



KOOP
WATERMANAGEMENT



Verantwoording



Titel De meerwaarde van een frequentiegestuurde bemaling met behulp van niveaumeting

Subtitel Onderzoeksrapport

Versie Definitief

Datum 13 juni 2014

Auteurs M.K.V van der Veen
B. Spikker

E-mail adres maikvanderveen@gmail.com
bartspikker@hotmail.com

Contact Koop Bronbemaling B.V
Brüsseler Straße 24
48455 Bad Bentheim / Gildehaus -Duitsland

Voorwoord

Dit onderzoeksrapport is het resultaat van ons onderzoek naar de duurzaamheid en kosten van een frequentiegestuurde bemaling. Dit als onderdeel van ons afstuderen aan de opleiding Land en Watermanagement aan Hogeschool Van Hall-Larenstein te Velp. Dit afstudeerrapport dient als onderbouwing voor de beslistool die gedurende dit onderzoek is ontworpen. Met deze tool kan relatief snel en eenvoudig berekend worden welke kosten en baten een frequentiegestuurde bemaling met zich meebrengen per project.

Onder begeleiding en in opdracht van Koop Bronbemalingen B.V. hebben wij dit onderzoek met veel plezier uitgevoerd en hebben wij veel geleerd over de verschillende bronbemalingsmethoden- en technieken.

Via dit voorwoord willen wij alle mensen hartelijk bedanken die ons hebben geholpen bij de totstandkoming van deze rapportage. In het bijzonder willen wij Thijs Bosch bedanken voor zijn goede begeleiding, verstrekken van data en goede feedback op onze werkwijze. Verder willen wij Ad Bot en Peter van der Meer bedanken voor hun begeleiding en feedback op het rapport en onderzoekstechnieken, vanuit Hogeschool Van Hall-Larenstein. Tevens willen wij Roel Brugman bedanken voor zijn kennis bijdrage op het gebied van geohydrologie en onderzoekstechnieken.

Tot slot willen wij Casper Hoiting van de Nederlandse Gasunie N.V. bedanken voor de ondersteuning en enthousiasme in dit onderzoek.

Wij hopen met dit rapport een bijdrage te hebben geleverd ten aanzien van de verduurzaming van bemalingsprocessen.

Maik van der Veen
Gildehaus, 13 juni 2014

Bart Spikker
Gildehaus, 13 juni 2014

Samenvatting

In het kader van duurzaamheid zijn verschillende bemalingsmethoden ontwikkeld die het bemalingsproces optimaliseren. Eén van deze methoden is een frequentiegestuurde bemaling met behulp van niveaumeting. Hiermee kunnen tijdens een bemaling verschillende grondwaterstandverlagingen gehanteerd worden die alvorens de start van de bemaling, ingevoerd dienen te worden. Hierdoor wordt niet meer grondwater onttrokken dan noodzakelijk. Dit geeft een positief effect op de mogelijke risico's die gepaard gaan met een bemaling. Daarnaast zal in veel situaties een besparing optreden in energie. Omdat Koop Bronbemaling geen compleet beeld heeft betreft de mate van verduurzaming en de kostenefficiëntie van een frequentiegestuurde bemaling, is dit onderzoek uitgevoerd. Uit dit onderzoek blijkt dat de mate waarin een frequentiegestuurde bemaling het waterbezwaar en de reikwijdte reduceert, afhangt van de projectgebonden gegevens en de hydrologische eigenschappen van de bodem. Door een analytisch model te ontwikkelen is het mogelijk gemaakt om per project het waterbezwaar, reikwijdte en energieverbruik te berekenen. Voor een gemiddelde situatie, die gebruikt is in dit onderzoek als voorbeeld simulatie, komt de reductie op het waterbezwaar neer op 4%. Reductie op de reikwijdte bedraagt 5.2% en op energieverbruik 25%. Met deze waarden, die toch gering lijken, is het inzetten van een frequentiegestuurde bemaling een duurzame én kostenefficiënte methode. Om een compleet overzicht te krijgen, waarin tevens de kosten per bemalingsmethode worden uitgerekend, is een geautomatiseerd kostenoverzicht aan het analytische model toegevoegd. Het analytisch model en het kosten overzicht vormen samen een beslistool. Hiermee wordt de mate van verduurzaming en kostenefficiëntie weergegeven van zowel een traditionele als frequentiegestuurde bemaling. Hieruit blijkt dat het toepassen van een frequentiegestuurde bemaling extra installatie- en huur kosten met zich meebrengt en niet altijd een besparing geeft op het energieverbruik. Frequentiegestuurde bemaling geeft echter in elke situatie een reductie op het waterbezwaar, de mate is afhankelijk van verschillende factoren. De tijdsduur van een project en de verhouding tussen de kostenreducerende en kostenverhogende factoren bepalen het verschil in de totale kosten. Het verschil is veelal dusdanig klein dat per project een afweging gemaakt dient te worden met betrekking op de duurzaamheid en kostenefficiëntie. Om de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid te toetsen, is het analytisch model getoetst aan een numeriek model en een proefopstelling. Uit het numeriek model (ModFlow) blijkt dat de verlaging grotendeels overeenkomt, de reikwijdte blijft hierbij achter. De reikwijdte in het numerieke model is acht meter groter dan het analytische model. Daarnaast is aan de hand van een proefopstelling het berekende waterbezwaar en de reactietijden getoetst. Gedurende de proef is gebleken dat, vergeleken met het analytisch model, de reactietijden van het grondwater in de bodem voor zowel opkomen als onttrekken sneller reageert. Verder komt het waterbezwaar (circa 60 m³), behorend bij de maximale verlaging en berekend met het model, overeen met het berekende waterbezwaar gedurende de proefopstelling. Het behalen van de minimale grondwaterstandverlaging is behaald met een lager pompdebiet dan berekend in het analytisch model.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting.....	4
Begrippen	7
Inleiding	8
1.1 Aanleiding.....	8
1.2 Probleemstelling.....	8
1.3 Doelstelling.....	9
1.4 Afbakening.....	9
1.5 Werkwijze	9
1.6 Doelgroep	10
2. Frequentiegestuurd bemalen.....	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Methode	11
2.3 Grondwatermonitoring	13
2.4 Deelconclusie.....	13
3. Wettelijke kaders en richtlijnen	14
3.1 Inleiding	14
3.2 Wetgeving.....	14
3.3 Richtlijnen en protocollen	16
3.4 Deelconclusie.....	17
4. Analytisch model	18
4.1 Inleiding	18
4.2 Invoergegevens model	18
4.3 Reactietijd verlagen grondwaterstand.....	20
4.4 Reactietijd opkomen grondwaterstand	23
4.5 Waterbezwaar	25
4.6 Reikwijdte	28
4.7 Reductie energieverbruik	29
4.8 Stuurbuis.....	31
4.1 Deelconclusie.....	32
5 Beslistool	33

5.1	Inleiding	33
5.2	Financiële factoren	33
4.9	Weergave beslistool	35
4.10	Deelconclusie.....	36
6	Toetsing analytisch model.....	37
6.1	Inleiding	37
6.2	Numeriek model.....	37
6.3	Proefopstelling	40
6.4	Deelconclusie.....	49
7	Conclusie	50
7.1	Conclusie	50
7.2	Aanbevelingen.....	52
8	Discussie	53
	Bronvermelding.....	54
	Bijlage 1	55

Begrippen

Traditionele bemaling	Methode van bemalen waarbij een vaste verlaging wordt vastgesteld.
Niveaugestuurde bemaling	Methode van bemalen waarbij het pompdebiet gestuurd wordt door middel van het monitoren van de grondwaterstand.
Frequentiegestuurde bemaling	Methode van bemalen waarbij het pompdebiet gestuurd wordt door een frequentieregelaar. Deze kan het vermogen van een elektrisch aangedreven pomp regelen.
Waterbezwaar	Debiet van de grondwateronttrekking
Frequentieregelaar	Een frequentieregelaar is een elektronische schakeling die in staat is de frequentie van een aangeboden signaal te veranderen terwijl de spanning mee varieert en het koppel behouden blijft.
Frequentie-unit	Een unit waarin alle benodigdheden zijn ingebouwd om pompen frequentiegestuurd te kunnen laten lopen.
Stuurbuis	De peilbuis waarmee, aan de hand van de stijghoogtemeting, het pompdebiet wordt in- bijgesteld.
Volkomen bemaling	Bemaling waarbij de filters of bronnen tot aan de hydrologische basis komen.
Onvolkomen bemaling	Bemaling waarbij de filters niet tot aan de hydrologische basis komen.
Stationaire situatie	Een situatie waarin de geohydrologische factoren constant zijn.
Niet stationaire situatie	Een situatie waarin de geohydrologische factoren veranderen in de tijd.
BRL	Beoordelingsrichtlijn
SIKB	Stichting Infrastructuur Kwaliteitsboring Bodembeheer
EMVI	Aanbestedingsvorm (Economisch Meest Voordelige Inschrijving)

Inleiding

1.1 Aanleiding

Het toepassen van innovatieve bemalingsmethoden kan leiden tot een duurzame en kostenefficiënte bemaling. Door te reduceren op energieverbruik en waterbezwaar en de hieraan gekoppelde reikwijdte van het invloedsgebied, kan hieraan voldaan worden. Op het gebied van kostenefficiëntie is het hierdoor mogelijk te besparen op zowel lozingskosten als energiekosten. Door onderzoek te doen naar het toepassen van energie reducerende methoden is het mogelijk projecten gegund te krijgen wanneer deze volgens de EMVI methode worden aanbesteed. Hierin is het reduceren van actief CO² bepalend.

Voor het reduceren van het waterbezwaar zijn diverse bemalingsmethoden ontwikkeld. Eén van deze methoden is het frequentiegestuurd bemalen met behulp van niveaumeting. Hierbij wordt, met behulp van een frequentieregelaar, de snelheid van een elektrisch aangedreven pomp gestuurd. Door de frequentieregelaar te koppelen aan een automatische niveaumeting en een computer wordt het sturen van de tijdelijke bemaling geautomatiseerd. Dit heeft als gevolg dat gedurende de verschillende dagdelen de grondwaterstand niet meer verlaagd wordt dan noodzakelijk.

Door niet meer grondwater te onttrekken dan nodig is kunnen tevens mogelijke risico's beperkt blijven zoals:

- Verdroging in de omgeving
- Zetting van de bodem
- Verplaatsing en verspreiding van bodemverontreinigingen

1.2 Probleemstelling

Het inzetten van een frequentiegestuurde bemaling brengt extra startkosten met zich mee. Dit zijn voornamelijk bijkomende installatie- en huurkosten. Binnen Koop Bronbemaling is echter niet inzichtelijk wat de exacte kosten zijn die gepaard gaan met een frequentiegestuurde bemaling. Verder dient meer inzicht verkregen te worden in de mate waarin bespaard wordt op energieverbruik. Daarom is het voor Koop Bronbemaling van belang dat per project berekend kan worden in welke mate er winst behaald wordt op duurzaamheid en wat dit betekent voor de kostenefficiëntie. Door een beslistool te ontwikkelen wordt hierin inzicht verkregen en kan een onderbouwde besluitvorming plaatsvinden.

De beslistool wordt ontwikkeld aan de hand van de volgende hoofdvraag:

In welke mate reduceert een frequentiegestuurde bemaling het waterbezwaar, de reikwijdte en energieverbruik van een tijdelijke bemaling en op welke wijze kan dit per project berekend worden in een beslistool waarin ook de kosten worden meegenomen?

Om antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag zijn de volgende deelvragen beantwoord:

1. Waardoor ontstaat het verschil in waterbezwaar tussen frequentiegestuurd- en traditioneel bemalen en waar is een goede werking van een frequentiesturing van afhankelijk?
2. Welke invloed heeft de wetgeving en richtlijnen op het keuzeproces van tijdelijke bemalingen en de monitoring?
3. In welke mate nemen het waterbezwaar en reikwijdte af, wanneer een frequentiegestuurde bemaling wordt toegepast in plaats van een traditionele bemaling?
4. In welke mate nemen de kosten toe of af, wanneer een frequentiegestuurde bemaling wordt toegepast in plaats van een traditionele bemaling?
5. Komen het waterbezwaar en reikwijdte uit de beslistool overeen met de resultaten uit een numeriek model en proefopstelling?

1.3 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is het ontwikkelen van een beslistool waarmee Koop Bronbemaling per project kan berekenen wat de effecten van frequentiegestuurd bemalen zijn op het waterbezwaar, de reikwijdte en energieverbruik en kosten (efficiëntie). Met deze tool is het mogelijk om opdrachtgevers inzicht te geven in de eventuele voordelen die gepaard gaan met het toepassen van een frequentiegestuurde bemaling. Hierdoor kan draagvlak gecreëerd worden voor het toepassen van de meest optimale bemalingsmethode voor elk afzonderlijk project.

1.4 Afbakening

Het sturen van de grondwaterstandverlaging is alleen mogelijk bij een freatische bemaling. Hierdoor richt dit onderzoek zich niet op semi-gespannen en gespannen bemalingen. Verder is niet ingegaan op projecten waarbij een van de methoden, frequentiegestuurde of traditionele bemaling, niet voldoet aan het programma van eisen van het betreffende project.

1.5 Werkwijze

Desktopstudie

Aan de hand van een desktopstudie is onderzocht onder welke omstandigheden tijdelijke bemalingen worden uitgevoerd. Hierbij is enkel onderzoek gedaan naar freatische bemalingen. De kostenbepalende factoren zijn geïnventariseerd door middel van desktopstudie. Verder zijn hier ook de criteria voor de model- en proefopstelling keuze mee opgesteld.

Literatuuronderzoek

Voor het opstellen van de beslistool is een literatuuronderzoek uitgevoerd. Hierin is onderzoek gedaan naar methodes die gebruikt kunnen worden voor het analytisch berekenen van de reactietijden van het grondwater in de bodem, het waterbezwaar en het energieverbruik van een elektrisch aangedreven motor. De van toepassing zijnde vergelijkingen zijn gebruikt voor het ontwikkelen van het analytische model dat als basis dient voor de beslistool. Verder is geïnventariseerd of de wettelijke kaders en richtlijnen invloed uitoefenen op het keuzeproces in de te gebruiken bemalingsmethode. Hierin is onderzoek gedaan naar de huidige vigerende wetgevingen en richtlijnen op tijdelijke bemalingen. De aspecten die van invloed zijn op het keuzeproces zijn meegenomen in de beslistool.

Modelleren

Door een analytisch model te ontwikkelen is het mogelijk de effecten van de verschillende methoden per project te berekenen. Deze effecten zijn het waterbezwaar, reactietijden en de reikwijdte. Met behulp van het geohydrologisch modelleer programma ModFlow, is het analytische model getoetst aan een numeriek model. De resultaten van het analytisch model worden gebruikt in de duurzaamheid en kostenefficiëntie.

Proefopstelling

Door gebruik te maken van een proefopstelling is de werking van het frequentiesturen van een elektrisch aangedreven pomp getoetst aan de werkelijkheid. Daarnaast zijn indrukken verkregen van de reactietijd van het grondwater in de bodem

1.6 Doelgroep

Het onderzoeksrapport is geschreven voor en in opdracht van Koop Bronbemaling B.V. Daarnaast dient het onderzoek als afstudeeronderzoek voor het afronden van de opleiding Land en Watermanagement aan Hogeschool Van Hall Larenstein. Hierbij kan het onderzoeksrapport dienen voor educatieve en projectmatige doeleinden. Voor het lezen van het onderzoeksrapport is geohydrologische voorkennis vereist.

2. Frequentiegestuurd bemalen

2.1 Inleiding

Om een representatief en betrouwbaar analytisch model en beslistool te kunnen ontwerpen, is het allereerst van belang om de werkwijze van frequentiegestuurd bemalen te doorgronden. Door onderzoek te doen naar de werking en toepasbaarheid wordt inzicht verkregen in de eisen waaraan het analytisch model en de beslistool dienen te voldoen.

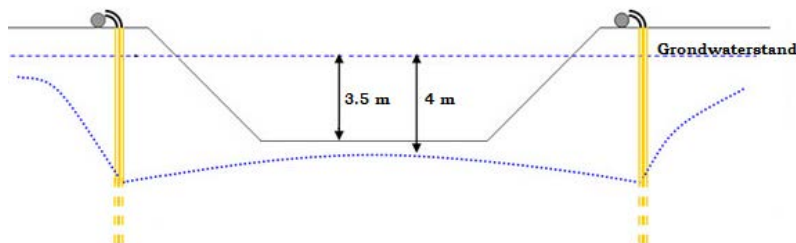
2.2 Methode

Toepassen frequentiegestuurde bemaling

In de praktijk wordt gedurende een traditionele bemaling het onttrekkingsdebiet in sommige gevallen bijgesteld. Dit is echter niet dagelijks maar veelal tijdens een overgang in bouwfase. Dit kan bijvoorbeeld een bouwfase zijn waarin de betonvloer gerealiseerd is in de bouwkuip, of een vakantie, waardoor de minimale grondwaterstand voor een langere periode verhoogd kan worden. Het verschil, tussen een frequentiegestuurde bemaling en traditionele bemaling, zal daardoor gemaakt worden in de sturing van het grondwater dat dagelijks plaatsvindt.

