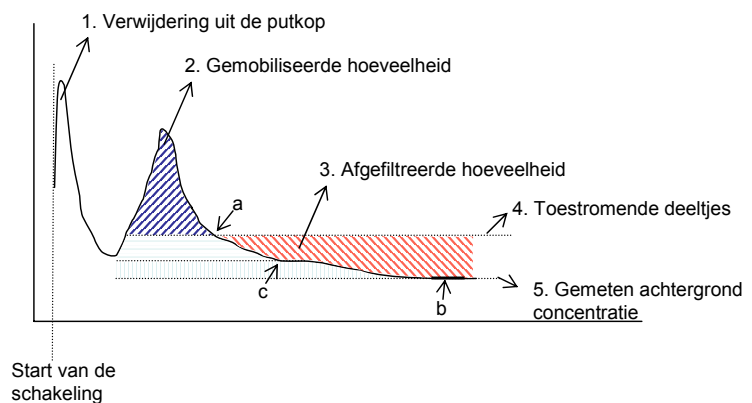


## Naar een verstoppingsvrij puttenveld Tull en 't Waal

Gedrag van deeltjes bij bedrijfsvoering  
(uitgevoerde metingen t/m juli 2006)



**KWR 06.078**  
juli 2006

# **Naar een verstoppingsvrij puttenveld Tull en 't Waal**

Gedrag van deeltjes bij bedrijfsvoering  
(uitgevoerde metingen t/m juli 2006)

© 2006 Kiwa Water Research  
Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag  
worden verveelvoudigd,  
opgeslagen in een  
geautomatiseerd  
gegevensbestand, of openbaar  
gemaakt, in enige vorm of op  
enige wijze, hetzij  
elektronisch, mechanisch,  
door fotokopieën, opnamen,  
of enig andere manier, zonder  
voorafgaande schriftelijke  
toestemming van de uitgever.

**Kiwa Water Research**  
Groningehaven 7  
Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein

Tel. 030 606 95 11  
Fax 030 606 11 65  
[www.kiwawaterresearch.eu](http://www.kiwawaterresearch.eu)

# Colofon

**Titel**

Naar een verstoppingsvrij puttenveld Tull en 't Waal  
Gedrag van deeltjes bij bedrijfsvoering (uitgevoerde metingen  
t/m juli 2006)

**Projectnummer**

30.6043.400

**Projectmanager**

Marc Balemans

**Opdrachtgever**

Hydron Midden Nederland

**Kwaliteitsborger(s)**

Jan Willem Kooiman

**Auteur(s)**

Kees van Beek, Inke Leunk en Martijn Tas (Hydron A&D)

Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de opdrachtgevers van het Contractonderzoekproject/adviesproject. Eventuele verspreiding daarbuiten vindt alleen plaats door de opdrachtgever zelf.

# Voorwoord

## **Aanleiding: verstoppingsvrij puttenveld Tull en 't Waal**

Het puttenveld Tull en 't Waal van Hydron Midden-Nederland (thans Vitens) verstopt ernstig. Wegens verbouwing en grootschalige aanpassing wil Vitens nagaan of het mogelijk is om het puttenveld "verstoppingsvrij" te maken. Binnen het BTO, het BTS putverstoppingsonderzoek en afzonderlijke adviesopdrachten is hiervoor een methodiek uitgedacht. Achtergronden en aanpak zijn beschreven in 'Putverstopping en deeltjes in grondwater: diagnose en aanzet voor therapie' (BTO 2005.046). Binnen het project 'naar een verstoppingsvrij puttenveld Tull en 't Waal' wordt deze methodiek getoetst wat resulteert in concrete adviezen aan Vitens om de putverstopping op het puttenveld Tull en 't Waal te beheersen.

Met ingang van 1 oktober 2006 zijn Hydron Midden-Nederland en Hydron Advies en Diensten samengegaan met Vitens. In deze rapportage is er voor gekozen om de oude benaming te gebruiken, aangezien het inhoudelijke onderzoek voor 1 oktober 2006 uitgevoerd en afgerond was.

## **Deze rapportage**

Voorliggende rapportage vormt een vervolg op de rapportages waarin de putschakelingen, aanleg van putten, de specifieke volumestroom, de duur van de onttrekking en de hoeveelheid verwijderde deeltjes is beschreven. Deze rapportage beschrijft de resultaten van het onderzoek van januari tot juli 2006. Omdat deze rapportage de eindrapportage vormt, wordt ook het gehele onderzoek geëvalueerd.

## **Deze rapportage**

In voorliggende rapportage is de uitvoering van de experimenten met de daarbij verkregen resultaten op puttenveld Tull en 't Waal gedurende de periode januari tot oktober 2005 vastgelegd. Het betreft de resultaten van de aanleg van de putten 33, 34 en 35, de achtergronden en implementatie van de putschakeling en de meting van de specifieke volumestroom van alle putten.

## **Opdracht aan Kiwa Water Research**

Hydron heeft Kiwa Water Research opdracht gegeven om na te gaan hoe het puttenveld Tull en 't Waal 'verstoppingsvrij' gemaakt kan worden, het benodigde onderzoek hiervoor uit te voeren en praktische handreikingen op te stellen.

De belangrijkste opbrengst van dit project is een advies voor een optimale bedrijfsvoering (onttrekkingscapaciteit en schakelfrequentie) van de pompputten op Tull en 't Waal, gericht op een minimale verstopping.

## **Uitgevoerde werkzaamheden**

Om te komen tot het hiervoor genoemde resultaat zijn op puttenveld Tull en 't Waal gedurende de periode juni 2004 – juli 2006 de volgende metingen uitgevoerd:



- in alle putten continue meting van de stijghoogten. Uit de resultaten van deze metingen kan het verloop van de afpompings worden bepaald,
- continue registratie van de putschakelingen. Uit de resultaten van deze registratie kan de tijdsduur van de afzonderlijke onttrekkings- en rustperiodes worden berekend,
- deeltjestellingen. Om de verkregen resultaten van bovengenoemde metingen te kunnen verklaren en te onderbouwen zijn regelmatig deeltjestellingen uitgevoerd.

De resultaten van de gegevens zijn niet alleen afzonderlijk maar juist in samenhang geïnterpreteerd. De voortgang van het onderzoek, de resultaten en vervolgstappen zijn voortdurend besproken en geëvalueerd met de betrokken medewerkers, en in workshops gepresenteerd.

### **Rapportage**

De resultaten van het gehele onderzoek is in 5 rapportages beschreven. De verkregen resultaten van de metingen zijn geëvalueerd en in drie rapporten vastgelegd:

- KWR 06.076 Naar een verstoppingsvrij puttenveld Tull en 't Waal; Resultaten van uitgevoerde experimenten bij aanleg en bedrijfsvoering (januari - oktober 2005);
- KWR 06.077 Naar een verstoppingsvrij puttenveld Tull en 't Waal; Putverstopping, deeltjes en schakelen (uitgevoerde metingen januari - december 2005);
- KWR 06.078 Naar een verstoppingsvrij puttenveld Tull en 't Waal; Gedrag van deeltjes bij bedrijfsvoering (uitgevoerde metingen t/m juli 2006).

In het tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer H<sub>2</sub>O is een artikelenreeks gepubliceerd over het onderzoek, de aanleiding, de aanpak en de resultaten. De reeks bestond uit 4 artikelen in H<sub>2</sub>O 2 en 3 van 2007 en is te beschouwen als de samenvatting van het onderzoek. Een bundeling van deze 4 artikelen is in een apart rapport opgenomen:

- KWR 07.017 Naar een verstoppingsvrij puttenveld Tull en 't Waal; Samenvatting.

Om de resultaten van het onderzoek ook voor de overige medewerkers van Hydron Midden-Nederland gemakkelijk toegankelijk te maken, is een zakboekje opgesteld. Hierin zijn tevens richtlijnen voor chemische putverstopping opgenomen:

- KWR 06.079 Richtlijnen voor het voorkomen en beheersen van putverstopping.

### **Projectteam**

De werkzaamheden zijn uitgevoerd door een projectteam bestaande uit medewerkers van Hydron Advies en Diensten, Hydron Midden-Nederland en Kiwa Water Research.

Het projectteam bestond uit:

Gertjan Doedens - Regiomanager en Opdrachtgever Hydron-Midden Nederland

Floor Oskam - Teamleider Hydron Midden- Nederland

Nico van der Wurf – Procesauditor Hydron Midden- Nederland  
Paul Niekus –Proceauditor Hydron Midden- Nederland  
Rob van der Horst –Procesauditor Hydron Midden- Nederland  
Rob Breedveld – Specialist Watervoorziening, Hydron Advies en Diensten  
Martijn Tas – Gegevensverwerking stijghoogtemetingen, Hydron Advies en Diensten

Jan Willem Kooiman – Projectmanager Kiwa Water Research (tot februari 2005)

Marc Balemans – Projectmanager (vanaf februari 2005), Adviseur putmanagement Kiwa Water Research

Kees van Beek – Expert putverstopping en deeltjes Kiwa Water Research

Hendrik Beverloo – Veldmedewerker, uitvoering deeltjestellingen Kiwa Water Research

Inke Leunk – Hydroloog, data handling Kiwa Water Research

### **Tenslotte**

Tijdens uitvoering van het onderzoek zijn de inzichten voor preventie en beheersing van mechanische putverstopping verder ontwikkeld. Deze inzichten zijn mede door inzet van het projectteam tot stand gekomen. Wij zijn de leden van het projectteam zeer erkentelijk voor hun inzet en de discussies. Wij danken Hydron Midden-Nederland voor de geboden mogelijkheden om deze opdracht uit te kunnen voeren.

December 2006

Marc Balemans

Kees van Beek.



# Samenvatting

## *Putverstopping*

Resultaten van deeltjestellingen hadden aanwijzingen opgeleverd dat met putschakelen het optreden van putverstopping kan worden tegengegaan, dat wil zeggen zolang een onttrekkingsperiode een bepaalde duur niet overschrijdt, zal geen verstopping optreden. Deze putschakeling is onder praktijkomstandigheden op het puttenveld Tull en 't Waal getoetst. Tull en 't Waal is een ernstig verstoppend puttenveld. Na introductie van het putschakelen trad op het puttenveld geen putverstopping meer op.

## *Carrouselchakeling*

Ten behoeve van het putschakelen is door Hydron MN een uniek putschakelschema ontwikkeld. In dit schema zijn de putten ingedeeld in 5 carrouselgroepen, elk bestaande uit 3 putten. Binnen een carrousel worden de putten gelijk belast; tussen de carrouselen bestaan verschillen. Met behulp van dit carrousel schema kan aan de onttrekking een willekeurige maximum duur worden gesteld.

Een carrouselduur van 3 uur, waarbij de putten ook regelmatig 6 uur in bedrijf waren, voorkwam het optreden van putverstopping. Gedurende 6 weken is de carrouselduur op 1 en vervolgens op 6 uur ingesteld. Deze kortere en langere duur lieten geen verbetering of verslechtering zien van de putten. Gezien de relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande bedrijfsperiode of van de voorgaande rustperiode is de duur van 3 uur een correcte keuze.

Bij de indeling in carrouselgroepen zijn verschillende benaderingen mogelijk: alle carrouselgroepen gelijk belasten of verschillen in belasting van de carrouselgroepen te accentueren. Aangezien de verstoppingsgevoeligheid van alle putten niet gelijk is, verdient de laatste optie de voorkeur.

Op de in het onderzoek betrokken putten zijn pompproeven uitgevoerd met een capaciteit kleiner of gelijk aan de normale capaciteit. Gedurende deze pompproeven is 1 tot 2 weken continu onttrokken. Het is opvallend dat deze lange continue onttrekking niet tot een verslechtering van de betrokken putten heeft geleid. Blijkbaar heeft een incidentele overbelasting geen nadelig effect op een gezonde put.

Op het puttenveld Tull en 't Waal wordt frequent kort geschakeld. Dit frequent schakelen heeft de experimenten waarschijnlijk nadelig beïnvloed (na een korte uitschakeling worden geen deeltjes gemobiliseerd, en een korte aanschakeling verhindert de remobilisatie van deeltjes).

## *Optimalisatie (maximalisatie) putcapaciteit*

Tijdens deze pompproeven zijn deeltjestellingen uitgevoerd. De deeltjesconcentratie bleek tot de normale putcapaciteit nagenoeg constant, om bij grotere capaciteit iets toe te nemen. Deze geringe correlatie tussen

putcapaciteit en deeltjesconcentratie vormt een aanwijzing dat grotere onderwaterpompen kunnen worden geïnstalleerd.

### **Monitoring**

De toestand van de putten kan nauwkeurig worden gevolgd met behulp van continu registrerende drukopnemers. Met behulp van de resultaten van deze drukopnemers kan bij een eventuele verslechtering van een put snel worden ingegrepen. Aanbevolen wordt deze monitoring te optimaliseren naar registratie-interval, uitlees-interval en wijze van verwerking.

### **Gedrag deeltjes in onttrokken grondwater**

Uit het onderzoek bleek dat niet alleen de duur van de onttrekkingsperiode van belang is, maar ook de duur van de rustperiode. Blijkbaar treedt gedurende de rustperiode op de boorgatwand een herrangschikking (remobilisatie) van geaccumuleerde deeltjes op, waardoor bij een volgende aanschakeling de geaccumuleerde deeltjes geheel of gedeeltelijk kunnen worden verwijderd. Dit effect kan mogelijk worden versterkt door gedurende de rustperiode een kleine volumestroom te infiltreren.

Tijdens de uitvoering van de experimenten zijn voortdurend deeltjestellingen uitgevoerd. Bij oude, verstopte putten bleek geen relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande onttrekkingsperiode; bij nieuwe putten een zwakke relatie.

Wel laat de deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater tussen de putten grote verschillen zien: de hoogste en de laagste concentratie wordt aangetroffen in de oude, verstopte putten.

Een put kan niet worden gekarakteriseerd door één deeltjesconcentratie; de concentratie varieerde gedurende de onttrekking. Vermoedelijk neemt de deeltjesconcentratie gedurende onttrekking voortdurend af, en wordt het concentratieniveau bepaald door de mate van verstoring bij aanschakelen van de onderwaterpomp, en door verstoringen ten gevolge van het schakelen van de pompen in de omringende putten.

Niet alleen de deeltjesconcentratie van de verschillende putten is verschillend, ook de deeltjesgrootteverdeling laat verschillen zien: de fractie grove deeltjes is in het onttrokken grondwater van de oude verstopte putten groter dan in de nieuwe, intensief ontwikkelde putten. Dit verschil kan worden toegeschreven aan het verschil in capaciteit van de geïnstalleerde onderwaterpompen: hoe groter de capaciteit van de onderwaterpomp des te groter de erosieve kracht van het onttrokken grondwater, en des te groter de bijdrage van grove deeltjes.

Hoe lager de concentratie van deeltjes in het onttrokken grondwater, des te minder deeltjes bij aanschakelen van de put worden verwijderd. Blijkbaar wordt het verwijderd aantal deeltjes bepaald door de aantal deeltjes dat op de boorgatwand is afgefilterd en niet door de capaciteit van de onderwaterpomp. Ook deze waarneming vormt een aanwijzing dat grotere onderwaterpompen kunnen worden geïnstalleerd (of dat de duur van de onttrekkingsperiode kan worden verlengd). Een complicerende factor hierbij

is de onbekendheid met de verdeling van de afgefilterde deeltjes over de lengte van het putfilter.

### ***Putaanleg***

Uit het onderzoek blijkt het belang van de duur van de rustperiode voor de verwijdering van geaccumuleerde deeltjes. Deze waarneming kan ook van toepassing zijn op het ontwikkelen van nieuwe putten: lange rustperiodes gevolgd door korte onttrekkingsperiodes zouden dan gunstiger zijn dan hoogfrequent schakelen. Deze bedrijfsvoering kan ook worden toegepast na het in gebruik nemen van de putten.

Uit balansberekeningen van deeltjes blijkt dat circa de helft van de met het onttrokken grondwater aangevoerde deeltjes wordt afgefilterd op de boorgatwand, op de nieuwe put 35 mogelijk minder. Deze waarneming vormt een bevestiging van de gedachte dat het volledig ontwikkelen van een put mechanische verstopping tegen gaat.

### ***Aanknopingspunten voor optimalisatie van de onttrekking***

Deeltjesconcentratie en deeltjesgrootteverdeling bieden aanknopingspunten voor de bepaling van de verstoppingsgevoeligheid van putten, en daardoor voor de optimalisatie van de onttrekking op puttenvelden. Om deze aanknopingspunten geschikt te maken voor de praktijk, zijn meer kengetallen van (andere) putten(velden) nodig.



# Inhoud

	<b>Voorwoord</b>	<b>1</b>
	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
	<b>Inhoud</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Uitvoering van de experimenten</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>Specifieke volumestroom van de putten</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Putschakelen en afpomping</b>	<b>17</b>
4.1	Stijghoogtemetingen	17
4.2	Putschakelingen	18
4.3	Putschakeling en afpomping	21
4.4	Evaluatie	25
<b>5</b>	<b>Putschakelen en verwijderd aantal deeltjes</b>	<b>27</b>
5.1	Inleiding	27
5.2	Definitie	27
5.3	Uitvoering	29
5.4	Relatie verwijderd aantal deeltjes en duur voorgaande bedrijfsperiode	31
5.4.1	Berekening verwijderd aantal deeltjes	31
5.4.2	Evaluatie relatie verwijderd aantal deeltjes en voorgaande bedrijfsperiode	35
5.5	Relatie verwijderd aantal deeltjes en duur voorgaande rustperiode	36
5.5.1	Resultaten van de metingen	36
5.5.2	Evaluatie van de metingen	40
5.6	Korte schakelingen	40
<b>6</b>	<b>Gedrag van deeltjes in grondwater</b>	<b>45</b>
6.1	Inleiding	45
6.1	Concentratie van deeltjes en deeltjesgrootteverdeling in onttrokken grondwater	45
6.2	Volumestroom en deeltjesconcentratie	48
6.3	Accumulatie van deeltjes op de boorgatwand	52
6.3.1	Tellingen tijdens normale bedrijfsvoering	52
6.3.2	Tellingen tijdens pompproeven	62
6.3.3	Evaluatie	64
6.4	Aanknopingspunten voor de bedrijfsvoering	68



<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>71</b>
7.1	Conclusies	71
7.2	Aanbevelingen	74
<b>Bijlage 1:</b>	<b>Specifieke volumestroom</b>	<b>75</b>
<b>Bijlage 2:</b>	<b>Verloop van de afpompings</b>	<b>77</b>
<b>Bijlage 3:</b>	<b>Kengetallen van de bedrijfsvoering</b>	<b>93</b>
<b>Bijlage 4:</b>	<b>Volumestroom en deeltjes</b>	<b>97</b>
<b>Bijlage 5:</b>	<b>Putschakeling en afpompings</b>	<b>107</b>

# 1 Inleiding

## *Aanleiding*

Het puttenveld Tull en 't Waal (Hydron Midden Nederland) wordt geplaagd door het optreden van mechanische verstopping. Dit optreden van putverstopping vormt een bedreiging voor de continuïteit van de onttrekking, en brengt hoge kosten met zich mee voor monitoring en regeneratie.

Onderzoek naar voorkomen en gedrag van deeltjes in onttrokken grondwater heeft geresulteerd in de volgende werkhypothese: Indien bij het aanschakelen van de onderwaterpomp al het materiaal dat gedurende de voorafgaande onttrekkingsperiode rond de put is geaccumuleerd, wordt verwijderd, zal geen verstopping optreden. Indien niet al het geaccumuleerde materiaal wordt verwijderd zal wel verstopping optreden. Met andere woorden: door een optimale combinatie van capaciteit van de onderwaterpomp en duur van de afzonderlijke onttrekkingsperioden (schakelfrequentie) kan het optreden van putverstopping worden tegengegaan.

Tull en 't Waal is het eerste puttenveld waar deze werkhypothese onder praktijkomstandigheden wordt getoetst.

## *Doelstelling*

De doelstellingen van het onderzoek zijn:

1. Het komen tot een verstoppingvrij puttenveld Tull en 't Waal. Hierbij zal in deze fase van het onderzoek de nadruk liggen op de schakelfrequentie, en minder op de onttrekkingcapaciteit.
2. Het onderbouwen van de optimale schakelfrequentie door het bepalen van de relatie tussen verwijderde hoeveelheid deeltjes en duur van de voorgaande onttrekkingsperiode.
3. Het vaststellen van het effect van maximale putontwikkeling op concentratie van deeltjes in het onttrokken grondwater en op de verstoppingsnelheid.
4. Het verzamelen van nadere informatie omtrent gedrag van deeltjes in het onttrokken grondwater onder andere ten behoeve van optimale onttrekkingcapaciteit, optimale filterstelling en verschillen in gedrag tussen puttenvelden. Hierbij kan gedacht worden aan:
  - a. concentratie van deeltjes als functie van onttrekkingcapaciteit. Dit geeft nadere informatie omtrent de optimale onttrekkingcapaciteit.
  - b. verdeling van de concentratie van deeltjes over de lengte van het putfilter. Dit geeft nadere informatie omtrent de optimale stelling van het putfilter.
  - c. onderzoek naar de aard en samenstelling van de deeltjes. Dit kan eventuele verschillen in gedrag van deeltjes tussen verschillende puttenvelden verklaren.

### *Leeswijzer*

November 2004 is het gedeelte van het onderzoek dat onder leiding van Nico van der Wurf is uitgevoerd, gerapporteerd. Dit betreft voornamelijk de aanleg van de putten 33, 34 en 35, de achtergronden en implementatie van de putschakeling en de meting van de specifieke volumestroom van alle putten. Februari 2006 is het onderzoek over 2005 gerapporteerd. In deze rapportage is veel aandacht besteed aan de relatie tussen verwijderde hoeveelheid deeltjes en duur van de voorgaande onttrekkingsperiode.

Voorliggende rapportage vormt een vervolg op beide voorgaande rapportages, en beschrijft de resultaten van het onderzoek van januari tot juli 2006. Omdat deze rapportage de eindrapportage vormt, wordt ook het gehele onderzoek geëvalueerd.

In de volgende hoofdstukken zullen achtereenvolgens aan de orde komen de algehele opzet van het onderzoek (hoofdstuk 2), de specifieke volumestroom van de putten (hoofdstuk 3), de relatie tussen putschakelen en afpompings (hoofdstuk 4), de relatie tussen putschakelen en verwijderde hoeveelheid deeltjes (hoofdstuk 5), het gedrag van deeltjes, waarin naar relaties tussen de resultaten van deeltjestellingen worden gezocht en de resultaten op onderlinge consistentie worden beoordeeld (hoofdstuk 6) en ten slotte de conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 7).

## 2 Uitvoering van de experimenten

Het onderzoek wordt onder normale bedrijfsomstandigheden uitgevoerd, met andere woorden bij de bedrijfsvoering wordt geen rekening gehouden met de experimenten. Het onderzoek is volledig gericht op het verstoppingvrij maken van het puttenveld. Consequenties van putschakelen op bijvoorbeeld de zuivering blijven dus buiten beschouwing.

Bij de uitvoering van het onderzoek zijn drie lijnen gevolgd, namelijk

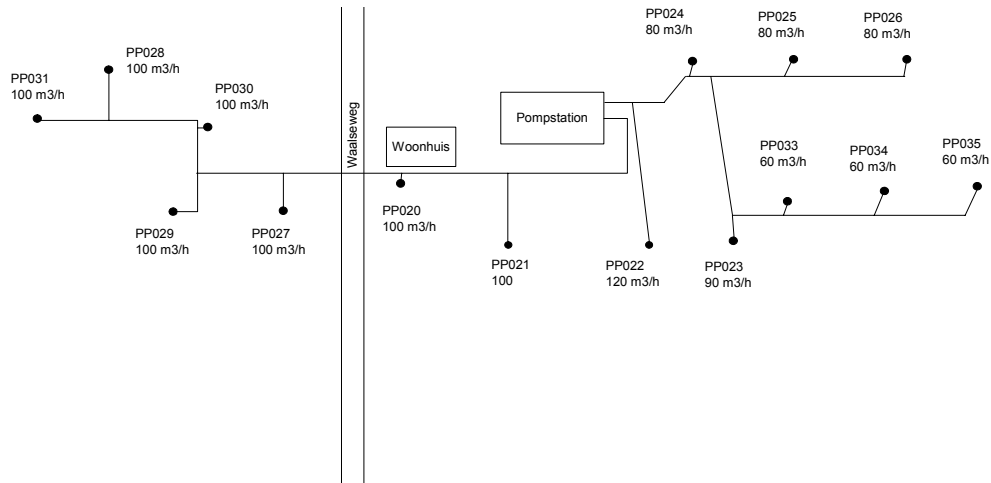
- (a) Continue meting van de stijghoogte in de putten. Deze metingen geven informatie over het al of niet optreden van putverstopping. Deze metingen worden maandelijks uitgelezen: mocht verstopping optreden, dan kan snel worden ingegrepen.
- (b) Continue registratie van de putschakelingen. Deze metingen geven nauwkeurige informatie over de duur van de opeenvolgende onttrekkings- en rustperioden.
- (c) Deeltjestellingen. Om de doelstellingen te toetsen en de resultaten van de metingen te onderbouwen worden regelmatig deeltjestellingen uitgevoerd. De resultaten van deze tellingen worden verwerkt tot deeltjes-massabalansen.

De resultaten van de deeltjestellingen zijn ook van belang om informatie te verkrijgen over verschillen in deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater binnen het puttenveld. Indien blijkt dat binnen het puttenveld grote verschillen in deeltjesconcentratie bestaan, kan het zijn dat voor iedere put een andere optimale combinatie bestaat van capaciteit en schakelfrequentie.

Vanwege de verbouwing van het pompstation Tull en 't Waal worden binnenkort drie putten verlaten. Deze putten zijn afgeschreven; op deze putten worden experimenten uitgevoerd die tot verstopping kunnen leiden. Ter vervanging van deze te verlaten putten zijn inmiddels drie nieuwe putten aangelegd en in bedrijf genomen. Deze nieuwe putten zijn maximaal ontwikkeld.

Het onderzoek wordt in het bijzonder op deze uitersten uitgevoerd: op de oude, ernstig verstopte putten en op de nieuwe, maximaal ontwikkelde putten.

Afbeelding 2.1 geeft een overzicht van de ligging van de putten op het puttenveld Tull en 't Waal.



Afb. 2.1: Ligging van de putten op het puttenveld Tull en 't Waal, met capaciteit van de geïnstalleerde onderwaterpomp.

Alle putten zijn uitgerust met onderwaterpompen met een capaciteit van 100 m<sup>3</sup>/h. Bij de aanvang van het onderzoek is in put 22 een grotere onderwaterpomp gehangen, namelijk 150 m<sup>3</sup>/h. De nieuwe putten 33, 34 en 35 zijn in gebruik genomen met onderwaterpompen met een capaciteit van 70 m<sup>3</sup>/h.

Eind 2004 was de automatische stijghoogte meting operationeel. Om snel op het eventueel optreden van putverstopping te kunnen reageren, worden deze meters maandelijks uitgelezen en verwerkt.

Augustus 2005 was het carrousel putschakelprogramma operationeel.

Omdat de resultaten van het onderzoek tot dusverre succesvol zijn (het optreden van putverstopping wordt volledig onderdrukt), zijn begin 2006 enige wijzigingen in de uitvoering van het onderzoek aangebracht.

1. Variatie in putcapaciteit. In januari 2006 is de capaciteit van de onderwaterpompen in de putten 33, 34 en 35 vergroot van 70 m<sup>3</sup>/h naar respectievelijk 100, 100 en 150 m<sup>3</sup>/h, en van put 22 teruggebracht van 150 naar 100 m<sup>3</sup>/h. Omdat de capaciteit van enkele putten werd veranderd, was het noodzakelijk om ook het carrouselprogramma aan te passen (?).
2. Variatie in onttrekkingsduur. Gedurende de maand maart 2006 is de onttrekkingsduur van de putten vergroot van 3 uur naar 6 uur, in de maand april 2006 verkleind naar 1 uur. Vervolgens is weer met de ingestelde onttrekkingsduur van 3 uur gewerkt.

### 3 Specifieke volumestroom van de putten

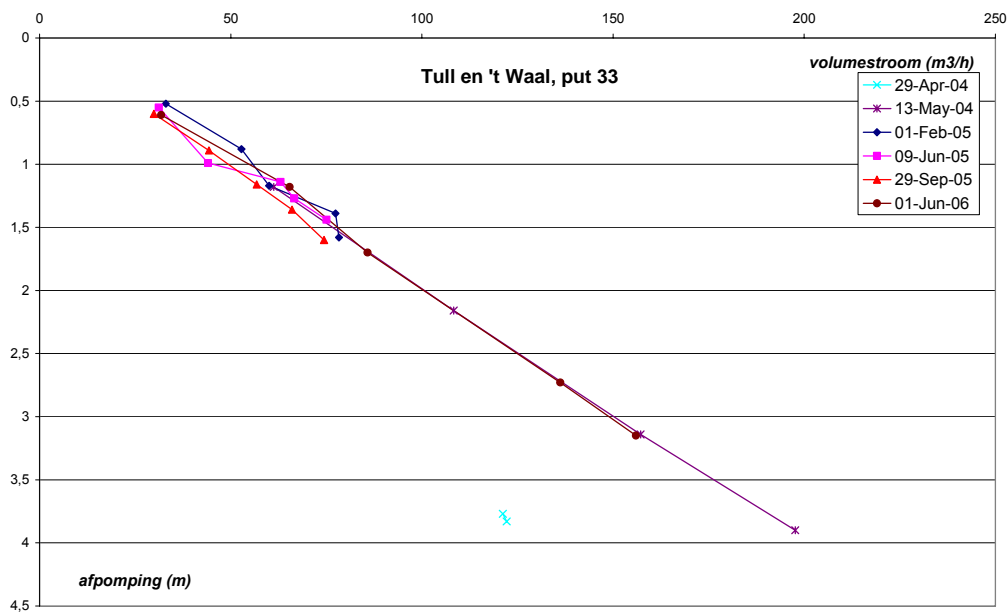
#### *Uitvoering*

De toestand van een put wordt weergegeven door de specifieke volumestroom, dat wil zeggen de volumestroom  $Q$  (in  $\text{m}^3/\text{h}$ ) gedeeld door de afpompings  $\Delta s$  (in m). Deze informatie kan met een kleine pompproef worden verkregen, waarbij de volumestroom wordt gevarieerd en de bijbehorende afpompings wordt gemeten.

Deze metingen worden door Hydron MN in eigen beheer uitgevoerd, waardoor de resultaten van de metingen onderling vergelijkbaar zijn.

#### *Resultaten*

De specifieke volumestroom wordt bepaald door de gemeten waarden van volumestroom en afpompings tegen elkaar uit te zetten. Vervolgens wordt met behulp van een rechte door de oorsprong en (een recht gedeelte van) de verkregen meetpunten de specifieke volumestroom berekend. Een en ander is weergegeven in onderstaande afbeelding.



Afb. 3.1: Specifieke volumestromen van put 33 op de aangegeven tijdstippen.

Er waren aanwijzingen dat put 33 ten gevolge van de experimenten enigszins verstopt zou zijn geraakt. Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat dit niet het geval is.

In onderstaande tabel zijn voor alle putten de aldus berekende waarden voor de specifieke volumestroom samengevat, zie ook bijlage 1.

Tabel 3.1: Samenvatting van het verloop van de specifieke volumestromen (in m<sup>3</sup>/h per m afpompings) van de putten van puttenveld Tull en 't Waal

datum	Putnr														
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35
oplevering	56,8	58,7	42,4	57,9	45,0	56,0	58,4	87,0	51,5	84,0	69,1	88,9	50,1	63,1	67,6
jul 03						39,8									
mrt 04	46,2	40,8	23,7		30,5	35,8	35,5		25,2	57,0	36,0	74,5			
jul 04			26,3	14,7											
sep 04				37,2				47,4							
jan 05					26,7	35,8									
feb 05		17,2	33,8	± 39			39,5	49,6	27,5	57,3	37,0				
jun 05	18,2	21,6	12,1		30,2	35,1	± 37	50,0	29,0	56,4	42,6	62,0	52,1	59,5	65,4
okt 05	19,3	21,0	16,2	40,8	30,0	35,3	39,5	53,9	30,8	55,4	42,8	69,5	48,5	62,6	66,8
jun 06	22,1	21,5	22,3	42,0	34,2	38,6	42,4	57,0	30,8	63,0	46,6	71,5	49,5	62,2	66,3
% tov oplevering	39	37	53	72	76	69	73	66	60	75	67	80	99	98	98

### Evaluatie

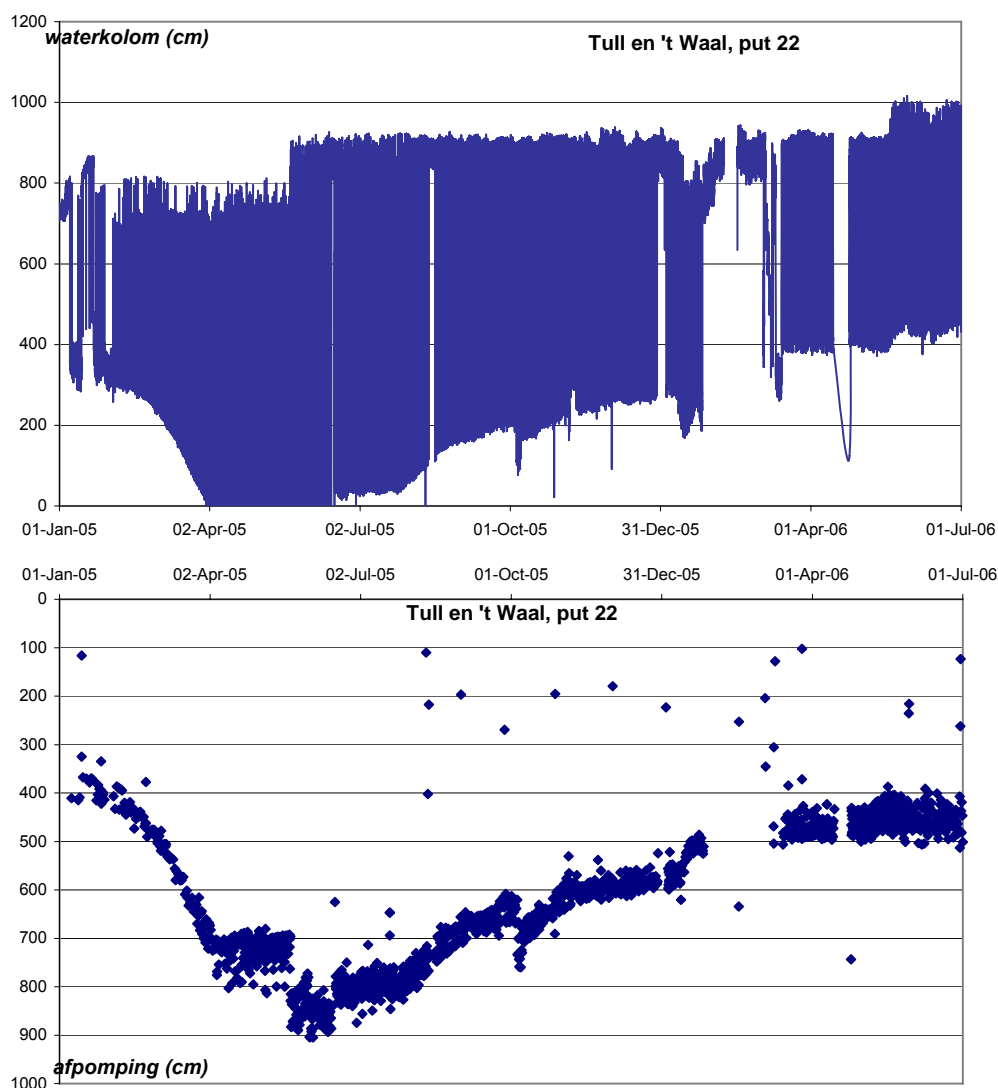
Uit bovenstaande tabel blijkt duidelijk dat de putten sedert de start van de experimenten, half 2004, niet zijn verslechterd, maar zijn verbeterd of gelijk gebleven.

