

Title:	Duurzame OnderhoudsSystematiek (DOS) voor voorzieningen op slappe bodem – onderdeel zettingsprognose		
Author:	Ir. J. Maccabiani	Institute:	GeoDelft
Author:	Ir. R. Spruit	Institute:	Gemeentewerken Rotterdam
Author:	Dr. J.K. van Deen	Institute:	GeoDelft
juli 2003			
Number of pages	:	73	
Keywords (3-5)	:	Decision Support System, Settlement, Maintenance	
DC-Publication-number	:	DC1-412-10	
Institute Publication-number (optional)	:	CO 740102/32	
Report Type	:	<input checked="" type="checkbox"/>	Intermediary report or study
	:	<input type="checkbox"/>	Final projectreport
DUP-publication Type	:	<input type="checkbox"/>	DUP Standard
	:	<input type="checkbox"/>	DUP-Science

Acknowledgement

This research has been sponsored by the Dutch Government through the ICES-2. The research is part of the Research programme of Delft Cluster.

Conditions of (re-)use of this publication

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

Abstract

In many areas in the western part of the Netherlands, municipalities face high maintenance costs for the infrastructure they have to maintain. This is especially the case when the subsurface consists of highly compressible soils, like the thick peat deposits that are common to large parts in this area. At present, the maintenance strategies for underground and surface infrastructure are not integrated. Among the civil servants responsible for managing this infrastructure there is a growing need for a method to select the optimum maintenance strategy, in terms of cost and societal impact, that integrates the geotechnical properties of the subsurface and the requirements for the underground and surface infrastructure. In this research, three tools were developed that can be used in such an integrated approach. These tools can be used to plan and design the rehabilitation of existing infrastructure.

First, a planning tool is developed with which the moment of rehabilitation of infrastructure works due to excessive settlement can be determined. Using the Asaoka model, an accurate prediction can be made of the progress of settlement in time using only measurements of the settlement of the surface, thus providing an easy and cost-efficient solution.

Secondly, a tool is developed that allows the quantification of the accuracy of a given settlement prediction. An accurate settlement prediction is essential in selecting the optimum method of rehabilitation. By using a flow chart the information that is needed in a given situation to set up an accurate settlement prediction can be identified. A scoring system is set up next to the flow chart in such a way that the route taken in the flow chart determines the end score and thus the accuracy of the settlement prediction.

Finally a model is presented to select the most appropriate settlement theory. Four settlement theories which are commonly used in rehabilitation situations in The Netherlands were selected. An analysis of these theories showed that the Koppejan and the Isotach model are most useful in these situations, the NEN method and the Terzaghi method are not suitable for these situations. A table is presented which can be used to select the Koppejan or Isotach model to predict the time-settlement relation in a given rehabilitation project.

PROJECT NAME:	Duurzame Onderhoudsstrategie (DOS) voor voorzieningen op slappe bodem	PROJECT CODE:	04.01.02
BASEPROJECT NAME:	Management System for Sustainable (Re)Development of Urban Infrastructure	BASEPROJECT CODE:	04.01
THEME NAME:	Urban Infrastructure	THEME CODE:	04

Executive Summary

In many areas in the western part of the Netherlands, municipalities face high maintenance costs for the infrastructure they have to maintain. This is especially the case when the subsurface consists of highly compressible soils, like the thick peat deposits that are common to large parts this area. At present, the maintenance strategies for underground and surface infrastructure are not integrated. Among the civil servants responsible for managing this infrastructure there is a growing need for a method to select the optimum maintenance strategy, in terms of cost and societal impact, that integrates the geotechnical properties of the subsurface and the requirements for the underground and surface infrastructure. In this research, three tools were developed that can be used in such an integrated approach. These tools can be used to plan and design the rehabilitation of existing infrastructure.

First, a planning tool is developed with which the moment of rehabilitation of infrastructure works due to excessive settlement can be determined. The Koppejan, Isotach and Asaoka settlement model have been reviewed for use in this tool. The Koppejan and Isotach method are more accurate than the Asaoka model, but the latter is more congruous with the financial restrictions of the municipalities. Using the Asaoka model, an adequately accurate prediction can be made of the progress of settlement in time using only measurements of the settlement of the surface, thus providing an easy and cost-efficient solution. In this research it is shown that the Asaoka model can be used to predict settlements during consolidation, even in very creep-sensitive soils. As soon as the process of creep becomes dominant over the consolidation process, or the settlement rate is very slow, the Asaoka method stops functioning properly. This problem can be easily solved by using a linear extrapolation on a logarithmic timescale on the last measurements.

Secondly, a tool is developed that allows the quantification of the accuracy of a given settlement prediction. An accurate settlement prediction is essential in selecting the optimum method of rehabilitation. Based on other research at CROW and CUR, still in progress at the time of writing, a flow chart is created showing step by step all actions needed in setting up an accurate settlement prediction. By using this flow chart the information that is needed in a given situation can be identified. A scoring system is set up next to the flow chart in such a way that the route taken in the flow chart determines the end score and thus the accuracy of the settlement prediction. This method is called the 'DOS-method'. The difference with other methods, like the method in development at CROW at this moment, is that this method takes in account the specifics of the location. For a project at a site with a more homogeneous subsurface getting a high score will be easier than for a project at a site with a more heterogeneous subsurface. This DOS-method was validated in one case study. It is recommended to validate the method in at least four other projects.

Finally a model is presented to select the most appropriate settlement theory. Four settlement theories which are commonly used when raising infrastructure in The Netherlands were selected. These four models are the Terzaghi method, the NEN method, the Koppejan method and the Isotach method. An analysis of these theories showed that the Koppejan and the Isotach model are most useful in these situations, the NEN method and the Terzaghi method are not suitable for these situations. Theoretically the isotach model is more suitable for predicting the time-settlement behaviour after the raising of infrastructure, but there is a large experience base for the Koppejan model and a general inexperience with the Isotach model. This means that making a definite choice of one model over the other is not possible at this time. A table is presented which can be used to select the Koppejan or Isotach model to predict the time-settlement relation in a given infrastructure rehabilitation project.

PROJECT NAME:	Duurzame Onderhoudsstrategie (DOS) voor voorzieningen op slappe bodem	PROJECT CODE:	04.01.02
BASEPROJECT NAME:	Management System for Sustainable (Re)Development of Urban Infrastructure	BASEPROJECT CODE:	04.01
THEME NAME:	Urban Infrastructure	THEME CODE:	04

Theme Managementteam:

Name	Organisation
dr. F.H.M. Mischgofsky	GeoDelft
drs. M.H. Kiers	TNO Bouw
prof. dr. ir. Ch. Hendriks	TU Delft

Sub-Projectgroup: researchteam

During the execution of the project the research team included, in alphabetical order:

Name	Organisation
1 Dr. J.K. van Deen	GeoDelft
2 Ir. J. Maccabiani	GeoDelft
3 Ir. R. Spruit	Gemeentewerken Rotterdam
4 Ir. P. Teunissen	ARCADIS Ruimtelijke Ontwikkeling BV
5 Ing. H. Visser	ARCADIS Ruimtelijke Ontwikkeling BV

Sub-Projectgroup: feedback group

The realisation of this report involved, in alphabetical order:

Name	Organisation
1 Ir. I.A. Clarisse	Delft Municipality
2 Ing. R. Kervezee	Boskoop Municipality
3 Ir. H. Verhoeven	CROW

Table of contents

Duurzame OnderhoudsSystematiek (DOS) voor voorzieningen op slappe bodem – onderdeel zettingsprognose	1
Abstract	2
Executive Summary.....	4
1 Inleiding	8
2 Doelstelling.....	10
2.1 Definities en afbakening	10
2.2 Fasering onderzoek, doelstelling fase 1	11
3 Voorspellen van het rehabilitatiemoment van bestaande voorzieningen.....	12
3.1 Voorspellingsmodellen	12
3.2 De Asaoka methode	12
3.2.1 Hoe werkt de methode	13
3.2.2 Kruip en het Asaoka model.....	13
3.2.3 Beperkingen van de Asaoka methode.....	14
3.2.4 Te hanteren meetinterval en meetnauwkeurigheid	15
3.3 De LRS-methodiek	15
3.4 Aanbevolen methodiek	16
3.5 Aanbevelingen voor nader onderzoek.....	17
4 Methodiek voor de bepaling van de nauwkeurigheid van een zettingsprognose.....	18
4.1 Stroomschema Zettingsprognoses bij rehabilitatie	18
4.2 Uitwerking van het stroomschema.....	24
4.3 Nauwkeurigheid van zettingsprognoses: DOS-systematiek	35
4.3.1 Score bij het doorlopen van het hoofdstroomschema	36
4.3.2 Scores bij subschema (2) “Historisch vervormingsgedrag”	37
4.3.3 Scores bij subschema (4) “Bepalen grondopbouw” en (4.6) “Afleiden benodigde parameters”	38
4.4 Conclusies en aanbevelingen nauwkeurigheid zettingsprognosen.....	39
5 Keuze rekenmodel.....	40
5.1 Overzicht beschikbare modellen.....	40
5.2 Model Terzaghi / Keverling Buisman, methode Koppejan	41
5.3 Het a-b-c isotachen model	42
5.4 Conclusies en aanbevelingen keuze rekenmodel	44
6 Conclusies.....	45
7 Referenties	47
Bijlage 1. De Asaoka methode.....	50

Bijlage 2. Case “Beneluxtunnel”	54
Bijlage 3. CROW-systematiek “nauwkeurigheid zettingsprognose”	63
Bijlage 4. Case “de Enterij” in Boskoop	66
Bijlage 5. General Appendix: Delft Cluster Research Programme Information	72

List of Figures

Figuur 1: Grafische methode Asaoka (1978), $\rho_i = S_{i-1}$ en $\rho_{i+1} = S_i$	13
Figuur 3: Schematisatie van de situatie in MSettle 6.7	55
Figuur 4: Zakbaakfit van het Koppejan model aan zettingsmetingen met behulp van MSettle 6.7	58
Figuur 5: Zakbaakfit van het isotachenmodel aan zettingsmetingen met behulp van MSettle 6.7	59

List of Tables

Tabel 1: Doelen voor het grondonderzoek op basis van het doorlopen van detailstroomschema 2.	24
Tabel 2: Geotechnische parameters per geotechnisch ontwerpaspect	27
Tabel 3: Kwalitatieve bepaling type grondonderzoek, naar CUR (2003)	27
Tabel 4: Kwantitatieve bepaling type grondonderzoek, naar CUR (2003)	28
Tabel 5: Enkele “standaard” correlaties voor zettingsparameters	32
Tabel 6: Enkele niet-standaard correlaties en indicatieve waarden voor zettingsparameters.....	33
Tabel 7: Te behalen scores in het hoofdschema. Dit zijn de maximum scores per onderdeel, ongeacht het feit of in de subschema’s meer punten verdiend zijn.....	36
Tabel 8: Te behalen score bij gebruik van verschillende modellen.....	37
Tabel 9: Te behalen scores in subschema 2. De scores tussen haakjes zijn de maximaal te behalen scores als de kennisleemte wordt opgelost.	38
Tabel 10: Te behalen scores in subschemas 4 en 6. Symbool N is het aantal in 4.5 onderscheiden relevante grondlagen.....	38
Tabel 11: Grove waardering zettingsprognoses op basis van puntentelling DOS-systematiek.....	39
Tabel 13: Resultaten Asaoka methode: eindzetting, consolidatiecoëfficiënt en nauwkeurigheid.....	60
Tabel 14: Vergelijking tussen Asaoka methode en loglineaire extrapolatie in de kruiptak	61
Tabel 15: Gemodificeerde CROW scorekaart (CROW, 2003). Onderdeel ‘g1’ is toegevoegd.	64
Tabel 16: Puntentelling voor de gemodificeerde CROW scorekaart in Tabel 15 (meest rechtse kolom) in vergelijking tot de originele puntentelling (CROW, 2003).	65

1 Inleiding

De publieke ruimte met de binnenstedelijke infrastructuur van wegen, riolering, oever- en groenvoorzieningen vergt naast grote investeringen tevens een groot jaarlijks bedrag aan onderhoud. Met name in de gebieden met slechte bodemgesteldheid zijn deze jaarlijkse onderhoudskosten een grote last voor de betreffende gemeenten en lagere overheden. Grote uitgaven voor het beheer van de stedelijke infrastructuur op zettinggevoelige ondergrond leiden tot financiële problemen voor een aantal gemeenten in West-Nederland.

Een geïntegreerd systeem voor beheer van ondergrondse en bovengrondse infrastructuur ontbreekt momenteel. De instandhouding van openbare voorzieningen, zoals riolering, wegen, water en groen, op zeer slappe veenondergrond is een complexe zaak door het grote aantal technische aspecten dat daarbij een rol speelt in combinatie met de hoge kosten. De complexiteit wordt bepaald door de volgende technische aspecten:

- *zakking van de bodem.*
In tegenstelling tot de situatie op zandgronden speelt de kwaliteit van de wegverharding een ondergeschikte rol bij de bepaling van de onderhoudstrategie. Door grootschalige vervormingen onder het weglichaam ontstaan ontoelaatbare vervormingen in het wegdek en zakking van het wegdek. In de bestaande en gangbare onderhoudssystematiek van het Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek (CROW, 2001) is impliciet het uitgangspunt dat structurele achteruitgang van de kwaliteit van de deklaag of van de gehele verharding tot een bepaald niveau het moment van onderhoud aangeeft. In de situatie van slappe ondergrond krijgt de verharding in feite niet de kans te verouderen. Voor dit zakkingsgedomineerd onderhoud bestaan geen richtlijnen. Elke gemeente heeft een eigen werkwijze gebaseerd op (beperkte) ervaringen.
- *zettingshistorie.*
De ouderdom en vroegere ingrepen zoals aanleg van infrastructuur en ophogen zijn van grote invloed op toekomstig zettingsgedrag. De wijze waarop riolen en wegen zijn gefundeerd is sterk afhankelijk van het jaar van aanleg. De kernen van de oude steden gelegen in een veengebied zijn in de loop van de tijd meters opgehoogd en thans tamelijk zettingsongevoelig. Naoorlogse wijken zijn vaak partieel opgehoogd, dat wil zeggen wel de wegen en niet het openbare groen en de particuliere terreinen. Sinds de jaren zeventig zijn veel wijken integraal, dat wil zeggen in zijn geheel, opgehoogd.
- *extra zakking door drainerende riolering.*
Door zakkingsverschillen en aantasting van de riolering gaat het rioleringsstelsel meer en meer als drainagesysteem werken. De veroorzaakte toename van de drooglegging geeft een extra impuls aan het zakkingsproces.
- *geringe drooglegging.*
De geringe drooglegging stelt eisen aan het ontwerp en het gebruik van de wegconstructie. Daarbij speelt onder andere het probleem van de vorstschade aan wegen en andere voorzieningen. De geringe drooglegging betekent een (te) geringe worteldiepte voor bomen en heesters en geeft stormschade en wegzakken van bomen onder hun eigen gewicht. De geringe drooglegging biedt (te) weinig ruimte om kabels en leidingen te bergen onder de verharding.
- *verhouding oppervlak bebouwing versus openbare ruimte.*
Kernen op een slappe ondergrond zijn doorgaans compact bebouwd en hebben vaak een afwijkende areaalverdeling ten opzichte van kernen op een draagkrachtige ondergrond. In steden komt hoogbouw voor gecombineerd met veel groen, maar ook komt er compacte bebouwing voor met beperkte ruimte voor openbare voorzieningen.

- *waterberging*
Door geringe drooglegging en een relatief groot aandeel verhard oppervlak is een groot areaal aan water noodzakelijk ten behoeve van de waterberging. Het benodigd oppervlak varieert van 12 tot 20% in plaats van de veelal gehanteerde norm van 6 tot 8%. Door de geringe drooglegging zal in de praktijk de berging van water ook plaatsvinden op wegen en in groen.
- *eutroof milieu.*
De veenbodem is zeer voedzaam voor planten. Het groenonderhoud op een veenbodem is aanmerkelijk intensiever dan op een zand- of een kleibodem.
- *toename percentage verhard oppervlak*
Door de toenemende bebouwingsdichtheid neemt het percentage verhard oppervlak toe. Hierdoor treedt in inzigtgebieden daling van de freatische grondwaterstand op. Een dergelijke grondwaterstandsverlaging zorgt voor zettingen die een zeer sluipend karakter hebben. De grondwaterdaling (met de daaraan gerelateerde verhoging van de korrelspanning) treedt namelijk geleidelijk (soms gedurende enige jaren) op.

Als gevolg van de hierboven genoemde aspecten zitten beheerders van stedelijke infrastructuur op een slappe bodem met bepaalde problemen en vragen. In een brainstormsessie met een aantal gemeenten in juli 2002 is geïnventariseerd welke problemen als het meest dringend werden ervaren.

- Waarom breiden we uit in steeds slechtere gebieden? Als we een afwegingsmodel hadden waarin investerings- en vooral beheerkosten tevoren zichtbaar gemaakt worden zouden we beter gebaseerde beslissingen kunnen nemen en veel problemen kunnen voorkomen.
- Hoe kunnen we de hogere beheerkosten op slappe bodem aantoonbaar maken richting gemeentefonds en toezichthouders?
- Waarom vindt er bij aanleg geen optimalisatie met beheer plaats?
- Hoe kan bij rehabilitatie van infrastructuur optimaal worden afgestemd op beheer?
- Welke onderhoudsmaatregelen zijn in welke omstandigheden het meest effectief en rendabel?
- Hoe toon ik de effectiviteit en rendement van lichtgewicht maatregelen aan?
- Is voor de toepassing van duurzame maatregelen een afwegingsmodel beschikbaar?
- Welke maatregelen zijn optimaal bij het toepassen van duurzaam-veilig maatregelen en het voorkomen van trillingsoverlast?
- Hoe stel je prioriteiten in beheer bij een beperkt budget?
- Zijn lichtgewicht maatregelen zinvol?

Uit deze en vergelijkbare vragen komt de behoefte aan een afwegingsmodel naar voren waarin verschillende scenario's kunnen worden doorgerekend in hun kostenconsequenties gerelateerd aan de kwaliteit van de ondergrond.

2 Doelstelling

Een methodiek of strategie voor de instandhouding van de openbare voorzieningen op slappe ondergrond is thans niet voorhanden. Doel van het onderzoek is het ontwikkelen van instrumenten voor de instandhouding van wegen, riolering en groen waarmee:

1. Beter operationele keuzes kunnen worden gemaakt.
Welke criteria bepalen moment van onderhoud? Welke mate van drooglegging of ontwateringsdiepte is noodzakelijk en wat is het interventieniveau? Wat zijn de effecten van verschillende soorten maatregelen op het zettingsgedrag? Is een betere voorspelling van zettingen mogelijk? Wat is de invloed op bebouwing, kabels en leidingen, e.d.?
2. Beter beleidskeuzes kunnen worden gemaakt.
Welke maatregelen zijn voor de lange termijn duurzaam¹ en economisch het gunstigst? Een belangrijk facet bij de uitwerking is een optimalisatie cq. brede afweging binnen de stedelijke ruimte en binnen de reële financiële kaders.
3. Onderhoudsbudgetten beter kunnen worden onderhouden.
Hoe past de onderhoudsstrategie voor wegen op een zeer slappe bodem binnen de nieuwe CROW-normkostensystematiek? Indien niet, hoe kan deze passend worden gemaakt?

Het onderzoek resulteert in een reductie van beheerkosten, een stabilisatie van het kwaliteitsniveau, het voorkomen van kapitaalsvernietiging en het terugbrengen van overlast voor de bevolking bij het beheer, onderhoud en gebruik van de openbare voorzieningen op zeer slappe ondergrond. De te ontwikkelen instrumenten komen tot stand door gebruik te maken van bestaande kennis, door ontbrekende kennis aan te vullen en door een integrale aanpak van aanleg en onderhoud van bovengrondse en ondergrondse infrastructuur.

Het uitgangspunt van deze studie is dat voor onderhoud van wegen op zeer slappe ondergrond de zettingssnelheid maatgevend is boven de structurele toestand van de verhardingsconstructie. Voor een optimale keuze van de rehabilitatiemethode is dan slechts één zaak van essentieel belang: het tijd-zettingsverloop tot het moment dat de weg groot onderhoud behoeft op basis van de structurele toestand van de verhardingsconstructie. Het tijdstip waarop dit tijd-zettingsverloop voor elke ophoogvariant het interventieniveau snijdt is bepalend voor het berekenen van de meest economische oplossing. Doorgaans zal een oplossing in grond (ophogen met zand) het goedkoopst zijn te realiseren. Oplossingen met bijvoorbeeld lichte ophoogmaterialen zijn over het algemeen veel duurder in aanleg. In het algemeen zullen deze “lichte” constructies echter een langzamer tijd-zettingsverloop vertonen dan de “zwaardere” zandconstructies. Door de tijd tot de volgende rehabilitatie voor elke variant goed te kunnen voorspellen kan berekend worden welke oplossing uiteindelijk het goedkoopst is, inclusief de kosten als gevolg van bijvoorbeeld het niet beschikbaar zijn van de infrastructuur wegens onderhoud.

2.1 Definities en afbakening

- Het onderzoek betreft de beheersproblematiek die specifiek veroorzaakt wordt door ‘slechte grond’, waaronder verstaan wordt de aanwezigheid van een op natuurlijke wijze afgezet pakket sterk samendrukbare veen- en kleilagen van enige meters dikte. Ophogingen op baggerspecie, havenslib, (huis)afval, oude funderingen etc. vallen buiten dit onderzoek. Ook waterkerende (grond)constructies zoals dijken of bijzondere grondverbeteringsconstructies zoals gestabiliseerde grondkolommen vallen buiten dit onderzoek.
- Het onderzoek richt zich in eerste instantie op de instandhouding van bestaande wegen, rioleringen en groenvoorzieningen langs wegen. Rehabilitatie valt derhalve binnen het project, maar de aanleg van nieuwe infrastructuur niet.

¹ Onder duurzaam wordt hier verstaan: beheersbaar, kosteneffectief en een aanvaardbare overlast voor milieu en omgeving

- Bij de optimalisatie van maatregelen en berekening van beheerkosten wordt uitgegaan van bestaande inrichting en functionaliteit van infrastructuur. Voortijdige rehabilitaties als gevolg van functionele aanpassingen op maatschappelijke gronden worden niet meegenomen omdat deze gevolg zijn van beleidswijzigingen en uit dien hoofde veelal niet uit beheerbudgetten worden bekostigd.
- De instrumenten die voortvloeien uit het onderzoek zullen in de eerste plaats worden gebruikt door beheerders van openbare voorzieningen van voornamelijk kleine gemeenten. Er moet daarom rekening worden gehouden met het kleine budget dat deze gemeenten doorgaans te besteden hebben aan het beheer van openbare voorzieningen. Dit betekent dat in sommige situaties wellicht de voorkeur wordt gegeven aan een instrument dat voldoet boven een instrument dat ruim voldoet of iets beter is, maar die duurder is om te gebruiken. Concreet betekent dit bijvoorbeeld dat instrumenten waarvoor minder of geen grondonderzoek nodig is vaak de voorkeur zullen krijgen boven instrumenten die een uitgebreide terrein- en ondergrondverkenning behoeven, tenzij duidelijk aannemelijk gemaakt kan worden dat de investering in het grondonderzoek tot grote besparingen kan leiden.

Specifiek ten aanzien van zettingsprognoses geldt nog het volgende:

- Er wordt aandacht geschonken aan ophogingen van bestaande lijninfrastructuur. De onzekerheid in de zettingsprognose wordt mede bepaald door onzekerheden in het gedrag van de ondergrond onder de bestaande aardebaan en de eigenschappen (zoals de stijfheid) van de bestaande aardebaan. Ook is hier sprake van een tweedimensionale situatie, zodat de onzekerheid in de zettingsprognose mede bepaald wordt door de berekeningsmodellen voor de spanningsspreiding. In dit onderzoek zal echter niet verder ingegaan worden op de verschillende modellen voor spanningsspreiding.
- De ‘eindzetting’ bestaat feitelijk niet; het kruipproces gaat eeuwig door. Met de term ‘eindzetting’ wordt de zetting op 10000 dagen (ca 30 jaar) na aanbrengen van de belasting aangeduid.
- Het zettingsgedrag als gevolg van klink van het ophoogmateriaal zelf valt buiten deze beschouwing. De aanname bij ophogingen in zand is dat dit zand goed verdicht is aangebracht. Indien wordt opgehoogd met samendrukbare grond dan dient klink wel in beschouwing genomen te worden.