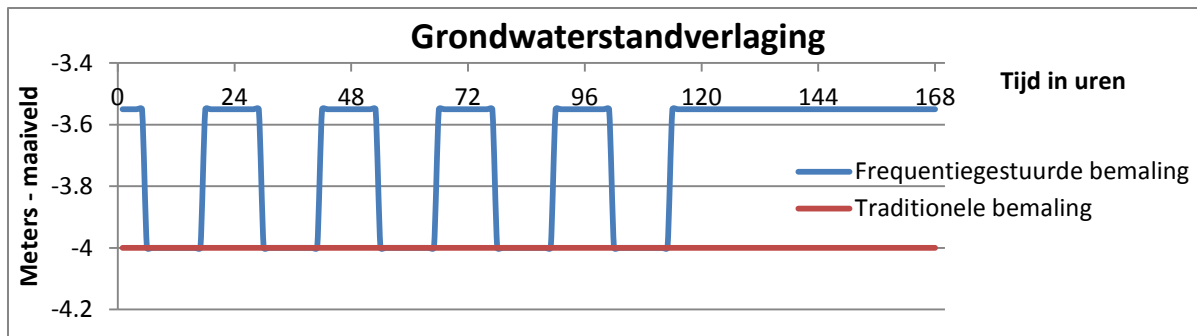
Voorbeeldsituatie

Veelal wordt een grondwaterstandverlaging gehanteerd van minimaal 0.5 m onder de bodem van de bouwkuip tijdens werkzaamheden (zie figuur 2-1). Verder is het een vereiste dat de grondwaterstand niet boven de bodem van de bouwkuip komt. In deze situatie kan met behulp van een frequentiegestuurde bemaling een grondwaterstandverlaging van 3.55 m (0.05 m veiligheid) gehanteerd worden, wanneer er geen werkzaamheden plaatsvinden in de bouwkuip.



Figuur 2-1. Schematische weergave van traditionele bronbemaling.

Grafiek 2-1 geeft een schematische weergave weer van een “werkweek”, waarin de verlagingen zijn weergegeven van frequentiegestuurd en traditioneel bemalen. De minimale verlaging die gehanteerd wordt tijdens werkzaamheden is in deze situatie vier meter. Gedurende de uren dat er geen werkzaamheden plaatsvinden in de bouwkuip voldoet een verlaging van 3.55 meter. Een frequentiegestuurde bemaling (blauwe lijn) speelt hierop in en past het onttrekkingsdebiet aan. Een traditionele bemaling (rode lijn) houdt een constante verlaging aan.



Grafiek 2-1. Effect frequentiegestuurde bemalen op grondwaterstand.

Het verschil in waterbezwaar tussen de twee methoden wordt gegenereerd doordat, wanneer mogelijk, het grondwater minder wordt verlaagd. Zoals weergegeven in figuur 2-2 is de reductie op het waterbezwaar gedeeltelijk afhankelijk van de reactiesnelheid van de grondwaterstand en de hoogte waarmee gefluctueerd kan worden.

Bijkomende voordelen

Naast de reductie op het waterbezwaar en reikwijdte, zijn er een tweetal bijkomende voordelen. Een bijkomend voordeel van frequentiegestuurd bemalen is dat de startstroom van een bemalingsinstallatie wordt opgevangen door de frequentieregelaar. Wanneer een elektrisch aangedreven pomp direct wordt aangesloten op de energiebron, zal het zo snel mogelijk het maximaal vermogen gaan leveren. Door dit plotselinge opstarten kan een pomp zeven keer zijn normale vermogen vragen aan de energie bron die kortstondig vijf keer zijn eigen vermogen kan leveren. Dit betekent dat de energiebron een overcapaciteit dient te hebben ten opzichte van de gemiddelde vraag naar vermogen om te voorkomen dat het uitslaat. De frequentieregelaars vangen deze piek in de start op doordat het niet direct naar het maximale vermogen gaat maar dit geleidelijk aan opbouwt.

Tevens is het met frequentiegestuurd bemalen mogelijk de overcapaciteit van een installatie, weg te nemen. Deze overcapaciteit wordt gecreëerd om aan extremen en ingebouwde veiligheden te kunnen voldoen. Bij een traditionele bemaling is hierdoor gedurende het gehele project een te hoge capaciteit aanwezig die meer energie verbruikt. Bij frequentiegestuurd bemalen wordt de overcapaciteit niet gebruikt wanneer dit niet nodig is. Hierdoor wordt niet meer energie verbruikt dan nodig.

Nadelen

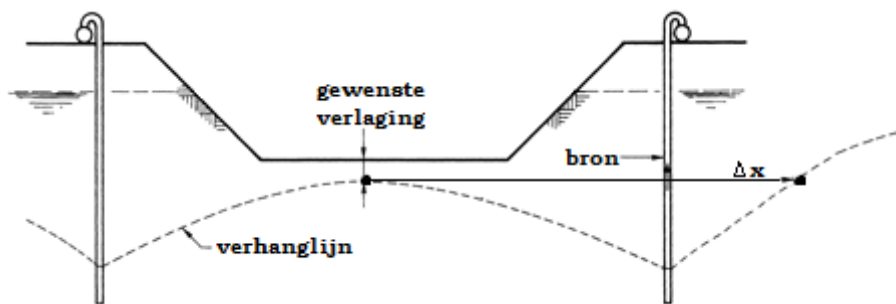
Een adequate monitoring is van groot belang omdat de gemeten stijghoogte in de stuurbuis overgenomen wordt door de frequentieregelaar. In de praktijk blijkt het echter niet altijd mogelijk te zijn om de stuurbuis op de juiste plaats, ten opzichte van de bouwput, te plaatsen. Onnauwkeurige stijghoogtemetingen kunnen leiden tot het overschrijden van de toegestane, minimale grondwaterstandverlaging, met nadelige gevolgen van dien. Hier wordt mee bedoeld het inzakken of opbreken van de bouwput of sleuf, de betonvloer kan komen opdrijven of de gewenste stijghoogte is niet snel genoeg weer op peil tijdens de werkzaamheden, met vertraging van de werkzaamheden als gevolg.

2.3 Grondwatermonitoring

Het monitoren van de grondwaterstand bij de bouwkuip en in de omgeving, gedurende een tijdelijke bemaling, is wettelijk verplicht. Naast de wettelijke verplichting dient de bemaling tevens de gewenste grondwaterstandverlaging te kunnen garanderen. Met behulp van peilbuizen op verschillende afstanden van de bouwkuip wordt inzicht verkregen van de grondwaterstandverlaging onder de bouwkuip en in de directe omgeving. De locaties van de peilbuizen zijn bepalend voor de betrouwbaarheid en juiste weergave van de grondwaterstandverlaging. De locaties van de peilbuizen verschilt per bemaling en wordt vastgelegd in het bemalingsplan.

Stuurbuis

Tijdens een frequentiegestuurde bemaling wordt gebruik gemaakt van een stuurbuis, dit is een peilbuis waaraan de grondwaterstand onder de bouwkuip wordt gerefereerd. Vervolgens wordt de capaciteit van de pomp gestuurd totdat de gewenste grondwaterverlaging is gerealiseerd. Door de stuurbuis in het midden van de bouwkuip te plaatsen kan de benodigde grondwaterstandverlaging nauwkeurig worden gemeten. In de meeste situaties is het echter praktisch niet haalbaar om een stuurbuis in de bouwkuip te plaatsen. Hierdoor is het van belang dat de grondwaterstand in het midden van de bouwkuip, buiten de bouwkuip gemeten wordt. Doordat er een onttrekkingskegel ontstaat tijdens een bemaling is dit mogelijk zoals weergegeven in figuur 2-3.



Figuur 2-2. Situatieschets locatie stuurbuis.

Peilbuizen

Gedurende een tijdelijke bemaling dient de grondwaterstandverlaging en reikwijdte inzichtelijk gemaakt te worden. Dit wordt veelal gedaan met peilbuizen. Aan de hand van een monitoringsplan worden de locaties hiervan bepaald, zodat alvorens de start van de bemaling het grondwater gemeten kan worden.

2.4 Deelconclusie

Door met een analytisch model de duur van een bemaling met hierin de weekcycli verwerkt, door te rekenen voor beide bemalingsmethoden, wordt een representatief beeld geschetst van de praktijk. Hierin wordt de bemaling doorgerekend met een verlaging van minimaal een halve meter onder de bouwkuip, tijdens werktijden. Buiten de werktijden (avond, nacht en weekend) wordt een minimale grondwaterstand gerealiseerd tot vijf centimeter onder de bouwkuip. Verder kan door het toepassen van een frequentiegestuurde bemaling bespaard worden op huur- en energiekosten die gekoppeld zijn aan een aggregaat. Tot slot is het mogelijk om de overcapaciteit van pompen weg te nemen. Hierdoor treedt extra reductie op het energieverbruik.

3. Wettelijke kaders en richtlijnen

3.1 Inleiding

Wettelijke verplichtingen en richtlijnen kunnen kosten en projectgebonden beperkingen met zich mee brengen. In dit hoofdstuk is onderzoek gedaan naar de invloed van de wettelijke kaders en richtlijnen op het keuzeproces van een tijdelijke bemaling en monitoring. Door inzicht te verkrijgen in de verschillende wettelijke verplichtingen en fungerende richtlijnen is onderzocht wat de invloed is op duurzaamheid en kosten en in welke vorm.

3.2 Wetgeving

Waterwet

De Waterwet, in werking getreden op 22 december 2009, regelt het beheer van oppervlaktewater en grondwater. Daarbij houdt de wet rekening met de samenhang tussen waterbeleid en ruimtelijke ordening. Tijdelijke bemalingen vallen onder het grondwaterbeheer vastgelegd in de Waterwet. Een vergunning aanvraag aangaande deze wet kan kosten met zich meebrengen. Deze kosten kunnen verschillen per waterbeheerder. Daarnaast is in de Waterwet aangegeven welke instantie bevoegd gezag heeft gedurende de bemaling. Hieronder zijn de verschillende instanties uitgewerkt.

Rijkswaterstaat

Grondwateronttrekkingen in een gebied waar Rijkswaterstaat het waterkwantiteitsbeheer uitvoert, vallen onder bevoegdheid van Rijkswaterstaat. Voor het uitvoeren van een bronbemaling of proefbemaling in één van deze gebieden, geldt een vergunning- of meldplicht. De meldplicht volstaat wanneer de hoeveelheid te onttrekken grondwater minder dan 100 m³/uur bedraagt en in totaal niet meer bedraagt dan 100.000 m³/30 dagen (artikel 6.3a lid 1 Waterregeling, opgenomen in huidige Waterwet).

Waterschappen

Tijdelijke bemalingen ten behoeve van bouwen in het droge en saneringen, vallen onder de bevoegdheid van een waterschap. Voor tijdelijke bemalingen geldt (vrijwel) altijd een vergunning- of meldplicht. Verplicht is, voorgaand aan een grondwateronttrekking of infiltratie, contact op te nemen met het desbetreffende waterschap. In het Keur van het desbetreffende waterschap is opgenomen wanneer een vergunningplicht of meldplicht geldt. De Keur is later dit hoofdstuk beschreven, in paragraaf Keur Waterschap.

De algemene regeling voor het meten aan grondwateronttrekkingen en infiltraties zijn opgenomen in artikel 6.11 van het Waterbesluit (opgenomen in huidige Waterwet). Deze regeling geldt voor zowel vergunningplichtige als vergunningvrije onttrekkingen. De vereiste metingen zijn verplicht voor degene die het grondwater onttrekt of infiltreert. Hierbij gaat het om metingen die de hoeveelheid van het onttrokken of geïnfiltreerde grondwater weergeven. Bij infiltratie dient tevens de waterkwaliteit gemeten te worden. De meetperioden zijn voorgeschreven door het bevoegd gezag in de vergunning of maatwerkvoorschrift, indien een vergunning niet vereist is. Zijn er geen meetperioden voorgeschreven dan dienen de metingen elk kwartaal verricht te worden. De meetgegevens dienen gerapporteerd en verstuurd te worden naar het bevoegd gezag, binnen een maand, na beëindiging van de onttrekking of infiltratie.

Keur waterschap

Aan de hand van het model Keur, opgesteld door de Unie van Waterschappen, heeft elk waterschap haar eigen Keur opgesteld. Binnen deze Keur zijn eigen eisen vastgesteld, aanvullend op de Waterwet. Hierdoor verschillen de criteria voor vergunning- en meldplicht per waterschap. De grenzen van deze criteria worden uitgedrukt in m³/uur, m³/maand, waterbezwaar of maximale pompcapaciteit.

Wet Milieubeheer en Wet Bodembescherming

De Wet Milieubeheer (Mb) legt in grote lijnen vast welke wettelijke instrumenten er zijn om het milieu te beschermen en welke uitgangspunten daarvoor gelden. De Wet Bodembescherming (Wbb) stelt regels om de bodem te beschermen. Lozingen in of op de bodem kunnen op grond van de Wbb worden gereguleerd. Deze besluiten zijn vast gelegd in het "Besluit lozen buiten inrichtingen en Activiteit besluit.

Besluit Lozen Buiten Inrichtingen en Activiteit besluit

Het besluit; Lozen buiten inrichtingen geldt tijdens het lozen van grondwater in de openbare ruimte. Het Activiteit besluit is van kracht tijdens het lozen in inrichtingen waarop de wet Mb van toepassing is.

Lozing		Verplichting	Regelgeving
Bouwputbemaling bij inrichtingen.	Lozing op oppervlaktewater en op riolering	Melding	Activiteiten besluit
	Lozing in bodem	Geen	
Bouwputbemaling in de openbare ruimte; sleufbemaling	Lozing op oppervlaktewater en op riolering	Melding	Besluit lozen buiten inrichtingen
	Lozing in bodem	Geen	

Tabel 3-1. Overzicht wet en regelgeving die van toepassing zijn

Wanneer het niet mogelijk is het onttrokken grondwater te lozen in de bodem, oppervlakte water of hemelwaterriool, kan het geloosd worden in de vuilwaterriolering. In dit geval is de gemeente het bevoegd gezag tenzij de provincie bevoegd is (deze is bevoegd bij een onttrekking dieper dan tien meter of als de lozing plaatsvindt binnen een inrichting die onder bevoegdheid van de provincie valt). Deze lozingen dienen worden gemeld en in sommige gevallen betekent dit dat er een aansluitvergunning dient aan te worden gevraagd. Voor lozingen in een rioolstelsel worden veelal heffingskosten in rekening gebracht. De hoogte hiervan verschilt per gemeente en is mede afhankelijk van de kwaliteit en kwantiteit van het te lozen onttrokken grondwater (gemeentewet). Wanneer de gemeente verwacht dat de lozing voor problemen kan zorgen, kan om een maatwerkvoorstel worden gevraagd. Hierin dienen maatregelen opgenomen te worden die de bescherming van het milieu waarborgen.

3.3 Richtlijnen en protocollen

Er zijn diverse regelgevingen die van toepassing zijn op tijdelijke bemalen. Recent is een nieuwe richtlijn opgesteld die de kwaliteit bewaakt van het totale bemalingsproces. Dit is de BRL SIKB 12000, tijdelijke grondwaterbemaling. Deze richtlijn die (nog) niet wettelijk verplicht is, ligt ter goedkeuring bij de Raad van Accreditatie. De richtlijn is echter wel actueel omdat verschillende opdrachtgevers volgens deze normen opdrachten willen gaan verstrekken. In deze richtlijn staat beschreven waaraan een tijdelijke bemaling dient te voldoen, van de voorbereiding tot de nazorg, van het bemalingstraject.

BRL SIKB 12000

Het doel van de BRL SIKB 12000 is het bewaken van de kwaliteit gedurende het bemalingstraject, van voorbereiding tot nazorg. Binnen de richtlijn is het bemalingproces opgedeeld in verschillende fasen. Voor elke fase is een protocol opgeteld binnen deze richtlijn. Het accent van deze protocollen ligt op het verkleinen van de kans op mogelijke schade en tegengaan van ongewenste effecten tijdens een tijdelijke bemaling. De verschillende protocollen zijn hieronder weergegeven:

12010 Voorbereiding melding / vergunning

Protocol 12010 beschrijft het proces om te komen tot een meldings- vergunning onderbouwende rapportage (bemalingsadvies). Dit ten behoeve van een melding respectievelijk een vergunningsaanvraag voor een tijdelijke bemaling inclusief de bijbehorende lozingen. Deze melding of vergunningsaanvraag dient te worden aangevraagd door het bedrijf of de instelling, dat onder het certificaat van de BRL SIKB 12000 het bemalingsadvies opstelt. [Bron: SIKB]

12020 Voorbereiding technische uitvoering

Protocol 12020 beschrijft het proces om te komen tot een technisch bemalingsplan ten behoeve van een tijdelijke bemaling en lozingen (voorbereiden technische uitvoering). Dit door het bedrijf of de instelling, dat onder het certificaat van de BRL SIKB 12000 het technisch bemalingsplan opstelt. [Bron: SIKB]

12030 Uitvoeren bemaling

Protocol 12030 beschrijft het proces van het uitvoeren van de bemaling (inclusief lozing). Dit betreft het aanleggen, controleren en onderhouden van de bemalingsinstallatie en meetnet tot het beëindigen van de bemaling, door het bedrijf of de instelling, dat onder het certificaat van de BRL SIKB 12000 de bemaling uitvoert. [Bron: SIKB]

12040 Aansturen bemaling

Protocol 12040 beschrijft het proces van aansturen van een tijdelijke grondwateronttrekking en lozingen door het bedrijf of instelling, die onder het certificaat van de BRL SIKB 12000 de bemaling aanstuurt. Het verschil met protocol 12030 is dat het om een coördinerende partij gaat, die niet de uitvoerende partij hoeft te zijn. [Bron: SIKB]

3.4 Deelconclusie

In de onderzochte wettelijke kaders en richtlijnen wordt niet voorgeschreven welk bemalingswijze de voorkeur krijgt. Wel zijn wetgevingen van kracht die het lozen van het onttrokken grondwater aan kosten bind wanneer geloosd wordt op oppervlaktewater of het vuilwaterriool. Deze kosten worden voorgeschreven door ieder afzonderlijk waterschap, gemeente of provincie.