## 4 Putschakelen en afpompings

### 4.1 Stijghoogtemetingen

De stijghoogtemetingen zijn in 2006 op dezelfde wijze als in 2005 voortgezet. De resultaten van deze metingen (48/dag) zijn in bijlage 2 in afbeeldingen weergegeven.

Onderstaande afbeelding toont als voorbeeld het verloop van de gemeten stijghoogten en de daaruit berekende afpompings van put 22.



Afb. 4.1: Verloop van de gemeten stijghoogten, in cm waterkolom, en de daaruit berekende afpompings van put 22. Omdat de stijghoogte tijdens bedrijf tussen 1 april en 1 augustus 2005 buiten het bereik liep, is de berekende afpompings over deze periode niet correct.



In het verloop van de stijghoogte in bovenstaande afbeelding vallen enkele bijzonderheden op.

In het verloop van de stijghoogte zijn enkele “blanco” perioden aanwezig. Deze blanco perioden worden veroorzaakt door het verloren gaan van de resultaten van de metingen.

Uit de afbeelding blijkt tevens dat de gemeten stijghoogte gedurende de periode 1 april tot 1 augustus 2005 de horizontale as snijdt. De stijghoogte is gedurende deze periode buiten zijn bereik geraakt. De berekende afpompingen gedurende periode zijn dus niet correct.

De gemeten stijghoogte vertoont op 22 mei 2005 aan de bovenzijde een stapvormige verandering. Dit wordt veroorzaakt door het dieper hangen van de stijghoogtemeter.

De gemeten stijghoogte vertoont tussen 3 tot 14 maart 2006 grote fluctuaties. Deze fluctuaties worden veroorzaakt door de uitvoering van een pompproef. Het verschil in stijghoogte (afpomping) is na 14 maart 2006 kleiner dan in de periode daarvoor. Dit wordt veroorzaakt door het inhangen van een kleinere onderwaterpomp.

De bovenzijde van de gemeten stijghoogten vormt de stijghoogte in rust, de onderzijde de stijghoogte in bedrijf. Het verschil tussen beide geeft de afpomping. De gemeten stijghoogten worden beïnvloed door het al of niet in bedrijf zijn van naastgelegen putten. Deze onderlinge beïnvloeding resulteert in een “karteling” aan de boven- en onderzijde van de stijghoogtemetingen: gedurende de ene meting stond een naastgelegen put aan, gedurende de andere meting uit.

De aanwezigheid van een “karteling” aan de boven- en aan de onderzijde van de stijghoogtemetingen, maakt het beoordelen van de aanwezigheid van een verloop in de afpomping lastig. Daarom is uit de resultaten van de stijghoogtemetingen de afpomping berekend door twee opeenvolgende waarden van elkaar af te trekken. Indien het verschil groter was dan 100 cm, is het verschil gelijk gesteld aan de afpomping. Ook dit verschil resulteert in een spreiding omdat op deze manier de afpomping tussen 1 en 29 minuten na aanschakelen van de onderwaterpomp wordt weergegeven.

Omdat de afpomping binnen 29 minuten nog niet zijn definitieve waarde zal hebben bereikt, is de aldus berekende waarde voor de afpomping kleiner dan het verschil in stijghoogte tijdens bedrijf en in rust.

Afbeelding 4.1 toont een grote temporele variatie in afpomping: tot 1 april 2005 neemt de afpomping sterk toe. Tussen 1 april en 1 augustus 2005 moet de toename in de afpomping zijn omgeslagen in een afname van de afpomping, om vervolgens tot 25 januari 2006 voortdurend te blijven afnemen. Na 14 maart 2006 blijft de afpomping nagenoeg constant. Deze temporele variatie in het verloop van de afpomping hangt samen met de putschakeling.

#### **4.2 Putschakelingen**

In augustus 2005 werd het automatisch carrouselchakelprogramma operationeel. In dit programma worden qua capaciteit vergelijkbare putten in 5 carrousel van 3 putten ingedeeld. Vervolgens worden de putten uit een

carrousel aan verschillende niveaugroepen van de reinwaterkelder toebedeeld, zie onderstaande tabel. Met dit programma is het mogelijk de individuele draaiperioden van de putten te reguleren.

*Tabel 4.1: Indeling van de putten in carrousel en groepen gedurende de periode augustus 2005 tot januari 2006. Het gearceerde gedeelte is dagelijks in gebruik, groep 5 soms, en de overige groepen alleen bij calamiteiten.*

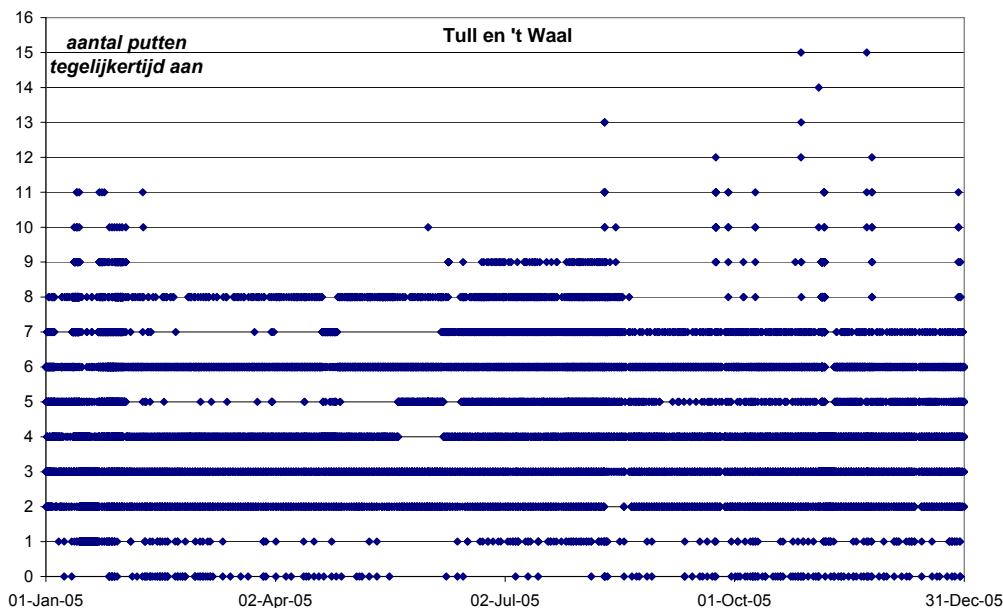
Carrousel	Putten	Niveaugroepen reinwaterkelder								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	20, 21, 22	X			X			X		
II	24, 25, 26					X	X			X
III	23, 27, 28	X					X			X
IV	29, 30, 31			X				X		X
V	33, 34, 35		X		X				X	

Zoals reeds aangegeven zijn in januari in meerdere putten andere onderwaterpompen, met andere capaciteit, gehangen. Dit heeft geen gevolgen voor de carrouselindeling. Ook na januari 2006 is bovenstaande indeling aangehouden.

Om het effect van een langere en van een kortere onttrekkingsperiode op de afpompings te onderzoeken is de carrouselperiode van 3 uur van 17 maart tot 20 april 2006 verlengd tot 6 uur, en van 22 april tot 29 mei 2006 verkort tot 1 uur.

Tijdens het onderzoek was gebleken dat de putten frequent schakelden, dat wil zeggen zeer kort in of uit bedrijf waren (tot minder dan één minuut). Frequent schakelen wordt niet als normaal putschakelen beschouwd. Daarom is om het frequent schakelen van de putten tegen te gaan in januari 2006 (?) een langere vertragingperiode ingesteld.

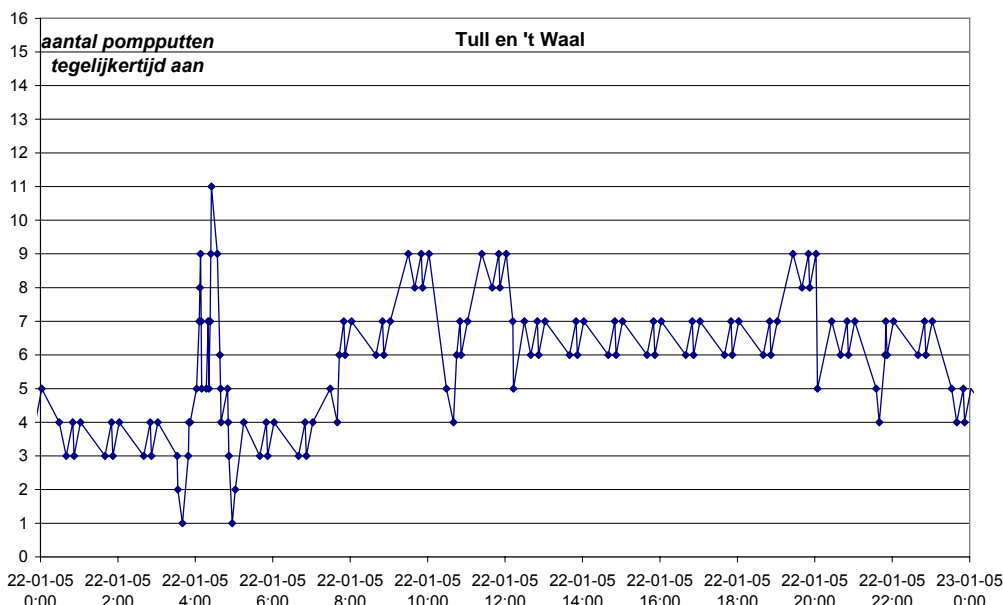
Om een indruk van de frequentie van schakelen te verkrijgen, is over 2005 in afbeelding 4.2 weergegeven het aantal putten dat tegelijkertijd in bedrijf is.



Afb. 4.2: Aantal putten dat tegelijkertijd in bedrijf is over 2005.

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat het aantal putten dat tegelijkertijd in bedrijf is varieert tussen 0 en 7 à 9 en enkele keren 15. In de afbeelding kunnen de verschillende schakelprogramma's die gedurende 2005 in bedrijf waren, worden herkend: tot half februari een programma waarbij regelmatig veel putten werden ingeschakeld, vanaf begin juni een ander programma, en tenslotte vanaf augustus het carouselprogramma.

Om een betere indruk te verkrijgen van het aantal schakelingen is in onderstaande afbeelding het aantal putten weergegeven dat tegelijkertijd op één dag in bedrijf was, namelijk op 22 januari 2005.



Afb. 4.3: Aantal putten dat tegelijkertijd in bedrijf was op 22 januari 2005.

Bijlage 4 geeft de relatie tussen schakelen en deeltjesconcentratie. Ook uit deze bijlage kan informatie omtrent schakelen worden verkregen.

Uit afbeelding 4.2 en 4.3 blijkt dat op puttenveld Tull en 't Waal frequent wordt geschakeld, niet alleen overdag, maar ook 's nachts. Het is niet bekend in hoeverre deze korte schakelingen de resultaten van de experimenten hebben beïnvloed. Bijlage 3 geeft een overzicht van kengetallen van de bedrijfsvoering: bedrijfsuren per maand per put, aantal schakelingen per maand per put, aantal onttrekkingsperioden langer dan 3 uur per maand per put en aantal rustperioden langer dan 6 uur per maand per put. Uit de bijlage blijkt het verschil in bedrijfsvoering met handmatige programmering en de carrousel-schakeling per augustus 2005. Na introductie van de carrousel-schakeling is de putschakeling binnen een groep nagenoeg identiek.

#### **4.3 Putschakeling en afpompning**

In deze paragraaf wordt de informatie van de afpompning gekoppeld aan de informatie van de putschakeling.

De resultaten van de experimenten zijn in bijlage 4 in afbeeldingen samengevat.

In deze afbeeldingen zijn weergegeven het verloop van de afpompning gedurende de onderzoeksperiode en de lengte van de draaiuren, dat wil zeggen de duur van de opeenvolgende onttrekkingsperioden. Omdat tijdens de evaluatie de indruk ontstond dat ook de lengte van de rustperiode van belang is, zijn ook deze perioden weergegeven, dat wil zeggen de duur van de opeenvolgende perioden van stilstand.

Opvallend in deze afbeeldingen zijn de vele kortdurende schakelingen over de gehele onderzoeksperiode, zowel korte aan-, als korte uitschakelingen.

Ten behoeve van de bespreking van de resultaten zijn de putten in drie groepen onderverdeeld:

1. Ernstig verstopte putten. De putten 20, 21 en 22 zijn ernstig verstopt; de specifieke volumestroom van deze putten varieert tussen 40 en 50% van de waarde bij oplevering. De experimenten kunnen bij deze putten leiden tot een verbetering en tot een verslechtering van de toestand.
2. Matig verstopte putten. De putten 23 tot en met 31 zijn matig verstopt; de specifieke volumestroom varieert tussen 60 en 80%. De experimenten kunnen bij deze putten leiden tot een verslechtering, terwijl maar een geringe mogelijkheid tot verbetering aanwezig is.
3. Nieuwe putten. De putten 33, 34 en 35 zijn niet verstopt. De experimenten kunnen hier alleen maar leiden tot een verslechtering.

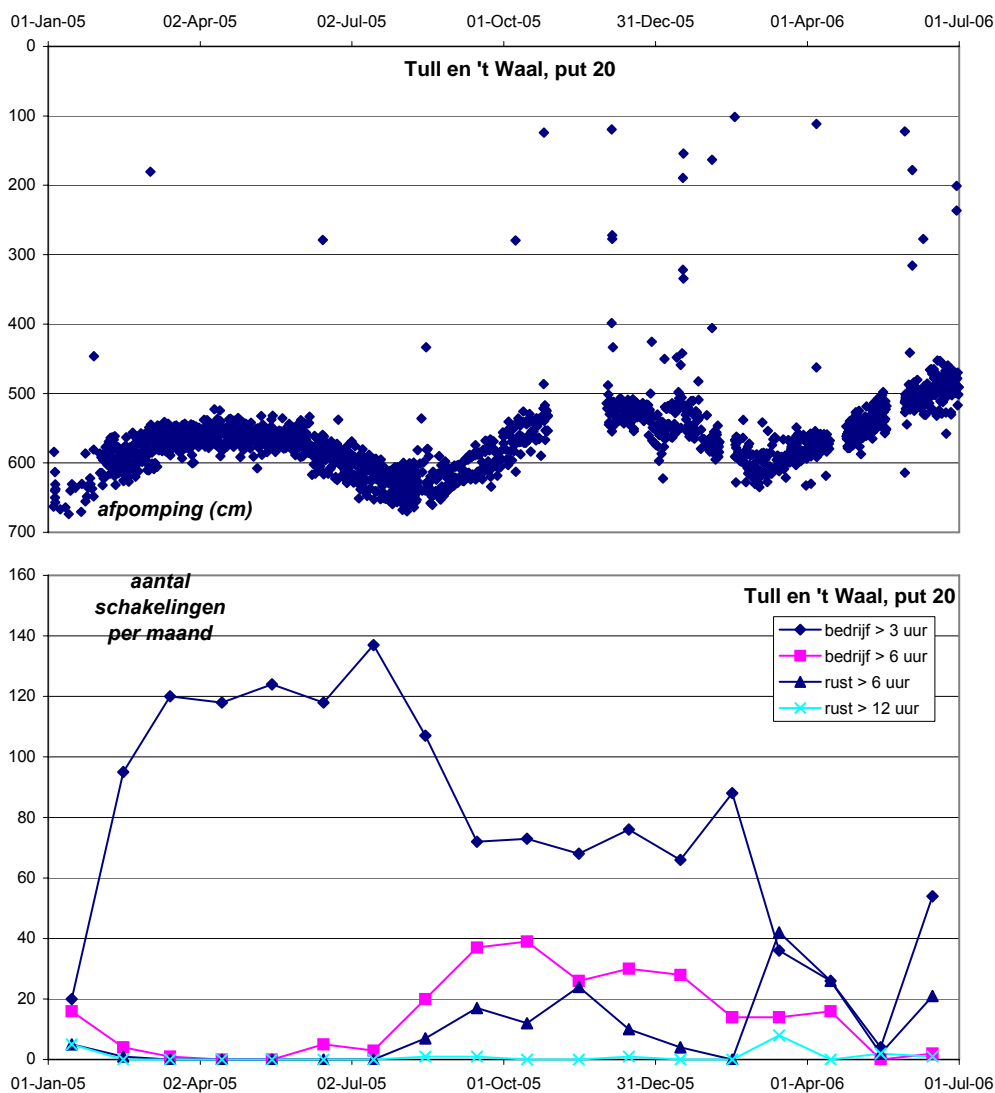
##### ***Ernstig verstopte putten***

Uit bijlage 4 blijkt dat de oude, ernstig verstopte putten in de loop van de tijd de grootste variatie in afpompning vertonen, namelijk circa 2 m voor put 20, circa 2,5 m voor put 21 en meer dan 3,5 m voor put 22. Daarom is voor deze putten de relatie onderzocht tussen verloop van de afpompning en putschakeling. Wat betreft putschakeling is onderscheid gemaakt tussen:

- a. aantal bedrijfsperioden per maand langer dan 3 uur,

- b. idem langer dan 6 uur
- c. aantal rustperiodes per maand langer dan 6 uur
- d. idem langer dan 12 uur.

Het resultaat van deze uitwerking is in onderstaande afbeeldingen weergegeven, te beginnen met put 20.

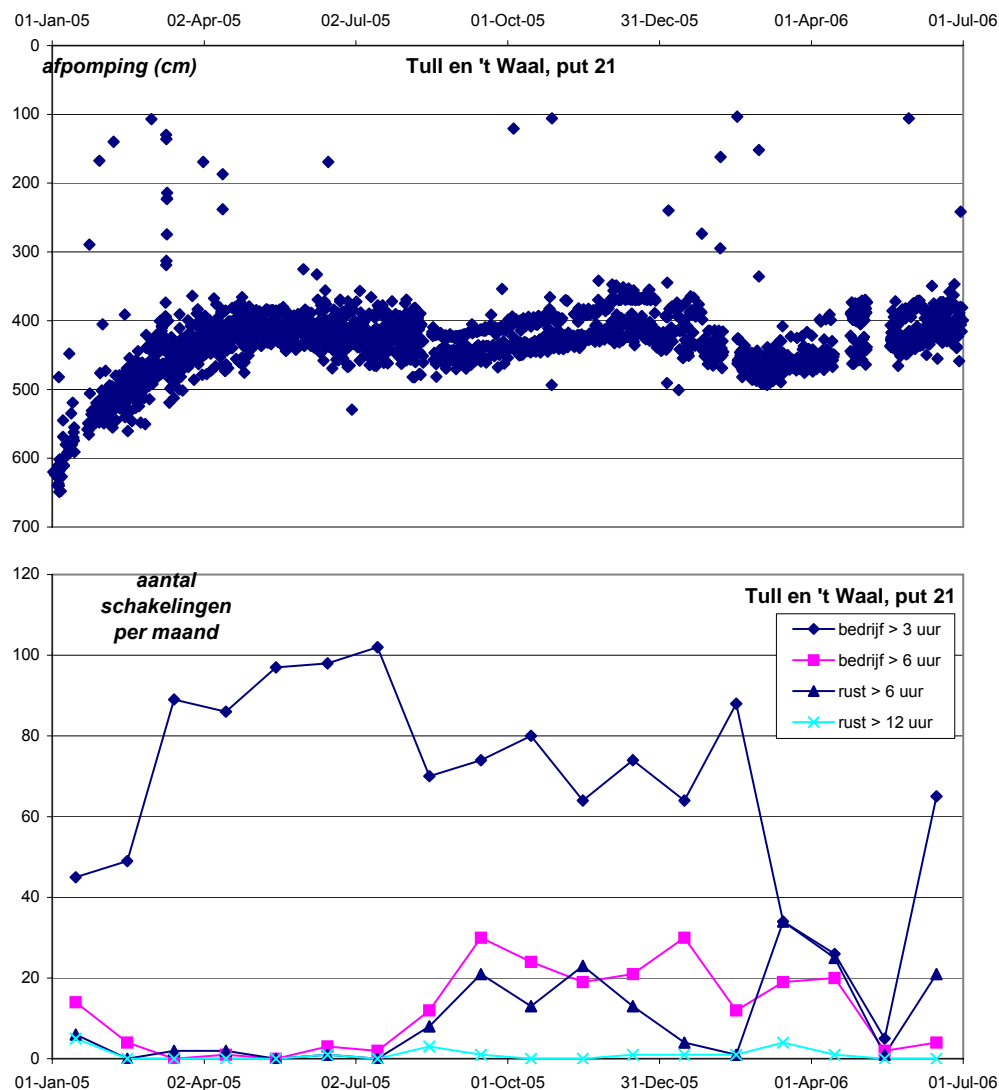


Afb. 4.4: Verloop van de afpompings (bovenste afbeelding) in put 20, en per maand het aantal bedrijfsperiodes (onderste afbeelding) respectievelijk langer dan 3 uur en 6 uur en het aantal rustperiodes respectievelijk langer dan 6 uur en 12 uur

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de afpompings vanaf juli 2005 afneemt zodra het aantal rustperiodes langer dan 6 uur toeneemt. Dat qua volume van onttrekking de afname in bedrijfsperiodes langer dan 3 uur meer dan wordt gecompenseerd door bedrijfsperiodes langer dan 6 uur, is blijkbaar niet relevant. Vanaf december 2005 neemt de afpompings weer toe, als bij gelijkblijvende onttrekking het aantal rustperiodes langer 6 uur afneemt. Vanaf maart 2006 neemt de afpompings weer af bij gelijktijdige toename van

het aantal rustperiodes langer dan 6 uur (en afname van het aantal onttrekkingsperiodes langer dan 3 uur).

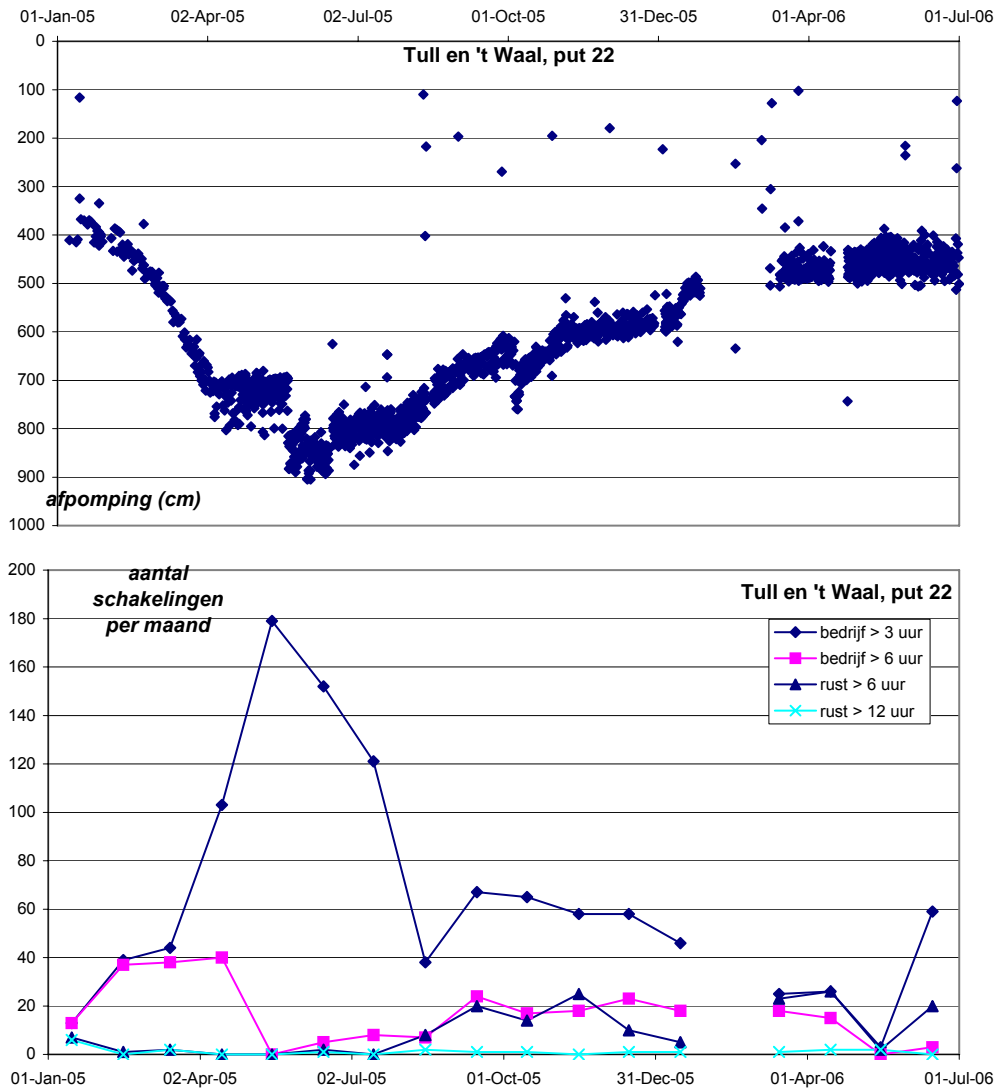
Onderstaande afbeelding toont de situatie van put 21. Het beeld in deze afbeelding is vergelijkbaar met dat van put 20.



Afb. 4.5: Verloop van de afpomping (bovenste afbeelding) in put 21, en per maand het aantal bedrijfsperiodes (onderste afbeelding) respectievelijk langer dan 3 uur en 6 uur en het aantal rustperiodes respectievelijk langer dan 6 uur en 12 uur

Opvallend in bovenstaande afbeelding is de toename van de afpomping in jan 2006 bij gelijkblijvend aantal onttrekkingsperiodes langer dan 3 en dan 6 uur, maar bij afnemend aantal rustperiodes langer dan 6 uur. Wederom een aanwijzing die op het belang wijst van het aantal en van de duur van de rustperiodes.

Onderstaande afbeelding toont de situatie van put 22.

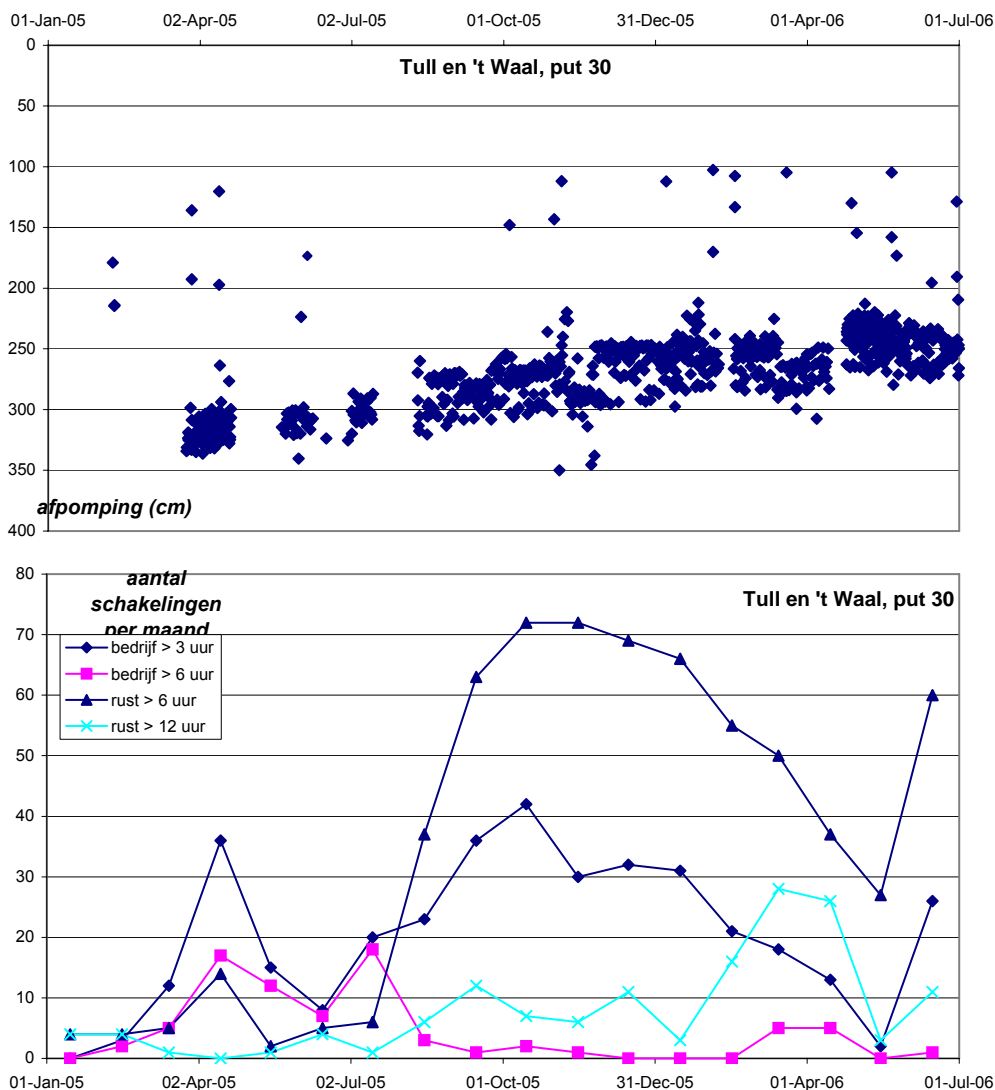


Afb. 4.6: Verloop van de afpompings (bovenste afbeelding) in put 22, en per maand het aantal bedrijfsperiodes (onderste afbeelding) respectievelijk langer dan 3 uur en 6 uur en het aantal rustperiodes respectievelijk langer dan 6 uur en 12 uur.

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de put tot juni 2005 zwaar wordt belast; er zijn geen rustperiodes langer dan 6 uur, en de afpomping neemt sterk toe. Vanaf juni 2005 wordt de put minder zwaar belast, en vanaf juli 2005 neemt het aantal rustperiodes langer dan 6 uur toe, en neemt de afpomping af. Weer een aanwijzing dat niet alleen het aantal en de duur van de bedrijfsperiodes van belang is, maar ook het aantal en de duur van de rustperiodes.

**Matig verstopte putten**

Als voorbeeld van een matig verstopte put wordt hier de situatie van put 30 gepresenteerd.



Afb. 4.7: Verloop van de afpompings (bovenste afbeelding) in put 30, en per maand het aantal bedrijfsperiodes (onderste afbeelding) respectievelijk langer dan 3 uur en 6 uur en het aantal rustperiodes respectievelijk langer dan 6 uur en 12 uur.

Ook uit bovenstaande afbeelding van put 30 blijkt dat langere rustperiodes een gunstig effect hebben op de afpomping.

#### 4.4 Evaluatie

Uit bovenstaande volgt dat een carouselperiode van 3 uur goed voldoet. De langere periode van 6 uur en de kortere periode van 1 uur hebben op het oog geen effect gehad op het verloop van de afpomping.

Wel blijkt dat niet alleen de lengte van de bedrijfsperiode van belang is, maar evenzeer (en misschien nog zelfs meer) de lengte van de rustperiode: hoe langer de rustperiode, des te beter voor de put.

Opvallend is dat de pompproef van februari – maart 2006, waarbij gedurende 1 à 2 weken continu is onttrokken, op het oog geen nadelig effect heeft gehad op het verloop van de afpomping. De pompproef is uitgevoerd met de aanwezige ingehangen onderwaterpomp, waardoor de maximum onttrekkingscapaciteit niet veel hoger kan zijn dan tijdens normale



bedrijfsvoering, en een groot deel van de tijd met een kleinere capaciteit is onttrokken. Wel heeft de put na afloop van de pompproef nog enige dagen stilgestaan, voordat hij weer in bedrijf werd genomen.

Blijkbaar kunnen putten incidentele ongunstige bedrijfsperioden zonder nadelige effecten doorstaan.

# 5 Putschakelen en verwijderd aantal deeltjes

## 5.1 Inleiding

### *Aanleiding*

In de rapportage over 2005 zijn resultaten gepresenteerd van indicatieve berekeningen van het aantal deeltjes dat bij het aanschakelen van een put wordt verwijderd. Deze berekeningen waren handmatig uitgevoerd, en daarom beperkt van omvang. Doel van deze berekeningen was het al of niet verwerpen van de hypothese dat er een relatie bestaat tussen verwijderde hoeveelheid deeltjes bij aanschakelen van de put en de lengte van de voorgaande onttrekkingsperiode.

Tijdens de uitvoering van deze berekeningen werden aanwijzingen gevonden dat het gedrag van deeltjes in het onttrokken grondwater niet alleen beïnvloed wordt door de lengte van de onttrekkingsperiode, maar ook door de lengte van de rustperiode.

### *Doelstelling*

Nadere evaluatie van de relatie tussen schakelfrequentie en verwijderd aantal deeltjes.

### *Uitvoering*

De berekeningen van de aantallen verwijderde deeltjes zijn met behulp van Matlab herhaald. Bij berekeningen die met behulp van Matlab worden uitgevoerd, is het gemakkelijk waarden voor parameters te variëren. Op deze wijze kan snel een indruk worden verkregen van het belang en de gevoeligheid van de verschillende variabelen. In deze herhaalde evaluatie wordt in het bijzonder aandacht besteed aan de bepaling van de evenwichtsconcentratie van deeltjes in het onttrokken grondwater.

## 5.2 Definitie

Afbeelding 5.1 geeft het (theoretische) verloop van de concentratie van deeltjes in het onttrokken grondwater. De eerste piek in concentratie bestaat uit deeltjes die in de putkop/monsterkraan worden gemobiliseerd. Deze deeltjes zijn daar tijdens de voorgaande onttrekkingsperiode vastgelegd. (Tijdens onttrekking ontstaat een evenwicht tussen vastlegging en mobilisatie van deeltjes op de wand van de putbuis etc.) De tweede piek in concentratie bestaat uit deeltjes gemobiliseerd van de boorgatwand. Tijdens de voorgaande onttrekkingsperiode zijn deze deeltjes uit het toestromende grondwater door de boorgatwand afgefilterd. Vervolgens neemt de concentratie deeltjes af naar de gemeten achtergrondconcentratie. Deze gemeten achtergrondconcentratie is niet gelijk aan de werkelijke achtergrondconcentratie, omdat een gedeelte van de meegevoerde deeltjes op de boorgatwand achterblijft.

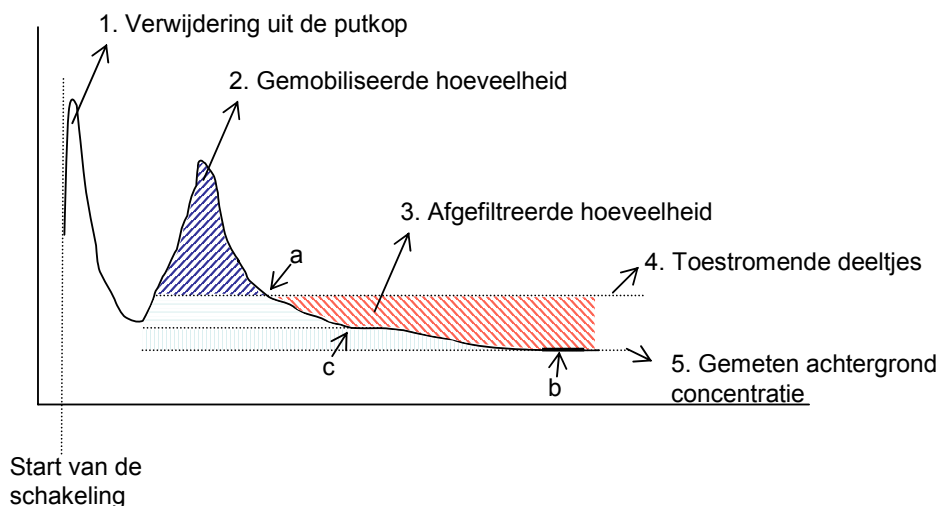
In afbeelding 5.1 zijn tevens de gemobiliseerde en de afgefilterde hoeveelheid deeltjes aangegeven. Een maat voor de gemobiliseerde hoeveelheid deeltjes wordt gevormd door het oppervlak boven de werkelijke concentratie en de gemeten concentratie, voor de afgefilterde hoeveelheid door het oppervlak onder de werkelijke toestromende concentratie en de gemeten concentratie.