2.2 Fasering onderzoek, doelstelling fase 1

Het onderzoek wordt gefaseerd uitgevoerd. In dit rapport wordt verslag gedaan van fase 1. Voor een vergelijk tussen de duurzaamheid van de verschillende rehabilitatievarianten is het belangrijk de onderhoudscyclus te kunnen inschatten. Op slappe grond is de onderhoudscyclus van de op te hogen infrastructuur voor een groot deel afhankelijk van het tijd-zettingsverloop. Voor een vergelijk van evenwichtsconstructies met lichtgewicht- of traditionele constructies is een nauwkeurige voorspelling van het tijd-zettingsverloop dan ook onontbeerlijk.

De centrale vraag in deze fase van het onderzoek is: “Hoe kan men het tijd-zettingsverloop voldoende nauwkeurig voorspellen voor bepaling van een duurzame onderhoudsstrategie voor voorzieningen op slappe bodem”. Het doel van fase 1 is om praktische beheersinstrumenten te ontwikkelen waarmee:

1. Het moment voorspeld kan worden wanneer bestaande voorzieningen op slappe bodem gerehabiliteerd moeten gaan worden;
2. De nauwkeurigheid van een zettingsprognose ten behoeve van rehabilitatie van voorzieningen op slappe bodem kan worden ingeschat;
3. Het meest geschikte zettingsmodel om de zettingsprognose (zie punt 2) mee op te stellen kan worden gekozen.

In hoofdstukken 3, 4 en 5 worden deze punten uitgewerkt.

3 Voorspellen van het rehabilitatiemoment van bestaande voorzieningen

Voor openbare voorzieningen is het moment waarop gerehabiliteerd zal moeten worden vaak wel bekend. Vaak is dit moment gedefinieerd als een droogleggingseis of als een hoogteligging. Af en toe worden de voorzieningen ingemeten en wordt gecontroleerd of nog aan de droogleggingseis wordt voldaan. Als dit niet het geval is dan wordt het plan voor rehabilitatie opgesteld. Deze ad-hoc aanpak bemoeilijkt een gedegen (meerjaren)planning.

In dit onderzoek wordt een instrument aangereikt waarmee deze planning beter tot stand kan komen.

3.1 Voorspellingsmodellen

De planning van rehabilitatiewerkzaamheden (en dus de reservering van middelen voor de meest kritische gedeelten) vraagt een nauwkeurige voorspelling van het tijd-zettingsgedrag. Er zijn verschillende modellen waarmee het tijd-zettingsverloop voor een gegeven situatie voorspeld kan worden. Het (in Nederland) meest gebruikte model is het Koppejan model, maar er zijn ook andere modellen zoals het meer recent ontwikkelde isotachenmodel. De theorie achter deze modellen is verder uitgewerkt in hoofdstuk 5. Dit zijn vrij uitgebreide modellen die het zettingsgedrag van grond vrij precies kunnen voorspellen. Deze modellen kunnen ook nog geïjkt worden op monitoringsgegevens, waardoor de nauwkeurigheid nog kan worden vergroot (zie voor een voorbeeld Adel, 2002). Voor deze uitgebreide modellen is echter ook een uitgebreide gegevensset over de situatie nodig, waardoor het maken van zo'n nauwkeurige zettingsvoorspelling een aanzienlijke (ook financiële) inspanning vraagt. Voor veel gemeenten met bestaande voorzieningen op slappe bodem zal het gebruik van deze methoden voor het voorspellen van het rehabilitatiemoment te kostbaar zijn.

Een model dat meer bij de problematiek en middelen van beheerders aansluit is de methode Asaoka. Op basis van enkele metingen van de zakking van de bovenkant van de ophoging (dus bijvoorbeeld van het asfalt) kan een tijd-zettingsverloop berekend worden. In paragraaf 3.2 wordt de methode Asaoka theoretisch uiteengezet en worden voordelen en beperkingen behandeld. Ook wordt de toepasbaarheid van de methode voor het voorspellen van het rehabilitatiemoment van bestaande voorzieningen besproken.

Een andere op metingen gebaseerde methode is de LRS-methodiek. In paragraaf 3.3 wordt deze methodiek en de relatie met de Asaoka methode besproken.

3.2 De Asaoka methode

De Asaoka methode is een manier om op een eenvoudige wijze het tijd-zettingsverloop te bepalen met een minimum aan vereiste randvoorwaarden. Om de traditionele zettingsvergelijkingen op te lossen, is het normaal gesproken nodig om de randvoorwaarden te kennen. Dit betekent dat de initiële verdeling van de wateroverspanning, de afstromingslengte, de uiteindelijke verticale spanningen en de consolidatiecoëfficiënt bekend moeten zijn voor de analyse (Asaoka, 1978). Het bepalen van deze randvoorwaarden vraagt een grote inspanning. Met de methode Asaoka is de benodigde inspanning aanzienlijk kleiner.

De Asaoka methode is gebaseerd op de consolidatietheorie van Terzaghi. Inmiddels zijn er zettingsmodellen beschikbaar, zoals de methode Koppejan en het isotachenmodel, die het tijd-zettingsverloop nauwkeuriger beschrijven. Toch kan de Asaoka methode een belangrijke meerwaarde bieden bij het voorspellen van het interventiemoment door zijn eenvoud en vooral ook door het feit dat er geen andere gegevens nodig zijn dan zettingsmetingen op geregelde intervallen; het bepalen van grondparameters en gedetailleerde kennis van de – vaak niet goed bekende – belastingsgeschiedenis is niet nodig.

3.2.1 Hoe werkt de methode

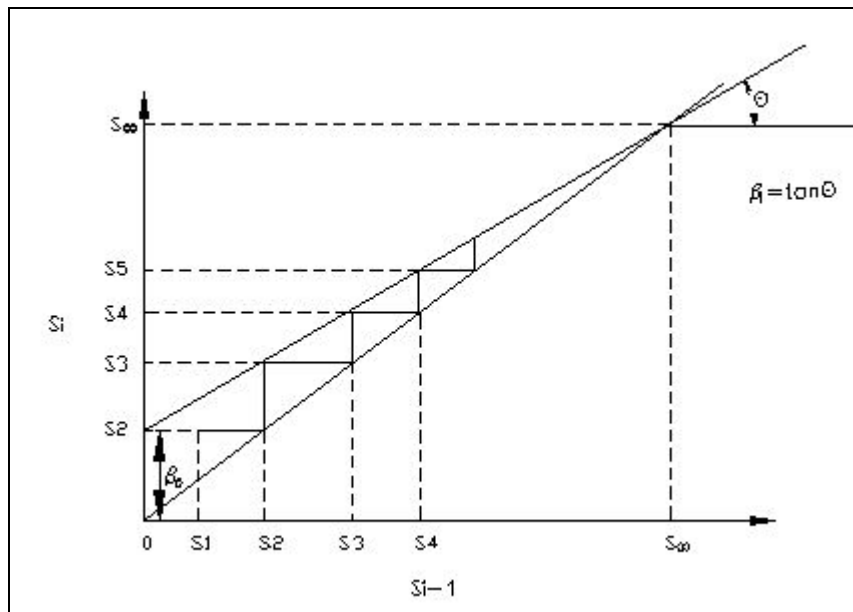
De theoretische afleiding van de methode Asaoka is te vinden in bijlage 1. Belangrijk is te weten dat de zetting ρ_j op tijdstip t_j berekend kan worden met de zetting op tijdstip t_{j-1} (ρ_{j-1}) en twee factoren β_0 en β_1 , zie vergelijking [3.1].

$$r_j = b_0 + b_1 r_{j-1}$$

[3.1]

Dus door de coëfficiënten β_0 en β_1 te bepalen kan de eindzetting bepaald worden en de zetting op elk willekeurig tijdstip t_j . De methode Asaoka gaat er van uit, dat de coëfficiënten β_0 en β_1 constant zijn, zodat een plot van zettingsmetingen ρ_{j-1} tegen ρ_j punten op een rechte lijn opleveren. Deze lijn wordt de Asaoka-lijn genoemd.

De kracht van de methode Asaoka is gelegen in het feit dat de Asaoka lijn eenvoudig bepaald kan worden uit metingen van de zetting. De zetting moet hiervoor met vaste tijdsintervallen worden gemeten. De grafische methode Asaoka is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Grafische methode Asaoka (1978), $r_i = S_{i-1}$ en $r_{i+1} = S_i$

Het snijpunt van de Asaoka-lijn met de $\rho_{j-1} = 0$ as levert de coëfficiënt β_0 . De richtingscoëfficiënt van de lijn is β_1 . Het snijpunt van de Asaoka-lijn met de lijn $\rho_{j-1} = \rho_j$ is de eindzetting ρ_f .

Voor de methode zijn dus maar drie observaties nodig. De bepaling van de Asaoka lijn wordt doorgaans echter nauwkeuriger als meer punten beschouwd worden: eventuele meeton nauwkeurigheden worden dan uitgemiddeld.

3.2.2 Kruip en het Asaoka model

Een karakteristiek van slappe grond is, dat naast consolidatie ook kruip oftewel seculaire zetting een belangrijke invloed heeft op het tijd-zettingsverloop. Dykstra & Joling (2001) laten zien dat de methode Asaoka een andere formulering van de theorie van Terzaghi is. In deze theorie is geen kruipcomponent aanwezig. Om van nut te zijn als beheersinstrument voor voorzieningen op slappe bodem moet de methode ook functioneren in kruipgevoelige gronden.

Doordat er geen kruipcomponent in de methode Asaoka is opgenomen geeft dit model theoretisch een te geringe schatting van de hoeveelheid optredende zetting. (Doordat de kruip instantaan na ophogen een aanvang neemt, wordt deze gedeeltelijk voorspeld door de methode als ware het zetting door consolidatie). Asaoka (1978) laat zien dat zijn methode wel uitgebreid kan worden met een kruipcomponent, door aparte β_0 en β_1 parameters in te voeren voor modellering van het kruipproces. Hij geeft hierbij geen methode om deze nieuwe parameters op basis van metingen te bepalen. Het op basis van alleen zettingsmetingen kunnen voorspellen van het verdere tijd-zettingsverloop is nu juist de kracht van de Asaoka methode. De uitbreiding van de methode met deze nieuwe parameters wordt daarom afgeraden.

Als bekend is hoe dik het zettingsgevoelige pakket is, dan kan met de Asaoka methode ook de equivalente consolidatiecoëfficiënt $c_{v,eq}$ worden bepaald (de berekening van $c_{v,eq}$ met de Asaoka methode is weergegeven in Bijlage 1.3). Dykstra & Joling (2001) geven aan dat ongeveer dezelfde consolidatiecoëfficiënt $c_{v,eq}$ gevonden wordt bij het narekenen van een Koppejan-ontwerpberekening met de Asaoka methode. Hierbij wordt aangegeven dat de invloed van kruip dus gering lijkt te zijn. De orde van grootte van de zettingen waarop deze uitspraak is gebaseerd is zo'n 1,5 meter. Omdat de zettingen die optreden bij zeer slappe ondergrond een orde van grootte van 5 meter kunnen bereiken – afhankelijk van de dikte van het slappe lagenpakket, de grootte van de aangebrachte belasting etc. – is besloten om voor een case de invloed van kruip op de voorspelde tijd-zettingsverloop van het Asaoka model te bepalen. Deze case, “Beneluxtunnel”, is uitgewerkt in Bijlage 2. In de case “Beneluxtunnel” is gebruik gemaakt van zettingsversnellende maatregelen. Hierdoor hoefde de methode Asaoka slechts 200 tot 300 dagen vooruit te voorspellen. Desondanks komt de voorspelde zetting bij het eind van de consolidatie zeer goed overeen met de gemeten zettingen. Dit versterkt het idee dat de Asaoka methode voldoende nauwkeurig is in de consolidatietak van het tijd-zettingsverloop. In het door kruip gedomineerde gedeelte van het tijd-zettingsverloop werkt de methode Asaoka niet goed. In de case is aangetoond dat het zettingsverloop dan beter op logaritmische tijdsschaal gelineariseerd kan worden.

3.2.3 Beperkingen van de Asaoka methode

De methode Asaoka kent een aantal beperkingen. Deze zullen hier kort worden besproken.

Ten eerste kan het tijd-zettingsverloop pas nauwkeurig geschat worden als de consolidatiegraad groter is dan 0,5, dat wil zeggen dat de eerste helft van de consolidatietijd erop zit. In de praktijk blijkt dat voor een nauwkeurige voorspelling bij toepassing van verticale drainage de observaties moeten doorlopen tot een consolidatiegraad van ten minste 0,8 (Dykstra & Joling, 2001). Gezien het feit dat er bij ophoging van voorzieningen op slappe bodem slechts zelden verticale drainage wordt toegepast hoeft dit geen probleem te zijn. Het bepalen van de consolidatiegraad op een gegeven tijdstip kan gedaan worden door aan te nemen dat de door de methode Asaoka voorspelde eindzetting correct is en vervolgens de gemeten zetting te delen door deze eindzetting.

Ook kan de methode niet worden gebruikt als de consolidatie voltooid is en er alleen nog kruip optreedt. Als er alleen kruip optreedt, dan geldt de wet van Terzaghi niet meer en kan Asaoka daardoor ook het tijd-zettingsgedrag niet goed beschrijven. Dit is echter op te lossen door middel van een linearisering van het tijd-zettingsgedrag op basis van (minimaal) de laatste twee metingen. Bijkomend voordeel is dat dit de analyse sterk vereenvoudigt. Het moment waarop de omslag van Asaoka naar linearisering plaatsvindt is moeilijk te bepalen. Om dit omslagpunt te vinden op basis van metingen moeten een aantal metingen verricht worden voorbij het omslagpunt. Bij een meetinterval van 6 maanden (zie paragraaf 3.2.4) betekent dit al snel dat er nog twee jaar ontbreekt met de Asaoka methode gewerkt wordt.

Als er zeer weinig kruip optreedt of als de tijd tussen twee meetpunten zeer klein is dan is de hoeveelheid zetting tussen twee opeenvolgende meetpunten ook gering. Indien slechts drie meetpunten gebruikt worden in de methode Asaoka (het minimum aantal) dan blijkt de methode

gevoelig voor meeton nauwkeurigheden. Uit een eerste verkenning in de testcase “Beneluxtunnel”, zie Bijlage 2, komt naar voren dat de methode Asaoka mogelijk onbetrouwbaar wordt als het zettingsverschil tussen twee meetpunten, en daarmee de zettingssnelheid, relatief klein is. Indien het op basis van de zettingsmetingen aannemelijk is dat het einde van de consolidatie is bereikt dan kan overgegaan worden op een linearisering op logaritmische tijdschaal. Indien dit niet zeker is dan dienen meer meetpunten gebruikt worden bij de bepaling van de Asaoka lijn, zodat het effect van meeton nauwkeurigheden wordt uitgemiddeld.

3.2.4 Te hanteren meetinterval en meetnauwkeurigheid

Een belangrijke vrijheidsgraad bij de Asaoka methode is het te hanteren meetinterval. Voor de methode Asaoka is het noodzakelijk een vast meetinterval aan te houden in de berekening. Volgens Asaoka (1978) geldt: hoe groter het meetinterval, hoe betrouwbaarder de voorspelling bij weinig meetpunten. Asaoka gebruikte zelf meetintervallen van 10 weken tot 3 maanden voor ophogingen op slappe grond zonder zettingsversnellende maatregelen. Dykstra & Joling (2001) gebruiken een interval van 20 dagen bij toepassing van verticale drains.

Uit de resultaten van de case “Beneluxtunnel” blijkt, dat het meetinterval niet van grote invloed is op de uiteindelijke resultaten. Een groter meetinterval levert over het algemeen wel een iets grotere nauwkeurigheid, maar het nadeel hiervan is dat langer gewacht moet worden voordat een voorspelling van het tijd-zettingsverloop gemaakt kan worden. De zettingsmetingen moeten wel op een vast tijdsinterval gedaan worden. Dykstra & Joling (2001) hebben aangetoond dat de invloed van een dag te vroeg of te laat inmeten bij een meetinterval van 20 dagen verwaarloosbaar is. Bij de uitwerking van de case “Beneluxtunnel” bleek dat een verschil van circa 4 dagen bij een meetinterval van 50 dagen geen noemenswaardig verschil maakt.

Aangezien bij bestaande voorzieningen op slappe bodem doorgaans geen zettingsversnellende maatregelen gebruikt zijn, wordt aangeraden de zetting van de voorzieningen tenminste elke zes maanden in te meten. Op deze manier komen voldoende metingen voorhanden om het effect van eventuele meeton nauwkeurigheden te verminderen. Met deze betrekkelijk lage inspanning kunnen halfjaarlijkse nauwkeurige voorspellingen gemaakt worden waarop de rehabilitatieplanning aangepast kan worden.

Zoals gezegd zijn voor de methode Asaoka zettingsmetingen nodig die met een vaste regelmaat worden gemeten. De zettingsmetingen moeten derhalve goed worden ingepland, met een speling van circa één week bij een meetinterval van zes maanden. Indien verwacht wordt dat dit tot grote problemen leidt, dan kan ook gekozen worden om de zettingmetingen twee maal zo vaak te doen (maar dus met een speling van 2 à 3 weken), zodat het tijd-zettingsverloop goed geïnterpoleerd kan worden om alsnog zettingen op de juiste dagen te kunnen achterhalen.

Ook moeten de metingen met grote nauwkeurigheid worden gedaan met een maximum onnauwkeurigheid van +/- enkele millimeters. In de praktijk betekent dit dat een voldoende afgeschermd meetbout ingemeten zal moeten worden met een waterpasinstrument, dus niet met een (D)GPS systeem. De onnauwkeurigheid van (D)GPS systemen is nog altijd in de orde van 1 a 2 cm. of groter.

3.3 De LRS-methodiek

De LRS-methodiek is toegepast bij het bepalen van de restzettingen bij het bouwrijp maken van een terrein van 30.000 m² op zeer slappe ondergrond (Bisschop et al., 2003). De LRS-methodiek is in feite een verfijning van de Asaoka methode met linearisering van de kruiptak op logaritmische tijdschaal. In dit project is met de Asaoka methode een voorspelling van het tijd-zettingsverloop gemaakt. Aan de hand hiervan is de LRS-waarde (Logarithmic Rate of Settlement, de logaritmische

zettingssnelheid) bepaald. Door deze LRS_{cons} te combineren met de LRS waarde berekend op basis van de metingen, LRS_{meting} , kan de LRS waarde voor kruip, LRS_{kruip} , gevonden worden:

$$LRS_{kruip} = LRS_{meting} - LRS_{cons}$$

[3.2]

Dit is een theoretische manier om nog tijdens de consolidatiefase de eind- en restzettingen te kunnen voorspellen. Echter uit de testcase “Beneluxtunnel” (zie hoofdstuk Bijlage 2) is gebleken dat de methode Asaoka tot het einde van de consolidatie de kruip juist vrij goed voorspelt. De verwachting is dan ook dat de beschreven LRS systematiek (Bisschop et al, 2003) geen significant betere resultaten zal geven tijdens consolidatie dan alleen de methode Asaoka, terwijl de LRS-methodiek wel bewerkelijker is.

3.4 Aanbevolen methodiek

Op basis van het bovenstaande kan de volgende methodiek worden aanbevolen om voor bestaande voorzieningen op slappe bodem te voorspellen wanneer gerehabiliteerd moet worden.

1. De voorzieningen worden eens per 6 maanden, met een marge van een week, nauwkeurig ingemeten. Indien de metingen niet binnen deze periode ingemeten kunnen worden, dienen ze eens per drie maanden uitgevoerd te worden, met een marge van een maand, maar in ieder geval 4 metingen per jaar.
2. Zodra uit metingen aannemelijk is dat de consolidatiegraad U groter is dan 0.5 (zie paragraaf 3.2.3), kan met het Asaoka model een voorspelling worden gemaakt van het toekomstige tijd-zettingsverloop. De metingen bij een consolidatiegraad kleiner dan 0.5 mogen hierbij niet gebruikt worden.
3. Als het consolidatieproces nagenoeg voorbij is en het kruipproces domineert, dan mag het Asaoka model niet meer gebruikt worden en moet vanuit de laatste metingen worden gelineariseerd op logaritmische tijdschaal. Voor het bepalen van dit moment kunnen de volgende methoden gebruikt worden:
 - Zodra blijkt dat de zettingsverschillen klein worden, bijvoorbeeld kleiner dan 2 cm., en uit een plot van de gemeten zettingen in de tijd is op te maken dat het consolidatieproces (nagenoeg) voorbij is. Dit zal doorgaans zeer moeilijk te bepalen zijn;
 - Na een typische hydrodynamische periode voor het gebied. Deze kan bepaald zijn bij eerder uitgevoerde detailberekeningen. Een indicatieve waarde van de hydrodynamische periode, voor ophogingen op een tien meter dik pakket veen, is 10 jaar. Na deze tien jaar kan het tijd-zettingsverloop dan gelineariseerd worden op logaritmische tijdschaal.

Het aantal in te meten locaties is afhankelijk van de geologie, de aanlegmethode en de ouderdom van de voorziening. Gelijksortige voorzieningen met identieke historie op een zelfde ondergrond kunnen met weinig meetpunten worden gevolgd. Bijvoorbeeld op hetzelfde moment op maagdelijk terrein aangelegde weginfrastructuur voor een woonwijk kan worden verdeeld in enkele geologisch identieke zones. Door het inmeten van enkele strategisch gekozen maatgevende locaties kan zo het tijd-zettingsverloop van deze zones worden gevolgd.

Belangrijk is te bedenken wat het alternatief is voor toepassen van de methode Asaoka. Er zijn geen (wezenlijk verschillende) methoden die met een even geringe inspanning een even nauwkeurige voorspelling van het tijd-zettingsverloop kunnen geven. Het alternatief voor toepassing van de Asaoka methode is dan om de metingen te fitten aan meer nauwkeurige zettingsmodellen zoals de methode Koppejan of het isotachenmodel, bijvoorbeeld door gebruik te maken van de “fit for settlement plate” optie in de MSettle software van Delft GeoSystems. De eigenschappen van de meer nauwkeurige modellen zijn als volgt:

1. Er wordt minimaal een zelfde mate van nauwkeurigheid bereikt met de meer geavanceerde modellen ten opzichte van de methode Asaoka;
2. Meer geavanceerde modellen, zoals het Koppejan model maar vooral het Isotachen model, kunnen beter met kruip omgaan dan de methode Asaoka;
3. Er is een directe terugkoppeling mogelijk tussen de tijd-zettingsvoorspellingen en de gemaakte ontwerpberekeningen, zodat ervaringen met het eerste gebruikt kunnen worden bij latere ontwerpen in hetzelfde gebied;
4. Er is een gedetailleerde kennis nodig van de belastingsgeschiedenis en er moet een redelijke beginschatting van de algemene grondparameters en de lokale grondopbouw zijn. Dit is bij de methode Asaoka niet nodig.

In de meeste gevallen zal punt 4 zwaarder wegen bij het bepalen van het interventiemoment dan de eerste 3 punten; het verzamelen van de benodigde kennis vergt een aanzienlijke inspanning. Daarmee is de methode Asaoka voor deze toepassing te verkiezen boven de meer nauwkeurige methoden.

3.5 Aanbevelingen voor nader onderzoek

De Asaoka methode is in zijn huidige vorm al een krachtig hulpmiddel. De kracht van de methode zou echter inzichtelijker zijn als over een aantal onderwerpen meer bekend zou zijn. Een aanbeveling is om:

1. Meer inzicht te krijgen in de nauwkeurigheid van de methode voor het doel van bepalen van het interventiemoment door het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses, waarin het effect van de gekozen grootte van het meetinterval en de invloed van kruip nader bestudeerd wordt.
2. Er is op dit moment geen goede manier beschikbaar voor de bepaling van het moment waarop het consolidatieproces zodanig ver gevorderd is, dat het Asaoka model niet meer geldig is en het tijd-zettingsverloop gelineariseerd moet worden. Het is wenselijk om nader te onderzoeken of er een eenvoudige maar nauwkeurige manier is om dit omslagpunt te bepalen.
3. Een aandachtspunt is het moment van omschakeling van het Asaoka model op een loglineair model op basis van zettingsmetingen. Wellicht kan een indicatie van dit moment, oftewel van de hydrodynamische periode, gegeven worden op basis van indicatieve hydrodynamische perioden van enkele standaard boorprofielen.