Ook kan de meldings- en vergunningsplicht van invloed zijn op het keuzeprocess van een bemalingstype, omdat deze afhankelijk is van de hoeveelheid te lozen grondwater. Ofwel bij een frequentiegestuurde bemaling kan de meldplicht volstaan terwijl voor het zelfde project, alleen dan met behulp van een traditionele bemaling een vergunning verplicht is.

4. Analytisch model

4.1 Inleiding

Om per project te kunnen afwegen welke bemalingsmethode het meest efficiënt is, dient bekend te zijn wat de verschillen zijn in waterbezwaar, reikwijdte en energieverbruik. In dit hoofdstuk is ingegaan op deze factoren. Voor het berekenen ervan zijn vergelijkingen vereist die het mogelijk maken deze factoren op een analytische wijze te berekenen. De vergelijkingen zijn verwerkt tot een analytisch model. De wijze waarop deze zijn verwerkt wordt beschreven per paragraaf.

4.2 Invoergegevens model

Het model start met een invoerveld. Hierin worden de projectgebonden factoren ingevuld. De waarden die in tabel 4-1 zijn ingevuld worden verder in dit hoofdstuk als simulatievoorbeeld meegenomen.

In te vullen parameters			
Symbol	Beschrijving	Eenheid	Waarde
L	Lengte bouwkuip	m ¹	20
B	Breedte bouwkuip	m ¹	20
k	k-waarde	m/d	10
H	Dikte watervoerend pakket	m ¹	30
Δh	Benodigde verlaging	m ¹	4
	Veiligheid (onderkant bouwkuip tot benodigde verlaging)	m ¹	0.5
μ	Poriënvolume	(-)	0.3
T	Diepte filter t.o.v. grondwaterstand	m ¹	7
T totaal	Totale duur van de bemaling	d	30
Δh_0	Verwachte verlaging rand bouwput	m ¹	6
t	Duur start bemaling tot gewenste diepte	d	1

Tabel 4-1. Weergave van het invoerveld.

Met de ingevoerde parameters rekt het model verschillende waarden uit die benodigd zijn voor het berekenen van de reactietijden en het waterbezwaar. In tabel 4-2 zijn de variabelen weergegeven die het model berekend aan de hand van de parameters uit het invoerveld.

In tabel 4-2 zijn de indicerende waarden weergegeven. De bijbehorende theorie en de verwerking hiervan zijn weergegeven in de paragrafen van dit hoofdstuk.

Berekende variabelen			
Symbool	Beschrijving	Eenheid	Waarde
r	Equivalentente straal	m ¹	11.28
a	Onvolkomenheidsfactor	(-)	0.56
R	Reikwijdte	m ¹	194
Q	Waterbezwaar stationair	m ³ /dag	1379
h	Dikte watervoerend pakket min lengte filter	m ¹	23
u	$\mu * r^2 / 4 * k * H * T_{\text{totaal}}$	(-)	0.00106103
W(u)	Bronfunctie	(-)	6.27
Q	Gemiddeld waterbezwaar niet stationair	m ³ /dag	1602

Tabel 4-2. Weergave van berekende variabelen aan de hand van het invoerveld.

Met de waarden ingevuld in het invoerveld is een equivalentente straal berekend van 11.28 meter, dit is de afstand van de rand, tot het midden van de bouwkuip. De onvolkomenheidsfactor is 0.56 en geeft hiermee de relatie tussen het debiet met volkomen bronnen en het debiet met onvolkomen bronnen. De reikwijdte is 194 meter en hoort bij een verlaging van één meter. Het stationair waterbezwaar bedraagt 1379 m³/dag en wordt berekend met de formule van Dupuit. De afstand tussen de onderkant van de filter of bron is in het simulatie voorbeeld 23 meter. De u, met een waarde van 0.001, is benodigd om de bronfunctie te berekenen. De bronfunctie bedraagt 6,27 en is net als de u en de onvolkomenheidsfactor, dimensieloos. Het gemiddelde waterbezwaar niet stationair is in het simulatievoorbeeld 1602 m³/dag. Dit is een verschil van 223 m³/dag ten opzichte van het stationaire waterbezwaar.

4.3 Reactietijd verlagen grondwaterstand

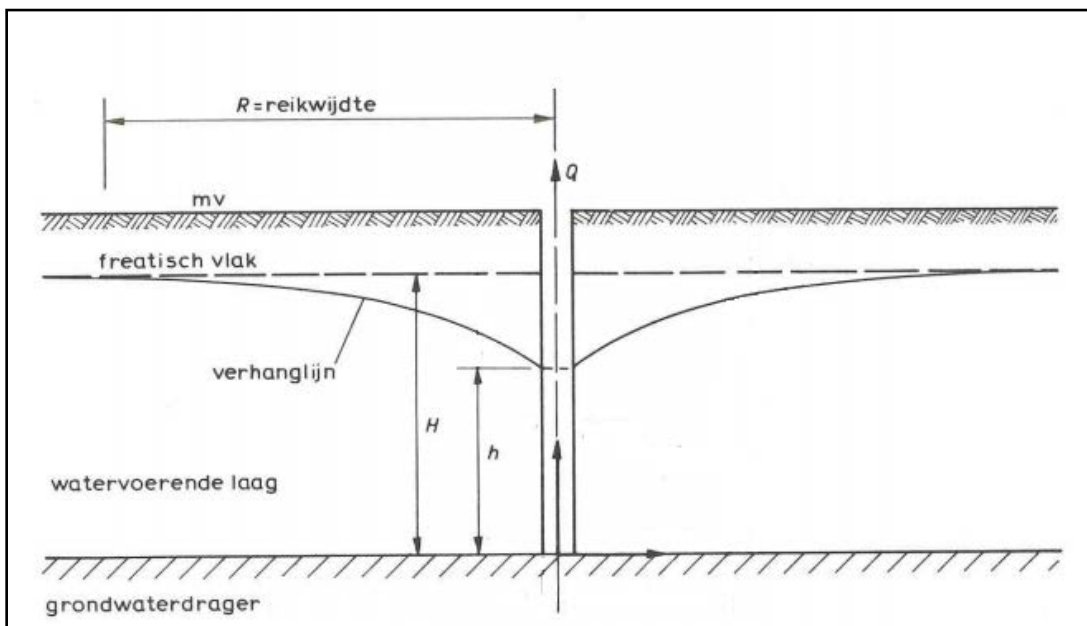
De pomptijd die nodig is voor het behalen van de benodigde verlaging, is benaderd met de vergelijking van het waterbezwaar in niet stationaire situaties

Theorie

De gebruikte vergelijking 4.0 is afgeleid van de Theis-Jacob-Edelman (*SBR-Bemaling van bouwputten, 2003*) vergelijking. Hiermee is het mogelijk de grondwaterstandverlaging als functie van de tijd ($W(u)$) te bepalen. De vergelijking gaat uit van één onttrekkingsbron zoals weergegeven is in figuur 4-1. De vergelijking die gebruikt is voor het verlagen van de grondwaterstand is hieronder weergegeven.

$$\Delta h = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot k \cdot H} \cdot W(u) \quad (4.0)$$

Hierbij is	Q	= Waterbezwaar in niet stationaire situatie	(m ³ /uur)
	k	= Doorlatendheid bodem	(m/uur)
	H	= Dikte watervoerend pakket	(m ¹)
	Δh	= Verlaging op afstand r van hart bouwkuip	(m ¹)
	$W(u)$	= Bronfunctie = $\ln (0.561 / u)$	(-)
	u	= $\frac{\mu \cdot r^2}{4 \cdot k \cdot H \cdot t}$	(-)
	μ	= Fractie meewerkend poriënvolume	(-)
	t	= Pomptijd	(uur)
	r	= Equivalente straal bouwkuip	(m ¹)



Figuur 4-1. Weergave variabelen, vergelijking Theis-Jacob-Edelman (Bron: SBR-Bemaling, 2003)

In het analytisch model is een benadering gebruikt van de bronfunctie weergegeven bij 4.2 (Kruseman en De Ridder, 1994). Deze benadering van de bronfunctie is gebruikt omdat de functie niet eenvoudig te berekenen is en daarom (internationaal) een benadering wordt gebruikt. Vergelijking 4.1 geeft de oorspronkelijke vergelijking weer.

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (4.1)$$

De constante in de bronfunctie 4.2 is bepaald voor een kleine u waarde dus voor een relatief lange bemalingsperiode.

Analytisch model

Doordat een kleine waarde voor de tijd, de u waarde vergroot is het niet altijd mogelijk tijdstap één te gebruiken. Dit omdat de waarde van (u) hierdoor gelijk of groter kan worden dan 0.561. Doordat de functie de natuurlijke logaritme van het quotiënt neemt, kan de uitkomst nul of negatief zijn.

$$W(u) = \ln\left(\frac{0.561}{u}\right) \quad (4.2)$$

Door de vergelijking in te vullen met de minimale waarde voor u in te vullen (4.3) is het mogelijk de kleinste tijdstap te berekenen.

$$0.561 = \frac{u \cdot r^2}{4 \cdot k \cdot H \cdot t} \quad (4.3)$$

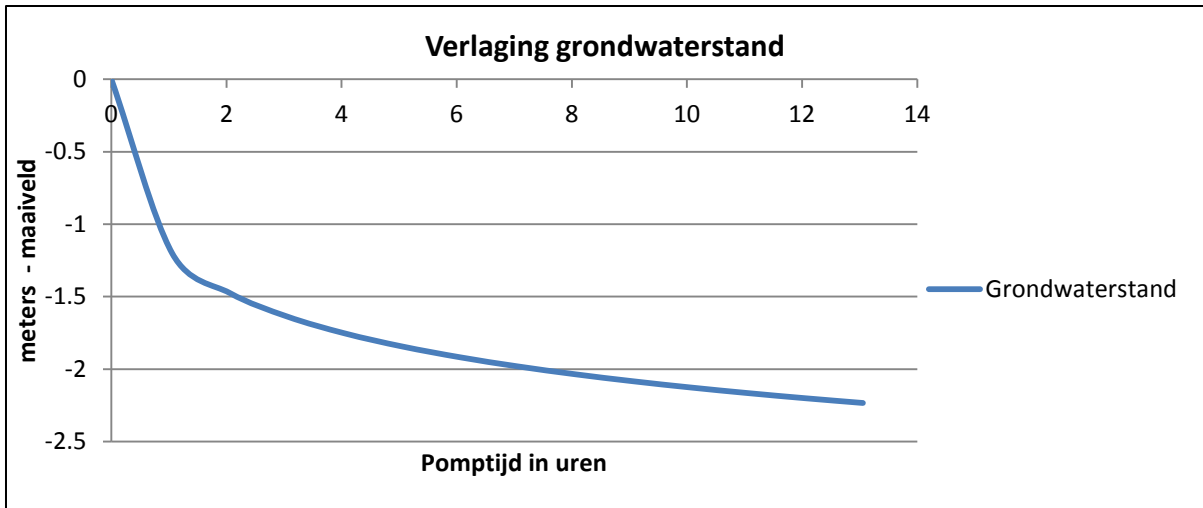
Door vervolgens de tijd naar voren te halen en te gebruiken als eerste tijdstap is het mogelijk deze functie te gebruiken voor kleine tijdstappen (4.4). Het optellen van een tijdstap geeft een te verwaarlozen verschil met de minimale waarde voor t .

$$t_{\text{minimaal}} = \frac{u \cdot r^2}{2.244 \cdot k \cdot H} + 1 \quad (4.4)$$

In tabel 4-3 is een weergave getoond van het model, waarin de tijdsafhankelijke vergelijking van Theis-Jacob-Edelman is uitgewerkt. In de laatste kolom (dh/dt) is de verlaging per uur weergegeven. In de voorbeeldsimulatie wordt een verlaging van 1,24 meter behaald na één uur pompen met een waterbezwaar van 60 m³/uur. In grafiek 4-1 is het logaritmisch verloop van de grondwaterverlaging weergegeven.

Reactietijd verlagen grondwaterstand						
Pomp uren (t)	u (-)	Q (m ³ /u)	W (-)	dh (m ¹)	$dh-mv$ (m-mv)	dh/dt (m ¹ /u)
0	0.0000	0	0	0	0	0
1.1	0.0301	67	2.92	1.24	-1.24	1.24
2.1	0.0155	67	3.59	1.53	-1.53	0.28
3.1	0.0104	67	3.99	1.69	-1.69	0.17
4.1	0.0078	67	4.27	1.81	-1.81	0.12
5.1	0.0063	67	4.49	1.91	-1.91	0.09
6.1	0.0053	67	4.67	1.98	-1.98	0.08
7.1	0.0045	67	4.82	2.05	-2.05	0.06
8.1	0.0040	67	4.96	2.11	-2.11	0.06
9.1	0.0035	67	5.07	2.16	-2.16	0.05
10.1	0.0032	67	5.18	2.20	-2.20	0.04
11.1	0.0029	67	5.27	2.24	-2.24	0.04
12.1	0.0026	67	5.36	2.28	-2.28	0.04
13.1	0.0024	67	5.44	2.31	-2.31	0.03

Tabel 4-3. Reactietijd van verlaging grondwaterstand



Grafiek 4-1. Verlaging grondwaterstand

4.4 Reactietijd opkomen grondwaterstand

Gedurende een frequentiegestuurde bemaling stuurt de frequentieregelaar de snelheid van de pomp aan en daardoor de grondwaterstandverlaging. De snelheid waarmee het grondwater stijgt of daalt, wordt de reactietijd genoemd.

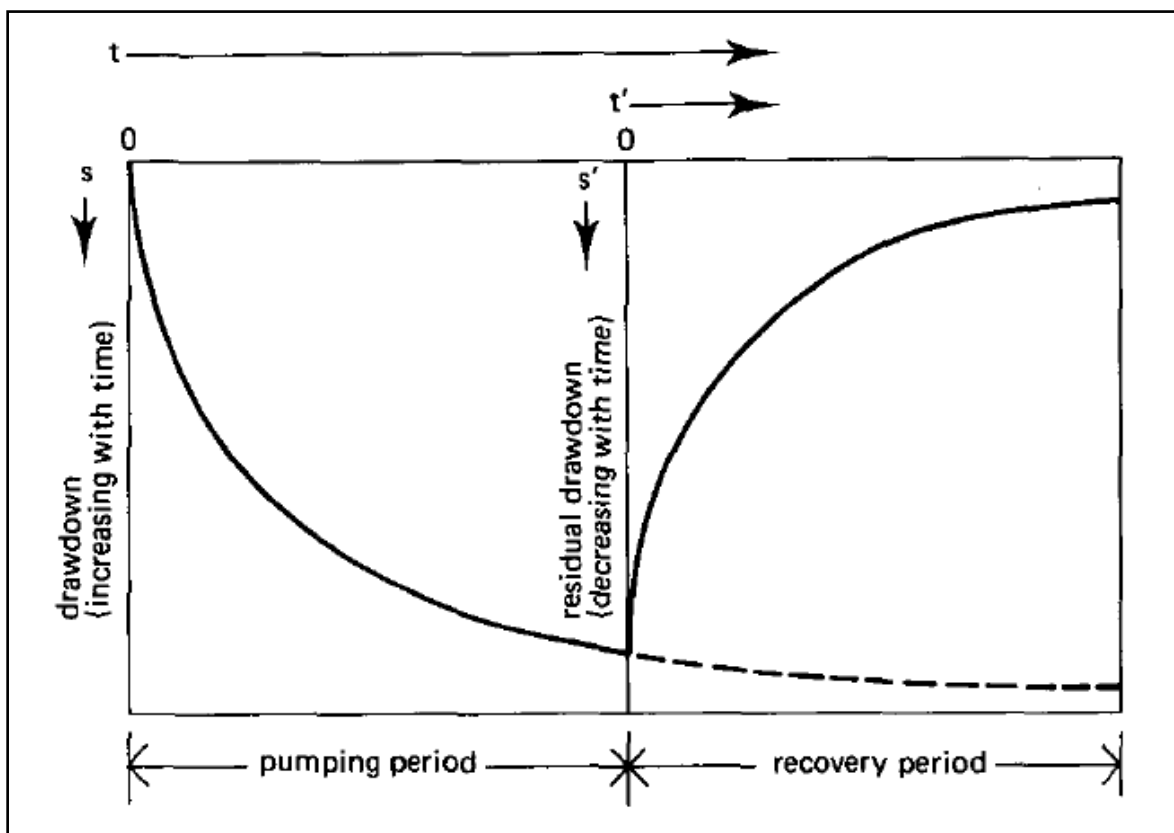
Theorie

De reactietijd van het grondwater kan berekend worden met de omgevormde vergelijking van Theis (4.5). Daarnaast is de vergelijking van Theis de enige vergelijking die tot op heden het opkomen van de grondwaterstand na een onttrekking kan berekenen. Het op laten komen van het grondwater is een natuurlijk proces dat bepaald wordt door de natuurlijke toestroom van het grondwater naar de onttrekkingskegel. De vergelijking van Theis heeft een logaritmisch verloop, dit heeft tot gevolg dat naarmate de tijd verstrijkt, het grondwater meer tijd nodig heeft om op te komen. Dit is weergegeven in figuur 4-2.

$$s' = \frac{Q}{4\pi \cdot k \cdot H} \ln \frac{t}{t'} \quad (4.5)$$

Hierbij is

s'	= Afstand verlaagde grondwaterstand tot originele grondwaterstand (m^1)
Q	= Waterbezwaar in niet stationaire situatie (m^3 / uur)
k	= Doorlatendheid bodem (m/uur)
H	= Dikte watervoerend pakket (m^1)
t	= tijd vanaf het begin van de bemaling (uur)
t'	= tijd vanaf het begin van het opkomen van de grondwaterstand (uur)



Figuur 4-2. Weergave factoren recovery methode van Theis (Bron: Kruijzenman en de Ridder 1994)

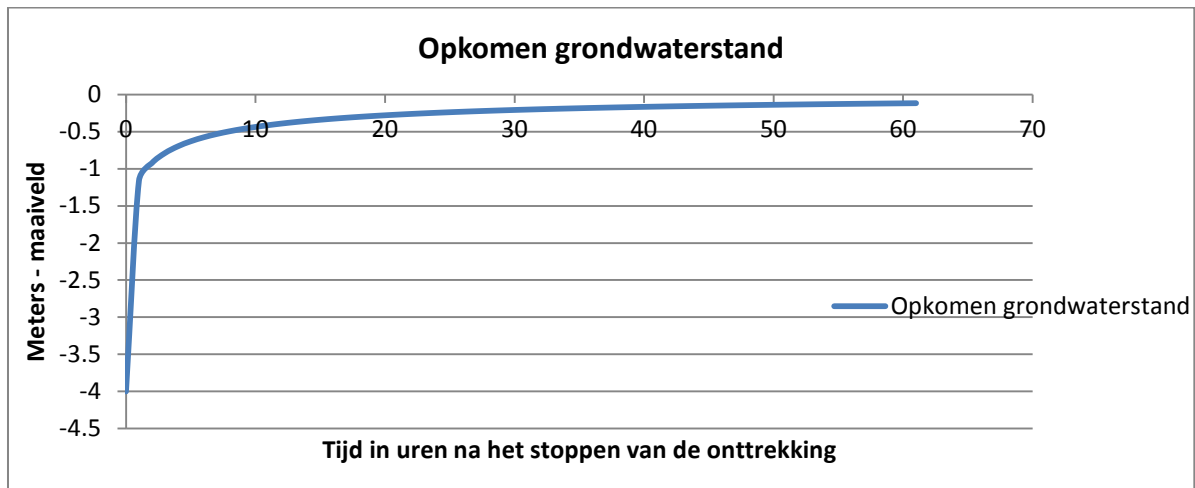
Analytisch model

Tabel 4-4 is een weergave van het model, waarin de tijdsduur en de verlagingen zijn getoond, berekend met de omgevormde vergelijking van Theis. Nadat een verlaging van het grondwater is gerealiseerd van vier meter, komt het in één uur 2.84 meter op. Dit is 1.16 meter onder de oorspronkelijke grondwaterstand.

