

ONDERZOEKSRAPPORT AFSTUDEERONDERZOEK OPBARSTRISICO

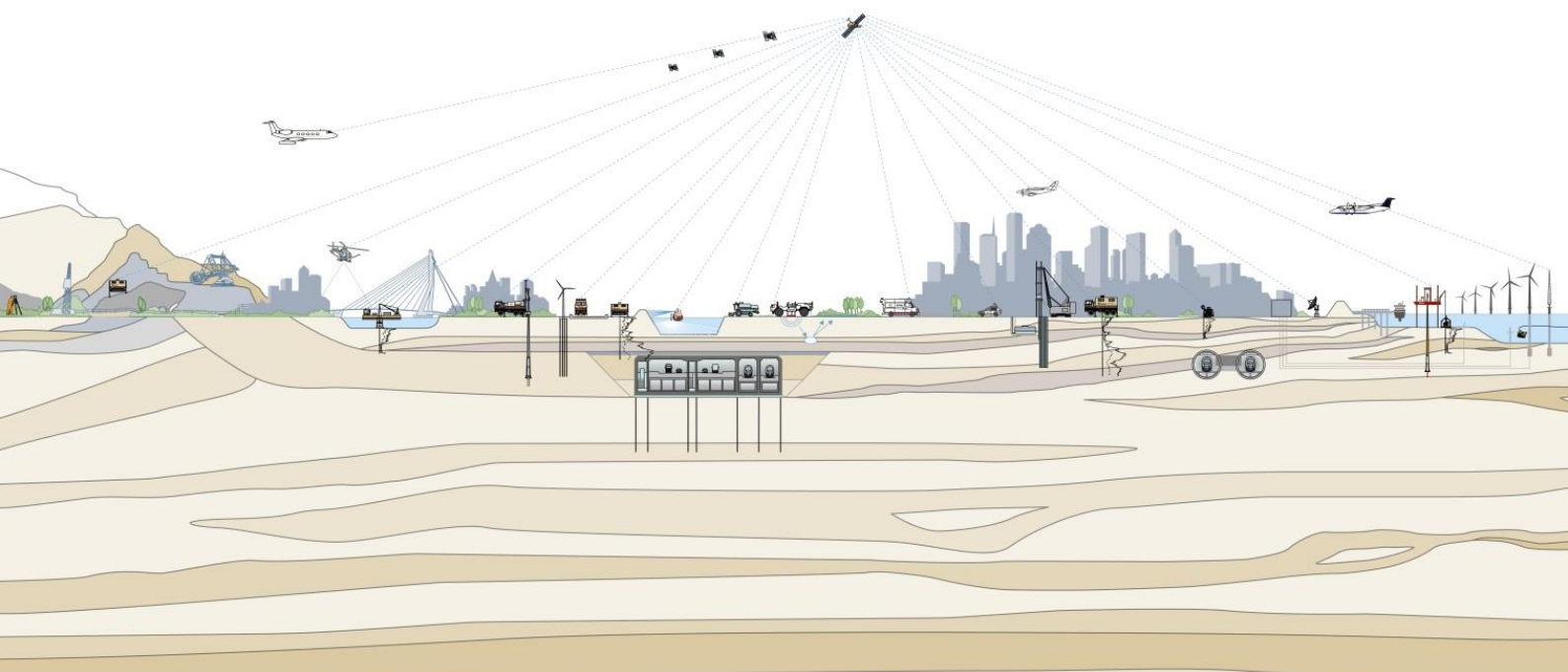
Versie: 2.0

Datum: 6 juni 2018

Opgesteld door: Peter Kleijn
Roald Hetem

Opdrachtgever: Fugro NL Land B.V.

Begeleider: Henk van der Velden
Harrie van Rosmalen



Opdrachtgever Fugro NL Land B.V.
Ringoven 37
Postbus 5009
6802 EA ARNHEM
T 026 3698444

Datum 5 juni 2018
Opdrachtnemer Peter Kleijn, Roald Hetem
Ringoven 37
Postbus 5009
6802 EA ARNHEM
T 06 23095275

Projectleider ir. W.H.J. van der Velden
Teammanager GeoAdvies
T 026 36 98444

Projectmedewerkers Peter Kleijn (auteur)
Afstudeerstudent Land- en Watermanagement
Hogeschool Van Hall Larenstein, te Velp

Roald Hetem (auteur)
Afstudeerstudent Land- en Watermanagement
Hogeschool Van Hall Larenstein, te Velp

Versiebeheer

1.0	Conceptversie	Peter Kleijn Roald Hetem	17-5-2018
2.0	Definitieve versie	Peter Kleijn Roald Hetem	6-6-2018
Rev	Omschrijving	Opgesteld	Datum

VOORWOORD

Voor u ligt de afstudeerscriptie "Afstudeeronderzoek opbarstrisico". Het onderzoeksrapport is in opdracht van Fugro NL Land B.V. te Arnhem opgesteld en beschrijft hoe het opbarstrisico beter benaderd kan worden dan dat de huidige voorgeschreven methode dit doet.

De focus ligt in dit onderzoek voornamelijk op het beter begrijpen van het opbarstrisico en hoe omgegaan dient te worden met de opbarstproblematiek. Om dit doel te bereiken is onderzoek gedaan naar opbarsten in het algemeen en naar hoe het risico bepaald wordt. Een inventarisatie is verricht naar ervaringen betreffende het onderwerp en welke ontwikkelingen hebben plaatsgevonden met betrekking tot het bepalen van het opbarstrisico. Hieruit zijn de (bodem)parameters bepaald die invloed hebben op het opbarstrisico. Een zelfontwikkelde schaalproef en uitgewerkte veldproef zijn tevens ontworpen, waarmee het risico beter ingeschat en begrepen kan worden.

Wij zijn dankbaar voor de goede samenwerking met en begeleiding van Fugro NL Land B.V. Tijdens de afstudeerperiode hebben we beide veel over het onderwerp geleerd en we zijn verheugd om een steentje te kunnen bijdragen, zodat in de toekomst het opbarstrisico beter benaderd kan worden.

Graag zouden we onze begeleider Henk van der Velden willen bedanken voor het mogelijk maken van de afstudeerstage en de begeleiding gedurende het afstuderen. Hans Vloermans en Olaf Duizendstra worden bedankt voor de overdracht van kennis op het gebied van opbarsten en modelleren. Tevens bedanken wij Piet van der Velde voor het mogelijk maken van de schaalproef en het begeleiden hiervan. Twee collega afstudeerders, Ronald Marks en Sven Goslinga, worden bedankt voor de gezelligheid en hulp gedurende het afstuderen.

Daarnaast worden Arnoud van de Lockant namens Hoogheemraadschap van Rijnland, Ruben Keijzer en Gerrie de Jong namens Waterschap Hollandse Delta, Mechiel van Appeldoorn namens Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard bedankt voor het mogelijk maken van interviews.

Tot slot willen de auteurs Harrie van Rosmalen bedanken voor de begeleiding vanuit Hogeschool Van Hall Larenstein te Velp en Karen Leever voor de beoordeling.

De auteurs wensen u veel leesplezier toe.

Namens de auteurs,
6 juni 2018

Peter Kleijn



Roald Hetem



SAMENVATTING

Tijdens dit onderzoek is getracht antwoord te krijgen op de vraag op welke wijze het opbarstrisico kan worden benaderd, zodanig dat deze beter aansluit bij de werkelijke situatie.

De aanleiding van dit onderzoek is de opbarstproblematiek die voornamelijk afspeelt in het westen van Nederland. Daar ligt het maaiveld van polders vaak lager dan de rivierwaterstand of het Normaal Amsterdams Peil (NAP), waardoor de stijghoogte van artesisch water dusdanig hoog ligt dat het risico op opbarsten groot is. Het opbarstrisico wordt bepaald aan de hand van de voorgeschreven methode uit de NEN 9997-1. Met deze rekenmethode wordt de neerwaartse gronddruk vergeleken met de opwaartse artesische waterdruk. Overige bodemeigenschappen worden niet meegenomen bij deze bepaling en de verwachting is dat enkele eigenschappen invloed hebben op het opbarstrisico. Het inzichtelijk maken van het werkelijke opbarstrisico en een beter begrip hiervan is van belang, zodat onnodige maatregelen en kosten bespaard kunnen worden. Dit draagt bij aan de verduurzaming van projectrealisatie in opbarstgevoelige gebieden.

De afstudeerperiode is begonnen met een literatuuronderzoek naar opbarsten in het algemeen en hoe het risico bepaald wordt. Een inventarisatie is verricht naar de ervaringen rondom het onderwerp en welke ontwikkelingen hebben plaatsgevonden met betrekking tot het bepalen van het opbarstrisico. Hieruit zijn invloed hebbende (bodem)parameters vastgesteld die nodig zijn voor de toetsing van het opbarstrisico. Dit is gedaan met behulp van het eindige elementenprogramma Plaxis 2D en een schaalproef. Deze zelfontwikkelde schaalproef is uitgevoerd en tevens is een protocol voor een veldproef ontworpen, waarmee het opbarstrisico beter bepaald kan worden. De uitkomsten van de uitgevoerde schaalproeven zijn getoetst aan de hand van het Hardening Soil model in Plaxis 2D. Over de verkregen resultaten is uitspraak gedaan en aanbevelingen voor nader onderzoek zijn geformuleerd.

Uit de resultaten van het onderzoek wordt geconcludeerd dat opbarsten een groot risico vormt voor zowel de waterveiligheid als het behoud van goede kwaliteit van oppervlaktewater. Hoe groot het risico is, wordt bepaald aan de hand van de voorgeschreven methode uit de NEN 9997-1, alternatieve rekenmethodes worden in de praktijk niet gebruikt, omdat deze niet algemeen geaccepteerd zijn.

Door onder andere Plaxis 2D te gebruiken is bepaald dat niet alleen de parameters uit de voorgeschreven rekenmethode (volumiek gewicht waterremmende deklaag en stijghoogte artesisch water) bepalend zijn voor het opbarstrisico. Ook doorlatendheid, ongedraineerde schuifsterkte en de elasticiteitsmodulus hebben invloed op het opbarstrisico. De kwelweglengte heeft invloed op de stijghoogte van het artesische water. Veiligheidsfactoren worden gebruikt ter compensatie van onnauwkeurigheid van het bodemonderzoek. Wanneer grondig grond- en laboratoriumonderzoek is uitgevoerd, kan deze factor in sommige gevallen aangepast of weggelaten worden.

Uit de uitgevoerde schaalproef blijkt dat de berekeningen aan de hand van Plaxis 2D de meest nauwkeurige uitkomsten voor de bepaling van het opbarstrisico geeft. De rekenmethoden van De Jongh onderschatten het opbarstrisico en NEN 9997-1 overschat het opbarstrisico.

Een veldproef op ware schaal levert veel informatie op ten aanzien van het fenomeen opbarsten, zowel in wetenschappelijk opzicht als voor het toetsen van bijvoorbeeld een ontgravingsplan. De kennis die een veldproef oplevert, draagt bij aan een meer nauwkeurige methodiek voor het bepalen van het opbarstrisico. Dit heeft een toegevoegde waarde voor een veilige en duurzame gebiedsontwikkeling in West-Nederland.

INHOUD

1.	INLEIDING	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Aanleiding	1
1.3	Probleembeschrijving	1
1.4	Hoofdvraag en deelvragen	2
1.5	Werkwijze	2
1.6	Doel	2
1.7	Doelgroep	3
1.8	Randvoorwaarden	3
2.	OPBARSTRISICO IN HET ALGEMEEN	5
2.1	Achtergrond	5
2.2	Principe opbarsten	5
2.3	Welvorming en opdrijven	6
2.4	Invloed van piping	7
2.5	Rekenmethodes bepaling opbarstrisico	8
2.6	Veiligheidsfactoren	11
2.7	Effect klimaatverandering	11
3.	INVENTARISATIE OPBARSTERVERINGEN, MODELLEN EN PROEVEN	13
3.1	Opbarstervering in het verleden	13
3.2	Opbarstproef Culemborg	14
3.3	Opbarstproef Waddinxveen	18
3.4	Situatie Gorinchem	20
3.5	Plaxis 2D analyse	21
3.6	Interviews externe partijen	27
3.7	Mogelijke maatregelen tegen opbarsten watergangen	28
3.8	Conclusie	29
4.	PARAMETERS DIE INVLOED HEBBEN OP HET OPBARSTRISICO	31
4.1	Volumiek gewicht waterremmende deklaag	31
4.2	Doorlatendheid waterremmende deklaag	32
4.3	Stijghoogte	32
4.4	Cohesie en ongedraineerde schuifsterkte	35
4.5	Elasticiteitsmodulus	36
4.6	Freatisch water	36
4.7	Veiligheidsfactoren	36
4.8	Conclusie	37
5.	TOETSING DOOR MIDDEL VAN EEN VELD- EN SCHAALPROEF OPBARSTEN	39
5.1	Inleiding	39
5.2	Opzet schaalproef opbarsten	39
5.3	Resultaten uitgevoerde schaalproeven	40

5.4	Vergelijking resultaten schaalproef met rekenmethoden	42
5.5	Opzet veldproef opbarsten	43
6.	CONCLUSIE, DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN	45
6.1	Conclusie	45
6.2	Discussie	48
6.3	Aanbevelingen	48
7.	BIBLIOGRAFIE	49
	BIJLAGEN	50

1. INLEIDING

1.1 Achtergrond

Voornamelijk het westen van Nederland heeft te maken met inklinking van de bodem. Dit heeft te maken met de toenemende ontwatering in deze gebieden. Een van de nadelen van inklinking is dat bodemdaling plaatsvindt waardoor de slecht doorlatende veen- of kleilagen dunner worden. De waterremmende werking van deze pakketten kan nog meer aangetast worden wanneer men hier de laagdikte verkleint.

In de Gemeente Gorinchem vindt een dergelijke situatie plaats. De gemeente heeft plannen om bedrijventerrein Groote Haar te realiseren ten noordoosten van knooppunt A27/A15. Dit bedrijventerrein zal een omvang hebben van circa 62,5 hectare. Deze locatie bestaat tot op heden uit agrarische percelen. De bodem bestaat ter plekke van het toekomstige bedrijventerrein uit veen- en kleilagen. De stijghoogte in het eerste watervoerend pakket, oftewel de artesische waterstand, ligt hier boven het maaiveld. Dit betekent dat het waterdruk uitoefent op de onderkant van de waterremmende deklaag. Ten behoeve van watercompensatie worden watergangen gerealiseerd rondom het bedrijventerrein.

1.2 Aanleiding

Om de watergangen te kunnen aanleggen is onderzoek gedaan naar de opbarstveiligheid. Hieruit is gebleken dat op meerdere locaties op het toekomstige bedrijventerrein een zeer hoog opbarstrisico bestaat. Verwacht wordt dat bij het ontgraven opbarsten zal plaatsvinden. Dit houdt in dat er niet langer een verticaal evenwicht bestaat in de bodem en dat deze kan 'bezijken'. Dit heeft nadelige gevolgen voor de waterhuishouding (kwantiteit en kwaliteit) van het gebied en dient voorkomen te worden.

Het onderzoek zal echter niet focussen op dit gebied, maar zal zich meer richten op het mechanisme van opbarsten zelf en hoe het risico hierop beter inzichtelijk gemaakt kan worden. Dit wil zeggen dat getracht wordt antwoord te verkrijgen op de hieronder genoemde probleembeschrijving.

1.3 Probleembeschrijving

De NEN 9997-1 norm is de voorgeschreven norm om het opbarstrisico te bepalen. Hierin staat een aantal methoden ter bepaling van de opbarstveiligheid. De meest gebruikte methode vergelijkt het gewicht van de bovenliggende laag met de omhooggerichte waterdruk (stijghoogte). Wanneer de opwaartse waterdruk groter is dan het neerwaartse gewicht van de bodem, kan volgens de theorie opbarsten plaatsvinden. Echter is uit verschillende praktijkproeven gebleken dat de beschreven rekenmethode een te pessimistisch beeld geeft. De verwachting is dat het werkelijke opbarstrisico kleiner is dan het risico welke is berekend met de NEN 9997-1 rekenmethode en dat meer aspecten een rol spelen bij de bepaling van het opbarstrisico. Door de pessimistische benadering worden onnodige kosten gemaakt voor maatregelen, zoals een ballastbed op de bodem, om opbarsten te voorkomen.

1.4 Hoofdvraag en deelvragen

De hoofdvraag luidt als volgt:

“Op welke wijze kan het opbarstrisico worden benaderd, zodanig dat deze beter aansluit bij de werkelijke situatie dan de voorgeschreven methode?”

De deelvragen luiden als volgt:

1. *Wat zijn de voorgeschreven en alternatieve methodes voor het uitvoeren van opbarstberekeningen en hoe worden deze toegepast?*
2. *Welke conclusies kunnen getrokken worden uit praktijkervaringen bij waterschappen en specifiek uit uitgevoerde opbarstproeven in Culemborg en Waddinxveen?*
3. *Welke bodemgerelateerde aspecten en omgevingsaspecten zijn van invloed op het opbarstrisico?*
4. *Hoe dient een protocol voor een veld- en schaalproef, waarmee het risico voor opbarsten beter inzichtelijk wordt dan wanneer deze aan de hand van de voorgeschreven methode wordt bepaald, eruit te zien?*
5. *Kan het opbarstrisico, behorende bij de resultaten van de uitgevoerde schaalproef worden berekend, met behulp van verschillende methoden, en welke conclusies kunnen daaruit worden getrokken?*

1.5 Werkwijze

Het onderzoek bestaat uit vijf fasen, die elk antwoord geven op de gestelde deelvragen. De eerste twee fasen bestaan uit een literatuurstudie naar het fenomeen opbarsten en naar de bepaling van het opbarstrisico. De voorgeschreven en alternatieve methoden zijn beschreven. Ook zijn uitgevoerde opbarstproeven geïnventariseerd en opnieuw doorgerekend en beschreven. Tevens zijn interviews gehouden met partijen die ervaring hebben met opbarsten.

In de derde fase wordt nagegaan welke bodemeigenschappen en overige aspecten van invloed kunnen zijn op het opbarstrisico.

In de vierde fase wordt een protocol beschreven voor een schaalproef en een veldproef naar opbarsten, zodanig dat deze in de toekomst herhaald kunnen worden. Ten slotte wordt een bepaling van het opbarstrisico geformuleerd aan de hand van de meest geschikte methode op basis van de schaalproeven.

1.6 Doel

Het doel van dit onderzoek is om beter inzicht te krijgen in bodemeigenschappen die het risico op opbarsten bepalen, zodat in de toekomst bij vergelijkbare situaties een betere inschatting van het opbarstrisico kan worden gemaakt. Deze kennis zal toegepast worden bij het ontwikkelen van een nieuwe of aangepaste werkwijze, het vaststellen van het benodigde onderzoek ter bepaling van de parameters in deze werkwijze en het definiëren van een schaalproef of anderszins.

Het beoogde resultaat is het leveren van een onderzoeksrapport, waarin de hoofdvraag wordt beantwoord, oftewel een methode wordt geformuleerd waarmee het opbarstrisico zo nauwkeurig mogelijk bepaald kan worden.

Naast het onderzoeksrapport wordt een handleiding van een veld- en schaalproef opgesteld en geleverd.

Het onderzoeksrapport bestaat uit zes hoofdstukken.

1.7 Doelgroep

Dit onderzoek wordt uitgevoerd voor Fugro NL Land B.V. Ook wordt het rapport opgesteld voor de afstudeerbegeleider en beoordelaar vanuit Hogeschool Van Hall Larenstein, te Velp.

1.8 Randvoorwaarden

Tijdens het afstudeeronderzoek wordt uitsluitend getracht antwoord te krijgen op de deelvragen en de hoofdvraag. Irrelevante informatie en zaken die niet verbonden zijn met deze vragen worden buiten beschouwing gelaten. Invloeden van piping op het opbarstrisico worden beschreven maar niet meegenomen in berekeningen en benaderingen.