4 Methodiek voor de bepaling van de nauwkeurigheid van een zettingsprognose

Het voornaamste doel van het project is het geven van een aanzet tot een afwegingsmodel voor het kiezen van de meest duurzame rehabilitatiemethode voor voorzieningen op slappe bodem. Niet-traditionele methoden, dat wil zeggen rehabilitatiemethoden anders dan ophogen in zand, zullen doorgaans een grotere investering vergen. Of een niet-traditionele methode uiteindelijk toch een meer duurzame keuze is, is dan direct afhankelijk van het verschil tussen de verwachte levensduur (inclusief de opgetreden zetting) van de traditionele ophoging in zand en die van de niet-traditionele methode.

Op slappe bodem is de zetting vaak maatgevend boven de slijtage de verhardingsconstructie. De levensduur van de traditioneel opgehoogde voorziening is dan direct afhankelijk van het verwachte tijd-zettingsverloop. Het opstellen van een nauwkeurige zettingsprognose is daarmee een essentieel onderdeel van ieder afwegingsmodel voor de keuze van een duurzame rehabilitatiemethode voor voorzieningen op slappe bodem. Dit is echter geen eenvoudige zaak. Er blijkt in de praktijk dat er een grote onzekerheidsmarge in zettingsprognoses aanwezig is. In de sector wordt vaak een percentage van 30% aangeduid als onzekerheidsmarges, al is de bron van dat getal onduidelijk. In fase 1 is een model opgesteld waarmee ingeschat kan worden hoe nauwkeurig een zettingsprognose is bij gebruikmaking van bepaalde informatie en hoe de nauwkeurigheid van zo een prognose vergroot kan worden.

In het CROW onderzoek 'Gevoeligheidsanalyse zettingsprognose' (CROW, 2003) is getracht aan te geven in welke aspecten van een zettingsprognose de onzekerheden en onnauwkeurigheden voornamelijk zitten. Door middel van een stroomschema is aangegeven welke stappen doorlopen worden bij het maken van een zettingsprognose en welke onnauwkeurigheden in die stappen geïntroduceerd kunnen worden. Daarnaast is een methodiek beschreven om kwantitatief te kunnen inschatten hoe sterk het doen van een extra inspanning om een bepaalde onzekerheid of onnauwkeurigheid te verkleinen de nauwkeurigheid van de uiteindelijke zettingsvoorspelling ten goede komt. Dit is gedaan voor ophogingen op maagdelijk terrein en voor aanaarding van bestaande wegen. Dit CROW onderzoek is op dit moment nog in uitvoering en er stond de auteurs daarom slechts een conceptversie ter beschikking.

Gezien de specifieke problemen en beschikbare kennis bij rehabilitatie van voorzieningen op slappe bodem is besloten de tussenresultaten van het genoemde CROW onderzoek (CROW, 2003) als uitgangspunt te nemen en deze uit te breiden. Dit heeft geleid tot twee producten:

- Een stroomschema voor het maken van een zettingsprognose voor rehabilitatie van voorzieningen op slappe bodem is opgesteld, gebaseerd op onderzoek van het CROW (CROW, 2003) en van het Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, de CUR (CUR, 2003);
- Een nieuwe kwantitatieve waarderingsmethode gebaseerd op het ontwikkelde stroomschema, waarin ook oorzaak en gevolg beter te scheiden zijn, is ontwikkeld.

Dit geeft beheerders van voorzieningen op slappe bodem handvatten om in te kunnen schatten welke inspanningen nodig zijn om een bepaalde nauwkeurigheid te behalen. Tevens is het een instrument voor geotechnisch adviseurs, een verantwoording van de opgestelde prognose. Voorzichtigheid dient betracht te worden bij de toepassing van dit instrument, daar validatie slechts op zeer beperkte schaal heeft plaatsgevonden.

4.1 Stroomschema Zettingsprognoses bij rehabilitatie

Zoals reeds vastgesteld in de inleiding van dit hoofdstuk is binnen het onderzoek 'Gevoeligheidsanalyse zettingsprognose' van het CROW (CROW, 2003) een stroomschema opgesteld waarin de stappen staan die doorlopen dienen te worden bij het opstellen van een

zettingsprognose. Dit stroomschema is als uitgangspunt gebruikt maar aangepast en uitgebreid, zodat het ook voor rehabilitatiesituaties voor voorzieningen op slappe bodem gebruikt kan worden. Ook is aangesloten op lopend CUR onderzoek 'Van niks naar grondparametermatrix' (CUR, 2003) voor het deel dat over het bepalen van grondparametersets gaat, onderdeel 4 in het stroomschema. Door aan te sluiten op deze beide (op het moment van schrijven nog lopende) onderzoeken is optimaal gebruik gemaakt van de state-of-the-art kennis in de sector.

Als in het vervolg van de tekst 'het stroomschema' wordt genoemd dan wordt verwezen naar het in dit onderzoek ontwikkelde stroomschema. In de praktijk kan het voorkomen dat sommige sporen in het stroomschema simultaan belopen worden of dat de volgorde van sommige stappen omgekeerd wordt. Getracht is echter om een zo volledig mogelijk beeld te geven van de (volgorde van de) stappen die nodig zijn om een nauwkeurige zettingsvoorspelling te maken. De afzonderlijke stappen in het stroomschema zijn nader uitgewerkt in paragraaf 4.2.

4.2 Uitwerking van het stroomschema

Navolgend zijn de stappen uit het stroomschema, waar nodig geacht, verder uitgewerkt en verduidelijkt. De stappen in het stroomschema zijn genummerd, hiernaar is in de uitwerking verwezen door de nummers *schuingedrukt* weer te geven, zoals (1) of (2.17).

(1) Definiëren project

Hieronder valt in ieder geval de definitie van het Programma van Eisen, waaronder:

- de gewenste aanleghoogte
- de droogleggingseis, het interventieniveau
- de geometrie van de gewenste constructie

Dit stroomschema is voor afzonderlijke projecten te gebruiken en binnen het keuzemodel dat binnen dit DOS project wordt ontwikkeld. In het laatste geval is het project op te vatten als een van de mogelijke rehabilitatiemethoden. De hier genoemde informatie moet de randvoorwaarden bevatten voor het maken van de afweging welke rehabilitatiemethode binnen een gestelde tijdsspanne de meest duurzame oplossing is.

(2) Historisch vervormingsgedrag

Bij het maken van een zettingsprognose voor rehabilitatie spelen een aantal lastige problemen, zoals een vaak slecht bekende belastinggeschiedenis. Toch heeft het feit dat er al een weg ligt ook een belangrijk voordeel; uit de status van de bestaande weg vergeleken met de situatie bij aanleg kan waardevolle informatie worden verkregen over de grond juist onder de weg. Hiermee wordt de ervaringskennis van de bestaande weg expliciet gemaakt en op een optimale manier ingezet om de nauwkeurigheid van de zettingsprognose te vergroten bij een zo klein mogelijke inspanning. Welke informatie verkregen kan worden en welke kennisleemtes er nog zijn vloeit voort uit het detailstroomschema van punt (2) van het stroomschema. Daarmee vloeit ook de inhoud van punt (3) uit het stroomschema voort uit punt (2).

Het doorlopen van stroomschema 2 kan worden vertaald naar de doelen van punt (3) *Kennisleemten*. Hoe dit gedaan kan worden is samengevat in de onderstaande tabel:

a.g.v. bereiken onderdeel	doel in grondonderzoek	prioriteit van doel binnen grond-onderzoek
2.4	heterogeniteit horizontaal	hoog
2.5	heterogeniteit horizontaal	laag
2.6	heterogeniteit horizontaal	laag – middel
	afhankelijk van uitgangspunten	laag – hoog
2.9	punten van 2.10	laag
2.10	heterogeniteit vertikaal	hoog
	vervormingsparameters	hoog
	waterspanningen	hoog
	volumegewichten	hoog
2.11	veranderde uitgangspunten	hoog
2.16	onbekende onderdelen	hoog
2.17	(indien onnauwkeurige berekening niet acceptabel) onbekende en slecht bekende onderdelen	middel – hoog
2.20	p_g en/of waterspanningen bepalen	hoog

Tabel 1: Doelen voor het grondonderzoek op basis van het doorlopen van detailstroomschema 2.

Het detailstroomschema van punt 2 is opgedeeld in drie delen, namelijk punt (2.1) t/m (2.6), punt (2.7) t/m (2.11), (2.12) t/m (2.20). In deze drie delen wordt steeds vanuit een aparte vraag over het historische vervormingsgedrag de aanwezige kennis gemobiliseerd. Deze drie delen worden hieronder elk nader uitgewerkt.

(2.1) t/m (2.6): Is bestaande weg differentiëel gezakt?

Het al dan niet optreden van differentiële zettingen is een goede graadmeter voor de heterogeniteit van de ondergrond, dat wil zeggen de horizontale en verticale verdeling van grondeigenschappen. Bij differentiële zettingen moet worden gedacht aan kuilen in het wegdek, glooiing van het wegdek, in het algemeen hoogteverschillen waarbij de aanleg op gelijke hoogte was. Om dit te kunnen beoordelen is het belangrijk de onderhoudsgeschiedenis van de weg te kennen sinds de aanleg. Immers, door regelmatig onderhoud kan de ernst van de differentiële zettingen versluierd worden.

Als de weg niet differentiëel is gezakt dan zal de grondopbouw doorgaans homogeen zijn. De schematisatie van de ondergrond die bij de vorige aanleg is gebruikt voldoet. Dit is echter niet het geval als aannemelijk is, dat bij de vorige aanleg rekening is gehouden met de heterogeniteit van de ondergrond, bijvoorbeeld door verschil in aangebrachte (voor)belasting. Indien de uitgangspunten van destijds goed bekend zijn en de weg vertoont nu geen differentiële zetting dan kan worden geconcludeerd dat deze uitgangspunten juist waren. Deze kunnen worden overgenomen en grondonderzoek kan worden gericht op het invullen van eventueel aanwezige ‘witte plekken’.

(2.7) t/m (2.11): tijd-zettingsverloop bij bestaande weg conform prognoses?

Indien het tijd-zettingsverloop bij de bestaande weg conform de prognoses van destijds is, dan kan hieruit worden afgeleid dat de toenmalige schematisatie van de ondergrond, voor wat betreft de parameters die de mate en snelheid van zetting beïnvloeden, voldoet. Hierbij kan een afwijking van 20% van de prognose worden geaccepteerd. Deze schematisatie kan worden overgenomen en grondonderzoek kan worden gericht op het invullen van eventueel aanwezige ‘witte plekken’. Wel moet worden gecontroleerd of de uitgangspunten van destijds nog actueel zijn, zoals de grondwaterstand, waterspanningen in relevante watervoerende pakketten, etc. Als dit niet het geval is dan kan het grondonderzoek worden gericht op het bepalen van deze gewijzigde uitgangspunten.

(2.12) t/m (2.20): vorige ophoging(en), cunet(ten), aanlegpeilen, onderhoudswerkzaamheden en overige uitgangspunten bekend?

Indien (een van) bovenstaande onderdelen niet bekend zijn, dan dient dit met behulp van terreinonderzoek onderzocht te worden. Dit is nodig om een nauwkeurige zettingsprognose te kunnen opstellen. Als deze informatie slechts bij benadering bekend is, dan kan dit wellicht toch voldoende zijn om op een voldoende nauwkeurige wijze een zettingsprognose te maken, bijvoorbeeld door een c_v -waarde terug te rekenen.

Indien de hiervoor genoemde onderdelen gedetailleerd bekend zijn, dan is dit zeer bevordelijk voor het opstellen van een gedetailleerde zettingsprognose. Ook kunnen dan verschillende modelparameters teruggerekend worden door vergelijking van de aanlegsituatie met de opgetreden zetting. Ook kan dan worden bepaald of bij de vorige ophoging is belast tot boven de grensspanning. Als de waterspanningen intussen niet zijn verhoogd dan betekent dit dat de grensspanning voor de rehabilitatie gelijk is aan de belasting als gevolg van de vorige ophogingen. Is niet belast tot boven de grensspanning, dan is de grensspanning voor de rehabilitatie dezelfde als die gold voor de vorige aanleg. Als niet bekend is of in het verleden is belast tot boven de grensspanning, of de waterspanningen ongewijzigd zijn of als de grensspanning niet eerder was bepaald, dan dient de desbetreffende onzekerheid gereduceerd te worden. Dit kan bijvoorbeeld door de grensspanning in het laboratorium te bepalen met een oedometerproef, of de waterspanningen in het veld opnieuw te meten.

(2.21) Restzetting

Indien de prognose van de zetting als gevolg van de toekomstige rehabilitatie niet expliciet de vorige ophoging(en) meeneemt dan is de restzetting als gevolg van de vorige ophoging(en) een belangrijk gegeven. Bij het geprognoseerde tijd-zettingverloop moet dan nog de restzetting als gevolg van de vorige ophoging(en) worden opgeteld (waarbij dan wordt uitgegaan van het superpositiebeginsel) of deze moet op een andere wijze worden verwerkt in de uiteindelijke prognose.

(3) Kennisleemten

De relevante kennisleemten dienen te worden vertaald naar de doelen voor het grondonderzoek. Bij een goede analyse van (het gedrag van) de bestaande weg zullen deze doelen voortvloeien uit punt 2 van het stroomschema, "Historische informatie".

(4) Bepalen grondopbouw

De grondopbouw is bepalend voor het te verwachten tijd-zettingsgedrag. Onder grondopbouw wordt verstaan de laagsuccessies, de (verdeling van de) eigenschappen van die lagen en de waterspanningen in die lagen. De mate waarom de grondopbouw bepaald dient te worden zal bij elk project anders zijn, afhankelijk van het Programma van Eisen. Door de doelen van het grondonderzoek voor het project expliciet te maken kan de juiste hoeveelheid grondonderzoek gekozen worden om de gewenste nauwkeurigheid te verkrijgen. De structuur en delen van de uitwerking van het detailstroomschema van punt 4 zijn overgenomen van CUR (2003), die op het moment van schrijven nog de conceptstatus heeft. Hierna worden de onderdelen uit dit stroomschema nader toegelicht.

(4.1.1) Doelen grondonderzoek vaststellen

In het algemeen is het doel: "Het in kaart brengen van de reactie van de ondergrond op een verandering in het belastingniveau zodanig, dat aan de nauwkeurigheidseisen van de zettingsberekening wordt voldaan." Meer specifiek vloeien de doelen voort uit de Kennisleemten in punt (3) van het stroomschema. De doelen van het grondonderzoek vloeien voort uit de (ontbrekende) kennis over relevante parameters en/of de vereiste kennis over (een van de) parameters voor een tijd-zettingsprognose van de gewenste nauwkeurigheid.

(4.1.2) Bepalen geotechnische ontwerpaspecten

Het oorspronkelijke stroomschema van de CUR (CUR, 2003) is generiek opgezet. Aangezien hier alleen de tijd-zettingsprognose wordt onderzocht zijn de mogelijke geotechnische ontwerpaspecten, waarbij grondonderzoek van nut is, op voorhand bekend. Dit zijn:

1. vervormingseigenschappen van de ondergrond
2. volumegewicht van de ondergrond
3. doorlatendheid van de ondergrond
4. waterspanningen in de ondergrond
5. de (3D) heterogeniteit in de eigenschappen 1 t/m 4

Op basis van punt (4.1.1) kunnen één of meerdere ontwerpaspecten, en wellicht zelfs allemaal, al bepaald zijn.

(4.1.3) Bepalen van geotechnische parameters per aspect

Aan ieder ontwerpaspect zijn een aantal geotechnische parameters verbonden. Deze zijn weergegeven in onderstaande tabel. De nummering van de ontwerpaspecten is conform (4.1.2).

aspect:	geotechnische parameters:
1	samendrukkingsparameters (bijv. C_p , C_s of a,b,c), grensspanning p_g , (zweelconstante A)
2	droog en nat volumegewicht
3	horizontale en verticale doorlatendheid
4	waterspanningen in het freatisch vlak en in alle relevante watervoerende pakketten
5	Relevante ruimtelijke structuren waarin deze parameters zijn verdeeld

Tabel 2: Geotechnische parameters per geotechnisch ontwerpaspect

(4.1.4) Literatuur, oriënterend grondonderzoek

Nu de relevante geotechnische parameters bekend zijn dient onderzocht te worden in hoeverre de doelen van het grondonderzoek al worden behaald door bestaande informatie. Hierbij kan gedacht worden aan algemene, minder gedetailleerde informatie zoals de TNO isohypsenkaart of de geologische kaart van Nederland. Maar bij rehabilitatie van voorzieningen op slappe bodem is juist ook de informatie (grondonderzoek, monitoring gegevens) van eerdere projecten op en nabij de locatie van rehabilitatie van belang. Een vorm van oriënterend grondonderzoek is een bezoek aan de te reconstrueren voorziening om sporen van heterogeniteit (op het gebied van zettingen) te zoeken. Een andere vorm van oriënterend grondonderzoek kan zijn om met een kostenefficiënte geofysische grondonderzoeksmethode, zoals grondradar, heterogeniteit op te sporen.

(4.1.5) Kwalitatieve bepaling van het type grondonderzoek per parameter

Nadat bekend is welke parameters onderzocht moeten worden met het grondonderzoek, dient bepaald te worden met welke laboratorium- of veldproef dit kan gebeuren. Elke methode heeft zijn eigen voor- en nadelen en meetnauwkeurigheid. Het type grondonderzoek moet dus zowel met de projectplanning en de budgetplanning als met de gewenste nauwkeurigheid van de prognose afgestemd worden. Het effect van het nauwkeuriger of onnauwkeuriger bepalen van één van de parameters in een zettingsvoorspelling op de nauwkeurigheid van de voorspelling zelf wordt op dit moment onderzocht in een CROW onderzoek (CROW, 2003).

In onderstaande tabel worden als voorbeeld enkele laboratorium- en veldproeven genoemd waarmee de in (4.1.3) genoemde geotechnische parameters bepaald kunnen worden. Dit is geenszins een uitputtende lijst en er wordt tevens geen uitspraak gedaan over de nauwkeurigheid die met deze methoden behaald wordt.

geotechnische parameters	type labonderzoek	type in situ onderzoek
$C_p, C_s / a, b, c / \text{etc}$	oedometer, (K0)-CRS	zettingsplaat, zettingsslang
p_g	oedometer, (K0)-CRS	zettingsplaat, zettingsslang
A	oedometer	zettingsplaat, zettingsslang
γ_d, γ_n	NEN methode, pyknometerproef, steekring	nucleaire dichtheid
k_h, k_v	falling en constant head test, oedometer, (K0)-CRS	falling en constant head test, dissipatietest met piezosondering
σ_w		peilbuizen en waterspanningsmeters
bodemopbouw		sonderingen min. klasse 2, camerasondering, boringen, bij voorkeur met continu gestoken monsters, geofysische methoden

Tabel 3: Kwalitatieve bepaling type grondonderzoek, naar CUR (2003)

(4.1.6) Bepalen aantallen grondonderzoek

Er bestaan nog geen formules waarmee de hoeveelheid benodigd grondonderzoek kan worden bepaald. In het algemeen kan worden gesteld dat voldoende grondonderzoek is gedaan als het toevoegen van extra informatie geen significante wijzigingen in het ondergrondmodel oplevert. Dit hangt derhalve niet alleen af van de aantallen, de soort en de locatie van van de parameterbepalingen, maar ook van degene die het grondonderzoek interpreteert; een ervaring geoloog heeft wellicht minder gegevens nodig dan een geotechnicus om het ondergrondmodel met een zelfde nauwkeurigheid te bepalen.

In een CUR onderzoek (CUR, 2003) is desalniettemin aangegeven wat de à priori minimale hoeveelheid grondonderzoek is. Samengevat en toegespitst op het probleem van grondonderzoek ten behoeve van rehabilitatie van voorzieningen op slappe bodem komt dit neer op het volgende:

type onderzoek	hoeveelheid	opmerkingen
sonderingen	hart-op-hart 25 m	Dit getal is niet bedoeld voor lijninfrastructuurprojecten. In de definitieve versie van het bronrapport wordt een grotere afstand van ca. 100 meter verwacht. Voor voorzieningen in stedelijk gebied zal dit getal dan hiertussenin liggen.
boringen	hart-op-hart 50 m	Voor boringen geldt een zelfde redenering als voor sonderingen
ongeroerde monsters cohesief	1/m/laag	
ongeroerde monsters niet-cohesief	1/laag	
peilbuizen	hart-op-hart 250 m	in zowel freatisch pakket en relevante watervoerende lagen
classificatieparameters (zoals volumegewicht)	1/m/boring	
samendrukkingsparameters	3 proeven per cohesieve laag per boring	

Tabel 4: Kwantitatieve bepaling type grondonderzoek, naar CUR (2003)

Zoals gezegd leidt een hoeveelheid grondonderzoek zoals beschreven in de vorige tabel niet automatisch tot een bepaald nauwkeurighedsniveau voor de zettingsprognose. Door lokale omstandigheden kan het nodig zijn om meer grondonderzoek te doen, of door inbreng van expertise kan met minder grondonderzoek volstaan worden. In het laatste geval moet men aan kunnen geven waarom men afwijkt van de getallen in de bovenstaande tabel.

Voor verschillende ontwerpaspecten is nog een nadere toelichting gegeven op deze paragraaf. Deze worden hieronder behandeld.

Onderdeel heterogeniteit

Indien de prioriteit van het in kaart brengen van de horizontale heterogeniteit hoog is, dan kan voor het grondonderzoek de volgende waarden aangehouden worden:

- Indien alleen sonderingen gebruikt worden moet de hart-op-hart afstand maximaal 50 meter zijn, tenzij vanuit de geologie aannemelijk is, bijvoorbeeld op basis van de interpretatie van de uitgevoerde sonderingen, dat een grotere of kleinere onderlinge afstand aangehouden moet of kan worden;
- Indien geofysica wordt gebruikt om de horizontale heterogeniteit vast te stellen dan kunnen puntmetingen (zoals sonderingen) beperkt worden ter validatie en ijking van het geofysisch model. Mogelijke geofysische technieken zijn o.a. grondradar, elektrische weerstandsmetingen en electromagnetische metingen;
- Boringen zijn voor het in kaart brengen van de horizontale heterogeniteit minder geschikt vanwege de relatief hoge prijs. Indien boringen worden gebruikt in combinatie met andere technieken dan geldt voor boringen hetzelfde als voor sonderingen

Deze getallen kunnen slechts een indicatie vormen. Een aanname hierbij is steeds dat de oorzaken van de heterogeniteit niet kleiner zijn dan deze afstand. Als bijvoorbeeld zandige geulen met een breedte van maximaal 10 meter verwacht worden dan zullen deze niet allemaal gevonden worden met een

hart-op-hart sondeerafstand van 25 meter. Hiervoor is wellicht een geofysische meting zoals grondradar nodig.

Onderdeel volume gewichten

Gezien het belang van nauwkeurige kennis van de volume gewichten wordt aanbevolen om bij elke gezette boring de volume gewichten te bepalen van de te onderscheiden lagen. Tenminste dient dan eens per meter in de boring het volume gewicht bepaald worden.

Onderdeel waterspanningen

Indien er onzekerheid bestaat over de waterspanningen dan kunnen deze worden gemeten in situ. Voor zowel de freatische waterspanningen als waterspanningen in watervoerende pakketten geldt dat een meetafstand van hart op hart 250 meter voldoende is. Waar het vermoeden bestaat dat afwijkende grondwaterspanningen zijn, bijvoorbeeld als gevolg van onttrekkingen of aanvullingen in de nabijheid, opbolling of andere redenen, zullen extra peilbuizen moeten worden geplaatst.

(4.2) Uitvoeren grondonderzoek

Het uitvoeren van het grondonderzoek dient te geschieden volgens de vigerende normen en leidraden, met ervaren medewerkers en goed onderhouden en geijkte apparatuur. Indien van de vigerende normen en leidraden wordt afgeweken dient expliciet aangegeven te worden waarom dit is gedaan. De locatie van het onderzoek dient met een nauwkeurigheid van minimaal 50 cm bepaald te worden, de hoogtelocatie van het uitgevoerde onderzoek met een nauwkeurigheid van minimaal 5 cm. Het grondonderzoek dient bij voorkeur gefaseerd uitgevoerd te worden, waarbij de resultaten van een eerdere fase gebruikt wordt in de planning van een latere fase. Dit is met name nuttig voor het onderzoeken van de zijdelingse heterogeniteit.