Probleem is dat de werkelijke concentratie van deeltjes in het toestromende grondwater niet bekend is. Deze moet dus benaderd worden. Voor deze benadering kan gekozen worden uit de volgende surrogaten:

1. De achtergrondconcentratie is gelijk aan het "knikpunt" in het verloop van de gemeten concentratie. De oppervlakte boven deze waarde is een maat voor de verwijderde hoeveelheid deeltjes (a).
2. Het constante verloop in de gemeten concentratie vormt een maat voor de werkelijke achtergrondconcentratie (a+b).
3. De achtergrondconcentratie is gelijk aan de concentratie die wordt gemeten na een vast tijdsinterval na het aanschakelen van de put, bijvoorbeeld de gemiddelde concentratie tussen 50 en 60 minuten na aanschakelen, of tussen 75 en 100 minuten (a+c).

In de keuze van beide concentraties speelt een subjectief element mee; daarom zullen de resultaten van alle benaderingen variabel zijn. En dat in alle gevallen de concentratie na een vast tijdsinterval representatief zou zijn voor de werkelijke concentratie is ook maar de vraag.

Dat in alle benaderingen niet de correcte waarde wordt berekend voor het verwijderd aantal deeltjes, is niet doorslaggevend, zolang maar steeds dezelfde "fout" wordt gemaakt, waardoor de resultaten wel onderling vergelijkbaar zijn.



Afbeelding 5.1: Wijze van berekening van het verwijderd aantal deeltjes. Scheef gearceerd verwijderde hoeveelheid berekend uit "knikpunt" (a), schief en horizontaal gearceerd berekend uit vast tijdsinterval (a+b), en schief, horizontaal en verticaal gearceerd berekend uit evenwichtsconcentratie (a+b+c).

### 5.3 Uitvoering

#### *Bruikbaarheid van de meetresultaten*

Bij het onderzoek zijn alleen deeltjes groter dan 1,5 µm beschouwd. De deeltjes van 1 tot 1,5 µm zijn buiten beschouwing gelaten, omdat dit de kleinste fractie is die het apparaat kan meten, waardoor in deze fractie de grootste kans aanwezig is op verstoringen.

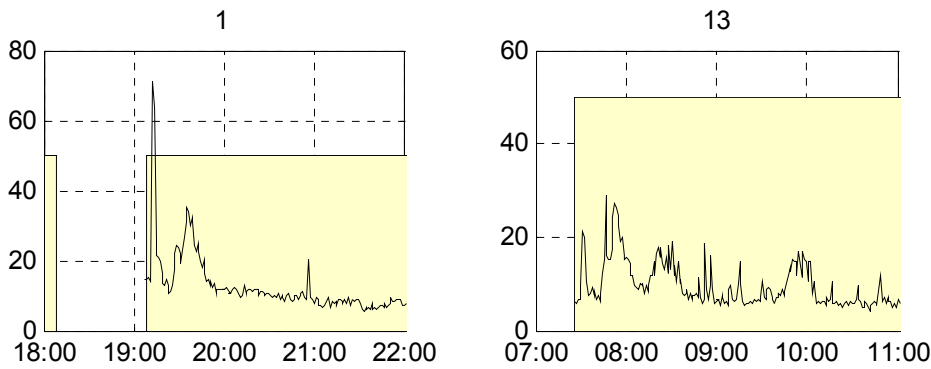
Er zijn op 5 putten deeltjestellingen uitgevoerd. Op het oog is bekeken welke resultaten bruikbaar zijn voor onderzoek. Het resultaat van deze beschouwing is in onderstaande tabel samengevat.

Tabel 5.1: *Bruikbaarheid van de deeltjestellingen*

Put	Periode	Apparaat	Bruikbaarheid
Put 21	april 05	Onbekend	Meting van 1 dag met 3 pieken, dit geeft te weinig informatie en is daarom onbruikbaar.
	jan 06	PAMAS6728	Bruikbaar
	10 - 20 mrt 06	PAMAS7608	Bruikbaar
	20 - 24 mrt 06	PAMAS6728	
Put 22	jan 06	PAMAS7608	Bruikbaar
	mrt 06	PAMAS6728	Zeer verstoorde meting (vooral in het kleine bereik) daardoor onbruikbaar.
Put 26	okt-nov 05	PAMAS6728	Slechts enkele schakelingen langer dan 30 minuten, daardoor onbruikbaar.
Put 33	mrt 05	PAMAS6728	Bruikbaar
	aug 05	PAMAS1676	Bruikbaar
	okt 05	PAMAS6728	Bruikbaar
	feb 06	PAMAS7608	Bruikbaar
	14 - 20 mrt 06	PAMAS6728	Bruikbaar
	20 - 24 mrt 06	PAMAS7608	
put 35	aug 05	PAMAS1655	Bruikbaar
	nov 05	PAMAS6728	Bruikbaar
	mrt 05	PAMAS7608	Sterk verstoorde meting, onbruikbaar.

#### *Keuze van de pieken*

In afbeelding 5.2 is te zien dat een put niet altijd hetzelfde reageert op het aanschakelen.



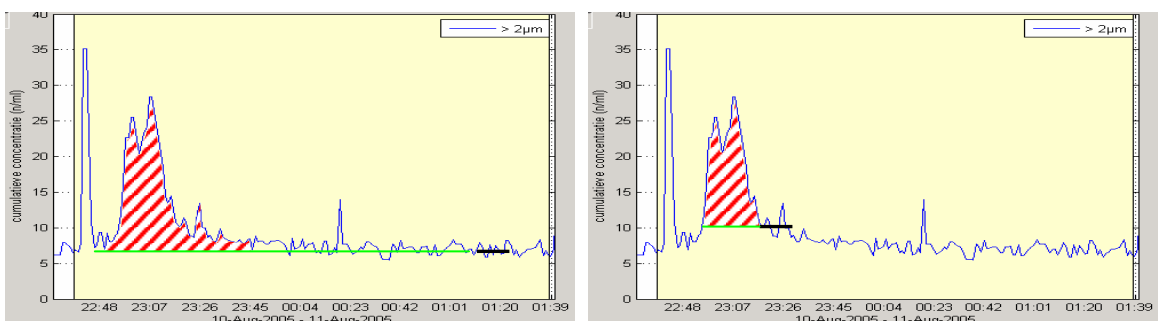
Afb. 5.2: Verloop van twee deeltjestellingen na aanschakelen van put 33

De schakeling links (piek 1) geeft een verloop in de deeltjestelling te zien zoals we dat verwachten. Eerst ontstaat een heel korte hoge piek; dit zijn deeltjes die op de putkop loskomen. Vervolgens arriveren met enige vertraging deeltjes die uit de omstorting zijn vrijgemaakt. Daarna zakt het aantal deeltjes naar een min of meer stabiele achtergrondwaarde. De rechter schakeling (piek 13) is minder duidelijk. Hier blijven pieken ontstaan ondanks dat de put maar 1 keer aangaat.

Uit een reeks zijn alleen die pieken meegenomen bij de bepaling van de relatie die er 'goed' uitzagen. Dit is een subjectieve keuze, die tot moeilijk reproduceerbare resultaten leidt (ieder zal een andere keuze maken).

#### Bepaling van het aantal verwijderde deeltjes

In voorgaande paragraaf zijn de mogelijkheden besproken om het aantal deeltjes te berekenen, die door het schakelen van de put wordt verwijderd. Omdat de werkelijke achtergrondconcentratie van deeltjes in het toestromende grondwater niet bekend is, moet gewerkt worden met de gemeten achtergrondconcentratie. Voor de gemeten achtergrondconcentratie zijn verschillende definities gegeven. De hoeveelheid deeltjes boven de achtergrond waarde vormt een maat voor de hoeveelheid gemobiliseerde deeltjes. Deze hoeveelheid zal niet de juiste waarde zijn, maar omdat alle "pieken" op gelijke wijze worden behandeld, zijn de verkregen resultaten wel onderling vergelijkbaar.



Afb. 5.3: Bepaling van de gemeten achtergrondconcentratie

Uit afbeelding 5.3 blijkt dat de achtergrondconcentratie niet helemaal constant is, en het duurt ook enige tijd voor de achtergrondconcentratie

bereikt wordt. Om zo objectief mogelijk te werken, is gekozen voor de bepaling van de achtergrondconcentratie gedurende een vast tijdsinterval na aanschakelen, bijvoorbeeld het gemiddelde van de gemeten concentratie tussen 50 en 60 minuten na aanschakelen van de put. Het zwarte streepje in de afbeelding geeft de berekende achtergrondconcentratie. Het verwijderde (gemobiliseerde) aantal deeltjes is de oppervlakte onder de piek, boven de achtergrond waarde.

Uit afbeelding 5.3 blijkt duidelijk de invloed van de keuze van de achtergrondwaarde op de berekende hoeveelheid verwijderde deeltjes.

Voor alle pieken zijn grafieken gemaakt om uitbijters op te kunnen sporen en te verwijderen.

#### **5.4 Relatie verwijderd aantal deeltjes en duur voorgaande bedrijfsperiode**

##### **5.4.1 Berekening verwijderd aantal deeltjes**

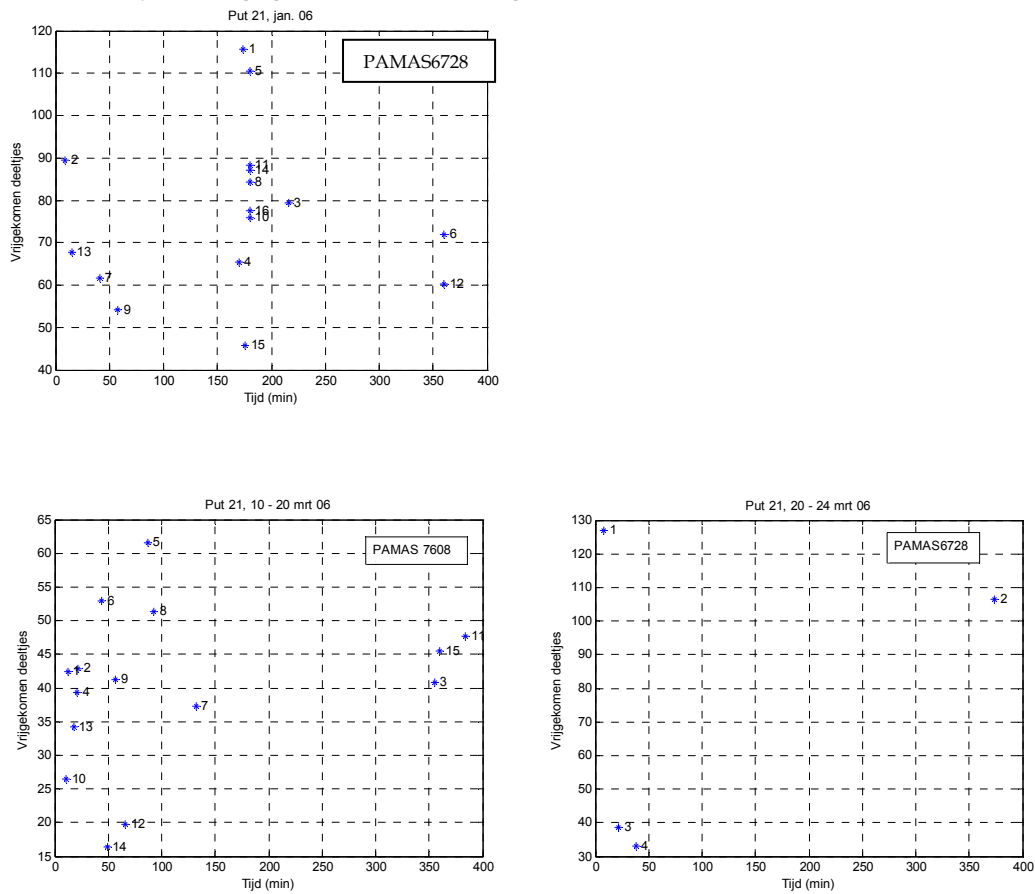
Per deeltjestelling is gekeken welke periode het meest geschikt was voor de berekening van de achtergrondconcentratie. Ieder put reageert anders, zowel in de breedte van de "piek" (de tijd nodig om alle gemobiliseerde deeltjes te verwijderen) als in de tijd nodig voor het bereiken van de achtergrondconcentratie. Bovendien is de achtergrondconcentratie bijna nooit volledig stabiel. In afbeelding 5.3 is bijvoorbeeld om 00.20 een kleine piek aanwezig. Als deze "piek" valt binnen de periode voor de bepaling van de achtergrondconcentratie, dan geeft dat een vertekend beeld.

Via 'trial and error' is per deeltjestelling gezocht naar de beste periode. Vaak kon de achtergrondconcentratie het best berekend worden na 60 tot 100 minuten, dan hadden alle putten de achtergrondconcentratie bereikt. Vaak bleek dat de gekozen periode voor individuele putten een effect had, maar dat het totale beeld voor de telling globaal hetzelfde bleef.

Per put is de relatie tussen de deeltjes die zijn verwijderd en de lengte van de voorgaande piek uitgezet. De relatie wordt kort per put besproken.

### put 21

In januari en maart 2006 zijn deeltjestellingen uitgevoerd op put 21. De resultaten zijn weergegeven in afbeelding 5.4.

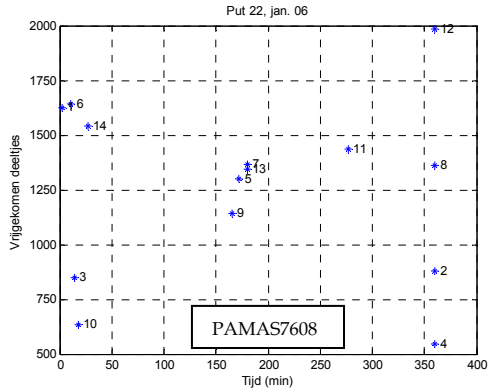


Afb. 5.4: Verwijderd aantal deeltjes als functie van de duur van de voorgaande onttrekkingsperiode voor put 21.

Bij het aanschakelen van put 21 worden per schakeling 60 à 90 deeltjes verwijderd. We zien geen verband tussen de tijd dat de put heeft aangestaan en de hoeveelheid deeltjes die worden verwijderd.

### put 22

Bij put 22 is alleen in januari 2006 een bruikbare deeltjestelling uitgevoerd.

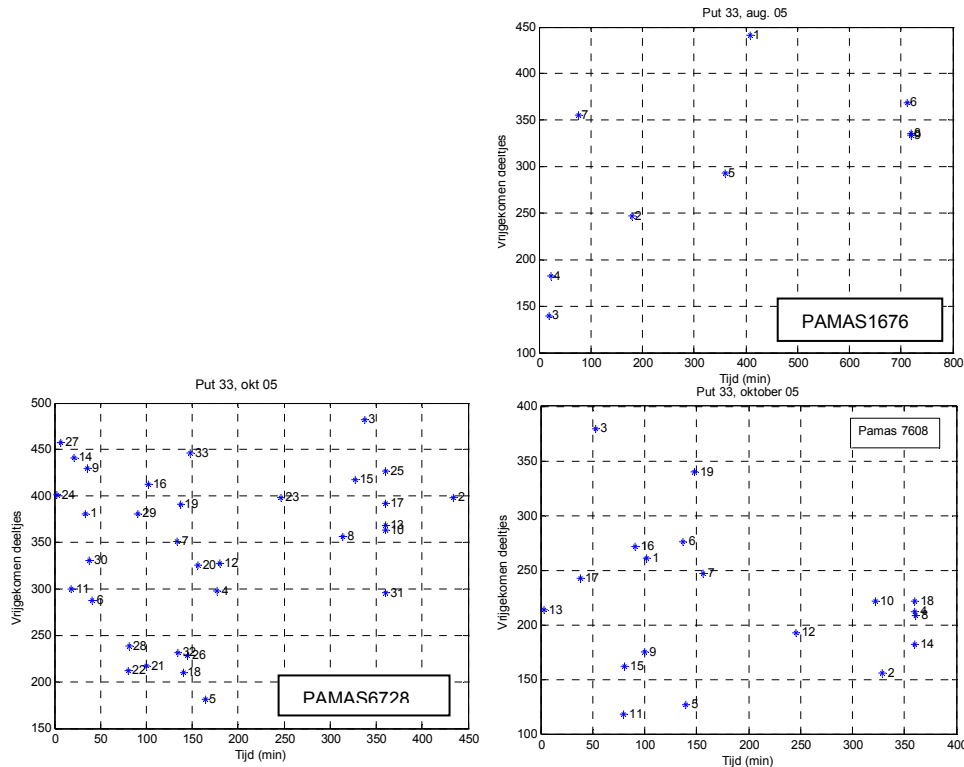


Bij deze put worden 500 tot 2000 deeltjes verwijderd bij het aanschakelen. Een relatie met de lengte van de voorgaande schakeling is niet te zien.

Afb. 5.5: Verwijderd aantal deeltjes als functie van de duur van de voorgaande onttrekkingsperiode voor put 22.

### Put 33

In 2005 zijn bij put 33 deeltjestellingen uitgevoerd in maart, augustus en oktober.



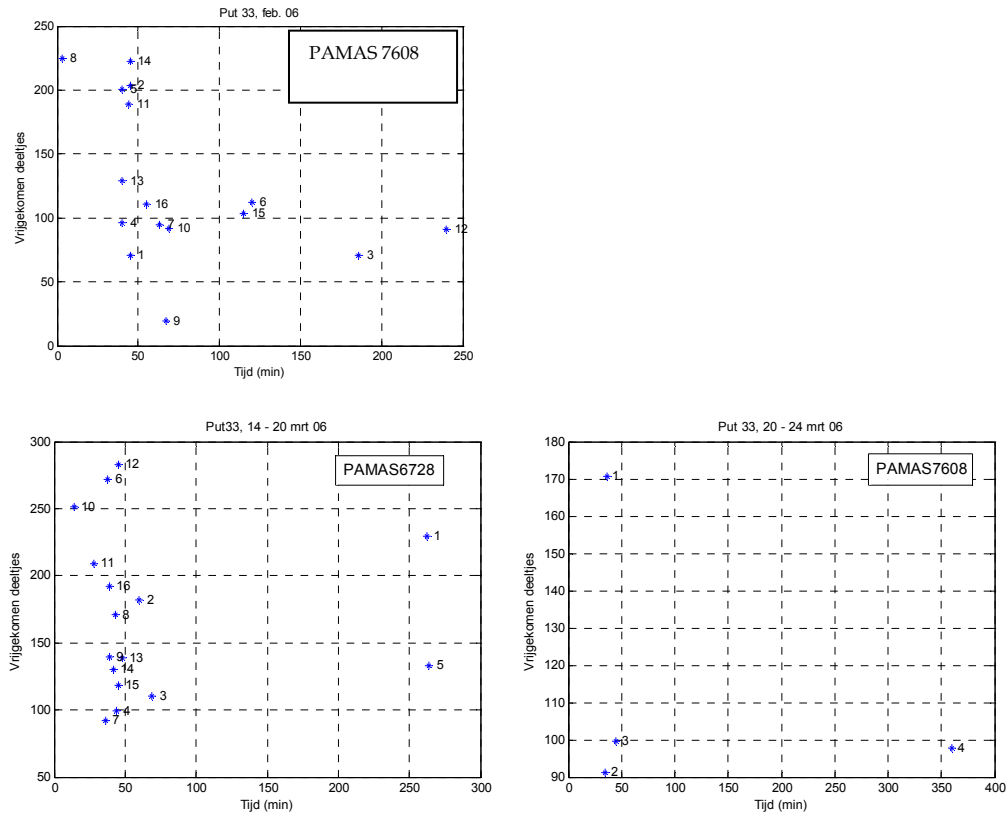
Afb. 5.6: Verwijderd aantal deeltjes als functie van de duur van de voorgaande onttrekkingsperiode voor put 33 in 2005.

Bij een aanschakeling worden 50 tot 500 deeltjes verwijderd. Bij de metingen van augustus lijkt een relatie zichtbaar. Als de put langer heeft aangestaan lijken meer deeltjes verwijderd te zijn. Bij de andere tellingen is geen relatie te zien.



Opvallend zijn de verschillen in niveau van verwijderde hoeveelheid deeltjes. Deze verschillen hangen waarschijnlijk samen met apparaat-effecten: de beide tellers geven geen identiek resultaat.

In 2006 zijn in februari en maart deeltjestellingen uitgevoerd.

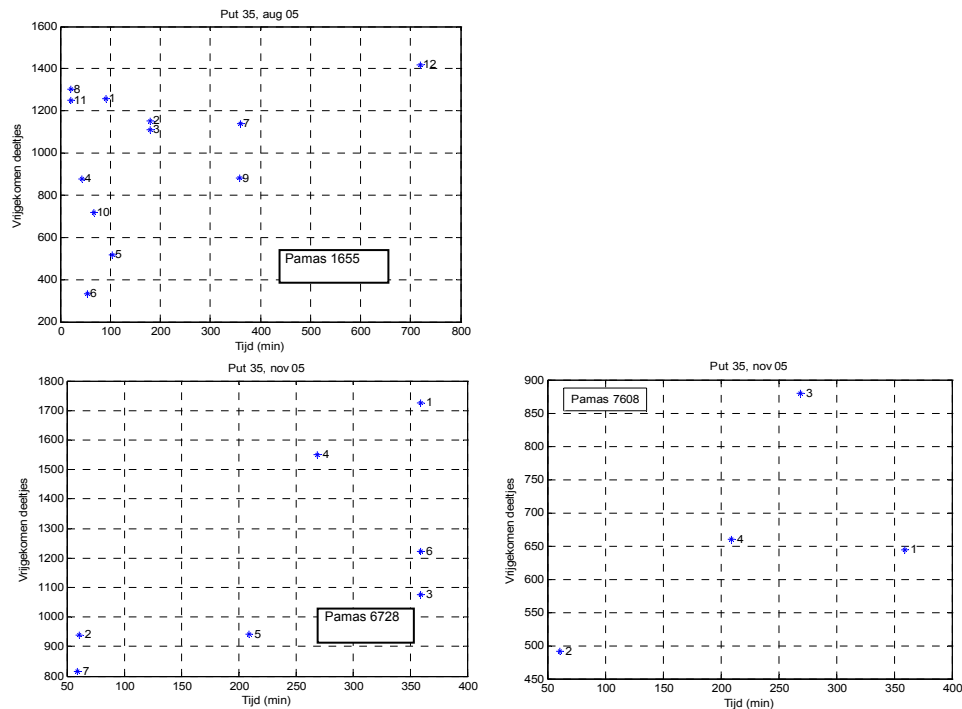


Afb.: 5.7: Verwijderd aantal deeltjes als functie van de duur van de voorgaande onttrekkingsperiode voor put 33 in 2006.

Hier zien we geen relatie tussen het verwijderd aantal deeltjes en de duur van de voorgaande onttrekkingsperiode. De hoeveelheid verwijderde deeltjes blijft wel in dezelfde orde grootte.

### put 35

Bij put 35 zijn deeltjestellingen uitgevoerd in augustus en november 2005.



Afb. 5.8: Verwijderd aantal deeltjes als functie van de duur van de voorgaande onttrekkingsperiode voor put 35.

Bij een schakeling worden 200 tot 1800 deeltjes verwijderd. In augustus lijkt een lichte relatie te zijn, hoewel dit idee vooral berust op piek 12. Als we piek 12 uit de afbeelding buiten beschouwing laten, dan blijft er geen relatie over. Bij de meting in november is de relatie wat sterker.

#### 5.4.2 Evaluatie relatie verwijderd aantal deeltjes en voorgaande bedrijfsperiode

De bepaling van het verwijderd aantal deeltjes is behept met methodologische en technische problemen. Het methodologische probleem betreft de onbekendheid van de werkelijke achtergrondconcentratie. Deze is hoger dan de gemeten achtergrondconcentratie. Het technische probleem betreft de variatie in de deeltjes concentratie. Onduidelijk is in hoeverre deze variatie bepaald wordt door enerzijds de eigenschappen van de put en het onttrokken grondwater (onderlinge beïnvloeding van de putten, aanwezigheid van gasbellen) en anderzijds (de instabiliteit van) de gebruikte apparatuur.

Om het verwijderd aantal deeltjes te kunnen berekenen, moet een schatting worden gemaakt van de achtergrondconcentratie. Door deze schatting wordt een subjectief element in de berekening van deze hoeveelheid gebracht.

Tussen de onderzochte putten blijken grote verschillen te bestaan tussen hoeveelheid verwijderde deeltjes. De hoeveelheden zijn in onderstaande tabel samengevat.

Tabel 5.2: Verwijderd aantal deeltjes per put verwijderd na aanschakelen.

putnummer	verwijderd aantal deeltjes (via deeltjesteller)
21	20 - 120
22	500 - 2000
33	100 - 400
35	400 - 1500

Deze verschillen moeten worden toegeschreven aan verschillen in onder andere de gebruikte deeltjesteller, concentratie van meegevoerde deeltjes in het onttrokken grondwater, en capaciteit van de geïnstalleerde onderwaterpomp (hoe groter de capaciteit, des te groter de versnellingskracht bij het aanzetten van de pomp).

Bij de putten 21 en 22 bestaat op het oog geen relatie tussen verwijderde hoeveelheid deeltjes en voorafgaande onttrekkingsperiode; bij de putten 33 en 35 is op het oog soms een zwakke relatie aanwezig. Dit is niet verwonderlijk: de putten 21 en 22 zijn ernstig verstopt, bij deze putten is op de boorgatwand een grote voorraad deeltjes aanwezig. Bij iedere schakeling wordt uit deze voorraad een vergelijkbaar aantal deeltjes gemobiliseerd. De putten 33 en 35 zijn nieuw en niet verstopt, en zijn maximaal ontwikkeld, in het bijzonder put 35. Bij deze putten is slechts een geringe voorraad deeltjes op de boorgatwand aanwezig, waardoor mobilisatie van deeltjes sterker kan reageren op de aanwezige, gedurende de voorgaande onttrekkingsperiode afgefilterde hoeveelheid deeltjes.

Bij het zoeken naar een relatie tussen de verwijderde hoeveelheid deeltjes bij het aanschakelen van een put en de duur van de voorafgaande onttrekkingsperiode vormen de korte schakelingen een complicatie. Het blijkt dat op het puttenveld frequent kort wordt aan- en uitgeschakeld, vaak korter dan één minuut. In hoeverre deze korte schakelingen de mobilisatie van deeltjes op de boorgatwand beïnvloeden, is onbekend.

## 5.5 Relatie verwijderd aantal deeltjes en duur voorgaande rustperiode

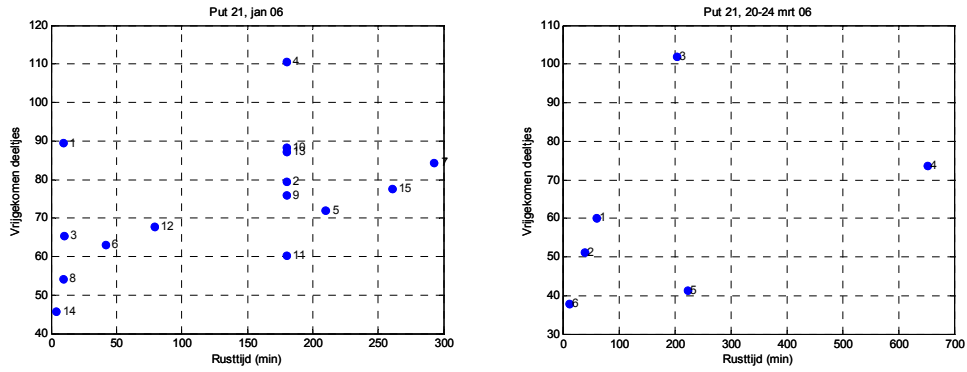
### 5.5.1 Resultaten van de metingen

Bij de uitwerking van de resultaten van de metingen ontstond de indruk dat naast de duur van de voorgaande onttrekkingsperiode, ook de duur van de voorgaande rustperiode van belang was.

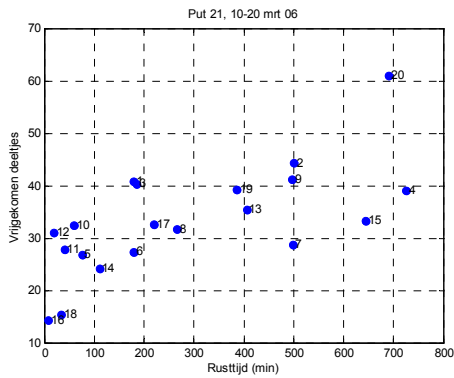
In de voorgaande paragraaf zijn de verwijderde aantallen deeltjes berekend. Bij deze berekende verwijderde aantallen is de duur van de voorgaande rustperiodes gezocht. In onderstaande afbeeldingen is de relatie tussen verwijderd aantal deeltjes bij aanschakelen van de onderwaterpomp en de duur van de voorgaande rustperiode aangegeven.

### Put 21

Onderstaande afbeelding toont de relatie tussen verwijderd aantal deeltjes na schakelen en voorgaande rustperiode.

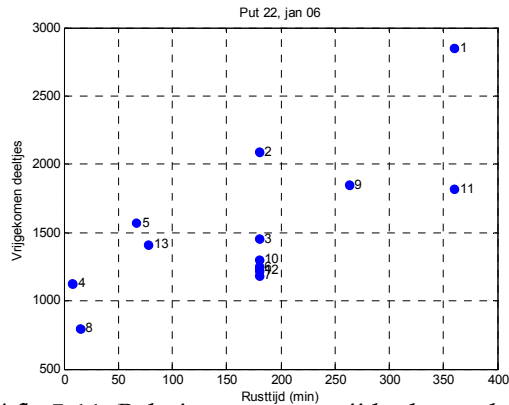


Afb. 5.9: Relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande rustperiode, gemeten met PAMAS6728.



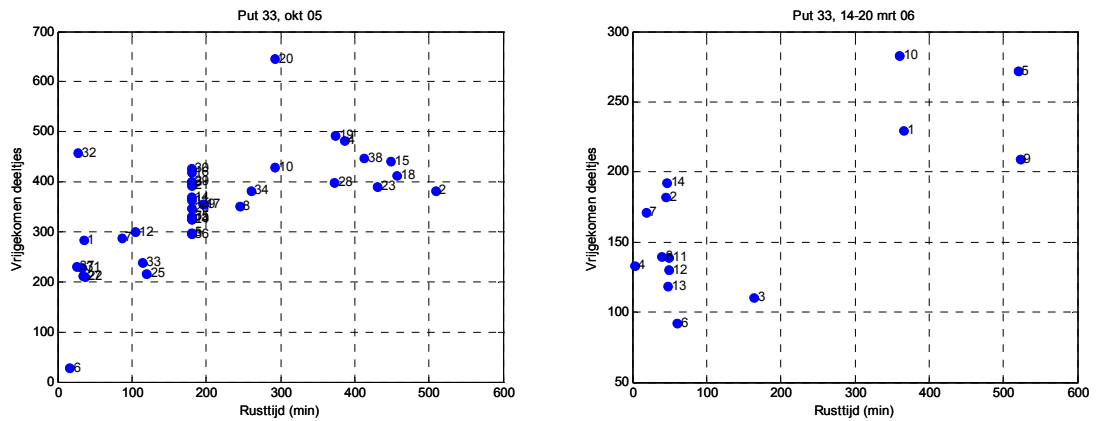
Afb. 5.10: Relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande rustperiode, gemeten met PAMAS7608.

### Put 22

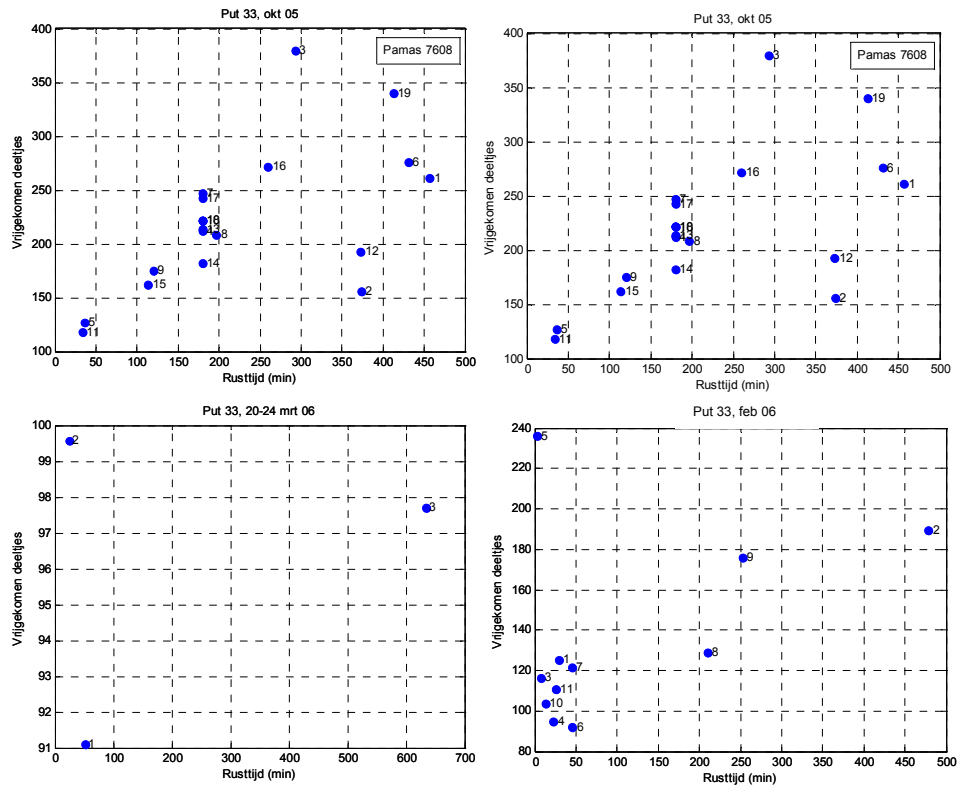


Afb. 5.11: Relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande rustperiode, gemeten met PAMAS7608.

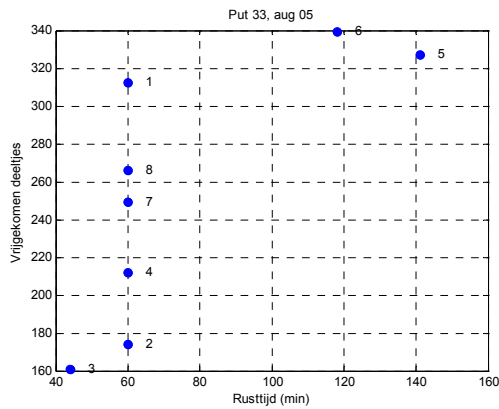
## Put 33



Afb. 5.12: Relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande rustperiode, gemeten met PAMAS6728.

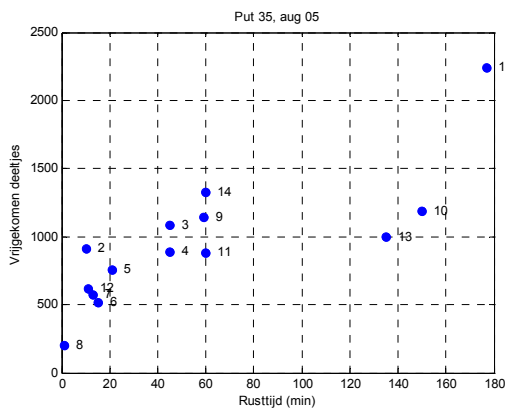


Afb. 5.13: Relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande rustperiode, gemeten met PAMAS7608.

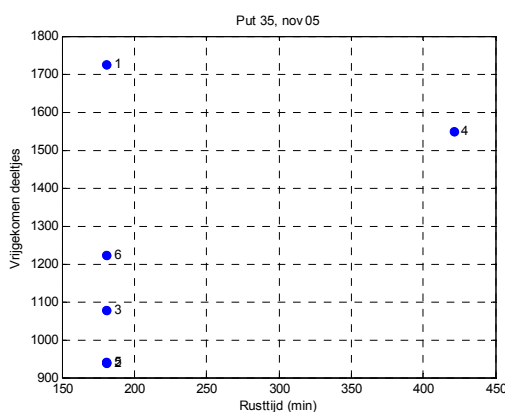


Afb. 5.14: Relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande rustperiode, gemeten met PAMAS1676.