De onderzoeksperiode start op 5 februari en eindigt op 7 juni 2018. Gedurende deze periode wordt uitsluitend gewerkt aan het onderzoek. Het colloquium zal tussen 14 juni en 4 juli 2018 gehouden worden.

De omvang van het rapport is maximaal 15.000 woorden.

2. OPBARSTRISICO IN HET ALGEMEEN

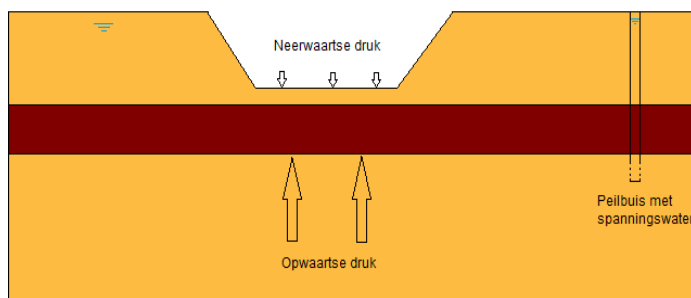
Dit hoofdstuk beschrijft wat opbarsten van een slecht doorlatende veen- of kleilaag inhoudt en hoe dit bodemproces wordt beïnvloed. Ook wordt een introductie gegeven van de huidige methodes om het opbarstrisico te bepalen en hoe veiligheidsfactoren gebruikt worden. Als laatste worden externe invloeden op het opbarstrisico beschreven.

2.1 Achtergrond

Nederland, met name het westen en het noorden, heeft te maken met bodemdaling en inklinking. Een proces dat zich eeuwenlang voordoet en in de toekomst zal dit proces door blijven gaan. Een gedeelte van deze processen is natuurlijk, maar het merendeel is te danken aan menselijk handelen. Vooral bodemdaling door inklinking van veen- en kleilagen zorgt voor veel problemen voor de stabiliteit van de bodem. Inklinking is het proces waarbij deze veen- en kleilagen door daling van het grondwater dalen en compacter worden. Deze daling van het grondwater wordt toegepast, zodat het land bewerkt kan worden. Ook oxidatie van veen, door afwezigheid van water, kan dit proces versterken. Dit proces is slecht omkeerbaar. Omdat deze twee processen een versterkende werking op elkaar hebben, daalt de bodem steeds verder. Het gevolg hiervan is dat door de eeuwen heen de veenbodems tot wel vijf meter zijn gedaald in West-Nederland (A.G. Jongmans, M.W. van den Berg, 2013).

2.2 Principe opbarsten

In opbarstgevoelige gebieden kan het voorkomen dat artesisch water in het eerste watervoerend pakket een omhooggerichte waterdruk op de waterremmende klei- of veenlaag uitoefent (zie figuur 1). Wanneer het gewicht van deze waterremmende slappe laag minder druk geeft dan de opwaartse waterdruk uit het watervoerend pakket is er niet langer sprake van een verticaal evenwicht. Bodemdaling versterkt dit fenomeen, met name wanneer veenoxidatie ook een rol speelt. Dit verstoorde evenwicht tussen de twee krachten kan resulteren in het opbarsten van de deklaag. Dit wil zeggen dat de deklaag door de omhooggerichte druk barst en water vanuit het watervoerend pakket omhoog stroomt naar het oppervlaktewater. Wanneer zand wordt meegevoerd in deze waterstroom kan een permanente watervoerende verbinding ontstaan tussen grond- en oppervlaktewater. Het herstel van een opgebarsten deklaag is complex en kostbaar.



Figuur 1 verticaal evenwicht (VGHM, 2016)

Risico ontgravingen

Bij het ontwikkelen van percelen worden doorgaans watergangen gegraven ter ontwatering van het terrein. Dit kan tevens worden gedaan ten behoeve van watercompensatie of het aantrekkelijker maken van de omgeving. Een ontgraving van de toplaag in gebieden in het westen betekent echter dat de dikte van de waterremmende deklaag verkleind wordt. Het gewicht van de ontgraven grond draagt nu niet langer bij aan de verticale stabiliteit van de bodem. Dit heeft een verhoogd opbarstrisico tot gevolg. Hetzelfde probleem speelt bij het graven van bouwputten, waar de bodem tussen de damwanden kan opbarsten ten gevolge van opwaartse waterdruk.

2.2.1 Waterkwaliteit

Wanneer de waterremmende deklaag opbarst heeft dit een negatieve invloed op de waterhuishouding van een gebied. Wanneer een permanente watervoerende verbinding ontstaat tussen grond- en oppervlaktewater en de stijghoogte hoger is dan het bodempeil dan zal water uit het eerste watervoerend pakket zich mengen met het oppervlaktewater. Dit water heeft andere eigenschappen dan oppervlaktewater. Zo is de kans erg groot dat de hoeveelheid opgeloste mineralen, nitraten, waterstofsulfide en tweewaardige ijzerionen groter is in grondwater dan in oppervlaktewater. Daarbij kan de temperatuur sterk verschillen (Lenntech, 2009). Een verandering van samenstelling van het oppervlaktewater kan een negatieve invloed hebben op de gewenste waterkwaliteit van het gebied en dus ook op de flora en fauna van het oppervlaktewater. Sloten waarin opbarsten heeft plaatsgevonden worden troebel en laten minder zonlicht door, waardoor bodemvegetatie zich moeilijk kan ontwikkelen.

Daarnaast kan ook opbarsten optreden in gebieden waar het grondwater brak of zelfs zout is nabij de kust. Wanneer dit water in het oppervlaktewater komt, zal het oppervlaktewater verzilten en minder bruikbaar zijn voor bijvoorbeeld het bewateren van akkers. Daarnaast heeft verzilting ook nadelige gevolgen voor de bestaande flora en fauna van het oppervlaktewater (Stowa, 2017).

2.2.2 Waterkwantiteit

Op het gebied van de waterkwantiteit veroorzaakt het kweldebiet van grondwater naar oppervlaktewater een hogere waterafvoer. Dit komt omdat de toestroom continue is en dit extra water zal permanent afgevoerd moeten worden. Om dit overschot aan water te verwerken worden gemalen doorlopend meer belast. Een dergelijke situatie is kostbaar en ongewenst.

2.3 Welvorming en opdrijven

Welvorming

Welvorming betreft het proces waarin water zich verticaal door poriën in de waterremmende deklaag perst en zanddeeltjes meeneemt. Hierdoor kan een verticale doorlatende zandkolom ontstaan. Het gevolg is een permanente verbinding tussen het watervoerend pakket en het oppervlaktewater. Ook kan het zijn dat twee watervoerende pakketten op verschillende diepte in verbinding met elkaar komen te staan. Dit heeft gevolgen voor het bodem- en oppervlaktewater. Welvorming kan een gevolg zijn van menselijke activiteiten. Welvorming kan visueel waargenomen worden. Ook kan een drone, uitgerust met infraroodcamera, gebruikt worden om wellen op te sporen. Op de beelden is dan een warmteverschil te zien als gevolg van welvorming, omdat artesisch water vaak warmer is dan oppervlaktewater. Wanneer welvorming optreedt neemt de artesische waterdruk onder de waterremmende deklaag af, waardoor het opbarstrisico verkleind wordt



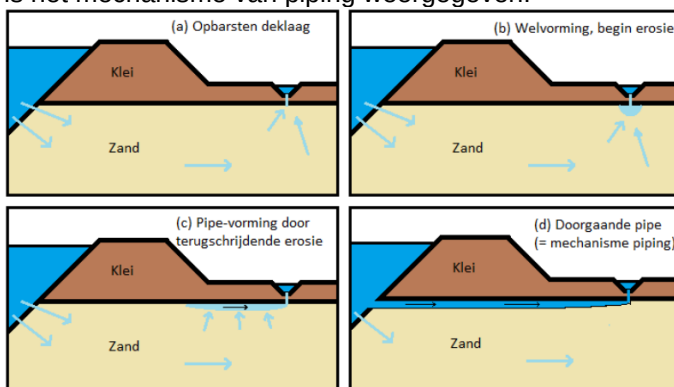
Figuur 2 Welvorming (Waterschap Rivierenland, 2018)

Opdrijven

Opdrijven treedt op wanneer de opwaartse waterdruk op de waterremmende laag groter wordt dan de neerwaartse gronddruk. Zo wordt de bodem als het ware opgetild en treden verticale vervormingen op. Een verschil met opbarsten is dat er niet per se schade hoeft te ontstaan aan de deklaag. Door het opdrijven ontstaat een nieuw verticaal evenwicht omdat er een lagere waterdruk zal zijn tegen de onderkant van de naar boven verplaatste afsluitende deklaag. De kans op opbarsten kan dan afnemen wanneer het opdrijven over een groot oppervlakte optreedt

2.4 Invloed van piping

Wanneer het betreffende gebied dichtbij een waterkering ligt, kan onder druk van het oppervlaktewater, eveneens opbarsten optreden in het lagergelegen gebied. Wanneer oppervlaktewater onder druk onder de dijk door stroomt en zand meevoert is er sprake van het fenomeen piping. Piping vindt plaats wanneer een waterkerende constructie of dijk bezwijkt en wanneer sprake is van een aantal gegevens. Ten eerste is de waterstand in het waterlichaam (rivier, kanaal etc.) hoger dan de stijghoogte van het water in het achterland. Ten tweede bestaat een doorlopende zandlaag onder de waterkering en is de waterkering slecht doorlatend. In onderstaande figuur is het mechanisme van piping weergegeven.



Figuur 3 – mechanisme piping (Rijkswaterstaat, 2012)

Om te kunnen bepalen of piping van invloed kan zijn op de stabiliteit van een waterkering wordt een toetsing toegepast. Voor deze toetsing wordt gekeken naar de bodemeigenschappen van drie situaties.

Dit zijn:

1. Een dijk bestaande uit klei op een slecht doorlatende ondergrond (klei- en veenlagen)
2. Een dijk bestaande uit zand op een slecht doorlatende ondergrond (klei- en veenlagen)
3. Een dijk bestaande uit klei op een goed doorlatende ondergrond, waarbij er direct onder de zool van de dijk geen waterremmende deklagen aanwezig zijn. (Oldhoff, 2013)

Wanneer sprake is van situatie 3, worden berekeningen met betrekking tot piping toegepast. Wanneer blijkt dat de waterkering voldoet volgens de uitgevoerde berekeningen, kan de invloed van piping op het opbarstrisico uitgesloten worden. De afstand waarop hoogwater achter waterkeringen invloed kan hebben op het opbarstrisico, de kwelweglengte, is beschreven in paragraaf 4.3.1.

2.5 Rekenmethodes bepaling opbarstrisico

Verschiede methodes zijn toe te passen voor het berekenen van het opbarstrisico. Een vergelijking van uitkomsten uit verschillende rekenmethodes is te vinden in paragraaf 3.2.1.

2.5.1 Rekenmethode volgens Terzaghi en de NEN 9997-1

De voorgeschreven methodiek ter bepaling van het opbarstrisico is beschreven in de NEN 9997-1 (2011), hoofdstuk 2. Er zijn verschillende mogelijkheden om het opbarstrisico te bepalen. (NEN 9997-1, 2011)

- Gebruik van berekeningen.
- Treffen van voorgeschreven maatregelen.
- Experimentele modellen en belastingproeven.
- Een observatiemethode.

De meest toegepaste en geaccepteerde methode is de berekening voor opbarsten. Deze methode is in eerste instantie geïntroduceerd door Terzaghi. Met deze rekenmethode wordt de neerwaartse gronddruk vergeleken met de opwaartse artesische waterdruk. Bij de stabiliteitsberekeningen dient de neerwaartse belasting van de grond te worden vermenigvuldigd met een (partiële materiaal-) factor van 0,9 ten behoeve van de veiligheid, zie paragraaf 2.6. De input voor deze berekening is als volgt:

- Het volumiek gewicht γ van alle lagen tussen de onderkant van de waterremmende deklaag en het ontgravingsniveau in kN/m^3 . Het volumiek gewicht wordt bepaald door middel van laboratoriumonderzoek.
- De laagdikte d van alle lagen tussen de onderkant van de waterremmende deklaag en het ontgravingsniveau in m.
- De stijghoogte H_s in het eerste watervoerend pakket gemeten vanaf de onderkant van de waterremmende deklaag in m. Deze wordt verkregen door peilbuisgegevens uit het verleden te analyseren en een veilige (hoge) waarde als referentie te nemen.
- Het volumiek gewicht γ_w van water in kN/m^3 . Deze bedraagt doorgaans 10 kN/m^3 .

De berekening is als volgt:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\gamma * d) * 0,9}{H_s * \gamma_w}$$

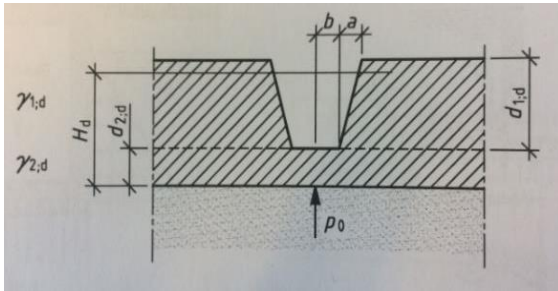
De uitkomst van de berekening is een veiligheidsfactor, oftewel een opbarstrisico. De uitkomst voldoet wanneer een waarde wordt gevonden die hoger is dan de gestelde veiligheidseis. Deze is doorgaans 1,1 of 1,2, afhankelijk van de toepassing van de ontgraving en de mate van vooronderzoek dat is uitgevoerd.

Taludwerking

Bij relatief smalle watergangen kan volgens NEN 9997-1 taludwerking een positief effect hebben op de verticale stabiliteit. Het talud oefent een verticale druk uit die de bodem van de watergang als het ware naar beneden drukt. Dit gegeven uit de NEN 9997-1 is een uitbreiding op de bestaande Terzaghi methode. De uitkomst van de formule is een factor die met de hoogte $d_{1;d}$ en het volumiek gewicht $\gamma_{1;d}$ van het talud wordt vermenigvuldigd.

$$f = \frac{2}{\pi} * \left(\left(1 + \frac{b}{a} \right) * \arctan\left(\frac{d_2}{a+b}\right) - \frac{b}{a} * \arctan\left(\frac{d_2}{ab}\right) \right)$$

Met:



Figuur 4 invoer formule taludfactor

De totale neerwaartse druk $U_{z;d}$ in kN/m² op de onderkant van de waterremmende deklaag wordt omschreven door de volgende formule.

$$U_{z;d} = \gamma_{2;d} * d_{2;d} + f * \gamma_{1;d} * d_{1;d}$$

Om deze formule toe te kunnen passen is het van belang de waarden van $\gamma_{1;d}$ en $\gamma_{2;d}$ juist te formuleren. Het kan namelijk zijn dat zich meerdere lagen in $d_{1;d}$ en $d_{2;d}$ bevinden waardoor eerst de gemiddelde waarden moeten worden berekend.

2.5.2 Rekenmethode 'De Jongh'

Ir. De Jongh presenteert in 2004 een alternatieve methode voor het berekenen van het opbarstrisico. Het model gaat uit van een krachtenevenwicht. Methode De Jongh neemt taludwerking mee in beschouwing. Tevens wordt schuifspanning door ongedraineerde schuifsterkte en schuifweerstand van een eventuele watervoerende tussenlaag ($d_{3;d}$) in de formule meegenomen.

De vergelijking is als volgt:

$$\begin{aligned} F_{min} &= \frac{F_{neerwaarts}}{F_{opwaarts}} = \frac{F_{bodem} + F_{talud} + F_{schuifweerstand}}{F_{opwaarts}} \\ &= \frac{(\sigma_2 * B) + (f * \sigma_1 * B) + (2 * c_u * d_{2;d} + (2 * \tau * d_{3;d}))}{H_s * \gamma_w * B} \end{aligned}$$

Met:

F_{min} =	minimale opbarstveiligheid
B_{bodem} =	Bodem breedte in m
f =	Taludfactor (zie taludwerking)
σ_1 =	Boven belasting op ontgravingsbodem in kN/m ²
σ_2 =	Grondspanning op onderkant waterremmende deklaag in kN/m ²
$d_{2;d}$ =	Dikte waterremmende deklaag onder ontgraving in m
$d_{3;d}$ =	Dikte watervoerende tussenlaag in m

C_u =	Ongedraineerde schuifsterkte waterremmende deklaag in kN/m ²
τ =	Schuifsterkte watervoerende tussenlaag in kN/m ²
H_s =	Afstand tussen stijghoogte in het watervoerend pakket onderkant waterremmende deklaag in m
γ_w =	Volumiek gewicht water in kN/m ³

Tevens is een tweede model beschreven door Ir. De Jongh. Dit model neemt ook de lengte van de ontgraving in meters mee in beschouwing. De taludwerking wordt nog eens extra meegenomen aan de korte zijde van de ontgraving. Wanneer een hoge waarde voor de bodemlengte wordt genomen, bij een lange watergang, heeft deze taludwerking geen effect en is de F_{min} gelijk aan de F_{min} bij dezelfde situatie in het 2D model.

In feite bestaat het 3D-opbarstmodel uit drie verschillende bijdragen die gezamenlijk zorgen voor de totale weerstand biedende belasting:

1. *Eigen gewicht van de grond tussen ontgravingsniveau en onderzijde waterremmende deklaag;*
2. *Spanning ten gevolge van spanning spreiding vanuit boven belasting direct naast de ontgraving (taludwerking).*
3. *De ongedraineerde schuifsterkte van de waterremmende deklaag.*

(Van Leeuwen, 2008)

De vergelijking is als volgt:

$$F_{min} = \frac{0.5 * flengte * (\sigma_1 + \sigma_3) + fbreedte * \sigma_1 + \sigma_2 + 2 * c_u * d_{2;d} * \left(\left(\frac{1}{L_{Bodem}} \right) + \left(\frac{1}{B_{bodem}} \right) \right)}{H_s * \gamma_w}$$

Met:

L_{bodem} = Bodemlengte in m

σ_1 = boven belasting op ontgravingsbodemniveau aan de aanvulzijde in kN/m²

$$fbreedte = \frac{2}{\pi} * \left(\left(1 + \frac{B}{a} \right) * \arctan\left(\frac{d_2}{a+B}\right) - \frac{B}{a} * \arctan\left(\frac{d_2}{aB}\right) \right)$$

$$flengte = \frac{2}{\pi} * \left(\left(1 + \frac{L}{a} \right) * \arctan\left(\frac{d_2}{a+L}\right) - \frac{L}{a} * \arctan\left(\frac{d_2}{aL}\right) \right)$$

(De Jongh, 2004)

2.5.3 Plaxis 2D

Naast de bovengenoemde rekenmethodes, kan ter bepaling van het opbarstrisico gebruik gemaakt worden van computerprogramma's. Een veel toegepast programma in de geotechniek is het eindige elementen model (EEM) (zie bijlage 2) Plaxis 2D. In paragraaf 3.5 wordt een Plaxis analyse uitgevoerd aan de hand van een praktijk situatie. Tevens worden de eigenschappen van Plaxis 2D in deze paragraaf en in bijlage 6 nader toegelicht. Plaxis 2D is niet geschikt om een veiligheidsfactor te berekenen. Wel kan de kritieke stijghoogte worden bepaald waarbij de bodem volgens het model bezwijkt.