(4.3) Interpretatie grondonderzoek

Indien het bovenstaande, in combinatie met de oude uitgangspunten, het historisch gedrag (de differentiële zettingen en het tijd-zettingsverloop) kan verklaren, dan houdt (4) hier op. Als dit niet zo is, dan dienen punten 3 en/of 4 uit het stroomschema, met de nieuwe informatie, opnieuw doorlopen te worden. Indien dit niet wenselijk is, of indien niet verwacht wordt dat dit tot betere inzichten leidt, dan kan besloten worden om door te gaan met het geotechnisch ontwerp met dien verstande dat oplossingen, waarbij het succes van het project afhangt van zaken die in deze fase nog onbekend zijn, niet uitgewerkt worden. Interpretatie van het onderzoek moet leiden tot een voldoende nauwkeurig beeld van de geohydrologische situatie, van de bodemopbouw en van de benodigde parameters. Deze vertegenwoordigen punten (4.4), (4.5) en (4.6) uit het stroomschema.

(4.4) Geohydrologie

De geohydrologische situatie wordt in zettingsanalyses vaak sterk vereenvoudigd geschematiseerd, zonder dat de geldigheid hiervan gevalideerd is. Voor zettingsanalyses voor rehabilitatiesituaties bij voorzieningen op slappe bodem is in ieder geval van belang te controleren hoe groot de waterspanningen zijn in het freatisch pakket en alle relevante watervoerende zandlagen ter plaatse van de bestaande voorziening. Doorgaans betekent dit dat naast de stijghoogte in het freatisch pakket ook de stijghoogte in het Pleistocene zand bepaald moet worden. Als er andere (ook dunne) zand- of grindlagen aanwezig zijn waarvan het niet onaannemelijk is dat daar een ander grondwaterregime heerst dan moet in die zandlagen de stijghoogte bepaald worden.

Het bepalen van de geohydrologische situatie vereist vaak slechts een peilbuis aan weerszijden van het te beschouwen traject (met een typische hart-op-hart afstand van 250 meter) zodat dit met relatief weinig inspanning bepaald kan worden.

(4.5) Bepalen bodemopbouw

Het bepalen van de drie-dimensionale bodemopbouw is in de meeste gevallen gebaseerd op lijnbepalingen, namelijk sonderingen en boringen. De grondopbouw kan geïnterpreteerd worden op basis van alleen deze lijninformatie. Indien de heterogeniteit in de ondergrond gering is dan zal de onzekerheid in de interpretatie ook gering zijn. Meestal is de grondopbouw echter niet homogeen. De

onzekerheid in het grondmodel kan dan worden ingeschat door gebruik te maken van gebiedservaring of van geologische expertise. Bij eenvoudige situaties kan wellicht worden volstaan met het raadplegen van de geologische kaart van Nederland, zoals uitgegeven door TNO-NITG. Bij complexere situaties of situaties waarbij de interpretaties zijn gebaseerd op een zeer beperkte hoeveelheid grondonderzoek zal de expertise van een geoloog noodzakelijk zijn. Een andere methode is het inschatten en indien noodzakelijk reduceren van de onzekerheid in het grondmodel op basis van het grondonderzoek in combinatie met probabilistische methoden. Een mogelijke techniek om dit te doen is gegeven in Graettinger & Dowding (2001). Voor de laatste methode is in het algemeen meer grondonderzoek nodig dan bij het raadplegen van een geoloog.

(4.6) Afleiden benodigde parameters

Voor de in (4.1.3) bepaalde relevante geotechnische parameters zal voor elke in (4.5) bepaalde relevante laag de parameter afgeleid moeten worden. Dit kan op verschillende manieren, met verschillende nauwkeurigheden. Aangezien dit zal doorwerken in de nauwkeurigheid van de zettingsprognose moet in de scorelijst onderscheid gemaakt worden naar de wijze van parameterbepaling. Voor elke te bepalen parameter dient substroomschema (4.6) doorlopen te worden.

(4.6.1) Geotechnische parameter

Voor iedere te bepalen geotechnische parameter begint het stroomschema hier.

(4.6.2) Grondonderzoek beschikbaar?

De keuze voor het type parameterbepaling hangt af van het al dan niet beschikbaar zijn van bruikbaar grondonderzoek. Hoewel een bepaling volgens het karakteristiek gemiddelde of op basis van een vergelijking met grondgedrag op zichzelf nauwkeuriger is dan een bepaling met correlaties of literatuur, stelt dit wel hogere eisen aan de beschikbare gegevens. In 4.6.5 is een handreiking gegeven waarmee ingeschat kan worden of voldoende proeven gedaan zijn om een bepaling met het karakteristiek gemiddelde uit te voeren.

(4.6.3) Afleiden parameter uit grondonderzoek

Indien voldoende bruikbaar grondonderzoek beschikbaar is dan dient dit gebruikt te worden, ook als dat “meer ongunstige” waarden oplevert dan een bepaling met standaardcorrelaties.

(4.6.4) Onafhankelijk eenduidig te bepalen waarde

Belangrijk is de vraag of de parameter onafhankelijk eenduidig is te bepalen. Dat wil zeggen, of de parameter eenduidig ‘gemeten’ kan worden in het laboratorium of dat het een macroparameter betreft die beter in situ bepaald kan worden of door analyse van het grondgedrag van een praktijkproef. In het eerste geval kan het karakteristiek gemiddelde bepaald worden van de parameter, in het tweede geval zal dit doorgaans te kostbaar zijn. In het tweede geval worden soms ook bulk parameters van de grond bepaald, zodat de heterogeniteit van de grond minder gedetailleerd in de schematisering gebruikt kan worden.

(4.6.5) Bepaling volgens het karakteristiek gemiddelde

Mits goed uitgevoerd zal een bepaling volgens het karakteristiek gemiddelde (zoals beschreven in NEN6740) de meest nauwkeurige parameters opleveren. Indien de parameters bepaald dienen te worden volgens het karakteristiek gemiddelde dan is het belangrijk een inschatting te kunnen maken van het aantal proeven of metingen dat noodzakelijk is om de gewenste nauwkeurigheid te bereiken.

Uitgangspunt is hierbij de natuurlijke variatie van de eigenschappen van een bepaalde geotechnische laag. Hiervan willen we het gemiddelde bepalen. De kans dat een enkele proef exact het gemiddelde zal opleveren is nihil. Het aantal proeven dat nodig is om dit te vergroten kan geschat worden vanuit de Student-t verdeling die in NEN6740 wordt gebruikt:

$$X_{\text{gem,t}} = X_{\text{gem,p}} \pm t^*s^*(1/\text{sqrt}(n))$$

waarin:

t: vermenigvuldigingsfactor

s: standaardafwijking van de proevenverzameling

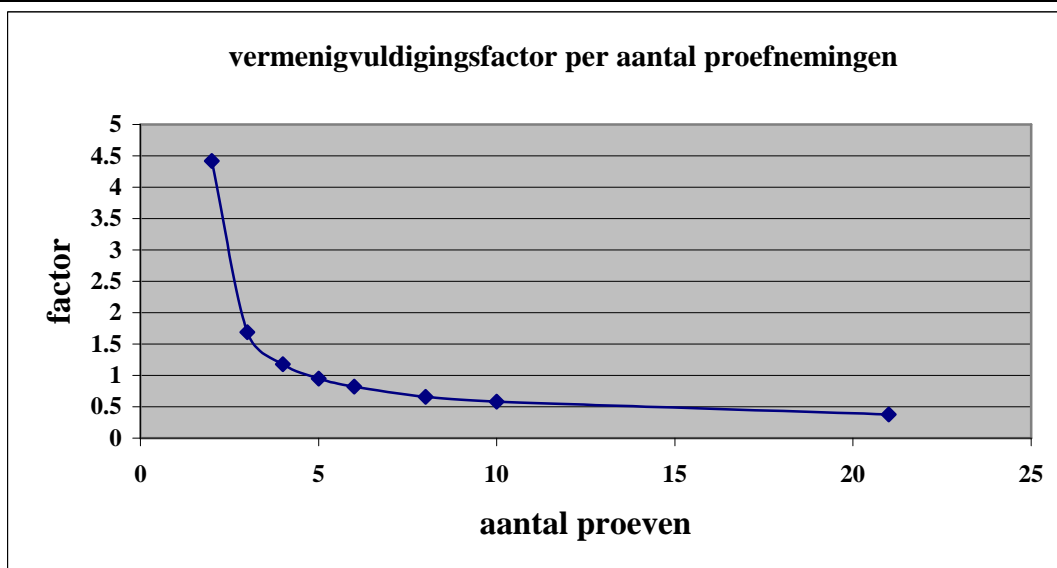
n: aantal proeven

$X_{\text{gem,p}}$: gemiddelde waarde van de proevenverzameling

$X_{\text{gem,t}}$: gemiddelde karakteristieke waarde

De factor t waarmee s wordt vermenigvuldigd is daarmee een maat voor de nauwkeurigheid waarmee het gemiddelde is bepaald. Als we aannemen dat de verdeling van de betreffende eigenschap normaal is, dan is deze factor afhankelijk van het aantal proefnemingen – hoe meer proefnemingen, hoe beter de schatting van het gemiddelde zal zijn.

aantal proefnemingen	vermenigvuldigingsfactor
2	4.42
3	1.69
4	1.18
5	0.95
6	0.82
8	0.66
10	0.58
21	0.38



Uitgaande van een perfect normaal verdeelde eigenschap (met onbekend gemiddelde en standaardafwijking) en een perfecte wijze van meten of beproeven kan op basis van deze figuur het aantal benodigde proeven geschat worden. Het aantal proeven – en dus de onzekerheid in het bepaalde gemiddelde – zal afhangen van de volgende zaken:

- De grootte van de berekende s uit de proeven. Als de standaardafwijking klein is dan zal ook de invloed van een volgende proef (dus een verkleining van de factor waarmee s vermenigvuldigd moet worden) geringer zijn dan bij een grote standaardafwijking. Men moet wel opletten dat voldoende proeven zijn gedaan om een redelijke inschatting van de standaardafwijking te kunnen maken.
- Enkele extreme waarden kunnen een grote invloed hebben op de berekende waarden, vooral indien maar weinig proeven gedaan zijn. Het is verleidelijk om afwijkende waarden te verwijderen uit de dataset. Bedenk echter dat bij een normaal verdeelde parameter er ook waarden in de tenen van de verdeling bemonsterd kunnen worden. Wellicht dienen er dan toch enkele proeven extra gedaan te worden om dit uit te sluiten.

(4.6.6) *Bepaling op basis van vergelijking grondgedrag / constructie en grondgedrag / proef (incl. in-situ proeven)*

De analyse van het vervormingsgedrag ten gevolge van de oude ophoging valt hier niet onder. Zie hiervoor punt (2) *Historisch vervormingsgedrag*.

(4.6.7) *“Standaard” correlaties beschikbaar?*

Indien geen bruikbaar grondonderzoek uitgevoerd is maar wel relevante “standaard” correlaties beschikbaar zijn, dan dienen deze gebruikt te worden. Deze correlaties zijn relevant als ze zijn gebaseerd op grondonderzoek in vergelijkbare geologische omstandigheden en in zekere mate gevalideerd.

(4.6.8) *Gebruik “standaard” correlaties*

Voor de voor een zettingsprognose benodigde parameters zijn maar weinig standaardcorrelaties beschikbaar. In de tabel hieronder zijn enkele van deze correlaties weergegeven. Het is belangrijk te beseffen dat in tabel 1 uit NEN6740 (NEN, 1991a) de lage representatieve waarden van de gemiddelden zijn opgenomen. De correlatie mag dan wel “standaard” zijn maar door deze correlatie te gebruiken worden deze parameters zeker te ongunstig ingeschat voor gebruik in een keuzemodel voor een *duurzame* rehabilitatiemethode, waarbij ophogingen in zand bijvoorbeeld worden vergeleken met gewichtsneutrale oplossingen.

geotechnische parameter	correlatiemethode
C_p, C_s	via grondsoort of q_c en NEN6740 tabel 1
C_{α}, C_c	Atterbergse grenzen
γ_d, γ_n	via grondsoort of q_c en NEN6740 tabel 1

Tabel 5: Enkele “standaard” correlaties voor zettingsparameters

(4.6.9) *Op basis van literatuur, “engineering judgement” of niet-standaard correlaties*

Het gebruik van de “standaard” correlaties in 4.6.8 introduceert al een aanzienlijke onzekerheid in de zettingsprognose. Vaak worden echter nog andere correlaties of zelfs algemene waarden gebruikt in berekeningen bij gebrek aan grondonderzoek. Dit maakt de onzekerheid in deze parameters nog groter.

Het is echter nog niet goed onderzocht wat het effect van een verkeerde inschatting van deze parameters is op de uiteindelijke tijd-zettingsprognose. In het CROW onderzoek “Gevoeligheidsanalyse zettingsprognose” (CROW, 2003) wordt getracht hier nieuw inzicht in te verschaffen. Op het moment van schrijven van dit rapport is dit onderzoek nog in uitvoering. Zolang er nog geen onderzoek is waaruit blijkt dat een globale orde-inschatting van de waarde van een van deze parameters voldoende is voor een nauwkeurige zettingsprognose moet aangenomen worden dat een dergelijke vorm van parameterbepaling de nauwkeurigheid van de zettingsprognose sterk negatief beïnvloedt.

Een – niet uitputtend – overzicht van niet-standaard correlaties en indicatieve waarden is gegeven in Tabel 6.

geotechnische parameter	indicatie of correlatie
A	zwell is 1/5 à 1/10 van de samendrukking
p_g	bij normaal geconsolideerde gronden is p_g de terreinspanning + 5 à 10 kPa
γ_d, γ_n	indicatieve waarde, bijv. CUR (2003) paragraaf 6.2.5
σ_w	(gemeente)archieven en de TNO

	isohypsenkaart
k_h, k_v	indicatieve waarden
heterogeniteit	via geologische en hydrologische kaarten

Tabel 6: Enkele niet-standaard correlaties en indicatieve waarden voor zettingsparameters

(4.6.10) Geotechnische parametersets per grondlaag

Door voor elke geïdentificeerde grondlaag voor elke relevante parameter op een van de manieren van (4.6.5), (4.6.6), (4.6.8) of (4.6.9) de parameterwaarde af te leiden kan een parameterset worden opgesteld voor iedere grondlaag. Deze parametersets vormen de basis voor de zettingsberekeningen. Het is belangrijk om goed te onthouden op welke wijze de parameters in de parameterset bepaald zijn. Op die manier kan, bijvoorbeeld door de wegbeheerder, gefaseerd een nauwkeurige parameterset voor het gebied bepaald worden op basis van karakteristieke gemiddelden. Hierdoor neemt de betrouwbaarheid van de zettingsprognoses bij nieuwe projecten steeds verder toe terwijl de benodigde kosten voor het grondonderzoek bij nieuwe projecten steeds verder zullen dalen tot een minimum is bereikt.

5: Opstellen geotechnisch ontwerp

Uiteindelijk dient de informatie die in de voorgaande stappen is vergaard terug te komen in de schematisatie van het probleem. Onder het geotechnisch ontwerp valt onder andere:

- de schematisatie van het ondergrondmodel en de aan te leggen constructie
- de grondparameters in de schematisatie
- het te gebruiken rekenmodel
- de zettingsprognose
- uitvoeringsrichtlijnen

De schematisatie van het ondergrondmodel en de aan te leggen constructie en de grondparameters in de schematisatie horen te volgen uit de vorige stappen uit het stroomschema. Voor een keuze van het te gebruiken rekenmodel kan gebruik gemaakt worden van de uitleg in hoofdstuk 5, en is onder andere afhankelijk van de bepaalde parameters en de ervaring van de adviseur. De zettingsprognose volgt uit de zettingsberekening op basis van het rekenmodel, de grondparameters en de schematisatie van het ondergrondmodel. Aangegeven dient te worden of het een verwachtingswaarde of een onder- of bovengrenswaarde betreft. Indien het van toepassing is dienen er uitvoeringsrichtlijnen aangegeven te worden, zoals het gebruik van zettingsversnellende maatregelen of type monitoring.

De wijze waarop de historische informatie wordt meegenomen van de vorige ophoging(en) is ook een aandachtspunt. Indien de vorige ophoging(en) expliciet – in tijd – geschematiseerd worden dan is de zettingsprognose zonder meer te gebruiken voor de toetsing aan het PvE. Indien dit niet het geval is dan zal de berekende restzetting nog moeten worden verhoogd met de achtergrondzetting van de vorige ophoging(en).

(6) Gevoeligheidsanalyse

Het in één schematisatie voldoen aan het PvE is niet voldoende waarborg voor een goed ontwerp. Belangrijk is inzicht te krijgen in de mogelijke effecten van onzekerheid in onderdelen van de zettingsprognose op de uiteindelijke nauwkeurigheid van de prognose. Als uit het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse blijkt dat de kans op niet voldoen aan het PvE zeer klein is dan is de waarde van de zettingsprognose sterk vergroot. Als aan de andere kant blijkt dat een aanzienlijke kans bestaat dat niet aan het PvE voldaan wordt, dan kan expliciet met dit risico worden omgegaan door ofwel het te accepteren ofwel het te verkleinen, bijvoorbeeld door het uitvoeren van gericht extra grondonderzoek of het gebruik van een beter rekenmodel.

(7) Voldoet het ontwerp aan het Programma van Eisen?

Uiteraard dient het geotechnisch ontwerp te voldoen aan het Programma van Eisen. Hieruit blijkt het belang van compleetheid en helderheid in het formuleren van het PvE; het helder formuleren van het PvE voorkomt onenigheid in deze fase van het project.

(8) Aanpassing ontwerp mogelijk?

Indien niet voldaan wordt aan het PvE dan kan nagegaan worden in hoeverre het ontwerp aangepast kan worden zodanig, dat een voldoende grote kans bestaat dat wel aan het PvE voldaan zal worden. Indien dit mogelijk is dan dient dit nieuwe ontwerp onderzocht te worden in stap 5 van het stroomschema. Zo niet, dan kan wellicht op andere wijzen toch aan het PvE voldaan worden, zie stap 9 van het stroomschema.

(9) Optimalisatie grondonderzoek mogelijk?

Indien het niet voldoen aan het PvE wordt veroorzaakt door een geotechnisch mechanisme, bijvoorbeeld te grote zettingen, dan kan dit wellicht opgelost worden door optimalisatie van het grondonderzoek. Dit extra grondonderzoek moet dan wel leiden tot het voldoen aan het PvE, bijvoorbeeld door het opwaarderen van één of meerdere van de (reken)waarden van de parameters in de geotechnische berekening. Het is dus belangrijk vooraf na te gaan hoe groot de verandering in de parameter(s) moet zijn om aan het PvE te voldoen en wat de kansen zijn dat die beoogde toename ook wordt gerealiseerd. In Calle (2002) wordt uiteengezet hoe een probabilistische analyse kan helpen in de optimalisatie van (de hoeveelheid) grondonderzoek en in een afweging van de winst die dit kan opleveren. Tevens worden enkele eenvoudige voorbeelden gegeven. Een mogelijke technische uitwerking van dit principe in een analyse- en planningstool is gegeven door Graettinger en Dowding (2001).

(10) Aanpassing PvE mogelijk?

Als niet aan het PvE wordt voldaan, het ontwerp niet wezenlijk aangepast kan worden en optimalisatie van het grondonderzoek deze situatie niet zal verbeteren, dan kan overwogen worden het PvE te versoepelen. Dit zal voornamelijk een politieke keuze zijn. Indien dit niet mogelijk of wenselijk is, dan leidt dit tot punt 11 uit het stroomschema.

(11) Project niet maakbaar

Indien niet aan het PvE kan worden voldaan en het PvE kan niet worden aangepast, dan is het project niet maakbaar. In het afwegingsmodel betekent dit, dat deze optie niet meegenomen hoeft te worden.

Onderdelen 1 t/m 11 spelen een rol in het keuzemodel, onderdelen 12 en verder zijn alleen relevant voor de daadwerkelijk gekozen rehabilitatiemethode.

(12) Uitvoering inclusief monitoring

De uitvoering van een project verloopt zelden zoals dat in het ontwerp voorzien was. Wijzigingen in uitvoering kunnen echter een significant effect hebben op het tijd-zettingsverloop. Kennis van de uitvoering van het project is belangrijk om, bij wijzigingen in de uitvoering, nog tijdens de uitvoering te kunnen bepalen of aan het PvE voldaan wordt of om nog te optimaliseren in het ontwerp. Ook is deze kennis relevant om achteraf te kunnen controleren of de (rest)zettingsprognose al dan niet nauwkeurig was. De monitoring dient zodanig ingericht te zijn, dat deze informatie verzameld kan worden. Een goede manier om een monitoring te organiseren en op te zetten is met behulp van de HerMes filosofie (Hölscher & Wijnants, 2003).

Een goede communicatie tussen aannemer en adviseur is dus van belang. Alle wijzigingen die zich tijdens de uitvoering voordoen en die van belang zijn voor de zettingsprognose dienen bekend te zijn bij de adviseur die de prognose heeft opgesteld. Ook een goede kennis van de nulsituatie is hiervoor van belang.

(13) Klopt gemeten zetting met de prognose?

Indien de gemeten zetting significant afwijkt van de prognose dan is belangrijk te onderzoeken wat hiervan de oorzaak is. Deze analyse begint in punt 14 van het stroomschema. Wat een significante

afwijking gevonden wordt dient in overleg met de opdrachtgever bepaald te worden en hoort thuis in het PvE. Een richtlijn is een afwijking van meer dan 20%. Indien de gemeten zetting minder afwijkt dan de afgesproken marge dan leidt dit tot punt 17 uit het stroomschema.

(14) Uitvoering afwijkend van het ontwerp?

Indien de zettingsprognose niet overeenkomt met de gemeten zettingen dan is het relevant om te onderzoeken of in de uitvoering is afgeweken van het ontwerp. Een wijziging in de uitvoering – zelfs in de fasering van ophogingen – kan een significant anders tijd-zettingsverloop tot gevolg hebben. Indien dit het geval blijkt dient ofwel de uitvoering aangepast te worden, ofwel het geotechnisch ontwerp aangepast te worden. Dit leidt tot punt 18 uit het stroomschema.

(15) Randvoorwaarden vermoedelijk afwijkend?

Indien de uitvoering niet afwijkend is van het ontwerp, moet onderzocht worden of de randvoorwaarden (de geotechnische parameters uit 4.1.3) anders zijn dan gedacht. Indien dit blijkt of indien er een sterk vermoeden is dat dit het geval is, leidt dit tot punt 19 uit het stroomschema.

(16) Ontwerpberekening onnauwkeurig

Als de randvoorwaarden juist zijn, de uitvoering niet afwijkend is van het ontwerp maar het gemeten tijd-zettingsverloop klopt niet met de prognose, dan is de ontwerpberekening onnauwkeurig. Dit kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door:

- gebruik van het verkeerde rekenmodel of spanningsspreidingsmodel
- onjuiste schematisering van het probleem
- onervarenheid met het gebruikte model of de gebruikte software

Indien dit geconstateerd wordt dan zit er weinig anders op dan ofwel van voren af aan te beginnen – eventueel met een andere adviseur – ofwel de onnauwkeurigheid te accepteren.

(17) Acceptatie door opdrachtgever mogelijk

Het project voldoet zowel in ontwerp als in uitvoering aan de randvoorwaarden. De oplevering kan, voor wat betreft de zettingen, geaccepteerd worden door de opdrachtgever.

(18) Geotechnisch ontwerp aanpassen

Indien uitvoering of randvoorwaarden afwijkend blijken te zijn van de ontwerpberekening dan dient het geotechnisch ontwerp aangepast te worden. Dit leidt tot punt 5 of punt 4 in het stroomschema, afhankelijk van het uit moeten voeren van grondonderzoek om de nieuwe randvoorwaarden te bepalen.

(19) Prognose bijstellen aan de hand van monitoring mogelijk?

Het bijstellen van de prognose aan de hand van monitoring betekent dat opnieuw gecontroleerd moet worden of wel aan het PvE voldaan wordt. Dit leidt tot punt 6 in het stroomschema. Indien het bijstellen niet mogelijk is leidt dit tot punt 20 van het stroomschema.

(20) Aanvullend grondonderzoek nodig

Indien de prognose niet bijgesteld kan worden op basis van grondonderzoek dan zal aanvullend grondonderzoek nodig zijn om de juiste randvoorwaarden en parameters vast te stellen. Dit leidt tot punt 4 in het stroomschema.

