

Kruip met verticale drainage voor Koppejan/ NEN 6744 model

Contactpersoon : Dr. H. den Adel
Datum : Maart 2002
Author(s) : Dr. H. den Adel
Dr. ir. J.B. Sellmeijer
Opdrachtgever : Delft Cluster

Project naam : Samengestelde constructies
Project nummer : 01.04.02-64 versie 1.0

Aantal pagina's : 18
Aantal tabellen :
Aantal figuren :
Aantal bijlagen : 1



Keverling Buismanweg 4
Postbus 69
2600 AB Delft

015-2693793
015-2693799

info@delftcluster.nl
www.delftcluster.nl

Delft Cluster verricht lange-termijn
fundamenteel strategisch onderzoek
op het gebied van duurzame inrichting
van deltagebieden.

Rapportnummer
64

Datum
Maart 2002

Versie
1.0

Aantal pagina's
12

Type rapport
Studie

Titel / subtitel
**Kruip met verticale drainage
voor Koppejan/NEN6744-model**

Projectnaam
Samengestelde constructies

Projectleider(s)
dr.ir. J.B. Sellmeijer

Projectbegeleider(s)
dr. H. den Adel

Overige leden projectteam
--

Verspreiding
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Samenvatting rapport

De klassieke regels van Koppejan en NEN6744 zijn omgewerkt in de vorm van een reksnelheid. Aldus kunnen ze als grondmodel ondergebracht worden in een algemeen consolidatieprogramma. Er is van de gelegenheid gebruik gemaakt om de rekken te definiëren als natuurlijke rek, zodat grote vervormingen mogelijk zijn.

Er dreigen twee soorten trendbreuk met het verleden. Enerzijds is het seculaire deel van de reksnelheid tot nu toe niet in ogenschouw genomen. Anderzijds wordt in de klassieke regels de consolidatiecoëfficiënt constant verondersteld, terwijl deze in de werkelijkheid afhangt van het spanningsniveau.

De eerste trendbreuk wordt afgewezen, immers de empirische regels zijn niet opgesteld om kruiprek te beschrijven. De angst bestaat dat deze een overtrokken waarde weergeven. Geen invloed wordt beter geacht dan een verkeerde invloed. Het ziet er naar uit dat deze keus voor Koppejan juist is, maar voor NEN niet.

De tweede trendbreuk is niet te vermijden. Het consolidatieprogramma is goed geformuleerd. Het is onzin om hierin onvolkomenheden uit het verleden in te bouwen. Indien resultaten uit het verleden van belang zijn voor de interpretatie van predicties, zal een goede vergelijking gemaakt moeten worden tussen een waarde voor de consolidatiecoëfficiënt en de doorlatendheid.

Versie	Datum	Opgesteld door	Paraaf	Gecontroleerd door	Paraaf
1.0	Maart 2002	dr.ir. J.B. Sellmeijer		dr. H. den Adel	

Projectgroep

Tijdens de uitvoering van de deelopdracht “kruip en verticale drainage” bestond de Delft Cluster-groep van thema 1 uit

	Naam	Organisatie
Thema Trekker	Dr.ir. P. van den Berg	GeoDelft
Thema Duwer	Dr. A. Scarpas	TU Delft
Thema Leden	Dr.ir. M.A. Van	GeoDelft
	Dr. J.B. Sellmeijer	GeoDelft
	Dr. H. den Adel	GeoDelft

Betrokken personen

Bij de totstandkoming van dit rapport waren betrokken:

Naam	Organisatie
Dr. H. den Adel	GeoDelft
Dr. ir. J.B. Sellmeijer	GeoDelft

Management samenvatting

Titel	Kruip met verticale drainage, voor koppejan/NEN6744 model
Auteurs	Dr. H. den Adel en Dr. ir. J.B. Sellmeijer
Datum	Maart 2002
Project nummer	01.04.02
Rapport nummer	64 versie 01

De klassieke regels van Koppejan en NEN6744 zijn omgewerkt in de vorm van een reksnelheid. Aldus kunnen ze als grondmodel ondergebracht worden in een algemeen consolidatieprogramma. Er is van de gelegenheid gebruik gemaakt om de rekken te definiëren als natuurlijke rek, zodat grote vervormingen mogelijk zijn.

Er dreigen twee soorten trendbreuk met het verleden. Enerzijds is het seculaire deel van de reksnelheid tot nu toe niet in ogenschouw genomen. Anderzijds wordt in de klassieke regels de consolidatiecoëfficiënt constant verondersteld, terwijl deze in de werkelijkheid afhangt van het spanningsniveau.

De eerste trendbreuk wordt afgewezen, immers de empirische regels zijn niet opgesteld om kruiprek te beschrijven. De angst bestaat dat deze een overtrokken waarde weergeven. Geen invloed wordt beter geacht dan een verkeerde invloed. Het ziet er naar uit dat deze keus voor Koppejan juist is, maar voor NEN niet.