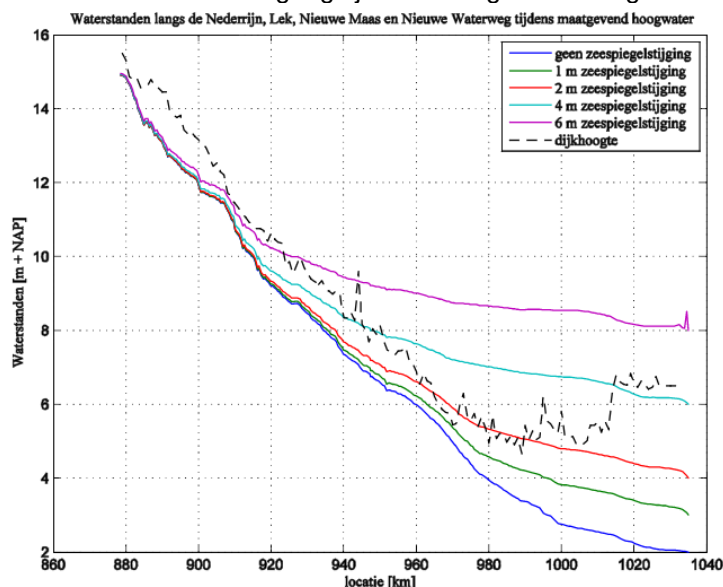
2.6 Veiligheidsfactoren

Bij het ontwerp van watergangen en bouwputten wordt doorgaans een extra veiligheidsfactor op het berekende opbarstrisico toegepast. De gronddruk wordt normaal gesproken vermenigvuldigd met veiligheidsfactor 0,9 waardoor een lagere veiligheidsfactor uit de berekening komt. Dit wordt gedaan zodat ontwerpen veilig gedimensioneerd kunnen worden en onzekerheden in de bodemopbouw worden gecompenseerd. In dit onderzoek wordt dit in beschouwing genomen maar niet in de berekening meegenomen wanneer geen sprake is van een ontwerpsituatie, maar een benadering van het werkelijke opbarstrisico wordt nagestreefd.

2.7 Effect klimaatverandering

Klimaatverandering heeft effect op het opbarstrisico. In de klimaatscenario's van het KNMI (KNMI, 2014) staat beschreven dat de zeespiegel blijft stijgen en dat het tempo hiervan zal toenemen. Een hogere zeespiegel zorgt voor een belemmering in de afwatering van rivieren, waardoor de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket hoger zal komen te liggen. Het resultaat hiervan is dat, wanneer artesisch water zich onder een waterremmende deklaag bevindt, de druk verhoogd wordt. Ook omschrijven klimaatscenario's hogere piekafvoeren van rivieren en ander oppervlaktewater, waardoor meer water in het eerste watervoerend pakket infiltreert. Het risico op opbarsten wordt hierdoor vergroot. Dit wordt verder behandeld in paragraaf 4.3.

Dat de rivierstand tijdens maatgevend hoogwater hoger is door zeespiegelstijging is bevestigd door een onderzoek dat in opdracht van het Milieu- en Natuurplanbureau is uitgevoerd. In 2007 is onderzoek gedaan naar de klimaatbestendigheid van Nederland. In dit rapport is het effect van zeespiegelstijging op de rivieren in kaart gebracht. In onderstaande grafiek is het effect van bepaalde zeespiegelstijgingen op de Neder-Rijn, Lek, Nieuwe Maas en Nieuwe Watergang tijdens maatgevend hoogwater afgebeeld. (Milieu- en Natuurplanbureau, 2007)



Grafiek 1 Rivierwaterstanden ten gevolge van zeespiegelstijging

Bovendien zal fluctuatie in het freatisch waterniveau ook toenemen. Het KNMI heeft in 2014 vier klimaatscenario's uitgegeven, waarin staat beschreven dat de zomer droger en warmer zal worden, afgewisseld met meer extreme neerslag (KNMI, 2014). Hierdoor zal de grondwaterstand in droge maanden lager liggen dan voorheen en in de natte maanden hoger. Er zal in de toekomst dus sprake zijn van grotere pieken en dalen in het freatisch waterniveau.

Ten slotte versnelt klimaatverandering het proces van veenoxidatie. Doordat de zomer droger en warmer zal zijn, zal verdroging van de bodem eerder plaatsvinden. Verdroging van de veenbodems versnelt de veenoxidatie, waardoor bodemdaling nog sneller zal verlopen (STOWA, 2014). Verdroging van veenbodems zorgt ook voor een lager volumegewicht van het veen, waardoor het opbarstrisico toeneemt.

Klimaatverandering heeft dus op verschillende manieren een versterkend effect op het opbarstrisico en opbarsten zal naar verwachting in de toekomst vaker voorkomen. Dit is in kaart gebracht door hetzelfde onderzoek van het Milieu- en Natuurplanbureau. Dit is bijlage 3 weergegeven.

Het is dus van belang voor duurzaam waterbeheer dat het werkelijke opbarstrisico in de toekomst nauwkeuriger bepaald kan worden. In de volgende hoofdstukken van het onderzoek is dit uitgewerkt.

3. INVENTARISATIE OPBARSTERVERINGEN, MODELLEN EN PROEVEN

In dit hoofdstuk wordt de praktijkkant van opbarsten toegelicht. Projecten waar in het verleden opbarsten heeft plaatsgevonden, of juist tegen de verwachtingen in níet heeft plaatsgevonden worden geanalyseerd. Overheden die ervaring hebben met het onderwerp opbarsten zijn door middel van interviews gevraagd om hun visie op het onderwerp te geven. Ook worden uitgevoerde opbarstproeven uitgelicht waarna de resultaten vergeleken en verklaard worden aan de hand van rekenmodellen zoals rekenmethode NEN 9997-1 en Plaxis 2D. Vervolgens wordt de locatie van bedrijventerrein 'Groote Haar' in Gorinchem in beschouwing genomen. Tenslotte wordt een aantal mogelijke maatregelen tegen opbarsten benoemd.

3.1 Opbarstervaring in het verleden

Om een goed beeld te krijgen van het mechanisme opbarsten is onderzoek gedaan naar opbarsten in het verleden. Opbarsten hoeft niet altijd duidelijk of zichtbaar te zijn. Wanneer een bodem opbarst kan dit echter wel degelijk grote gevolgen hebben.

Een praktijkvoorbeeld waar opbarsten van de bodem heeft plaatsgevonden is het project Brabantse Biesbosch. Tijdens de aanleg van knooppunt Ridderster, nabij Ridderkerk, is ten behoeve van de aanleg van kabels en leidingen een boring uitgevoerd tot in het eerste watervoerend pakket. De bodem barstte op ten gevolge van welvorming en waterdruk. Er kwam veel water omhoog wellen, zuurstofarm en ijzerhoudend. Dit zorgde voor veel vissterfte in het oppervlaktewater. Er moest langdurige bronbemaling toegepast worden om verdere schade te voorkomen. Om het probleem op te lossen is de bodem geïnjecteerd met bentoniet en andere grondstoffen. Het repareren van de ontstane wel heeft ongeveer 9 maanden in beslag genomen. (Keijzer & De Jong, 2018)

Een tweede situatie waarin opbarsten een rol speelt is de aanleg van natuurvriendelijke oevers in de Vierpolders, nabij Brielle. Ter uitvoering van Europese richtlijnen wordt in de Vierpolders ruimte gemaakt voor natuur door natuurvriendelijke oevers aan te brengen. Natuurvriendelijke oevers hebben, in tegenstelling tot gangbare watergangen, een zeer flauw talud. Hierdoor komt er meer oppervlak vrij voor verschillende habitatten die een variatie aan waterdiepte vereisen. Om natuurvriendelijke oevers te realiseren worden de bestaande oevers ontgraven. Deze ontgraving heeft een verhoogd opbarstrisico tot gevolg. Naar aanleiding van de, door een agrariër geconstateerde, welvorming in de huidige kavelsloot, in combinatie met het hoge berekende opbarstrisico, is uiteindelijk gekozen voor een alternatieve locatie voor de natuurvriendelijke oevers. (Keijzer & De Jong, 2018)



Figuur 5, Welvorming kavelsloot Vierpolders

Ten slotte is een situatie beschreven in het beheergebied van Hoogheemraadschap Schieland en de Krimpenerwaard. Bij het maken van het ontwerp voor de Eendragtspolder was berekend dat de kans op opbarsten aanwezig was. Er is toch besloten om tot uitvoering over te gaan. Bij de realisatie van het project, barstte de bodem echter niet op. Als oorzaak hiervan wordt gegeven dat de waterdruk in het freatisch pakket heel globaal bekeken was en gebruik was gemaakt van Dinoloket. Dit resulteerde in een te globale en conservatieve bepaling, die niet aansloot bij de realiteit. Het opbarstrisico wordt vaak overschat omdat de berekening uitgevoerd wordt aan de hand van grove schattingen of onvolledige gegevens. Het is zinvol om eerst meer nauwkeurige en lokale data te verkrijgen, vooral bij grote investeringen, omdat het veel geld kan schelen op de korte en lange termijn. Sonderingen, laboratoriumproeven en peilbuismetingen leveren meer nauwkeurige data op. (Van Appeldoorn, 2018)

3.2 Opbarstproef Culemborg

In 2010 heeft de Gemeente Culemborg de realisatie van een waterberging gepland met een lengte van ongeveer 1700 meter tussen de Anthony van Diemenstraat en de Wethouder Schoutenweg te Culemborg. Uit eerdere berekeningen van derden is gebleken dat een opbarstrisico bestaat ter plaatse van de ontgraving. Er is in overleg met de gemeente besloten om een veldproef op de projectlocatie uit te voeren. De gebruikte gegevens van deze opbarstproef zijn te vinden in bijlage 4. (Fugro NL Land B.V., 2009)



Figuur 6 Situatieschets opbarstproef Culemborg

Beschrijving opbarstproef

Ter voorbereiding zijn bodemgegevens, geanalyseerd. Vervolgens is de maatgevende grondwaterstand bepaald aan de hand van peilbuismetingen door derden. Ook zijn de eerder uitgevoerde opbarstberekening opnieuw doorgerekend en geverifieerd. Er bleek inderdaad sprake te zijn van een hoog opbarstrisico.

Ten behoeve van de uitvoering van de proef is een spanningsbemaling toegepast om de stijghoogte tijdelijk zodanig te verlagen dat in den droge ontgraven kon worden. Vervolgens is ontgraven tot 1,5 m-maaiveld (NAP - 0,38 m). Om eventuele deformatie van de ontgravingsbodem te monitoren zijn 42 zakbaken geplaatst die gedurende de proef met behulp van een Terrestrische laserscanning (3D scanner) in de X, Y en Z richting de deformatie vastleggen. Fugro heeft 4 Bat sensoren (waterspanningsmeters) geplaatst die tijdens de proef actuele waterdrukgegevens verzamelen.

De bronbemaling is uitgeschakeld (abrupt) om zo de stijghoogte weer naar het oorspronkelijke niveau van NAP +0,92 m te brengen. Gedurende ongeveer 6,5 uur vanaf dat moment zijn doorlopend metingen gedaan. Hierna is de proef afgesloten.



Figuur 7 Opbarstproef met zakbaken

Bron: Fugro NL Land BV

3.2.1 Herberekening opbarstrisico

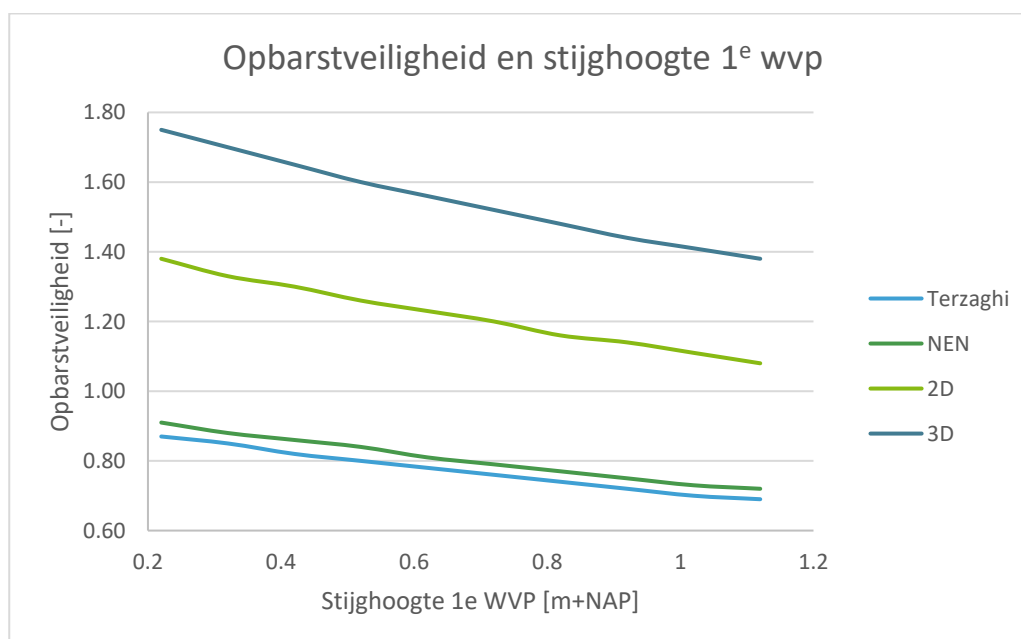
Berekeningen

De berekeningen zijn in eerste instantie uitgevoerd met een maatgevende stijghoogte van NAP +0,92 m.

Tabel 1 Herberekening opbarstrisico Culemborg

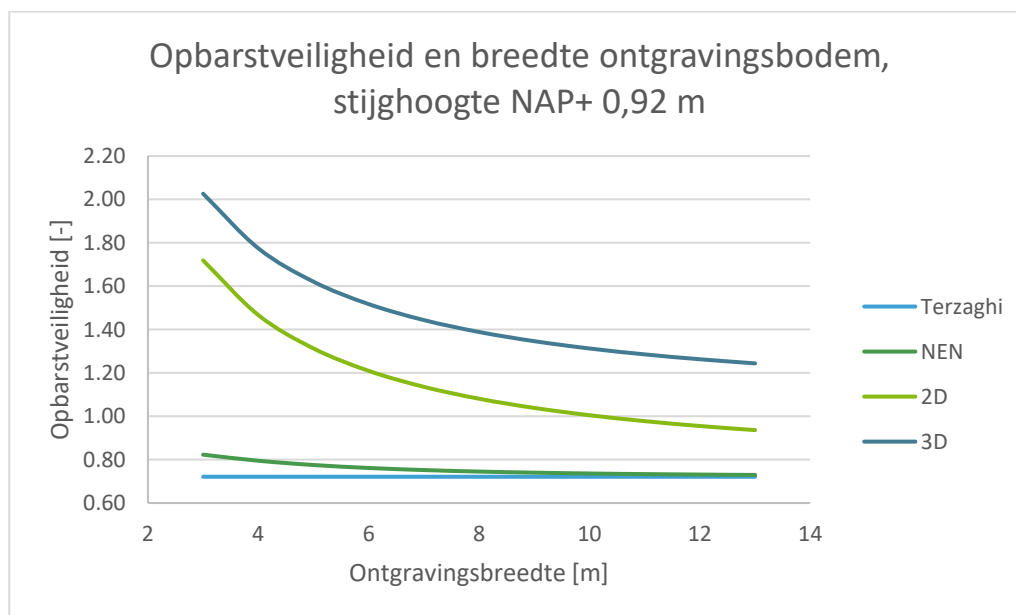
Methode	Terzaghi	NEN 9997-1	De Jongh 2D	De Jongh 3D
$F_{\text{veiligheid}}$	0,74	0,77	1,16	1,48

Wanneer verschillende mogelijke stijghoogtes in het eerste watervoerend pakket uitgezet worden tegen de veiligheidsfactor zijn duidelijke verschillen te zien per rekenmethode. Dit is te zien in de volgende grafiek:



Grafiek 2 Opbarstveiligheid en stijghoogte 1e WVP

Volgens de Terzaghi en NEN 9997-1 rekenmethode is de te verwachten veiligheidsfactor in het geval van Culemborg lager dan 1,0, er zou volgens deze methoden dus opbarsten moeten plaatsvinden. Methoden De Jongh 2D en 3D geven een hogere veiligheid tegen opbarsten.



Grafiek 3 Opbarstveiligheid en breedte ontgravingsbodem

De taludwerking wordt per methode op een andere manier meegeteld, zie paragraaf 2.5. In grafiek 3 is te zien dat de formule van Terzaghi geen taludwerking rekent.

3.2.2 Resultaten

De verticale deformatie van de ontgravingsbodem ten gevolge van het zich laten herstellen van de stijghoogte tijdens de proef is gemeten tussen +9 en -11 mm, waarbij geen verband bestond tussen de deformatie en de locatie van de zakbaken, zie bijlage 4. Er is geen noemenswaardige deformatie of welvorming geconstateerd in de ontgravingsbodem. Na afloop van de proef heeft het proefvak nog bijna een week open gestaan. Visueel zijn geen veranderingen waargenomen.

3.2.3 Conclusie en aanbevelingen

Conclusie

Naar aanleiding van de resultaten van de opbarstproef in Culemborg valt te concluderen dat geen opbarsten van de ontgravingsbodem heeft plaatsgevonden. De NEN 9997-1 rekenmethode stelde de opbarstveiligheid op 0,77. Deze voorspelling stelt dat opbarsten vrijwel zeker plaats zal vinden. De voorspelling en praktijkresultaten komen niet overeen. Hieruit wordt geconcludeerd dat de methode waarschijnlijk te conservatief rekent. Dit wil zeggen dat het opbarstrisico hoger wordt ingeschat dan deze in werkelijkheid is.

Wat echter niet uit de proef is gebleken is onder welke omstandigheden opbarsten van een ontgraving wél plaatsvindt. Hierdoor is het onmogelijk om aan de hand van deze opbarstproef, voorwaarden voor opbarsten te formuleren.

Aanbevelingen

Deze opbarstproef is uitgevoerd ter controle van de opbarstveiligheid in een geplande situatie. De vraag vanuit de opdrachtgever was om een second opinion te geven op de eerder uitgevoerde berekeningen voor reeds ontworpen inrichtingsplannen. Met het oog op het nauwkeuriger bepalen van het opbarstrisico in de toekomst, is het interessant om juist te ontgraven totdat opbarsten daadwerkelijk plaatsvindt. Dit brengt hogere kosten en risico's met zich mee maar kan in de toekomst leiden tot veel kostenbesparing op onnodige maatregelen ter voorkoming van opbarsten. Om de proef te optimaliseren is het daarbij aan te raden om over een langere periode te meten zodat de bodem en de grondwaterstanden langer de kans hebben om zich tot hun eindsituatie te vormen.

Om methode De Jongh en een berekening in het programma Plaxis 2D te kunnen vergelijken met een opbarstproef is het van belang om rekenwaardes voor ongedraineerde schuifsterkte te bepalen. Deze kunnen worden bepaald aan de hand van laboratoriumproeven.

Benito Putranto afstudeerstudent bij Fugro Groningen, beschrijft in zijn onderzoek dat 'negative excess pore pressure', oftewel de negatieve wateroverspanning ten gevolge van ontgraving, op de korte termijn een positief effect kan hebben op de bodemstabiliteit. Naarmate de bodem in zijn uiteindelijke (gedraineerde) toestand terecht komt, valt dit effect weer weg. (Putranto, 2014) Dit proces dient nader onderzocht te worden. Onderzoek naar negatieve wateroverspanning wordt beschreven in paragraaf 3.5.3. Voor een volgende opbarstproef zou het om deze reden aan te raden zijn om het proefvak zo lang mogelijk open te houden en te monitoren.

3.3 Opbarstproef Waddinxveen

In het kader van de inrichtingsplannen Centrumplan en Coenecoop III te Waddinxveen is de herinrichting voorzien van de zone tussen het Spoorpad en de Kanaaldijk. Onderdeel van deze inrichtingsplannen is het ontgraven van een nieuwe waterpartij. Uit eerdere rapportage is gebleken dat een reëel opbarstrisico bestaat op de projectlocatie. Naar aanleiding van de door Fugro uitgevoerde opbarstproef in Culemborg is Fugro door de Gemeente Waddinxveen gevraagd of de resultaten van deze proef aanleiding geven tot een bijstelling van de benodigde veiligheid op opbarsten op de projectlocatie. Ook hier is besloten een opbarstproef uit te voeren.

Beschrijving opbarstproef

Ter voorbereiding zijn bodemgegevens uit, door Fugro uitgevoerde, boring HB101 en HB102 in beschouwing genomen. De reden hiervoor is de verwachting dat deze locaties volgens de berekeningen het hoogste opbarstrisico kennen. Vervolgens is de maatgevende grondwaterstand bepaald aan de hand van peilbuismetingen. De eerder uitgevoerde berekeningen zijn opnieuw doorgerekend en geverifieerd. Er bleek inderdaad sprake te zijn van een hoog opbarstrisico. De bodemgegevens en berekeningen, afkomstig uit de rapportage van Fugro, zijn samengevat in bijlage 4.