4.3 Nauwkeurigheid van zettingsprognoses: DOS-systematiek

Bij het opstellen van zettingsprognoses zal maar zelden het stroomschema op de manier (kunnen) worden doorlopen die de grootste nauwkeurigheid oplevert. Om een goede afweging te maken tussen verschillende rehabilitatiemethoden is het echter wel belangrijk dat de nauwkeurigheid van de

zettingsprognose zo nauwkeurig mogelijk is. Er is behoefte aan een manier om de nauwkeurigheid van de zettingsprognose in te kunnen schatten.

Ook het CROW herkende deze behoefte. In het al eerder genoemde onderzoek “Gevoeligheidsanalyse zettingsprognose” (CROW, 2003) is een methodiek geopperd om de nauwkeurigheid in te schatten met behulp van een ‘scorekaart’ voor ophogingen op maagdelijk terrein en voor aanaarding (verder: CROW-systematiek). Aanvankelijk is in dit onderzoek deze systematiek uitgebreid voor rehabilitaties op zeer slappe ondergrond. Deze aangepaste scorekaart is te vinden in Bijlage 3. Een nadeel van het bepalen van de nauwkeurigheid van de prognose met behulp van de scorekaart is echter dat geen rekening wordt gehouden met de specifieke projectbehoeften. Zo zal niet in elke situatie een zeer uitgebreid grondonderzoek met geofysische metingen nodig zijn en het is in die gevallen redelijk om met een minder uitgebreid grondonderzoek (mits degelijk gepland en uitgevoerd) toch het maximale aantal punten te scoren.

In dit onderzoek wordt een alternatief aangedragen voor de scorekaart gebaseerd op de CROW-systematiek. Dit alternatief is gebaseerd op het stroomschema dat is gepresenteerd in paragraaf 4.1. Het voordeel van deze nieuwe systematiek (verder: DOS-systematiek) is dus zoals gezegd de grotere mogelijkheden tot nuancering in de behaalde scores. Dit is ook direct het nadeel; door het grotere aantal vrijheidsgraden wordt het systeem complexer. In deze fase is een aanzet gegeven voor de te behalen scores, gevalideerd in slechts één case. Voorzichtigheid dient derhalve te worden betracht bij het gebruik van de DOS-systematiek. Voor de volledigheid dient vermeld te worden dat de genoemde CROW-systematiek voor zover bekend nog in geen enkele case is gevalideerd.

In de DOS-systematiek kunnen punten worden verdiend tot en met punt 8 (Uitvoering inclusief monitoring). Hierna vindt evaluatie plaats van het praktijkgedrag van de grond. In de paragrafen 4.3.1 tot en met 4.3.3 worden de te behalen scores per onderdeel genoemd en toegelicht.

4.3.1 Score bij het doorlopen van het hoofdstroomschema

Er kunnen punten worden verdiend in de volgende onderdelen:

onderdeel	naam onderdeel	maximum te behalen punten
2	Historische informatie	30
4	Bepalen grondopbouw	30
5	Opstellen geotechnisch ontwerp	20
6	Gevoeligheidsanalyse	20
12	Uitvoering inclusief monitoring	(20)
	Totaal	100

Tabel 7: Te behalen scores in het hoofdschema. Dit zijn de maximum scores per onderdeel, ongeacht het feit of in de subschema's meer punten verdiend zijn.

Voor onderdelen 2 en 4 is de score nader uitgewerkt in paragrafen 4.4.2 en 4.4.3. Voor onderdelen 5, 6 en 12 is dat hieronder gedaan.

(5) Opstellen geotechnisch ontwerp

Een uitgangspunt bij de score voor dit punt is dat de adviseur ervaren is met het rekenmodel en (eventueel) de software die is gebruikt. Bij het opstellen van het geotechnisch ontwerp dient alle informatie, waarvoor punten toebedeeld zijn, expliciet te worden gebruikt. Indien dit niet gebeurt dienen de eerder verdiende punten op die onderdelen geannuleerd te worden. Als bijvoorbeeld samendrukkingsparameters voor het isotachenmodel zijn bepaald in punt 4 van het stroomschema maar een eenvoudig Terzaghi-model wordt gebruikt, dan dienen de punten verdiend voor de isotachenparameters te vervallen.

In dit onderdeel kunnen punten worden verdiend door gebruik te maken van het juiste rekenmodel, zie Tabel 8. Het te kiezen model dient optimaal aan te sluiten bij het probleem en bij de beschikbare informatie. Voor een keuze tussen het Koppejan- en isotachenmodel dient gebruik gemaakt te worden van het afwegingsmodel in hoofdstuk 5.4.

model	punten
formule van Terzaghi of gelijkwaardig, geen kruipcomponent	0
als boven, met eenvoudige kruipcomponent	3
NEN of Angelsaksische methode, geen correctie voor onder water zakken	5
NEN of Angelsaksische methode, correctie voor onder water zakken	7
Koppejan- of isotachenmodel, geen correctie voor onder water zakken	10
Koppejan- of isotachenmodel, correctie voor onder water zakken	13

Tabel 8: Te behalen score bij gebruik van verschillende modellen

Omdat het hier rehabilitatiesituaties betreft is het van belang de (nog te verwachten) zetting als gevolg van de vorige ophoging(en) expliciet mee te nemen, ofwel in de schematisatie van de zettingsberekening door verschillende belastingstappen in de tijd te modelleren ofwel door de te verwachten restzetting op te tellen bij de berekende zetting als gevolg van de nieuwe ophoging. De te behalen score is 7 punten als de restzetting expliciet wordt meegenomen, 0 punten als dit niet het geval is.

(6) Gevoeligheidsanalyse

De score voor de gevoeligheidsanalyse is 20 punten als de invloed van de geotechnische ontwerpparameters binnen het te verwachten bereik is bepaald. Indien slechts van enkele parameters de invloed is bepaald dan kan een score tussen 0 en 20 behaald worden (dus bij 1 van de 4 is de score 5 punten).

(12) Uitvoering inclusief monitoring

De uitvoering hoort niet in het keuzemodel. Voor de variant die is gekozen kan hier echter 20 punten extra verdiend worden door goede controle op de uitvoering uit te oefenen en zodanig te monitoren, dat afwijkingen tussen het voorspelde en het gemeten tijd-zettingsverloop niet alleen geconstateerd maar ook verklaard kunnen worden.

4.3.2 Scores bij subschema (2) “Historisch vervormingsgedrag”

De te behalen scores in het subschema van punt twee zijn weergegeven in Tabel 9. Uit de analyse van het zettingsgedrag van de bestaande voorziening kan blijken dat er kennisleemten bestaan. Hierdoor kan niet de volledige score behaald worden. Indien deze kennisleemten (bijvoorbeeld door grondonderzoek) later alsnog ingevuld worden dan kan de score aangevuld worden tot de maximumscore (de punten tussen haakjes in Tabel 9).

onderdeel	naam onderdeel	behaalde punten
2.27	differentiële zetting onbekend	0 (8)
2.4	differentiële zetting	3 (8)
2.5	geen differentiële zetting	8
2.6	geen differentiële zetting door rekening houden met heterogeniteit	6 (8)
2.9	tijd-zettingsverloop volgens prognoses, uitgangspunten actueel	8
2.10	tijd-zettingsverloop niet volgens prognoses	0 (8)
2.11	tijd-zettingsverloop niet volgens prognoses, uitgangspunten niet	5 (8)

	actueel	
2.14	vorige ophogingen etc gedetailleerd bekend	10
2.16	vorige ophogingen etc niet bekend	0 (10)
2.17	vorige ophogingen etc grof bekend	3 (10)
2.18	grensspanning af te leiden	4
2.19	grensspanning af te leiden	4
2.20	grensspanning niet af te leiden	0 (4)

Tabel 9: Te behalen scores in subschema 2. De scores tussen haakjes zijn de maximaal te behalen scores als de kennisleemte wordt opgelost.

Een gedetailleerde uitleg van wat bedoeld wordt in ieder punt is te vinden in paragraaf 4.2.

4.3.3 Scores bij subschema (4) “Bepalen grondopbouw” en (4.6) “Afliden benodigde parameters”

De maximaal te behalen scores in de subschema's van punten (4) en (4.6) zijn weergegeven in Tabel 10. Onder deze tabel is per onderdeel een meer gedetailleerde uitwerking gegeven.

onderdeel	naam onderdeel	behaalde punten
4.2	gefaseerd uitvoeren grondonderzoek	+8
4.4	bepalen stijghoogten in freatisch pakket en relevante watervoerende pakketten	+5
4.5	grondopbouw bepaald door geoloog op basis van lokaal grondonderzoek	+10
4.6	afleiden benodigde parameters	max +15
4.6.5	bepaling volgens karakteristiek gemiddelde	2.5/N
4.6.6	bepaling volgens vergelijking grondgedrag/constructie en grondgedrag/proef	1.5/N
4.6.8	gebruik “standaard” correlaties	0.5/N
4.6.9	Literatuur	0/N

Tabel 10: Te behalen scores in subschemas 4 en 6. Symbool N is het aantal in 4.5 onderscheiden relevante grondlagen.

(4.2) Uitvoeren grondonderzoek

Indien het grondonderzoek gefaseerd wordt uitgevoerd en de resultaten van een eerdere fase worden expliciet meegenomen in een latere fase, dan worden 8 punten verdiend. Indien aannemelijk gemaakt kan worden dat fasen van het onderzoek geen toegevoegde waarde heeft, dan mogen de punten zonder meer toegekend worden. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren als de heterogeniteit zeer laag is.

(4.4) Geohydrologie

Indien de stijghoogten in het freatisch pakket en alle relevante watervoerende lagen (inclusief dunne lagen die mogelijk als drainage kunnen fungeren in het consolidatieproces) bepaald zijn met behulp van peilbuizen en/of waterspanningsmeters, dan mogen 5 punten toegekend worden.

(4.5) Bepalen grondopbouw

Indien de grondopbouw is aangenomen of bepaald op slechts niet-lokale informatie, zoals een geologische kaart van Nederland, dan worden geen punten verdiend. Indien geen grondonderzoek is gedaan, maar de grondopbouw is bepaald op basis van gebiedskennis en is niet sterk heterogeen, dan worden 2 punten verdiend. Is beperkt lokaal onderzoek gedaan (minder dan 1 sondering of boring per 100 strekkende meters) en dit is niet geïnterpreteerd door een geoloog, maar er is wel gebruik

gemaakt van gebiedservaring en/of niet-lokale (geologische) informatie dan worden 5 punten toegekend. Indien meer grondonderzoek is gedaan of er is een geoloog ingeschakeld, dan worden 10 punten toegekend.

(4.6) Afleiden benodigde parameters

Voor iedere af te leiden parameter die relevant is voor het te gebruiken model in punt 5 van het stroomschema (“geotechnisch ontwerp”) kunnen punten worden verdiend, afhankelijk van de manier van parameterbepaling die wordt gebruikt. Het maximaal te verdienen aantal punten is 15. De punten te verdienen per parameter zijn ook afhankelijk van het aantal relevante grondlagen; hoe meer relevante grondlagen, hoe meer parameters er zijn te bepalen. Indien geïdentificeerde relevante lagen worden samengevoegd in de zettingsberekening om de analyse eenvoudiger te maken, dan moet per laag die bij een andere wordt samengevoegd steeds $14/N$ van het maximaal te behalen aantal punten afgehaald worden. Hierin is N het aantal relevante lagen dat in eerste instantie (dus voor samenvoegen) is geïdentificeerd.

Bijvoorbeeld: bij het gebruik van één equivalente laag waar aanvankelijk vier relevante lagen waren geïdentificeerd, kunnen dus nog maximaal 3.75 punten verdiend worden. Ook het aantal te behalen punten per parameter blijft gerelateerd aan het oorspronkelijk aantal geïdentificeerde lagen, een bepaling met het karakteristiek gemiddelde is per parameter in de ene equivalente laag daarom nog maar 0.63 punten waard.

4.4 Conclusies en aanbevelingen nauwkeurigheid zettingsprognosen

In dit hoofdstuk is een instrument gepresenteerd waarmee de nauwkeurigheid van zettingsprognosen ten behoeve van voorzieningen op slappe bodem kwantitatief kan worden bepaald. Deze DOS-systematiek is locatiespecifiek, de te behalen score is afhankelijk van de (complexiteit van de) lokale ondergrond.

Voorzichtigheid dient betracht te worden bij het toepassen van deze methodiek. Er heeft pas weinig validatie plaatsgevonden. Aanbevolen wordt dan ook om meer cases, met verschillende mate van heterogeniteit van de ondergrond, uit te werken om zo de methode en de scores te ijken. Desondanks kan wel een eerste zeer grove waardering van zettingsprognoses gemaakt worden op basis van de puntentelling van de DOS-systematiek. Deze is weergegeven in Tabel 11.

score	waardering
0 - 25	slecht
25 - 50	slecht tot goed
75 - 100	goed

Tabel 11: Grove waardering zettingsprognoses op basis van puntentelling DOS-systematiek

Bij nieuw uit te voeren rehabilitatiewerkzaamheden waarbij de zettingsprognose is opgesteld aan de hand van deze DOS-systematiek, is het belangrijk de zettingen ook na oplevering te blijven meten zodat terugkoppeling naar de methode mogelijk wordt.

5 Keuze rekenmodel

In hoofdstuk 4 is een instrument gepresenteerd waarmee de nauwkeurigheid van een zettingsprognose voor rehabilitatie van voorzieningen op slappe bodem mee kan worden gekwantificeerd. Een onderdeel van die methodiek is de keuze van het rekenmodel, bij even correct gebruik van verschillende modellen zal een verschillende nauwkeurigheid worden bereikt. In paragraaf 5.1 worden kort de beschikbare modellen en hun voor- en nadelen besproken. In deze methodiek van hoofdstuk 4 is ook aangegeven dat het Koppejan model en het isotachenmodel even waardevol zijn. In dit hoofdstuk wordt hierin een nuance aangebracht en wordt een model geboden waarmee de afweging gemaakt kan worden of het Koppejan model of het isotachenmodel het meest geschikt is. In paragrafen 5.2 en 5.3 wordt de theorie achter het Koppejan model en het isotachen model besproken. In paragraaf 5.4 worden deze paragrafen samengevat en wordt het afwegingsmodel gepresenteerd voor de keuze van het te gebruiken rekenmodel.

5.1 Overzicht beschikbare modellen

In de vorige eeuw is een groot aantal rekenmodellen voor het voorspellen van zettingen ontwikkeld. Een aantal daarvan heeft zich inmiddels in de (Nederlandse) praktijk bewezen, andere modellen zijn in het algemeen te beperkt van opzet of minder geschikt voor de Nederlandse omstandigheden.

Bij het model van Terzaghi (Terzaghi, 1925) worden alle samendrukbare lagen als één equivalente laag geschematiseerd, waarvoor alleen de zetting ten gevolge van consolidatie wordt bepaald. Kruip wordt hierbij genegeerd. Later zijn aanvullingen op dit model gemaakt waarbij kruip op een eenvoudige wijze wordt meegenomen. De betrouwbaarheid van de uitkomsten neemt hierdoor niet veel toe; dergelijke methoden zijn vooral geschikt om enige indicatie te krijgen van de mogelijke zettingen in een onbekend (buitenlands) gebied, waar lokale ervaring ontbreekt.

Internationaal, met name in de Angelsaksische landen, wordt veel gebruik gemaakt van het model van Terzaghi/Bjerrum (CROW, 2003), waarin het model van Terzaghi is gecombineerd met de meer geavanceerde kruiptheorie van Bjerrum (Bjerrum, 1972). Kruip wordt in dit model beschouwd als spanningsonafhankelijk, verder wordt er geen onderscheid gemaakt in samendrukkingsgedrag onder en boven de grensspanning, hetgeen met name voor toepassing in de Nederlandse praktijk als een belangrijk bezwaar tegen deze methode kan worden gezien. Zeker bij rehabilitatiesituaties waarbij relatief kleine ophogingen, minder dan 1 meter, worden aangebracht zijn de spanningen vaak ongeveer de grensspanning.

De NEN-methode (NEN, 1991c) is een voor de Nederlandse geotechnische norm aangepaste versie van de angelsaksische methode, waarbij wel aangegeven wordt hoe de grensspanning dient te worden bepaald, maar iedere indicatie hoe vervolgens omgegaan dient te worden met het verschil in stijfheid onder en boven de grensspanning ontbreekt. Verder is er in dit model reeds bij een minimale spanningstoename volledige kruip op, waardoor de uitkomsten sterk afhankelijk zijn van aannamen met betrekking tot belasting en spannings spreiding: midden onder een ophoging maakt dit geen verschil, terwijl aan de rand van een ophoging een plotselinge sprong optreedt.

De methode Koppejan en het Isotachenmodel zijn beide geschikter voor de Nederlandse situatie. Met de methode Koppejan bestaat ruime ervaring, terwijl de meest relevante fenomenen in deze empirische methode verwerkt zijn. Het Isotachen model is beter onderbouwd en werkt in principe nauwkeuriger, maar er bestaat (voorlopig) minder ervaring mee. Deze beide modellen worden in dit hoofdstuk nader toegelicht.

Voor alle methoden, afgezien van de meest eenvoudige, geldt dat een duidelijke verbetering van de nauwkeurigheid kan worden bereikt als er rekening wordt gehouden met het veranderende volumegewicht van grond en ophoogmateriaal wanneer dit onder de grondwaterspiegel zakt. Dit is dan ook terug te vinden in tabel 8 (paragraaf 4.3.1).

Het eigenschappen, de voordelen en de nadelen van Koppejan model en het isotachenmodel worden nader beschreven in paragrafen 5.2 en 5.3. Meer informatie over de angelsaksische methode, de NEN methode en de formule van Terzaghi is te vinden in CROW (2003).

5.2 Model Terzaghi / Keverling Buisman, methode Koppejan

In Nederland wordt voor zettingsberekeningen vaak de methode Koppejan (Koppejan, 1948) gehanteerd. Deze methode is in het buitenland echter nauwelijks bekend. De methode combineert de theorie van Terzaghi (Terzaghi, 1925) voor primaire zetting en de theorie van Keverling Buisman (Keverling Buisman, 1940) voor seculaire zetting. In dit hoofdstuk wordt het model uitgelegd en wordt aangegeven waar de belangrijke afwijkingen zijn met het NEN model (NEN, 1991).

Een belangrijk verschil van de methode Koppejan met andere methoden zoals de NEN methode en de Angelsaksische methode is de manier waarop kruip beschreven wordt. In de theorie van Keverling Buisman neemt de kruip al een aanvang direct na het aanbrengen van de belasting, in andere theorieën wordt vaak aangehouden dat de kruip pas begint nadat de grond volledig is geconsolideerd. In de NEN methode wordt aangenomen dat de volledige kruip instantaan optreedt. Hierdoor is de NEN methode niet geschikt voor het bepalen van het tijd-zettingsverloop maar alleen voor het bepalen van de eindzetting. Verder is in de methode Koppejan is de kruip niet alleen een functie van de tijd, maar ook van spanning. In andere beschrijvingen wordt de kruip onafhankelijk van de spanning verondersteld, waardoor ook bij een kleine belasting de volledige kruip in rekening wordt gebracht. Ook bij de NEN methode is dit het geval. Bij de slappe, humeuze, grondsoorten die in Nederland veelvuldig voorkomen kunnen over het algemeen aanzienlijke zettingen optreden als gevolg van kruip.

Een wiskundige beschrijving van het Koppejan model ziet er als volgt uit:

$$\frac{\Delta h}{h} = \left[\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_s} \log(t) \right] \ln \left(\frac{p_g - s_0}{s_0} \right) + \left[\frac{1}{C'_p} + \frac{1}{C'_s} \log(t) \right] \ln \left(\frac{s_i - p_g}{p_g} \right)$$

waarin:

- Δh = zetting maaiveld (meter)
- h = oorspronkelijke laagdikte (meter)
- C_p = primaire samendrukkingsconstante voor de grensspanning
- C_s = seculaire samendrukkingsconstante voor de grensspanning
- C'_p = primaire samendrukkingsconstante na de grensspanning
- C'_s = seculaire samendrukkingsconstante na de grensspanning
- t = tijdstip na aanbrengen van belasting (dagen)
- σ_i = korrelspanning na belasting (kN/m^2)
- σ_0 = initiële korrelspanning (kN/m^2)
- p_g = grensspanning (kN/m^2)

Zoals uit de voorgaande formule duidelijk blijkt, zijn de stijfheidsparameters vóór en na de grensspanning verschillend. Hierin verschilt de methode ook van de NEN methode. In de NEN norm (NEN 5118) wordt wel vermeld hoe de grensspanning bepaald moet worden, maar niet hoe het verschil in stijfheid voor en na de grensspanning in rekening moet worden gebracht.

Belangrijk in de berekening van de zettingen met behulp van de methode Koppejan, is de aanname dat de extra samendrukking door een belastingtoename onafhankelijk is van de tijd die de vorige belastingen hebben gewerkt. Dit wordt het superpositiebeginsel genoemd. Hoewel deze werkwijze logisch lijkt, blijkt het grondgedrag anders te zijn en blijkt de tijdsduur van de voorgaande stappen wel degelijk een rol te spelen (Den Haan, 1991). Als gevolg van het superpositiebeginsel wordt met name de seculaire zetting overschat.

5.3 Het a-b-c isotachen model

Hoewel het Koppejan model het meest gebruikte model in de Nederlandse geotechnische praktijk is voor het bepalen van zettingen, is reeds lange tijd bekend dat het model onnauwkeurig is. Een aantal van deze onnauwkeurigheden kwamen in het vorige hoofdstuk al naar voren. In het gebied van de maagdelijke spanning bijvoorbeeld, is in de praktijk vaak te zien dat de relatie tussen de rek en de natuurlijke logaritme van de normaalspanning niet lineair is. Dit effect is sterker bij slappere grondsoorten.

Het a-b-c isotachen model is ontwikkeld om de beschrijving van het consolidatiegedrag van vooral ook slappe grond te verbeteren. Het model gaat ervan uit dat de kruipreksnelheid wordt bepaald door de huidige in-situ spanning en rek. Deze relatie wordt beschreven door de parameters b en c . Directe compressie na een spanningstoename wordt beschreven door de parameter a . Hieruit volgt de naam van het model, het *a-b-c* model. (Den Haan, 1994)

Een belangrijk verschil met de voorgaande modellen is dat het isotachenmodel uitgaat van een andere definitie van rek. De voorgaande modellen gaan allen uit van lineaire rek, dat wil zeggen dat de rek wordt uitgedrukt in de verhouding van de verkleining van het grondelement ten opzichte van de oorspronkelijke hoogte van het grondelement. Door de lineaire rek te vervangen door *natuurlijke* rek wordt ook in het maagdelijke spanningstraject een min of meer lineaire relatie gevonden. Natuurlijke rek wordt gegeven door:

$$e^H = -\ln(1 - e^C)$$

Hierin is ϵ^H de natuurlijke (of Hencky) rek en ϵ^C de lineaire (of Cauchy) rek. Het grote voordeel om te werken met natuurlijke rek boven lineaire rek wordt zichtbaar bij grote vervormingen. De voorgaande modellen gaan uit van een kleine spanningstoename en daarmee van kleine rekken. Indien toch grote spanningstoename in rekening wordt gebracht, kunnen er rekken worden berekend van 100% of groter. Door gebruik te maken van natuurlijke rekken wordt dit probleem voorkomen.

Een tweede belangrijk verschil met de voorgaande modellen is dat het is gebaseerd op vervormingssnelheden in plaats van absolute vervormingen. Dit sluit beter aan bij de fysische werkelijkheid, waarin de 'oorspronkelijke laagdikte' in feite niet te bepalen is, omdat elk tijdstip daarvoor in zekere zin willekeurig is.

Een derde belangrijk verschil met de voorgaande modellen is het gebruik van intrinsieke tijd. In het Koppejan model wordt de oorsprong van de tijdsas (t_0) gesteld op het begin van de belastingsstap. Hierdoor ontstaat een lineair verband tussen de rek en de logaritme van de tijd. Dit levert echter een grote verstoring van de tijd-rekcurves als er geringe belastingsstappen worden toegepast, zoals bij rehabilitatie van wegen (Den Haan, 1994). Deze methode kan worden verbeterd door het invoeren van het concept intrinsieke tijd. De intrinsieke tijd is de tijd, die nodig zou zijn geweest voor het bereiken van het huidige volume indien de tegenwoordige spanning direct na sedimentatie was aangebracht. Dit betekent een verschuiving van de tijd volgens:

$$t = t - t_r$$

De helling van de (lineaire) $\epsilon^H - \ln(\tau)$ grafiek wordt c genoemd, de *natuurlijke seculaire compressie index*.