De tweede trendbreuk is niet te vermijden. Het consolidatieprogramma is goed geformuleerd. Het is onzin om hierin onvolkomenheden uit het verleden in te bouwen. Indien resultaten uit het verleden van belang zijn voor de interpretatie van predicties, zal een goede vergelijking gemaakt moeten worden tussen een waarde voor de consolidatiecoëfficiënt en de doorlatendheid.

Inhoud

1	Inleiding	4
2	Koppejan- en NEN-model	6
3	Wel of geen trendbreuk	8
4	Evaluatie	10
5	Samenvatting en conclusies	12
6	Lijst met symbolen	13

Bijlagen

Bijlage 1

Diepte-afhankelijke consolidatiecoëfficiënt

1 Inleiding

Na bijna twee regeringsperioden van paarse kabinetten doet een fenomeen opgang, dat "de terugtrekkende overheid" wordt genoemd. Wegen en spoorwegen worden in opdracht van de overheid door aannemerscombinaties aangelegd, terwijl de laatsten tevens verantwoordelijk zijn voor het onderhoud. Het doel van deze aanpak is om de totale kosten voor aanleg en onderhoud te minimaliseren, door de consequenties voor het onderhoud neer te leggen bij degene die voor de aanleg verantwoordelijk is. Vanuit de private markt is er derhalve een verhoogde belangstelling om in een zo vroeg mogelijk stadium van een project een betrouwbare schatting te verkrijgen van de grootte van de verwachte (eind)zakking en dus de financiële gevolgen voor het onderhoud. Met het oog hierop is het Delft Cluster project: "Samengestelde constructies" met projectnummer 01.02.04 gestart, waarin de interactie tussen grondconstructie en ondergrond centraal staat.

Bij het aanleggen van grondconstructies op slappe en veelal slecht doorlatende ondergrond treden in het algemeen vrij grote maaiveldzakkingen op. Het zakkingsproces verloopt bovendien erg traag in de tijd, met name door het optreden van kruip. Het gevolg is dat er veel tijd verloren gaat tussen het moment van aanbrengen van een grondlichaam en het moment waarop de constructie in gebruik kan worden genomen. Maar zelfs na de ingebruikname blijven er nog zakkingen optreden, die met name bij de aansluiting op onderheide kunstwerken voor problemen zorgen. Het kunnen voorspellen van zakkingen tot vele jaren na aanleg is daarom van groot belang, ten einde kosten voor onderhoud aan de constructie te kunnen minimaliseren. Met het oog op het voorspellen van (eind)zakkingen zijn diverse conceptuele modellen ontwikkeld om de zakking te kunnen voorspellen. Ook zijn er technieken ontwikkeld waarmee het zakkingsproces kan worden versneld.

Zakking ten gevolge van consolidatie en of kruip is een niet lineair proces. Analytische oplossingen die een betrouwbare voorspellende waarde hebben, zijn daarom niet haalbaar. Technieken zoals eindige elementen komen dan om de hoek kijken. Daarnaast zijn er in het verleden veelal empirische modellen ontwikkeld, waarmee de zakking kan worden voorspeld, zoals de regel van Koppejan en de NEN6744 regel. Om het zakkingsproces te versnellen, wordt o.a. verticale drainage aangelegd. Bovengenoemde empirische modellen zijn veelal niet goed in staat de invloed van verticale drainage in te schatten.

Op dit moment is een versie van het zakkingsprogramma MSettle beschikbaar, waarin consolidatie en verticale drains zijn geïmplementeerd voor het Isotache kruipmodel. De mogelijkheden van consolidatie en verticale drains zijn eveneens gewenst voor de empirische regel van Koppejan en de sterk daarop lijkende NEN-variant. Daarom moeten de implicaties van deze regels op een rij gezet worden, zodat de numerieke codering kan worden uitgewerkt.

Het mechanisme van consolidatie en het effect van verticale drains staat in principe los van de keuze van het grondmodel. Het grondmodel beïnvloedt de mate van de zettingen. Het regelt alleen de relatie tussen rekken en spanningen. Dit betekent dat het numerieke algoritme van consolidatie, zoals dat ontwikkeld is voor de Isotache aanpak, integraal kan worden overgenomen voor andere grondmodellen. Op de plaats waar de rekken worden vastgelegd, moet natuurlijk wel het juiste grondmodel gespecificeerd worden.

Dit betekent een enorme besparing van moeite en kosten. Allerlei geavanceerde mogelijkheden, zoals de toepassing van verticale drains, zijn immers al beschikbaar. De algehele numerieke afhandeling is eender, onafhankelijk van het grondmodel. Er is dus een hoge mate van standaardisatie aanwezig en een minimale inspanning voor onderhoud is vereist.

Op de plaats waar de relatie tussen de vervorming en de effectieve spanning geregeld wordt, zit nu het Isotache kruipmodel. Op deze plaats moeten de Koppejan- en NEN6744-modellen worden toegevoegd. Deze modellen zijn echter niet als grondmodel gedefinieerd, maar als zettingregel.