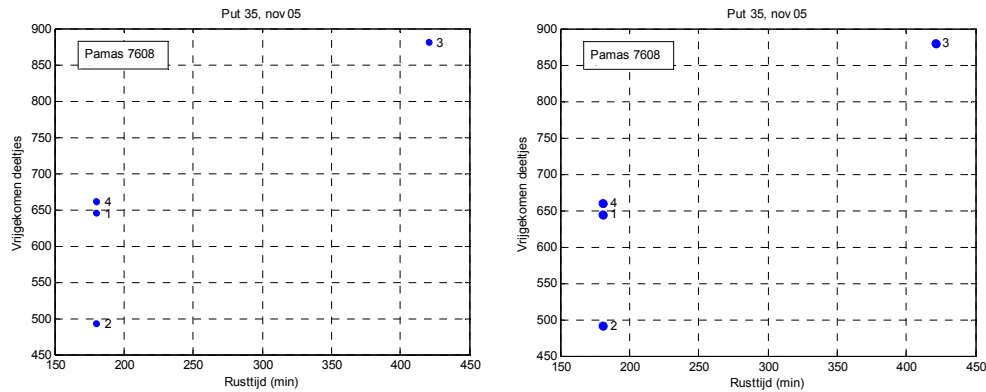
**Put 35**



Afb. 5.15: Relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande rustperiode, gemeten met PAMAS1655.



Afb. 5.16: Relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande rustperiode, gemeten met PAMAS6728.



Afb. 5.17: Relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande rustperiode, gemeten met PAMAS7608.

Bestudering van bovenstaande afbeeldingen laat zien dat in ongeveer de helft van de resultaten een (lineaire) relatie bestaat tussen verwijderd aantal deeltjes bij aanschakelen van de onderwaterpomp en duur van de voorgaande rustperiode.

### 5.5.2 Evaluatie van de metingen

Uit de resultaten van de metingen blijkt dat op het oog de relatie tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande rustperiode sterker is dan tussen verwijderd aantal en duur van de voorgaande bedrijfsperiode. Uit de resultaten van micromorfologisch onderzoek aan steekmonsters van de boorgatwand te Noordbergum, ondersteund door laboratoriumonderzoek naar gedrag van deeltjes in kolommen gevuld met glaspereels, bleek dat deeltjes op de boorgatwand accumuleren in de vorm van de "bruggen". De deeltjes zijn ieder op zich in staat de bodemporie te passeren, maar de aanvoer van deeltjes is zo groot dat meerdere deeltjes tegelijkertijd een bodemporie willen passeren. Aangezien dit niet mogelijk is, raken meerdere deeltjes tegelijkertijd in de bodemporie "klem", waardoor "deeltjesbruggen" ontstaan. Door de vorming van deze "brug" wordt de diameter van de overblijvende porie kleiner, waardoor meer deeltjes niet kunnen passeren. Het is dus een zichzelf versterkend proces.

Deze bruggen blijven in stand zolang de toestromende grondwater naar de put "druk" op deze bruggen blijft uitoefenen. Zodra dat niet meer het geval is, zullen deze bruggen uiteenvallen. Hoe langer daarvoor gelegenheid is, des te verder (of des te meer) zullen deze bruggen desintegreren.

Uit deze redenering blijkt zowel het belang van de duur van de bedrijfsperiode, de bruggen mogen niet te stabiel worden, als van de duur van de rustperiode: er moet voldoende gelegenheid zijn om de bruggen te laten desintegreren.

### 5.6 Korte schakelingen

Het blijkt dat op het puttenveld Tull en 't Waal putten regelmatig zeer kort schakelen, dat wil zeggen aanschakelen en binnen enkele minuten weer uitschakelen, en andersom uitschakelen, en binnen enkele minuten weer aanschakelen. Naar aanleiding hiervan rees de vraag welk effect deze korte schakelingen hebben op het resultaat van de deeltjestelling.

Op voorhand kan al gezegd worden dat korte aanschakelingen niet kunnen worden waargenomen: uit de verhouding tussen putvolume en capaciteit van de onderwaterpomp blijkt dat het enige tijd duurt voordat de putinhoud is vervangen, namelijk tot circa 15 minuten. Het effect van putten die aanschakelen en binnen deze periode weer uitschakelen kan dus niet met de deeltjestelling worden waargenomen. Welke invloed deze korte schakeling op het verloop van de deeltjesconcentratie van de volgende schakeling heeft, is onbekend.

#### *Definitie*

Op het pompstation worden de aan- en uitschakelingen geregistreerd: 1 als de put wordt aangezet, 0 als de put uitgaat. Onderstaande tabel geeft een voorbeeld van korte schakelingen.

*Tabel 5.3: Voorbeeld van korte schakelingen*

Tijd	Code	Verklaring
1-1-2005 00.30	1	Put aan
1-1-2005 04.20	0	Put uit (heeft 3 uur en 50 minuten gedraaid)
1-1-2005 05.10	1	Put aan
1-1-2005 05.15	0	Put uit (heeft 5 minuten gedraaid)
1-1-2005 07.00	1	Put aan
1-1-2005 07.20	1	Put heeft minder dan 1 minuut uit gestaan
1-1-2005 09.00	0	Put uit (put heeft 2 uur gedraaid, met een onderbreking van minder dan 1 minuut)
1-1-2005 09.10	1	Put aan (put heeft minder dan 10 minuten uit gestaan)
1-1-2005 10.10	0	Put uit (put heeft 1 uur gedraaid)
1-1-2005 11.05	0	Put heeft minder dan 1 minuut aangestaan)
1-1-2005 12.50	1	Put aan

We onderscheiden zeer korte en korte schakelingen. Zeer korte schakelingen zien we om 7.20 uur en 11.05 uur, te herkennen aan de twee keer een 1 of twee keer een 0 achter elkaar. In het eerste geval wordt de put heel even, minder dan 1 minuut uitgezet in een draaiperiode. In het tweede geval slaat de put voor minder dan een minuut aan.

Daarnaast hebben we de korte schakelingen, waarbij een put een aantal minuten aan- of uitgezet wordt, zoals van 5.10 tot 5.15 uur.

#### *Zeer korte schakelingen*

In tabel 5.4 staan het aantal zeer korte aan- en uitschakelingen tijdens de deeltjestellingen. Alleen in augustus 2005, bij put 35 komen veel zeer korte schakelingen voor.

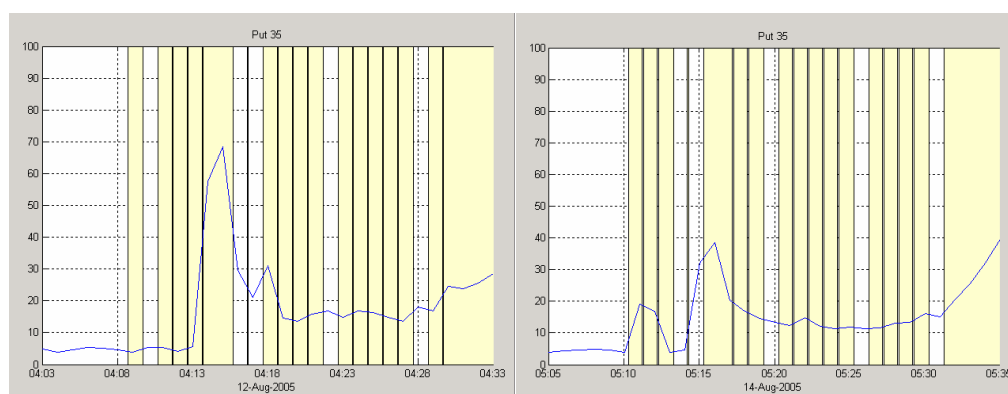


Tabel 5.4: Zeer korte aan- en uitschakelingen tijdens deeltjestellingen.

Put	Periode	Zeer kort aan	Zeer kort uit
Put 21	april 05	0	0
	jan 06	1	0
	mrt 06	0	4
Put 22	jan 06	0	0
	mrt 06	1	0
Put 26	okt-nov 05	2	5
Put 33	mrt 05	0	1
	aug 05	0	3
	okt 05	0	1
	feb 06	0	0
	mrt 06	0	0
PP35	aug 05	3	28
	nov 05	0	0
	mrt 05	0	0

Alle schakelingen zijn bekeken en geanalyseerd. Een enkele keer lijkt er een kleine piek te volgen op een korte uitschakeling. Deze piekjes komen ook voor als er geen korte schakeling heeft plaatsgevonden en zijn dus toevalligheden.

Over het algemeen zien we geen enkel effect van de korte aan- en uitschakelingen. Het effect is zoals bij put 35 op 12 en 14 augustus 2005, zie afbeelding 9.

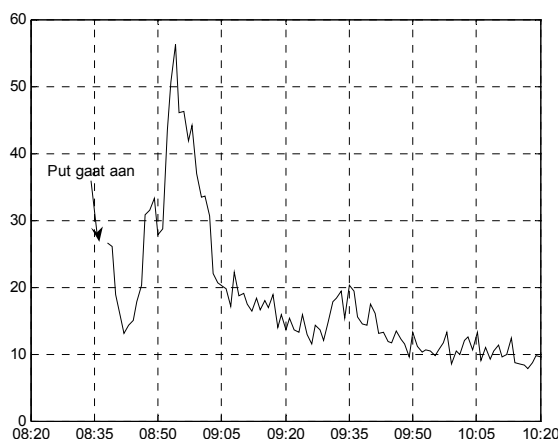


Afb. 5.18: Invloed van zeer korte schakelingen op de deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater. In de grafieken zien we langere perioden dat de put aanstaat, die worden onderbroken door korte uitschakelingen. Bijvoorbeeld in de linker grafiek staat de put van 4:23 tot 4:28, maar wordt 4 keer kort uit gezet.

#### Korte schakelingen

Naast de zeer korte schakelingen van minder dan 1 minuut, staat een put soms ook voor enkele minuten uit of aan. De vraag is welk effect dit heeft. Door het aanschakelen worden deeltjes los gemaakt op de boorgatwand, maar het kost tijd om deze extra deeltjes uit de put af te voeren. Zoals in afbeelding 5.10 te zien is duurt het na het aanschakelen van de put nog ongeveer een kwartier voor de piek het maximum heeft bereikt. De

vertraging wisselt per put en is afhankelijk van putinhoud en capaciteit van de onderwaterpomp.



Afb. 5.19: Verloop van de deeltjesconcentratie na aanzetten van de onderwaterpomp. Het duurt circa 15 minuten voordat de putinhoud is vervangen.

Als de put binnen een kwartier uitgezet wordt, dan kunnen de losgemaakte deeltjes niet uit de put afgevoerd worden. We verwachten dan dat deze losgemaakte deeltjes met de volgende schakeling mee komen. Dit betekent dat als de put kort schakelt, de relatie tussen de lengte dat een put aanstaat en de hoeveelheid deeltjes die vrijkomen wordt verstoord.

Als een put wordt uitgezet, dan zullen de afgevangen deeltjes op de boorgatwand onder invloed van de zwaartekracht een nieuwe positie innemen. Hierdoor kunnen ze met de volgende schakeling vrij gemaakt worden. Als de put te kort uit staat, is de positie van de deeltjes nog niet veranderd, en kunnen ook de deeltjes niet worden vrijgemaakt. Het aanzetten van de put laat dan geen effect zien in de deeltjestelling.

Het is niet duidelijk hoe lang een put uit moet staan voordat het effect heeft.

#### *Evaluatie korte schakelingen*

Op het puttenveld Tull en 't Waal wordt frequent kort geschakeld, zelfs vaak korter dan 1 minuut. Het effect van deze korte schakelingen op het mobiliseren van deeltjes is onbekend.

Indien de verblijftijd van het onttrokken grondwater in de put groter is dan de onttrekkingsperiode, is het effect van korte aanschakelingen niet zichtbaar in het verloop van de deeltjesconcentratie. Mogelijk dat het effect van de korte aanschakeling accumuleert met de volgende aanschakeling.

Een korte uitschakeling tijdens een onttrekkingsperiode heeft geen effect op het verloop van de deeltjesconcentratie. Waarschijnlijk is de tijd te kort, dat geaccumuleerde deeltjes tot een herrangschikking kunnen komen, waardoor zij wel de boorgatwand kunnen passeren. Mogelijk heeft een rustperiode een minimum duur nodig om effectief te kunnen zijn.



# 6 Gedrag van deeltjes in grondwater

## 6.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken zijn de resultaten van deeltjestellingen aan de orde geweest als onderbouwing van maatregelen ter preventie van het optreden van putverstopping. In deze hoofdstukken was het niet mogelijk de resultaten van deeltjestellingen onderling te beschouwen.

Om informatie uit deeltjestellingen niet verloren te laten gaan, worden daarom in dit hoofdstuk de resultaten van deeltjestellingen in onderlinge relatie besproken. Achtereenvolgens zullen aan de orde komen:

1. concentratie van deeltjes en deeltjesgrootteverdeling in onttrokken grondwater,
2. concentratie van deeltjes en volumestroom, en
3. hoeveelheid deeltjes tijdens onttrekking afgefilterd op de boorgatwand

## 6.1 Concentratie van deeltjes en deeltjesgrootteverdeling in onttrokken grondwater

Bij de uitvoering van de tellingen zijn verschillende apparaten gebruikt. Deze tellers leveren wel vergelijkbare, maar geen identieke resultaten. Om eventuele apparaat-effecten te voorkomen, zullen de resultaten van de tellingen per teller worden geëvalueerd.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de uitgevoerde tellingen per deeltjesteller. Daarbij is onderscheid gemaakt in tellingen tijdens normale bedrijfsvoering en tijdens pompproeven. Uit de tabel blijkt dat van de tellers PAMAS6728 en PAMAS7608 voldoende resultaten voor onderlinge evaluatie beschikbaar zijn. Voor de overige tellers is dat niet het geval.

De resultaten van de deeltjestellingen geven geen stabiel beeld, zie bijlage 4. Om toch een indruk van de concentratie te verkrijgen, zijn gedurende onttrekking, stabiele perioden opgezocht met de laagste concentratie. Binnen deze stabiele perioden zijn de concentraties en de deeltjesgrootteverdeling op het oog geschat. Om voor eventuele apparaat-effecten te kunnen corrigeren, is ook het gebruikte apparaat vermeld. De resultaten zijn in onderstaande tabel samengevat.

Tabel 6.1: Deeltjesconcentratie in onttrokken grondwater tijdens normale bedrijfsvoering en tijdens pompproeven (pp: telling tijdens pompproef). Bij de pompproeven zijn de gemeten concentraties herleid naar de gangbare onttrekking.

put	gebruikte deeltjesteller	deeltjesconcentratie				
		conc (n/ml)	PAMAS6728	conc (n/ml)	PAMAS7608	conc (n/ml)
21	PAMAS(nr?) 8-10 dec 2004 26-27 apr 2005	2,6 1 à 1,2	5-10 jan 2006 20-24 mrt 2006	1 à 1,5 -	10-20 mrt 2006	0,3 à 0,4
22			3-10 mrt 2006pp 24-29 mrt 2006	- 5 à 6	5-10 jan 2006 (150 m3/h) 3-10 mrt 2006pp (100 m3/h)	6 à 9 2,2
26	Metone 31 okt-7 nov 2005	6 à 8	31 okt-7 nov 2005	5 à 6	31 okt-7nov 2005	4 à 5
33	PAMAS1676 10-15 aug 2005 PAMAS0325 7-17 okt 2005	1,6 à 2,0 2,5 à 4,0	29 sept-26 okt 2005 10-20 mrt 2006	1,6 à 2,2 0,9 à 1,0	13-26 okt 2005 17-23 jan 2006pp 25-30 jan 2006pp 15-20 feb 2006 20-24 mrt 2006	1,6 à 2,0 - - 0,6 à 0,8 0,2 à 0,4
34			17-23 jan 2006pp 25-30 jan 2006pp	3 -		
35	PAMAS1655 10-15 aug 2005 Metone 15-18 nov 2005	6 19	15-18 nov 2006	7	15-18 nov 2005 (70 m3/h) 20 feb-3 mrt 2006pp (100 m3/h) 24-29 mrt 2006	4 4 à 5 -

Tabel 6.2: Fractie deeltjes > 3 µm in onttrokken grondwater tijdens normale bedrijfsvoering en tijdens pompproeven (pp: telling tijdens pompproef). Bij de pompproeven zijn de gemeten concentraties herleid naar de gangbare onttrekking.

put	gebruikte deeltjesteller	deeltjesgrootteverdeling (fractie deeltjes > 3 µm over deeltjes > 2 µm)				
		conc (n/ml)	PAMAS6728	conc (n/ml)	PAMAS7608	conc (n/ml)
21	PAMAS(nr?) 8-10 dec 2004 26-27 apr 2005	0,53 0,54	5-10 jan 2006 20-24 mrt 2006	0,54 -	10-20 mrt 2006	0,45
22			3-10 mrt 2006pp 24-29 mrt 2006	- 0,45	5-10 jan 2006 (150 m3/h) 3-10 mrt 2006pp (100 m3/h)	0,45 0,46
26	Metone 31 okt-7 nov 2005	0,38	31 okt-7 nov 2005	0,4	31 okt-7 nov 2005	0,38
33	PAMAS1676 10-15 aug 2005 PAMAS0325 7-17 okt 2005	0,33 0,33	29 sept-26 okt 2005 10-20 mrt 2006	0,25 0,35	13-26 okt 2005 17-23 jan 2006pp 25-30 jan 2006pp 15-20 feb 2006 20-24 mrt 2006	0,30 - - 0,40 0,40
34			17-23 jan 2006pp 25-30 jan 2006pp	0,22 -		
35	PAMAS1655 10-15 aug 2005 Metone 15-18 nov 2005	0,25 0,25	15-18 nov 2006	0,25	15-18 nov 2005 (70 m3/h) 20 feb-3 mrt 2006pp (100 m3/h) 24-29 mrt 2006	0,27 0,26 -

Uit bovenstaande tabellen kunnen verschillende gevolgtrekkingen worden gemaakt:

1. Er bestaan systematische verschillen in concentratie en in deeltjesgrootteverdeling in het onttrokken grondwater van verschillende putten.
2. Er is in één put geen sprake van één constante achtergrondconcentratie in het onttrokken grondwater; de deeltjesgrootteverdeling is in één put wel redelijk constant.
3. Indien binnen één periode wordt gemeten is sprake van een apparaateffect in de concentratie maar niet in de deeltjesgrootteverdeling: PAMAS6728 geeft een hogere concentratie dan PAMAS7608.
4. Er is geen relatie tussen deeltjesconcentratie en ouderdom van de put of mate van verstopping, voor de deeltjesgrootteverdeling lijkt wel een relatie aanwezig.

## **6.2 Volumestroom en deeltjesconcentratie**

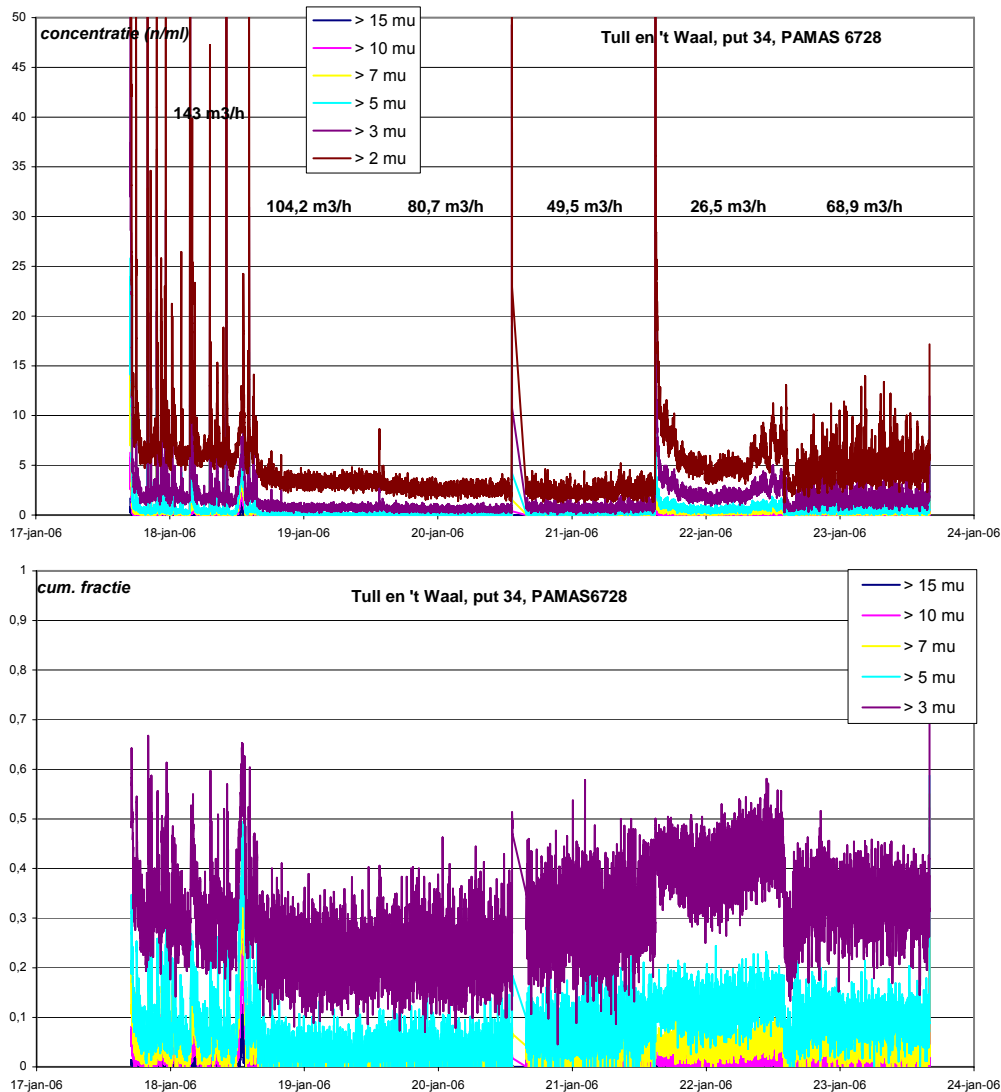
### *Uitvoering*

In de nieuwe putten 33, 34 en 35 zijn in januari 2006 grotere onderwaterpompen gehangen, en in put 22 een kleinere. Om de bacteriologische betrouwbaarheid van het onttrokken grondwater te verzekeren is het, als gevolg van het omwisselen van de onderwaterpompen, noodzakelijk deze putten te spuien. Dit spuien vormde een buitenkans voor het bepalen van de concentratie van deeltjes in het onttrokken grondwater als functie van de volumestroom.

Daartoe zijn deze putten met variabele volumestroom gespuid, en is gedurende het spuien continu de deeltjesconcentratie gemeten.

### *Resultaten*

De resultaten van deze metingen zijn uitgebreid beschreven en verwerkt in bijlage 4. Op de verkregen resultaten is een kwaliteitscontrole uitgevoerd. Onderstaande afbeelding toont als voorbeeld het verloop van de deeltjesconcentratie en de deeltjesgrootte fractie  $> 3 \mu\text{m}$  als functie van de volumestroom.



Afb. 6.1: Verloop van de deeltjes concentratie en van de deeltjes grootte fractie  $> 3 \mu\text{m}$  in het onttrokken grondwater van put 34 bij variabele volumestroom.

Op grond van bovenstaande afbeeldingen kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

1. Het verloop van de deeltjesconcentratie laat soms een wisselvallig verloop zien. Waarom zijn de beelden van de deeltjesconcentraties op 18 januari, op 19 t/m 21 januari, op 22 januari en op 23 januari onderling zo verschillend? De oorzaak van dit wisselvallige verloop kan samenhangen met de onttrekking, maar ook met de gebruikte apparatuur. In de bodem wordt aan een groot reservoir deeltjes onttrokken; dan ligt een constante concentratie en deeltjesgrootteverdeling meer voor de hand.
2. Iedere verstoring van of in het watervoerend pakket leidt tot een beïnvloeding van de gemeten concentraties en deeltjesgrootteverdelingen. Het kan langer dan één dag duren, voordat de evenwichtssituatie is bereikt. Aangezien de concentratie asymptotisch tot de evenwichtswaarde nadert, is bepaling van de evenwichtskoncentratie lastig. Een en ander resulteert in het aflezen van te hoge concentraties. Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat het aanpassen van de



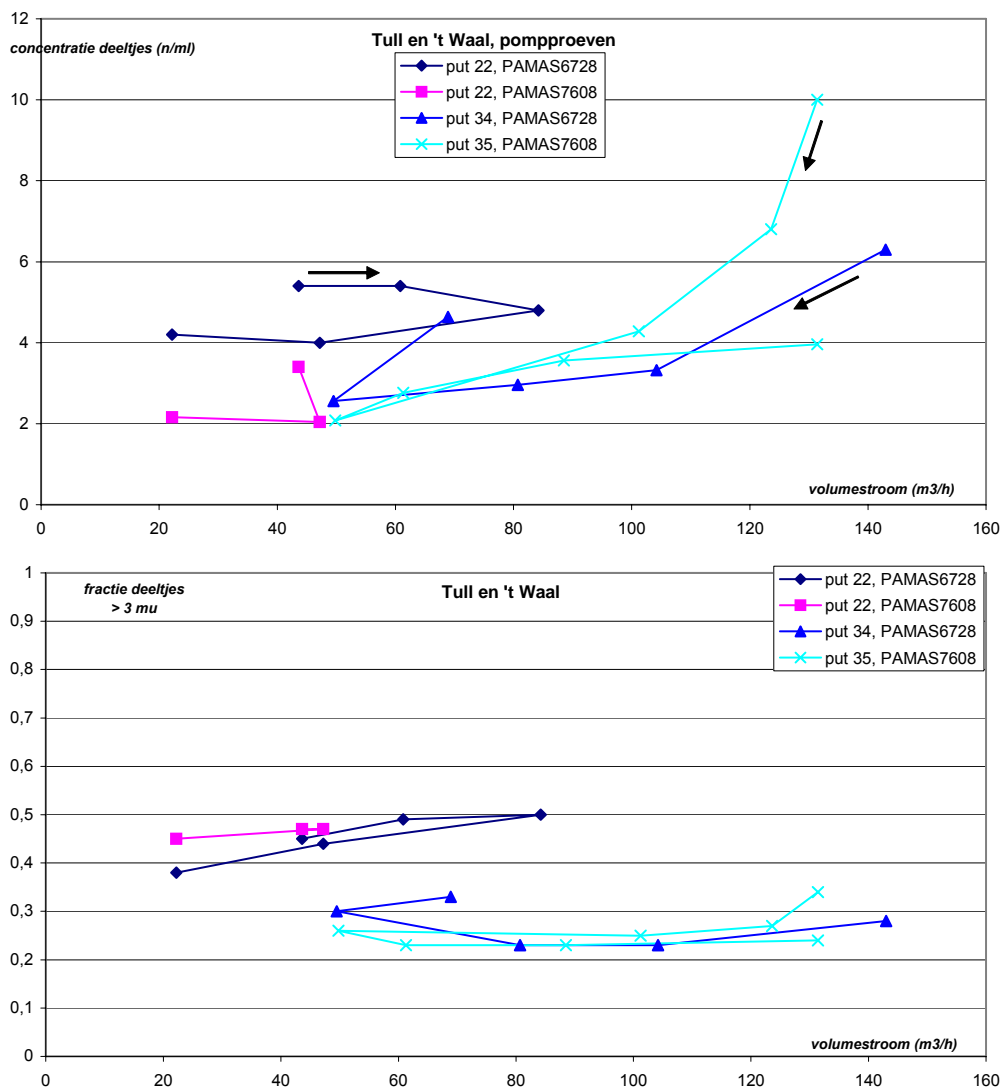
volumestroom van 104,2 naar 80,7 m<sup>3</sup>/h praktisch zonder verstoring is verlopen, er is een kleine piek in concentratie aanwezig en het concentratieniveau verschuift snel iets naar beneden. De instelling van de volumestroom van 49,5 naar 26,5 m<sup>3</sup>/h vertoont een grote piek in concentratie, duidend op een grote verstoring in het watervoerend pakket, waardoor de meter/meting gedurende een dag van slag blijft.

De deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater reageert anders op het vergroten van de onttrekking dan op het verlagen van de onttrekking.

Bij het vergroten van de onttrekking neemt de snelheid van het onttrokken grondwater toe. Voor deze vergroting van deze snelheid is een versnellingskracht nodig. Ten gevolge van deze versnellingskracht worden extra deeltjes gemobiliseerd. Na verloop van tijd zal een evenwichtsconcentratie worden bereikt.

Bij het verkleinen van de onttrekking verliest het onttrokken grondwater momentum, en zal vervolgens de snelheid, en daarmee de sleepkracht, van het water afnemen. Ten gevolge van de verkleining van deze sleepkracht zullen (grovere) deeltjes sedimenteren, en zal na enige tijd een evenwichtsconcentratie worden bereikt.

Uit de correcte metingen zijn de deeltjesconcentratie > 2 µm en de deeltjesgrootte fractie > 3 µm afgelezen, en samengevat in onderstaande afbeelding.



Afbeelding 6.2: Deeltjes concentratie > 2 µm en deeltjesgrootte fractie > 3 µm als functie van volumestroom.

### Evaluatie

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de deeltjes concentratie in het onttrokken grondwater tot een volumestroom van 100 m³/h tussen 2 en 6/ml varieert, en nauwelijks afhankelijk is van de grootte van de volumestroom. Deze onafhankelijkheid wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de lage concentratie. Pas bij volumestromen groter dan 100 m³/h neemt de concentratie toe.

Opvallend is dat de deeltjesconcentratie zoals gemeten tijdens de pompproeven afwijkt van de concentratie tijdens de putschakelingen. Voor de bedrijfsvoering betekent dit dat de putten gemakkelijk 100 m³/h moeten kunnen leveren, en waarschijnlijk nog wel meer.

Uit de deeltjesgrootte verdeling blijkt dat de deeltjesgrootte fractie > 3 µm met toenemende onttrekking enigszins toeneemt, en dat een tweedeling optreedt: tussen 0,4 en 0,5 in put 22, en tussen 0,23 in de putten 34 en 35. De achtergrond van dit verschil is voornamelijk onbekend.

Deze tweedeling werd ook aangetroffen in resultaten van deeltjestellingen tijdens putschakelingen.

### 6.3 Accumulatie van deeltjes op de boorgatwand

Zoals reeds aangegeven kunnen op het puttenveld Tull en 't Waal drie groepen putten worden onderscheiden: 1. oude, ernstig verstopte, 2. oude matig verstopte en 3. nieuwe, niet verstopte putten.

Tijdens het onderzoek is veel aandacht besteed aan de beide uitersten, namelijk de oude ernstig verstopte en de nieuwe putten.

De oude putten zijn niet maximaal ontwikkeld. Op de boorgatwand zullen oorspronkelijk en mogelijk nu nog restanten boorspoeling aanwezig zijn. Bovendien zijn de putten ernstig verstopt, dat wil zeggen rond de boorgatwand zijn veel deeltjes geaccumuleerd, die de toestroming van het grondwater belemmeren. De geaccumuleerde deeltjes zullen ook als een filter fungeren: veel van de door het toestromende grondwater meegevoerde deeltjes zullen op de boorgatwand accumuleren. Doordat rond de boorgatwand een grote voorraad deeltjes aanwezig is, zal bij iedere schakeling een vergelijkbare hoeveelheid deeltjes worden vrijgemaakt. De nieuwe putten zijn maximaal ontwikkeld; op de boorgatwand zullen nog wel restanten boorspoeling en verontreiniging van boorspoeling aanwezig zijn, maar in veel mindere mate dan bij de oude putten. De boorgatwand zal het transport van door het grondwater meegevoerde deeltjes in veel mindere mate belemmeren.

#### 6.3.1 Tellingen tijdens normale bedrijfsvoering

De gemiddelde concentratie van deeltjes kan bepaald worden door de gemiddelde concentratie gedurende onttrekking over een langere periode te berekenen. Uit de resultaten van de tellingen zijn op het oog betrouwbare gedeelten geselecteerd voor nader onderzoek. Resultaten van tellingen werden betrouwbaar geacht indien zowel de deeltjesconcentratie als de deeltjesgrootteverdeling gedurende enige tijd constant waren.

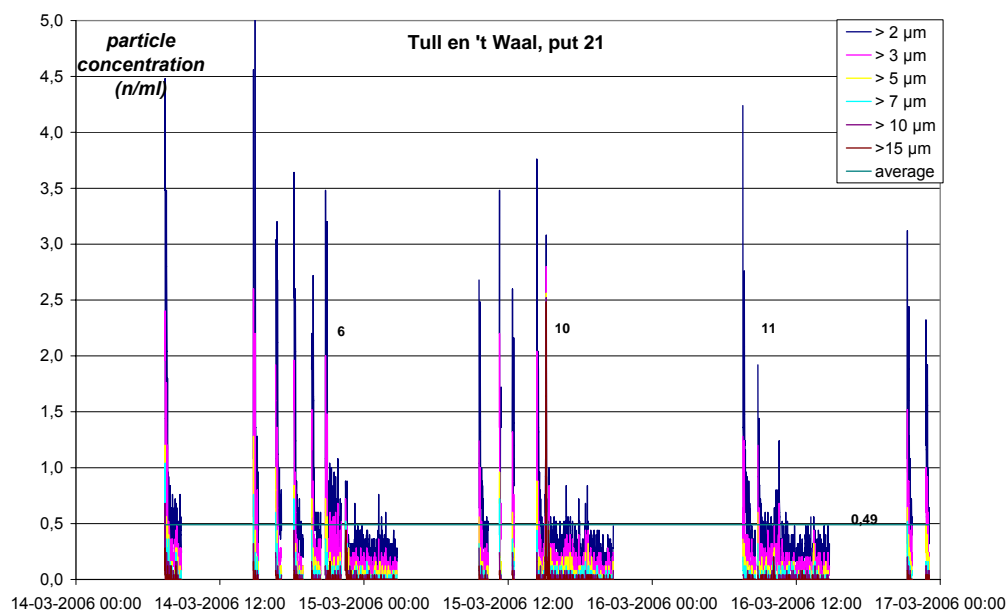
Een belangrijke veronderstelling voor der berekening van de gemiddelde concentratie is de aanwezigheid van een evenwichtssituatie: alle deeltjes die gedurende de onttrekking op de boorgatwand zijn geaccumuleerd, worden bij het schakelen gemobiliseerd.

Om een mogelijke vertekening als gevolg van de gebruikte deeltjesteller te voorkomen, worden de resultaten per teller besproken.

#### **PAMAS7608**

Onderstaande afbeelding toont voor put 21 het verloop van de deeltjesconcentratie gedurende onttrekking over het aangegeven tijdvak. Aannemende dat over dit tijdvak evenwicht bestaat tussen aan- en afvoer van deeltjes op de boorgatwand (aanvoer na verloop van tijd tijdens onttrekking en afvoer tijdens aanschakelen van de put) kan een gemiddelde aanvoerconcentratie worden berekend, namelijk 0,49/ml deeltjes > 2 µm. Deze concentratie deeltjes > 2 µm is in de afbeelding aangegeven. Uit de afbeelding blijkt dat gedurende dit tijdvak meerdere keren gedurende korte perioden (korter dan 1 à 2 uur) werd onttrokken, en de concentratie nog

geen constante waarde heeft bereikt. Indien deze korte perioden worden betrokken bij de schatting van de concentratie in het onttrokken grondwater resulteert dit in een te hoge waarde voor de aanvoerconcentratie.