Op verzoek van de opdrachtgever is de ontgraving 'in den natte' uitgevoerd bij een waterstand van ca. 0,85 m. De ontgraving heeft in twee fasen plaatsgevonden. De stijghoogte is middels dataloggers gemonitord. Na de eerste ontgraving tot ca. NAP -6,75 m zijn 15 zakkaken in de ontgraving geplaatst. Op 24 juni 2010 is een nulmeting uitgevoerd. Op 1 juli 2010 is een herhalingsmeting uitgevoerd, waarna de zakkaken zijn verwijderd. Visueel is geen opbarsten geconstateerd, waarna direct de tweede ontgraving tot ca. NAP -7,0 m is uitgevoerd. Daarna zijn de zakkaken opnieuw geplaatst en is een nieuwe nulmeting uitgevoerd. Op 8 juli 2010 is de herhalingsmeting van de tweede fase uitgevoerd.



Figuur 8 opbarstproef in Waddinxveen

Bron: Fugro

3.3.1 Herberekening opbarstrisico

Het opbarstrisico is volgens de verschillende geformuleerde rekenmethoden opnieuw berekend.

Tabel 2 Herberekening opbarstrisico Waddinxveen

Methode	Terzaghi	NEN 9997-1	De Jongh 2D	De Jongh 3D
F _{veiligheid}	1,04	1,08	1,27	1,59

3.3.2 Resultaten

De verticale deformatie van de ontgravingsbodem ligt volgens de metingen in eerste instantie tussen +11 en -13 mm en bij de tweede meting tussen +6 en -10 mm, waarbij geen verband bestaat tussen de deformatie en de locatie van de zakbaken. Twee zakbaken zijn tijdens de tweede fase omgevallen en dus niet te meten. De gemeten stijghoogten van het eerste watervoerend pakket varieerden tijdens de metingen tussen NAP -5,76 en -5,91 m.

3.3.3 Conclusie en aanbevelingen

Conclusie

Naar aanleiding van de resultaten van de opbarstproef in Waddinxveen valt te concluderen dat geen opbarsten van de ontgravingsbodem heeft plaatsgevonden. Op basis van de rapportage van Fugro en de hierboven weergegeven herberekeningen is het opbarstrisico ter plekke van boring HB101, bij een stijghoogte van ca. NAP -5,8 m, 1,04. Hieruit wordt geconcludeerd dat het opbarstrisico niet erg groot is, maar een opbarstveiligheid van 1,1 of 1,2 niet wordt gehaald. Hierbij is geen rekening gehouden met een veiligheidsfactor. De stabiliteit is mede te danken aan het feit dat in den natte is ontgraven. De ca. 0,85 meter water geeft een additionele neerwaartse druk die is meegenomen in de berekening.

Wanneer wordt uitgegaan van een stijghoogte van het artesisch water van NAP -5,5 m, is de veiligheidsfactor 0,96.

De uitgevoerde opbarstproef kent een aantal kanttekeningen:

Ten eerste was een visuele inspectie niet mogelijk omdat de ontgraving in den natte heeft plaatsgevonden. Dit heeft ook een belemmerende rol gespeeld bij het ontgraven: de bodem was niet volledig vlak. De metingen kunnen verstoord zijn door onregelmatigheden in de ontgravingsbodem. Het water dat in de ontgraving stond vormde een stabiliserende factor. Wanneer deze waterstand in de toekomst fluctueert, heeft dit ook gevolgen voor de opbarstveiligheid.

Aanbevelingen

De aanbevelingen komen grotendeels overeen met de aanbevelingen ten aanzien van de opbarstproef in Culemborg, zie paragraaf 3.2.3. Met het oog op het nauwkeuriger bepalen van het opbarstrisico in de toekomst, is het interessant om juist te ontgraven totdat opbarsten daadwerkelijk plaatsvindt. Daarbij is het voor een optimalisatie van de opbarstproef aan te raden om in den droge te ontgraven ten behoeve van het nauwkeuriger ontgraven en monitoren tijdens de proef. Dit kan worden gerealiseerd door middel van spanningsbemaling ter voorkoming van voortijdig opbarsten en het wegpompen van water in de ontgraving d.m.v. een klokpomp.

3.4 Situatie Gorinchem

In de Gemeente Gorinchem wordt bedrijventerrein de Groote Haar ontwikkeld. Ten behoeve van watercompensatie worden brede watergangen gerealiseerd met een verhoogd opbarstrisico tot gevolg. Het geotechnisch onderzoek is uitgevoerd door Fugro NL Land B.V. Uit dit onderzoek blijkt dat een reëel opbarstrisico bestaat op de projectlocatie. Zie bijlage 5.

3.4.1 Verwacht opbarstrisico

Het opbarstrisico is bepaald aan de hand van gegevens uit het onderzoek dat door Fugro is uitgevoerd, en uit het ontwerp dat door de Gemeente Gorinchem is geleverd. De onderbouwing van deze gegevens is weergegeven in bijlage 5. De volgende berekeningen zijn uitgevoerd zonder rekening te houden met de extra veiligheidsfactor van 0,9. De meest opbarstgevoelige locatie is volgens het onderzoek door Fugro ter plaatse van sondeernummer DKM182. Het verwachte opbarstrisico op deze locatie is als volgt:

Methode	Terzaghi	NEN 9997-1	De Jongh 2D	De Jongh 3D
$F_{\text{veiligheid}}$	0,74	0,74	0,68	0,69

3.4.2 Conclusie en verwachtingen Gorinchem

Conclusie

De uitgevoerde berekeningen tonen aan dat volgens de meest gehanteerde NEN 9997-1 rekenmethode op deze locatie op het toekomstige bedrijventerrein Groote Haar een reëel opbarstrisico bestaat.

De rekenmethode Terzaghi en NEN 9997-1 geven een gelijke uitkomst. Dit is te verklaren door de grote bodembreedte. De watergang is dusdanig breed dat taludwerking volgens de methode niet langer een significante rol speelt.

Ook De Jongh 2D en De Jongh 3D zijn nauwelijks verschillend. Dit is te verklaren door de grote lengte van de watergang. Hierdoor heeft het talud aan de korte zijden van de ontgraving geen merkbaar effect.

Opvallend is dat De Jongh 2D en De Jongh 3D op een lagere veiligheid uitkomen dan de NEN 9997-1 en Terzaghi methode. Dit terwijl deze methodes doorgaans een hogere veiligheid geven. De formules en resultaten in beschouwing nemend valt te concluderen dat de f_{breedte} (2D en 3D) en de f_{lengte} (3D) beide ongeveer 0 zijn. Dit komt doordat de breedte en lengte van de watergang erg groot zijn. Hierdoor valt de veiligheid laag uit, ondanks het feit dat ongedraineerde schuifsterkte volgens de methode een positief effect op de verticale stabiliteit heeft. De Jongh geeft wellicht alleen realistische uitkomsten bij watergangen waarin de taluds een rol spelen.

Verwachtingen

Volgens de berekeningen heeft huidige ontwerp een onaanvaardbaar hoog opbarstrisico. Echter, uit voorgaande opbarstproeven blijkt dat deze berekeningen niet altijd een juiste voorspelling geven. De verwachting is dat meerdere aspecten een rol spelen en dat het opbarstrisico lager zal uitvallen. De kosten voor maatregelen ter voorkoming van opbarsten kunnen mogelijk worden gedrukt wanneer uit onderzoek blijkt dat de gebruikte methodes te conservatief rekenen.

3.5 Plaxis 2D analyse

Om aan te kunnen tonen of verschillende bodemparameters effect hebben op het opbarstrisico, zijn modellen gemaakt met het computerprogramma Plaxis 2D. Dit programma kan het grondgedrag simuleren in een eindige elementen model (EEM). In de gebruikte versie van Plaxis worden daarbij twee dimensionale analyses uitgevoerd voor de bepaling van bijvoorbeeld de stabiliteit of de vervormingen van de bodem. Het verschil met andere bodemgerelateerde programma's en modellen is dat Plaxis 2D als EEM-programma het grond gedrag meer volledig modelleert, maar daardoor ook meer bodemparameters hanteert in de berekeningen. Met deze parameters kan worden gevarieerd, zodat het effect van elke parameter op het grondgedrag kan worden bekeken en vergeleken. Het programma kan berekeningen uitvoeren totdat de bodem bezwijkt. Dit betekent dat kan worden bepaald tot wanneer de bodem nog juist in evenwicht is maar niet het exacte moment van opbarsten. Aangenomen wordt dat wanneer het model niet meer voldoet, opbarsten is opgetreden.

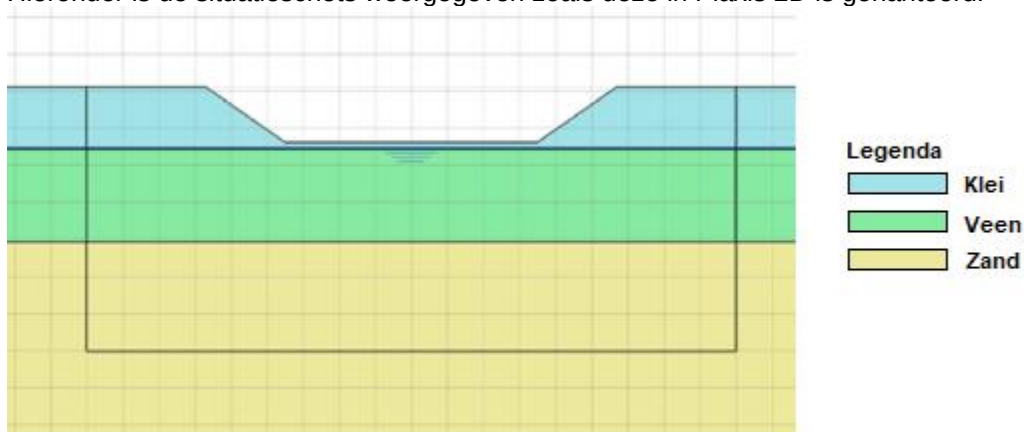
3.5.1 Opzet model

Het onderzoek met Plaxis 2D is gedaan aan de hand van de gegevens uit de opbarstproef in Culemborg. Er is getracht een zo realistisch en gebied specifiek model te maken, zodat deze zo goed mogelijk aansluit op de werkelijkheid. Het onderzoek met Plaxis 2D is gebaseerd op de opbarstproef in Culemborg, omdat deze proef het meest volledig en betrouwbaar is. De bekende bodemparameters van de proef zijn verwerkt in het programma en aangevuld door realistische aannames. De bodemopbouw en de afmetingen zijn beschreven in bijlage 6. In deze Plaxis 2D analyse is gebruik gemaakt van drie verschillende rekenmodellen:

1. Mohr-Coulomb model (MC)
2. Hardening Soil model (HS)
3. Hardening Soil model voor kleine belastingen (HSsmall)

De eigenschappen van deze verschillende rekenmodellen en wat de verschillende rekenmodellen inhouden zijn te vinden in bijlage 6.

Hieronder is de situatieschets weergegeven zoals deze in Plaxis 2D is gehanteerd.



Figuur 9 Model opbarstproef Culemborg

3.5.2 Samenvatting voorgaand onderzoek

In 2014 is onderzoek naar opbarsten gedaan door Benito Putranto, afstudeerstudent bij Fugro Groningen naar het modelleren van opbarsten in relatie tot de werkelijkheid, waarbij de opbarstproef in Culemborg ook als basis heeft gediend. Uit dit onderzoek aan de hand van Plaxis 2D is door middel van het Mohr-Coulomb model geconcludeerd dat de kritieke stijghoogte waarbij de opbarstveiligheid nog juist 1,0 is, tijdens de opbarstproef in Culemborg NAP +0,62 m bedraagt. Volgens de herberekening volgens de NEN 9997-1 methode is deze kritieke stijghoogte NAP -0,07 m. Dit verschil is te verklaren doordat Plaxis 2D meer parameters meeneemt dan de geaccepteerde rekenmethodes. Ook beschrijft het Plaxis onderzoek dat de ongedraineerde schuifsterkte van de waterremmende deklaag geen invloed heeft op de stabiliteit van de bodem. Ten slotte concludeert Benito Putranto in het onderzoek dat de ontgravingsbodem een tijdelijke stabiliteit ontleent aan de negatieve wateroverspanning.

In het huidige onderzoek is hier verder op ingegaan.

3.5.3 Gedraineerd gedrag en ongedraineerd gedrag

In Plaxis wordt onderscheid gemaakt tussen gedraineerd en ongedraineerd gedrag. Wanneer een bodem ontgraven wordt, gaat het overgebleven deel van de waterremmende deklaag onder de ontgravingsbodem, als gevolg van het wegvallen van de initiële boven belasting, uitzetten. Er is in deze situatie sprake van een onderdruk en daardoor 'zuigt' de laag water aan. Deze onderdruk vergroot de korrelspanning en daarmee de ongedraineerde schuifsterkte. Dit zorgt voor een tijdelijk evenwicht. De negatieve wateroverspanning heeft een positief effect op de opbarstveiligheid. Zo kan, zelfs wanneer de opwaartse waterdruk uit het eerste watervoerend pakket hoger is dan de neerwaartse gronddruk van de waterremmende deklaag, negatieve wateroverspanning zorgen dat de ontgravingsbodem in evenwicht blijft. Dit wordt de ongedraineerde situatie genoemd. Dit proces heeft alleen uitwerking op korte termijn, omdat de bodemlaag onder het ontgravingsniveau na een bepaalde tijd verzadigd raakt. Er is nu sprake van de gedraineerde eindsituatie.

"Het wegvallen van de negatieve wateroverspanning (onderdruk) is het tegenovergestelde proces van consolidatie" (Putranto, 2014)

In plaats van een uitstroom van poriënwater ten gevolge van een bovendruk, is er sprake van een instroom van poriënwater ten gevolge van een onderdruk. In eerste instantie is er weinig poriënruimte. De korrels zitten strak op elkaar en dus is er sprake van een hoge korrelspanning. Na verloop van tijd stroomt water in de poriën en wordt het pakket weer zwakker en kan opbarsten alsnog optreden (Plaxis, 2018).

3.5.4 Input

Om aan te tonen of de ongedraineerde schuifsterkte invloed heeft op de deformatie van de bodem (en dus ook opbarsten van de bodem) is gevarieerd met de stijghoogte van het water in het eerste watervoerend pakket en de ongedraineerde schuifsterkte parameters van de klei- en veenlaag. De overige waarden zijn aan elkaar gelijkgesteld en niet gewijzigd. Hierdoor kan een vergelijking gemaakt worden tussen de verschillende modellen en stijghoogtes. Omdat de ongedraineerde schuifsterkte voorafgaand aan de opbarstproef in Culemborg niet bepaald is, zijn verschillende aannemelijke waarden hiervoor gebruikt. Dit is weergegeven in Tabel 3. Het eerste model geeft een slappe bodem weer, het vijfde model is een zeer stevige bodem.

Tabel 3 Ongedraineerde schuifsterkte

Model nr.	Ong. schuifsterkte klei (kPa)	Ong. schuifsterkte veen (kPa)
Model 1	10	6
Model 2	15	9
Model 3	20	12
Model 4	30	18
Model 5	50	30

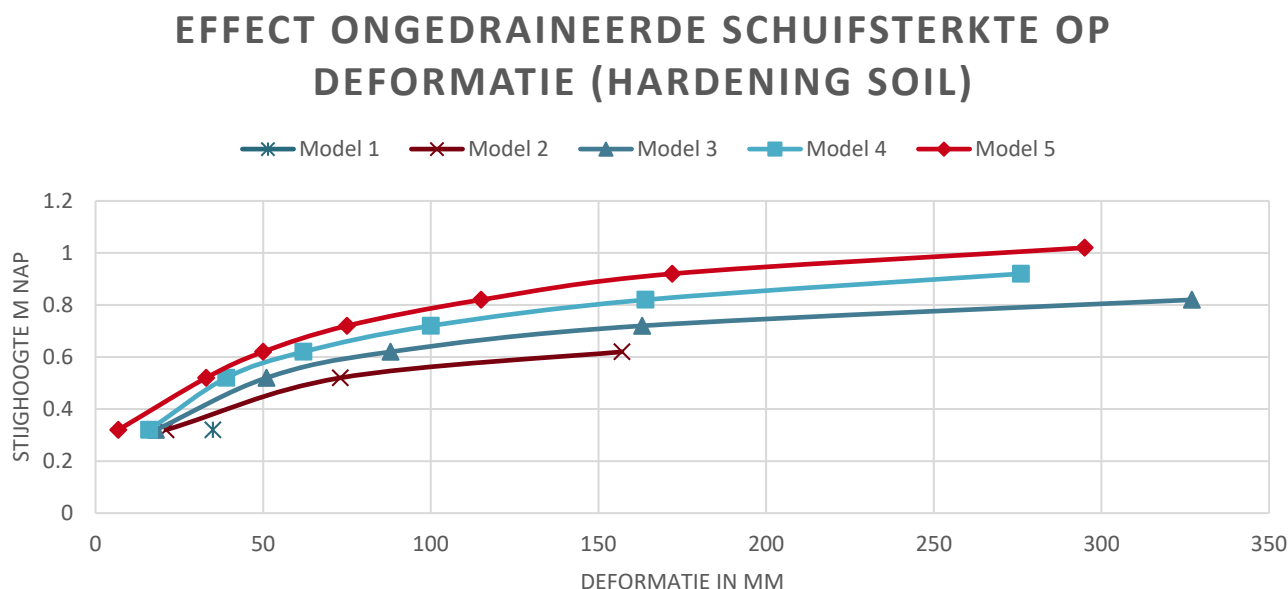
Bij het uitvoeren van de berekeningen is, volgens de bovengenoemde modellen, gevarieerd met de waarde voor ongedraineerde schuifsterkte. Deze modellen zijn vervolgens doorgerekend met de verschillende stijghoogtes in het eerste watervoerend pakket. De gebruikte waardes voor de stijghoogte zijn weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4 Stijghoogte artesisch water

Stijghoogte artesisch water (m t.o.v. NAP)
+1,02
+0,92
+0,82
+0,72
+0,62
+0,52
+0,32

3.5.5 Resultaten

In de onderstaande grafiek is per rekenmodel de stijghoogte uitgezet tegen de deformatie. Elke lijn in de grafiek representeert een invoermodel. De uiteindes van de lijnen geven het moment van bezwijken weer.



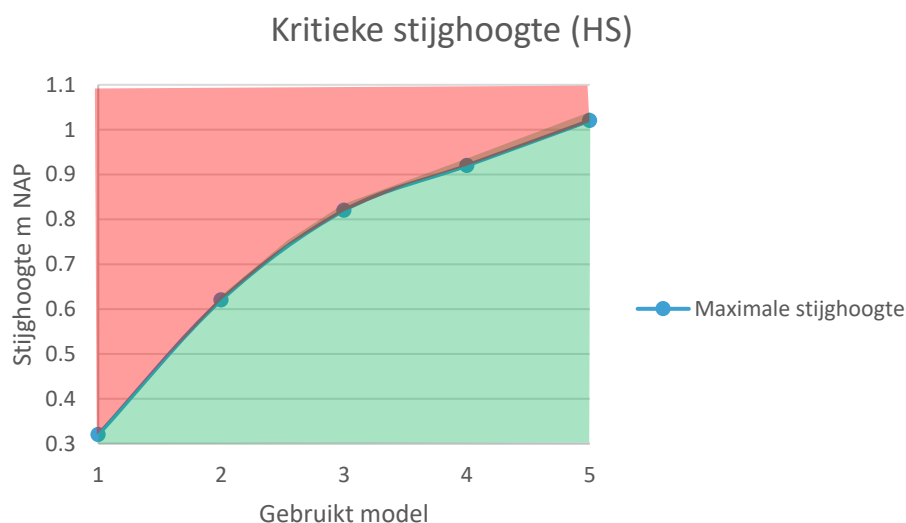
Grafiek 4 Effect ongedraineerde schuifsterkte op de deformatie

Te zien is dat de deformatie verschilt bij variërende stijghoogten en waarden van de ongedraineerde schuifsterkte. Hoe groter de ongedraineerde sterkte, des te minder deformatie te zien is. Uit bijlage 6 blijkt dat dit geldt voor het model Hardening Soil en Hardening Soil small strain, maar niet voor het Mohr-Coulomb model. Verwacht wordt dat dit te maken heeft met de meer globale berekening van dit model.