In dit rapport wordt aangegeven in welke vorm de regels van Koppejan en NEN6744 aangeleverd moeten worden om effectief ingebouwd te kunnen worden in het bestaande numerieke kader van MSettle. Er wordt ingegaan op gewenste en ongewenste verschillen met de klassieke aanpak tot nog toe. De verschillen in het zettingverloop, bepaald met de diverse grondmodellen, worden toegelicht.

De betekenis van de symbolen kan worden nagegaan in de symbolenlijst. Dit document is de rapportage conform artikel 1 sub 2A van het contract DWW 2041 tussen Dienst Weg- en Waterbouwkunde en GeoDelft.

2 Koppejan- en NEN-model

De Koppejan-regel bestaat evenals de NEN-regel uit een empirisch verband tussen zakking en spanning, waarin een tijdseffect is opgenomen. Het verschil tussen beide regels betreft de seculaire bijdrage. Bij Koppejan hangt deze af van de effectieve spanning, bij NEN niet.

De regel van Koppejan heeft de volgende vorm:

$$\frac{s}{h} = \left\{ \frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_s} \log \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) \right\} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

De NEN6744 regel is gedefinieerd als:

$$\frac{s}{h} = c_c \log \left(\frac{p}{p_0} \right) + c_a \log \left(1 + \frac{t}{t_0} \right)$$

De samendrukkingcoëfficiënten, C_p , C_s , c_c , c_a , hebben verschillende waarden voor belasten en ont- of herbelasten. De formules zijn zodanig geschreven dat deze vanaf $t = 0$ gelden.

Beide formules passen een lineaire spanningafhankelijke stijfheid toe. De regels specificeren een uitdrukking voor de zakking. Maar dan moet wel de effectieve spanning constant zijn. In de praktijk is dit niet zo. Daarom worden de uitdrukkingen als lineaire rek geïnterpreteerd. Deze rek komt overeen met de grootheid s/h .

MSettle is opgezet voor grote vervormingen. Het ligt dus voor de hand te werken met natuurlijke rek. Deze is gedefinieerd als $-\ln(v/v_0)$. Voorgesteld wordt de lineaire rek te vervangen door de natuurlijke. Hierdoor verandert het vervormingsgedrag voor grote waarden van de tijd.

Er zal nu onderscheid gemaakt worden tussen regel en grondmodel. Regel is de oorspronkelijke uitdrukking om zakkingen te voorspellen. Grondmodel is de transformatie hiervan in een spanningrekrelatie. Het volgende grondmodel voor Koppejan wordt geïntroduceerd:

$$\ln \left(\frac{v}{v_0} \right) = - \left\{ \frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_s} \log \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) \right\} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

Voor NEN6744:

$$\ln \left(\frac{v}{v_0} \right) = -c_c \log \left(\frac{p}{p_0} \right) - c_a \log \left(1 + \frac{t}{t_0} \right)$$

De primaire samendrukkingcoëfficiënt, C_p , c_c , wordt niet beïnvloed door de natuurlijke rek. Daarom wordt de bepaling van de waarde ervan uit proeven niet gewijzigd. De bepaling van de seculaire coëfficiënt, C_s , c_a , zal een aanpassing behoeven, omdat deze over een grotere tijdspanne bepaald wordt.

Nu heeft dit rekverband slechts een zeer beperkt geldigheidsgebied. Alleen de plotselinge toename van p_0 naar p is beschreven. Daarom worden de uitdrukkingen op grond van het superpositiebeginsel uitgebreid:

$$\text{Koppejan} \quad \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) = - \int_{p_0}^p \left\{ \frac{1}{C_p(\bar{p})} + \frac{1}{C_s(\bar{p})} \log\left(1 + \frac{t - J(\bar{p})}{t}\right) \right\} \frac{d\bar{p}}{\bar{p}}$$

$$\text{NEN6744} \quad \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) = - \int_{p_0}^p \frac{c_c(\bar{p})}{\ln(10)} \frac{d\bar{p}}{\bar{p}} - c_a \log\left(1 + \frac{t}{t}\right)$$

J is het tijdstip waarop het belastingincrement dp wordt aangebracht. De samendrukking-coëfficiënten kunnen op dit traject ontlasten, herbelasten of belasten vertegenwoordigen.

Door deze ingreep blijkt het verschil tussen de Koppejan- en de NEN6744-aanpak essentieel te zijn. Bij Koppejan heeft elk increment zijn eigen begin van het seculaire effect, terwijl bij NEN6744 het seculaire effect solitair verloopt.