Reactietijd opkomen grondwaterstand						
Pomp uren (t)	Uren na opkomen gws (t')	t/t'	dh (m ¹)	dh-mv (m mv)	dh/dt (m ¹ /u)	
23	0	0	4	-4.0	0	
24	1.00	24.0	1.16	-1.2	2.84	
25	2.00	12.5	0.92	-0.9	0.24	
26	3.00	8.7	0.79	-0.8	0.13	
27	4.00	6.8	0.70	-0.7	0.09	
28	5.00	5.6	0.63	-0.6	0.07	
29	6.00	4.8	0.58	-0.6	0.05	
30	7.00	4.3	0.53	-0.5	0.04	
31	8.00	3.9	0.50	-0.5	0.04	
32	9.00	3.6	0.46	-0.5	0.03	

Tabel 4-4. Reactietijd opkomen grondwaterstand

In grafiek 4-2 is het logaritmisches verloop van de grondwaterstand weergegeven. Doordat het verloop logaritmisches is zal het grondwater, in theorie, nooit opkomen tot aan de oorspronkelijke grondwaterstand.



Grafiek 4-2. Opkomen grondwaterstand

4.5 Waterbezwaar

Met de reactietijden van de grondwaterstand kan vervolgens het waterbezwaar worden berekend. Dit wordt berekend als zijnde een niet stationaire situatie. Hier is voor gekozen omdat bij tijdelijke bemalingen geen stationaire situatie wordt verkregen omdat de duur, in de meeste gevallen, te kort is.

Theorie

Het waterbezwaar wordt berekend met de, al eerder genoemde, vergelijking van Theis-Jacob-Edelman.

$$Q = \frac{4 \cdot \pi \cdot k \cdot H \cdot \Delta h}{W(u)} \quad (4.6)$$

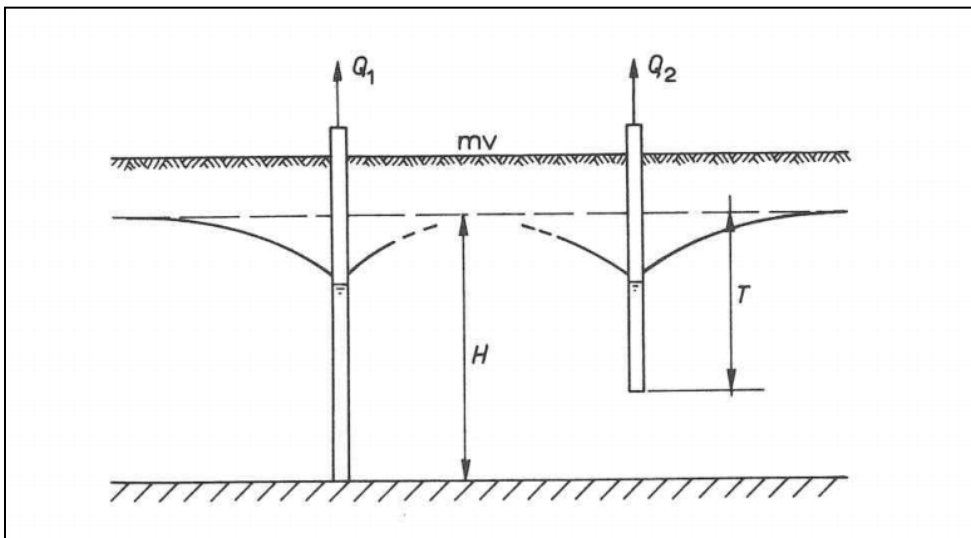
Doordat de verlaging verandert bij een fluctuerende grondwaterstand zal deze parameter (Δh) het verschil bepalen in waterbezwaar tussen de twee methoden.

De vergelijking van Theis-Jacob-Edelman is geschikt voor het bemalen onder volkomen omstandigheden. Voor het bemalen met onvolkomen bronnen wordt de onvolkomenheidsfactor van Forchheimer (*Fraanje 1974*) toegevoegd (4.7). Deze is empirisch bepaald.

$$\alpha = \sqrt{\frac{T}{H}} \cdot \sqrt[4]{\frac{2 \cdot H - T}{T}} \quad (4.7)$$

Hierbij is

α	= Onvolkomenheidsfactor (-)
T	= Afstand tussen onderkant filter tot grondwaterstand (m)
H	= Dikte watervoerend pakket (m)



Figuur 4-3. Weergave variabelen onvolkomenheidsfactor van Forchheimer (Bron: Fraanje 1974)

Analytisch model

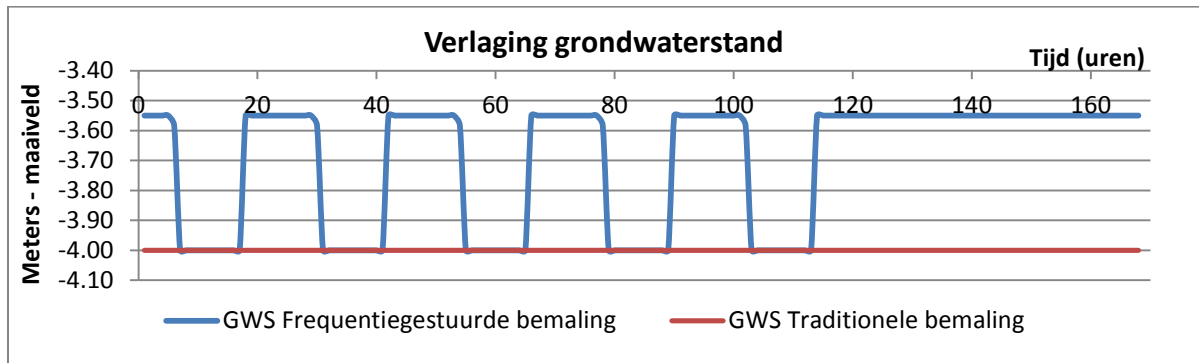
Naarmate de duur van de bemaling, kan met een lager waterbezwaar de zelfde gewenste grondwaterstand worden gehandhaafd. Dit komt doordat de bronfunctie, $W(u)$, groter wordt als de tijd (t) toeneemt. In het model is dit weergegeven in het tabblad waterbezwaar. Hierin zijn de tijdsduur en de vergelijkingen geautomatiseerd. (zie tabel 4-5). Het model reageert automatisch op de fysische- en projectmatige eigenschappen en wijzigt de vergelijking in de cel indien nodig (opkomen of dalen van de grondwaterstand). Hierdoor worden de verlagingen, per tijdseenheid weergegeven.

Het model is zo ingesteld dat het grondwater tussen de ingestelde niveaus blijft. Dit is de range tussen de (minimale) grondwaterstandverlaging tijdens en buiten de werkuren om. Verder is ingesteld dat de minimale verlaging die gehanteerd dient te worden tijdens werkzaamheden in de bouwkuip elke dag op een vast tijdstip behaald wordt.

Pomptijd (uren)	Gewenste verlaging (m-mv)	Werkelijke verlaging (m-mv)	u (-)	W (-)	Debiet (m ³ /uur)	Qcumulatief (m ³)	Reikwijdte (m ¹)
24	3.55	3.55	0.03183	2.87	108	108	179
25	3.55	3.55	0.03056	2.91	107	215	179
26	3.55	3.55	0.02938	2.95	105	320	179
27	3.55	3.55	0.02829	2.99	104	424	179
28	3.55	3.55	0.02728	3.02	103	527	179
29	3.55	3.55	0.02634	3.06	102	628	179
30	4	4	0.02546	3.09	113	742	194
31	4	4	0.02464	3.13	112	854	194
32	4	4	0.02387	3.16	111	964	194
33	4	4	0.02315	3.19	110	1074	194
34	4	4	0.02247	3.22	109	1183	194
35	4	4	0.02183	3.25	108	1291	194
36	4	4	0.02122	3.27	107	1398	194
37	4	4	0.02065	3.30	106	1504	194
38	4	4	0.02010	3.33	105	1609	194
39	4	4	0.01959	3.35	104	1713	194
40	4	4	0.01910	3.38	104	1816	194
41	3.55	3.55	0.01863	3.40	91	1908	179
42	3.55	3.55	0.01819	3.43	91	1998	179

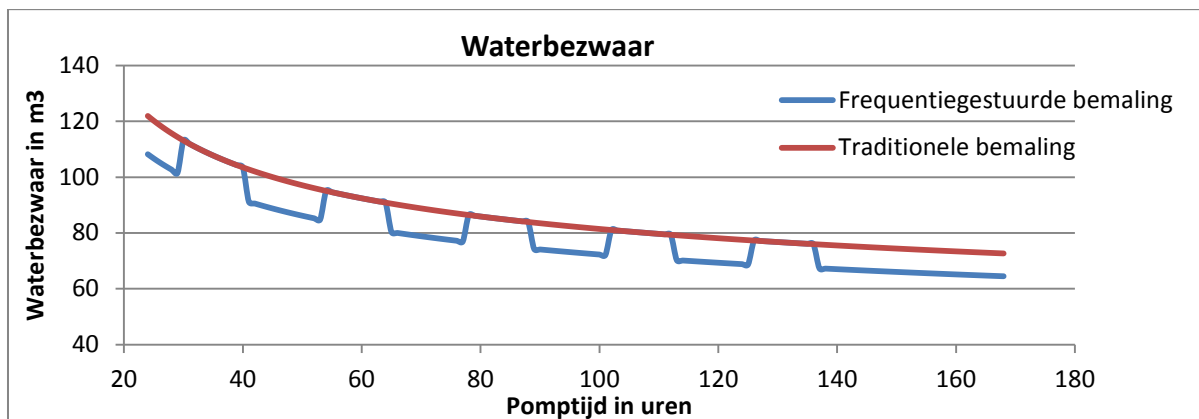
Tabel 4-5. Geautomatiseerd schema met daarin grondwaterstanden, waterbezwaar en reikwijdte.

In grafiek 4-4 is het verloop van de grondwaterstand in een weekcyclus weergegeven. Doordat de grondwaterstand in de voorbeeldsituatie snel reageert worden de gewenste niveaus gedurende de frequentiegestuurde bemaling in één uur gehaald.



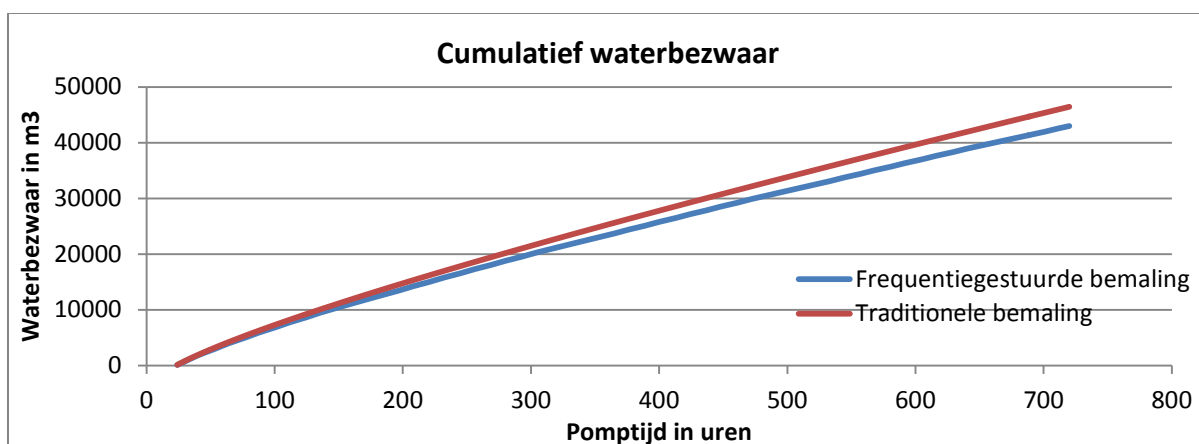
Grafiek 4-3. Weergave grondwaterstand met en zonder frequentiesturing

In grafiek 4-5 is het waterbezwaar (niet stationair) in de weekcyclus weergegeven. Het waterbezwaar neemt af in de tijd, circa 45 m³/uur na een periode van 150 uur.



Grafiek 4-4. Waterbezwaar van frequentiegestuurde- en traditionele bemaling

In grafiek 4-6 is het cumulatief waterbezwaar weergegeven van de frequentiegestuurde bemaling en traditionele bemaling. Hieruit blijkt dat het verschil in waterbezwaar voor deze situatie relatief klein is. De traditionele bemaling heeft een totaal waterbezwaar van 46452 m³, de frequentiegestuurde bemaling 42995 m³. Door een frequentiegestuurde bemaling toe te passen wordt er 3457 m³ bespaard op het waterbezwaar, dit is 7.4% van het totale waterbezwaar.



Grafiek 4-5. Cumulatief waterbezwaar

4.6 Reikwijdte

De reikwijdte wordt berekend met de vergelijking van Sichardt (4.8). Deze is empirisch bepaald en wordt veel toegepast voor het berekenen van de reikwijdte bij tijdelijke bemalingen.

Theorie

De vergelijking is een statische benadering voor kort durende situaties. Deze vergelijking is toegepast omdat het afhankelijk is van de grondwaterstandverlaging, dit in tegenstelling tot andere empirische vergelijkingen voor de reikwijdte. Tevens is dit een internationaal veel gebruikte vergelijking voor het berekenen van de reikwijdte.

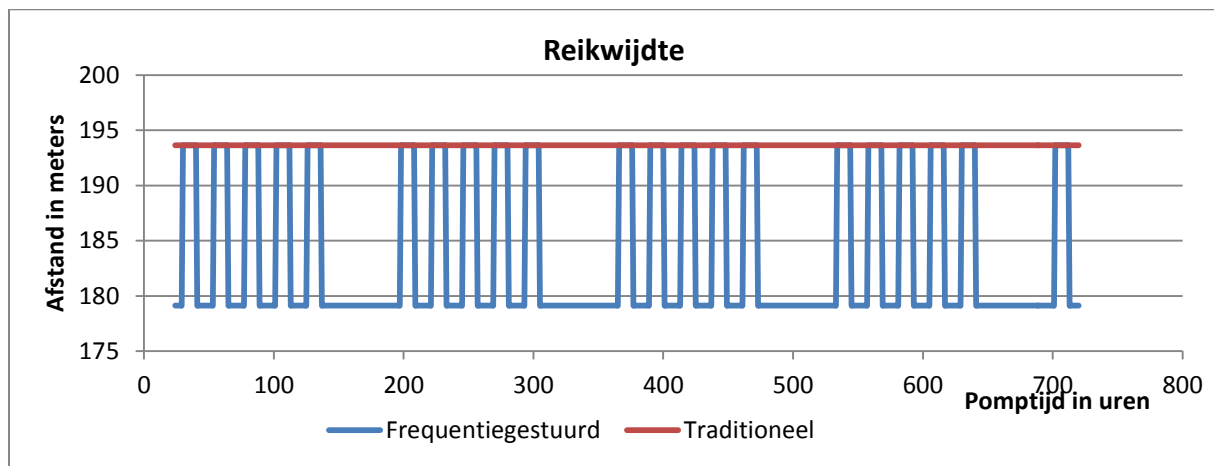
$$R = 3000 \cdot \Delta h_0 \cdot \sqrt{k} \quad (4.8)$$

R	= Reikwijdte	(m ¹)
3000	= Constante	(s/m ^{1/2})
Δh_0	= Grondwaterstandverlaging bij filter	(m ¹)
k	= Doorlatendheid bodem	(m/s)

Analytisch model

De reikwijdte is in het analytisch model verwerkt zoals weergegeven in tabel 4-5. Verder wordt de reikwijdte meegenomen in de beslistool waarin het de duurzaamheid bij het toepassen van een frequentiegestuurde bemaling mede bepaald. De reikwijdte in het simulatie voorbeeld heeft een variërende afstand van 179 m tot 194 m. Dit verschil is het gevolg van het hanteren van twee grondwaterstandsverlagingen bij frequentiegestuurd bemalen. Het gemiddelde verschil tussen de twee methoden bedraagt hierdoor acht meter.