De maximaal berekende toelaatbare stijghoogte van het voorgaande onderzoek, waarbij het model niet bezwijkt, was NAP +0,62 m. (Putranto, 2014) Echter is onder gunstige omstandigheden in dit onderzoek een maximale stijghoogte van NAP +1,02 m bepaald. De stijghoogte van NAP 1,02 m is berekend door middel van het Hardening Soil model bij de hoogste waarden van ongedraineerde schuifsterkte. De maximaal gemeten stijghoogte tijdens de opbarstproef betrof NAP +0,92 m. Te zien is in bovenstaande grafiek dat bij deze stijghoogte in model 4 en 5 de bodem nog niet zal opbarsten. Het zou kunnen dat de ongedraineerde schuifsterkte van de bodem vergelijkbaar was met model 4 en 5, waardoor de bodem in evenwicht is gebleven. Uit elk gebruikt model blijkt dat bezwijken eerder plaatsvindt bij een hogere stijghoogte.

Veiligheidsfactor vergelijking

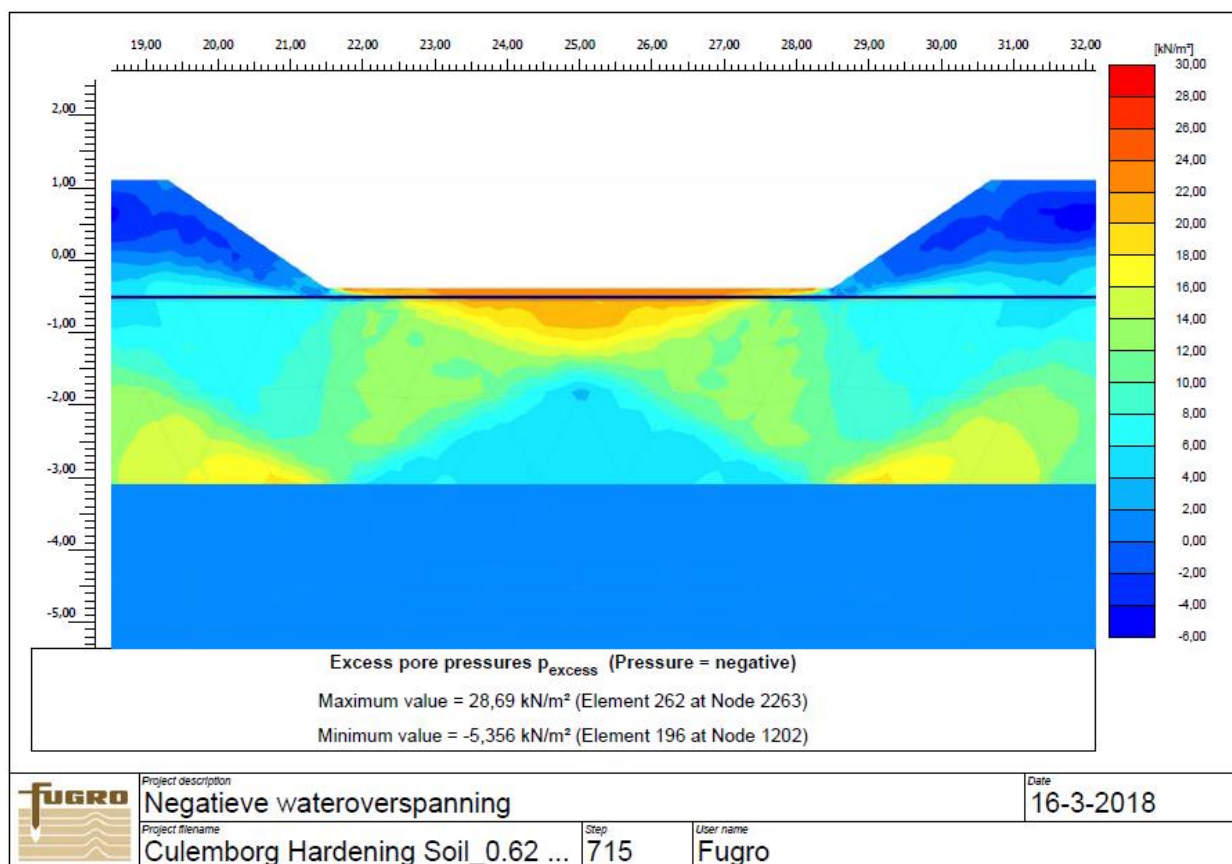
De maximaal gehanteerde stijghoogte met behulp van Plaxis 2D bedraagt NAP +1,02 m. Aangezien de berekening tot het moment van opbarsten gedaan kan worden, is aangenomen dat bij een hogere stijghoogte bij dezelfde ongedraineerde schuifsterkte de veiligheidsfactor onder de 1,0 komt en dus opbarsten plaatsvindt. In onderstaande grafiek is dit weergegeven. Het groene gebied onder de lijn is het gebied waar, volgens Plaxis 2D, geen opbarsten zal plaatsvinden. Het rode gebied geeft het verwachte moment van opbarsten weer. D.w.z. dat het model hier bezwijkt en wordt aangenomen dat de opbarstveiligheid hier kleiner is dan 1,0.



Grafiek 5 Kritieke stijghoogte (HS)

Negatieve wateroverspanning

De negatieve wateroverspanning heeft een positief effect op de opbarstveiligheid. Negatieve wateroverspanning ontstaat ten gevolge van een ontgraving en heeft een tijdelijke stabiliserende werking, zie paragraaf 3.5.3.



Figuur 10 Negatieve wateroverspanning

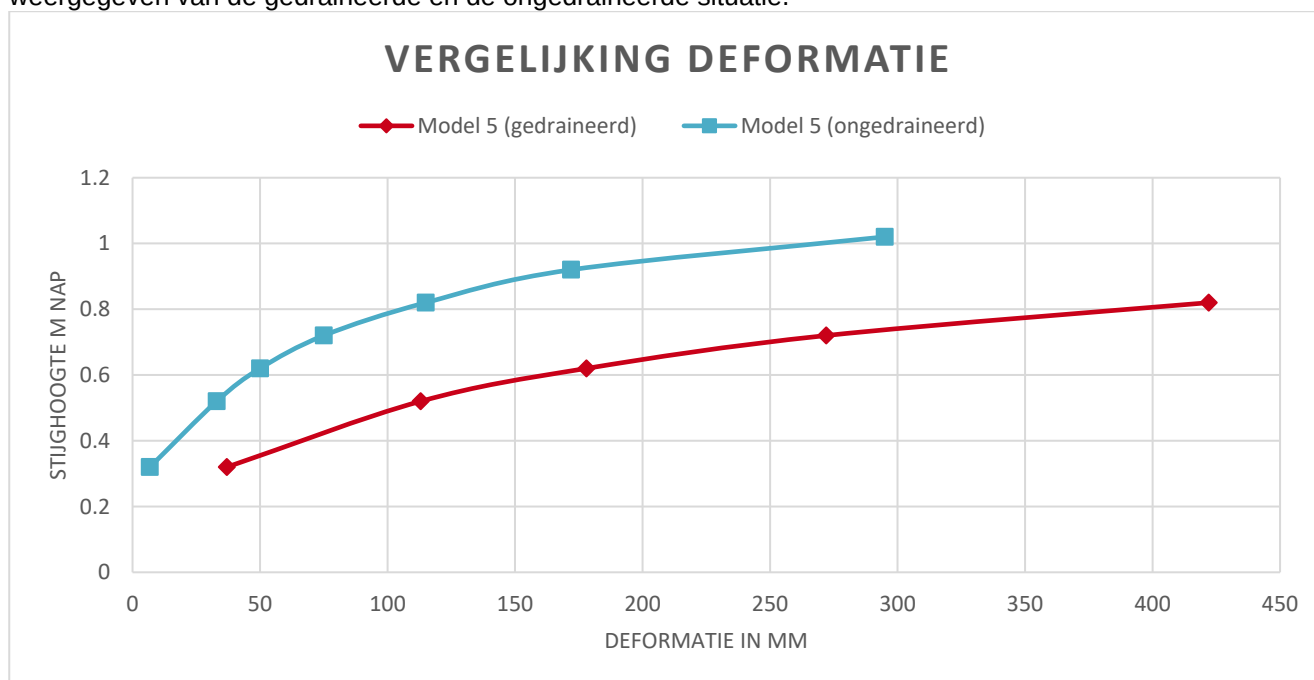
In deze figuur is te zien waar de negatieve wateroverspanningen (negative excess pore pressure) het grootst is. In het oranje gedeelte, ofwel het midden van de ontgravingsbodem, is deze negatieve spanning het grootst.

Ongedraineerde schuifsterkte

De resultaten in figuur 16 geven de negatieve wateroverspanning in de veenlaag weer. Deze geven de spanningsverdeling aan door de opwaartse druk van het grondwater. De ongedraineerde schuifsterkte werkt naar verwachting op twee manieren mee aan de stabiliteit van de ontgravingsbodem. Wanneer sprake is van een hoge sterkte ontstaat minder snel een afschuiving in de veenlaag. Anderzijds kan door een hoge sterkte een drukboog ontstaan. Een drukboog beschrijft een boogvormige krachtenafdracht naar de zijanten, zie bijlage 6. Hierdoor wordt het effect van de naastliggende taluds en daarmee de weerstand tegen opbarsten verhoogd. Dit laatste is alleen zichtbaar bij model 5, bij een stijghoogte van NAP +0.32 m. Waarschijnlijk kan een drukboog alleen ontstaan bij een hoge sterkte ten opzichte van een lage waterdruk. Ook de dikte van de waterremmende deklaag speelt een rol. Hoe dikker de laag, hoe groter de kans op een volledige drukboog.

3.5.6 Gedraineerde situatie

De voorgaande resultaten zijn verkregen aan de hand van berekeningen voor de ongedraineerde situatie, oftewel voor de korte termijn. Om een vergelijking te kunnen maken met de lange termijn situatie, is de vergelijking gelegd tussen de ongedraineerde -en de gedraineerde situatie. Plaxis 2D gebruikt voor de berekeningen dezelfde bodemparameters als voor de ongedraineerde situatie, echter het programma gaat nu uit van de gedraineerde situatie. Dit betekent dat het programma de ongedraineerde schuifsterkte omrekent naar effectieve cohesie. Voor de berekeningen is het HS-model gebruikt en de waarden van model 1 t/m 5 zijn meegenomen, zodat de vergelijking gemaakt kan worden met de ongedraineerde situatie. In onderstaand grafiek zijn de uitkomsten weergegeven van de gedraineerde en de ongedraineerde situatie.



Grafiek 6 Vergelijking gedraineerd en ongedraineerd

Te zien is dat in de gedraineerde situatie een minder hoge stijghoogte behaald wordt dan bij de ongedraineerde situatie. De maximaal berekende stijghoogte van de gedraineerde situatie is NAP +0,82 m, terwijl deze van de ongedraineerde situatie NAP +1,02 m is.

Dit betekent dat de bodem eerder bezwijkt bij de gedraineerde situatie dan bij de ongedraineerde situatie bij dezelfde waarden voor de ongedraineerde schuifsterkte.

Hieruit valt te concluderen dat het opbarstrisico hoger is op de lange termijn dan op de korte.

3.6 Interviews externe partijen

Overheden in het westen van Nederland hebben veel te maken met het opbarsten van de bodem. In deze fase zijn drie interviews gehouden met waterschappen met ervaring over dit onderwerp. Het verslag van deze interviews is te vinden in bijlage 7.

De geïnterviewde partijen zijn:

- Arnoud van de Lockant namens Hoogheemraadschap van Rijnland, 7 februari 2018
- Ruben Keijzer en Gerrie de Jong namens Waterschap Hollandse Delta, 1 maart 2018
- Mechiel van Appeldoorn namens Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard, 9 maart 2018

Samenvatting van gehouden interviews

Opbarsten komt voor in laaggelegen gebieden, zoals polders en droogmakerijen. Wanneer opbarsten heeft plaatsgevonden wordt dat vaak opgemerkt door agrariërs; het slootwater is verkleurd, de visstand is laag, er is weinig oeverbegroeiing of er zijn weinig waterplanten te vinden. Tevens kan het water in het freatische pakket brak zijn en wanneer dit in het oppervlaktewater terechtkomt, heeft dit nadelige effecten voor de waterkwaliteit.

Het voorkomen van opbarsten is daarom van groot belang. Wanneer het opbarstrisico hoog blijkt, is het gebruikelijk om het ontwerp te herzien of af te keuren. De watergangen worden bijvoorbeeld ondieper of smaller gedimensioneerd, of er worden meerdere, smalle watergangen ontworpen. Een ballastbed op de bodem van de watergang is ook een mogelijkheid, maar heeft niet de voorkeur omdat het een kostbare oplossing is en er in de beheerfase rekening mee moet worden gehouden. Ook kan er in den natte gegraven worden mits het opbarstrisico in de eindsituatie hoog genoeg is.

Aanlegkosten en beheersmaatregelen worden tegenover elkaar gezet in de vorm van een kosten-batenanalyse.

De bepaling van het opbarstrisico gaat volgens de geïnterviewden altijd volgens de NEN 9997-1 methode. Vaak wordt in één dimensie gerekend bij relatief brede watergangen. Deze methode is algemeen geaccepteerd en aan de veilige kant. De kans dat alsnog opbarsten optreedt is klein, wanneer het risico laag is bevonden volgens de NEN 9997-1 methode. Omdat waterlopen in de rivierendelta in het verleden constant van loop zijn veranderd, is de bodem opbouw in dit gebied zeer grillig. Hierdoor is de bodem moeilijk in kaart te brengen en is het bepalen van het werkelijke opbarstrisico een uitdaging. De minimale veiligheid van 1,1 is daarom bedacht om deze onzekerheden te compenseren. Hoe nauwkeuriger de bodem in kaart is gebracht, des te nauwkeuriger deze veiligheid mag zijn. Hiervoor is uitgebreid vooronderzoek nodig. De kosten voor extra vooronderzoek worden vaak terugverdiend doordat minder geld aan maatregelen hoeft te worden uitgegeven.

Wanneer de bodem is opgebarsten zijn verschillende technieken toe te passen. De meest gebruikte methoden zijn:

- Het verhogen van het gewicht door zand aan te brengen in de watergang (alleen in veengebieden, omdat het volumiek gewicht van veen veel lager is dan dat van zand)
- Een injectie van bentoniet kan toegepast worden, dit is echter een moeilijk en kostbaar proces.

Over het algemeen kan gezegd worden dat het dichten van een wel te kostbaar is en daarom niet de voorkeur heeft. Een beperkt kweldebiet wordt soms gedoogd, afhankelijk van de relevantie en kenmerken van de watergang.

3.7 Mogelijke maatregelen tegen opbarsten watergangen

De gevolgen van opbarsten zijn onwenselijk en kunnen tot hoge kosten leiden. Voor de realisatie van ontgravingen wordt gezocht naar een mogelijke oplossing. Uit ervaring blijkt dat voorkomen van opbarsten de voorkeur heeft boven het herstellen van een opgebarsten bodem met alle problemen en kosten van dien. Het gedogen van een bepaald kweldebiet (zoals vb. gemaalkanaal, zie bijlage 7) is riskant omdat niet uitgesloten kan worden dat de bodem opbarst en het kweldebiet aanzienlijk toeneemt. De bestaande gemalen zouden in deze situatie in hogere mate belast worden, dit brengt kosten met zich mee. Ook kan de kwaliteit van het opwellende water erg verschillen van het oppervlaktewater. Hierdoor ontstaat het risico op vissterfte en landbouwschade. In deze paragraaf worden, op basis van de interviews en ervaringen binnen Fugro NL Land BV, enkele (reële) maatregelen tegen opbarsten geformuleerd.

Ballastbed aanbrengen

Om opbarsten te voorkomen kan worden geopperd om een ballastbed aan te brengen op de bodem van de watergangen. Dit wil zeggen dat de bodem plaatselijk verzwaard wordt om zo het ontgraven gewicht te compenseren. Deze oplossing is echter zeer kostbaar omdat deze vaak op grote schaal toegepast moet worden. Daarbij moet bij het beheren van de watergangen rekening gehouden worden met het aangebrachte ballastbed.

Meerdere smalle watergangen realiseren

Taludwerking heeft in smalle watergangen een stabiliserend effect waarbij het gewicht van de grondmoot onder een hoek bijdraagt aan de verticale stabiliteit. Door het realiseren van meerdere, smalle watergangen wordt gebruik gemaakt van dit gegeven. Deze oplossing geeft wel een reductie van de oppervlakte uitgeefbare grond op een projectlocatie. Twee smalle watergangen nemen immers meer ruimte in dan een enkele brede, waarbij aan dezelfde hoeveelheid watercompensatie wordt voldaan. Daarbij heeft een grotere lengte aan strekkende meters oever tot gevolg dat de beheerskosten hoger zullen uitvallen.

Ontwerp verondiepen

Wanneer de watergangen ondieper worden ontworpen hoeft ook minder gewicht van de waterremmende deklaag worden afgegraven. Dit komt de verticale stabiliteit ten goede aangezien een groter aandeel neerwaartse druk wordt behouden. Echter wordt in sommige gevallen door opdrachtgevers geëist dat de oevers van de watergangen vanaf het water beheerd dienen te kunnen worden. Hiervoor is een minimale waterdiepte noodzakelijk. Ook kent ondiep stilstaand water in droge, warme periodes een groter risico op waterkwaliteitsproblemen door bijvoorbeeld schimmelvorming. Om dit te voorkomen is ook een bepaalde diepte benodigd.

Waterstand oppervlaktewater verhogen

Om meer neerwaartse druk op de ondoorlatende laag uit te oefenen kan de waterstand verhoogd worden. De beperking van deze maatregel is dat het gevolgen kan hebben voor de ontwatering van het omliggend agrarisch gebied. Wanneer de drainage van de landbouwgrond onder het slootpeil komt te staan kan het land minder effectief ontwaterd worden. Daarnaast is mogelijk de drooglegging ter plaatse van de projectlocatie onvoldoende.

3.8 Conclusie

In deze paragraaf is de conclusie uit de verschillende onderdelen van dit hoofdstuk beschreven.

3.8.1 Conclusie naar aanleiding van opbarstervaringen en proeven

Het opbarsten van de bodem is een proces dat moeilijk te voorspellen kan zijn. Ter voorkoming van opbarsten worden, zoals eerdergenoemd, hoge kosten gemaakt. Wanneer het daadwerkelijke opbarsten van de bodem optreedt kan dit tot allerlei vormen van schade leiden. De ervaring leert overigens dat een opgebarsten deklaag bijzonder moeilijk te herstellen is.

De opbarstproeven, die beiden tegen de verwachtingen in niet tot opbarsten hebben geleid, wijzen uit dat er meer speelt in de bodem behalve het evenwicht tussen de gronddruk en de waterdruk.

In het geval van Culemborg is bij de uitgevoerde berekeningen volgens de NEN 9997-1 methode de sterkte van de grond waarschijnlijk onderschat. De Plaxis berekening (model 4 en 5), De Jongh 2D en De Jongh 3D hebben een veiligheid van groter dan 1,0 berekend. Deze sluiten in dit geval aan bij de werkelijkheid omdat de ontgravingsbodem tijdens de proef niet is opgebarsten.