Tijdens het consolidatieproces speelt de reksnelheid een rol. Deze volgt direct uit de huidige formulering door deze te differentiëren naar de tijd:

$$\text{Koppejan} \quad \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{1}{C_p p} \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{C_s} \frac{\partial}{\partial t} \int_{p_0}^p \log\left(1 + \frac{t - J(\bar{p})}{t}\right) \frac{d\bar{p}}{\bar{p}}$$

$$\text{NEN6744} \quad \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{c_c}{p \ln(10)} \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{c_a}{(t+t) \ln(10)}$$

De eerste term is de elastische reksnelheid. Deze is bepaald door de verandering van de spanning en afhankelijk van de stijfheid van de grond. Voor beide modellen geldt dat deze stijfheid lineair afhangt van de spanning. De tweede term is de kruipsnelheid, die bepaald zou moeten zijn door de rektoestand. Bij Isotache is dit de positie op de isotachen. Bij Koppejan, echter, is een deel van de kruipsnelheid toch afhankelijk van de verandering van de spanning. Bij NEN6744 is de kruipsnelheid alleen in de tijd gespecificeerd.

Het is van belang even stil te blijven staan bij de wijze waarop de kruipsnelheid is geformuleerd. Bij NEN6744 is deze weliswaar door het huidige tijdstip bepaald, maar dit kan uitgelegd worden als de toestand op dat tijdstip. NEN6744 en Isotache liggen dan redelijk dicht bij elkaar, zij het dat NEN6744 logaritmisch van de tijd afhangt en Isotache volgens een machtfunctie.

Maar bij Koppejan ligt het anders. Hier is de kruipsnelheid niet louter bepaald door de huidige toestand, maar door de gehele voorgeschiedenis. Dit maakt de bepaling van de kruip arbeidsintensief. Op elk tijdstip moet de gehele voorgeschiedenis weer opnieuw in een iets andere verhouding worden doorgerekend.

Er is nu genoeg informatie om zettingsberekeningen te kunnen maken. Er is een elastische bijdrage aan de reksnelheid. Deze wordt samengesteld met de samendrukbaarheid van het water tot een consolidatiecoëfficiënt. Daarnaast is er de kruiprek, die gezien kan worden als een lekbijdrage.

3 Wel of geen trendbreuk

In de huidige implementatie van Koppejan en NEN6744 is nooit een kruipsnelheid opgenomen in de bergingsvergelijking. Dit is in feite onjuist. Bij een moeizaam verlopend consolidatieproces kunnen aanvankelijk de waterspanningen hoger gaan oplopen dan op grond van de belasting verwacht wordt. In principe moet de kruipsnelheid dus worden meegenomen.

Op zich is het meenemen van de kruipsnelheid in de bergingsvergelijking geen probleem. In het vorige hoofdstuk zijn de uitdrukkingen ervoor aangegeven. Maar het zou een trendbreuk betekenen met het verleden. In de klassieke programmatuur is het effect van de kruipsnelheid immers niet verwerkt.

Het argument is naar voren gebracht dat het niet wijs is om nu de kruipsnelheid wel op te nemen in de nieuwe consolidatieprogrammatuur. De oude Koppejan- en NEN6744-regels zijn empirisch. Zij zijn bedoeld voor een snelle afschatting van de zettingen en bieden niet de mogelijkheid om afgeleide grootheden op hoogwaardige wijze te bepalen. De kruipsnelheid zou dan een overdreven invloed suggereren.

Het is misschien beter om geen invloed mee te nemen dan een overtrokken invloed. Op deze wijze weet je wat er in de programmatuur te kort schiet en zullen de nieuwe rekenresultaten altijd vergelijkbaar blijven met resultaten die in het verleden behaald zijn. Een trendbreuk wordt dan en passant voorkomen.

Op zich is het nemen van een al dan niet verkeerde beslissing op dit moment niet zo cruciaal. In feite is de kruipsnelheid op elk tijdstip in het rekenprogramma bekend. Deze is nodig om de rekken te bepalen. Rekentechnisch is het om het even of de kruipsnelheid wel of niet aan de bergingvergelijking wordt toegevoegd. Op dit moment zal ervan worden afgezien om de kruipsnelheid toe te voegen aan de bergingvergelijking. Het ziet er naar uit dat deze keus voor Koppejan juist is, maar voor NEN niet.

Een tweede verschil van aanpak met vroeger is de wijze waarop het consolidatie proces verwerkt wordt.

- In de klassieke programmatuur worden de zettingen bepaald op grond van totaalspanningen. Deze zijn gecorrigeerd voor waterlasten, die door de gebruiker kunnen worden opgegeven. De twee zakkingscomponenten, het primaire deel en het seculaire deel worden apart bepaald. Vervolgens wordt er een consolidatieberekening gemaakt op basis van constante elastische berging. Deze wordt beschreven met behulp van een constante consolidatiecoëfficiënt. Het resultaat wordt uitgedrukt in een consolidatiepercentage. De primaire zakking wordt met dit percentage gereduceerd.
- Het uitgangspunt bij de nieuwe programmatuur is de bergingvergelijking voor water. Deze bevat de stromingsterm en de bergingstermen, die bestaan uit de reksnelheid van de grond en de samendrukbaarheid van het water. De reksnelheid is bepaald door het kruipmodel en de evenwichtvergelijkingen. Uit de drie relaties – bergingvergelijking, kruipmodel en evenwicht – resulteert een voorwaarde voor alleen de stijghoogte. Deze voorwaarde wordt numeriek opgelost.