Door het gebruik van deze eigenschappen kan het consolidatieproces nauwkeuriger worden beschreven. Er worden twee relaties ontwikkeld, één voor directe compressie en één voor kruip. Voor directe compressie en de bijbehorende reksnelheid geldt:

$$e_d^H = a \ln\left(\frac{s'_v}{s'_{v0}}\right) \quad \dot{e}_d^H = \frac{a}{s'_v} \dot{s}'_v$$

Uit de vergelijking voor de reksnelheid volgt dat de toename van de directe rek in de tijd gelijk is aan de toename van de effectieve verticale spanning in de tijd. Zodra de verticale spanning niet meer toeneemt, neemt de directe rek ook niet meer toe.

Voor kruip geldt:

$$e_s^H = (b - a) \ln(s'_v / s'_{v0}) + c \ln(t / t_0)$$

Zodat de totale zetting wordt:

$$e^H = e_d^H + e_s^H$$

Hierin is:

- ε^H = totale rek
- ε_d^H = rek als gevolg van directe compressie
- ε_s^H = rek als gevolg van kruip
- σ'_v = verticale effectieve spanning
- σ'_{v0} = grensspanning
- τ = intrinsieke tijd
- τ_0 = initiële intrinsieke tijd
- a, b, c = modelparameters

Naast de genoemde fundamentele verbeteringen ten opzichte van het Koppejan model zijn er nog een aantal belangrijke bijkomende verbeteringen. Een zeer belangrijke verbetering van het isotachenmodel ten opzichte van het Koppejan model is de mogelijkheid om met de spanningsonafhankelijke c te rekenen. De parameter in het Koppejanmodel die de kruipreksnelheid bepaalt, C_s' , is namelijk wél spanningsafhankelijk, terwijl dit in het model niet wordt meegenomen. Dit zorgt er ook voor, dat in het laboratorium bepaalde waarden van C_s' sterk afhankelijk zijn van de spanning waarbij de laboratoriumproeven zijn uitgevoerd (zie bijvoorbeeld Greeuw *et. al.*, 2002).

Een andere belangrijke verbetering van het isotachenmodel ten opzichte van het Koppejan model is, dat het mogelijk is om te rekenen met een rekafhankelijke doorlatendheid. Tijdens het verloop van de consolidatie treden de zettingen op voornamelijk als gevolg van het dicht drukken van de poriën. Dit leidt tot een afname van de doorlatendheid en tegelijkertijd tot een toename van de stijfheid van de grond. In het Koppejan model wordt aangenomen dat beide effecten elkaar in evenwicht houden waardoor tijdens de consolidatiefase de c_v waarde min of meer constant blijft. Bij kleine vervormingen is deze aanname vaak nog wel gerechtvaardigd. Maar bij grote rekken of grondsoorten waarbij de verandering van de doorlatendheid en stijfheid van de grond sterk niet-lineair met de effectieve spanning verloopt zal de c_v waarde niet constant blijven (zie bijvoorbeeld Nishimura, 2000). Rekenen met een constante c_v levert dan een onnauwkeurige voorspelling van het tijd-zettingsverloop. Dit probleem speelt voornamelijk bij zeer slappe grond. Met het isotachenmodel en Msettle is het mogelijk op correcte wijze met een rekafhankelijke doorlatendheid te rekenen. De doorlatendheid-rekrelatie kan met de standaard samendrukkingsproef en de K0-CRS proef bepaald worden.

De parameters a , b en c kunnen uit een standaard samendrukkingsproef worden bepaald. In een standaard samendrukkingsproef wordt de samendrukking in een aantal belastingsstappen bewerkstelligd. In het isotachenmodel wordt echter gebruik gemaakt van vervormingssnelheden. Een

betere aansluiting tussen het model en de samendrukkingsproef wordt gevonden indien geen constante belasting maar een constante vervormingssnelheid wordt voorgeschreven. Een dergelijk apparaat waarmee dit gerealiseerd kan worden is het K0-CRS apparaat. Het apparaat en zijn werking zijn beschreven door Van (2002) en Den Haan (2001).

5.4 Conclusies en aanbevelingen keuze rekenmodel

Voor zettingsprognoses ten behoeve van rehabilitatie van voorzieningen op zeer slappe bodem is een zettingsmodel vereist dat goed om kan gaan met voornamelijk kruip en het effect van verschillende opeenvolgende belastingstappen.

De (met kruip uitgebreide) formule van Terzaghi en de Angelsaksische methode of NEN methode zijn niet geschikt voor het maken van nauwkeurige tijd-zettingsprognoses op zeer slappe ondergrond. De NEN methode kan gebruikt worden voor de bepaling van de eindzetting, maar niet voor het tijd-zettingsverloop. Betere modellen hiervoor zijn het Koppejan model en het isotachenmodel

Met het isotachenmodel is het tijd-zettingsverloop theoretisch nauwkeuriger te voorspellen dan met het Koppejan model. Verbeteringen ten opzichte van het Koppejan model zijn onder andere:

- Gebruik van natuurlijke rek in plaats van lineaire rek, wat nauwkeuriger resultaten oplevert bij grote vervormingen;
- Gebruik van intrinsieke tijd waardoor verschillende belastingsstappen goed gemodelleerd worden;
- Mogelijkheid voor het rekenen met een rekafhankelijke doorlatendheid, waardoor het tijd-zettingsverloop beter gemodelleerd kan worden;
- Eenvoudiger en spanningsonafhankelijke parameters, waardoor de modelfout en de fout als gevolg van parameterbepaling afneemt.

Ondanks deze resultaten wordt in tabel 8, paragraaf 4.3.1 geen onderscheid gemaakt tussen de Koppejan methode en het isotachenmodel. Omdat er al meer dan 60 jaar ervaring is met het Koppejan model in de geotechnische adviespraktijk kunnen ervaren adviseurs met dit model, en met vuistregels, rektrucs en aanpassingen aan het model relatief nauwkeurige berekeningen maken waardoor de meerwaarde van het isotachenmodel kleiner wordt. Op dit moment zijn er nog weinig adviseurs die ervaring hebben met het isotachenmodel en er is daardoor ook nog relatief weinig gevoel voor de parameters in dit model. De verwachting is dat dit in de komende jaren zal veranderen en dat het isotachenmodel over een aantal jaar duidelijk de voorkeur zal genieten boven het Koppejan model.

Samenvattend komt de keuze tussen het Koppejan model en het isotachenmodel, op basis van theoretische gronden en literatuuronderzoek, neer op het volgende. Kies voor het isotachenmodel, tenzij er al een goede gegevensset voor het project is gebaseerd op het Koppejan-model.

6 Conclusies

In dit hoofdstuk zal worden geëvalueerd in hoeverre het doel van fase 1 is gehaald. Hiervoor is het handig de doelstelling nog eens te herhalen. Het doel van fase 1 is om praktische beheersinstrumenten te ontwikkelen waarmee:

1. Het moment voorspeld kan worden wanneer bestaande voorzieningen op slappe bodem gerehabiliteerd moeten gaan worden.

Hiervoor is een systematiek gegeven waarmee met een minimale inspanning, namelijk het met enige regelmaat meten van de opgetreden zettingen, een vrij nauwkeurige inschatting gemaakt kan worden van het toekomstige tijd-zettingsverloop en daarmee het moment van rehabilitatie.

2. De nauwkeurigheid van een zettingsprognose ten behoeve van rehabilitatie van voorzieningen op slappe bodem kan worden ingeschat;

Een nieuwe methodiek, de DOS-systematiek, is opgezet om een kwantitatieve inschatting te kunnen maken van de nauwkeurigheid van een tijd-zettingsprognose. De DOS-systematiek is een instrument waarmee een beheerder van voorzieningen op slappe grond stap voor stap kan nagaan hoe nauwkeurig een zettingsprognose is en hoe deze met welke inspanningen nauwkeuriger gemaakt kan worden. De systematiek is samengevat in overzichtelijke stroomschema's.

3. Het meest geschikte zettingsmodel om de zettingsprognose (zie punt 2) mee op te stellen kan worden gekozen.

Op basis van literatuuronderzoek en theoretische afwegingen is gesteld dat het isotachenmodel het meest geschikte zettingsmodel is voor rehabilitatiesituaties voor wegen. Indien reeds een goede gegevensset aanwezig is voor het Koppejan-model en niet voor het isotachenmodel, dan kan uit kostenoverwegingen ook het Koppejan model gebruikt worden. De Terzaghi-methoden en de Angelsaksische en NEN-methoden zijn niet geschikt voor een nauwkeurige bepaling van het tijd-zettingsverloop in deze situaties.

7 Aanbevelingen

De DOS systematiek is gevalideerd in één case. Aanbevolen wordt de DOS-systematiek nog verder te valideren door het uitwerken en beoordelen van tenminste nog vier cases.

Een aandachtspunt bij het instrument om het rehabilitatiemoment te voorspellen is het moment van omschakeling van het Asaoka model op een loglineair model op basis van zettingsmetingen. Wellicht kan een indicatie van dit moment, oftewel van de hydrodynamische periode, gegeven worden op basis van indicatieve hydrodynamische perioden van enkele standaard boorprofielen.

In de in dit rapport gepresenteerde systematiek is impliciet gebaseerd op het oordeel van enkele experts van de projectgroep (voornamelijk gebaseerd op eigen ervaring en ervaring gerapporteerd in literatuur). Recentelijk is onderzoek gedaan naar toepassing van nieuwe technieken in de geotechniek, waarmee deze expertkennis expliciet gemodelleerd kan worden. Een voorbeeld van een dergelijke technieken zijn Bayesian Belief Networks (Bles, 2003), waarin door experts de effecten van onzekerheden gemodelleerd kunnen worden. Door het expliciet maken van de expertkennis wordt het systeem toegankelijker en wordt voortdurende verbetering (op basis van nieuwe expertkennis of praktijkobservaties) mogelijk. Een aanbeveling voor vervolgonderzoek is dan ook om de ontwikkelde systematiek in dergelijke technieken te vangen.

8 Referenties

- Adel, H. den & V. Trompille,
Validation Isotach model by means of 'Barendrechtse weg',
Delft Cluster deelrapport, GeoDelft nummer 720301/113, 2002.
- ARCADIS,
Toetsingsmodel ophogingen, toets vijf wegen,
ARCADIS Ruimtelijke Ordening, projectnummer 110403, 2002.
- Asaoka, A.,
Observational procedure of settlement prediction,
Soils and foundations Vol 18, No. 4, Dec, 1978.
- Bisschop, F., C. van Rhee & C. Nieuwenhuizen,
Beheersing restzetting,
Geotechniek (7) 2, april 2003, pp. 38 – 44, 2003.
- Bjerrum, L.
Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings,
Géotechnique 22 (2), pp. 81-118, 1972.
- Bles, T.
Risico's bij uitvoering paalfunderingen, Beslissingsondersteunend model, door identificatie, inschatting en afweging van risico's
Civiele Techniek, Universiteit Twente, 2003.
- Calle, E.O.F.,
Optimaliseren van grondonderzoek vraagt een heldere kansenanalyse,
Land + Water (11), pp. 36 – 38, 2002.
- CROW,
Beheerkosten weginfrastructuur,
publicatienummer 145, ISBN 90 6628 321 1, 2001.
- CROW,
Gevoeligheidsanalyse Zettingprognosen,
Conceptversie, juni 2003.2
- CUR,
C127 van Niks tot grondparametermatrix,
Conceptversie, CUR commissie C127, 24 april 2003.
- Den Haan, E.J.,
Machtsrelatie tussen spanning en soortelijk volume,
Land + Water 1991 (10), pp. 30-33, 1991.
- Den Haan, E.J.,
Vertical compression of soils,
Proefschrift TU Delft, Delft University Press, Delft, 1994.
- Den Haan, E.J., B.H.P.A.M. The, M.A. Van,
De K_0 CRS samendrukkingsproef,

Geotechniek 2001 (4), pp. 57-63, 2001.

Den Haan, E.J. & W.O. Molendijk,
Voorspelling restzetting met het a,b,c isotachenmodel. Betuweroute, km 16.7 en km 11.7,
Delft Cluster onderzoek 01.04.02-76, 2002.

Douwes Dekker, D.M.,
Soil Mechanics II,
Collegedictaat, ITC-Delft, Delft, Nederland, 1991.

Dykstra, C.J. & A.G. Joling,
Praktijkwaarde consolidatiecoëfficiënt bepaald met Asaoka-methode,
Geotechniek 2001 (2), 2001.

Graetinger, A.J. & C.H. Dowding,
Quantifying exploration sufficiency while accomodating judgment,
Mathematical Geology, Vol. 33, No 2, 2001.

Greeuw, G., E.P. Grünwald & W. Lous,
Ringonderzoek samendrukkingsproef,
Geotechniek 2002 (3), 2002.

Hölscher, P. & G.H. Wijnants,
HerMes, HEt Rationele Monitoring Evaluatie Systeem,
Delft Cluster onderzoek 01.01.07-10.

Keverling Buisman, A.S.,
Grondmechanica,
Waltman Delft, Delft, 1940.

Koppejan, A.W.,
A formula combining the Terzaghi load compression relationship and the Buisman secular time effect,
in *Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Rotterdam 3*, pp. 205-212, 1948.

Lambe, T.W.,
Predictions in soil engineering,
Géotechnique 23, No. 2, pp. 149-202, 1973.

Luger, H.J. & A.H. Nooy van der Kolff,
Geotechnical design and behavior of the Kerith breakwater,
in: *Proc. XIIth Eur. Conf. Soil. Mech. and Found. Eng.*, Balkema, Rotterdam, 1999.

NEN,
Geotechniek TGB 1990 Basiseisen en belastingen,
NEN norm 6740, 1991a.

NEN,
Geotechniek, Bepaling van de een-dimensionale samendrukkings-eigenschappen van de grond,
NEN norm 5118, 1991b.

NEN,
Geotechniek, Berekeningsmethode voor funderingen op staal,
NEN norm 6744, 1991c

Nishimura, S., K. Shimada & H. Fujii,
Stochastic non-linear consolidation model and its application to back analysis of soft ground,
in: *Proc. 8th Int. Conf. Applications Statistics Probability, ICASP 8*, Sydney, 2000.

Terzaghi, K.,
Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage,
F. Deuticke, Leipzig, 1925.

Van, M.A.,
Zettingsvoorspelling voor consolidatieversnellende grondverbeteringstechnieken,
Wegbouwkundige Werkdagen 2002, deel 2, pp. 163-175, CROW, Ede, 2002.

Bijlage 1. De Asaoka methode

Om de traditionele zettingsvergelijkingen op te lossen, is het normaal gesproken nodig om de volgende randvoorwaarden te kennen: de initiële verdeling van de wateroverspanning, de afstromingslengte, de uiteindelijke verticale spanningen en de consolidatiecoëfficiënt (Asaoka, 1978).

Een zettingsvergelijking oplossen betekent dus een grote inspanning leveren om de bovengenoemde randvoorwaarden te bepalen. Deze inspanning bestaat doorgaans voor een groot deel uit veld- en laboratoriumonderzoek. De Asaoka methode is een manier om op een eenvoudige wijze het tijd-zettingsverloop te bepalen met een minimum aan vereiste randvoorwaarden.

B 1.1 Hoofdvergelijking

Het startpunt van de methode is Misaki's (Misaki, 1963) vergelijking:

$$\dot{e} = c_v e_{zz}$$

[8.1]

Deze vergelijking wordt gebruikt in plaats van die van Terzaghi (Terzaghi, 1925) vanwege een tweetal redenen. Ten eerste is het gemakkelijk met deze vergelijking zettingen uit te drukken. Ten tweede is de vergelijking ook geldig als de coëfficiënten van zowel volumecompressibiliteit als permeabiliteit variëren in de tijd (mits de consolidatiecoëfficiënt constant blijft) (Misaki, 1963).

De zetting van een samendrukbare laag kan worden beschreven door (Asaoka, 1978):

$$r(t) = \int_0^H e(t, z) dz$$

[8.2]

Asaoka (1978) heeft aangetoond, dat vergelijking [8.1] en vergelijking [8.2], onder enkele hier niet nader genoemde aannamen, gecombineerd kunnen worden tot de volgende n^e orde benadering:

$$r + c_1 \dot{r} + c_2 \ddot{r} + \mathbf{K} + c_n {}^{(n)}r = C$$

[8.3]

waarin c_1, c_2, \dots, c_n onbekende constanten zijn. Dit is de hoofdvergelijking voor zetting in de Asaoka methode. De grafische methode, die hier beschouwd wordt, is een specifieke toepassing van deze hoofdvergelijking.

B 1.2 Grafische methode

Als nu een discrete tijd geïntroduceerd wordt als $t_j = \Delta t \cdot j$, dan kan vergelijking [8.3] worden gereduceerd tot:

$$r_j = b_0 + \sum_{s=1}^n b_s r_{j-s}$$

[8.4]

waarin ρ_j een afkorting voor $\rho(t_j)$ is. De grafische methode Asaoka, die hier beschouwd wordt, is een eerste orde benadering van de bovenstaande vergelijking:

$$r_j = b_0 + b_1 r_{j-1}$$

[8.5]

Als de uiteindelijke zetting ρ_f een zekere waarde $c > 0$ is, dan geldt dat

$$r_f = \frac{b_0}{1 - b_1}$$

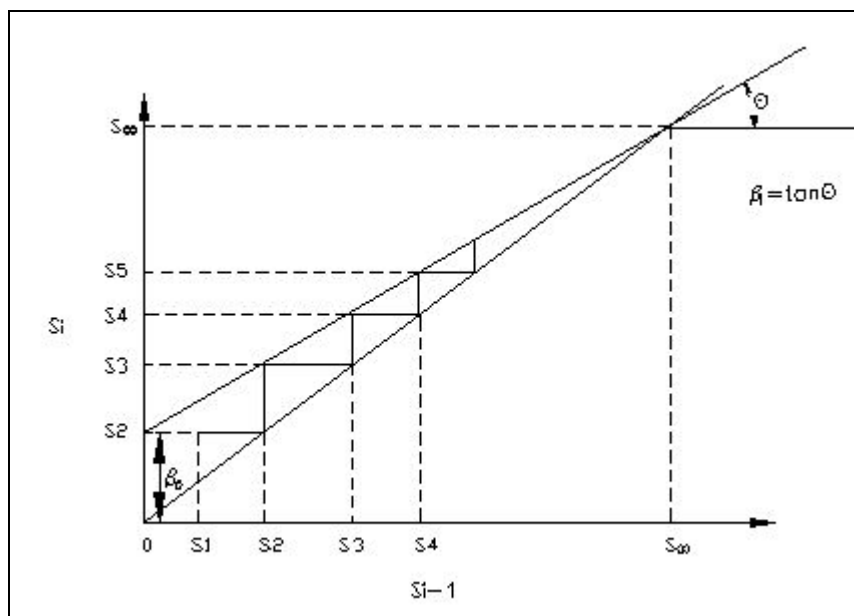
[8.6]

Ook geldt voor de zetting op tijd t_j dat

$$r_j = r_f - \{r_f - r_0\}(b_1)^j$$

[8.7]

Dus door de coëfficiënten β_0 en β_1 te bepalen kan de eindzetting bepaald worden en de zetting op elk willekeurig tijdstip t_j . De methode Asaoka gaat er van uit, dat de coëfficiënten β_0 en β_1 constant zijn, zodat een plot van zettingsmetingen ρ_{i-1} tegen ρ_i punten op een rechte lijn opleveren. Deze lijn wordt de Asaoka-lijn genoemd.



Figuur 2: Grafische methode Asaoka (1978), $r_{i-1} = S_{i-1}$ en $r_i = S_i$

Het snijpunt van de Asaoka-lijn met de $\rho_I = 0$ as levert de coëfficiënt β_0 . De richtingscoëfficiënt van de lijn is β_1 . Het snijpunt van de Asaoka-lijn met de lijn $\rho_{I-1} = \rho_I$ is de eindzetting ρ_f .

B 1.3 Afleiding van de consolidatiecoëfficiënt

Het is mogelijk om met behulp van de β_0 , bepaald met de grafische methode van Asaoka, de equivalente consolidatiecoëfficiënt c_v te bepalen. Menard *et al.* (1980) geven daarvoor de volgende vergelijking:

$$c_{v,eq} = -\ln(b_0) \frac{4H^2}{p^2 \Delta t} \quad ; U > 0,50$$

[8.8]

Ook hebben zij aangetoond dat vergelijking [3.1] geldt voor radiale consolidatie. De equivalente horizontale consolidatiecoëfficiënt kan ook bepaald worden. Hiervoor geven zij de volgende relatie:

$$c_{h,eq} = -\ln(b_0) \frac{mD^2}{8\Delta t}$$

[8.9]

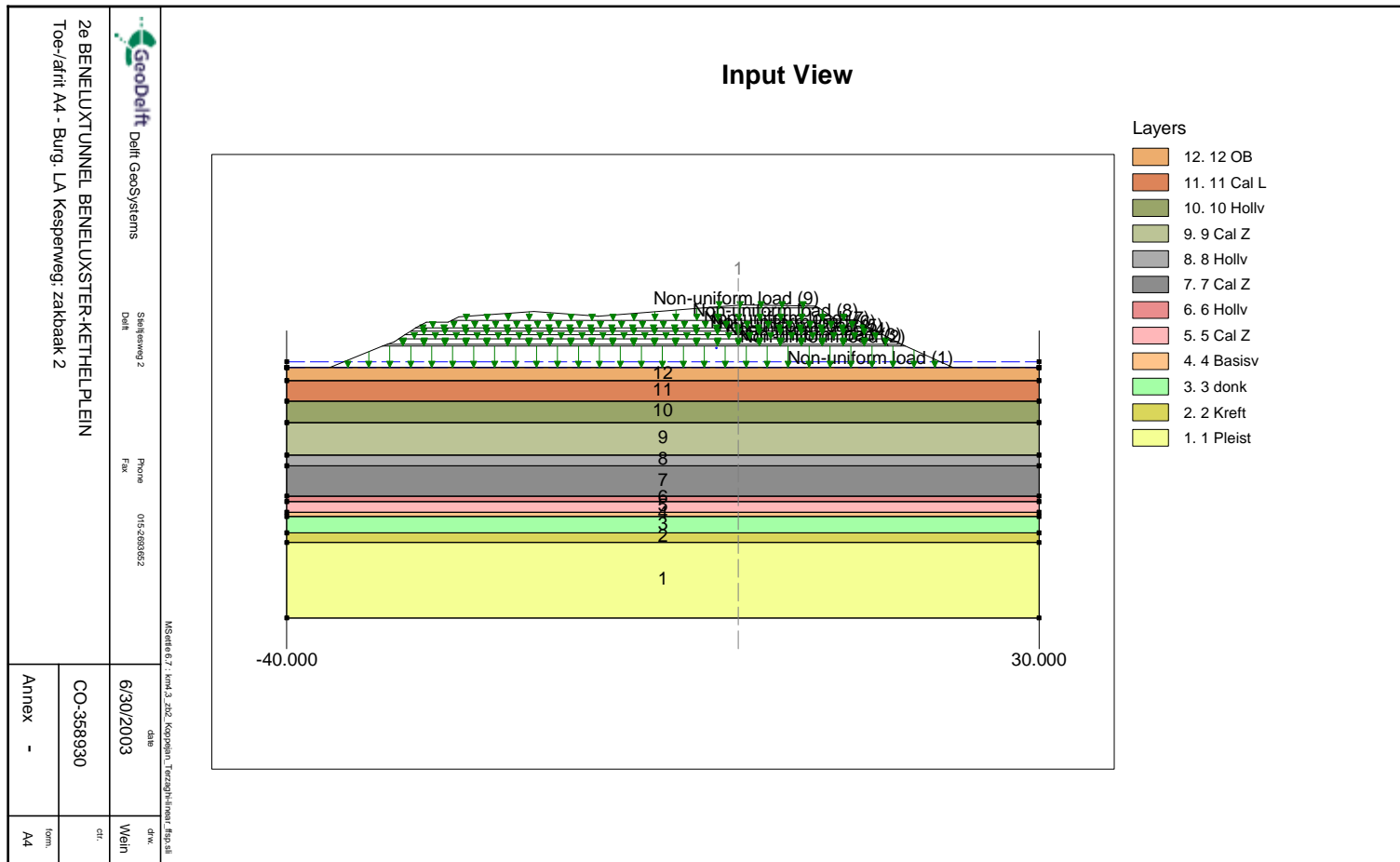
Dykstra *et al.* (2001) geven aan dat de combinatie van vergelijkingen [8.6], [8.8] en [8.9] in feite een andere formulering van de theorie van Terzaghi voor verticale consolidatie ($U > 0,50$) respectievelijk de theorie van Kjellman voor radiale consolidatie is. Dykstra *et al.* (2001) gebruiken de waarden van $c_{v,eq}$ en $c_{h,eq}$ berekend met de methode Asaoka om de ontwerpwaarden hiervoor, bepaald met laboratoriumproeven, te vergelijken met de werkelijkheid. De werkelijke c_v waarden bleken in hun studie een factor 3 hoger dan de ontwerpwaarden.