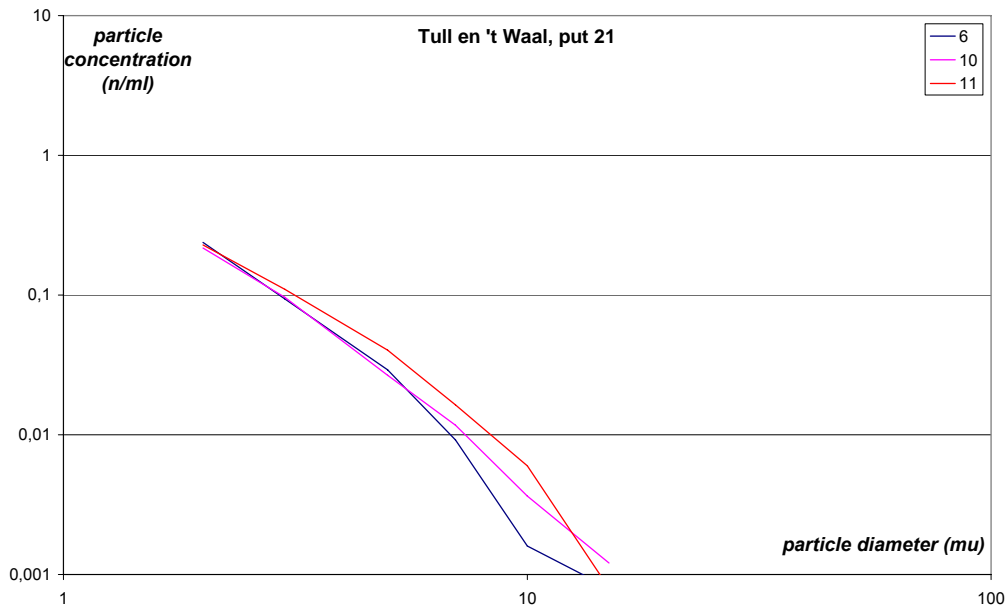
Afb. 6.3: Verloop van de deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater van put 21. De nummers geven de verder uitgewerkte onttrekkingsperioden aan.

Van de drie lange (aangegeven) onttrekkingsperioden is uit de 100 laatste waarnemingen de gemiddelde concentratie van deeltjes  $> 2 \mu\text{m}$  berekend. Deze concentratie bedraagt respectievelijk 0,24, 0,22 en 0,23/ml.

Beschouwing van de gemeten achtergrondconcentratie en de berekende werkelijke achtergrondconcentratie leert dat ruim de helft  $((0,49-0,23)/0,49)$  van de met het grondwater aangevoerde deeltjes op de boorgatwand wordt afgefilterd.

Op dezelfde wijze is de deeltjesgrootteverdeling berekend. De fractie deeltjes  $> 3 \mu\text{m}$  ten opzichte van  $> 2 \mu\text{m}$  bedraagt respectievelijk 0,39, 0,44 en 0,48.

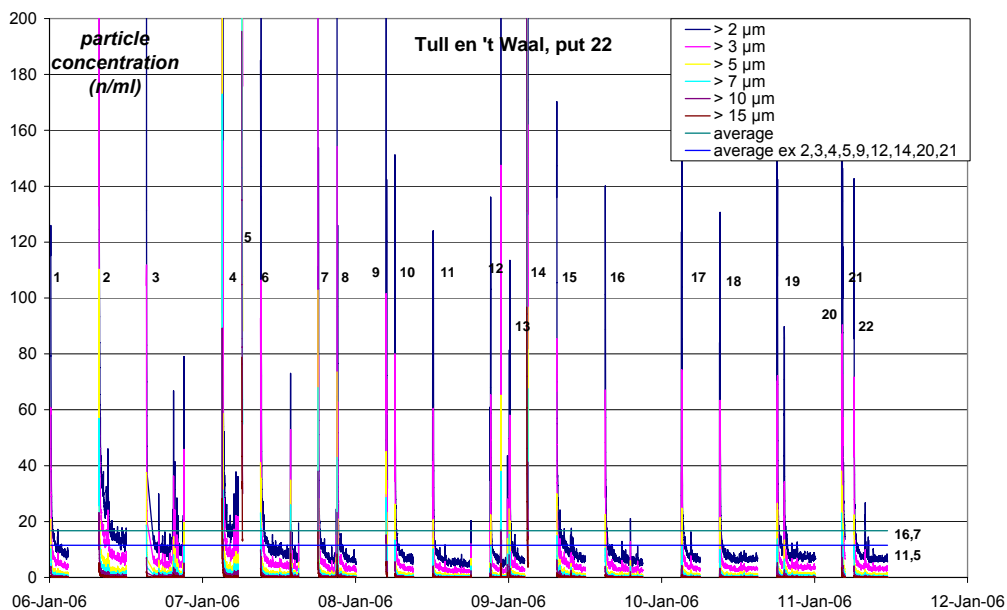
Onderstaande afbeelding geeft de relatie tussen deeltjesconcentratie en deeltjesdiameter.



Afb. 6.4: Relatie tussen deeltjesconcentratie en deeltjesdiameter.

De resultaten van een deeltjestelling van put 22 zijn op vergelijkbare wijze bewerkt.

Onderstaande afbeelding toont het verloop van de deeltjesconcentratie gedurende de achtereenvolgende onttrekkingsperioden in put 22.



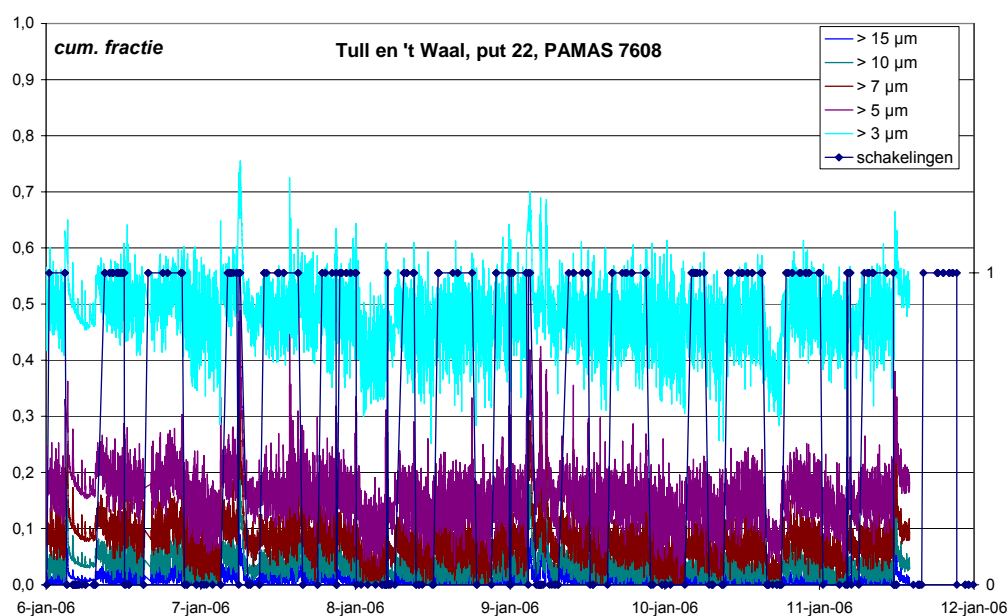
Afb. 6.5: Verloop van de deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater van put 22. De nummers geven de afzonderlijke onttrekkingsperioden weer.

Uit deze afbeelding is het algemene verloop van de deeltjesconcentratie duidelijk: een hoge piek in deeltjesconcentratie bij het aanschakelen, waarna de concentratie geleidelijk afloopt naar een lage concentratie. Echter bij het uitschakelen van de put is niet in alle gevallen de achtergrond concentratie bereikt.

Andere opvallende aspecten zijn het verschil in hoogte van de pieken in concentratie, het optreden van verstoringen tijdens de meting, en de aanwezigheid van korte onttrekkingsperioden.

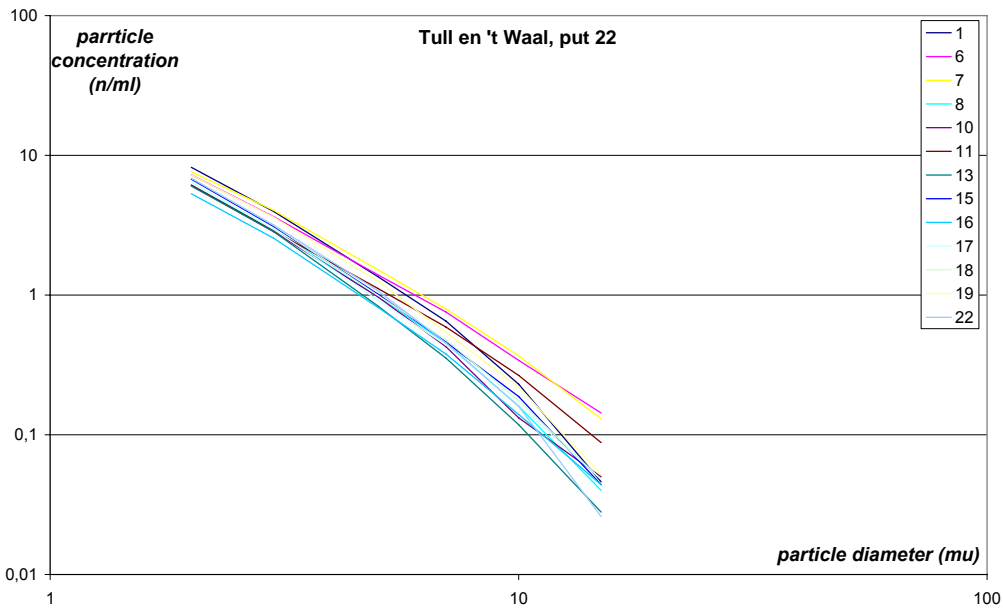
Indien wordt aangenomen dat sprake is van een evenwichtssituatie in aanvoer en afvoer van deeltjes (de put verstopt niet), dan is het mogelijk de werkelijke achtergrondconcentratie te berekenen. Indien alle resultaten van de metingen in deze berekening worden betrokken, is de berekende concentratie deeltjes > 2 µm gelijk aan 16,7/ml; indien alle metingen met verstoringen en korte metingen buiten beschouwing worden gelaten, is de berekende concentratie deeltjes > 2 µm gelijk aan 11,5/ml.

Onderstaande afbeelding toont de cumulatieve deeltjesgrootteverdeling. Hieruit blijkt de variatie in deeltjesgrootteverdeling (tijdens onttrekking en tijdens rust).



Afb. 6.7: Verloop van de deeltjesgrootteverdeling gedurende het aangegeven tijdvak tijdens bedrijf en tijdens rust.

Van de "correcte" resultaten is bij iedere schakelperiode de gemeten achtergrondconcentratie berekend als gemiddelde van de laatste 20 waarnemingen. In onderstaande afbeelding is de berekende concentratie als functie van de deeltjesdiameter weergegeven .

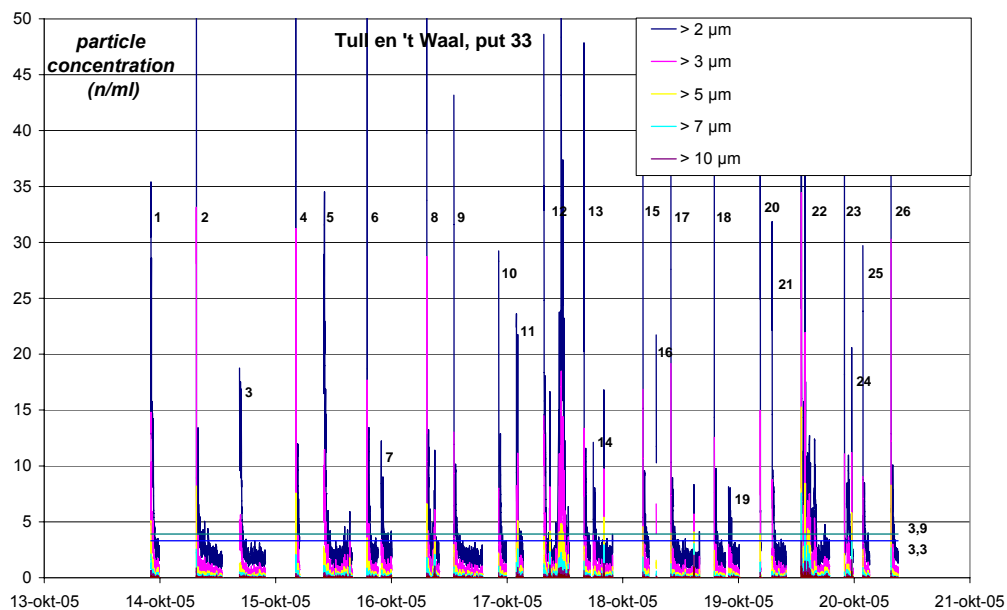


Afb. 6.6: Relatie tussen deeltjesconcentratie en deeltjesdiameter.

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de gemeten achtergrondconcentratie deeltjes  $> 2 \mu\text{m}$  varieert tussen 5,3 en 7,6/ml. Aannemende dat in meerdere tellingen nog geen constante waarde was bereikt, zal de correcte waarde zich aan de onderzijde van het traject bevinden, namelijk circa 6/ml. Dat betekent dat bijna de helft  $((11,5-6)/11,5)$  van de meegevoerde deeltjes op de boorgatwand wordt afgefilterd.

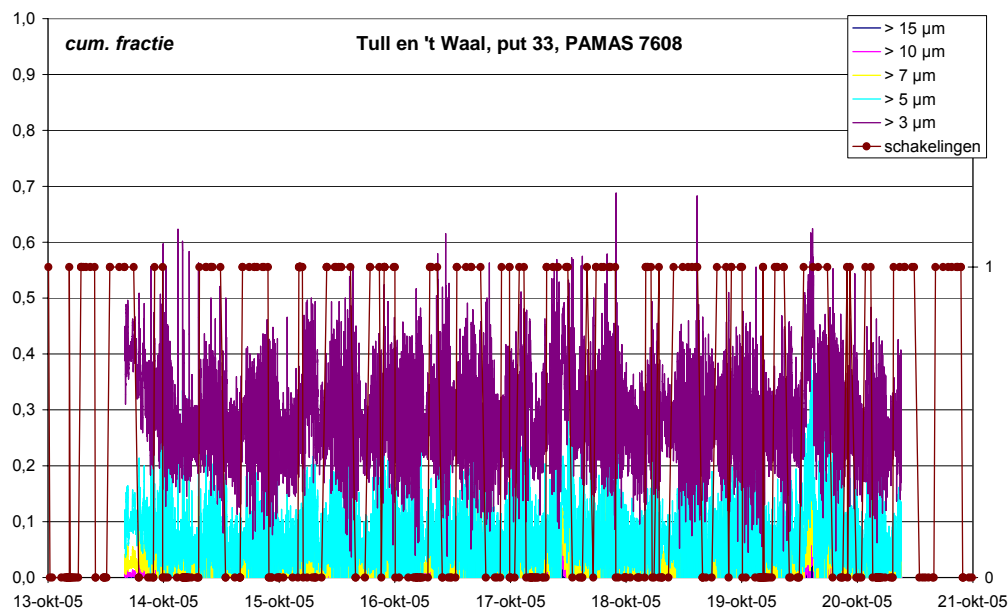
Tevens kan uit bovenstaande afbeelding de verhouding worden berekend tussen de deeltjes  $> 3 \mu\text{m}$  en  $> 2 \mu\text{m}$ . Deze verhouding bedraagt 0,48.

Dezelfde procedure is uitgevoerd voor put 33; het resultaat is in onderstaande afbeeldingen samengevat.



Afb. 6.8: Verloop van de deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater van put 33. De nummers geven de afzonderlijke onttrekkingsperioden weer.

De gemeten achtergrondconcentratie van deeltjes > 2 µm in put 33 is gelijk aan 3,9/ml indien alle resultaten worden beschouwd, en 3,3/ml indien alleen de "correcte" resultaten worden beschouwd.

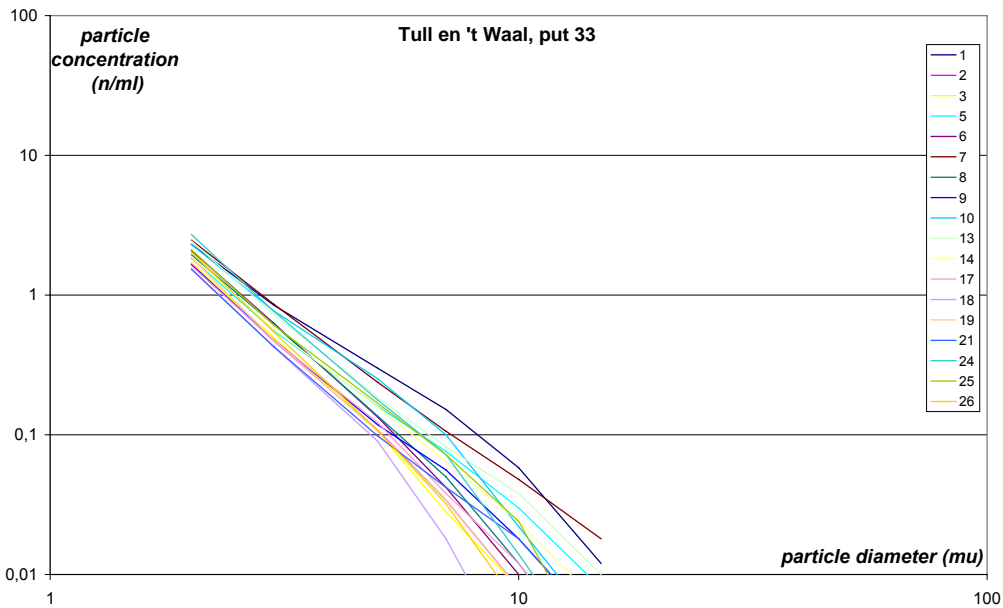


Afb. 6.10: Verloop van de deeltjesgrootteverdeling gedurende het aangegeven tijdvak tijdens bedrijf en tijdens rust.

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat na het aanschakelen van de put de spreiding in de fractie deeltjes > 3 µm toeneemt. Deze toename in de spreiding wordt veroorzaakt door de afname in deeltjesconcentratie.

Tevens is bij iedere schakeling uit de 20 laatste waarnemingen de gemiddelde concentratie berekend. De resultaten zijn in onderstaande afbeelding weergegeven.

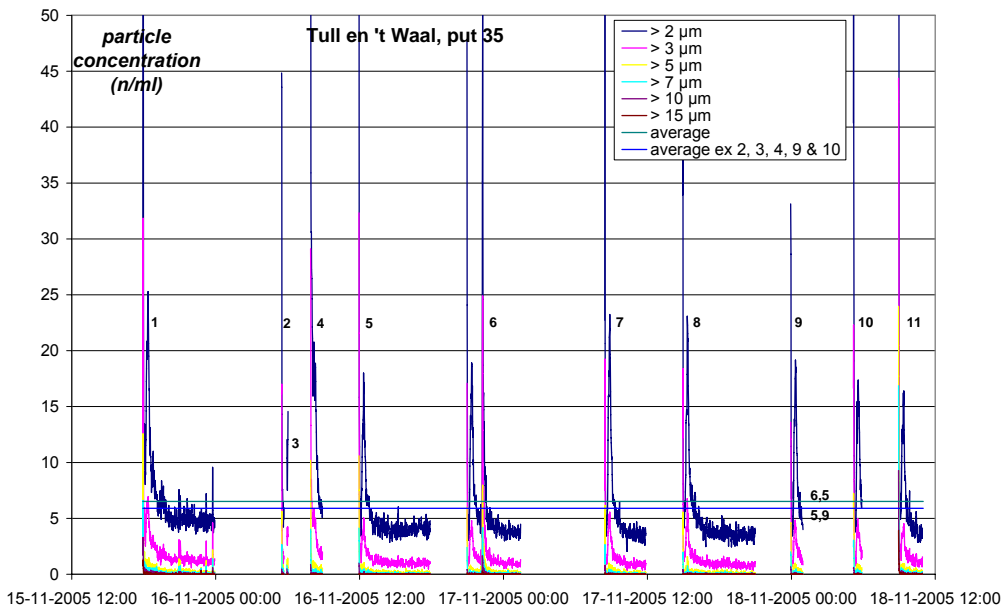




Afb. 6.9: Relatie tussen deeltjesconcentratie en deeltjesdiameter.

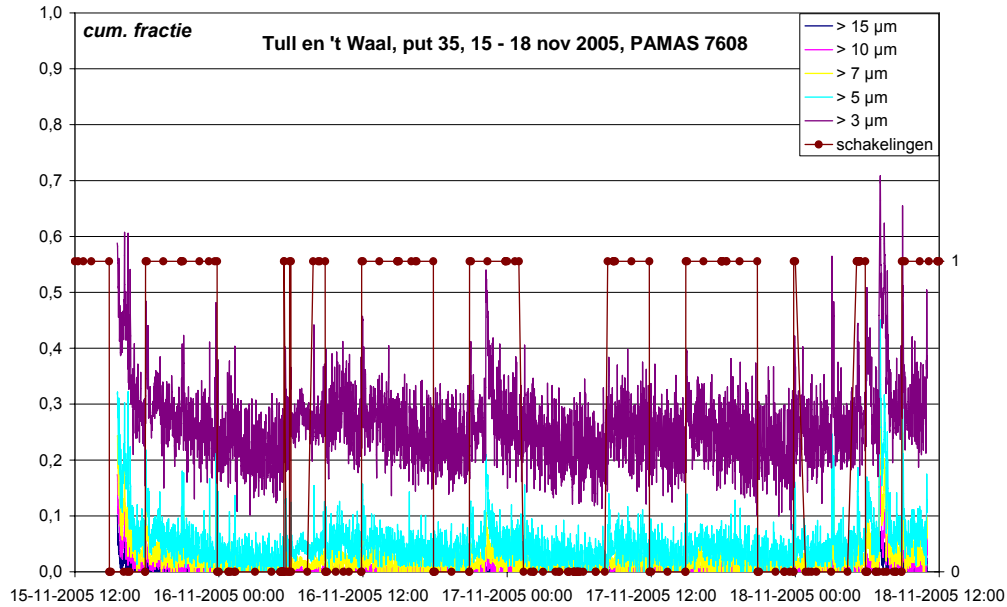
Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de concentratie van deeltjes > 2 µm varieert tussen 1,53 en 2,76/ml, en het zwaartepunt van de concentraties gelijk is aan circa 1,7/ml. Ook bij put 33 wordt dus ongeveer de helft ((3,3-1,7)/3,3) van de aangevoerde deeltjes afgefilterd op de boorgatwand. De fractie deeltjes > 3 µm over > 2 µm is gelijk aan 0,30.

Onderstaande afbeeldingen tonen het resultaat van dezelfde bewerkingen op de resultaten van de deeltjestellingen van put 35.



Afb. 6.11: Verloop van de deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater van put 35. De nummers geven de afzonderlijke onttrekkingsperioden weer.

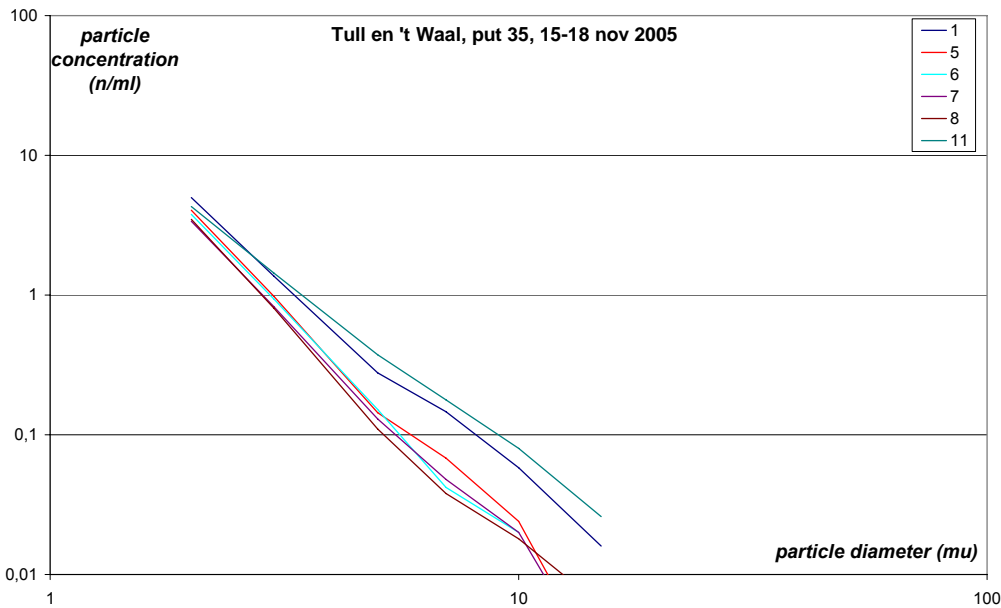
Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de berekende gemiddelde achtergrondconcentratie van deeltjes  $> 2 \mu\text{m}$  gelijk is aan 6,5/ml, en indien de korte onttrekkingsperioden buiten beschouwing worden gelaten gelijk aan 5,9/ml.



Afb. 6.13: Verloop van de deeltjesgrootteverdeling gedurende het aangegeven tijdvak tijdens bedrijf en tijdens rust.

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de fractie deeltjes  $> 3 \mu\text{m}$  gedurende iedere onttrekkingsperiode niet constant is, maar afneemt. Blijkbaar is aanvankelijk de fractie grove deeltjes groter, en neemt gedurende de onttrekkingsperiode af.

Onderstaande afbeelding geeft de relatie tussen deeltjesdiameter en deeltjesconcentratie, zoals berekend als gemiddelde uit de laatste 20 tellingen van de aangegeven onttrekkingsperioden.



Afb. 6.14: Relatie tussen deeltjesconcentratie en deeltjesdiameter.

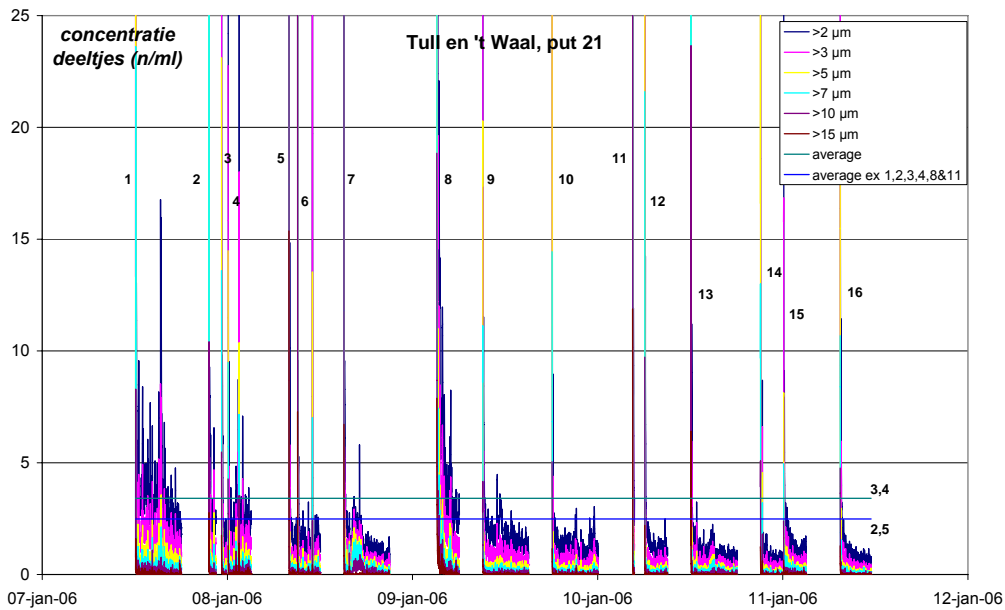
Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de gemiddelde concentratie deeltjes  $> 2 \mu\text{m}$  varieert tussen 3,38 en 4,98/ml. Aannemende dat de "correcte" concentratie zich aan de benedenzijde van het traject zal bevinden, en gelijk zal zijn aan circa 3,6/ml. Beschouwing van de verhouding tussen berekende gemeten achtergrondconcentratie deeltjes  $> 2 \mu\text{m}$ , 3,6/ml, en berekende werkelijke achtergrondconcentratie, 5,9/ml, leert dat circa 40%  $((5,9-3,6)/5,9 \approx 0,4)$  van de met het onttrokken grondwater meegevoerde deeltjes op de boorgatwand wordt afgefilterd.

Uit bovenstaande afbeelding kan ook de concentratieverhouding tussen deeltjes  $> 3 \mu\text{m}$  en deeltjes  $> 2 \mu\text{m}$  worden berekend. Deze verhouding is gelijk aan 0,25.

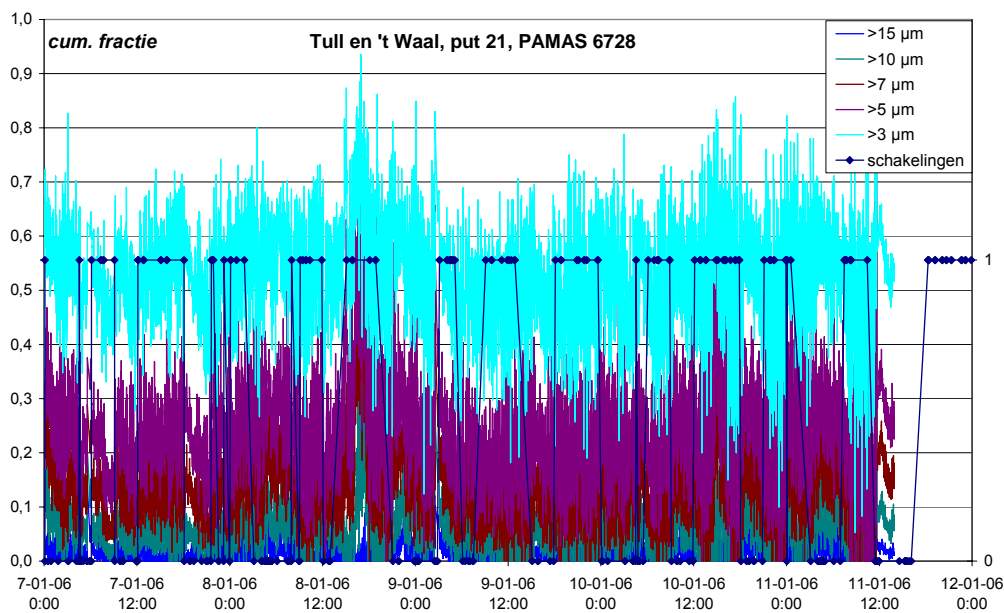
### **PAMAS6728**

In deze sectie worden de resultaten van de metingen met de PAMAS6728 besproken.

Onderstaande afbeelding toont voor put 21 het verloop van de deeltjesconcentratie over de aangegeven periode. Uit de afbeeldingen blijkt dat de achtergrondconcentratie van deeltjes  $> 2 \mu\text{m}$  3,4 en 2,5/ml bedraagt.

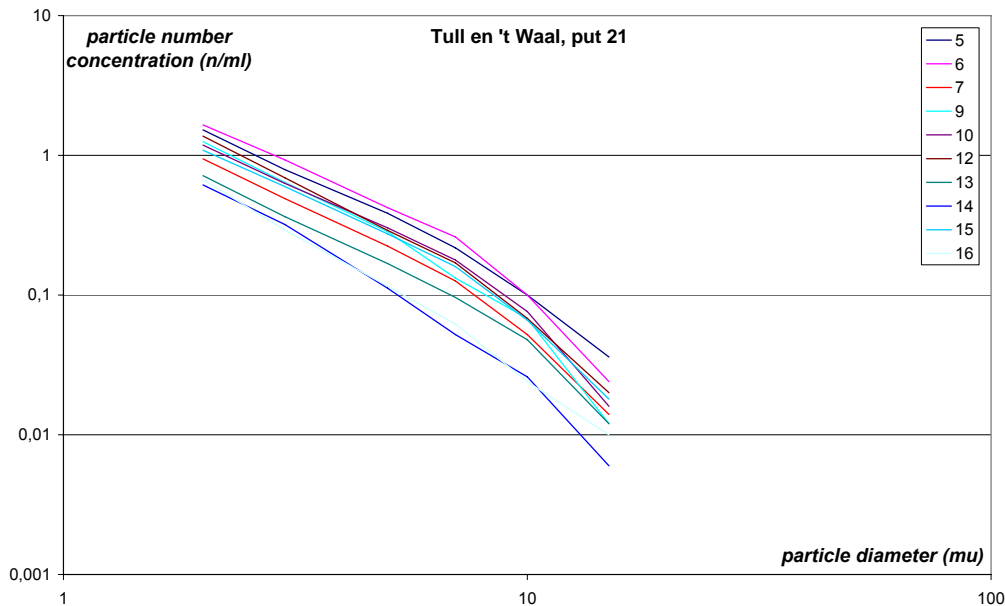


Afb. 6.15: Verloop van de deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater van put 21. De nummers geven de afzonderlijke onttrekkingsperiodes weer.



Afb. 6.16: Verloop van de deeltjesgrootteverdeling gedurende het aangegeven tijdvak tijdens bedrijf en tijdens rust.

Van de "correcte" resultaten is bij iedere schakelfrequentie de gemeten achtergrondconcentratie berekend als gemiddelde van de laatste 20 waarnemingen en in onderstaande afbeelding weergegeven als functie van de deeltjesdiameter.



Afb. 6.17: Relatie tussen deeltjesconcentratie en deeltjesdiameter.

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de gemiddelde concentratie deeltjes  $> 2 \mu\text{m}$  varieert tussen 0,61 en 1,65/ml. Uit de berekende achtergrondconcentratie, 2,5/ml, en de gemeten achtergrondconcentratie geschat op 1/ml, kan de fractie worden berekend die op de boorgatwand achterblijft, nl  $(2,5-1)/2,5 = 0,6$ .

Uit bovenstaande afbeelding kan ook de verhouding tussen deeltjes  $> 3 \mu\text{m}$  en deeltjes  $> 2 \mu\text{m}$  worden berekend. deze verhouding bedraagt 0,52.

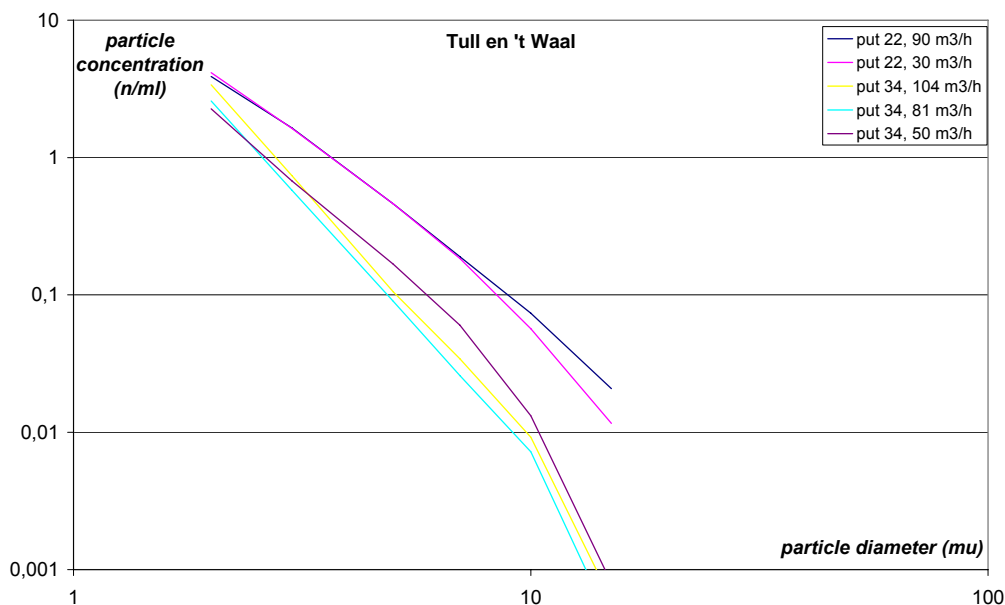
### 6.3.2 Tellingen tijdens pompproeven

Bij de uitwerking van de pompproeven is op het oog dezelfde kwaliteitscontrole toegepast als bij de normale bedrijfsvoering: alleen die metingen met een constante deeltjesconcentratie en met een constante deeltjesgrootteverdeling zijn in beschouwing genomen.

Vervolgens is uit de eerste 200 waarnemingen na middernacht de gemiddelde concentratie berekend. De resultaten van deze berekeningen zijn in onderstaande afbeeldingen weergegeven.

#### **PAMAS6728**

Onderstaande afbeelding toont de relatie tussen deeltjesconcentratie en deeltjesdiameter voor de putten 22 en 34.