Beide wijzen van oplossen verschillen op enkele essentiële plaatsen. Deze worden puntsgewijs aangegeven.

- De nieuwe programmatuur hanteert een geïntegreerde aanpak. Dit houdt in dat de werkelijke effectieve spanningen die tijdens het consolideren optreden, ook verantwoordelijk zijn voor de zettingen. Het klassieke programma rekent volgens een ontkoppeld schema. De zettingen worden op basis van totaalspanningen bepaald. Hierin wordt de primaire component gecorrigeerd via een separaat bepaald consolidatiepercentage.
- In de beide grondmodellen, zowel Koppejan als NEN6744, is de stijfheid van de grond lineair afhankelijk van het spanningsniveau. Daarom is de consolidatiecoëfficiënt eveneens afhankelijk van het spanningsniveau. In de ontkoppelde aanpak wordt de consolidatiecoëfficiënt constant verondersteld.
- In de geïntegreerde aanpak dient een waarde voor de doorlatendheid te worden opgegeven. In de ontkoppelde aanpak wordt de consolidatiecoëfficiënt gespecificeerd.
- In de geïntegreerde aanpak wordt standaard gewerkt met natuurlijke rek. In de ontkoppelde aanpak is de rek lineair. Wel kan er een cosmetisch effect gesimuleerd worden door de zettingen te bewerken met een exponentieel filter.

Het is duidelijk dat de resultaten die bereikt zijn met de nieuwe programmatuur, niet volledig meer kunnen sporen met de uitkomsten van de klassieke regels. Door toekomstige uitbreidingen, zoals een rekafhankelijke doorlatendheid, zullen de verschillen alleen maar toenemen.

Voor een enkel praktijkprobleem zou het kunnen voorkomen dat een gedegen vergelijking met eerder gedane predicties moet worden gemaakt. Men zal dan geneigd zijn een min of meer gemiddelde waarde te hanteren voor de doorlatendheid of de consolidatiecoëfficiënt. Dit loopt niet altijd goed af. In de bijlage is als voorbeeld een geometrie aan het oppervlak geanalyseerd. Hier blijkt dat de wortel uit de consolidatiecoëfficiënt gemiddeld moet worden.

4 Evaluatie

Tot nu toe kunnen de effecten van kruip onder ophogingen op drie manieren bepaald worden. Er is een consolidatieprogramma beschikbaar, waarin het fundamentele isotachenmodel is geïmplementeerd. En er zijn de empirische regels van Koppejan en NEN6744, waarin het effect van consolidatie is gesimuleerd.

Het consolidatieprogramma is een eenvoudige ééndimensionale numerieke rekenaanpak. Er zitten enkele geavanceerde mogelijkheden in, zoals het effect van verticale drains, spanningsspreiding en calibratie van de grondeigenschappen met behulp van zakbaakmetingen. De toepassing van verticale drains is moeilijk te realiseren in de klassieke empirische regels.

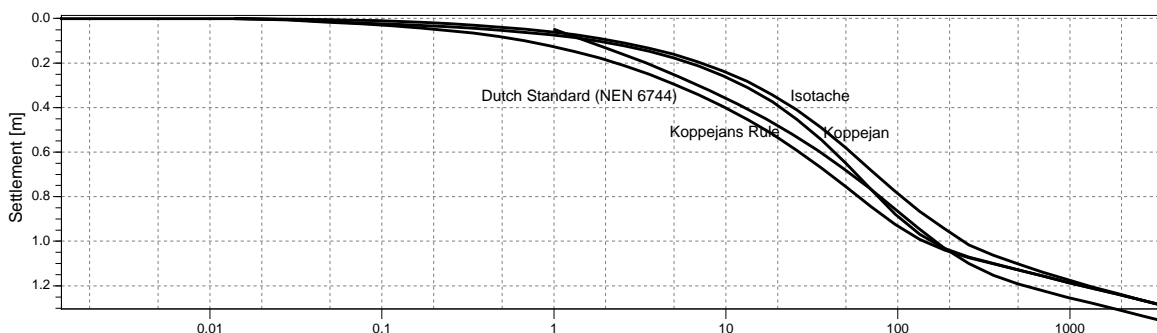
Om de Koppejan- en NEN6744-methode toch flexibeler te maken voor uitbreidingen, zijn hun zakkingsregels omgezet naar een spanning-rekmodel. Deze zijn toegevoegd aan het algemene consolidatieprogramma. Het resultaat is een veelzijdig rekenprogramma waarmee zakkingsen ten gevolge van kruip kunnen worden uitgerekend. Een keus uit drie grondmodellen is nu mogelijk: Isotache, Koppejan en NEN6744.