Er valt te concluderen dat opbarstproeven veel informatie kunnen geven over het fenomeen opbarsten. Een optimalisatie van de opbarstproeven kan in de toekomst wellicht nog meer duidelijkheid geven. De eenvoudige, geaccepteerde formule uit de NEN 9997-1 blijkt te onnauwkeurig en erg conservatief.

3.8.2 Conclusie naar aanleiding van de Plaxis 2D analyse

Om aan te kunnen tonen of verschillende bodemparameters effect hebben op het opbarstrisico, zijn modellen gemaakt met het eindige elementenprogramma Plaxis 2D. De modellen zijn gebaseerd op de opbarstproef in Culemborg.

Uit het onderzoek met Plaxis 2D zijn verschillende conclusies getrokken:

1. De ongedraineerde schuifsterkte heeft invloed op de stabiliteit van de bodem en dus ook op het opbarstrisico. Hoe hoger de waarde van de ongedraineerde schuifsterkte, des te stabielere de bodem is. Tevens kan een drukboog ontwikkelen in de waterremmende deklaag. Deze drukboog kan krachten afdragen naar de zijkanten, waardoor weerstand tegen opbarsten verhoogd wordt.
2. Het HS-model is het meest geschikt voor het bepalen van het opbarstrisico, het Mohr-Coulomb model is minder geschikt, omdat deze o.a. geen belasting geschiedenis meeneemt*. Het HSS-model geeft, met uitzondering van de deformatie, geen verschil met het HS-model.
3. Hoe hoger de stijghoogte in het model, des te groter de deformatie en de kans op opbarsten.
4. Het moment van opbarsten kan niet precies bepaald worden met Plaxis 2D, omdat het programma daar niet geschikt voor is. Wanneer het model instabiel is, is uitgegaan van opbarsten van de bodem. De vraag blijft echter of bij deze deformatie opbarsten zal plaatsvinden of dat dit proces al eerder tot uiting komt door bijvoorbeeld welvorming.
5. Het programma gaat ervan uit dat het pakket in het geheel omhoog wordt gedrukt, waardoor de bodem aan de onderkanten van beide taluds bezwijkt. In werkelijkheid wordt verwacht dat opbarsten optreedt ter plaatse van de minste weerstand, oftewel in het midden van de ontgraving.

6. Negatieve wateroverspanning verhoogt de korrelspanning en verhoogt de stabiliteit. Het treedt op direct na de ontgraving. Na enige tijd neemt het effect van de negatieve wateroverspanning af en wordt de bodem minder stabiel. Dit betekent dat opbarsten niet direct na het ontgraven hoeft op te treden, maar later alsnog kan optreden.

* Plaxis rekent altijd tot een bepaalde waarde waarbij bezwijken van het model optreedt. In het voorgaande onderzoek is met minder volledige instellingen gerekend en met het MC-model. Hierdoor was geen verschil te zien bij verschillende waardes van ongedraineerde schuifsterkte. Dit heeft ook invloed gehad op de maximaal toelaatbare stijghoogte van het model.

3.8.3 Conclusie naar aanleiding van gehouden interviews

Uit de gehouden interviews blijkt dat in verband met bodemdaling en klimaatverandering beleidsmatig gezien weinig ruimte is voor alternatieve bepalingen van het opbarstrisico. Waterschappen, die de eindverantwoordelijkheid dragen, nemen niet graag dergelijke risico's. Vandaar dat normaal gesproken de voorkeur is om niet af te wijken van de NEN-methode en de bijbehorende veiligheidsfactor van 0,9. Kansen liggen echter voornamelijk in de kwaliteit en kwantiteit van vooronderzoek voor een uit te voeren project. Bodemgegevens uit Dinoloket zijn vaak te onnauwkeurig en om dit te compenseren worden hoge veiligheidsnormen toegepast.

Wanneer aannemelijk gemaakt kan worden dat een alternatieve bepaling goed onderbouwd en betrouwbaar is, dan kan hiervoor open gestaan worden. Een waterschap heeft doorgaans in mindere mate technische kennis in huis over het onderwerp opbarsten. Om deze reden worden de meeste onderzoeken naar opbarsten uitbesteed aan adviesbureaus. Een beter begrip van het fenomeen opbarsten en het meer inzichtelijk maken van het proces en de risico's kunnen gaan leiden tot een betere benadering en een meer efficiënte toepassing van maatregelen.

4. PARAMETERS DIE INVLOED HEBBEN OP HET OPBARSTRISICO

In dit hoofdstuk zijn alle parameters die invloed hebben op het opbarstrisico beschreven. Deze parameters komen voort uit bodemeigenschappen en invloeden van het omliggende gebied. Het opbarstrisico is, zoals eerder beschreven, het grootst in laaggelegen gebieden, zoals polders en droogmakerijen in West-Nederland.

4.1 Volumiek gewicht waterremmende deklaag

Bij de bepaling van het volumiek gewicht wordt een gemiddelde waarde toegepast, bepaald uit laboratoriumonderzoek. Dit onderzoek bestaat uit de bepaling van het droge -en natte volumiek gewicht. Omdat het om gemiddelden gaat kan door het toepassen van statistiek, op basis van een normale verdeling, de 5%-bovengrens en de 5%-ondergrens bepaald worden. Wat opvalt is dat dit een groot effect heeft op de berekende veiligheidsfactor. Dit effect wordt in onderstaande tabel beschreven aan de hand van de NEN 9997-1 methode, met gegevens van de opbarstproef in Culemborg.

Tabel 5 statistiek en opbarstrisico

NEN 9997-1	Voorgaand onderzoek	5%-bovengrens	5%-ondergrens
Kleilaag, $\gamma_1;d$	14,90	16,19	13,74
Klei- en veenlaag $\gamma_2;d$	10,74	12,10	10,27
Opbarstveiligheid volgens NEN 9997-1	0,770	0,864	0,738
Verskil t.o.v. voorgaand onderzoek	-	0,094	-0,032
Procentueel verschil	-	10,9	-4,4

Bandbreedte: $10,9 + 4,4 = 15,3\%$

Uit deze tabel blijkt dat, in het geval van de opbarstproef in Culemborg, een verschil in veiligheid van 15,3% wordt berekend. In dit geval blijft de opbarstveiligheid lager dan 1,0 bij de 5%-bovengrens benadering. De berekening toont aan dat de mate van onnauwkeurigheid bij het bepalen van het (gemiddelde) volumiek gewicht doorwerkt in de berekende opbarstveiligheid. Een groter aantal proeven zal leiden tot een meer nauwkeurige bepaling van het volumiek gewicht.

4.2 Doorlatendheid waterremmende deklaag

De doorlatendheid k wordt uitgedrukt in meter per dag. De hydraulische weerstand c in dagen en de dikte van de waterremmende toplaag d in meter bepalen deze doorlatendheid volgens de volgende term:

$$C = \frac{d}{k}$$

Deze hydraulische weerstand is bepalend voor het risico op welvorming. Wanneer de deklaag erg doorlatend is, zal het risico op het ontstaan van zand meevoerende wellen groot zijn. Wanneer de waterremmende deklaag enigszins doorlatend is, kan dit echter ook betekenen dat een deel van de waterspanning wordt vrijgelaten en de opwaartse druk op de deklaag vermindert. De waarden van doorlatendheid zijn erg uiteenlopend. Zandige klei heeft een k -waarde van ca. 0,05 meter per dag, zware, vette klei kan daarentegen een k -waarde van ca. 10^{-4} tot 10^{-5} meter per dag hebben. De doorlatendheid van veen loopt uiteen van 0,3 tot 0,005 meter per dag. De doorlatendheid van het eerste watervoerend pakket heeft ook invloed op het opbarstrisico, maar is met name bepalend voor de kwelweglengte vanaf waterkeringen, zie paragraaf 4.3.1.

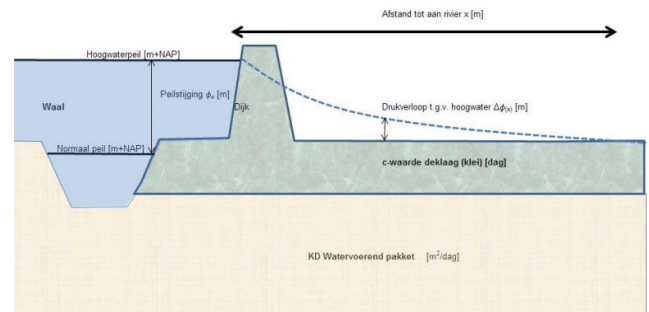
4.3 Stijghoogte

De opwaartse waterdruk is, zoals benoemd in paragraaf 2.2, bepalend voor het opbarstrisico. De opwaartse waterdruk is een gevolg van de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket. Deze stijghoogte kan beïnvloed worden door externe factoren. Artesisch water kan zich door het eerste watervoerend pakket verplaatsen waardoor de stijghoogte kan toe- of afnemen.

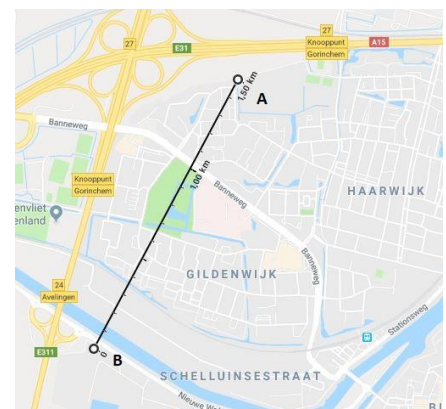
4.3.1 Invloed hoofdwatgang op de stijghoogte

De aanwezigheid van hoofdwatgangen heeft veel effect op de waterhuishouding van een regio, tot wel kilometers afstand van de watgang. Het effect van deze watgangen is zo groot doordat ze hoger liggen dan de polders en vrijwel altijd in verbinding staan met het eerste watervoerend pakket. Rivierwater dat infiltreert in het eerste watervoerend pakket staat onder druk door het stijghoogteverschil en verspreidt zich in horizontale richting (zie Figuur 12). Het eerste watervoerend pakket bestaat voornamelijk uit zand en

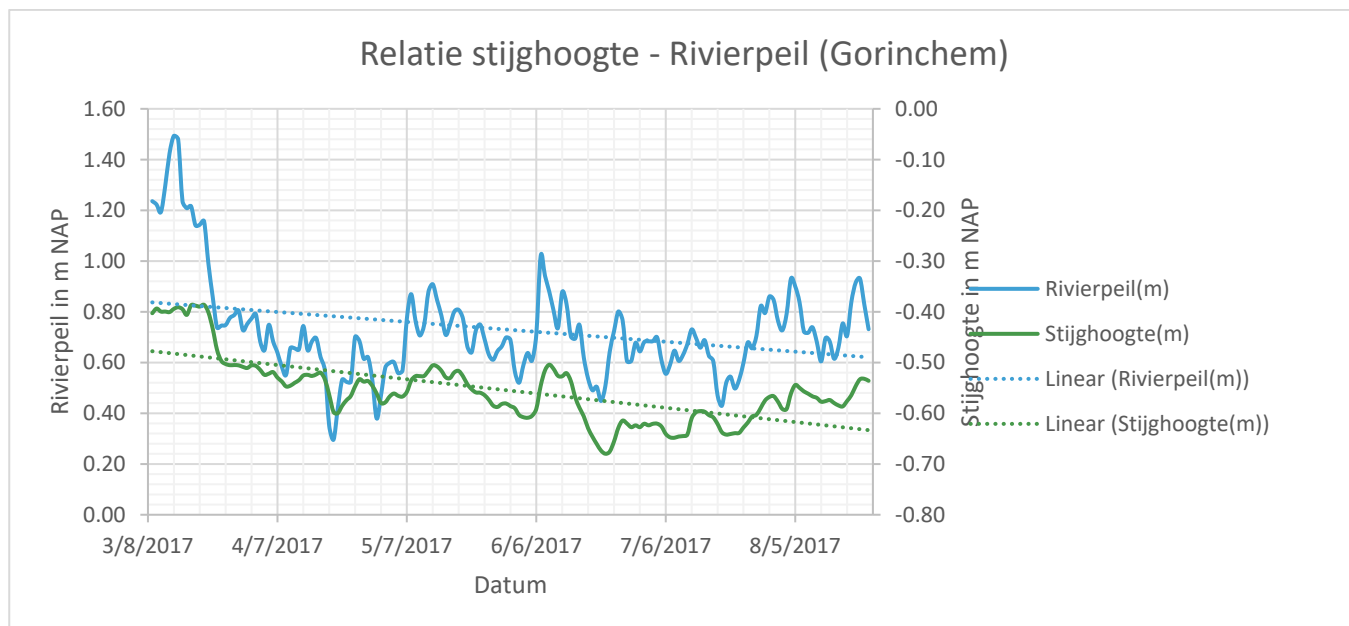
is daardoor zeer goed doorlatend. Fluctuatie in rivierpeil heeft direct invloed op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket. Door de wet van communicerende vaten (zie bijlage 2) oefent het water druk uit op de waterremmende laag. Deze druk is te meten met behulp van een peilbuis in het eerste watervoerend pakket in de vorm van stijghoogte. Dit is ook bepaald voor het te realiseren bedrijventerrein in Gorinchem. Voor deze situatie is de relatie gelegd tussen de gemeten stijghoogte, bepaald met behulp van peilbuis B102 in het eerste watervoerend pakket (locatie A) en het rivierpeil van de Boven Merwede (locatie B), ter plekke van Gorinchem. De afstand tussen de locaties is ca. 1,5 kilometer.



Figuur 12 Kwelweglengte (RVDE, 2012)



Figuur 11 Peilbuis B102 tot Merwede



Grafiek 7 Relatie stijghoogte-rivierpeil

Te zien is dat het waterpeil van de Boven Merwede direct invloed heeft op de stijghoogte landinwaarts. Opvallend is dat de stijghoogte heel direct reageert op de rivierstand. Dit wijst op een grote doorlatendheid van het eerste watervoerend pakket. Aan de hand van dit voorbeeld kan gesteld worden dat het rivierpeil invloed heeft op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket.

Deze resultaten worden bevestigd door de formule van Mazure. Met deze formule kan de verhoging van de stijghoogte in het watervoerend pakket berekend worden. De kwelweglengte en de stijghoogte zijn tegen elkaar uitgezet in Grafiek 8. De kwelweglengte is de maximale afstand die het kwelwater kan afleggen vanaf intrede (winterdijk), in de richting van de polder.

De formule van Mazure:

$$\Delta\phi(x) = \phi_0 * e^{\frac{-x}{\sqrt{K*D*c}}}$$

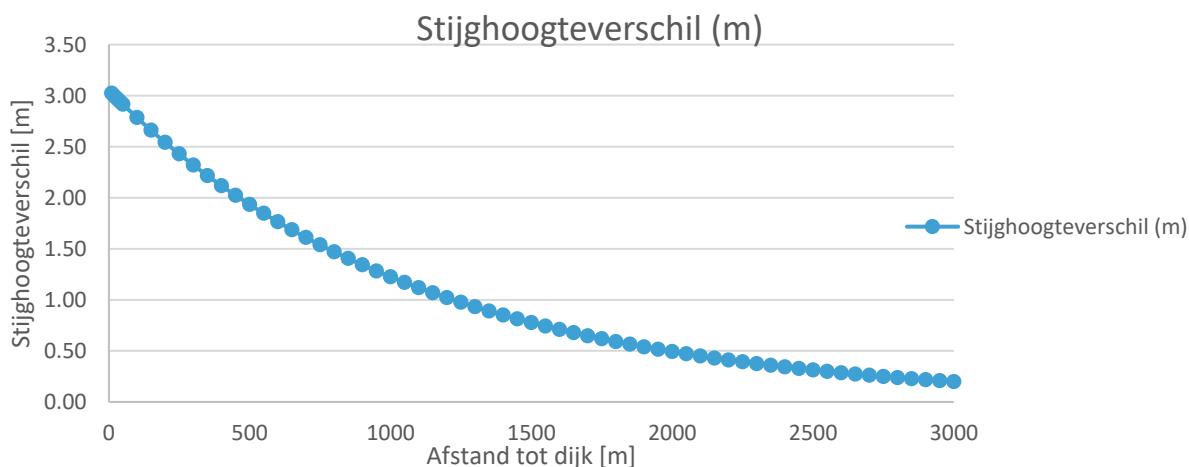
Waarbij:

$\Delta\phi(x)$	= Verhoging van stijghoogte in het watervoerend pakket (m)	
ϕ_0	= Verschil in waterpeil tussen het poldergebied en de rivier (m)	
	= Rivierstand – polderpeil = +1,49 – -1,56	= 3,05 m*
x	= kwelweglengte (m)	= 0 - 3000 m
K	= Hydraulische conductiviteit van het watervoerend pakket (m/dag)	= 100 m/dag8**
D	= Verzadigde dikte van het watervoerend pakket (m)	= 30 m**
c	= Hydraulische weerstand van de afsluitende deklaag (dag)	= 400 dagen**

*Bij hoogste rivierpeil tussen 1 maart 2017 t/m 31 december 2017 (Rijkswaterstaat, 2018)

**De gebruikte waarden zijn benaderingen van de werkelijkheid, uitgaande van homogene bodemeigenschappen en een gelijke bodemopbouw tussen winterdijk en peilbuis B102.

In onderstaande grafiek zijn de resultaten weergegeven:

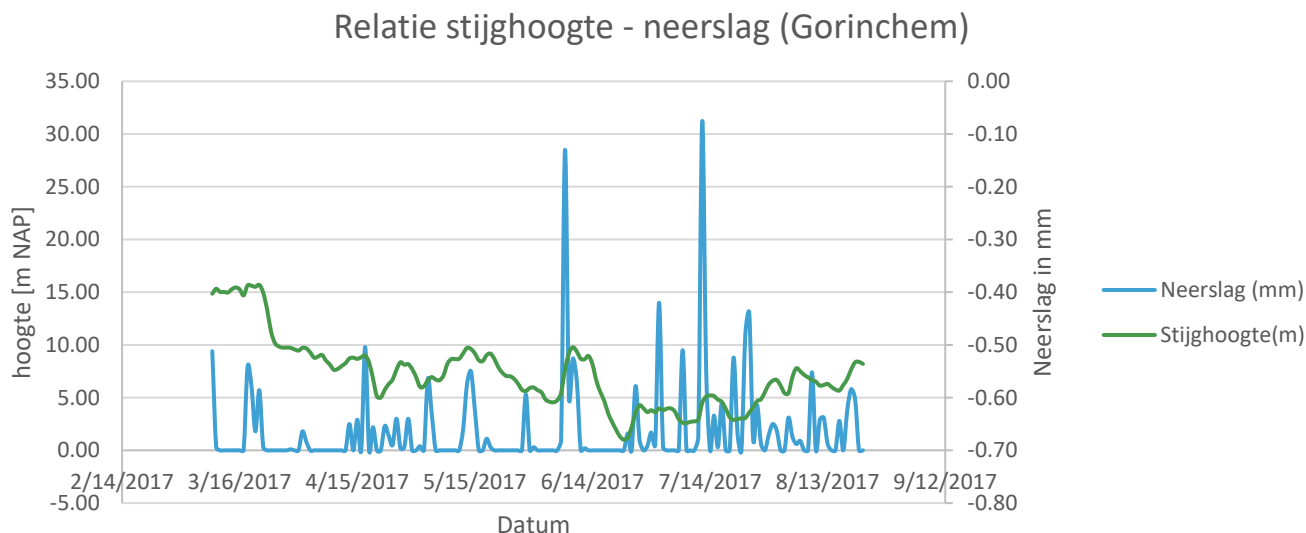


Grafiek 8 Stijghoogte op afstand x van de waterkering

Te zien is dat bij een toename van de afstand het stijghoogteverschil kleiner wordt, oftewel hoe langer de afstand, hoe kleiner de invloed van de rivier is op de stijghoogte. Bij peilbuis B102, op een afstand van 1500 meter vanaf de waterkering is, volgens de formule van Mazure, het stijghoogteverschil in het watervoerend pakket 0,78 meter. De stijghoogte was ter plaatse van de peilbuis op dat moment Nap -0,39 m. Uit deze benadering blijkt dat de waterstand in de hoofdwatergang op een afstand van 1500 meter vanaf de winterdijk invloed heeft op de stijghoogte. Uit de daadwerkelijke metingen en de theoretische benadering met de formule van Mazure word geconcludeerd dat bij een hoogwatergolf het opbarstrisico ook toeneemt.