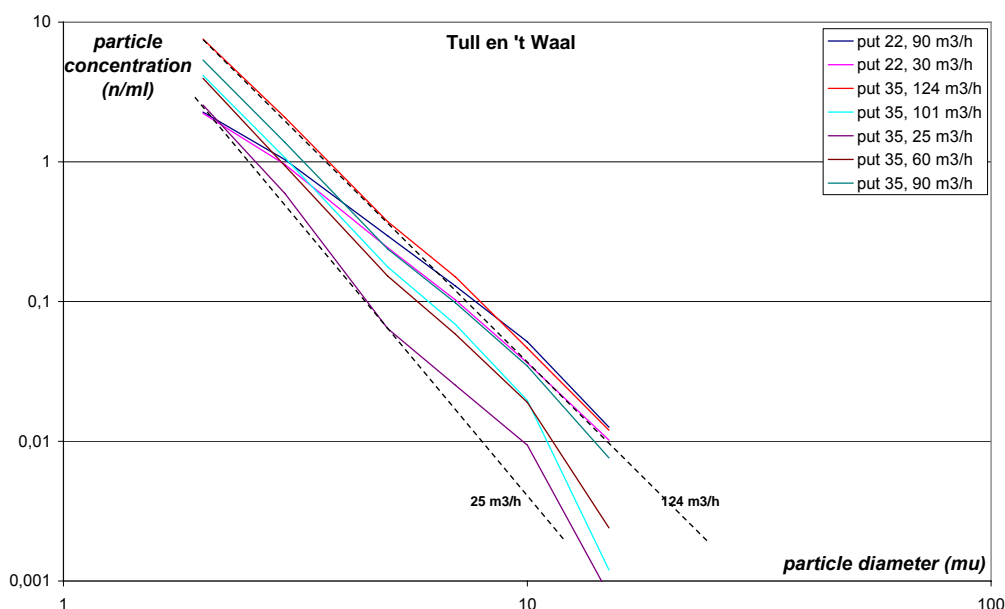


Afb. 6.18: Deeltjesconcentratie als functie van deeltjesdiameter tijdens de pompproeven op de aangegeven putten bij de aangegeven volumestromen.

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de concentratie deeltjes  $> 2 \mu\text{m}$  in put 22 bij een onttrekking van circa  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  gelijk is aan  $3,9/\text{ml}$  en in put 34 bij een onttrekking van  $70 \text{ m}^3/\text{h}$  aan  $3,3/\text{ml}$ , en dat de fractie deeltjes  $> 3 \mu\text{m}$  over  $> 2 \mu\text{m}$  in put 22 gelijk is aan  $0,42$  en in put 34 aan  $0,22$ .

### PAMAS7608

Onderstaande afbeelding toont dezelfde relatie voor put 22 en put 35.



Afb. 6.19: Deeltjesconcentratie als functie van deeltjesdiameter tijdens de pompproeven op de aangegeven putten bij de aangegeven volumestromen.

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat in put 22 de concentratie van deeltjes > 2 µm bij een onttrekking van circa 100 m<sup>3</sup>/h gelijk is aan 2,2/ml, in put 35 bij een onttrekking van circa 70 m<sup>3</sup>/h aan 4/ml, en de fractie deeltjes > 3 µm over 2 µm in put 22 gelijk aan 0,46 en in put 35 aan 0,26.

In bovenstaande afbeelding is tevens voor put 35 de helling voor verschillende volumestromen aangegeven. Het verschil in helling bevestigt de waarneming tot nu toe: hoe groter de onttrekking des te vlakker de helling.

### 6.3.3 Evaluatie

In onderstaande tabel zijn alle berekende waarden voor de aangegeven parameters verzameld, aangevuld met het verwijderd aantal deeltjes bij schakelen, zoals vermeld in de rapportage over 2005.

Tabel 6.3: Overzicht van kengetallen van deeltjes in de aangegeven metingen

put	datum	1	2	3	4	5
<i>tijdens normale bedrijfsvoering</i>						
	PAMAS1655					
35	10-13 aug 2005					500-1250
	PAMAS1676					
33	10-15 aug 2005					
	PAMAS6728					
21	6-11 jan 2006	1,0	0,52	2,5	60%	50-100
33	5-26 okt 2005, 70 m <sup>3</sup> /h					200-500
33	10-20 mrt 2006, 100 m <sup>3</sup> /h					100-250
35	15-18 nov 2005					1000-1500
<i>tijdens pompproef</i>						
22	120 m <sup>3</sup> /h	4,8	0,5	-	-	
33						
34	70 m <sup>3</sup> /h	3,0	0,23	-	-	
35						
	PAMAS7608					
<i>tijdens normale bedrijfsvoering</i>						
21	14-17 mrt 2006	0,23	0,44	0,49	50%	25-50
22	6-11 jan 2005 (150 m <sup>3</sup> /h)	6	0,48	11,5	50%	750-2000
33	14-21 okt 2005	1,7	0,30	3,3	50%	150-300
33	15-20 feb 2006					90-180
35	15-18 nov 2005	3,6	0,25	5,9	40%	500-900?
<i>tijdens pompproef</i>						
22	120 m <sup>3</sup> /h	2,0?	0,47?	-	-	
33						
35	70 m <sup>3</sup> /h?	2,8	0,23	-	-	

kolom 1: gemeten (achtergrond) concentratie > 2 µm (n/ml) in onttrokken grondwater

kolom 2: gemeten fractie > 3 µm

kolom 3: berekende achtergrond concentratie > 2 µm (n/ml) in toestromend grondwater

kolom 4: berekende fractie > 2 µm afgefilterd op boorgatwand

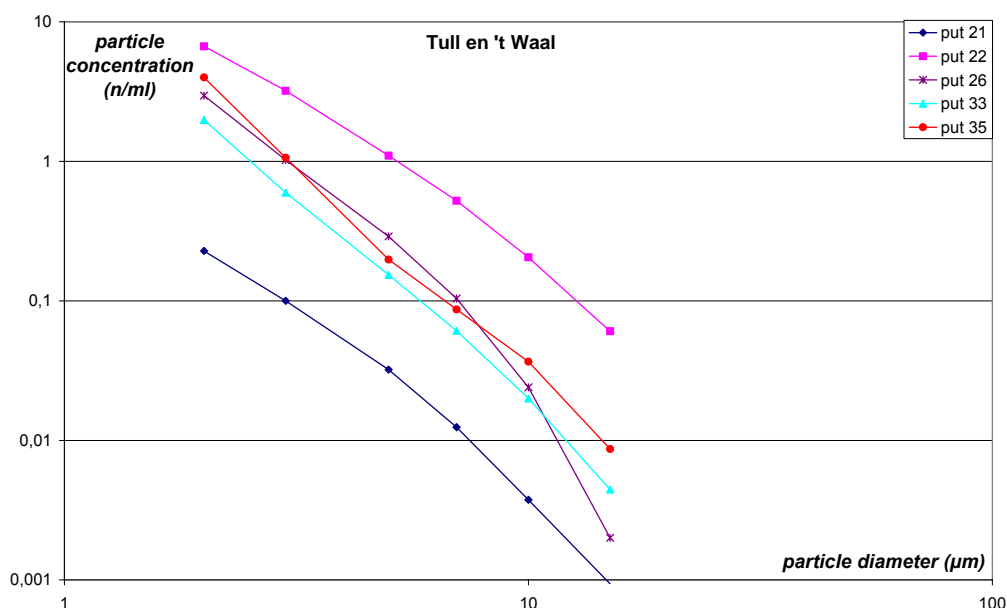
kolom 5: berekend verwijderd aantal hoeveelheid deeltjes > 2 µm

Uit bovenstaande tabel blijken grote verschillen in deeltjesconcentratie van de verschillende putten. De hoogste en de laagste concentraties verschillen tijdens normale bedrijfsvoering een factor 25 (PAMAS7608). Opmerkelijk is dat het onttrokken grondwater van de oude put 22 de hoogste concentratie deeltjes bevat. Reageert de put daarom zo scherp op wijzigingen in de bedrijfsvoering?

Opvallend is dat op deze wijze berekend circa de helft van de met het onttrokken grondwater aangevoerde deeltjes op de boorgatwand wordt afgefilterd. Het maakt daarbij niet uit of het een oude, verstopte of een nieuwe, volledig ontwikkelde put betreft.

Wel blijkt een duidelijk verschil in deeltjesgrootteverdeling tussen enerzijds de oude, verstopte putten en anderzijds de nieuwe, volledig ontwikkelde putten.

Deze laatste waarneming wordt bevestigd door de relatie tussen deeltjesdiameter en deeltjesconcentratie, zie onderstaande afbeelding. De helling van de putten 21 en 22 vertoont een vlakker verloop dan die van de putten 33 en 35. Dit verschil in helling duidt op de aanwezigheid van een grotere fractie grove deeltjes in het onttrokken grondwater van de putten 21 en 22 in vergelijking met de putten 33 en 35.



Afb. 6.20: Relatie tussen deeltjesdiameter en deeltjes(aantal)concentratie in het onttrokken grondwater van de aangegeven putten, dubbellogarithmisch weergegeven. (Meting uitgevoerd met PAMAS7608)

Voor dit verschil in deeltjesgrootteverdeling tussen enerzijds de putten 21 en 22 en anderzijds de putten 33 en 35 zijn meerdere verklaringen mogelijk, namelijk uitputting van de voorraad deeltjes of verschil in capaciteit van de onderwaterpomp.

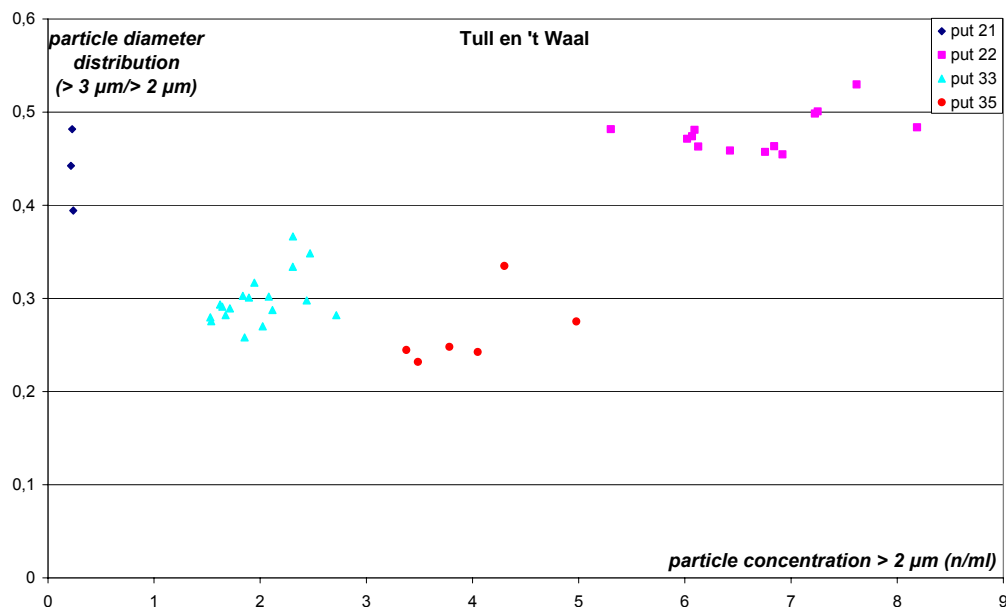
De putten 21 en 22 zijn al lang in bedrijf, de putten 33 en 35 nog maar kort. Kleine deeltjes worden tijdens normale bedrijfsvoering gemobiliseerd en getransporteerd, grove deeltjes alleen tijdens het aanschakelen van de onderwaterpomp. Aangezien de schakelperioden (veel) korter zijn dan de



normale onttrekkingsperioden, zullen in het bijzonder kleine deeltjes worden onttrokken. De putten 21 en 22 zouden dan dus uitgeput zijn geraakt in kleine deeltjes. Deze verklaring van het verschil in deeltjesgrootte wordt onwaarschijnlijk geacht.

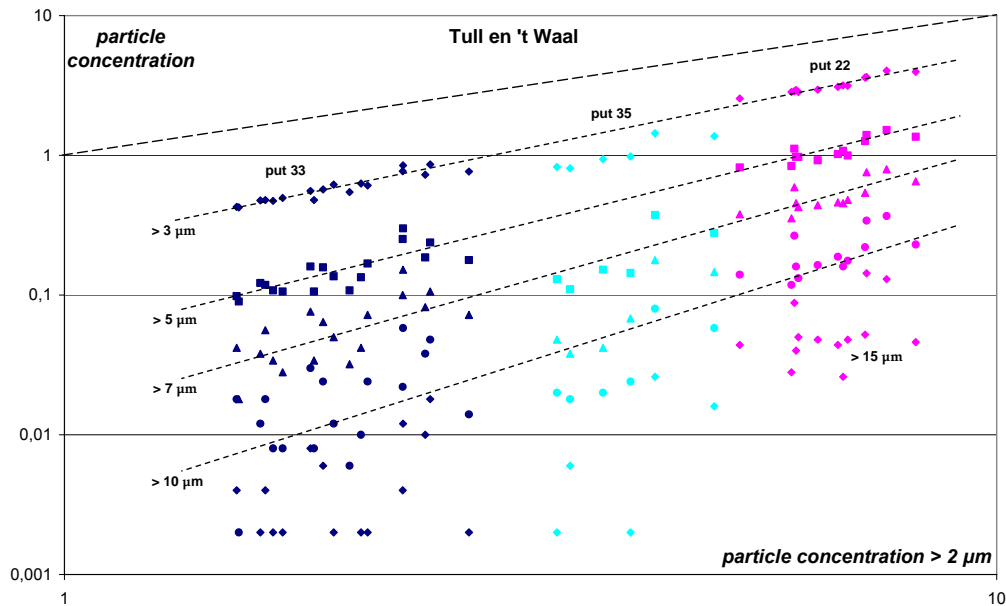
Het verschil in deeltjesgrootteverdeling valt samen met een verschil in capaciteit van de onderwaterpompen. Bekend is dat een toenemende volumestroom resulteert in een meer dan proportionele toename van grove deeltjes (net zoals een afname in volumestroom gepaard gaat met een meer dan proportionele afname van grove deeltjes). Deze verklaring is in lijn met andere verklaringen, en daarom het meest waarschijnlijk.

Onderstaande afbeelding toont de concentratieverhouding van deeltjes  $> 3 \mu\text{m}$  ten opzichte van  $> 2 \mu\text{m}$  als functie van de deeltjesconcentratie  $> 2 \mu\text{m}$ . Dit zijn de gemiddelde concentraties aan het einde van de bestudeerde onttrekkingsperioden.



Afb. 6.21: Relatie tussen deeltjesconcentratie  $> 2 \mu\text{m}$  en fractie deeltjes  $> 3 \mu\text{m}$ . (metingen uitgevoerd met PAMAS7608).

Uit bovenstaande afbeelding blijkt duidelijk dat twee groepen kunnen worden onderscheiden, namelijk put 21 en 22 met een verhouding van circa 0,45, en de putten 33 en 35 met een verhouding van circa 0,28. Bovendien lijkt de deeltjesgrootteverdeling afhankelijk is van de deeltjesconcentratie  $> 2 \mu\text{m}$ : hoe lager de concentratie des te kleiner de fractie deeltjes  $> 3 \mu\text{m}$ . Deze relatie is specifiek per put. Dit aspect is in onderstaande afbeelding nader uitgewerkt. In deze afbeelding zijn de deeltjesconcentraties  $> 3 \mu\text{m}$ ,  $> 5 \mu\text{m}$ ,  $> 7 \mu\text{m}$ ,  $> 10 \mu\text{m}$  en  $> 15 \mu\text{m}$  weergegeven als functie van de deeltjesconcentratie  $> 2 \mu\text{m}$ .



Afb. 6.22: Relatie tussen deeltjesconcentratie  $> 2 \mu\text{m}$  en deeltjesconcentraties  $> 3 \mu\text{m}$ ,  $> 5 \mu\text{m}$ ,  $> 6 \mu\text{m}$ ,  $> 10 \mu\text{m}$  en  $> 15 \mu\text{m}$ . (Metingen uitgevoerd met PAMAS6708.)

De bovenste (gestippelde) lijn geeft een evenredige afname in de concentratie weer: indien de deeltjesconcentratie  $> 2 \mu\text{m}$  een factor 10 afneemt, nemen ook alle andere concentraties een factor 10 af. Uit de afbeelding blijkt dat de helling door de deeltjesconcentraties  $> 3 \mu\text{m}$  sterker af neemt dan de concentratie  $> 2 \mu\text{m}$ . En de helling behorend bij de deeltjesconcentratie  $> 5 \mu\text{m}$  is weer steiler dan de helling behorend bij de deeltjesconcentratie  $> 3 \mu\text{m}$ . De deeltjesconcentratie  $> 5 \mu\text{m}$  neemt dus weer sterker af dan de deeltjesconcentratie  $> 3 \mu\text{m}$ , enzovoorts.

Met andere woorden, de afname in deeltjesconcentratie wordt niet veroorzaakt door een evenredige afname van alle deeltjesdiameters, maar door een progressieve afname van grovere deeltjes.

Deze progressieve afname in de concentratie van grove deeltjes kan verschillende oorzaken hebben.

Tijdens een onttrekkingsperiode raakt de boorgatwand steeds verder verstopt. Deze voortdurende toename van de verstopping leidt tot een toenemende filtratie van deeltjes op de boorgatwand, en daardoor tot een steeds lagere concentratie, in het bijzonder van grovere deeltjes.

Door het aanschakelen van de onderwaterpomp worden deeltjes in de bodem gemobiliseerd. Deze deeltjes zullen in de loop van de tijd vervolgens weer sedimenteren, in het bijzonder de grovere deeltjes.

Uit bovenstaande blijkt dat de gemeten achtergrondconcentratie bij één en dezelfde put in de loop van de tijd zeer varieert. Het is niet mogelijk te spreken van één achtergrondconcentratie in het onttrokken grondwater. Bij deze variatie spelen de volgende aspecten een rol:

1. Mate van verstoring bij aanschakelen van de onderwaterpomp. Hoe groter de verstoring, des te hoger de beginconcentratie.

2. Mate van verstoring ten gevolge van aanschakelen van de pomp in omringende putten. Hoe groter de verstoring, des te hoger de concentratie.
3. Lengte van de onttrekkingsperiode. Hoe langer de onttrekking, des te lager de concentratie.
4. Bij pompproeven de capaciteit van de onderwaterpomp, en de historie van de onttrekking: opgaande of neergaande verandering in capaciteit.

#### 6.4 Aanknopingspunten voor de bedrijfsvoering

In het voorgaande is diep ingegaan op het gedrag van deeltjes in het onttrokken grondwater. Zijn hieruit aanknopingspunten voor de bedrijfsvoering te extraheren? Mogelijke aanknopingspunten zijn het aantal deeltjes dat wordt verwijderd bij het aanzetten van de onderwaterpomp, en de deeltjesgrootteverdeling.

Op voorhand kan al verwacht worden dat geen absolute relaties gelegd kunnen worden: de deeltjesconcentratie in het toestromende grondwater is over de gehele lengte van het putfilter niet gelijk. Aangezien een watervoerend pakket bestaat uit opeenvolgende lagen met een verschillende korrelgrootte, ligt een onregelmatige verdeling over het putfilter meer voor de hand. Deze verwachting wordt ondersteund door de aanwezigheid van twee pieken in de deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater na het aanzetten van de onderwaterpomp bij een dubbel putfilter.

De deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater wordt in hoge mate bepaald door de sleepkracht van het onttrokken grondwater. De sleepkracht van het onttrokken grondwater wordt bepaald door de actuele volumestroom per meter filterlengte. De actuele volumestroom per m filterlengte is gelijk aan:

$$Q_{act,m} = \frac{Q}{l} \frac{Q_{spec,t=0}}{Q_{spec,t=t}}$$

hierin is:

$Q_{act,m}$  : actuele volumestroom per m filterlengte (m<sup>3</sup>/h.m)

$Q$  : capaciteit van de onderwaterpomp (m<sup>3</sup>/h)

$l$  : lengte van het putfilter (m)

$Q_{spec,t=0}$  : specifieke volumestroom bij oplevering

$Q_{spec,t=t}$  : huidige specifieke volumestroom

Deze laatste term is een correctieterm voor de mate van verstopping van de put.

Onderstaande tabel geeft enkele parameters als functie van de actuele volumestroom.

Tabel 6.4: Actuele volumestroom per m open filterlengte, en concentratie deeltjes in onttrokken grondwater en verwijderd aantal deeltjes bij aanschakelen van de onderwaterpomp.

put	1	2	3	4	5	6
20	100	16	39	16,0		
21	100	15	37	18,0	0,23	25-50
22	120	15	53	15,1	6	750-2000
33	70	22,7	99	3,1	1,7	150-300
34	70	21,6	98	3,2		
35	70	19,6	98	3,6	3,6	500-900

1: capaciteit van de onderwaterpomp ( $m^3/h$ )

2: lengte van het putfilter (m)

3: percentage huidige specifieke volumestroom tov oorspronkelijke volumestroom (-)

4: actuele volumestroom per m open filterlengte ( $m^3/h.m$ )

5: deeltjes concentratie (n/ml)

6: aantal verwijderde deeltjes (n)

Beschouwing van bovenstaande tabel laat een groot verschil zien in volumestroom per m open filterlengte tussen enerzijds de oude putten (20, 21 en 22) en anderzijds de nieuwe putten (33, 34 en 35). Uit de tabel blijkt dat er geen relatie bestaat tussen deeltjesconcentratie en actuele volumestroom per m filterlengte. Een verklaring kan zijn dat de voorraad deeltjes in het watervoerend pakket beperkt is. Uit de tabel blijkt tevens dat er geen relatie bestaat tussen actuele volumestroom en verwijderd aantal deeltjes.

Hoe groter de capaciteit van de onderwaterpomp, hoe meer afgefilterde deeltjes de pomp bij aanzetten kan verwijderen, maar dan moeten ze er wel zijn (en de van verwijdering zal ook afhankelijk zijn van de verdeling over het putfilter).

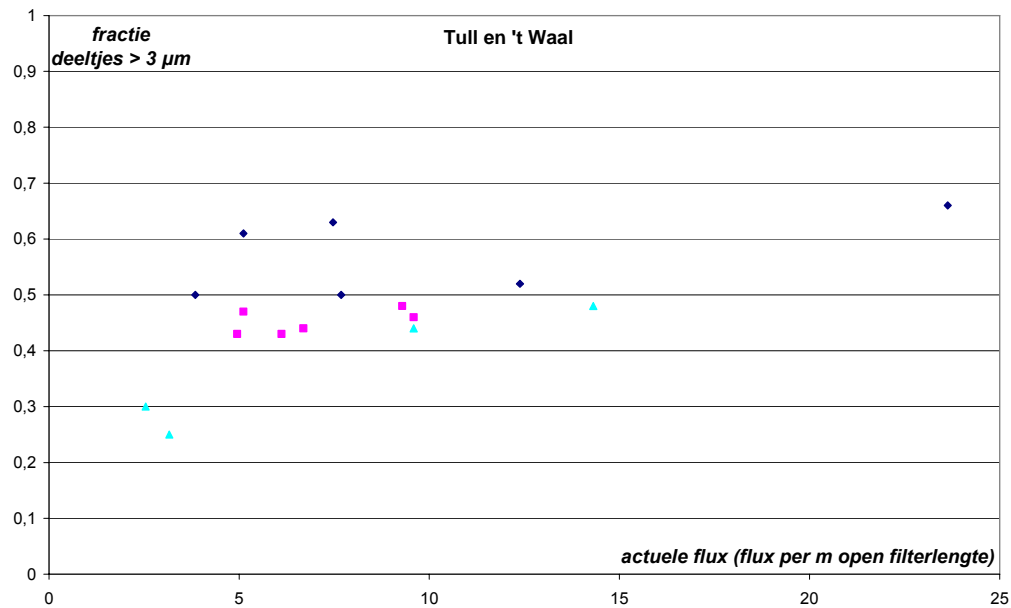
Uit bovenstaande tabel blijkt dat er wel een relatie bestaat tussen verwijderd aantal deeltjes en deeltjesconcentratie. Bij vergelijkbare putcapaciteit en bij vergelijkbare actuele volumestroom per m filterlengte worden in put 22 veel meer deeltjes verwijderd dan in put 21, en in put 35 meer dan in put 33.

Hieruit kan worden afgeleid dat put 21 en put 33 waarschijnlijk zwaarder belast kunnen worden.

*Met andere woorden bepaling van het gemiddeld aantal deeltjes dat bij aanzetten van de pomp wordt verwijderd, geeft informatie over de maximale capaciteit van de onderwaterpomp en/of de maximale duur van een onttrekkingsperiode..*

Het onttrokken grondwater kan worden gekarakteriseerd door de deeltjesconcentratie en door de deeltjesgrootteverdeling. De deeltjes concentratie is afhankelijk van de voorraad deeltjes en de verdeling over het putfilter. De deeltjesgrootteverdeling is waarschijnlijk veel ongevoeliger voor beïnvloeding dan de deeltjesconcentratie.

Onderstaande afbeelding geeft de fractie deeltjes  $> 3 \mu m$  als functie van de actuele volumestroom per m putfilter.



Afb. 6.23: Fractie deeltjes > 3 μm als functie van de actuele flux per m putfilter. Het betreft drie databestanden.

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat voor de drie getoonde verdelingen een positieve relatie aanwezig is: hoe groter de actuele volumestroom, des te hoger de fractie grove deeltjes. Uit onderzoek blijkt dat een normale fractie deeltjes > 3 μm circa 0,5 bedraagt. Hieruit kan worden afgeleid dat bij hogere waarden te hard wordt onttrokken, en bij lagere waarden te weinig.

Bovenstaande leidt tot de volgende voorlopige indeling:  
 fractie deeltjes > 3 μm > 0,55-0,60: onttrekking is te hoog  
 fractie < 0,45-0,50: onttrekking is te laag  
 tussen beide grenzen: onttrekking is correct.

# 7 Conclusies en aanbevelingen

## 7.1 Conclusies

### *Putverstopping*

1. Sedert het begin van de experimenten zijn de putten niet verstopt, maar integendeel verbeterd.
2. Op het puttenveld Tull en 't Waal kan het optreden van putverstopping met behulp van een putschakelprogramma worden voorkomen.

### *Putschakelen en putverstopping*

3. Met behulp van stijghoogtemeters kan een goed inzicht in de toestand van de putten worden verkregen. Door deze meters regelmatig uit te lezen en te verwerken, kan bij een eventuele verslechtering van de put snel worden ingegrepen.
4. Het carrousel schakelprogramma van de putten voldoet goed. Doordat de putten binnen een carrousel rouleren, is de belasting van de putten binnen een carrousel onderling vergelijkbaar.
5. Een carrousel bedrijfsperiode van 3 uur voldoet goed. Bij deze carrouselperiode is de put ook regelmatig 6 uur in bedrijf.
6. Niet alleen de bedrijfsduur, maar ook de rustduur is van belang: blijkbaar heeft de put tijd nodig voor een herverdeling van de geaccumuleerde deeltjes (onder invloed van de zwaartekracht). Ten gevolge van deze herverdeling komen de deeltjes terecht voor open gedeelten in de boorgatwand, waardoor zij wel kunnen worden afgevoerd.
7. Vanwege de benodigde rust is kort schakelen tijdens de rustperiode funest.
8. Bekend is dat (langdurige) stilstand van verstopte putten een gunstig effect heeft op mechanisch verstopte putten. In het verleden is dit effect, zonder diepgaande overwegingen, toegeschreven aan anaërobe mineralisatie van organisch materiaal als gevolg van onder andere sulfaatreductie en methaanproductie. Met de huidige beschikbare resultaten ligt het meer voor de hand, dit effect toe te schrijven aan herverdeling van deeltjes.
9. Opmerkelijk is dat de pompproeven op het oog geen nadelig effect hebben gehad op het verloop van de afpompings. De pompproeven zijn uitgevoerd met de geïnstalleerde onderwaterpomp: de maximum volumestroom was dus gelijk aan de volumestroom van de geïnstalleerde onderwaterpomp. Tijdens de pompproeven is gedurende 1 a 2 weken onttrokken met een kwart tot de volledige capaciteit van de onderwaterpomp.
10. Blijkbaar kunnen de putten, in goede conditie, een langdurige continue onttrekking zonder nadelige gevolgen doorstaan, mits de put vervolgens langer rust krijgt.

11. Er zijn aanwijzingen dat een put gedurende enige tijd zwaar mag worden belast (veel bedrijfsuren mag maken), indien de put vervolgens wel de gelegenheid krijgt om te herstellen.
12. De carroussels worden niet alle even zwaar belast. De indruk bestaat dat de putten in de minst belaste carrousselgroep de grootste verbetering tonen.
13. Een langdurige continue onttrekking behoeft niet tot putverstopping te leiden, indien deze periode maar gevolgd wordt door een adequate rustperiode.
14. Maximale ontwikkeling van een put leidt inderdaad tot minder filtratie van deeltjes op de boorgatwand, en maakt de put daardoor minder kwetsbaar voor putverstopping.

#### *Putschakelen en verwijderd aantal deeltjes*

15. De hypothese dat het verwijderd aantal deeltjes evenredig is met de duur van de voorgaande bedrijfsperiode kon niet door deeltjestellingen worden bevestigd. De gebruikte apparatuur voldeed niet onder de omstandigheden van puttenveld Tull en 't Waal (was niet in staat langdurig betrouwbare metingen te produceren). Bovendien werden de resultaten van de metingen verstoord door veelvuldig korte schakelingen.
16. Bij de oude, verstopte putten (put 20, 21 en 22) is geen relatie aanwezig tussen verwijderd aantal deeltjes en duur van de voorgaande onttrekkingsperiode: bij iedere schakeling wordt een vergelijkbaar aantal deeltjes verwijderd. Bij de nieuwe putten (put 33, 34 en 35) is enkele malen een zwakke relatie aanwezig: bij een korte duur van de voorgaande onttrekkingsperiode wordt soms een geringer aantal deeltjes verwijderd.  
Dit verschil in gedrag kan verklaard worden door aan te nemen dat bij de oude putten een grote voorraad deeltjes rond de put aanwezig is, waar bij iedere schakeling steeds een vergelijkbare hoeveelheid wordt verwijderd. Bij de nieuwe putten, die maximaal zijn ontwikkeld, is een geringe voorraad deeltjes rond de put aanwezig. Deze geringe voorraad reageert veel scherper op de afgefilterde hoeveelheid, resulterend in een (zwakke) relatie tussen verwijderde hoeveelheid deeltjes en duur van de voorgaande onttrekkingsperiode.
17. Er blijkt wel een zwakke relatie aanwezig tussen verwijderd aantal deeltjes en voorgaande rustperiode. Een put heeft regelmatig rust nodig!
18. Het verloop van de deeltjesconcentratie vertoont na korte uitschakelingen geen piek in de concentratie. Door deze korte uitschakelingen worden dus geen deeltjes verwijderd.  
Het effect van korte aanschakelingen is niet te beoordelen, omdat het onttrokken grondwater de putkop nog niet kan hebben bereikt.
19. De invloed van de veelvuldig korte schakelingen op de resultaten is onbekend, maar waarschijnlijk nadelig.

### *Deeltjes in grondwater*

20. Uit de resultaten van de pompproeven blijkt dat de deeltjesconcentratie tot circa 100 m<sup>3</sup>/h niet of nauwelijks varieert; bij grotere onttrekking neemt de concentratie toe.
21. Aangezien alle putten bij de geïnstalleerde onderpompen en daarbij behorende deeltjesconcentraties verbeteren, is de deeltjesconcentratie niet limiterend. Dit duidt er op dat er waarschijnlijk ruimte is voor installatie van grotere onderwaterpompen.
22. Van de in het onderzoek betrokken putten is de concentratie het laagst in put 21 (0,25 deeltjes > 2 µm/ml) en het hoogst in put 22 (6 deeltjes > 2 µm/ml). De concentraties in de putten 33 en 35 bevinden zich hiertussen.
23. Er is geen sprake van een eenduidige achtergrondconcentratie deeltjes > 2 µm per put. Deze variatie in gemeten achtergrondconcentratie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de mate van verstoring bij het starten van de onderwaterpomp: hoe groter deze verstoring, des te hoger de beginconcentratie, des te langer het duurt voor de werkelijke achtergrondconcentratie wordt bereikt (indien deze al wordt bereikt). Daarom is de concentratie deeltjes aan het einde van elke onttrekkingsperiode niet gelijk.
24. Ook de deeltjesgrootteverdeling laat tussen de onderzochte putten verschillen zien: de fractie van de concentratie deeltjes > 3 µm ten opzichte van de concentratie deeltjes > 3 µm bedraagt in de putten 21 en 22 circa 0,5 en in de putten 33 en 35 circa 0,3.
25. Het niveau van de deeltjesconcentratie als functie van de onttrekkingscapaciteit tijdens pompproeven is niet gelijk aan het niveau tijdens normale bedrijfsvoering, de deeltjesgrootteverdeling is wel vergelijkbaar. Er is duidelijk geen sprake van één achtergrondconcentratie.
26. De gemeten deeltjes concentraties zijn concentraties na filtratie over de boorgatwand; de concentratie in het toestromende grondwater moet hoger zijn. Met behulp van balansberekeningen, waarbij evenwicht wordt verondersteld tussen aan- en afvoer van deeltjes, kan een indruk worden verkregen van de fractie deeltjes die op de boorgatwand achterblijft. Deze hoeveelheid bedraagt circa 50% van de aangevoerde hoeveelheid.
27. Aan het eind van iedere onttrekkingsperiode is de concentratie van deeltjes in het onttrokken grondwater niet steeds gelijk. Deze variaties worden veroorzaakt door verschillen in de duur van de onttrekking, maar waarschijnlijk meerdoor tussentijdse verstoringen, waardoor deeltjes voortdurend worden opgewerveld.

### *Mogelijke aanknopingspunten voor bedrijfsvoering*

28. Het aantal deeltjes dat per schakeling wordt verwijderd is per put redelijk constant. Uit vergelijking van deze hoeveelheid tussen de putten kunnen aanwijzingen worden verkregen voor optimalisatie naar putcapaciteit en duur van de individuele onttrekkingsperiode.
29. Omdat de verdeling van de deeltjesconcentratie over de lengte van het putfilter niet bekend is, vormt de deeltjesconcentratie in het onttrokken grondwater geen goede maat voor karakterisering van de put.



30. Een hoge fractie grove deeltjes duidt op een grote erosieve kracht van het onttrokken grondwater. Deze fractie is dus meer geschikt om het grondwater te karakteriseren, en kan gebruikt worden voor optimalisatie van de putcapaciteit.
31. Samen met deeltjesconcentratie vormt de fractie grove deeltjes naar verwachting een goede maat voor de verstoppingsgevoeligheid van de put.

#### *Putaanleg*

32. Maximaal ontwikkelen van nieuwe putten.
33. Boorgaten niet over laten staan.

## **7.2 Aanbevelingen**

### *Putschakelen en putverstopping*

1. Ontwikkelen van een softwareprogramma voor de omzetting van gemeten stijghoogten in nauwkeurige afpompingsfrequenties.
2. Terugbrengen van de meetfrequentie en van de frequentie van uitlezen.
3. Nader onderzoek naar de invloed van de duur van de rustperiode op het tegengaan van mechanische putverstopping.

### *Carrouselchakeling*

4. In de carrouselprogrammering aandacht besteden aan het inbouwen van rustperiodes.
5. Onderdrukken van korte schakelperiodes, in het bijzonder tijdens rustperiodes.
6. Bij de indeling in carrouselgroepen rekening houden met de verstoppingsgevoeligheid van de putten.
7. Is dat niet mogelijk, dan de carrouselgroepen laten rouleren. Niet alle carrouselgroepen worden gelijk belast; door de carrouselgroepen te laten rouleren kunnen alle putten regelmatig voldoende rust krijgen.