Naast deze fundamentele bepalingen blijft het rekengereedschap dat direct gebaseerd is op de regel van Koppejan en NEN6744 beschikbaar. De fundamentele bepaling wordt geïntegreerde aanpak genoemd, omdat consolidatie en kruip elkaar beïnvloeden. De klassieke regels worden aangeduid als ontkoppelde aanpak, omdat consolidatie en kruip separaat worden bepaald.

Voor een eenvoudig geval van een enkele laag, waarop een enkele belasting staat, is een vergelijkende berekening gemaakt. Drie geïntegreerde berekeningen voor Isotache, Koppejan en NEN6744 zijn uitgevoerd. Daarnaast is de ontkoppelde Koppejan-regel toegepast. De ontkoppelde NEN6744 regel is niet opgenomen in de vergelijking. NEN6744 heeft geen mogelijkheid te rekenen met natuurlijke rekken.

De samendrukkingcoëfficiënten voor Isotache en NEN6744 zijn op elkaar afgestemd. In beide modellen kunnen dus dezelfde waarden gehanteerd worden. De primaire coëfficiënt in Koppejan is hetzelfde als de b -waarde van Isotache. Alleen voor de seculaire coëfficiënt van Koppejan is er geen directe relatie. Deze is proberenderwijs zodanig bepaald, dat de eindzetting van Koppejan overeenkomt met die van Isotache en NEN6744.

De rekenresultaten zijn samengevat in de volgende grafiek.



Figuur 4.1 Zettingverloop, bepaald met behulp van de beschikbare rekenprogramma's

De resultaten zijn bemoedigend en de verschillen zijn begrijpelijk. De grondmodellen NEN6744 en Isotache geven dezelfde eindzettingen. Het grondmodel Koppejan is hierop gefit. De regel van Koppejan zou dan ook moeten samenvallen met de eindwaarde, maar doet dit niet. Kennelijk is de manier waarop natuurlijke rekken zijn gesimuleerd, ietwat afwijkend van de wijze waarop dit gedaan is in de geïntegreerde aanpak.

Isotache vertoont de grootste vertragingen door consolidatie. Dit is begrijpelijk, omdat de reksnelheid bestaat uit een elastische component en een kruipcomponent. Alleen bij Isotache is de kruipcomponent geïmplementeerd. Alle andere hebben alleen een elastische reksnelheid en moeten dus sneller aanpassen. Dit is duidelijk te zien bij het grondmodel NEN6744 en ook de regel van Koppejan.

Het grondmodel Koppejan vertoont een extra vertraging. Dit komt door de spanning-afhankelijkheid van de seculaire term. Dit reduceert aanvankelijk de zakkingen. Je zou kunnen stellen dat dit de invloed van de kruipsnelheid simuleert. Bij de regel van Koppejan is de consolidatiefactor alleen toegepast op de directe rek en treedt dit effect dus niet op.

5 Samenvatting en conclusies

Er is een numeriek eendimensionaal consolidatieprogramma beschikbaar om de zakkingen ten gevolge van kruip te bepalen. Dit programma heeft enkele geavanceerde mogelijkheden, zoals versnelde consolidatie voor toepassing van verticale drains en het ijken van samendrukking-constanten in-situ.

Het grondgedrag in dit rekenschema wordt ingevoerd als een reksnelheid. Dit laat de mogelijkheid open om te werken met verschillende grondmodellen. Er hoeft alleen een module gemaakt te worden waarin de reksnelheid gecodeerd is. In het consolidatieprogramma kan de gebruiker kiezen welke module gebruikt wordt.

Om de klassieke modellen van Koppejan en NEN6744 te kunnen laten profiteren van de geavanceerde mogelijkheden, zoals het modelleren van verticale drains, is het dus nodig deze te schrijven in de vorm van een reksnelheid. Dit is hier uitgevoerd. Er is van de gelegenheid gebruik gemaakt om de rekken te definiëren als natuurlijke rek, zodat grote vervormingen mogelijk zijn.

Er dreigen twee soorten trendbreuk met het verleden. Enerzijds is het seculaire deel van de reksnelheid tot nu toe niet in ogenschouw genomen. Anderzijds wordt in de klassieke regels de consolidatiecoëfficiënt constant verondersteld, terwijl deze in de werkelijkheid afhangt van het spanningsniveau.

De eerste trendbreuk wordt afgewezen. Het argument hierbij is dat de empirische regels zijn opgesteld om zakkingen te voorspellen. Het juist beschrijven van de kruiprek is geen doel geweest. De angst bestaat dat deze afgeleide grootheid een overtrokken invloed krijgt. Geen invloed wordt beter geacht dan een verkeerde invloed. Het ziet er naar uit dat deze keus voor Koppejan juist is, maar voor NEN niet.

Vanuit oogpunt van programmeren is dit niet zo belangrijk. De kruiprek wordt toch bijgehouden en gesommeerd. Zodra besloten wordt om toch de invloed van de kruiprek op de consolidatie mee te nemen, kan deze makkelijk worden toegevoegd.