4.3.2 Invloed neerslag

Bij de bepaling of neerslag invloed heeft op de stijghoogte van het artesisch water, zijn neerslaggegevens (KNMI, 2018) vergeleken met de stijghoogte in peilbuis B102 op locatie A in de periode van 1 maart 2017 t/m 31 december 2017. De resultaten zijn in onderstaande grafiek weergegeven.



Grafiek 9 Relatie stijghoogte-neerslag

Uit de grafiek blijkt dat op deze locatie geen direct verband bestaat tussen de stijghoogte van het artesisch water en de neerslag. Dit is te verklaren doordat de hydraulische weerstand van het waterremmende pakket groot is en het hemelwater daardoor niet direct kan infiltreren in het artesisch water. Omdat deze waterremmende deklaag op deze locatie ca. 8 meter dik is, wordt de infiltratietijd erg groot.

Hieruit valt te concluderen dat neerslag geen directe invloed heeft op de stijghoogte van het artesisch water, in het geval van Gorinchem. Wanneer bij andere situaties sprake is van een dikke waterremmende deklaag, zal dit ook het geval zijn. De neerslag heeft wel een directe invloed op het freatische waterniveau (grondwater). Dit wordt behandeld in paragraaf 4.6.

4.4 Cohesie en ongedraineerde schuifsterkte

Ongedraineerde schuifsterkte

Dit is een waarde van de schuifsterkte die afhankelijk is van diverse factoren, waaronder de belastinggeschiedenis en de belastingcondities van de grond. Bij het rekenen met de ongedraineerde schuifsterkte is daarom het meten van de sterkte in het veld en het laboratorium belangrijk. De ongedraineerde schuifsterkte is een sterkteverloop dat kan worden bepaald door de volgende 3 parameters: de sterkte toename exponent m , de ongedraineerde schuifsterkteratio S en de grensspanning. De eenheid van de ongedraineerde schuifsterkte is kN/m^2 (Helpdeskwater, 2017) Ongedraineerde schuifsterkte is een sterktemaat die een weerstand tegen deformatie weergeeft. Een hoge waarde voor ongedraineerde schuifsterkte heeft een lager opbarstrisico tot gevolg. Deze parameter is van belang bij het rekenen met methode De Jongh en in het Hardening Soil model (HSM) in Plaxis 2D.

Cohesie

Cohesie c' is de aantrekkingskracht tussen gronddeeltjes. Cohesie wordt onder andere veroorzaakt door elektromagnetische bindingen (Van der Waals krachten). In de geotechniek worden ook het effect van cementatie

op de schuifsterkte van grond en het effect van capillaire krachten in deels verzadigde grond onder cohesie gerekend. De grootte van cohesie is weerstand, de eenheid is kN/m^2

Cohesie kan worden bepaald door het uitvoeren van triaxiaalproeven of direct simple shear proeven. Omdat de cohesie het gevolg kan zijn van verschillende oorzaken en de mate van cementatie en overconsolidatie sterk kan variëren, is de waarde van de cohesie sterk variabel (Duinen, 2017). In Plaxis kan de waarde van cohesie worden omgerekend vanuit de ongedraineerde schuifsterkte. De cohesie van de waterremmende deklaag veroorzaakt een sterkte die de kans op opbarsten verkleint.

4.5 Elasticiteitsmodulus

De elasticiteitsmodulus, oftewel de E-modulus is een maat voor de stijfheid van een bodem. De E-modulus wordt bepaald aan de hand van een triaxiaal proef. Hoe hoger deze waarde is, des te stijver of starrer het materiaal. De elasticiteitsmodulus is een term dat bestaat uit de secansstijfheid, de oedometerstijfheid en de ontlast-herbelaststijfheid. De afkorting voor de elasticiteitsmodulus is E.

4.6 Freatisch water

De freatische grondwaterstand fluctueert sterk ten gevolge van neerslag en verdamping, zie paragraaf 4.3.24.6. Wanneer hemelwater infiltreert in de waterremmende deklaag krijgt deze meer gewicht, waardoor de druk naar beneden groter wordt. In droge periodes is de deklaag daarom lichter dan in natte periodes. Echter, een hoger vochtgehalte resulteert ook in een lagere sterkte van het waterremmende materiaal.

4.7 Veiligheidsfactoren

De extra veiligheid die wordt toegepast op de waterremmende deklaag beïnvloedt het berekende opbarstrisico. Door het neerwaartse gewicht te vermenigvuldigen met 0,9 of te delen door 1,1 wordt een veilige benadering gedaan. Wanneer grondig grond- en laboratoriumonderzoek is uitgevoerd, kan deze factor in sommige gevallen aangepast of weggelaten worden.

4.8 Conclusie

In tabel 6 is een overzicht te zien van de parameters en de invloed op het opbarstrisico. Daarbij is beschreven wat de invloed op het opbarstrisico is van elke parameter.

Tabel 6 Overzicht invloed hebbende parameters

Paragraaf nr.	Parameter	Heeft invloed op
4.1	Volumiek gewicht	Neerwaartse gronddruk
4.2	Doorlatendheid waterremmende deklaag	Risico welvorming
4.3.1	Stijghoogte artesisch water	Opwaartse waterdruk
4.3.2	Invloed neerslag	Neerwaartse gronddruk
4.4	Cohesie	Sterkte deklaag
4.4	Ongedraineerde schuifsterkte	Sterkte deklaag
4.5	Elasticiteitsmodulus	Sterkte deklaag
4.6	Freatisch water	Neerwaartse gronddruk en stijfheid materiaal
4.7	Veiligheidsfactoren	Uitkomst berekening

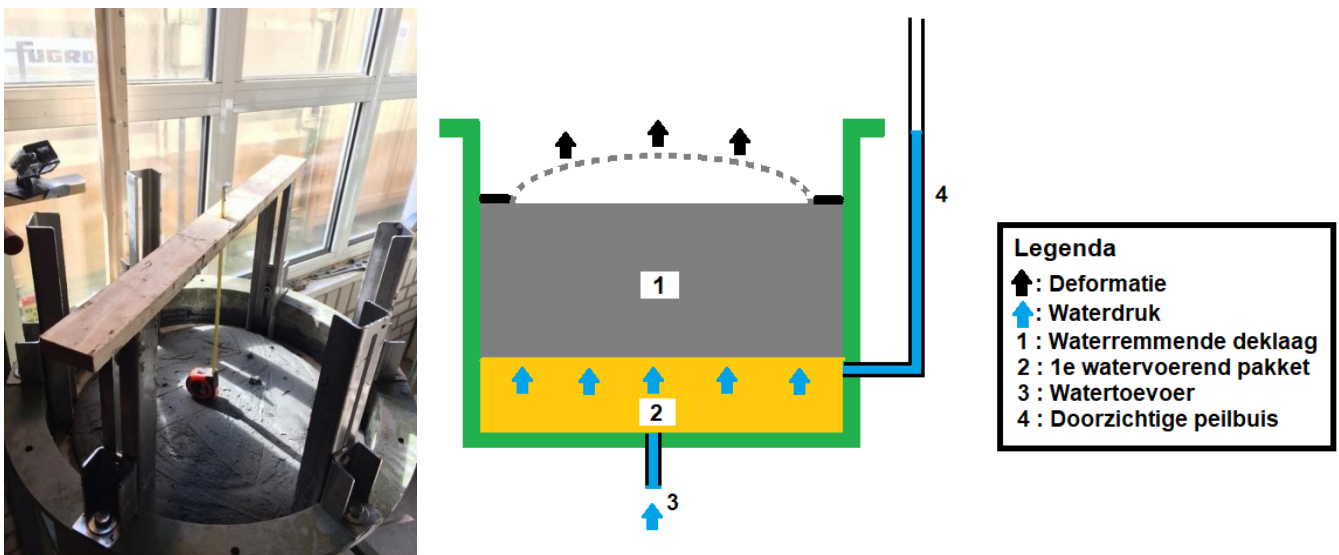
5. TOETSING DOOR MIDDEL VAN EEN VELD- EN SCHAALPROEF OPBARSTEN

5.1 Inleiding

Uit de conclusie in paragraaf 3.8 blijkt dat er behoefte bestaat aan meer inzicht en een meer nauwkeurige benadering van het opbarstrisico. Wanneer aangetoond kan worden dat de gangbare methodes te conservatief rekenen, kan het opbarstrisico in de toekomst in mindere mate gaan leiden tot herziening of afkeuring van ontwerpen. Ook kunnen maatregelen tegen opbarsten beter worden gedimensioneerd en afgewogen. Uit dit onderzoek wordt geconcludeerd dat praktijkkennis van toegevoegde waarde kan zijn voor de theoretische benadering van het opbarstrisico.

5.2 Opzet schaalproef opbarsten

Op basis van het uitgevoerde literatuur- en praktijkonderzoek is in het kader van het afstudeeronderzoek een schaalproef ontwikkeld in het laboratorium van Fugro, zie bijlage 8. Door middel van deze proef wordt getracht meer begrip te krijgen over het fenomeen opbarsten. Daarbij kan de invloed van verschillende parameters op het opbarstproces bepaald worden. De schaalproef simuleert een praktijksituatie zo nauwkeurig mogelijk. Het is een procesgerichte proef waarin een benadering van het werkelijke opbarstrisico wordt nagestreefd. In onderstaande figuur is de schaalproef te zien.

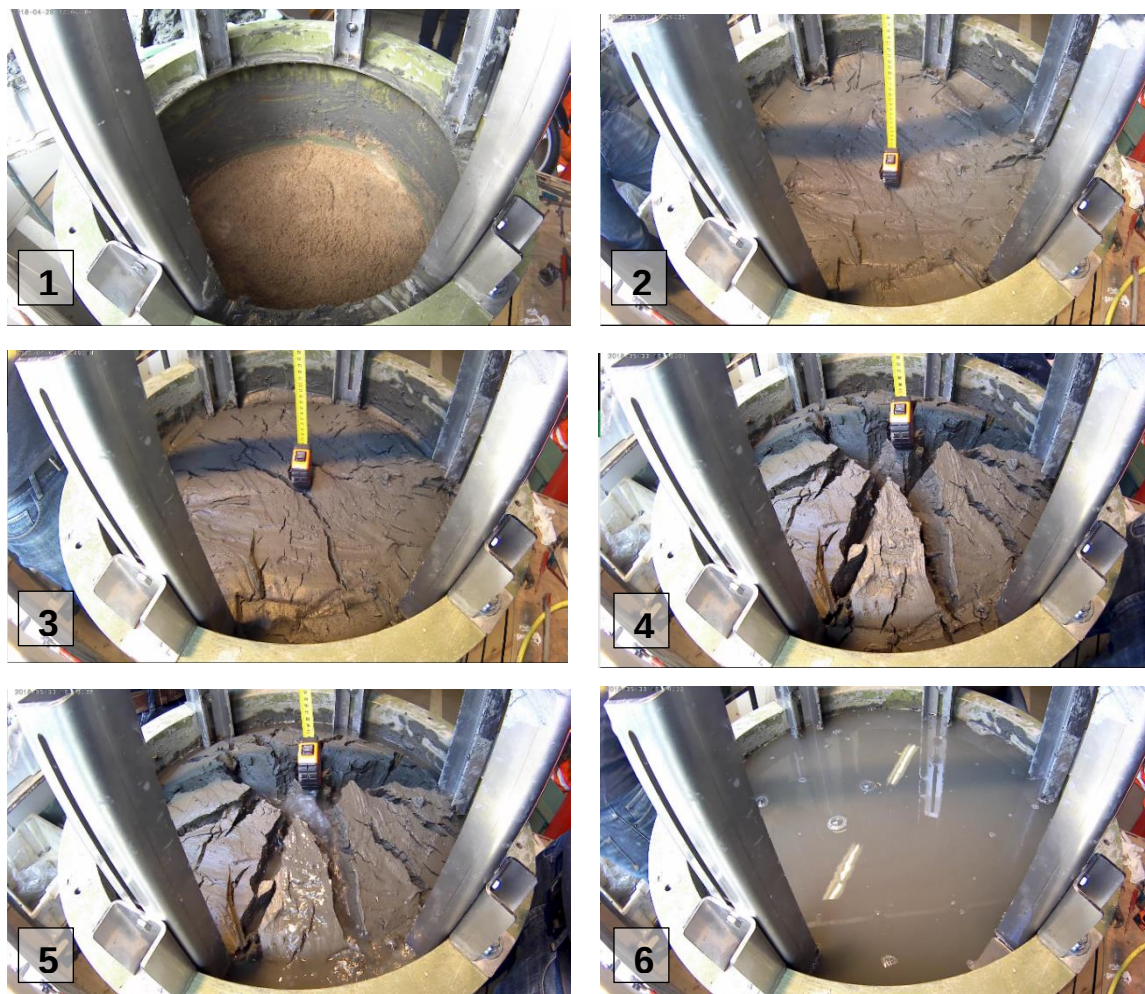


Figuur 13 Schaalproef opbarsten (afbeelding en schets)

De schaalproef bestaat uit een bak waarin een praktijksituatie wordt nagebootst. Het protocol van de schaalproef bestaat uit totaal 8 stappen, zie bijlage 8. Ten eerste wordt goed waterdoorlatend drainagezand op de bodem van de bak gelegd en hierop komt de waterremmende deklaag van klei. Van deze klei zijn alle invloed hebbende parameters op het opbarstrisico in het laboratorium bepaald. In het eerste watervoerend pakket (1^e WVP) wordt een waterdruk opgebouwd, zoals dit ook in de praktijk voorkomt. Stijghoogte en deformatie worden hierbij nauwkeurig gemonitord. De druk wordt opgevoerd totdat opbarsten plaatsvindt waarna bevindingen en resultaten worden vastgelegd.

5.3 Resultaten uitgevoerde schaalproeven

Er zijn 12 schaalproeven uitgevoerd in het laboratorium van Fugro. Tijdens deze proeven is gevarieerd met de dikte van de waterremmende deklaag en de stijghoogte. De waterdruk is in het 1e WVP is tijdens de proef geleidelijk toegenomen. Deze gelijkmatige druk zorgt ervoor dat de kleilaag begint te deformeren. Na een tijd ontstaan scheuren in de waterremmende deklaag. De scheuren worden langzaam groter totdat de deklaag uiteindelijk bezwijkt en het pakket opbarst. Hierbij stroomt het water naar boven waarna het pakket terug zakt. In de bak blijft een laag water staan. In de onderstaande figuur zijn de verschillende fasen van de schaalproef weergegeven.



Figuur 14 Fasering schaalproef

- 1: Geprepareerde zandlaag
- 2: Verdicht kleipakket, begin proef
- 3: Scheurvorming
- 4: Vlak voor opbarsten
- 5: Opbarsten
- 6: Na opbarsten, einde proef

De resultaten van de schaalproeven worden vergeleken met berekeningen aan de hand van de rekenmethoden De Jongh 2D en 3D, de rekenmethode uit de NEN 9997-1 en berekeningen in het Hardening Soil model (HS-model) in Plaxis 2D. Om een geschikte vergelijkingsparameter te kunnen hanteren is, in plaats van een opbarstveiligheid te berekenen, gerekend met de kritieke stijghoogte (STH). Dit wil zeggen, de stijghoogte waarbij sprake is van een opbarstveiligheid van 1,0. Dit wordt getypeerd als de stijghoogte waar opbarsten plaatsvindt. De rekenmethoden De Jongh 2D en 3D en de rekenmethode uit de NEN 9997-1 zijn hiervoor omschreven zodat een kritieke stijghoogte kan worden berekend, zie bijlage 8. Ook in Plaxis 2D (HS-model) is de kritieke stijghoogte te berekenen. Bovendien is deze waarde tijdens de proef af te lezen op de doorzichtige peilbuis met maatstrepen.

In onderstaande tabel is een overzicht weergegeven van de resultaten van de schaalproef. Tevens zijn de berekende kritieke stijghoogtes, in millimeter t.o.v. de onderkant van de waterremmende deklaag, van alle rekenmethoden weergegeven. De resultaten zijn gesorteerd op de laagdikte van de waterremmende deklaag, van klein naar groot. In de laatste kolom is de kritieke stijghoogte weergegeven die is bepaald tijdens de schaalproef.

Tabel 7 Resultaten uitgevoerde schaalproeven

Proef nr.	Dikte	STH Jongh 2D	STH Jongh 3D	STH NEN	STH Plaxis	STH schaalproef
-	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
4	0,15	600	975	225	410	300
5	0,15	602	977	227	410	300
11	0,15	599	974	224	410	300
1	0,2	1365	2432	299	570	730
2	0,2	1179	2045	312	550	585
3	0,2	804	1304	304	450	430
6	0,2	802	1302	302	450	400
10	0,2	802	1302	302	450	490
12	0,2	800	1300	300	450	400
8	0,24	972	1572	372	530	550
7	0,25	1013	1638	388	520	630
9	0,25	1008	1633	383	520	490

In de tabel is te zien dat beide De Jongh rekenmethodes een hoge kritieke stijghoogte berekenen, de NEN-rekenmethode een relatief lage en Plaxis een waarde geeft tussen beide extremen.

5.4 Vergelijking resultaten schaalproef met rekenmethoden

Tabel 8 Vergelijking resultaten met vooraf berekende voorspellingen

Proef nr.	Dikte	Vershil t.o.v. de Jongh 2D	Vershil t.o.v. de Jongh 3D	Vershil t.o.v. NEN	Vershil t.o.v. Plaxis 2D
-	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]
Proef 4	0,15	-50	-69	33	-27
Proef 5	0,15	-50	-69	32	-27
Proef 11	0,15	-50	-69	34	-27
Proef 1	0,2	-47	-70	144	28
Proef 2	0,2	-50	-71	88	6
Proef 3	0,2	-47	-67	41	-4
Proef 6	0,2	-50	-69	32	-11
Proef 10	0,2	-39	-62	62	9
Proef 12	0,2	-50	-69	33	-11
Proef 8	0,24	-43	-65	48	4
Proef 7	0,25	-38	-62	63	21
Proef 9	0,25	-51	-70	28	-6

In bovenstaande tabel zijn de verschillen in kritieke stijghoogte weergegeven van elke rekenmethode ten opzichte van de kritieke stijghoogte van de schaalproef.

Wat opvalt is dat de waarden van de Jongh-rekenmethoden negatief zijn. Dit betekent dat deze methoden de veiligheid te hoog inschatten, oftewel een hogere kritieke stijghoogte berekenen dan uit de proef is gebleken. Deze methoden bepalen dus het opbarstrisico te laag.

Aan de andere kant zijn de waarden van de NEN-rekenmethode positief. Deze methode berekent een lagere kritieke stijghoogte dan de werkelijke situatie. Hieruit valt te concluderen dat de NEN-rekenmethode het opbarstrisico te hoog bepaalt.

De Plaxis 2D-rekenmethode bepaalt het opbarstrisico zowel te hoog als te laag. Echter wijken deze waarden significant minder af van de proefresultaten dan andere rekenmethoden. Dit is ook te zien aan het gemiddelde verschil in kritieke stijghoogte in onderstaande tabel.

Tabel 9 Gemiddelde verschil kritieke stijghoogte met schaalproef [%]

	Vershil t.o.v. de Jongh 2D	Vershil t.o.v. de Jongh 3D	Vershil t.o.v. NEN	Vershil t.o.v. Plaxis 2D
Gem.	-47	-68	53	-4

Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat de Plaxis 2D-rekenmethode de kritieke stijghoogte en dus ook het opbarstrisico het meest nauwkeurig bepaalt ten opzichte van De Jongh en de NEN 9997-1 rekenmethoden.