B 1.4 Waarde van de berekende consolidatiecoëfficiënt voor zettingsgedrag na rehabilitatie

Zoals in de vorige paragraaf beschreven kan met de methode Asaoka ook de consolidatiecoëfficiënt worden teruggerekend. Het is wellicht verleidelijk deze $c_{v,eq}$ zonder meer toe te passen bij de zettingsprognose voor de situatie na rehabilitatie. De toepasbaarheid van de bepaalde $c_{v,eq}$ hiervoor is echter zeer beperkt. Bij grote rekken of grondsoorten waarbij de verandering van de doorlatendheid en stijfheid van de grond sterk niet-lineair met de effectieve spanning verloopt zal de c_v waarde niet constant blijven (zie bijvoorbeeld Nishimura, 2000). Rekenen met een constante c_v levert dan een onnauwkeurige voorspelling van het tijd-zettingsverloop. Dit probleem speelt voornamelijk bij zeer slappe grond. Hoewel dit effect bij een (geringe) ophoging wellicht niet zeer groot zal zijn, zal bij het aanbrengen van de nieuwe belasting het tijd-zettingsgedrag anders zijn dan bij de eerdere belasting. Dit is bijvoorbeeld ook te zien in Dykstra *et al.* (2001) in figuur 6. Hierin zijn Asaoka-lijnen te construeren voor verschillende ophoogslagen voor het ophogen van een aarden baan van de Betuweroute. Af te leiden is, dat de verschillende Asaoka-lijnen een verschillende waarde van β_0 hebben. Bij aanbrengen van de tweede belastingslag is de dikte van het slappe lagenpakket ook afgenomen zijn door zetting als gevolg van de eerste slag. Dit zijn beide parameters in de formule om $c_{v,eq}$ af te leiden (zie vergelijking [8.8]). De c_v -waarde voor het voorspellen van het tijd-zettingsgedrag van de tweede ophoogslag is daardoor verschillend van die van de eerste ophoogslag.

Bijlage 2. Case “Beneluxtunnel”

Bij GeoDelft zijn zakbaakmetingen en de belastingsgeschiedenis bekend van een project waarbij een aardebaan is aangelegd voor een toe- en afrit voor de A4 ter hoogte van de Beneluxster. Om de consolidatie te versnellen is in dit project gebruik gemaakt van verticale drainage. De laatste ophoogslag is 265 dagen na de eerste ophoogslag aangebracht op 5,3 meter boven maaiveld. De zettingen zijn gemeten tot 618 dagen na het aanbrengen van de eerste slag en bedroegen toen ongeveer 4 meter. Met behulp van de methode Koppejan en de “zakbaakfitmodule” uit Msettle 6.7 is de verwachte eindzetting op 4,41 meter voorspeld (fitfactor 0,99). Op de volgende pagina is in Figuur 3 een schematisatie van de situatie gegeven.

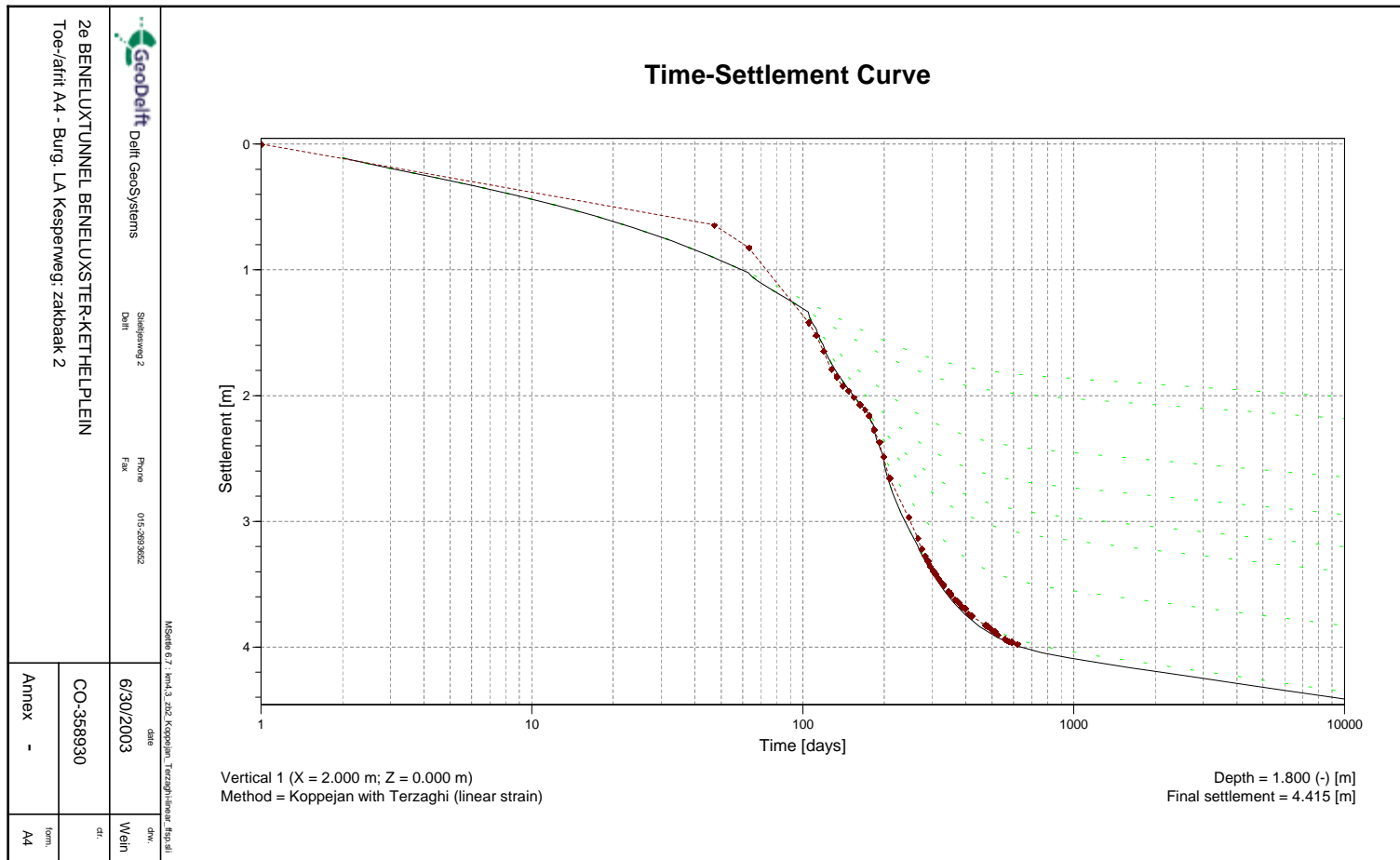


Figuur 3: Schematisatie van de situatie in MSettle 6.7

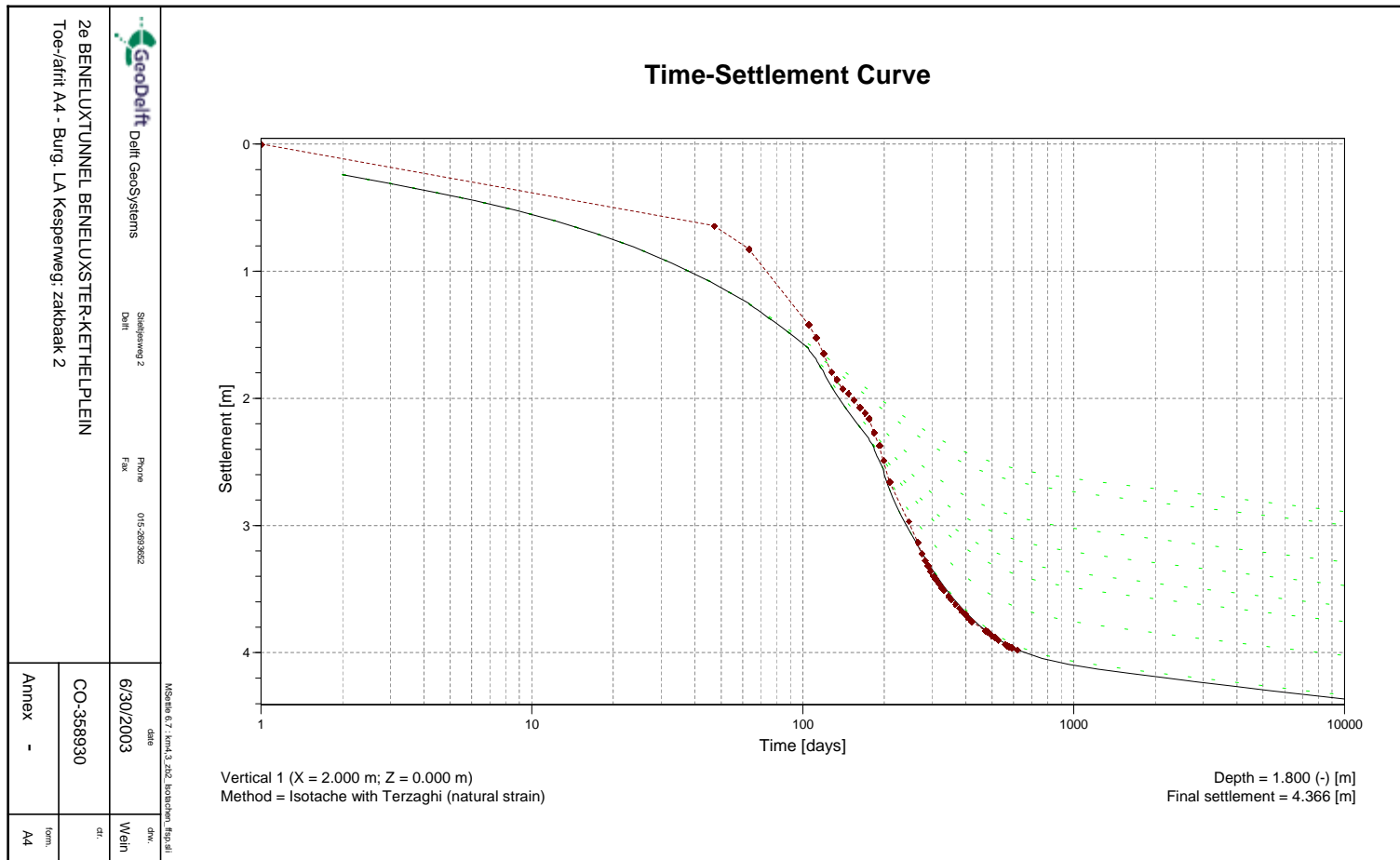
B 2.1 Vergelijk tussen het Koppejan en het isotachenmodel

Zoals op de bijgevoegde figuur is te zien, beschrijft de aan de metingen gefitte methode Koppejan de metingen erg goed. De metingen lopen echter niet door tot de kruiptak, zodat over de nauwkeurigheid waarmee de seculaire tak beschreven wordt weinig gezegd kan worden. Uit de theorie is bekend dat de methode Koppejan, zeker bij het aanbrengen van meerdere belastingstappen, te veel kruip voorspelt (zie paragraaf 5.2).

Dezelfde situatie is in Msettle ook doorgerekend met het isotachenmodel. Hierbij moesten wel enkele vereenvoudigingen aangebracht worden, omdat de materiaalparameters benodigd in het isotachenmodel destijds niet bepaald waren. De laagopbouw uit de schematisatie is vervangen door een equivalente laag. Doordat dan slechts één set isotachenparameters gefit hoeft te worden is de kans op een goede fit groter. Ook de meer geavanceerde mogelijkheden van het isotachenmodel, zoals rekafhankelijke doorlatendheid, zijn niet gebruikt. Desondanks wordt er een zeer goede fit aan de meetdata gevonden (fitfactor 0,99) en wordt een kleinere eindzetting voorspeld als met de methode Koppejan gefit aan de zakbaakmetingen, namelijk 4,37 meter.



Figuur 4: Zakbaakfit van het Koppejan model aan zettingsmetingen met behulp van MSettle 6.7



Figuur 5: Zakbaakfit van het isotachenmodel aan zettingsmetingen met behulp van MSettle 6.7

B 2.2 De Asaoka methode

De case “Beneluxtunnel” is gebruikt om de nauwkeurigheid en de beperkingen van de Asaoka methode te onderzoeken. Over de toepasbaarheid van het Asaoka model moeten de volgende onzekerheden onderzocht worden:

- Hoe goed kan de methode het tijd-zettingsverloop voorspellen tot het moment dat het tijd-zettingsverloop door kruip gedomineerd wordt
- Hoe goed kan de methode het tijd-zettingsverloop voorspellen in de kruptak en bij kleine verschilzettingen?
- Welk meetinterval moet aangehouden worden?

B 2.3 Nauwkeurigheid van de Asaoka methode tijdens consolidatie

In literatuur werd de verwachting gewekt dat de Asaoka methode, zelfs bij aanwezigheid van kruipgevoelige grondlagen, in staat is om het tijd-zettingsverloop tijdens de consolidatieperiode vrij nauwkeurig te voorspellen. Om dit te controleren is het tijd-zettingsverloop bepaald door de Asaoka methode toe te passen op de zakbaakmetingen van de Beneluxroute bij verschillende tijdstappen. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel:

dt	t0 (dag)	Z ₁₀₀ (m)	c _v	afw (% / dagen)
25	295	3.95	0.222	1.57 / 248
25	370	3.90	0.308	2.11 / 173
25	445	4.05	0.170	0.16 / 98
50	295	3.96	0.222	1.22 / 173
50	445	3.98	0.449	0.14 / 23
100	100	4.42	0.137	5.81 / 223
100	200	3.92	0.249	1.95 / 123

Tabel 12: Resultaten Asaoka methode: eindzetting, consolidatiecoëfficiënt en nauwkeurigheid

Doordat een consolidatieversnellende methode gebruikt is, wordt het einde van de consolidatie al bereikt na ongeveer 600 dagen. De laatste slag werd na zo'n 175 dagen pas aangebracht, waardoor dit deel van het onderzoek zich alleen op de overige 425 dagen kan richten. In de tabel is te zien dat de slagen afzonderlijk geanalyseerd dienen te worden; de afwijking van de voorspelling waarbij ook metingen van de eerdere slagen zijn meegenomen (dt=100, t0=100 dagen) is een factor 2 hoger dan bij de voorspellingen waar alleen metingen van de laatste slag zijn gebruikt.

Ongeacht welke tijdstap is gebruikt en hoe ver vooruit voorspeld wordt volgt het door de Asaoka voorspelde tijd-zettingsverloop de gemeten tijd-zettingsverloop goed tot t=618 dagen. In deze tijd treedt 0,60 meter zetting op. De met de methode voorspelde eindzetting is gemiddeld 3,96 meter met een standaardafwijking van 0,05 meter. Dit is dus 0,46 meter lager dan de eindzetting berekend met de methode Koppejan en 0,40 meter lager dan de eindzetting berekend met het isotachenmodel. De Asaoka methode zou theoretisch de invloed van kruip in de kruptak moeten onderschatten, zodat hiermee de verschillen verklaard kunnen worden.

B 2.4 Nauwkeurigheid van de Asaoka methode in de kruptak

Aangezien de methode Asaoka een andere manier is om de vergelijking van Terzaghi te beschrijven, wordt kruip door de Asaoka methode niet goed gemodelleerd. Bij zeer slappe grond kunnen als gevolg van kruip echter nog aanzienlijke vervormingen optreden. Onderzocht is, hoe geschikt de

methode Asaoka is voor toepassing in de kruiptak. Als alternatief voor het gebruik van de Asaoka methode wordt voorgesteld om de metingen in de tijd op logschaal lineair te extrapoleren. Aangezien er geen metingen van zettingen voorhanden zijn waarbij kruip domineert, is besloten om de Koppejan zakbaakfit aan de zakbaakmetingen te gebruiken als te voorspellen tijd-zakkingsgedrag. Vanuit deze zakbaakfit zijn punten gedigitaliseerd en gebruikt als invoer voor het Asaoka model.

dt	t0 (dag)	Z ₁₀₀ (m) Asaoka	Z ₁₀₀ (m) loglineair	c _v Asaoka
100	700	4.12	5.01	0.107
200	800	4.19	4.80	0.044
200	2000	4.24	4.45	0.059
400	2000	4.33	4.45	0.016
1000	2000	4.39	4.45	0.009
400	4000	--	4.42	--

Tabel 13: Vergelijking tussen Asaoka methode en loglineaire extrapolatie in de kruiptak

Zoals verwacht neemt de betrouwbaarheid van de linearisering op log(t)-schaal toe in de tijd en benadert het tijd-zettingsverloop van de conservatieve kant. Om dit te zien in de resultaten in Tabel 13 moet worden bedacht dat de te voorspellen zetting 4.41 meter is. De methode Asaoka lijkt op basis van de berekende eindzetting ook een steeds betere voorspelling te geven naarmate verder in de kruiptak gemeten wordt, maar er kleven toch twee grote nadelen aan het gebruik van deze methode in de kruiptak. Ten eerste benadert het de eindzetting door steeds meer zettingen te voorspellen. Dit maakt planning van rehabilitatieschema's lastig omdat er aanvankelijk wellicht helemaal geen interventiemoment voorspeld wordt. Bij gebruik van de linearisatie is tenminste het moment bekend wanneer op zijn laatst, namelijk indien de linearisatie de werkelijkheid perfect benadert, gerehabiliteerd zal moeten worden. Ten tweede wordt het tijd-zettingsverloop niet goed benaderd. De methode probeert de meetpunten te fitten aan de vergelijking van Terzaghi. Indien de hoeveelheid zetting door kruip erg klein is, zal de methode de meetpunten zo fitten dat ze in de asymptotische tak liggen. Dit is bijna een rechte lijn, waardoor de afwijkingen niet zo groot zijn. Er kunnen wel rekenkundige problemen ontstaan waardoor de methode niet goed meer werkt. Een voorbeeld hiervan is de laatste rij uit de voorgaande tabel. Als er echter wel een aanzienlijke zetting door kruip optreedt, zoals bij zeer slappe grond gewoon is, dan zijn de afwijkingen aanzienlijk en is de methode onbetrouwbaar.

Aanbevolen wordt dan ook om de zettingen in de kruiptak op logaritmische tijdschaal lineair te extrapoleren.

B 2.5 Methode Asaoka bij kleine zettingsverschillen

De Asaoka methode kan ook minder goed worden gebruikt als de zettingsverschillen tussen twee metingen klein zijn. De invloed van meeton nauwkeurigheden kan dan zo groot worden dat er onrealistische waarden voorspeld worden. Bij het uitwerken van deze case bleek dat dit probleem optreedt als de zettingsverschillen minder dan 2 à 3 centimeter bedragen bij een gemeten zetting van circa 3,5 tot 4,5 meter. Indien de zettingsverschillen kleiner zijn, dan zijn er drie mogelijke manieren om hier mee om te gaan:

- Het verdubbelen van de tijdstap door tussenliggende metingen weg te laten. Hierdoor nemen de zettingsverschillen toe en wordt de methode wellicht weer bruikbaar;
- Het gebruiken van meer meetpunten waardoor de meeton nauwkeurigheden uitgemiddeld worden;
- Het lineair extrapoleren van de zettingen op logaritmische tijdschaal. Dit is een conservatieve maar robuuste methode. Vaak treden kleine zettingsverschillen op in de kruiptak, waarvan in de vorige paragraaf al is aangegeven dat beter gelineariseerd kan worden.

B 2.6 Invloed van het meetinterval in de methode Asaoka

Uit de resultaten in de tabellen in de vorige paragrafen blijkt dat het meetinterval niet van grote invloed is op de uiteindelijke resultaten al levert een groter meetinterval (bij een gelijk aantal meetpunten) over het algemeen wel een iets grotere nauwkeurigheid. De zettingsmetingen moeten wel op een vast tijdsinterval gedaan worden. Dykstra (2001) heeft al aangetoond dat de invloed van een dag te vroeg of te laat inmeten bij een meetinterval van 20 dagen vervaarloosbaar is. Bij de uitwerking van deze case bleek dat ook een verschil van circa 4 dagen bij een meetinterval van 50 dagen geen noemenswaardig verschil maakt.

Bijlage 3. CROW-systematiek “nauwkeurigheid zettingsprognose”

In het onderzoek “Gevoeligheidsanalyse zettingsprognose (GZP) onderdeel nadere analyse foutenbronnen” (CROW, 2003) is een checklist met bijbehorende scorelijst gegeven waarmee de nauwkeurigheid van de zettingsprognose kan worden ingeschat voor een aantal situaties. Deze situaties zijn:

- integrale ophoging: prognose eindzetting
- integrale ophoging: prognose zettingsverloop – restzetting
- ophoging t.b.v. lijninfrastructuur: prognose eindzetting
- ophoging t.b.v. lijninfrastructuur: prognose zettingsverloop – restzetting

Voor de situatie die in dit onderzoek aan de orde is, rehabilitatie van infrastructuur op zeer slappe ondergrond, is deze checklist dus niet gemaakt. Er zijn wel zeer grote overeenkomsten tussen de situaties uit beide onderzoeken. Hier is een voorstel gedaan om de methodiek van het CROW (2003) aan te passen aan de rehabilitatiesituatie. Dit is gedaan door de scorekaart aan te passen en door een extra onderdeel, onderdeel g1, op te nemen in de checklist.

checklist		scorekaart
verkenning ondergrond (stap 2 en3)		
a1	hoeveelheid / soort onderzoek	
	a1a uitgebreid terrein en lab. werkzaamheden incl. geofysische metingen	
	a1b uitgebreid terrein en lab. werkzaamheden excl. geofysische metingen	
	a1c beperkt grondonderzoek	
	a1d enige sonderingen en archiefgegevens	
	a1e archiefgegevens	
a2	interpretatie er is gebruik gemaakt van	
	a2a ervaring in de omgeving	
	a2b geologische informatie, bv geotechnisch lengte profiel	
	a2c overig /niet	
schematisatie ondergrond (stap 2, 4 en 5)		
b1	de schematisatie van de grondlagen in maatgevend dwarsprofiel kent	
	b1a een grote mate van detaillering	
	b1b een grove laagindeling (dunne lagen zijn weggelaten)	
b2	De ligging van het freatisch niveau volgt uit:	
	b2a metingen en er is rekening gehouden met de invloed van de ophoging op de ligging van de freatische lijn	
	b2b kaartmateriaal / opgaaf van derden	
b3	het verloop van de waterspanningen in de diepte:	
	b3a is gemeten	
	b3b stijghoogte in eerste watervoerend pakket volgt uit kaartmateriaal / metingen daarboven interpolatie	
	b3c aannamen op basis van grondopbouw	
	b3d is lineair verondersteld	
b4	bij de keuze van maatgevende (= berekende) dwarsprofielen is zowel gekeken naar profielen met naar verwachting maximale zettingen als naar profielen met naar verwachting minimale zettingen	
b5	is er sprake van een aanaarding? zo ja hoe is grondopbouw onder bestaande baan bepaald?	
	b5a door grondonderzoek	
	b5b door berekeningen	
	b5c door historisch onderzoek naar aanleg methode	
	b5d door middel van vuistregels / aannamen	

checklist		scorekaart
b6	spanningsspreiding wordt in rekening gebracht	
modelkeuze / parameterbepaling (stap 6+7)		
c1	modelkeuze, er is gekozen voor:	
c1a	Soft Soil Creep	
c1b	isotache model (abc model)	
c1c	Buisman / Koppejan methode	
c1d	NEN methode	
c1e	overig	
c2	de adviseur heeft ervaring met het gebruikte model en bijbehorende parameters	
c3	afstemming parameterbepaling / modelkeuze	
c3a	de parameters volgend uit laboratorium onderzoek of archief zijn getoetst aan zettingsmetingen uit de omgeving van het project	
c3b	er zijn voldoende laboratoriumproeven uitgevoerd om statistische spreiding van de bepaalde parameters te bepalen	
c3c	alle benodigde parameters zijn aan de hand van laboratoriumonderzoek bepaald	
c3d	de belangrijkste parameters zijn door middel van laboratoriumonderzoek bepaald de andere volgen uit ervaring / aannamen	
c3e	de belangrijkste parameters volgen uit archiefonderzoek en zijn bepaald voor projecten in de omgeving van het huidige project	
c3f	voor alle parameters zijn aannamen gedaan (b.v. gebruik gemaakt van tabel 1 van NEN 6740)	
modelleren ophoging (stap 5)		
d1	er is rekening gehouden met tijdverloop tussen de verschillende ophoogslagen	
d2	er is rekening gehouden met het onderwater zakken van de ophoging	
d3	er is rekening gehouden met aanvulling van de optredende zettingen (onderhouden hoogte)	
d4	er is goed inzicht in het volumiek gewicht van het aan te brengen ophoogmateriaal	
modellering uitvoeringsvariant ter zettingsvermindering en/of -versnelling (stap 9)		
e1	rekenmodel	
e1a	eindige elementen berekeningen / 2D modellering MSettle	
e1b	analytische modellen	
e1c	nomogrammen	
e2	verhouding horizontale – verticale doorlatendheid	
e2a	horizontale doorlatendheid gebaseerd op laboratorium onderzoek	
e2b	horizontale doorlatendheid gebaseerd op ervaring / aannamen	
e2c	er is geen onderscheid gemaakt	
e3	de in rekening gebrachte parameters zijn geijkt aan veldmetingen	
e4	bij zanddrains of zandschermen wordt de invloed van de stijfheid van de schermen op het zettingsgedrag in rekening gebracht	
uitvoering (stap 13)		
f1	de aangebrachte ophoging wordt goed verdicht (beperking klink)	
f2	wijzigingen in de uitvoering worden doorgegeven en indien relevant verwerkt in zettingsprognose	
f3	het zettingsverloop wordt op een goede en betrouwbare wijze gemonitord	
verwerken kennis bestaande weg		
g1	kennis uit het gedrag van de bestaande weg is verwerkt volgens stroomschema 2	
Totaal score		

Tabel 14: Gemodificeerde CROW scorekaart (CROW, 2003). Onderdeel 'g1' is toegevoegd.