De tweede trendbreuk is niet te vermijden. De modellering moet intern consistent zijn. Indien resultaten uit het verleden van belang zijn voor de interpretatie van predicties, zal een goede vergelijking gemaakt moeten worden tussen een waarde voor de consolidatiecoëfficiënt en de doorlatendheid. Een aanpassing door middeling is niet altijd de juiste.

Uit een vergelijkende studie tussen de effecten van de beschikbare grondmodellen op de zettingen blijkt dat het gedrag van elk model apart goed te begrijpen is. Isotache geeft de grootste vertragingen, omdat dit model de kruiprek in de berging verwerkt. Het grondmodel Koppejan komt hier heel dichtbij door de spanningsafhankelijkheid van de seculaire term. Het grondmodel NEN6744 zakt sneller tijdens de consolidatieperiode, omdat de invloed van de kruiprek op de berging niet meegenomen is.

6 Lijst met symbolen

C [-] : samendrukkingcoëfficiënt Koppejan

c [-] : samendrukkingcoëfficiënt NEN6744

h [m] : laagdikte

p [Pa] : gronddruk

v [m³] : volume

s [m] : zetting

t [d] : verlopen tijd

z [m] : verticale positie

J [d] : tijdstip van aanbrenge gronddruk

t [d] : referentietijd

j [m] : stijghoogte

index ₀ : initieel

_{p, c} : primair

_{s, α} : seculair

Bijlage 1 Diepte-afhankelijke consolidatiecoëfficiënt

De Koppejan regel is gecorrigeerd voor consolidatie. Hierbij is ervan uitgegaan dat de consolidatie coëfficiënt constant is. In werkelijkheid hangt deze coëfficiënt van de korrelspanning af. In de geïntegreerde aanpak is dit zo geïmplementeerd. Om de geïntegreerde en de ontkoppelde resultaten te kunnen vergelijken moet er dus een gemiddelde werking bepaald worden.

Dit kan gerealiseerd worden door twee oplossingen te bepalen. Een voor een spanningsafhankelijke consolidatiecoëfficiënt en een voor een constante coëfficiënt. We beginnen met de spanningsafhankelijke, waarbij een lineair met de diepte toenemende spanning verondersteld wordt. De bergingsvergelijking luidt:

$$\frac{\partial^2 j}{\partial z^2} = \frac{h}{z} \frac{1}{c_{vh}} \frac{\partial j}{\partial t}$$

De waarde van de consolidatiecoëfficiënt geldt op de onderkant van de laag. Het is niet noodzakelijk de werkelijke oplossing voor deze vergelijking te beschouwen voor de beoogde vergelijking. Een getransformeerde oplossing is ook goed. Om de lastige tijdbepaling te vermijden, wordt dan ook gewerkt met de Laplace getransformeerde vorm:

$$\frac{\partial^2 \bar{j}}{\partial z^2} = \frac{h}{z} \frac{p}{c_{vh}} \left(\bar{j} - \frac{j_0}{p} \right) \quad \bar{j} = \int_0^{\infty} j \exp(-pt) dt$$

Op tijdstip 0^+ wordt de waterspanning met één klap verhoogd tot j_0 . Op de randen geldt de voorwaarde $j = 0$. De oplossing van deze differentiaal vergelijking is standaard. Hij is aangegeven in de tekstboeken als een variant van de Besselfuncties. De afleiding wordt niet gegeven. Het resultaat kan eenvoudig gecontroleerd worden. De oplossing luidt:

$$p \frac{\bar{j}}{j_0} = 1 - a \sqrt{\frac{z}{h}} K_1 \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) - \frac{1 - a K_1(a)}{I_1(a)} \sqrt{\frac{z}{h}} I_1 \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) \quad a = 2 \sqrt{\frac{ph^2}{c_{vh}}}$$

Van belang is te zien dat $a \sqrt{(z/h)} K_1[a \sqrt{(z/h)}]$ en $a \sqrt{(z/h)} I_1[a \sqrt{(z/h)}]$ voldoen aan de differentiaal vergelijking. Voorts dat het geheel voldoet aan de begin- en randvoorwaarden. Nu zijn we niet geïnteresseerd in individuele waarden, maar in het gemiddelde. Voor Besselfuncties geldt:

$$\frac{1}{h} \int_0^h a \sqrt{\frac{z}{h}} K_1 \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) dz = \frac{2}{a^2} \int_0^h \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right)^2 K_1 \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) d \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) = - \frac{2}{a^2} \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right)^2 K_2 \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) \Big|_0^h$$

en

$$\frac{1}{h} \int_0^h a \sqrt{\frac{z}{h}} I_1 \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) dz = \frac{2}{a^2} \int_0^h \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right)^2 I_1 \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) d \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) = \frac{2}{a^2} \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right)^2 I_2 \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) \Big|_0^h$$