Doordat Δh_0 niet berekend wordt, dient in het invoerveld hier een geschatte waarde voor ingevuld te worden. Deze geschatte waarde behoort bij de gewenste verlaging tijdens werkuren. Wanneer de grondwaterstandverlaging minder wordt, het peil bij niet werk uren, verandert dit automatisch mee.



Grafiek 4-6. Reikwijdte gedurende een frequentiegestuurde bemaling en traditionele bemaling

Grafiek 4-6 geeft de reikwijdte weer die zich gedurende de voorbeeldsimulatie voordoet. Gezien de reikwijdte afhankelijk is van de steeds veranderende verlaging, is hier dezelfde trend in te zien als in grafiek 4-3. De gemiddelde reikwijdte zal bij frequentiegestuurd bemalen, met deze voorbeeldsimulatie, gereduceerd worden met circa acht meter. Dit komt neer op een gemiddelde vermindering van 5.2 % ten opzichte van de traditionele reikwijdte.

4.7 Reductie energieverbruik

Theorie

Met een frequentieregelaar is het mogelijk het aantal hertz te sturen, waarbij het koppel van een elektrisch aangedreven pomp gelijk blijft. Met vergelijking 4.9 is het mogelijk het vermogen te berekenen. Doordat het koppel constant blijft, verandert het vermogen evenredig mee met de frequentiesturing.

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot N \quad (4.9)$$

Hierbij is: P = Vermogen (Watt)
 M = Koppel (N/m)
 N = Frequentie (Hertz)

De frequentieregelaar stuurt het aantal hertz aan de hand van de niveaumetingen en de ingestelde niveaus in de computer. Bij verdringerpompen (zuigerpompen en plunjerpompen) betekent dit dat de energiebesparing gelijk is aan de reductie op waterbezwaar omdat de efficiëntie curve lineair is.

Voor centrifugaal pompen (onderwaterpompen en klokpompen) is deze curve niet lineair en kan dus niet gelijk worden gesteld aan de reductie op het waterbezwaar bij frequentiegestuurde bemalingen. In dit onderzoek is het verschil tussen de efficiëntie curves niet meegenomen omdat iedere pomp een ander energie curve heeft en dit niet geautomatiseerd.

Analytisch model

In het tabblad reductie energieverbruik wordt het energieverbruik van een frequentiegestuurde bemaling uitgezet tegen het energieverbruik van een traditionele bemaling. Voordat het model het energieverbruik kan berekenen, dient in een tabel een aantal pompeigenschappen ingevuld te worden. In tabel 4-6 is het invoerveld voor pompeigenschappen weergegeven.

In te vullen pompeigenschappen		
Beschrijving	Eenheid	Waarde
Zuigerpompen	st	2
Capaciteit pompen	m ³ /uur	40
Verbruik pomp	kW	5

Tabel 4-6. In te vullen pompeigenschappen

Wanneer geen aansluiting op het elektriciteitsnet mogelijk is dient gebruik gemaakt te worden van een aggregaat. Hiervoor kan tevens het energieverbruik berekend worden. Hiervoor moet het invoerveld, weergegeven in tabel 4-7, ingevuld worden.

In te vullen aggregaat eigenschappen		
Beschrijving	Eenheid	Waarde
Aantal aggregaten	st	1
Capaciteit	kW	11
Verbruik aggregaat	l/d	60

Tabel 4-7. In te vullen aggregaat eigenschappen

Figuur 4-4 is een weergave van de spreadsheet reductie energieverbruik dat verwerkt is in het analytische model. De reductie op het energieverbruik, van een elektrisch aangedreven pomp, is met deze berekening bepaald op 25 % als gevolg van het inzetten van een frequentiegestuurde bemaling vergeleken met .

In te vullen parameters			Debiet frequentiegestuurd (m ³ /uur)	verbruik pomp (kW)	verbruik aggregaat (l)
Beschrijving	Eenheid	Waarde	108	6.76	3.08
Aantal zuigerpompen	st	2	107	6.67	3.03
Capaciteiten per pomp	m ³ /uur	60	105	6.58	2.99
Verbruik pomp	kW	5.5	104	6.50	2.95
			103	6.42	2.92
Beschrijving	Eenheid	Waarde	102	6.35	2.89
Aantal aggregaten	st	1	113	7.07	3.22
Capaciteit	kW	11	112	7.00	3.18
Verbruik aggregaat	l/d	60	111	6.93	3.15
Berekende verbruiken			110	6.86	3.12
Verbruik pompen	totaal	Dag	109	6.80	3.09
Frequentiegestuurd	2687	90	108	6.74	3.06
			107	6.68	3.04
Traditioneel	3600	120	106	6.62	3.01
			105	6.57	2.99
verschil	913	30	25%	104	2.96
			104	6.47	2.94
			91	5.70	2.59
Verbruik aggregaat	totaal	dag	91	5.66	2.57
Frequentiegestuurd	1221	41	90	5.62	2.56

Figuur 4-4. Weergave van het tabblad reductie energieverbruik.

4.8 Stuurbuis

Wanneer gekozen wordt voor het toepassen van een frequentiegestuurde bemaling is het mogelijk om in het tabblad stuurbuis de verwachte grondwaterstand in de stuurbuis te berekenen. Hiermee kan tijdens het voorprogrammeren van de frequentieregelaar de gewenste grondwaterstanden en de pompeigenschappen ingevoerd worden.

Theorie

De stijghoogte in de stuurbuis is berekend met het natuurkundig principe 'superpositie'. Dit betekent dat alle factoren die invloed uitoefenen op een bepaald punt, bij elkaar opgeteld mogen worden. In dit geval alle 'verlagingen' van de filters of bronnen op de stijghoogte op de locatie van de stuurbuis. Hiervoor is de formule van Dupuit gebruikt (4.10).

$$(H^2 - h^2) = \frac{Q_* (\ln R - \ln r)}{\pi * \kappa} \quad (4.10)$$

Hierbij is	Q	= Waterbezwaar	m ³ / uur
	α	= Onvolkomenheidsfactor van Forchheimer	(-)
	κ	= doorlatendheid van de bodemsoort	m / uur
	H	= Dikte watervoerend pakket	m ¹
	h	= Grondwaterstand tot ondoorlatende laag	m ¹
	R	= Reikwijdte onttrekkingskegel	m ¹
	r	= Equivalente straal bouwkuip	m ¹

De equivalente straal wordt in deze situatie gebruikt als zijnde de afstand van de filters of bronnen tot aan de stuurbuis.

Analytisch model

Door de $(H^2 - h^2)$ van alle filters op te tellen en de kwadraten weg te nemen zijn alle verlagingen van de verschillende filters of bronnen berekend en gesommeerd. Na een vereenvoudiging van de formule (4.11) is deze toegepast in het model.

$$S = H - h = H - \sqrt{H_t^2 - \Sigma (H_i^2 - h_i^2)} \quad (4.11)$$

Het berekenen van deze stijghoogten is grotendeels geautomatiseerd. De onderlinge afstand van de filters of bronnen dienen ingevuld te worden en de afstand tussen de filters of bronnen ten opzichte van de bouwkuip. In figuur 4-5 is het invoerveld weergegeven. De overige waarden zijn overgenomen vanuit het tabblad invoerveld.

	Waarde	Eenheid
Bronnen/filters	40	(st)
Afstand tussen filters	2	(m ¹)
Per zijde	20	(m ¹)
Lengte boven zijde	20	(m ¹)
Lengte onder zijde	20	(m ¹)
Lengte linker zijde	20	(m ¹)
Lengte rechter zijde	20	(m ¹)
Afstand put tot bron	0.5	(m ¹)
	x	y
Locatie stuurbuis	10	-4.5

Figuur 4-5. Weergave invoerveld stuurbuis.

Doordat de locatie van de stuurbuis bekend is kan middels de stelling van Pythagoras de straal (r) berekend worden. Dit is voor elke lengte geautomatiseerd zoals weergegeven in figuur 4-6. In dit rekenvoorbeeld is in de stuurbuis, die op vijf meter afstand van de filters is gesitueerd, een verlaging berekend van 3.05 meter met behulp van vergelijking 4.11

Filters boven	x	y	R (m ¹)	(H ² -h ²)
1	2	21	26.7254	3.934574021
2	4	21	26.19637	3.973195183
3	6	21	25.81182	4.001759045
4	8	21	25.57831	4.019311882
5	10	21	25.5	4.025234447
6	12	21	25.57831	4.019311882
7	14	21	25.81182	4.001759045
8	16	21	26.19637	3.973195183
9	18	21	26.72546	3.934574021
10	20	21	27.39069	3.887085006

Figuur 4-6. Weergave stijghoogte berekening als gevolg van de bovenste rij filters of bronnen.

4.1 Deelconclusie

Het waterbezwaar varieert aan de hand van het verschil in de grondwaterstandverlaging. Doordat dit verschil een halve meter bedraagt, is het verschil in cumulatief waterbezwaar 7.4%. De reikwijdte is gelijk aan de variatie in de grondwaterstand, hierbij wordt een reductie gerealiseerd van circa (4%). De energiereductie is niet alleen afhankelijk van het verschil in grondwaterverlaging maar ook van de keuze van de pomp. Omdat de gecombineerde capaciteit van de pompen veelal niet overeenkomt met de benodigde capaciteit, wordt significant bespaard op de voorbeeldsimulatie. Er wordt 25% bespaard op het energieverbruik ten opzichte van traditioneel bemalen. De stijghoogte in de stuurbuis is benaderd met het natuurkundige begrip 'superpositie'. Het komt erop neer dat de berekende stijghoogte afhangt van de nauwkeurigheid van het waterbezwaar, reikwijdte en de grondwaterstandverlaging.

5 Beslistool

5.1 Inleiding

Om een afweging te kunnen maken op basis van kostenefficiëntie, is het van belang dat de berekende duurzaamheidsfactoren uit het analytisch model, waar mogelijk, worden omgezet naar kosten. Hierbij dient de herkomst van de kosten te worden achterhaald zodat hiermee een onderbouwing wordt verkregen. Hiernaast dient de wijze waarop de kosten zijn verwerkt in de beslistool duidelijk te worden gemaakt. Dit ,zodat wanneer nodig, de eenheidsprijzen aangepast kunnen worden.

5.2 Financiële factoren

Installatie/huurkosten

Om de installatie/huurkosten te kunnen bepalen dient het verwachte waterbezwaar bekend te zijn. Aan de hand van het waterbezwaar wordt een keuze gemaakt welke pompen ingezet worden. De beschikbaarheid van elektriciteit speelt een duidelijke rol in de keuze van de pompen en daardoor installatie/huurkosten. Het gebruik van het elektriciteitsnet als energievoorziening is aanzienlijk voordeliger in de kosten ten opzichte van fossiele brandstof. Het opwekken van elektriciteit door middel van aggregaten is echter een relatief kostbare aangelegenheid wegens de hoge aanschaf/huurkosten en onderhoudskosten. Het verschil in installatie/huurkosten bestaat uit kosten die gerekend worden voor de pompen, aggregaten en de frequentieregelaar. De kosten voor de leidingwerken en overige kosten zullen nagenoeg geen verschil geven. De installatie van een frequentiegestuurde bemaling zal extra kosten met zich mee brengen, omdat een installatiemonteur de frequentieregelaar dient in te stellen..

Energiekosten

Energiekosten worden steeds doorslaggevender voor de keuze van een bemalingstechniek omdat de kosten van fossiele brandstof steeds verder stijgen. In figuur 5-1 zijn veel gebruikte zuigerpompen weergegeven met het bijbehorend verbruik in kW en liters (diesel).

Capaciteit in m ³ /uur	Diesel			Elektrisch			Verskil Diesel/elektrisch	
	Verbruik L/uur	Prijs € / l	Kosten per uur	Verbruik kW	Prijs kW/h	kosten per uur	Prijs €	Verskil %
30	0.625	1.4	0.875	1.9	0.18	0.342	0.533	61
60	0.8	1.4	1.12	3.42	0.18	0.6156	0.5044	45
90	0.92	1.4	1.288	4.56	0.18	0.8208	0.4672	36

Tabel 5-1. Energiekosten anno 2014 (bron:<http://www.vanwingen.be>).

Lozingskosten

Afhankelijk van de locatie worden, veelal door een waterschap, lozingskosten in rekening gebracht. Deze kosten worden per vervuilingseenheid (1000 m³ grondwater) berekend. De exacte prijs die betaald dient te worden kan verschillen per waterschap en zal rond de € 55,- /VE (Vervuilingseenheid) bedragen. In tabel 5-2 zijn de lozingstarieven van een aantal verschillende waterschappen weergegeven, geldend voor 2014. Wanneer geloosd wordt op het rioleringsysteem dient naast het betalen van de lozingskosten aan het waterschap, tevens betaald te worden aan de beheerder van het riool. In de meeste gevallen betreft dit de gemeente, die tevens het tarief bepaalt en de vergunning afgeeft. De hoogte van het tarief kan afhankelijk zijn van de hoeveelheid en de kwaliteit van het te lozen grondwater. Ook komt het voor dat gemeenten geen kosten in rekening brengen. Een melding is echter altijd verplicht.

Waterschap	Lozingskosten €/VE
Vechtstromen	€ 49
Rivierenland	€ 54
Zuider Zeeland	€ 57
Hoogheemraadschap Rijnland	€ 59

Tabel 5-2. Lozingskosten van enkele waterschappen.

4.9 Weergave beslistool

In de beslistool worden de kostenbepalende factoren doorgerekend. De beslistool gaat hierbij uit van twee bepalende situaties, namelijk wel en geen beschikking over aansluiting op het elektriciteitsnet. Hiermee wordt berekend of de hogere startkosten, van de frequentiegestuurde bemaling, afwegen tegen de besparing op lozings- en energiekosten. De variabelen in de paarse vakken worden berekend in het model of in het tabblad energiereductie. De gele vakken zijn variabelen die ingevuld dienen te worden. In de groene vakken worden de totale kosten weergegeven die kenmerken zijn voor de bemalingsmethode en energiebron. Uit de resultaten van de beslistool blijkt dat het verschil in kosten relatief klein is. Wanneer gebruik gemaakt kan worden van het elektriciteitsnet zijn de kosten nagenoeg gelijk. Indien de elektriciteit voor een frequentiegestuurde bemaling gegenereerd dient te worden door een aggregaat, is een frequentiegestuurde bemaling €787,- duurder in de voorbeeldsituatie.

		Trad (diesel)	Trad (elek)	Freq (elek)	Freq (diesel/Elek)
	Waterbezwaar	46452	46452	42995	42995
Algemeen					
Aantal pompen (st)		2	2	2	2
Aantal aggregaten (st)					1
Energieverbruik					
Verbruik aggregaat (l/dag)	41				1221
Verbruik dieselpomp (l/d)	18	1080			
Verbruik Elekpomp (kW/d)	120		7200	7200	
W & R					
Grens vergunning m ³ /maand	100000				
Vergunning (Traditioneel)	0				
Vergunning (Frequentie)	0				
Huurkosten					
Prijs pomp elek (€/dag)	20		1200	1200	1200
Prijs aggregaat (€/dag)	30				900
Prijs frequentieunit (€/dag)	17			510	510
Prijs dieselpomp (€/dag)	30	1800			
Installatie kosten					
Installatie monteur (€/uur)	55			220	55
Energiekosten					
Prijs diesel liter (€)	1.3	1404			1588
Prijs Kw/uur (€)	0.17		1224		
Reductie energie (%)	25.4			914	
Lozingskosten					
Prijs lozing m ³ (€)	0.06	2787	2787	2580	2580
Duur (dagen)	30				
Totaal Trad (diesel) (€)		5991			
Totaal Trad (elek) (€)			5211		
Totaal Frequentie (elek) (€)				5203	
Totaal Frequentie (diesel/elek) (€)					6778

Figuur 5-1. Weergave beslistool

In tabel 5-3 zijn de factoren weergegeven die staan voor de duurzaamheid. Het geeft weer dat een frequentiegestuurde bemaling op bijna alle punten duurzamer is behalve wanneer er geen aansluiting op het elektriciteitsnet mogelijk is.

Factoren	Frequentiegestuurd	Traditioneel	Vershil	Eenheid
Gemiddelde reikwijdte	117	129	13	m ¹
Totaal waterbezwaar	43314	46452	3138	m ³
Verbruik energie	66	132	66	kW
Verbruik diesel	902	840	-62	liter

Tabel 5-3. Tabel met daarin factoren die de duurzaamheid van de bemalingen vergelijkt

4.10 Deelconclusie

Met de beslistool is het mogelijk een afweging te maken op het gebied van kostenefficiëntie. Hieruit komt naar voren dat wanneer er geen mogelijkheden zijn om op het elektriciteitsnet aan te sluiten, het inzetten van frequentiegestuurd bemalen minder kostenefficiënt is dan traditioneel bemalen. In het simulatievoorbeeld komt dit neer op een verschil van € 787,- . Wanneer aansluiting op het elektriciteitsnet mogelijk is zal het verschil vaak nihil zijn. Dit komt door de lage lozingskosten die gemiddeld € 0.06,- bedraagt. Op het gebied van energieverbruik reductie wordt aanzienlijk bespaard doordat de frequentieregelaars niet alleen het verbruik reduceert aan de hand van de grondwaterstand verlaging, maar neemt het ook de overcapaciteit van de bemalingsinstallatie weg. Dit komt in de voorbeeldsimulatie neer op een energie reductie van 25 %. Voor de totale kosten geeft dit echter een relatief lage besparing. Dit is het gevolg van de relatief lage energie tarieven ten opzichte van andere kostenbepalende factoren als huurprijzen en installatiekosten.