De toekenning van de punten in bovenstaande scorekaart is uitgelegd in CROW (2003). In CROW (2003) zijn de maximum te behalen punten per onderdeel gekoppeld aan de situatie waarop de zettingsprognose van toepassing is. Aangezien in dit onderzoek een andere situatie beschouwd wordt zijn deze maximum te behalen punten aangepast. Het verschil tussen de te behalen punten in de rehabilitatiesituatie en een ophogingssituatie bij een ophoging op maagdelijk terrein zijn weergegeven in Tabel 15.

onderdeel	Ophoging t.b.v. lijninfrastructuur		Rehabilitatie van (lijn)infrastructuur op slappe bodem
	eindzetting	zettingsverloop – restzetting	zettingsverloop – restzetting
a1	17	15	14
a2	6	5	5
b1	11	8	6
b2	4	3	3
b3	4	3	3
b4	2	2	2
b5	4	3	3
b6	4	3	3
c1	6	4	4
c2	10	8	4
c3	11	9	5
d1		5	4
d2	7	5	4
d3	7	5	4
d4	7	5	4
e1		3	3
e2		5	5
e3		5	5
e4		4	4
f1	(7)	(7)	(6)
f2	(7)	(7)	(7)
f3	(6)	(6)	(7)
g1			15

Tabel 15: Puntentelling voor de gemodificeerde CROW scorekaart in Tabel 14 (meest rechtse kolom) in vergelijking tot de originele puntentelling (CROW, 2003).

De scores onder onderdeel f1 tot en met f3 zijn te verdienen in de uitvoeringsfase van het project en gelden als zodanig niet voor de zettingsprognose. Wel kan bij het plannen van het project al rekening worden gehouden met de extra te verdienen punten door een correcte uitvoering met uitgebreide monitoring en feedback.

Benadrukt wordt in CROW (2003) dat een score van 80 van de 100 punten niet een 80% nauwkeurigheid of iets dergelijks betekent. De score geeft een kwalitatief beeld van de nauwkeurigheid van de zettingsprognose. Wel kan, door terugkoppeling vanuit de praktijk (door middel van monitoring), deze score worden geïjkt. Of dit alleen kan op het niveau van iedere adviseur afzonderlijk of dat dit generiek gemaakt kan worden is op dit moment nog onduidelijk.

Bijlage 4. Case “de Enterij” in Boskoop

Ter validatie en detaillering van de ontwikkelde methodiek voor het opstellen van een nauwkeurige zettingsprognose (zie hoofdstuk 4) is een recente case geanalyseerd, de rehabilitatie van de infrastructuur in een woonwijk. In 1989 is in Boskoop de woonwijk “de Enterij” aangelegd, inclusief de bestrating. Nu, zo’n 14 jaar later, is er sprake van flinke (differentiële) zakking zodat de infrastructuur, de rijbanen en de voetpaden, moeten worden gerehabiliteerd. De beslissing is genomen om dit te doen met een lichtgewicht constructie; het ontwerp is door ARCADIS opgesteld en het project is op het moment van schrijven (juni 2003) in uitvoering.

In de navolgende paragrafen zal het project volgens het opgestelde stroomschema worden doorlopen. Eventuele afwijkingen van de werkelijk gevolgde procedure zullen worden geanalyseerd. Nota bene: dit project is slechts ingebracht als validatie en illustratie van de ontwikkelde methodiek. Deze door ARCADIS ingebrachte zettingsprognose is niet opgesteld om een zo nauwkeurig mogelijke zettingsprognose te geven, maar als indicatie van de te verwachten zettingen in een ander afwegingsproces.

B 4.1 Beschikbare informatie

De volgende informatie is ter beschikking gesteld om de analyse te maken:

Door ARCADIS:

- Het Programma van Eisen van de gemeente Boskoop voor de rehabilitatie van infrastructuur, inclusief enkele gegevens over de oorspronkelijke aanleg en de huidige peilen.
- De gekozen verhardingsopbouw voor de rijbanen
- gegevens parameters tbv lichtgewichtfundering
- sonderingen Geomet AA00332 op het Torenpad
- zettingsanalyse Enterij

Door de gemeente Boskoop:

- Rapport betreffende fundering 23 Woningen aan het Torenpad te Boskoop, Joustra Geomet B.V., AA-00332, 1989
- Grondonderzoek en funderingsadvies t.b.v. 15 + 20 woningen a/h Torenpad te Boskoop, IGN b.v., C89.819, 1989.

B 4.2 Analyse volgens het stroomschema

In deze paragraaf wordt het stroomschema puntsgewijs doorlopen. Naast een analyse van het project met betrekking tot het stroomschema zal ook de score volgens de scorelijst van paragraaf 4.3 vermeld worden. Dit levert een controle of ijking van de behaalde score.

(1) Programma van Eisen

De enige gestelde eis is dat de weg wordt teruggebracht tot minimaal de aanleghoogte in 1989, NAP – 1,55 m. Bron: “Gegevens parameters t.b.v. lichtgewichtfundering de Enterij”, gemeente Boskoop.

Belangrijk is te beseffen dat de keuze voor de hier gebruikte ophoogmethode, in lichte ophoogmaterialen, al reeds eerder is gemaakt op basis van een netto contante waarde vergelijk gemaakt door ARCADIS (ARCADIS, 2002). Sec gezien is dit een zeer beperkte PvE, het mist bijvoorbeeld een restzettingseis terwijl de zetting een cruciale rol speelt in de mate van onderhoud. Er zijn ook geen andere kwaliteitscriteria aangegeven. Deze eisen zijn impliciet overgenomen uit het eerder uitgevoerde onderzoek.

Als deze rehabilitatiemethode wordt doorgerekend in het keuzemodel dan is deze eis voldoende. Immers, uit de tijd-zettingsprognose volgt vanzelf wanneer het interventieniveau met deze methode opnieuw bereikt wordt en dit zal in het model leiden tot een kwantitatief waardeoordeel over deze rehabilitatiemethode.

Behaalde score	: 0 (maximum 0)
----------------	-----------------

(2) *Historische informatie*

(2.1) *De bestaande wegen zijn differentiëel gezakt.*

Dit blijkt uit opgave van de gemeente, die op een aantal plaatsen langs de rijbaan en de doorsteek hoogtemetingen hebben uitgevoerd. Het verschil in zetting tussen de ingemeten locaties is tot 0,3 meter. Dit leidt in het stroomschema tot punt 2.4. Een doel voor het vervolgonderzoek is om uit te vinden waardoor de differentiële zettingen zijn ontstaan. Hiermee dient rekening gehouden te worden bij het ontwerp en het opstellen van de zettingsprognose.

Behaalde score	: 0 (maximum 8)
----------------	-----------------

(2.7) *Het tijd-zettingsverloop is conform de prognoses.*

Als het tijd-zettingsverloop conform de prognoses is dan is dit een indicatie voor het feit dat de schematisatie en aannamen die voor deze prognose zijn gebruikt waarschijnlijk voldoende nauwkeurig bekend zijn. Voor deze case zijn geen zettingsprognoses beschikbaar van de oorspronkelijke aanleg.

Door ARCADIS zijn wel zettingsanalyses gemaakt op basis van een schematisatie van de ondergrond en de aanleghoogte. Deze hadden echter een ander doel dan het bepalen van de doelen van het grondonderzoek. Het doel van deze zettingsanalyses was om direct de schematisatie te ijken aan de gemeten zetting. Het gebruikte zettingsmodel is gebaseerd op de consolidatievergelijking van Terzaghi en een linearisering van het kruipgedrag op logaritmische tijdschaal. De postdictie is uitgevoerd met een van tevoren bepaalde schematisatie van ondergrond (dikte, volumegewicht en consolidatieconstante van het slappe lagenpakket) en constructie (dikte en volumegewicht verhardingsopbouw). Hierin zijn dus 5 vrijheidsgraden aanwezig en er is maar één zettingsmeting om op te ijken. Dit is opgelost door alleen de opbouw van de (verhardings)constructie in de schematisatie aan te passen zodanig, dat de berekende zetting ongeveer overeenkomt met de opgetreden zetting (ARCADIS, 2002).

Uit de rapportage is niet op te maken in welke mate de schematisatie in de individuele analyses is aangepast. Dit leidt tot punt (2.10) in het stroomschema.

Behaalde score	: 0 (maximum 8)
----------------	-----------------

(2.12): De vorige ophogingen, cunetten, aanlegpeilen en uitgangspunten zijn bekend, maar (2.13) niet gedetailleerd. Dit leidt tot punt (2.17) in het stroomschema.

Uit de gegevens van de gemeente en de rapportage van ARCADIS is op te maken dat de vorige constructie, aanlegpeilen en een aantal uitgangspunten wel bekend zijn, maar erg gedetailleerd is deze informatie niet. Er is met name nog weinig duidelijkheid over:

- het ontwerp en de zettingsprognose voor de vorige ophoging;
- de grondwaterpeilen in zowel de historische als de huidige situatie;
- de grondopbouw van het slappe lagenpakket (dikte, volumegewicht, consolidatieconstante(n), doorlatendheid per laag).

Behaalde score	: 3 (maximum 10)
----------------	------------------

(2.15): waterspanningen zijn nu waarschijnlijk lager maar onbekend is of bij de vorige ophoging is belast tot boven p_g . Deze moet dus bepaald worden.

Behaalde score	: 0 (maximum 4)
----------------	-----------------

(3) Kennisleemten

Uit de analyse van punt 2 van het stroomschema volgen de kennisleemten, zie ook de uitleg van het stroomschema in paragraaf 4.2. Uit de beschikbare informatie kan de reden voor de differentiële zettingen of de uitgangspunten voor een nauwkeurige tijd-zettingsprognose niet gevonden worden. De met behulp van grondonderzoek in te vullen kennisleemten en de bijbehorende prioriteiten zijn:

- heterogeniteit, de (ruimtelijke) variatie in de grondopbouw van het slappe lagenpakket (dikte, volumegewicht, consolidatieconstante(n), doorlatendheid per laag) : hoog
- polderpeil en stijghoogte in het Pleistocene zand: hoog
- grensspanning p_g bepalen: hoog
- het ontwerp en de zettingsprognose voor de vorige ophoging;
- de grondwaterpeilen in de historische situatie;

(4) Bepalen grondopbouw

In punt 3 van het stroomschema zijn de kennisleemten genoemd die ingevuld moeten worden om tot een nauwkeurige prognose van het tijd-zettingsverloop te kunnen komen. De eerste drie onderdelen hiervan kunnen door grondonderzoek opgelost worden. Deze kennisleemten vormen de invoer voor punt 4.1.1 van het stroomschema.

(4.1.2) De geotechnische ontwerpaspecten

Zoals reeds uitgelegd in paragraaf 4.2 zijn de ontwerpaspecten reeds op voorhand bekend. Voor de volledigheid worden ze hieronder nog eens opgesomd.

1. vervormingseigenschappen van de ondergrond
2. volumegewicht van de ondergrond
3. doorlatendheid van de ondergrond
4. waterspanningen in de ondergrond
5. de (3D) heterogeniteit in de eigenschappen 1 t/m 4

(4.1.3) De geotechnische parameters per aspect

In paragraaf 4.2 zijn voor elk geotechnisch ontwerpaspect de mogelijk relevante geotechnische parameters opgesomd. Voor de volledigheid zijn deze hieronder nogmaals herhaald.

aspect:	geotechnische parameters:
1	samendrukkingsparameters (bijv. C_p , C_s of a,b,c) , grensspanning p_g , (zwelconstante A)
2	droog en nat volumegewicht
3	horizontale en verticale doorlatendheid
4	waterspanningen in het freatisch vlak en in alle relevante watervoerende pakketten
5	Relevante ruimtelijke structuren waarin deze parameters zijn verdeeld

In de door ARCADIS (voor andere doeleinden) gemaakte berekeningen zijn schematisaties gemaakt, waarin gerekend is met een slappe laag zonder verdere onderverdeling. Voor de schematisatie van deze slappe laag zijn aannamen gedaan voor het volumegewicht, de samendrukkingsparameter, de doorlatendheid, de waterspanningen en de ruimtelijke structuren. Omdat uit de uitgevoerde analyses niet met zekerheid is gebleken dat één van deze aannamen correct was, blijven alle geotechnische ontwerpaspecten relevant.

(4.1.4) Literatuur en oriënterend onderzoek

Nu de relevante geotechnische parameters bekend zijn kan in literatuur, eerder uitgevoerd onderzoek en oude projecten gezocht worden naar informatie over deze ontwerpaspecten. In dit geval is gebruik gemaakt van de informatie die is opgesomd in paragraaf 0.

doel heterogeniteit:

Het doel 'heterogeniteit' vloeit voort uit het optreden van differentiële zettingen. Met behulp van de genoemde informatie is onderzocht of de differentiële zettingen konden worden verklaard. Dit bleek niet mogelijk. De mogelijke oorzaken hiervan zijn:

- het oorspronkelijke grondonderzoek is circa 10 meter uit de baan geplaatst, waardoor het wellicht de oorzaak van de differentiële zetting onder de baan gemist heeft;
- het grondonderzoek bestaat alleen uit sonderingen, waarvan de helft mechanisch en vrijwel allemaal zonder schachtwrijving. De sonderingen met schachtwrijving tonen aanwezigheid van veen/kleiafwisselingen in het wrijvingsgetal die niet in conusweerstand van de andere sonderingen zijn terug te vinden. Gebruik van klasse 1 sonderingen is wellicht nodig om de oorzaken van de differentiële zettingen op te sporen;
- er zijn geen boringen verricht waardoor er ook geen informatie over de werkelijke mogelijke verschillen in de ondergrond ter plaatse is;

doel polderpeil en stijghoogten:

Er is geen grondonderzoek of oude informatie beschikbaar waaruit het polderpeil, de freatische stijghoogte en de stijghoogte in het Pleistoceen afgeleid kan worden. Door ARCADIS is, in samenspraak met de gemeente Boskoop, het freatisch peil van 2,27 m. – NAP aangehouden. De stijghoogte in het Pleistocene zand is in de oorspronkelijke analyse niet gebruikt.

doel grensspanning:

De grensspanning kan niet uit oud onderzoek afgeleid worden, aangezien er een (onbekende) peilwijziging heeft plaatsgevonden en aangezien de vorige ophoging niet exact bekend is.

Samenvattend kan gesteld worden dat de relevante geotechnische parameters niet uit de literatuur en het oude grondonderzoek bepaald konden worden. Hiervoor is dus aanvullend grondonderzoek nodig.

(4.1.5) kwalitatieve bepaling type grondonderzoek:

Op basis van de te bepalen geotechnische parameters kan een kwalitatieve inschatting gemaakt worden van het benodigde grondonderzoek. Aanbevolen worden:

- Goede sonderingen om heterogeniteit van de ondergrond in kaart te brengen (klasse 1, q_c en f_s en wellicht nog de waterspanning). De enkele sonderingen met meting van schachtwrijving doen vermoeden dat dit het inzicht in de heterogeniteit sterk kan verbeteren.
- Boringen, onder andere ter plaatse van sonderingen zodat deze geijkt kunnen worden aan de lokale omstandigheden. Gezien de aanwezige grondsoorten (slappe klei en veen) en de noodzaak proefmonsters te verzamelen worden Begemannboringen geadviseerd.
- Plaatsen van peilbuizen op 2 locaties met filters in het freatisch pakket en in het Pleistocene zand, aan weerszijden van het gebied. Dit is een zeer geringe inspanning om de onzekerheid over de heersende waterspanningen weg te nemen.
- Oedometerproeven op iedere grondlaag, uit monsters uit Begemann boringen. Hiermee kunnen de relevante samendrukkingsparameters bepaald worden.

(4.1.6) kwantitatieve bepaling grondonderzoek

Aangezien er nog geen goede leidraden of algemeen beschikbare tools zijn om de hoeveelheid en de optimale locatie van grondonderzoek te bepalen, is hiervoor een zekere mate van expertise vereist. In het algemeen kan gesteld worden dat een extra proefneming alleen nuttig is, als het het grondmodel significant wijzigt. Om dit in te kunnen schatten kan het beste gefaseerd gewerkt worden, waarbij het grondmodel na iedere fase bijgewerkt wordt. De volgende getallen zijn dan ook alleen voor de eerste fase. Bij deze getallen is mede rekening gehouden met de omvang van het project. Voor meer informatie over het bepalen van hoeveelheid grondonderzoek wordt de lezer verwezen naar CUR (2003).

- Sonderingen: 10 stuks, zie ook plattegrond voor locatie.

- Boringen: 2 stuks, ter plaatse van sonderingen, zie ook plattegrond voor locatie
- Peilbuisfilters: 2 maal 2 stuks
- Oedometerproeven: 1 monster per laag per boring. Het totale aantal hangt af van de geïdentificeerde lagen in het nieuwe heterogeniteitsonderzoek.

(4.2) Uitvoeren grondonderzoek

Het uitvoeren van het grondonderzoek dient te geschieden volgens de vigerende normen en leidraden, met ervaren medewerkers en goed onderhouden en geijkte apparatuur. De locatie van het onderzoek dient met een nauwkeurigheid van maximaal 10 cm bepaald te worden.

Er is in deze case geen aanvullend grondonderzoek uitgevoerd.

(4.3) Interpretatie grondonderzoek

Indien het bovenstaande, in combinatie met de oude uitgangspunten, het historisch gedrag (de differentiële zettingen en het tijd-zettingsverloop) kan verklaren, dan houdt (4) hier op. Als dit niet zo is, dan dienen punten 3 en/of 4 uit het stroomschema, met de nieuwe informatie, opnieuw doorlopen te worden. Indien dit niet wenselijk is, of indien niet verwacht wordt dat dit tot betere inzichten leidt, dan kan besloten worden om door te gaan met het geotechnisch ontwerp met dien verstande dat oplossingen, waarbij het succes van het project afhangt van zaken die in deze fase nog onbekend zijn, niet uitgewerkt worden.

(4.4) Geohydrologie

De geohydrologische situatie is geschematiseerd als zijnde één watervoerend (freatisch) pakket. De stijghoogte in het Pleistocene zand en in de in de sonderingen gevonden tussenzandlaag is niet bepaald.

Behaalde score	: 2 (maximum 5)
----------------	-----------------

(4.5) Bepalen bodemopbouw

De schematisatie van de bodemopbouw is gedaan door het slappe lagenpakket te beschouwen als één veenlaag. In de beschikbare sonderingen met meting van de schachtwrijving is echter te zien dat er wel degelijk verschillende lagen (veen, klei, zand) te onderscheiden zijn die lokaal in dikte variëren. Dit kan ook verwacht worden van het beschikbare langprofiel dat schematisch de geologische bodemopbouw in Boskoop weergeeft. Aangezien de overheersende grondsoort veen is, is hier toch twee punten toegekend.

Behaalde score	: 2 (maximum 10)
----------------	------------------

(4.6) Afleiden benodigde parameters

Er zijn geen proeven gedaan om de parameters af te leiden. De consolidatieconstante van de equivalente laag is wel bepaald door middel van ijking van berekeningen aan gemeten zettingen. Omdat van één equivalente laag is uitgegaan en uit sonderingen blijkt dat er minimaal twee relevante lagen zijn, is de maximaal te behalen score in dit onderdeel $15/2=7.5$. De volgende scores zijn hiermee behaald:

Parameter	Type bepaling	Score
volumegewicht	literatuur	0
consolidatiecoëfficiënt	vergelijking grondgedrag	$1.5/2 = 0.75$
waterspanning	correlatie met polderpeil	$1.5/2 = 0.75$ (uitzondering gezien de geringe afstand tot open water: als vergelijking grondgedrag)
		Totaalscore: 1.5

5: Opstellen geotechnisch ontwerp

De exacte schematisatie voor de zettingsprognose is niet bekend. Wat wel duidelijk is, is dat de vorige ophoging wordt schematiseerd als een achtergrondzetting; de berekende zetting wordt expliciet vermeerderd met de restzetting van de vorige ophoging. Hiervoor wordt 7 punten verdiend. Het gekozen zettingsmodel is de formule van Terzaghi met een eenvoudige kruipcomponent. Hiervoor worden 3 punten gescoord.

Behaalde score	: 10 (maximum 20)
----------------	-------------------

(6) Gevoeligheidsanalyse

Er is voor zover bekend geen gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Behaalde score	: 0 (maximum 20)
----------------	------------------

B 4.3 Totaalscore en analyse hiervan

De totaal behaalde score door het doorlopen van het stroomschema is 18,5 van de 100 punten. Dit betekent dat de zettingsprognose “slecht” is. Dit komt overeen met de inschatting die vooraf was gemaakt door de auteurs. Immers, er is vrijwel geen grondonderzoek gedaan, de ondergrondschematisatie is zeer grof, er is een eenvoudig zettingsmodel gebruikt en er is geen verklaring gevonden voor differentiële zettingen. Uit deze case blijkt dat de resultaten van het voorgestelde model goed overeenkomen met hetgeen verwacht wordt.

Nogmaals dient benadrukt te worden dat dit slechts een voorbeeldcase is; de zettingsprognose die door ARCADIS is opgesteld in deze case was niet bedoeld als nauwkeurige zettingsprognose, maar diende als indicatie van de te verwachten zettingen in een ander afwegingsproces dan in dit onderzoek behandeld.

Bijlage 5. 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	:	Urban Infrastructure	
Baseproject name	:	Management System for Sustainable (Re)Development of Urban Infrastructure	
Project name	:	Duurzame Onderhoudsstrategie (DOS) voor voorzieningen op slappe bodem	
Projectleader/Institute	:	Ing. H. Visser	ARCADIS Ruimtelijke Ontwikkeling BV, Regio West
Project number	:	04.01.02	
Projectduration	:	january 2002	- june 2003
Financial sponsor(s)	:	Ministry of the Interior (Min BZK)	
	:	Boskoop Municipality	
Project participants	:	ARCADIS Ruimtelijke Ontwikkeling BV	
	:	Boskoop Municipality	
		CROW	
		Delft Municipality	
		GeoDelft	
	:	Rotterdam Municipality	
Total Project-budget	:	198 000 euro	
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