De gemiddelde stijghoogte krijgt dan de vorm:

$$p \frac{\bar{j}}{j_0} = 1 + 2 \frac{z}{h} K_2 \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) \Big|_0^h - \frac{1 - a K_1(a)}{a I_1(a)} 2 \frac{z}{h} I_2 \left(a \sqrt{\frac{z}{h}} \right) \Big|_0^h \quad a = 2 \sqrt{\frac{ph^2}{c_{vh}}}$$

Invulling van de grenzen leidt tot:

$$\frac{\tilde{j}}{j_0/p} = 1 + 2K_2(a) - \frac{4}{a^2} - \frac{1-aK_1(a)}{aI_1(a)} 2I_2(a) \quad a = 2\sqrt{\frac{ph^2}{c_{vh}}}$$

De som van de tweede term en de laatste term van het rechter lid bevat een Wronskiaan. Dit is een begrip in de theorie van Besselfuncties waarvoor geldt:

$$K_2(a)I_1(a) + K_1(a)I_2(a) = \frac{1}{a}$$

Substitutie hiervan leidt tot:

$$p \frac{\tilde{j}}{j_0} = 1 - \frac{4}{a^2} - 2 \frac{I_2(a)-1}{aI_1(a)} = 1 - 2 \frac{aI_2(a)+2I_1(a)-a}{a^2I_1(a)} \quad a = 2\sqrt{\frac{ph^2}{c_{vh}}}$$

Tussen de orden van Besselfuncties gelden speciale recurrente betrekkingen. Hierdoor kan het resultaat verder vereenvoudigd worden:

$$p \frac{\tilde{j}}{j_0} = 1 - 2 \frac{I_0(a)-1}{aI_1(a)} \quad aI_2(a)+2I_1(a) = aI_0(a) \quad a = 2\sqrt{\frac{ph^2}{c_{vh}}}$$

Hiermee is de oplossing voor een lineair met de diepte toenemende consolidatiecoëfficiënt voldoende in kaart gebracht.

Nu wordt de oplossing voor een constante coëfficiënt bepaald. De uitgangsvergelijking is:

$$\frac{\partial^2 j}{\partial z^2} = \frac{1}{c_v} \frac{\partial j}{\partial t}$$

De Laplace getransformeerde vorm hiervan is:

$$\frac{\partial^2 \bar{j}}{\partial z^2} = \frac{p}{c_v} \left(\bar{j} - \frac{j_0}{p} \right) \quad \bar{j} = \int_0^{\infty} j \exp(-pt) dt$$

De oplossing hiervan luidt:

$$p \frac{\bar{j}}{j_0} = 1 - \frac{\cosh\{h(2z/h-1)\}}{\cosh(h)} \quad h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{ph^2}{c_v}}$$

Het gemiddelde hiervan is:

$$p \frac{\tilde{j}}{j_0} = 1 - \frac{\tanh(h)}{h} \quad h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{ph^2}{c_v}}$$

Hiermee is de oplossing voor een constante consolidatiecoëfficiënt bepaald.

Nu willen we dat de twee oplossingen zich redelijk analoog in de tijd gedragen. Om dit vast te stellen, is het niet nodig om de oplossing specifiek in de tijd te kennen. De in de tijd Laplace getransformeerde oplossingen zijn voldoende. Gemiddeld over de hoogte is er goede overeenstemming, indien er geldt:

$$2 \frac{I_0(a)-1}{a I_1(a)} \sim \frac{\tanh(h)}{h} \quad a = 2 \sqrt{\frac{ph^2}{c_{vh}}} \quad h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{ph^2}{c_v}}$$

Kleine waarden van de tijd komen overeen met grote waarden van p en grote waarden van de tijd met kleine waarden van p . Voor grote waarden van de tijd zijn de wateroverspanningen weggedissipeerd. De overeenstemming is dan triviaal. Maar voor kleine waarden van de tijd heeft de voorwaarde wel degelijk betekenis. De waarden van I_0 en I_1 worden dan heel groot en ongeveer gelijk aan elkaar; $\tanh(h)$ benadert dan 1. De voorwaarde gedraagt zich dan als:

$$\frac{2}{a} \sim \frac{1}{h} \quad a = 2 \sqrt{\frac{ph^2}{c_{vh}}} \quad h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{ph^2}{c_v}}$$

Of:

$$\sqrt{\frac{ph^2}{c_{vh}}} \sim \frac{1}{2} \sqrt{\frac{ph^2}{c_v}} \quad c_{vh} = 4c_v$$

Het blijkt dat de consolidatiecoëfficiënt niet gemiddeld moet worden, maar nog sterker gereduceerd. Dit komt doordat de stijfheid aan het oppervlak erg klein is. Door de grote rekken wordt er aan het oppervlak zoveel water gegenereerd, dat de poriën als het ware verstopt raken. Op grotere diepte speelt dit probleem niet, omdat de stijfheid aldaar veel hoger is.

Het water zal dus hoofdzakelijk naar beneden moeten afstromen. Het lijkt er dan op dat de laagdikte verdubbeld is.