6 Toetsing analytisch model

6.1 Inleiding

De nauwkeurigheid van het analytische model is gebaseerd op de algemeen geaccepteerde vergelijking. Deze vergelijkingen zijn echter niet eerder in deze samenstelling gebruikt. Om deze reden is het van belang dat het analytische model wordt getoetst. Dit is zowel aan een numeriek model als een proefopstelling getoetst. Met deze toetsing worden het waterbezwaar, de reikwijdte, de stijghoogte in de stuurbuis en de reactiesnelheid van de grondwaterstand vergeleken.

6.2 Numeriek model

Voor het toetsen van de beslistool is gekozen voor een geohydrologisch model. Een erkend en veel gebruikt programma is het numerieke ModFlow dat ontwikkeld is door USGS (U.S. Geological Survey). Met het model zal eenzelfde situatie worden doorgerekend als met het zelf ontwikkelde analytische model.

Keuze modelleringssoftware

Modflow is het, internationaal, meest gebruikte simulatie programma. Het besluit om dit programma te gebruiken is gebaseerd op een aantal criteria. Ten eerste is het berekenen van een freatische bemaling met ModFlow nauwkeuriger dan met andere programma's als MWell. Omdat MWell rekent met De Glee is het ontwikkeld om gespannen bemalingen te modelleren, dit onderzoek richt zich enkel op freatische bemalingen. Omdat Modflow een erkend modelleringsprogramma is en vrij te gebruiken, is het gebruikt in dit onderzoek. Voor het werken met modflow is gekozen om de gebruikersschil PMWin (Processing Modflow Window) te gebruiken.

Opbouwen model

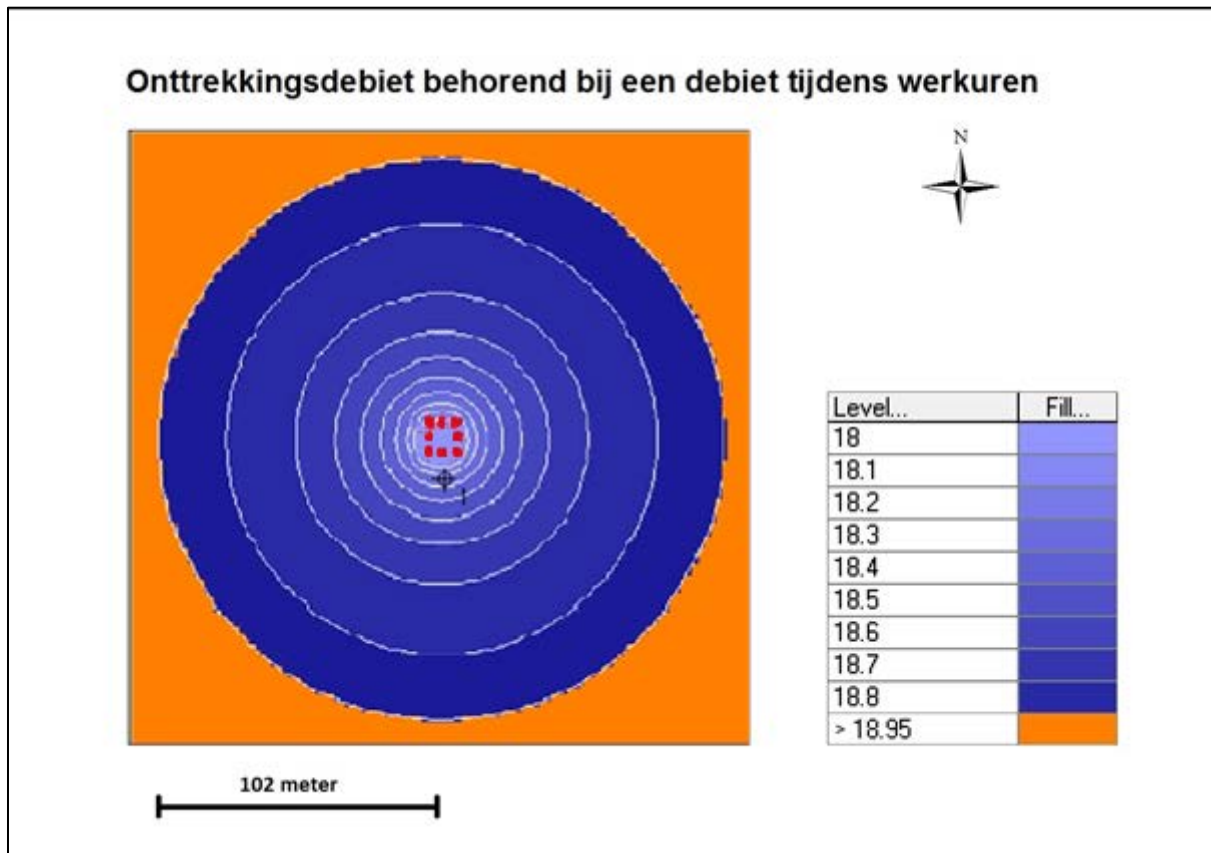
Er is een situatie doorgerekend voor tien dagen, met een debiet afkomstig van het analytische model zodat met dezelfde invoergegevens wordt gewerkt. Het berekend waterbezwaar is verdeeld over de acht filters. De grootte van het grid is 250000 m² (500 m¹ bij 500 m¹). De invoergegevens zoals gebruikt in het model zijn hieronder weergegeven.

- Laag type	Freatisch
- Tijd instellingen	240 tijdstappen van één uur, tijdsafhankelijk rekenen
- Initiële grondwaterstand	19 meter boven hydrologische basis
- K-waarde	1.25 (m/uur)
- Specifieke opslag	0.001 (-)
- Doorlaatbaarheid pakket	23.75 (m ² /uur)
- Bergings coëfficiënt	0.3 (-)
- Effectieve porositeit	0.25 (-)
- Specifieke toelevering	0.25 (-)
- Onttrekking	dag 4.646 (m ³ /uur/filter) nacht 3.063 (m ³ /uur/filter)
- Aantal filters	8 (st)

Het model is twee keer door gerekend. Eén met een waterbezwaar gedurende werkzaamheden en één met een waterbezwaar dat is berekend buiten de werktijden. Hierdoor zijn twee

spreidingslengtes en twee verlagingen berekend. De situering van de filters is weergegeven in de figuur 6-5.

Resultaten model



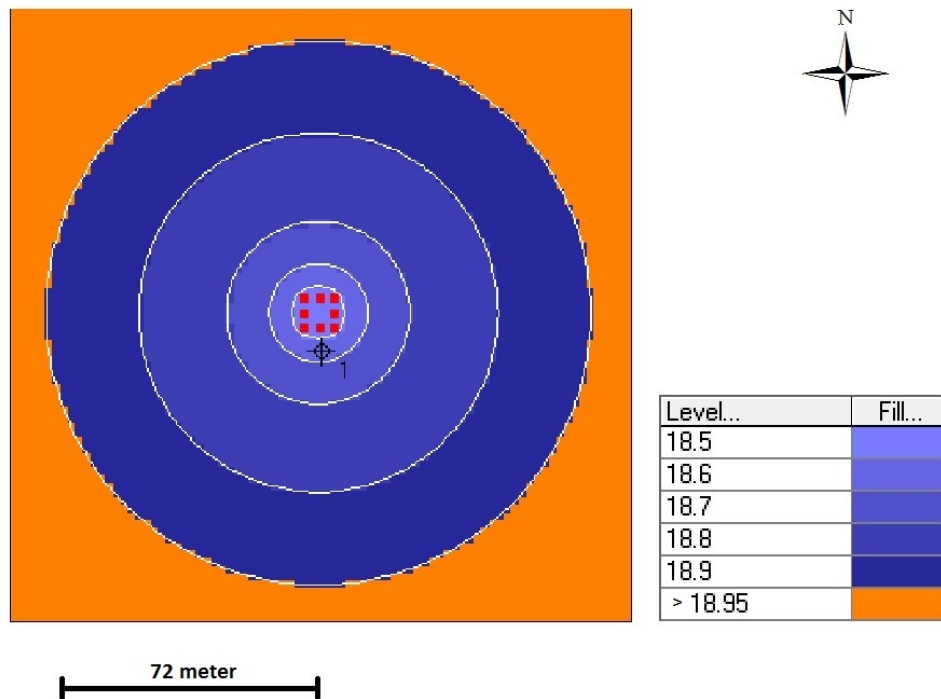
Figuur 6-1. Onttrekkings contouren bemaling.

In figuur 6-1 is de onttrekkingskegel weergegeven die ontstaat wanneer per filter $3.06 \text{ m}^3/\text{uur}$ wordt onttrokken. Het laagste grondwaterniveau is gemeten tussen de filters en bedraagt 18.03 meter boven de geohydrologische basis. Dit is gelijk aan één meter verlaging van het grondwater. De reikwijdte bedraagt, gemeten vanuit het hart van de bemaling, 102 meter. In tabel 6-1 zijn de waarden uit het numerieke model vergeleken met het analytische model.

Factoren	Numeriek	Analytisch	Vershil in %
Waterbezwaar (gemiddeld)	24.5 m^3/uur	24.5 m^3/uur	0 %
Reikwijdte	102 m^1	112 m^1	9 %
Verlaging	1.97 m -mv	2.00 m -mv	1.5 %
Stijghoogte in stuurbuis	1.67 m -mv	1.69 m -mv	1.2 %

Tabel 6-1. Vergelijking factoren numeriek en analytisch model

Onttrekkingscontouren bij een debiet horend bij niet werk uren



Figuur 6-2. Contouren onttrekkingskegel

In figuur 6-2 is de onttrekkingskegel weergegeven die ontstaat wanneer per filter $4.65 \text{ m}^3/\text{uur}$ wordt onttrokken. Het laagste grondwaterniveau is gemeten tussen de filters en bedraagt 18.51 meter boven de geohydrologische basis. De reikwijdte bedraagt, gemeten vanuit het hart van de bemaling, 72 meter. In tabel 6-2 zijn de waarden uit het numerieke model vergeleken met het analytische model.

Factoren	Numeriek	Analytisch	Vershil in %
Waterbezwaar (gemiddeld)	$37.2 \text{ m}^3/\text{uur}$	$37.2 \text{ m}^3/\text{uur}$	0 %
Reikwijdte	72 m^1	87 m^1	17.2 %
Verlaging	1.49 m -mv	1.55 m -mv	3.9 %
Stijghoogte in stuurbuis	1.39 m -mv	1.34 m -mv	3.6 %

Tabel 6-2. Vergelijking factoren numeriek en analytisch model

Mogelijke oorzaken verschil.

De verschillen in resultaat zijn afkomstig door van de verschillen in rekenwijze van de modellen, analytisch versus numeriek. Het numeriek model rekent met filters langs de rand van de bouwkuip en het analytisch met een bron in het hart van de bouwkuip. Echter is er ook andere reden zoals het relatief grote verschil in de reikwijdte. Dit is mede het gevolg van de geschatte waarde voor Δh_0 die benodigd is voor de vergelijking van Sichardt. Het numerieke model berekent deze verlaging bij de filters, door middel van iteratie. Hierdoor is het waarschijnlijk dat deze reikwijdte nauwkeuriger is dan berekend met het analytische model.

Het verschil in de verlaging komt door het niet kunnen toepassen van onvolkomen bronnen of filters wanneer gebruik wordt gemaakt van de gebruikersschil PMWin. Hierdoor is gewerkt met volkomen bronnen tot 19 meter diepte. Het verschil loopt uiteen van drie tot zes centimeter op een verlaging van een meter en halve meter. Dit is ook waar te nemen in de stijghoogte, gemeten in de stuurhuis.

6.3 Proefopstelling

In de loop van dit onderzoek is een frequentie-unit ontworpen en gebouwd met daarin drie frequentieregelaars die ieder één pomp kunnen aansturen. Met behulp van een proefopstelling is de werking van deze frequentieregelaar getest. Verder zijn onderdelen van het analytisch model getoetst aan de proefopstelling. Hier is de reactiesnelheid van het grondwater getoetst betreft het behalen van de twee gewenste grondwater niveaus. Hierbij gaat het om de maximale en minimale grondwaterstandverlaging (tijdens en na werkuren). Tot slot is het berekende pompdebiet vergeleken met het waterbezwaar, berekend met het analytisch model. In bijlage 1 zijn foto's opgenomen van de proefopstelling.

Project

De proefopstelling is gerealiseerd, gedurende een project van de Nederlandse Gasunie N.V. Het project betrof het verleggen en opnieuw aansluiten van een gasleiding. Het project bevond zich ter plaatse van een meet- en regelstation van de Gasunie aan de Doesburgseweg te Angerlo, weergegeven in figuur 6-3. Ten aanzien van deze werkzaamheden zijn er een drietal bouwkuipen gerealiseerd met bemaling. Eén daarvan is opgenomen en ingericht als proefopstelling voor dit onderzoek.



Figuur 6-3. Locatie proefopstelling.

Keuze onderbouwing

Er is gekozen voor een project van de Nederlandse Gasunie. Hiervoor is gekozen omdat de Nederlandse Gasunie op de hoogte was van dit onderzoek en medewerking wou verlenen ten aanzien van een proeflocatie. De projectlocatie te Angerlo is gekozen omdat dit een freatische bemaling betrof, waar het analytisch model ook op is gebaseerd. Daarnaast is de bodem ter plaatse van het project relatief homogeen, wat het vergelijken van de bemaling aan de het analytisch model vereenvoudigd. Verder was het mogelijk een

frequentieregelaar en aggregaat dicht bij de bouwkuip te plaatsen. Tot slot was er toestemming om extra peilbuizen te plaatsen in de omgeving.

Actoren

De Nederlandse Gasunie was de opdrachtgever gedurende dit project. Denys Engineers & Contractors N.V. heeft het project aangenomen en was de hoofduitvoerder. Voor de diverse vergunning aanvragen zijn de provincie Gelderland en gemeente Montferland betrokken. Het watersysteem waar op geloosd is, valt onder het beheer van waterschap Rijn en IJssel.

Projectgegevens

Voorgaand aan de proefopstelling is een bemalingsplan opgesteld door Koop Bronbemaling (Bemalingsplan project 134991 Angerlo-Ulft, 04-03-2014). De geohydrologische gegevens zijn afkomstig uit het geohydrologisch onderzoek, dat is uitgevoerd door Antea Group (Geohydrologisch rapport Oranjewoud 258755-GHR-001+002, 29 maart 2013). Binnen dit bemalingsplan is de frequentiegestuurde proefopstelling niet opgenomen.

Projecteigenschappen en geohydrologische gegevens

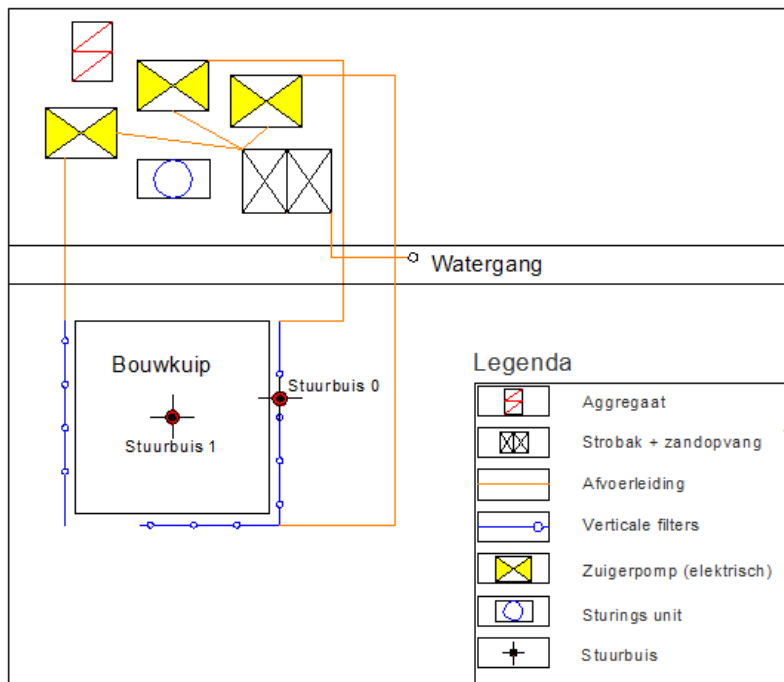
Gedurende dit project is een vacuümbemaling gerealiseerd met filters tot 5 meter minus maaiveld. In de loop van het project een aantal projectgegevens gewijzigd ten opzichte van het bemalingsplan. In tabel 6-4 is een overzicht weergegeven van de projectgegevens die invloed hebben op de proefopstelling.

Putnummer	lxb (m ¹)	GWS (m -mv)	Putdiepte (m ¹)	Verlaging GWS (m -mv)	Duur bemaling (d)	Diepte filters (m-mv)	Filters (st)
Dp-ko3	8x8	1.00	1.5	2.0	14	5.0	13
k-waarde (m/d)	Dikte watervoerend pakket (m ¹)	Gewenste verlaging tijdens werkuren (m -mv)		Gewenste verlaging na werkuren (m -mv)		Berekend waterbezwaar (m ³ /uur)	
30	19	2.0		1.55		50.4	

Tabel 6-4. Projecteigenschappen en geohydrologische gegevens.

Technische uitwerking

In figuur 6-5 is een schematisering weergegeven van de proefopstelling. Hier zijn drie elektrisch aangedreven pompen geïnstalleerd die gestuurd worden door middel van drie frequentieregelaars in de frequentie-unit. De pompen kunnen in de praktijk elk een maximaal debiet van 60 m³/uur verpompen. Met behulp van een 50 kVA aggregaat is de installatie voorzien van elektriciteit. Het grondwater is gedurende dit project geloosd op een zijleiding van de Hengelder Leigraaf. Voorafgaand aan het lozen is door middel van een strobak met zandopvang, het ijzergehalte en de vaste delen gefilterd.