### *Gedrag van deeltjes in grondwater*

8. Ontwikkelen van criteria om de verstoppingsgevoeligheid van putten te kunnen bepalen.

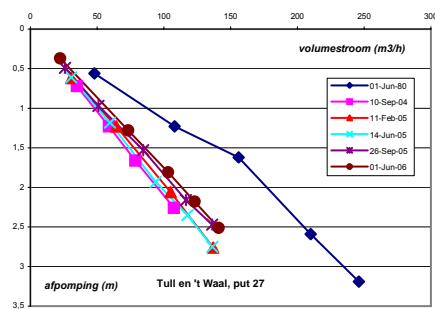
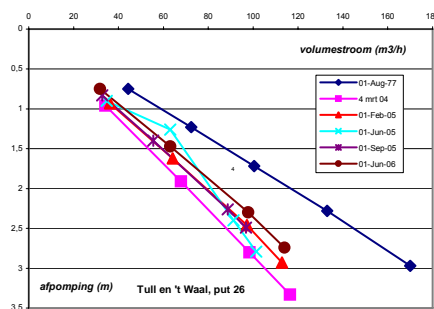
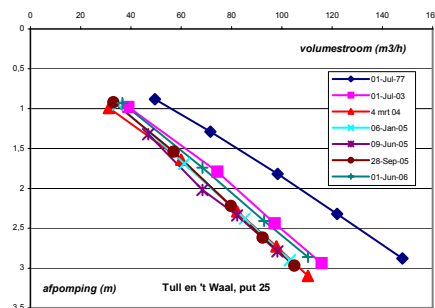
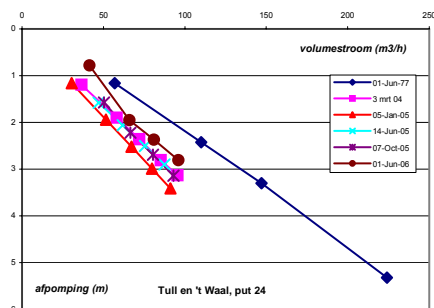
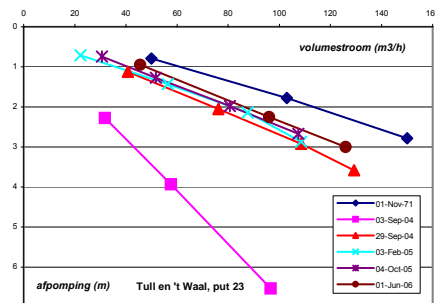
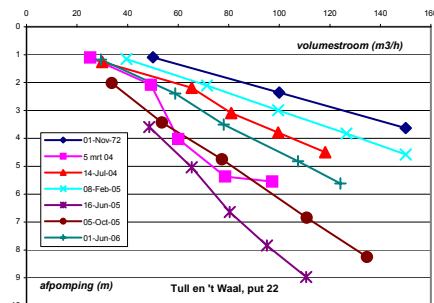
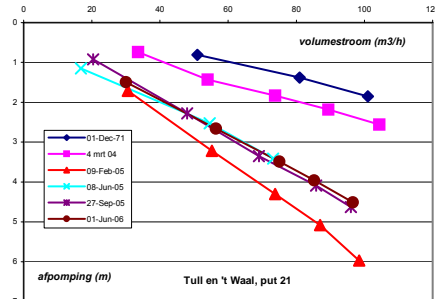
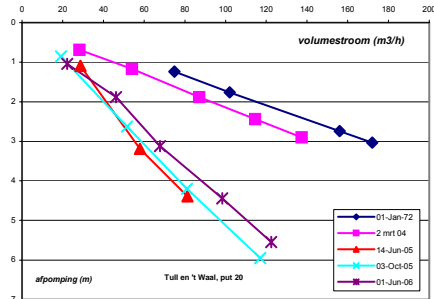
### *Bedrijfsvoering*

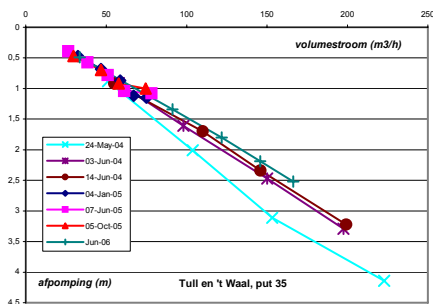
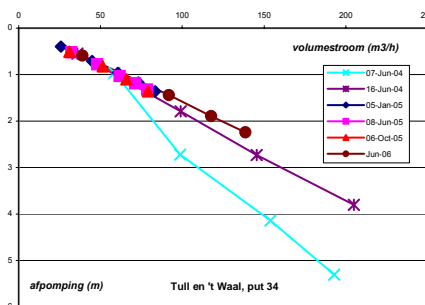
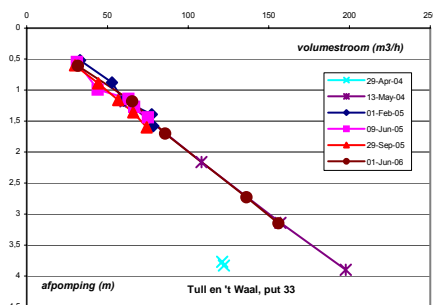
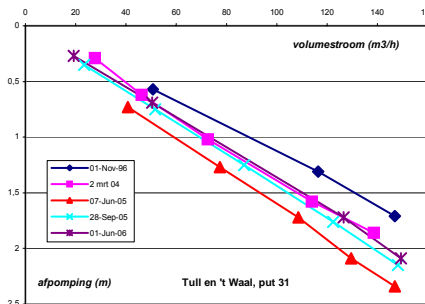
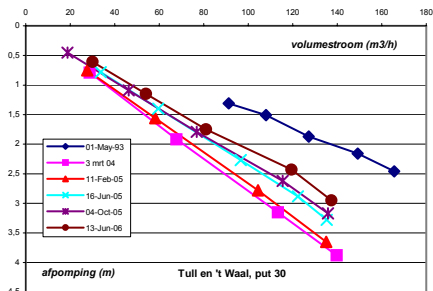
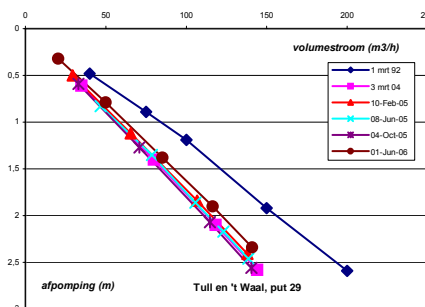
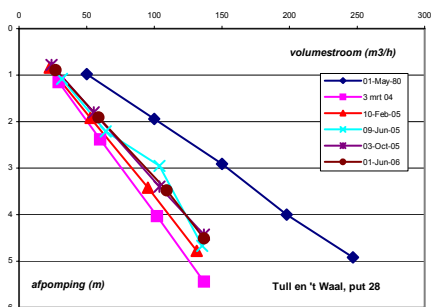
9. De desintegratie van deeltjes bruggen op de boorgatwand wordt waarschijnlijk bevorderd door gedurende rust water te laten terugstromen. Dit kan worden bereikt door een klein gat in de voetklep van de onderwaterpomp aan te brengen, dan wel een kleine terugslagklep in de stijgleiding.

### *Putaanleg*

10. Frequent schakelen is niet effectief voor het ontwikkelen van putten. Het is effectiever de put dagelijks kort te onttrekken (kwispelen).

# Bijlage 1: Specifieke volumestroom

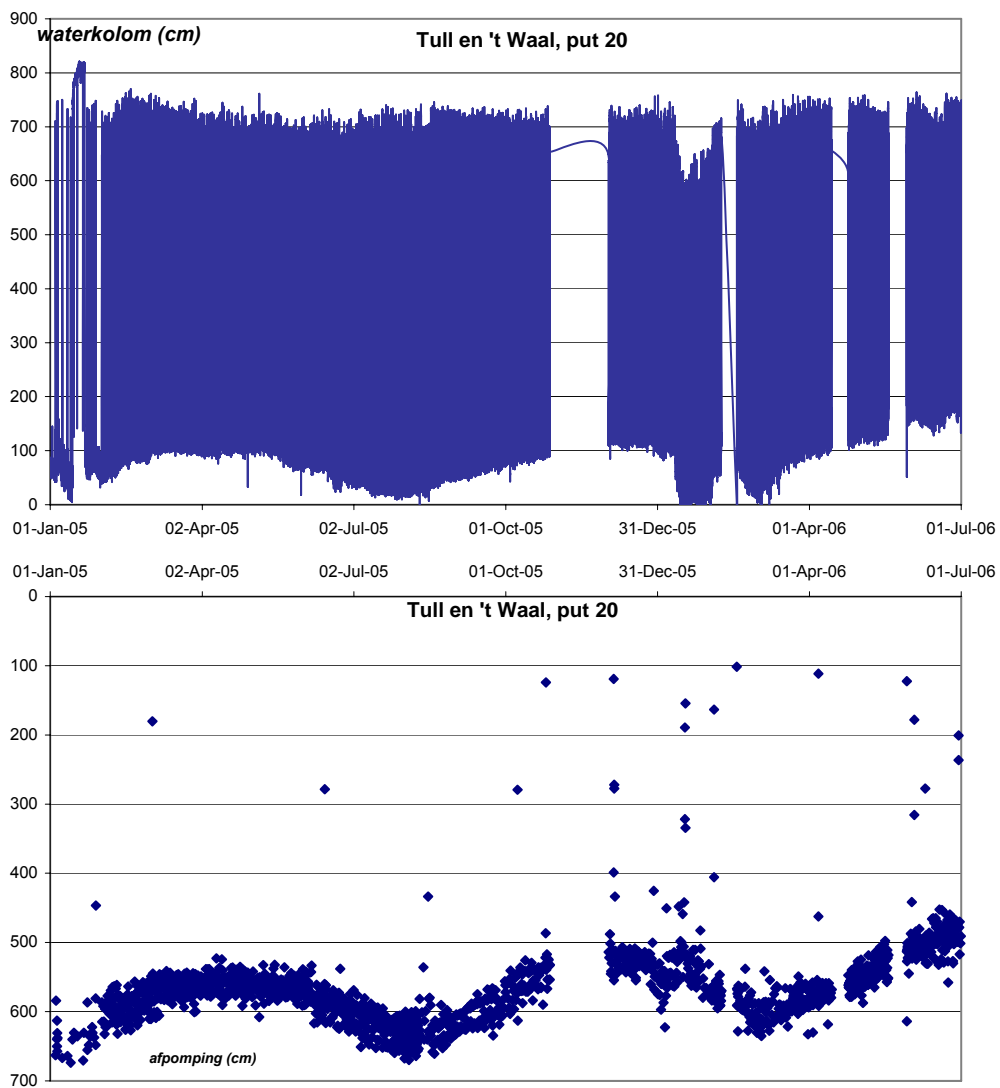


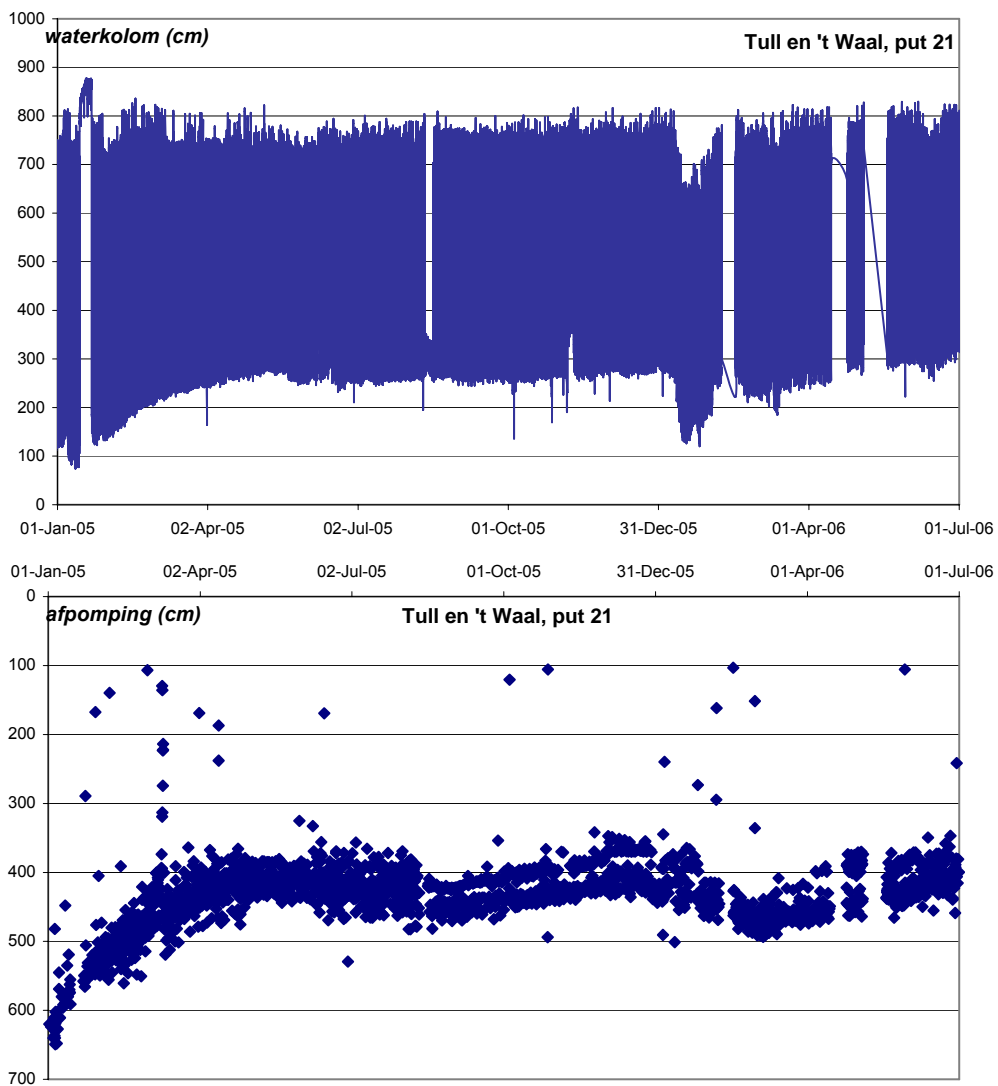


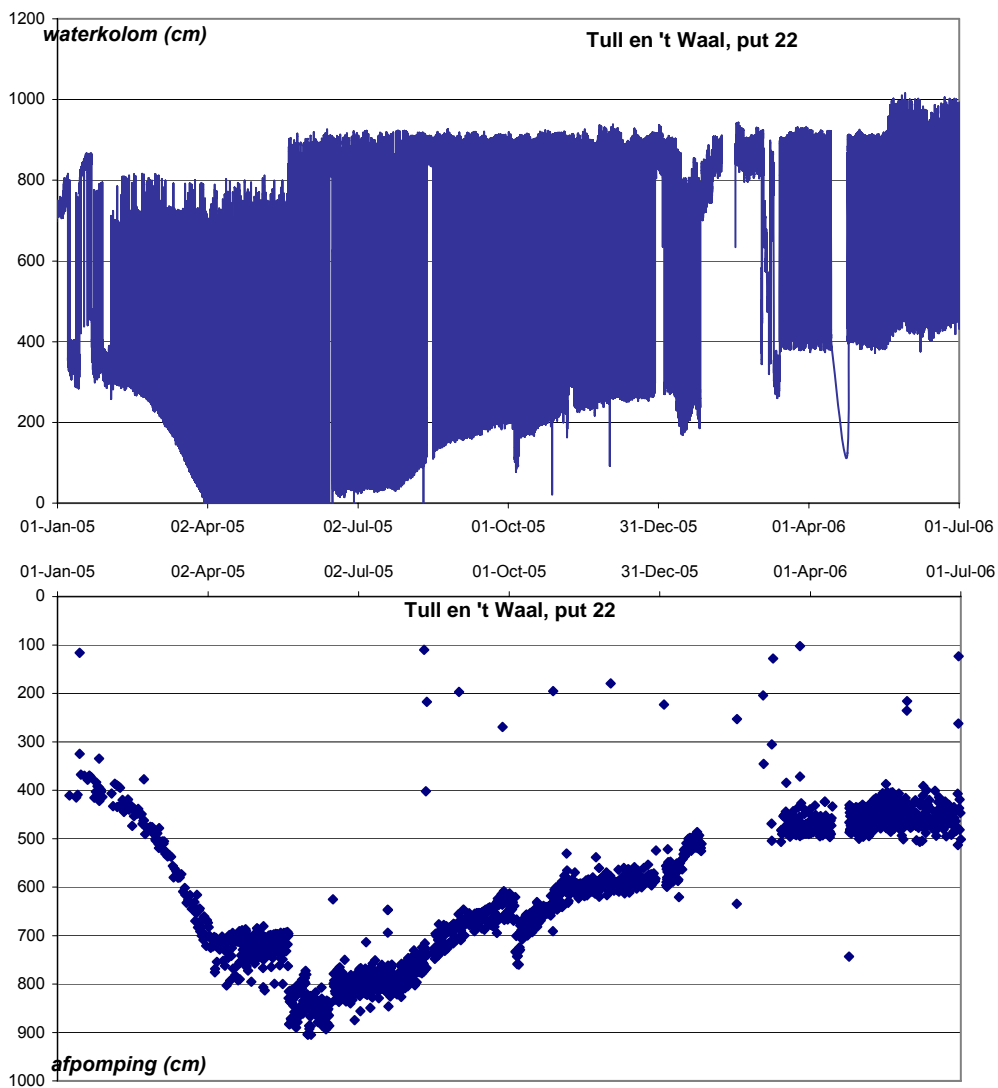
## Bijlage 2: Verloop van de afpompings

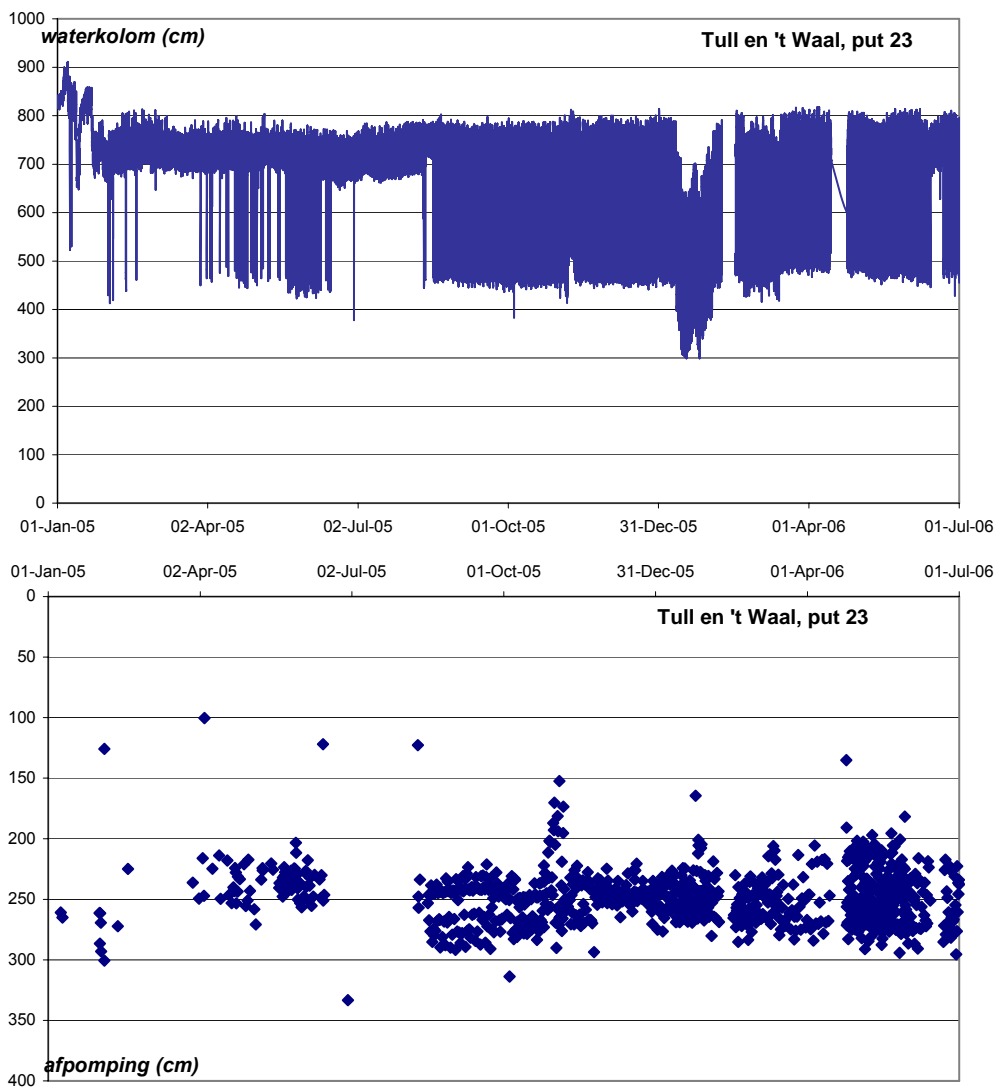
Toelichting op de bijlagen:

1. De “witte” banen in de stijghoogte van het grondwater (waterkolom in cm) worden veroorzaakt door het verloren gaan van de resultaten van de metingen.
2. De extra verlaging in de stijghoogte in februari en maart 2006 worden veroorzaakt door pompproeven op de putten 22, 34, 35 en 36.
3. De schoksgewijze veranderingen in de stijghoogte worden veroorzaakt door het verhangen van de stijghoogtemeters.
4. De schoksgewijze veranderingen in stijghoogte worden ook veroorzaakt door het installeren van andere onderwaterpompen in januari-februari 2006: in put 22 van 150 naar 100 m<sup>3</sup>/h, in put 33 en 34 van 70 naar 100 m<sup>3</sup>/h, en in put 35 van 70 naar 150 m<sup>3</sup>/h. De oorzaak van de schoksgewijze verandering in put 31 is onbekend (ook andere pomp ingehangen?).
5. Indien het verschil tussen twee opeenvolgende stijghoogtemetingen groter was dan 100 cm (voor de putten 33, 34 en 35 groter dan 50 cm) is aangenomen dat in die periode de onderwaterpomp is ingeschakeld. Aangezien de stijghoogte iedere 30 minuten wordt geregistreerd, is de afpompings gelijk genomen aan het verschil in stijghoogte tussen 1 en 29 minuten na aanschakelen van de onderwaterpomp. Deze aanpak verklaart de “ondiepe” punten, en een afpompings die kleiner is dan het (uiterste) verschil tussen stijghoogten.
6. Bij put 28 is gewerkt met het verschil in stijghoogte tussen 30 en 59 minuten.
7. Er is niet gekeken of een andere periode, bij voorbeeld de afpompings na 60, 90 of 120 minuten “scherpere” resultaten zou geven.
8. Waar de stijghoogte uit het bereik loopt (de bovenste of de onderste ingestelde waarde overschrijdt) is de berekende afpompings over die periode niet correct. Dit betreft put 20 (juli-augustus 2005, januari 2006), put 22 (april-augustus 2005,