Hieruit wordt geconcludeerd dat Plaxis 2D bij het analyseren van een praktijksituatie ook het meest nauwkeurig zal zijn. Het programma geeft een meer volledige berekening van de kritieke stijghoogte waarin meerdere relevante bodemparameters worden meegenomen. Het Hardening Soil rekenmodel is het meest geschikt om een nauwkeurige uitspraak over de kritieke stijghoogte te geven. Dit wil niet zeggen dat deze voorspelling volledig correspondeert met de werkelijke situatie.

De schaalproef, zoals deze is uitgevoerd, heeft een aantal kanttekeningen. Deze kanttekeningen, samen met hieruit volgende aanbevelingen, zijn beschreven in bijlage 8.

5.5 Opzet veldproef opbarsten

Omdat rekenmodellen nooit 100% betrouwbare gegevens opleveren is het aan te raden om een veldproef ter bepaling van het opbarstrisico uit te voeren. De veldproef bestaat uit een ontgraving met een talud. Om het opbarstrisico d.m.v. een veldproef te kunnen bepalen en door te vertalen naar locaties met andere omstandigheden en om vergelijkingen met verschillende rekenmethodieken te kunnen maken is het van belang om uitgebreid vooronderzoek te doen. Dit wil zeggen dat onder andere relevante fysische bodemeigenschappen en de bodemgelaagdheid bepaald worden. Het doel is om tijdens de proef de bodem te laten opbarsten, waardoor informatie over het opbarstrisico gewonnen kan worden.

Een veldproef kan om twee redenen worden uitgevoerd. Ofwel om het opbarstrisico op een bepaalde locatie onder bepaalde omstandigheden te bepalen, ofwel ten behoeve van inwinning van algemene kennis met betrekking tot het proces opbarsten.

In het eerste geval worden de afmetingen van de geplande ontgraving aangehouden met een extra diepte zodat het opbarstrisico hoger wordt bepaald. Wanneer de bodem in deze situatie niet opbarst, zal dit bij de daadwerkelijke ontgraving ook niet het geval zijn. Ook kan ter compensatie extra diep worden ontgraven wanneer tijdens de proef geen sprake is van de maximaal te verwachten stijghoogte.

Voor de afmetingen van een veldproef om meer inzicht te krijgen in het proces van opbarsten is het advies om een brede ontgraving te hanteren om de invloed van taludwerking te minimaliseren en effectief onderzoek te kunnen doen naar het verticale evenwicht. Als vuistregel wordt in dit geval aangeraden om de ontgraving zodanig breed te graven dat de invloed van taludwerking in het midden van de ontgraving minder dan 1% van de totale neerwaartse gronddruk bedraagt. De diepte moet dusdanig groot zijn dat volgens de NEN-methode en Plaxis 2D (HS-model) opbarsten berekend wordt.

In beide gevallen geschiedt de ontgraving in den droge. Hiervoor wordt tijdelijke spanningsbemaling toegepast en wordt de ontgravingsbodem droog gepompt met een klokpomp. De ontgravingsbodem blijft tijdens de proef droogstaan t.b.v. de monitoring. Monitoring vindt plaats aan de hand van waterspanningsmeters, zakbaken, een 3D terrestrische laserscanner en eventueel een infraroodcamera. Bovendien vindt doorlopend visuele inspectie plaats. De proef wordt beëindigd wanneer opbarsten is opgetreden of de proef redelijkerwijs niet langer voortgezet kan worden. Na afloop wordt de waterremmende deklaag hersteld d.m.v. een cement-bentoniet injectie. Om dit te kunnen realiseren wordt de aanwezige spanningsbemaling gebruikt. Het protocol voor de veldproef is te vinden in bijlage 9.

6. CONCLUSIE, DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk is de conclusie beschreven, met daarin beantwoording van de hoofdvraag door middel van het beantwoorden van de gestelde deelvragen. Daarnaast zijn in de discussie kanttekeningen vermeld omtrent dit onderzoek en tot slot zijn aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek.

6.1 Conclusie

De hoofdvraag, die centraal staat in dit onderzoek, luidt als volgt:

“Op welke wijze kan het opbarstrisico worden benaderd, zodanig dat deze beter aansluit bij de werkelijke situatie dan de voorgeschreven methode?”

Deelvragen:

Wat zijn de voorgeschreven en alternatieve methodes voor het uitvoeren van opbarstberekeningen en hoe worden deze toegepast?

De voorgeschreven methode voor het uitvoeren van opbarstberekening staat beschreven in de NEN 9997-1 en gaat uit van een vergelijking van de neerwaartse gronddruk met de opwaartse artesische waterdruk. Bij stabiliteitsberekeningen dient de neerwaartse belasting van de grond te worden vermenigvuldigd met een (partiële materiaal-) factor van 0,9 ten behoeve van onzekerheden. De berekende veiligheid tegen opbarsten dient 1,0 te zijn. Bij relatief smalle ontgravingen heeft het talud een versterkend effect op de opbarstveiligheid. Het talud oefent een verticale druk uit die de bodem van de watergang naar beneden drukt. Dit wordt taludwerking genoemd en dit wordt uitgedrukt in een factor.

Alternatieve rekenmethodes, zoals De Jongh methode en berekeningen in het eindige elementen programma Plaxis 2D, worden in de praktijk niet toegepast, omdat deze (nog) niet erkend zijn als geldige rekenmethode. De rekenmethode van De Jongh is een aanpassing op de NEN 9997-1 met toevoeging van de ongedraineerde schuifsterkte. Met Plaxis 2D kan een model van de werkelijkheid gemaakt worden, waarmee de stabiliteit van de bodem berekend kan worden. In een situatie waarbij het opbarstrisico groot is, kan bepaald worden wanneer het model bezwijkt en dus opbarst.

Welke conclusies kunnen getrokken worden uit praktijkervaringen bij waterschappen en specifiek uit uitgevoerde opbarstproeven in Culemborg en Waddinxveen?

Uit de gehouden interviews blijkt dat in verband met bodemdaling en klimaatverandering beleidsmatig gezien weinig ruimte is voor alternatieve bepalingen van het opbarstrisico. Waterschappen, die de eindverantwoordelijkheid dragen, nemen niet graag dergelijke risico's. Vandaar dat normaal gesproken de voorkeur is om niet af te wijken van de NEN-methode en de bijbehorende veiligheidsfactor van 0,9. Kansen liggen echter voornamelijk in de kwaliteit en kwantiteit van vooronderzoek voor een uit te voeren project. Bodemgegevens uit Dinoloket zijn vaak te onnauwkeurig en om dit te compenseren worden hoge veiligheidsnormen toegepast. Wanneer aannemelijk gemaakt kan worden dat een alternatieve bepaling goed onderbouwd en betrouwbaar is, dan kan hiervoor open gestaan worden.

De opbarstproeven van Culemborg en Waddinxveen, die beiden tegen de verwachtingen in niet tot opbarsten hebben geleid, wijzen uit dat er meer speelt in de bodem behalve het verticale evenwicht tussen de neerwaartse gronddruk en de opwaartse artesische waterdruk.

In het geval van Culemborg is bij de uitgevoerde berekeningen volgens de NEN 9997-1 methode de sterkte van de grond onderschat. De Plaxis berekening (Hardening Soil model), De Jongh 2D en De Jongh 3D hebben een veiligheid van hoger dan 1,0 berekend. Deze sluiten in dit geval beter aan bij de werkelijkheid omdat de ontgravingsbodem tijdens de proef niet is opgebarsten.

Er valt te concluderen dat opbarstproeven veel informatie kunnen geven over het fenomeen opbarsten. Een optimalisatie van de opbarstproeven kan in de toekomst wellicht nog meer duidelijkheid geven. De eenvoudige, geaccepteerde formule uit de NEN 9997-1 blijkt onnauwkeurig en conservatief. Een beter begrip van het fenomeen opbarsten en het meer inzichtelijk maken van het proces en de risico's zou kunnen leiden tot een betere benadering en een meer efficiënte en duurzame toepassing van maatregelen.

Welke bodemgerelateerde aspecten en omgevingsaspecten zijn van invloed op het opbarstrisico?

Het opbarstrisico wordt beïnvloed door verschillende bodem -en omgevingsaspecten. Ten eerste heeft het volumiek gewicht invloed op de neerwaartse gronddruk en werkt opbarsten tegen. De doorlatendheid van de waterremmende deklaag is van belang, omdat het risico op welvorming groter wordt bij een grote doorlatendheid. De stijghoogte van het artesisch water veroorzaakt de opwaartse waterdruk, hieruit ontstaat het risico op opbarsten. Neerslag heeft effect op de grondwaterstand. Hoe hoger de grondwaterstand, des te hoger de verzadigingsgraad van de waterremmende deklaag, wat de neerwaartse druk verhoogt, maar ook de sterkte van de waterremmende deklaag laat afnemen. Cohesie en ongedraineerde schuifsterkte hebben effect op de sterkte van de deklaag. Hoe groter deze waarde, des te hoger de weerstand van de deklaag tegen opbarsten is. Ook de elasticiteitsmodulus bepaald de stijfheid van de deklaag. Hoe groter deze is, des te lager het risico op opbarsten. Veiligheidsfactoren worden gebruikt voor extra veiligheid om onzekerheden te compenseren.

Hoe dient een protocol voor een veld- en schaalproef eruit te zien waarmee het risico voor opbarsten beter inzichtelijk wordt dan wanneer deze aan de hand van de voorgeschreven methode wordt bepaald?

Het risico op opbarsten kan beter inzichtelijk gemaakt worden met een veld- en schaalproef als toevoeging op de NEN 9997-1 rekenmethode.

De schaalproef bestaat uit een cilindervormige bak waarin een praktijksituatie wordt nagebootst. Het protocol van de schaalproef bestaat uit totaal 8 stappen. Ten eerste wordt goed waterdoorlatend drainagezand op de bodem van de bak gelegd en hierop komt de waterremmende deklaag van klei. Van deze klei zijn alle invloed hebbende parameters op het opbarstrisico bepaald. In het eerste watervoerend pakket wordt een waterdruk opgebouwd, zoals dit ook in de praktijk voorkomt. Stijghoogte en deformatie worden hierbij nauwkeurig gemonitord. De druk wordt opgevoerd totdat opbarsten plaatsvindt waarna bevindingen en resultaten worden vastgelegd.

De veldproef ontstaat uit een ontgraving die verdiept wordt totdat opbarsten plaatsvindt. Het voordeel van een veldproef ten opzichte van een schaalproef is de mogelijkheid om een ontwerpsituatie te simuleren. Zo kan d.m.v. een veldproef een betrouwbare voorspelling worden gedaan over het opbarstrisico van te realiseren watergangen. Zo kunnen maatregelen nauwkeurig bepaald en gedimensioneerd worden zodat overbodige kosten voorkomen worden. Bovendien is de verkregen kennis van toegevoegde waarde voor een veilig en duurzaam ontwerp. De mate van vooronderzoek is bepalend voor de kwaliteit van deze kennis. Van belang bij deze proef is dat de bodemgelaagdheid, stijghoogte en bodemparameters nauwkeurig bepaald worden. De verkregen parameters worden in het Hardening Soil model in Plaxis 2D en de NEN-9997 rekenmethode verwerkt en een voorspelling van de kritieke stijghoogte wordt gemaakt. Met behulp van spanningsbemaling wordt de ontgraving uitgevoerd. Zakbaken worden geïnstalleerd en met behulp van een 3D terrestrische laserscanner wordt deformatie gemeten. De stijghoogte wordt langzaam tot de natuurlijke stijghoogte gebracht. Opbarsten zal wel of niet optreden. Wanneer dit niet gebeurt wordt verder ontgraven en de proef wordt herhaald totdat opbarsten optreedt. Spanningsbemaling wordt na opbarsten wederom toegepast, waardoor het dichten van de ontstane wel mogelijk wordt. Dit wordt gedaan door een cement-bentoniet mengsel te injecteren. Uit de verkregen waarden uit de

veldproef wordt de vergelijking gelegd tussen resultaten de veldproef en berekende waarden. Ten slotte worden conclusies getrokken en een adviesrapport opgesteld.

Een beschrijving van het protocol van beide proeven staat beschreven in bijlage 8 en bijlage 9.

Kan het opbarstrisico, behorende bij de resultaten van de uitgevoerde schaalproef, worden berekend via verschillende methoden, en welke conclusies kunnen daaruit worden getrokken?

Ja, uit de resultaten van de uitgevoerde schaalproeven blijkt dat het Hardening Soil model in Plaxis 2D het meest geschikt is om een voorspelling te doen over de kritieke stijghoogte. De resultaten uit deze berekeningen in Plaxis komen het best overeen met de kritieke stijghoogte die uit de proef is bepaald. Hieruit wordt geconcludeerd dat Plaxis 2D bij het analyseren van een praktijksituatie ook het meest nauwkeurig zal zijn. Omdat rekenmodellen nooit 100% betrouwbare gegevens opleveren is het aan te raden om naast de berekeningen een veldproef ter bepaling van het opbarstrisico uit te voeren, zie paragraaf 5.5.

Het antwoord op de hoofdvraag ***“Op welke wijze kan het opbarstrisico worden benaderd, zodanig dat deze beter aansluit bij de werkelijke situatie dan de voorgeschreven methode?”*** luidt als volgt:

Om het werkelijke opbarstrisico zo nauwkeurig mogelijk te benaderen, wordt gebruik gemaakt van berekeningen in het Hardening Soil model in Plaxis 2D. Hiervoor dienen invloed hebbende parameters nauwkeurig bepaald te zijn. Als aanvulling op de berekening van het opbarstrisico wordt aangeraden om een veldproef opbarsten uit te voeren.

6.2 Discussie

De volgende discussiepunten zijn beschreven met betrekking tot het onderzoek.

- De schaalproeven kennen nog enkele kanttekeningen die invloed hebben op de resultaten zoals wandlekkage, de relatief kleine diameter en de gebruikte materialen;
- Het onderzoek levert weinig kennis op over risico van welvorming op opbarsten;
- De berekeningen in Plaxis 2D (HS-model) blijken het meest geschikt ter bepaling van de kritieke stijghoogte, toch kent ook deze methode veel onnauwkeurigheden;
- De kans dat overheden besluiten tot Plaxis 2D risicobeoordelingen over gaan is erg klein gezien de conservatieve, veilige benadering van de geaccepteerde NEN 9997-1 methode;
- Het langetermijneffect van ontgravingen (negatieve wateroverspanning) is niet voldoende onderzocht;

6.3 Aanbevelingen

Op basis van de genoemde discussiepunten zijn de volgende aanbevelingen gedaan.

- Om overheden die te maken hebben met opbarstproblematiek te overtuigen om gebruik te maken van meer nauwkeurige methoden dan de NEN 9997-1, is meer onderzoek benodigd;
- Een schaalproef met een grotere diameter dient ontwikkeld te worden. Daarbij dienen overige kanttekeningen met betrekking tot de schaalproef in acht genomen te worden;
- Aanbevolen wordt om meerdere schaalproeven met variatie in onder meer materiaal, laagdikte en vochtgehalte uit te voeren. Resultaten worden wederom vergeleken met predictieberekeningen in Plaxis 2D;
- Veld- en schaalproeven naar opbarsten leveren het meest bruikbare informatie op wanneer deze daadwerkelijk tot het punt van opbarsten zijn uitgevoerd. Op basis van deze gegevens zijn betrouwbare uitspraken te doen over het werkelijke opbarstrisico;
- Negatieve wateroverspanning dient onderzocht en getoetst te worden. Wanneer een tijdsbepaling aan dit proces kan worden gekoppeld is het wellicht mogelijk om de negatieve wateroverspanning te gebruiken als extra stabiliserende factor bij kort openstaande ontgravingen. Daarbij is het van belang om de opbarstveiligheid in de eindsituatie nauwkeurig te kunnen berekenen.

7. BIBLIOGRAFIE

- A.G. Jongmans, M.W. van den Berg. (2013). *Landschappen van Nederland*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- De Jongh, I. J. (2004). *3D opbarstmodel toont kansen voor werken in den droge*. Nieuwegein: Infra Consult+Engineering.
- Duinen, A. v. (2017). *Ongedraineerde schuifsterkte bij toetsspoor macrostabiliteit in WTI 2017*. Delft: Deltares.
- Fugro NL Land B.V. (2009). *WATERBERGING WETHOUDER SCHOUTENWEG TE CULEMBORG*. Arnhem: Fugro Ingenieursbureau.
- Helpdeskwater. (2017). *waterveiligheid*. Opgehaald van Helpdeskwater: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-wbi/>
- Keijzer, R., & De Jong, G. (2018, Maart 13). Interview Waterschap Hollandse Delta. (R. Hetem, & P. Kleijn, Interviewers)
- KNMI. (2014, juli 5). *Scenario's Samegevat*. Opgehaald van Klimaatscenario's : http://www.klimaatscenario's.nl/scenarios_samengevat/index.html
- KNMI. (2018, Maart 30). *KNMI*. Opgehaald van KNMI: <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/monv/reeksen>
- Lenntech. (2009, oktober 30). *Grondwater eigenschappen*. Opgehaald van Lenntech: <https://www.lenntech.nl/grondwater/eigenschappen.htm>
- Milieu- en Natuurplanbureau. (2007, Oktober). *Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding*. Opgehaald van Docplayer: <http://docplayer.nl/63159359-Gevolgen-van-grote-zeespiegelstijging-op-de-nederlandse-zoetwaterhuishouding.html>
- NEN 9997-1. (2011, December). *NEN 9997-1. Normcomissie Geotechniek*. Delft, Zuid Holland, Nederland: Nederlands Normalisatie Instituut.
- Oldhoff, R. (2013). *Meetkwantiteit versus toetsingskwaliteit*. Deventer: BZ Innovatiemanagement BV.
- Plaxis . (2018). *Plaxis 2D manual 2018*. Plaxis.
- Putranto, B. A. (2014). *Analysis of the safety factor for the vertical stability of a building pit*. Groningen: Hanzehogeschool.
- Rijkswaterstaat. (2012). *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Lelystad: RWS Waterdienst.
- Rijkswaterstaat. (2018, maart 30). *RWS*. Opgehaald van Waterinfo: <https://waterinfo.rws.nl/#!/nav/bulkdownload/periode-selectie/>
- RVDE. (2012). *Kwel en geohydrologie*. RVDE.
- STOWA. (2014, juni 24). *Klimaatverandering*. Opgehaald van Veenweidegebieden: <http://www.veenweidegebieden-oras.nl/Upload/Klimaatverandering.pdf>
- Stowa. (2017, september 1). *Templates*. Opgehaald van Deltaproof Stowa: <http://deltaproof.stowa.nl/Templates/pdf.aspx?rId=21>
- Van Appeldoorn, M. (2018, Maart 22). Interview Hoogheemraadschap Schieland en de Krimpenerwaard. (R. e. Peter, Interviewer)
- Van de Lockant, A. (2018, maart 7). Interview Hoogheemraadschap Rijnland. (R. e. Peter, Interviewer)
- Van Leeuwen, R. (2008). *Een studie naar een ontwerpmethodiek voor bouwputvernageling*. Amsterdam.
- VGHM. (2016). *Projecten*. Opgehaald van Van Harlingen Grondwater Management B.V.: https://vhgm.nl/avada_portfolio/opbarstberekening-bouwkuip-diemen/
- Waterschap Rivierenland. (2018). *Mysterie wel (!) opgelost. Site Waterschap Rivierenland*, 1.
- Wudtke, R.-B. (2008). *Failure Mechanisms of Hydraulic Heave at Excavations*. Gyor: Bauhaus-University Weimar, Department Geotechnical Engineering, Germany.

BIJLAGEN

- Bijlage 0 – Reflectie
- Bijlage 1 – Plan van Aanpak
- Bijlage 2 – Begrippenlijst
- Bijlage 3 – Invloed klimaatverandering op opbarstrisico
- Bijlage 4 – Opbarstproeven
- Bijlage 5 – Project Groote Haar Gorinchem
- Bijlage 6 – Plaxis 2D analyse
- Bijlage 7 – Interviews externe partijen
- Bijlage 8 – Schaalproef opbarsten
- Bijlage 9 – Veldproef opbarsten