Figuur 6-5. Schematisatie bemalingsinstallatie.

Stuurbuis

Er zijn een tweetal stuurbuizen geplaatst waarbij gekeken is naar de functionaliteit en betrouwbaarheid per locatie. Eén stuurbuis is geplaatst in de kern van de bouwkuip, de andere tussen twee filters. De verlaging in de stuurbuizen is gemonitord met behulp van een "diver". Dit is een elektronische waterdrukmeter, die met een in te stellen tijdsinterval de stijghoogte meet. In de eerste meetreeksen is elke 5 minuten een meting gedaan. Voor het monitoren van de reactietijden is de stijghoogte om de halve minuut gemeten. In figuur 6-5 zijn de locaties van de stuurbuizen weergegeven.

Monitoring

Om de monitoring van de frequentiegestuurde bemaling nauwkeurig te kunnen uitvoeren, is een raai peilbuizen en een referentie peilbuis geplaatst. In figuur 6.6 zijn de locaties van de peilbuizen weergegeven. De onderlinge afstand van de peilbuizen in de raai bedraagt 20 meter. Daarnaast is er een referentie peilbuis geplaatst op 150 meter, gemeten vanaf de rand van de bouwkuip. De referentie peilbuis ondervindt geen invloed van de bemaling waardoor de natuurlijke variatie van de grondwaterstand gemeten kon worden. Er is uit gegaan van een gelijke natuurlijke variatie in iedere peilbuis binnen het projectgebied. Deze variatie in de grondwaterstand is voornamelijk toe te wijden aan neerslag en veranderingen van het oppervlaktewaterpeil. Gedurende de proef was het niet mogelijk de reikwijdte van de grondwateronttrekking nauwkeurig te monitoren. Doordat de referentiepeilbuis en de peilbuizen, die het verst gelegen zijn van de bemaling, sterk beïnvloed werden door oppervlaktewater fluctuaties als gevolg van menselijke activiteiten. Hierdoor zijn schommelingen in de grondwaterstand gemeten van meer dan 0.1 meter per dag waardoor het niet mogelijk was de reikwijdte nauwkeurig te meten en te vergelijken met het analytisch model.



Figuur 6-6. Locaties peilbuizen

Resultaten proefopstelling

Gedurende de proefopstelling kon wegens het dichtslibben van de filters geen meerdaagse meetreeks verkregen worden. De meetresultaten zijn gebaseerd op korte meetperioden (circa 0.5 tot 2.0 uur). Daarnaast is het waterbezwaar niet gemeten maar berekend aan de hand van het vermogen van de pomp. Dit vanwege het slecht functioneren van de watermeters.

Frequentieregelaar en pompen

Het bereik van een elektrisch aangedreven pomp ligt tussen de 10 tot 50 hertz. Door de frequentie te verlagen en daarmee de rotatiesnelheid van de motor, wordt ook de koeler vertraagd. Hierdoor kan oververhitting ontstaan, gedurende de frequentiesturing is het aantal hertz niet verder verlaagd dan 10 hertz. In tabel 6-3 is weergegeven welk berekend debiet de pomp verpompt bij een bepaald aantal hertz.

Frequentie	(Hz)	10	20	30	40	50
Berekend pompdebiet	(m ³ /uur)	12	24	36	48	60

Tabel 6-3. Pompdebieten met de daarbijhorende hoeveelheid hertz.

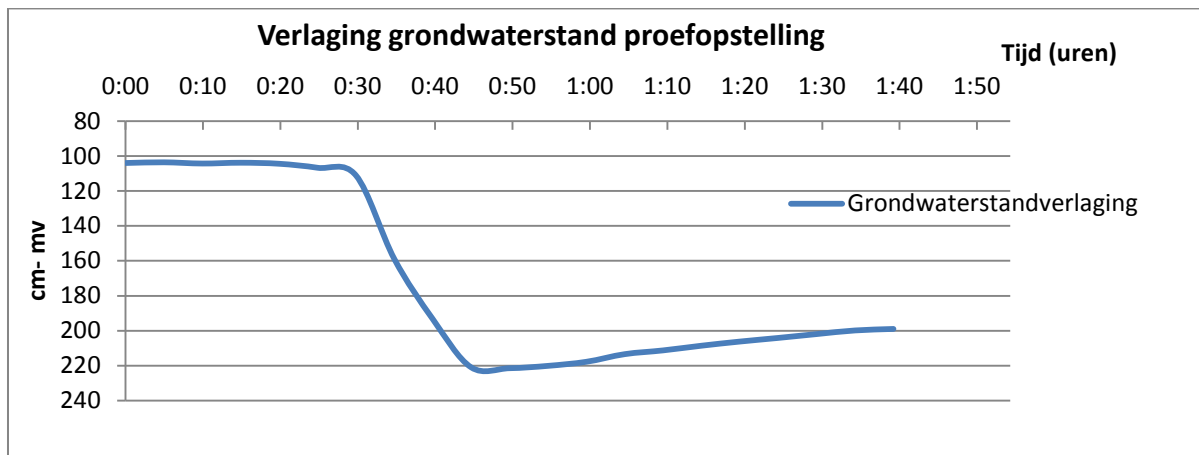
Stuurbuis

Er zijn een tweetal stuurbuizen geplaatst, die elk getest zijn op nauwkeurigheid en betrouwbaarheid. De stuurbuis, geplaatst tussen twee filters, bleek niet nauwkeurig en betrouwbaar genoeg te zijn. Doordat de afstand van de stuurbuis naar de filters (één meter), te klein was ondervond de stuurbuis te veel invloed van de filters. De grondwaterstand in de stuurbuis was te instabiel voor een goede niveaumeting. De stuurbuis in de kern van de bouwkuip fungeerde wel naar behoren. Met behulp van een diver, is de verlaging van het grondwater nauwkeurig gemeten worden.

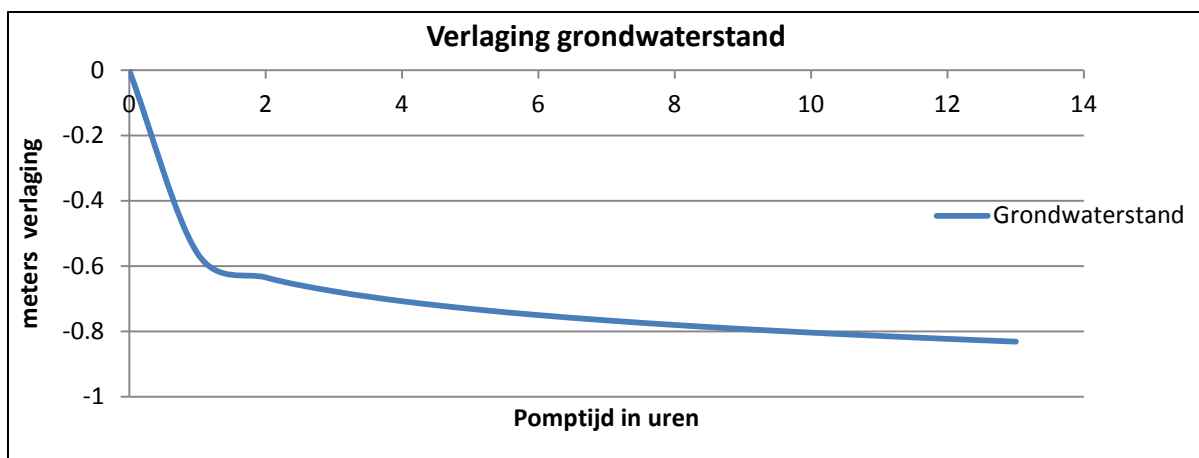
Reactiesnelheid grondwaterstand

Er zijn een drietal testen uitgevoerd naar de reactiesnelheid van de grondwaterstand. Hierbij is onderzocht of de gewenste verlaging kon worden gehaald en met welk berekend waterbezwaar. Verder is de snelheid van het opkomen gemeten, nadat de frequentieregelaar het pompdebiet verlaagd. De grondwaterstanden zijn gedurende deze meetreeksen om de halve minuut gemeten. Hierdoor is een nauwkeurig beeld gevormd van het verlagen en opkomen van de grondwaterstand in de tijd.

Test 1. Tijdens het starten van de eerste test zijn drie pompen zijn met behulp van de frequentieregelaars ingesteld op een maximaal pompvermogen ($60 \text{ m}^3/\text{uur}$), dit is 50 hertz. In grafiek 6-1 is het verloop van de gemeten grondwaterstand weergegeven en in grafiek 6-2 het berekende verloop met behulp van het analytisch model. Gedurende de test is in een zeer korte periode, circa 15 minuten, een verlaging gemeten van circa 2,2 meter ten opzichte van het maaiveld. Dit komt overeen met een verlaging van circa een meter. Nadat deze verlaging behaald is stijgt het grondwater langzaam als gevolg van het gedeeltelijk dichtslibben van de filters, door een te hoge filtersnelheid. De zelfde situatie is ingevoerd in het analytisch model, dat naar 60 minuten een verlaging van 1.65 meter minus maaiveld berekent, dat gelijk is aan een verlaging van 0.65 meter.

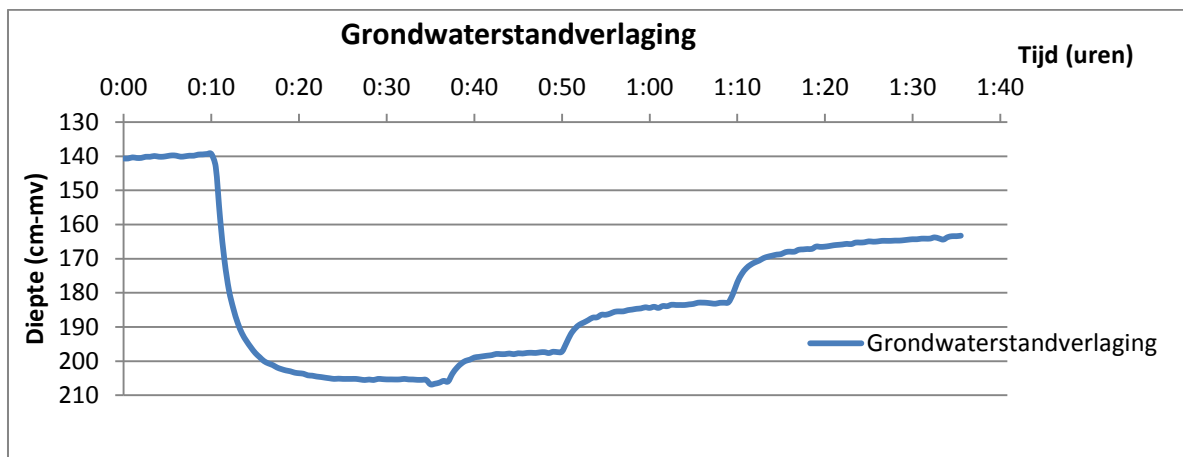


Grafiek 6-1. Gemeten grondwaterstand, onder de berekende grondwaterstandverlaging bij een frequentie van 50 hertz.



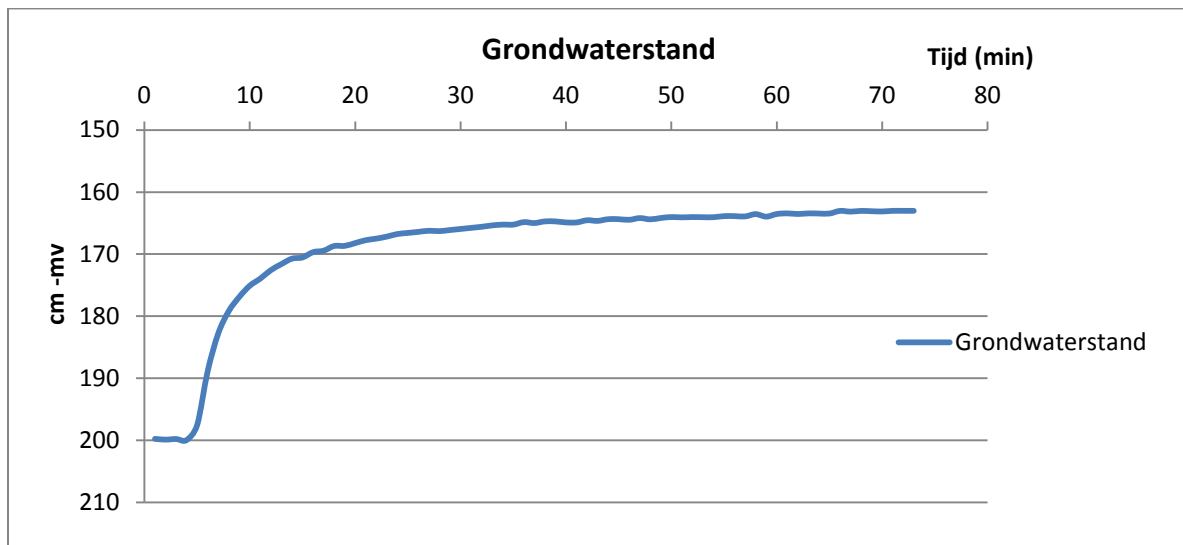
Grafiek 6-2 Berekende grondwaterstandverlaging in model

Test 2. Uiteindelijk is er voor gekozen om alle filters op één pomp aan te sluiten. Hierdoor is het gelukt om dichterbij de gewenste grondwaterstandverlaging te komen van 1,55 meter ten opzichte van het maaiveld. Dit is weergegeven in grafiek 6-3. Door te starten met een maximale pompcapaciteit, wordt de gewenste verlaging gedurende de werktijden in een korte periode behaald. Na 15 minuten is er een relatief stabiele verlaging gerealiseerd van circa 2,05 meter minus maaiveld. Vervolgens is met behulp van de frequentieregelaar het aantal hertz verlaagd met 40% naar 30 hertz (36 m³/uur), waarnaar een verlaging is gerealiseerd van circa 1,97 meter minus maaiveld. Door uiteindelijk de frequentie maximaal te verlagen naar 10 hertz (12 m³/uur) is een verlaging van 1,65 meter minus maaiveld bereikt. Gebleken is dat het pompdebiet niet voldoende gereduceerd kon worden, de gemeten verlaging is 0,1 meter te veel ten opzichte van de gewenste grondwaterstand.

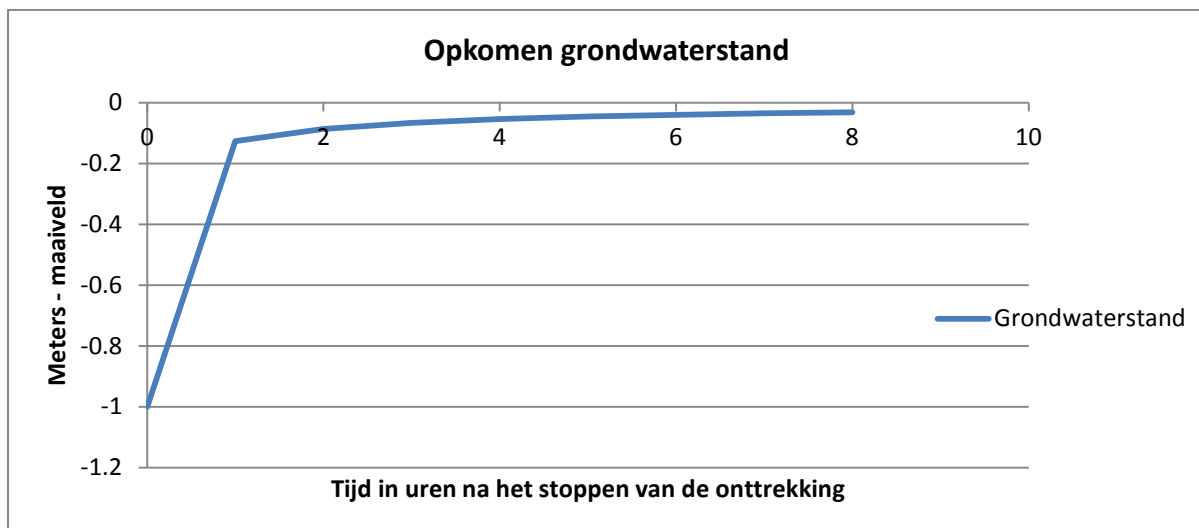


Grafiek 6-3. Verloop grondwaterstand verkregen met het sturen van de frequentie.

Test 3. In de laatste test is met behulp van de frequentieregelaar de frequentie verhoogd naar 50 hertz (60 m³/uur). Na 10 minuten is de frequentie verlaagd naar 10 hertz (12 m³/uur). In grafiek 6-4 is de gemeten grondwaterstand weergegeven en in grafiek 6-5 de resultaten uit het analytisch model. Hieruit blijkt dat na een uur de grondwaterstand opgekomen is naar 1.62 meter minus maaiveld. Het berekende opkomen van de grondwaterstand door het model geeft aan dat in een uur de grondwaterstandverlaging van een meter naar 0.25 meter. Hieruit blijkt dat de gemeten grondwaterstand sneller reageert dan het berekende maar komt minder ver op. De grondwaterstand komt niet hoger dan circa 0.6 meter minus maaiveld. Dit verschil is te verklaren doordat het analytische model uitgaat van het uitzetten van de pomp en niet het sturen van de frequentie ervan.



Grafiek 6-4. Gemeten opkomen van de grondwaterstand.



Grafiek 6-5 Berekende opkomen analytisch model.

Vergelijking met analytisch model

Reactietijd opkomen grondwaterstand

In tabel 6-4 zijn de reactietijden uit de proefopstelling en het analytische model weergegeven. Het analytisch model berekent dat na één uur een verlaging gerealiseerd is van 1.08 meter met een waterbezwaar van 61 m³/uur. Gedurende de proefopstelling is met een debiet van circa 60 m³/uur een verlaging gerealiseerd van 1.2 m binnen 20 minuten. Hieruit blijkt dat het grondwater gedurende de proefopstelling sneller reageert dan berekend met het analytisch model daarnaast komt het berekende waterbezwaar van zowel de pomp als het analytisch model overeen. Vermeld dient te worden dat dit een berekend pompdebiet is en niet een gemeten debiet.

Pomp uren	Opkomen		Waterbezwaar	
	Pilot	Model	Pilot	Model
(t)	(m)	(m)	(t)	(m)
0	0	0	60	61
1	0.39	1.08	12	0
2	0.01	0.14	12	0
3	0.005	0.08	12	0

Tabel 6-4. Het gemeten en berekende opkomen van de grondwaterstand.

Reactietijd verlagen grondwaterstand

In tabel 6-5 zijn de berekende en gemeten verlagingen weergegeven. Ondanks het niet kunnen voltooiën van een meerdaagse meetreeks, valt te concluderen dat de reactietijden van het verlagen, grotendeels overeenkomt met de berekende reactietijd. Daarnaast is bekend dat de verlaging binnen een uur afvlakt en stabiel blijft op een verlaging van 0.65 meter.

Pomp uren	Verlagen		Waterbezwaar	
	Pilot	Model	Pilot	Model
(t)	(m)	(m)	(t)	(m)
0	0	0.00	0	0
1	0.65	0.51	60	61
2	-	0.07	-	61
3	-	0.05	-	61

Tabel 6-5. Het gemeten en berekende verlagen van de grondwaterstand.

6.4 Deelconclusie

Resultaten uit het analytisch model als reikwijdten, verlagingen en de stijghoogten in de stuurbuis, zijn aan de hand van het analytische model getoetst. De reikwijdte verschilde het meest van de resultaten. Namelijk tien m op een lengte van 102 meter en 15 meter op een totale lengte van 72 meter. Dit verschil is te verklaren doordat het analytische model gebruik maakt van een geschatte verlaging bij de filters die doorgerekend wordt met een empirische formule. Het numeriek model hanteert een iteratieve methode om tot een berekende waarde te komen met behulp van een tijdsafhankelijke vergelijking. De verlagingen verschillen onderling minder, namelijk drie centimeter op een verlaging van één meter en zes centimeter bij een verlaging van een halve meter. Dit verschil is het gevolg van het niet toe kunnen passen van onvolkomen bronnen of filters in de besturingschil PMWin. Deze oorzaak heeft dezelfde invloed op de stijghoogten in de stuurbuis, deze verschillen onderling twee centimeter bij een verlaging van één meter en vijf centimeter op een verlaging van een halve meter

Aan de hand van een proefopstelling is het functioneren van een frequentieregelaar en automatische niveaumeting getoetst. Door het niet goed functioneren van de bemaling zijn geen langdurige meetreeksen verkregen. Wel zijn een aantal test uitgevoerd om de reactietijd van de het grondwater te kunnen vergelijken met het analytische model. Het verlagen op laten komen van de grondwaterstand bleek in de proefopstelling sneller te gebeuren. Echter vlakke de verhoging of verlaging van de grondwaterstand sneller af dan berekent doordat de berekeningen uitgingen het volledig stoppen van de bemaling. In de werkelijkheid loopt de bemaling door met een lager debiet.

7 Conclusie

7.1 Conclusie

Op basis van dit onderzoek is antwoord verkregen op de hoofdvraag:

In welke mate reduceert een frequentiegestuurde bemaling het waterbezwaar, de reikwijdte en energieverbruik van een tijdelijke bemaling en op welke wijze kan dit per project berekend worden in een beslistool waarin ook de kosten worden meegenomen?

De reductie op waterbezwaar, reikwijdte en energieverbruik kan berekend worden met de, in dit onderzoek ontwikkelde, beslistool. Voor een gemiddelde situatie, die gebruikt is in dit onderzoek, komt de reductie op het waterbezwaar neer op 4%. Reductie op de reikwijdte bedraagt 5.2% en op energieverbruik 25%. Met deze waarden, die toch gering lijken, is het inzetten van een frequentiegestuurde bemaling een duurzame én kostenefficiënte methode (€8.-).

Op basis van de in dit onderzoek verkregen resultaten zijn de deelvragen hieronder beantwoord.

Deelvraag 1. Waardoor ontstaat het verschil in waterbezwaar tussen frequentiegestuurd- en traditioneel bemalen en waar is een goede werking van een frequentiesturing van afhankelijk?

Doordat de gemiddelde verlaging bij frequentiegestuurd bemalen minder is dan bij traditioneel bemalen wordt het waterbezwaar gereduceerd. Hiernaast wordt door de frequentiesturing de startstroom van pompen weggenomen waardoor minder capaciteit wordt gevraagd van de aanwezige energiebron. Verder wordt de overdimensionering, die berekend wordt als extra veiligheid voor extreme situaties, weggenomen wanneer deze niet nodig is. Deze sturingen zijn afhankelijk van de ingestelde grondwaterstandverlagingen in de computer en de niveaumeting in de stuurbuis. Dit betekent dat een goede monitoring van de onttrekking cruciaal is voor een nauwkeurige frequentiesturing.

Deelvraag 2. Welke invloed heeft wet- en regelgeving op het keuzeproces van tijdelijke bemalingen en de monitoring?

Wet- en regelgeving beïnvloedt bemalingen door de lozingskosten. De lozingskosten worden per waterschap bepaald (gemiddeld € 0.06/m³) en zijn opgenomen in de Keur van het desbetreffende waterschap. Het veranderen van de lozingskosten heeft grote invloed op de kostenefficiëntie en hierdoor op het keuzeproces.

Deelvraag 3. In welke mate nemen het waterbezwaar en de reikwijdte af, als gevolg van het toepassen van een frequentiegestuurde bemaling ten opzichte van een traditionele bemaling?

De mate van reductie op het waterbezwaar en de reikwijdte zijn te berekenen met het analytisch model van de beslistool. Hieruit blijkt dat de gewenste verlaging en de doorlatendheid van de bodem grote invloed heeft op het waterbezwaar en de reikwijdte. Een frequentiegestuurde bemaling reduceert het waterbezwaar sterk naar mate het verschil in de grondwaterstandverlaging na en tijdens werkuren groot wordt. In de voorbeeldsimulatie is een verschil gehanteerd van 0.5 meter, wat een reductie op het waterbezwaar geeft van 7,4%. De reductie op de reikwijdte is in de voorbeeldsimulatie 5.2%. Het sturen van de frequentie bij bemalingen die onttrekken uit een slecht

doorlatende laag heeft geen of weinig invloed op de duurzaamheid. Dit vanwege een te lage reactietijd van het grondwater. Verder dient genoemd te worden dat een frequentiegestuurde bemaling niet altijd een besparing geeft op het energieverbruik. Wanneer geen aggregaat nodig is voor een traditionele bemaling en wel voor een frequentiegestuurde bemaling zullen de energiekosten veelal lager zijn gedurende een traditionele bemaling. Een frequentie gestuurde bemaling reduceert echter het energieverbruik met 25,4% wanneer beide methoden beschikking hebben tot het elektriciteitsnet.

Deelvraag 4. In welke mate nemen de kosten toe of af, wanneer frequentiegestuurd bemalen wordt toegepast in plaats van traditioneel bemalen?

In welke mate de kosten toenemen of afnemen is geheel afhankelijk van de project- en geohydrologische eigenschappen van de bemaling. De kostenverdeling uit de voorbeeldsimulatie geeft weer dat frequentiegestuurd bemalen een totale besparing oplevert van €8,-. De kosten efficiëntie wordt bepaald door de tijdsduur van een project en de verhouding tussen de kostenreducerende factoren en de kostenverhogende factoren. Door de relatief lage lozingskosten(€0.06/m³), installatie(in voorbeeldsimulatie €220)- en huurkosten(€15/dag) is het verschil, in veel situaties, relatief klein.

Deelvraag 5. Komen de resultaten uit het analytische model overeen met de resultaten uit een numeriek model en proefopstelling?

Het toetsen van het analytische model aan een numeriek model is uitgevoerd met ModFlow. Uit deze toetsing is gebleken dat er verschillen zijn in reikwijdte, verlaging onder de bouwkuip en verlaging in de stuurbuis. Het verschil in reikwijdte is gemiddeld 13.1%. Het verschil in verlaging onder de bouwkuip en in de stuurbuis is gemiddeld 2.5%. Naarmate de gewenste verlaging vermindert, lopen de verschillen op (gemiddeld 1.4% ten opzichte van 3.8%).

Voor de toetsing van de beslistool aan de proefopstelling is één project gebruikt. Door het dichtslibben van de filters is het niet mogelijk gebleken een meerdaagse en nauwkeurige meetreeks te genereren. Wel zijn de reactiesnelheden van de grondwaterstand gemeten. Hieruit blijkt dat het op laten komen en verlagen van de grondwaterstand in werkelijkheid sneller verloopt dan berekend met het analytisch model. De verlagingen vlakken echter wel eerder af, als gevolg van het niet uitslaan van de pomp waar het analytische model wel vanuit gaat. De stuurbuis tussen de twee filters bleek niet bruikbaar te zijn doordat de onttrekking van de filters turbulentie veroorzaakte waardoor niet te gebruiken door de drukopnemer van de frequentie-unit.

7.2 Aanbevelingen

Met behulp van de resultaten van dit onderzoek zijn aanbevelingen geschreven. Deze aanbevelingen zijn onderverdeeld in twee groepen: aanbevelingen op de beslistool en aanbevelingen op de toepassing van frequentiegestuurd bemalen. In de volgende paragrafen zijn de aanbevelingen weergegeven.

Analytisch model

Het analytisch model kan verrijkt worden door de grondwaterstandverlaging, gedurende buiten en tijdens werktijden, variabel te maken. In de praktijk zal deze cyclus per project afgestemd worden op de tijden van de werkzaamheden. Dit is van invloed op de rendabiliteit van frequentiegestuurd bemalen.

Zoals genoemd in het rapport zijn de efficiëntie curven van alle aanwezige pompen gelijk genomen. Dit is gedaan vanwege de grote variatie in curven het niet mogelijk maakt dit te automatiseren. Door een overzicht samen te stellen met hierin alle curven van de pompen binnen Koop Bronbemaling, kan de energie besparing nauwkeuriger worden berekend in het analytisch model.

Frequentiegestuurd bemalen is alleen toepasbaar wanneer het materieel, pompen en aggregaten, zorgvuldig op elkaar zijn afgestemd. Doordat het analytisch model het waterbezwaar berekend, is het mogelijk hierbij de minimaal benodigde pompen en aggregaten te berekenen. Op deze manier is de keuze van het materieel onderbouwd en wordt de capaciteit op maat gedimensioneerd. Dit heeft invloed op de installatie- en huurkosten en duurzaamheid van een bemaling.

De resultaten uit het analytisch model zijn in dit onderzoek een enkele keer getoetst aan de hand van een numeriek model. Om meer inzicht te verkrijgen in de mogelijk verschillende resultaten, dient het analytische model vaker getoetst te worden. Door verschillende situaties door te rekenen als sleuven en bouwkuipen, met variërende afmetingen, is het mogelijk een beter beeld te verkrijgen van deze verschillen. Door deze verschillen te vergelijken met situaties in de praktijk waarbij een frequentiegestuurde bemaling is toegepast, is het mogelijk de nauwkeurigheid, de sterkten en de verbeterpunten van het analytische model inzichtelijk te krijgen en waar nodig verbeteringen door te voeren. Het evalueren en terugkoppelen van een toegepaste frequentiegestuurde bemaling is hierbij van groot belang.

Toepassing

Wanneer een frequentiegestuurde bemaling toegepast gaat worden is het nauwkeurig instellen van de frequentieregelaars van groot belang. Ondanks dat de stijghoogte in de beslistool berekend wordt is het mogelijk dat deze verschilt met de werkelijkheid door een sterk variërende bodemlagen of veranderingen in de bemalingsinstallatie. Bij het instellen van de stijghoogte is het noodzakelijk dat de stijghoogte in de kern van de ontgraving is gerefereerd aan de stuurbuis. Dit zal ter plekke vergeleken moeten worden. Veelal dient gedurende het project de frequentieregelaars een aantal keren bijgesteld te worden. Het handmatig bijstellen van de frequentiesturing heeft ook betrekking op de genoemde werktijdencyclus. In welke mate en het aantal keren dat de frequentieregelaars dienen worden bijgesteld, zal verschillen per project.

De locatie van de stuurbuis is per project afhankelijk van praktische factoren als bereikbaarheid en locatie van de frequentie-unit. In de proefopstelling is gebleken dat het plaatsen tussen de filters niet een goede optie is. Er dient nog onderzoek gedaan te worden naar het refereren van een stuurbuis buiten de verlaging, aan een peilbuis in de verlaging alvorens de werkzaamheden zijn begonnen.

8 Discussie

Geohydrologische vergelijkingen

De geohydrologische formules die gebruikt zijn voor de beslistool zijn erkende vergelijkingen en worden veelvuldig in het vakgebied van de bronbemaling toegepast. Echter is bekend dat sommige vergelijkingen beperkingen hebben. Deze beperkingen kunnen zijn dat ze niet geschikt zijn te gebruiken voor korte tijdsduren. Een andere beperking is dat ze sterk kunnen afwijken van de werkelijkheid omdat ze empirisch zijn opgesteld en hierdoor niet geschikt voor alle toepassingen. Toch zijn in dit onderzoek deze vergelijkingen gebruikt omdat ze, zoals hierboven genoemd, soms de enige manier zijn om berekeningen te kunnen maken.

Bewerkingen geohydrologische vergelijkingen

Doordat de geohydrologische vergelijkingen geautomatiseerd dienden te worden gemaakt voor het toepassen in het analytische model, zijn soms aanpassingen gedaan om in alle situaties een uitkomst te kunnen geven. Dat de uitkomst hierdoor kan verschillen van het origineel is een mogelijkheid. Het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse kan bijdragen aan de betrouwbaarheid van het model en de eventuele optimalisering ervan.

Uitvoeren van de proefopstelling

De uitvoering van de proefopstelling is niet verlopen zoals van te voren beoogd. De insteek was dat het analytische model en de beslistool getoetst zouden worden aan de proefopstelling. Dus niet alleen de verlaging en de reactietijden maar ook het dieselverbruik van de aggregaten, elektriciteitsverbruik van de pompen, en het exacte waterbezwaar en reikwijdte. Doordat het dichtslibben van de filters het niet toelieten dit te realiseren zijn de factoren getest die mogelijk waren. Door een extra proefopstelling uit te voeren is een volledige toetsing van het analytisch model en de beslistool mogelijk waarbij ook de berekende kosten getoetst worden.

Bronvermelding

Helpdeskwater. (n.d.) Wetgeving en beleid. Opgeroepen op 8 maart 2014:

<http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wetgeving-beleid/waterwet>

Infomil. (n.d.) Onttrekken van grondwater. Opgeroepen op 10 maart 2014:

<http://www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/handboek-water/activiteiten/oppervalktewater/bronbemaling-lozen/#Onttrekkenvangrondwater>

Infomil. (n.d.) Heffingen op lozingswater. Opgeroepen op 10 maart 2014:

<http://www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/handboek-water/wetgeving/waterwet/financiele/heffingen-algemeen/>

Rijkswaterstaat. (n.d.) Geldigheidsdatum. Opgeroepen op 11 maart 2014.

http://wetten.overheid.nl/BWBR0026845/Hoofdstuk6/3/Artikel63a/geldigheidsdatum_11-02-2014

Infomil. (n.d.) Bronbemaling lozen. Opgeroepen op 15 maart 2014:

<http://www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/handboek-water/activiteiten/oppervalktewater/bronbemaling-lozen/#Lozeninderiolering>

Wetten.overheid (n.d.) Lozingskosten. Opgeroepen op 15 maart 2014:

http://wetten.overheid.nl/BWBR0029789/geldigheidsdatum_11-02-2014#Hoofdstuk3_32_Artikel32

Wetten.overheid (n.d.) Bevoegd gezag. Opgeroepen op 16 maart 2014:

http://wetten.overheid.nl/BWBR0026872/geldigheidsdatum_11-02-2014#Hoofdstuk6_5_Artikel610a

SIKB (n.d.) BRL12000. Opgeroepen op 21 maart 2014:

<http://www.bronbemalen.nl/20>

WTCB (n.d.) Richtlijnen en bemalingen. Opgeroepen op 24 maart 2014:

http://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?dtype=services&doc=tis_sft_richtlijnen_en_bemalingen.pdf&lang=nl

Acacia (n.d.) Grondwaterformules. Opgeroepen op april-juni 2014:

<http://www.grondwatertoolbox.nl/wizard/1>

Bredenoord (n.d.) Verhuurtarieven aggregaat. Opgeroepen op 11 april 2014

<http://www.bredenoord.nl/tarieven/aggregaat>

Acacia (n.d.) Onvolkomen bronnen. Opgeroepen op 24 april 2014:

http://www.grondwatertoolbox.nl/media/references/1.1.3.forcheimerfraanjep99101_onvolkomen.pdf

Acacia (n.d.) Waterbezwaar. Opgeroepen op 24 april 2014:

<http://www.grondwatertoolbox.nl/media/references/1.1.4.theisjacobedelmansbr30.pdf>

Kruseman and the Ridder, (1994) Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. Blz. 193 – 197

Bronbemaling, M.J.Fraanje, 1974 blz. 137 spreidingslengte, blz 100-101 onvolkomenheidsfactor

Bijlage 1