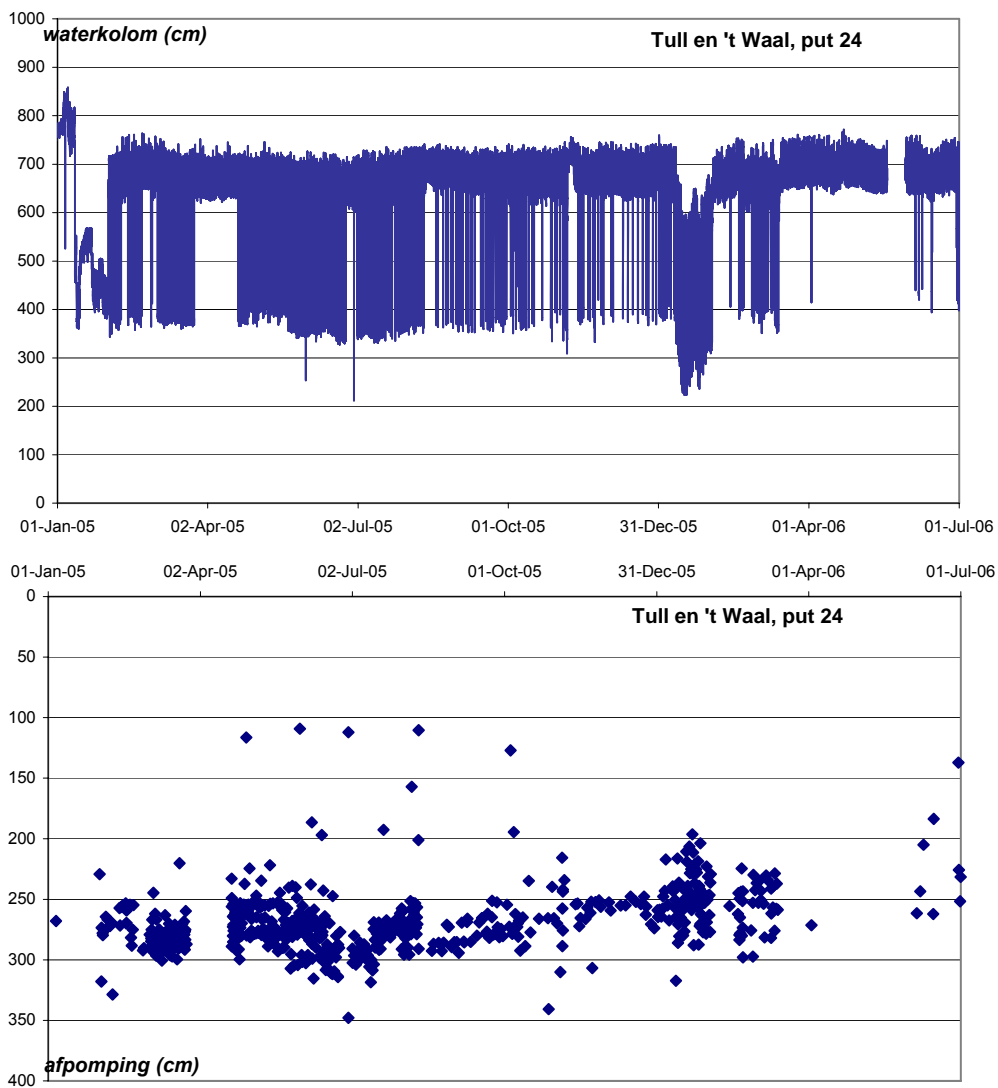


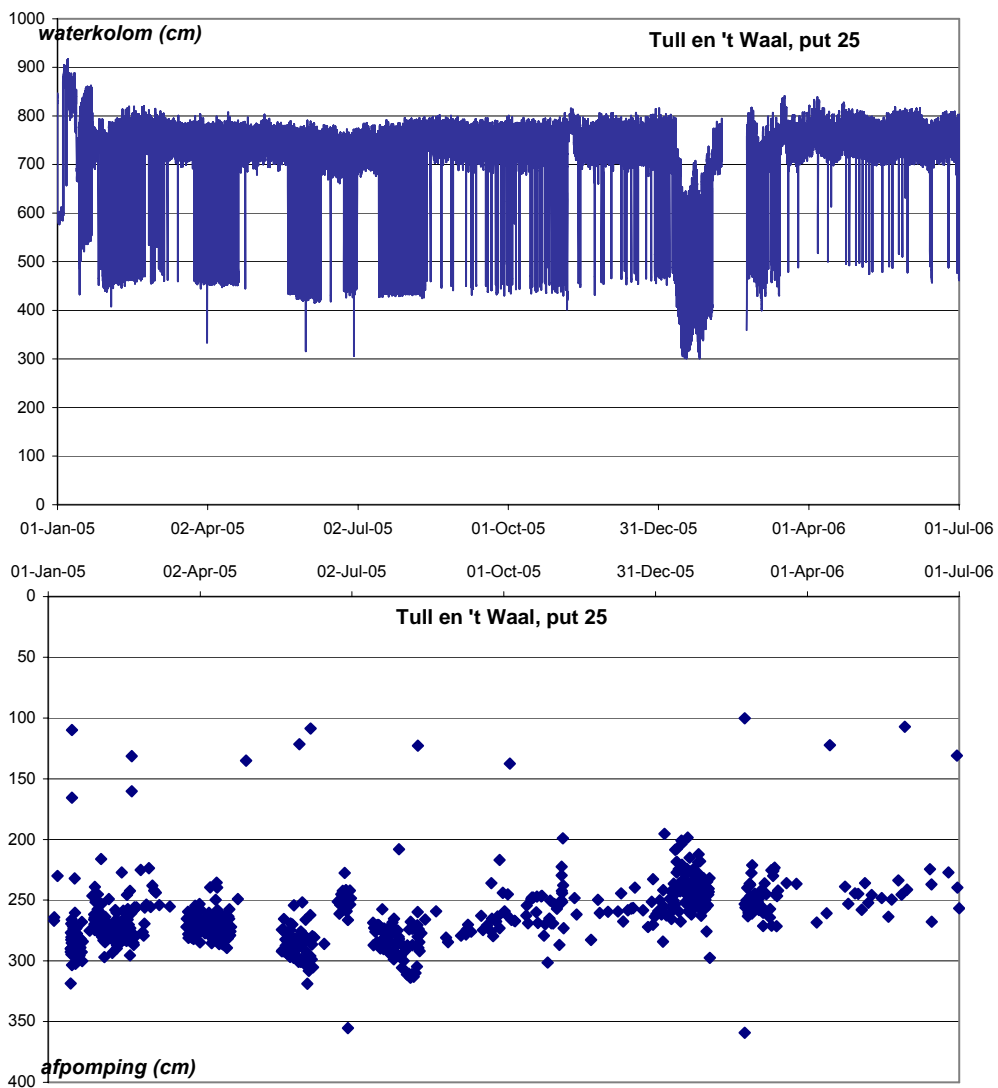


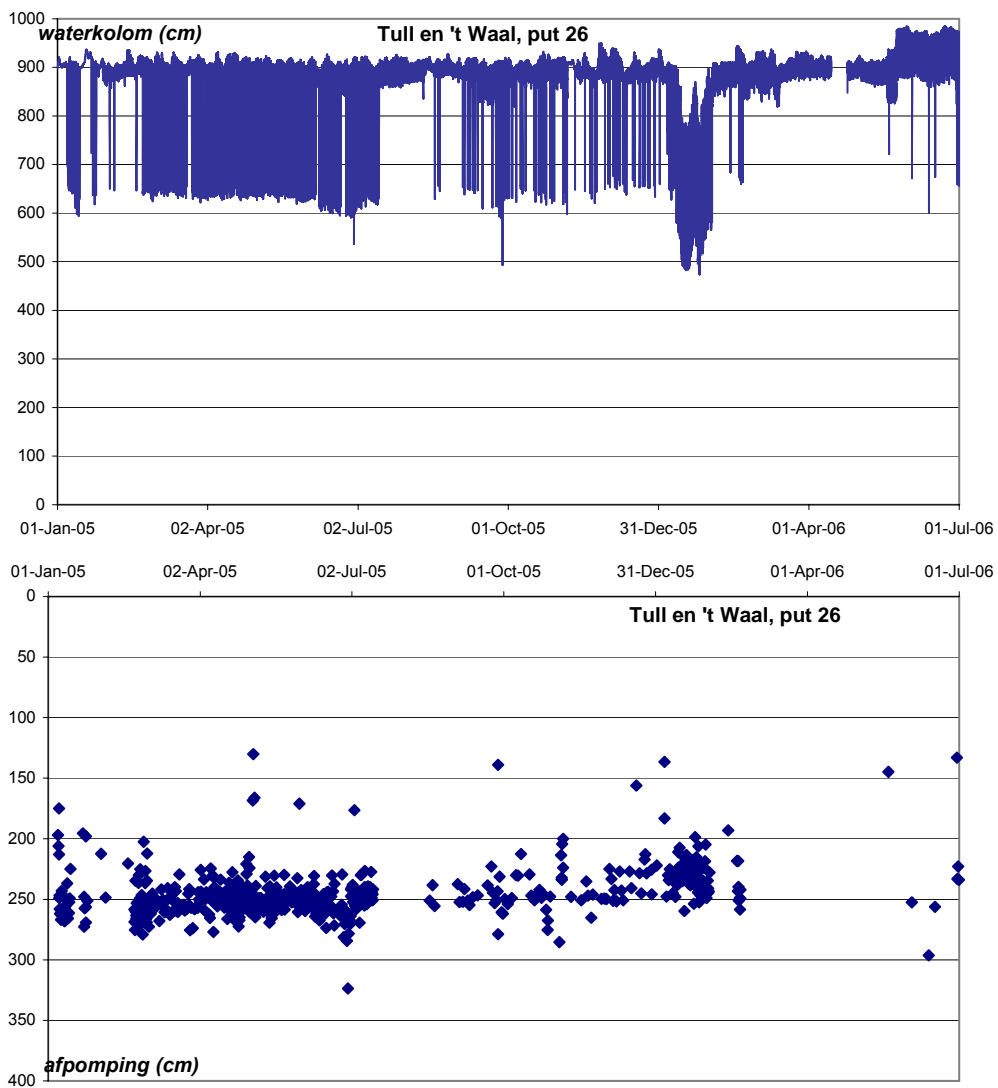


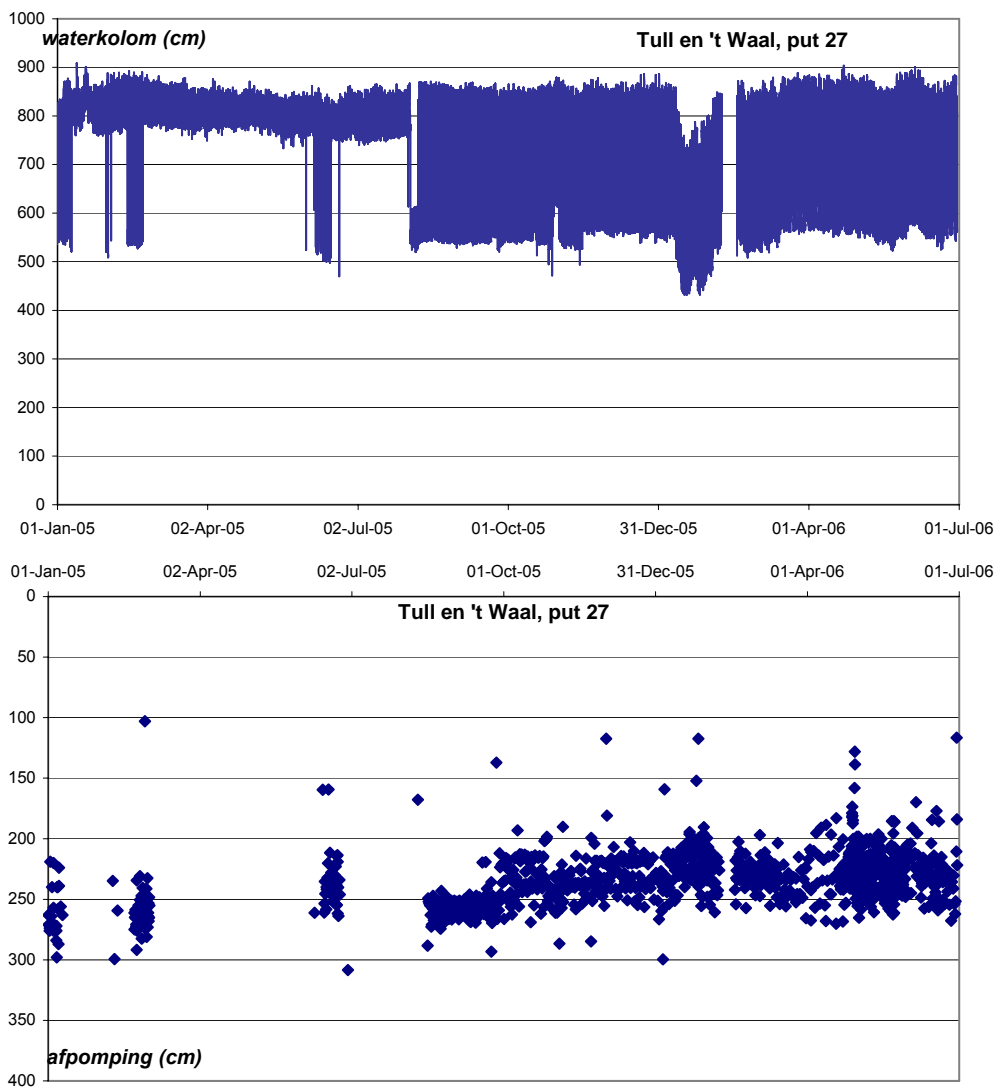


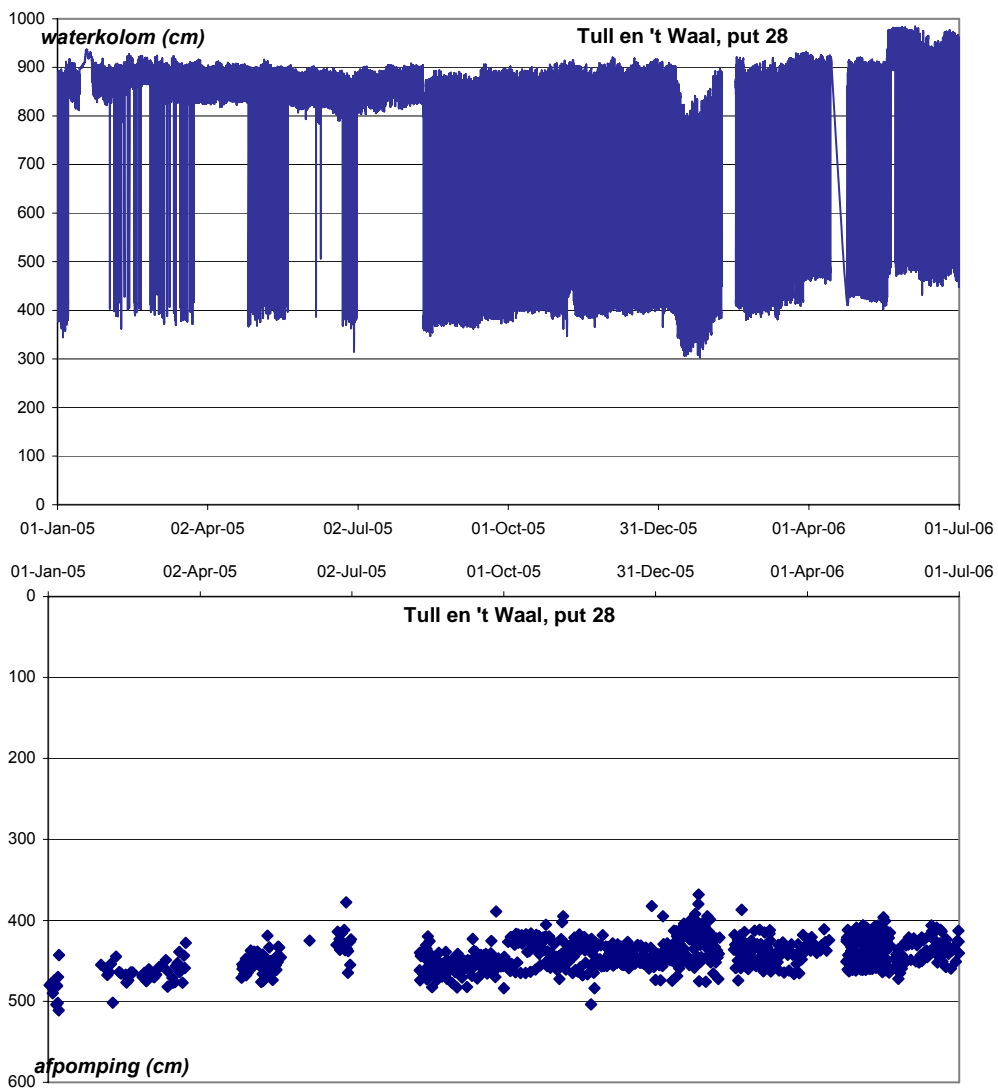


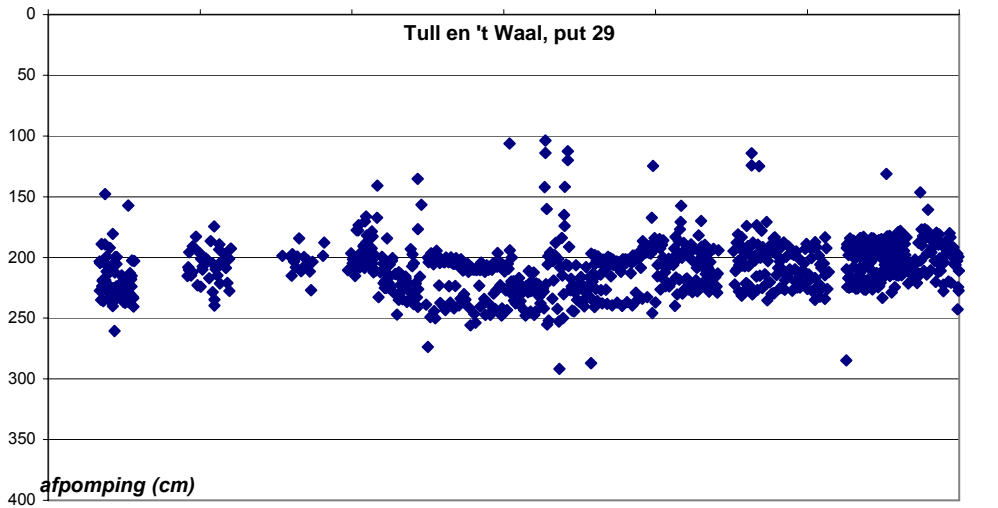
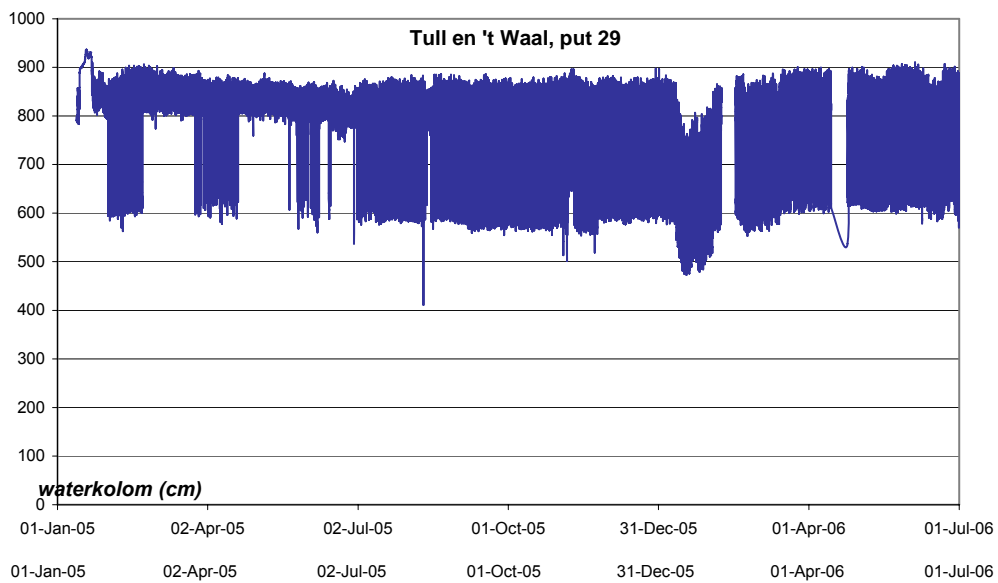


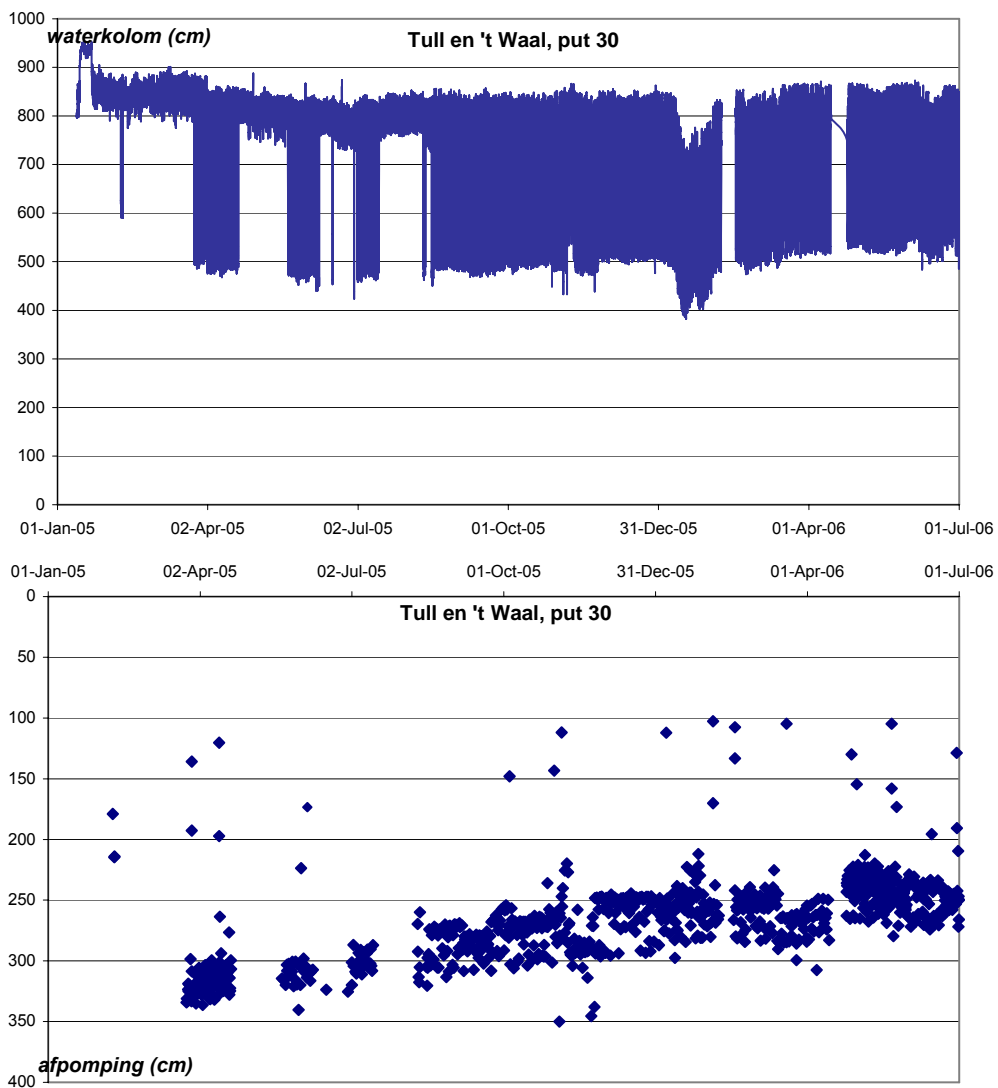


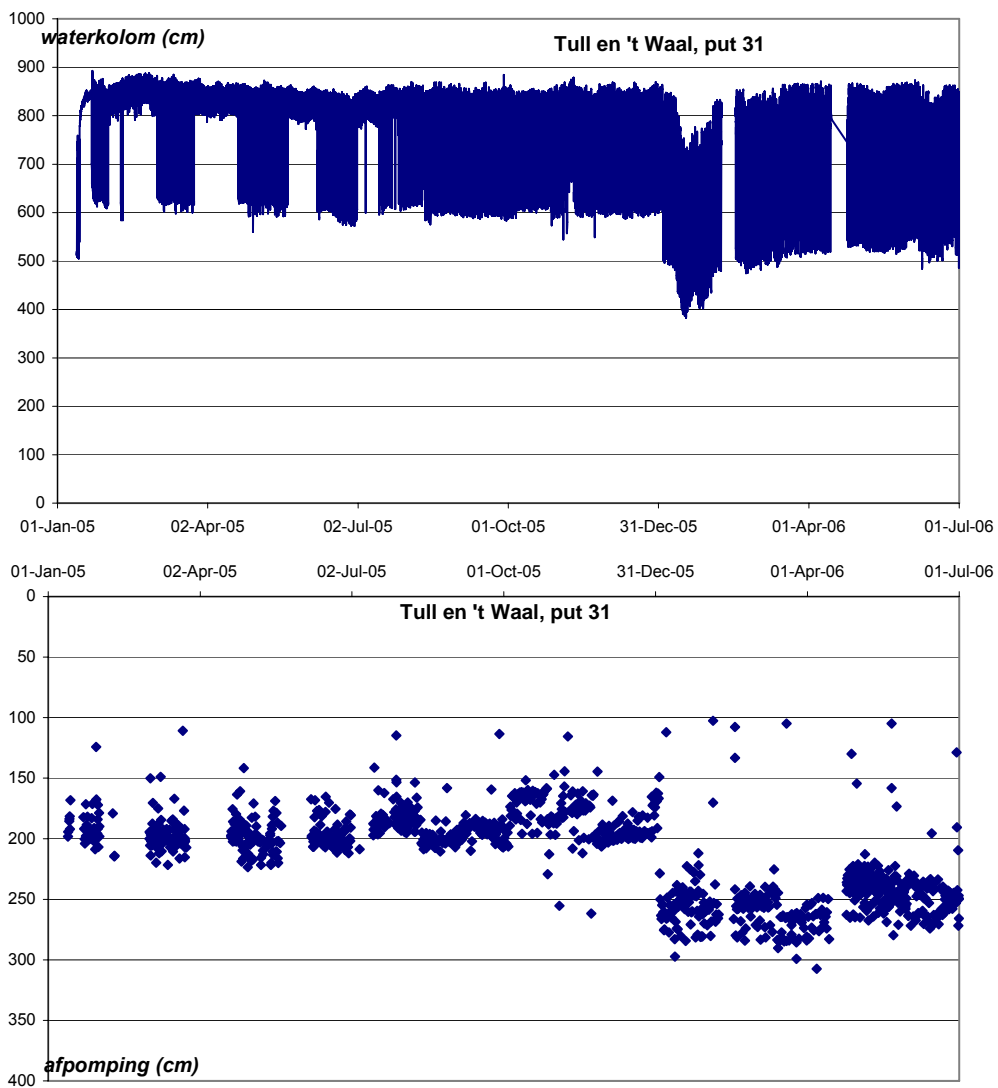




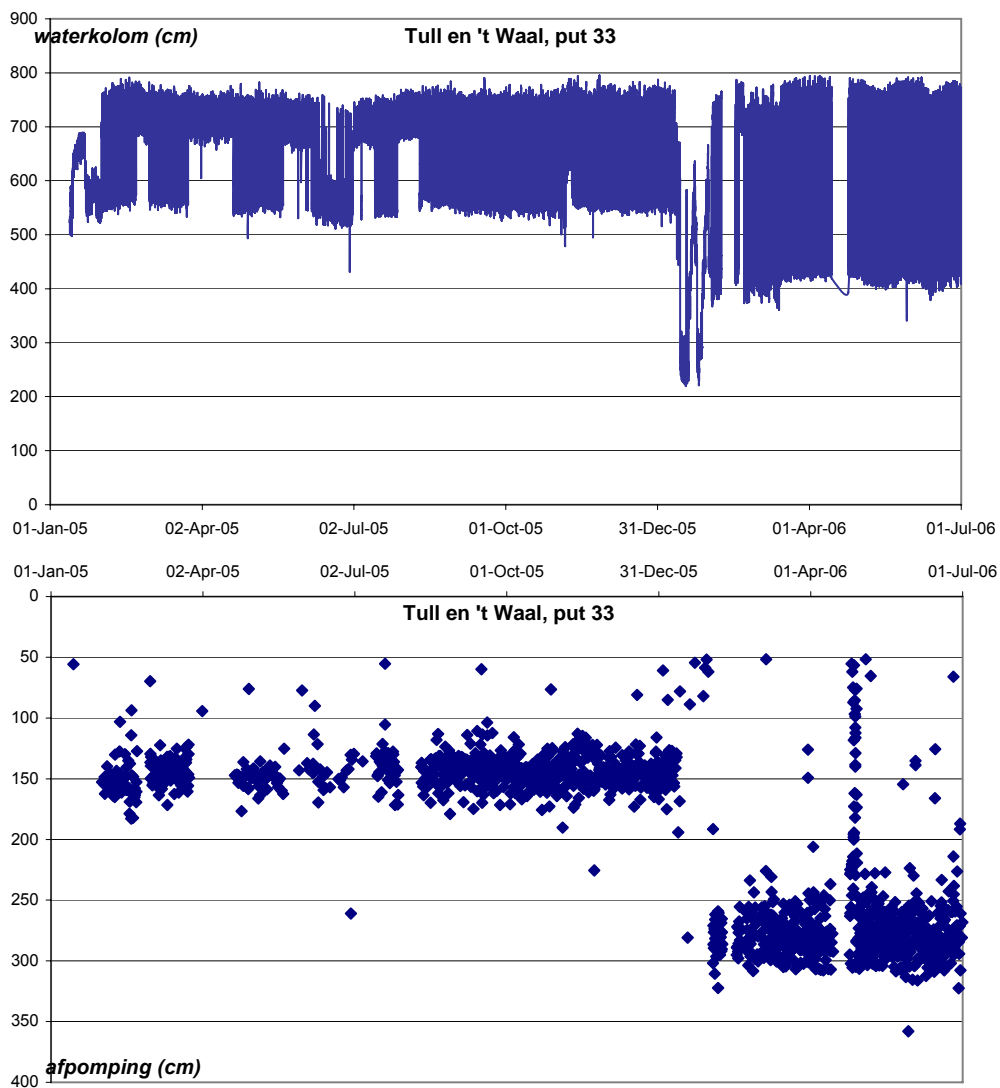


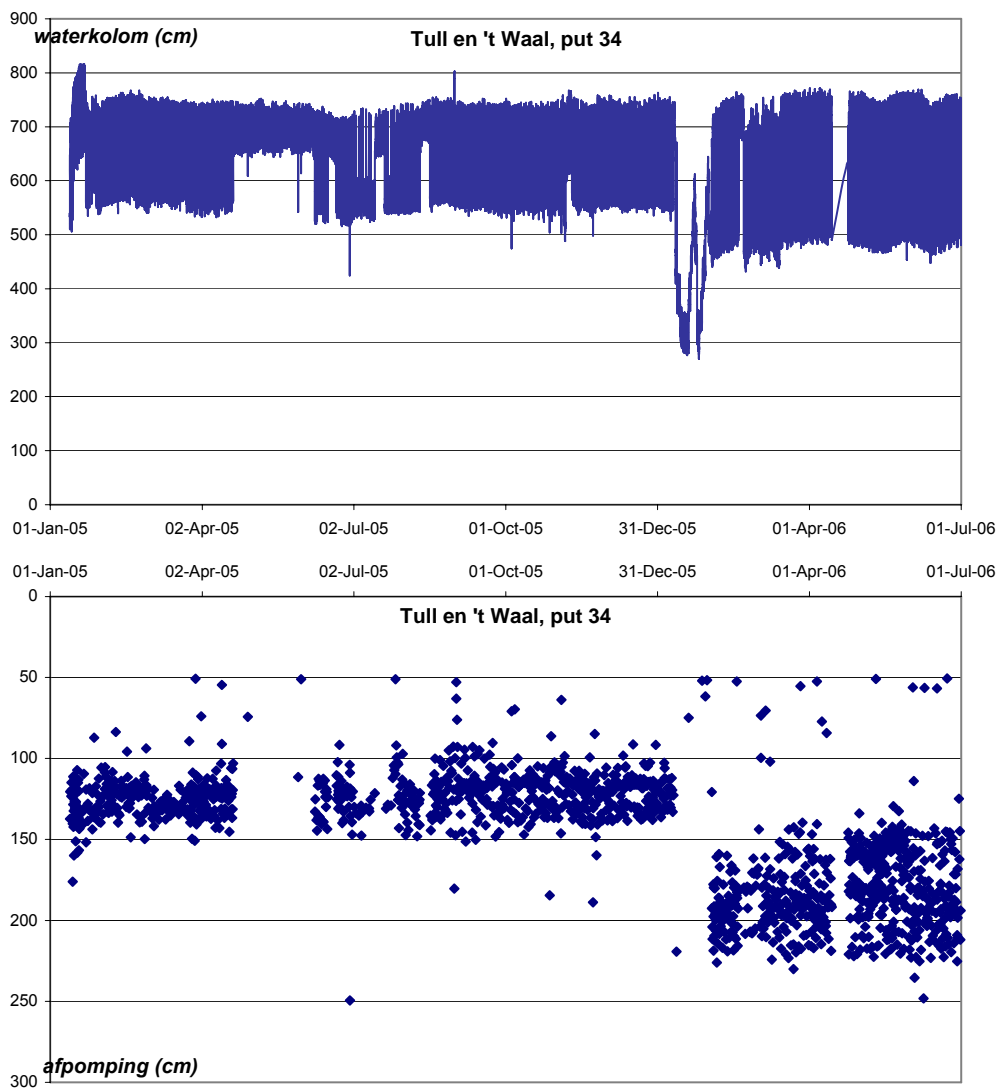


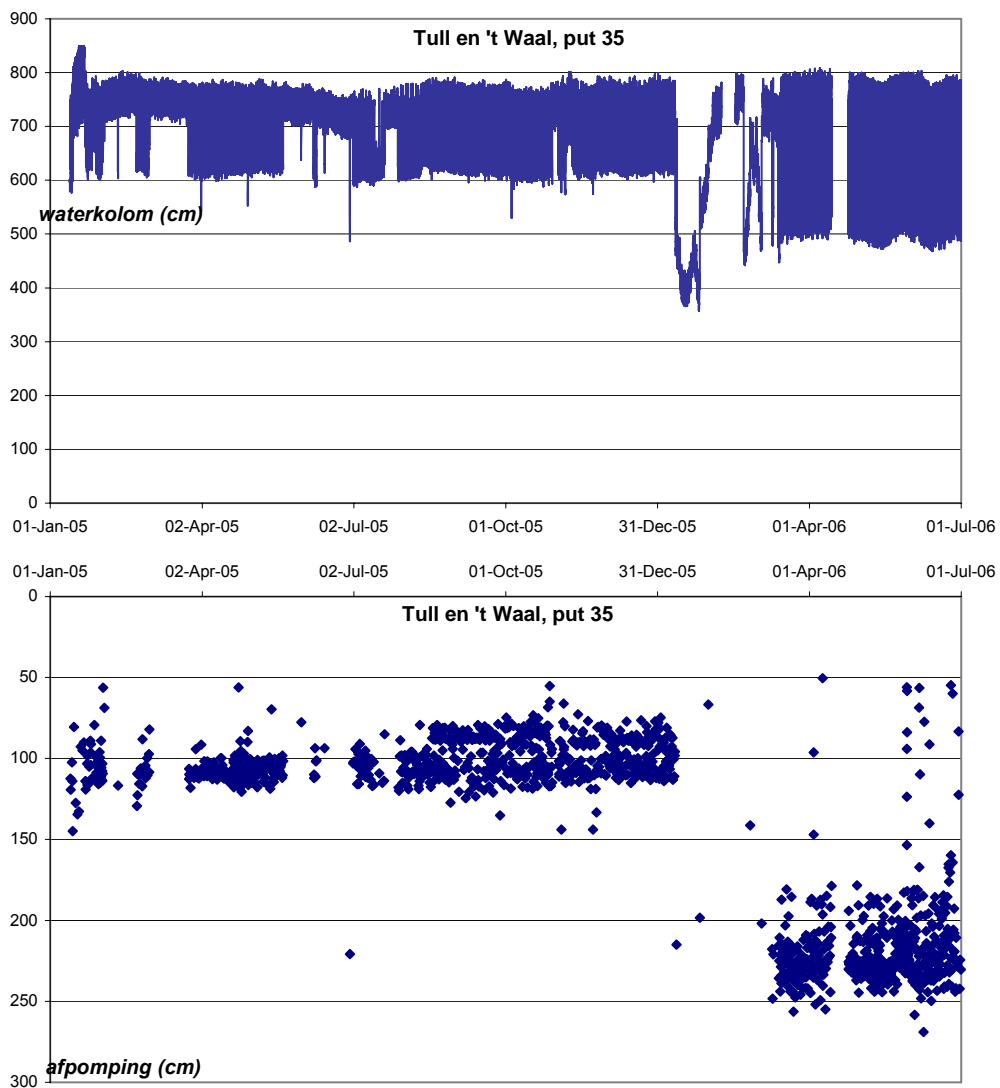












## Bijlage 3: Kengetallen van de bedrijfsvoering

In onderstaande tabellen zijn enkele kengetallen van de bedrijfsvoering van de putten samengevat. Het betreft achtereenvolgens het aantal bedrijfsuren per put per maand, het aantal schakelingen per put per maand, het aantal onttrekkingen langer dan 3 uur per put per maand en het aantal rustperiodes langer dan 6 uur per put per maand. In onderstaande tabel betreft een schakeling de combinatie van aan- en uitschakeling.

Tabel 1: Bedrijfsuren, aantal schakelingen per maand, aantal onttrekkingsperiodes langer dan drie en aantal rustperiodes langer dan 6 uur per put per maand.

	Bedrijfsuren per maand 2005															Tot
	Putnummer															
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	
jan	563	423	342	187	316	175	80	60	49	32	6	347	298	268	350	3494
febr	541	383	679	14	22	292	125	691	15	297	648	14	404	177	330	4631
mrt	613	440	671	201	321	122	59	20	14	5	106	299	99	486	146	3601
apr	591	446	612	13	49	302	170	0	8	22	287	143	216	129	580	3567
mei	618	506	555	238	218	213	260	0	31	5	201	298	450	0	332	3925
jun	620	497	490	18	374	158	299	57	12	20	115	393	486	135	69	3742
jul	617	496	51	256	257	305	30	0	0	331	216	32	195	530	368	4149
aug	504	390	338	120	66	176	170	232	150	259	140	156	265	350	469	3785
sep	418	373	360	231	50	15	28	274	221	176	166	156	337	359	316	3481
okt	409	410	390	245	49	30	39	259	237	194	187	192	370	377	304	3690
nov	372	364	361	249	33	20	25	236	247	156	155	152	320	311	305	3304
dec	422	408	380	240	15	16	20	266	237	175	172	177	359	379	344	3609
2005	6289	5134	5692	2013	1769	1823	1304	2092	1220	1672	2398	2360	3798	3500	3915	44980
jan	483	406	258	318	157	158	156	272	273	247	179	176	265	92	405	
feb	517	442	?	219	25	50	15	221	243	138	134	132	655	636	0	
mrt	265	273	436	242	43	19	0	222	273	149	152	148	306	331	417	
apr	315	293	294	240	0	1	0	238	238	151	153	152	231	231	258	
mei	274	366	260	315	1204	2	1	215	271	134	139	129	210	212	211	
jun	288	303	299	217	17	61	15	286	262	153	146	161	243	251	215	
tot						2114	1492	4547	3742	2646	3300	3257	5711	5254		

Aantal schakelingen per maand 2005																Tot
Putnummer																
2005	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	
jan	51	290	41	12	807	286	77	35	43	34	9	275	807	301	214	
febr	136	247	59	7	39	123	57	61	24	108	6	6	77	158	27	
mrt	143	187	56	1	131	47	65	12	23	9	40	40	134	112	19	
apr	135	184	117	41	74	99	160	?	11	32	95	95	24	132	138	
mei	130	207	192	70	154	85	247	?	43	14	64	64	37	1	97	
jun	127	192	159	38	110	106	142	53	25	18	81	81	34	81	9	
jul	140	180	213	?	110	70	62	?	1	124	49	49	54	42	57	
aug	161	126	213	45	64	66	6	45	60	98	71	71	84	107	138	
sep	93	106	107	76	26	21	17	80	79	71	95	95	110	99	111	
okt	114	119	163	88	28	28	24	98	96	111	108	108	122	115	117	
nov	130	123	150	119	58	81	37	124	106	324	343	343	135	130	130	
dec	111	124	119	80	17	16	22	92	82	103	98	98	114	120	124	
2006																
jan	107	115	67	128	129	147	136	162	139	84	94	94	32	23	35	
feb	163	167	?	82	33	41	16	84	83	82	78	78	194	136	1	
mrt	137	136	81	65	30	25	4	73	67	85	85	85	164	139	118	
apr	241	174	244	112	3	8	6	123	124	130	145	145	232	179	241	
mei	309	279	299	215	1	11	9	219	183	175	194	194	281	210	293	
jun	171	163	182	72	15	14	9	115	111	91	107	107	172	172	186	
tot	2599	3119		1251	1829	1274	1096	1376	1300	1693	1762	1762	2807	2257	2055	

Aantal onttrekkingsperioden langer dan 3 uur per maand																Tot
Putnummer																
2005	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	
jan	20	45	13	2	1	4	8	5	7	1	0	42	0	15	19	
febr	95	49	39	2	0	35	17	19	0	38	3	2	25	8	10	
mrt	120	89	44	0	39	14	2	2	0	0	12	38	0	22	7	
apr	118	86	103	0	0	37	6	?	0	0	36	11	10	0	34	
mei	124	97	179	0	25	12	0	?	0	0	15	33	21	0	35	
jun	118	98	152	0	36	8	29	2	0	2	8	38	15	11	5	
jul	137	102	121	?	22	28	1	?	0	28	20	1	24	32	37	
aug	107	70	38	36	1	11	3	40	35	31	23	22	41	47	61	
sep	72	74	67	74	1	0	2	73	67	37	36	38	51	55	49	
okt	73	80	65	78	1	0	1	69	67	44	42	44	52	53	45	
nov	68	64	58	76	1	0	2	61	68	32	30	32	44	45	47	
dec	76	74	58	61	0	0	0	54	58	34	32	35	53	53	51	
2006																
jan	66	64	46	65	5	25	27	64	64	35	31	33	14	14	14	
feb	88	88	?	61	1	2	2	60	60	24	21	20	31	45	0	
mrt	36	34	25	43	1	0	0	36	36	20	18	17	36	50	20	
apr	26	26	26	26	0	0	0	24	24	13	13	12	13	13	13	
mei	4	5	3	4	1	0	0	3	4	3	2	1	2	2	2	
jun	54	65	59	40	0	2	1	65	62	28	26	30	32	29	23	
tot	1402	1210		568	135	178	101	577	557	370	368	449	464	494		

Aantal rustperiodes langer dan 6 uur per maand 2005															Tot	
Putnummer																
2005	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	
jan	5	6	7	7	1	11	17	10	15	11	4	3	0	11	14	
febr	1	0	1	4	23	10	6	5	19	2	4	5	1	18	4	
mrt	0	2	2	1	6	10	32	0	20	7	5	17	21	11	2	
apr	0	2	0	21	12	4	30	?	6	20	14	9	10	17	4	
mei	0	0	0	27	25	4	23	?	25	12	2	17	1	1	0	
jun	0	1	2	17	3	17	16	13	17	13	5	9	7	17	3	
jul	0	0	0	?	26	6	17	?	1	23	6	24	14	2	15	
aug	7	8	8	43	19	10	3	40	46	38	37	45	8	13	10	
sep	17	21	20	74	24	19	16	73	76	67	63	67	21	21	20	
okt	12	13	14	77	21	27	21	76	78	69	72	70	18	22	24	
nov	24	23	25	75	16	11	11	73	72	70	72	69	24	28	28	
dec	10	13	10	79	15	14	21	79	80	71	69	70	14	19	17	
2006																
jan	4	4	5	34	25	32	25	32	25	70	66	65	5	7	4	
feb	0	1	?	65	15	19	6	64	64	58	55	59	16	30	1	
mrt	42	34	23	54	16	18	4	54	53	46	50	51	32	33	29	
apr	26	25	26	26	2	7	6	26	27	36	37	36	42	36	35	
mei	2	1	2	4	0	10	9	5	4	28	27	28	23	15	14	
jun	21	21	20	51	8	8	8	47	51	62	60	60	26	30	31	
tot	171	175		659	257	237	271	597	679	703	648	704	276	331	265	

Uit bovenstaande tabel blijkt het verschil in bedrijfsvoering met handmatige programmering, de carrouselchakeling per augustus 2005 en de wijzigingen in de carrousel per januari 2006 (?). Na introductie van de carrouselchakeling is de putschakeling binnen een groep nagenoeg identiek.



## Bijlage 4: Volumestroom en deeltjes

### Uitvoering

Om de relatie tussen volumestroom en aanwezigheid van deeltjes in onttrokken grondwater te leren kennen, zijn deeltjestellingen bij variabele volumestroom uitgevoerd. Deze tellingen zijn uitgevoerd tijdens het spuien van de put met de geïnstalleerde onderwaterpomp. Variaties in volumestroom werden verkregen met behulp van een afsluiter gemonteerd in de spuileiding.

Om de evenwichtsconcentratie van deeltjes te kunnen meten, werd 24 uur met een constante volumestroom onttrokken. Met andere woorden, de volumestroom werd iedere middag aangepast.

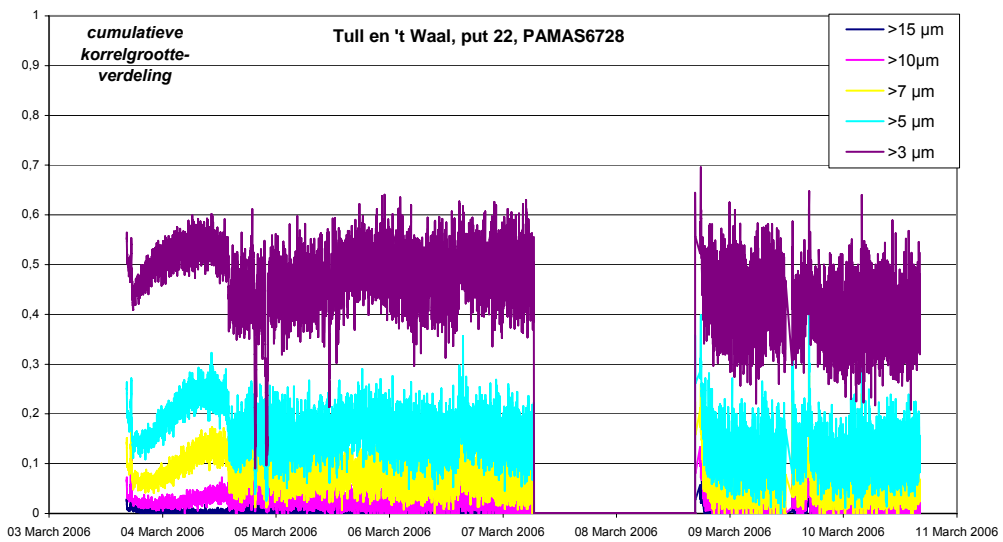
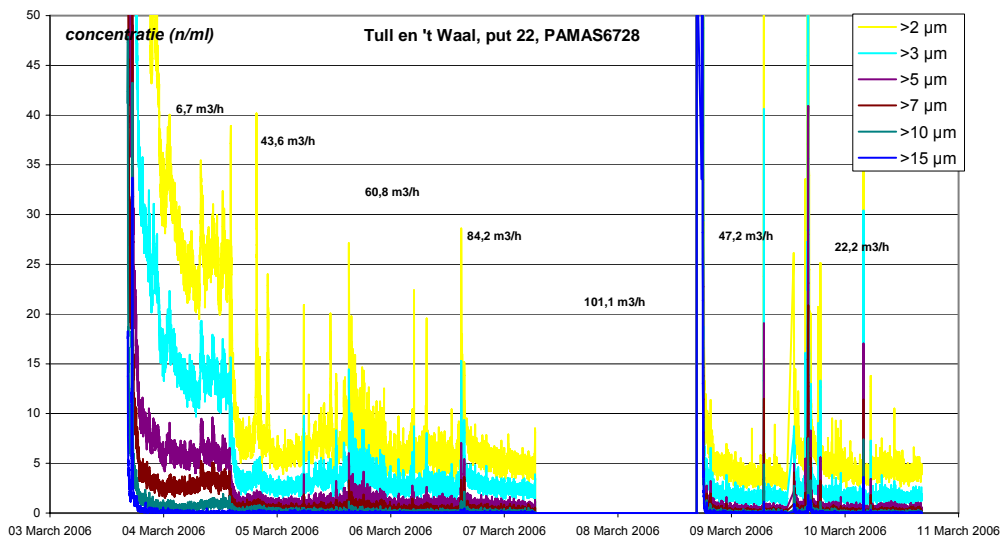
Om tot betrouwbare conclusies te kunnen komen, is op de resultaten van de tellingen een kwaliteitscontrole uitgevoerd. Deze controle bestaat uit de volgende onderdelen:

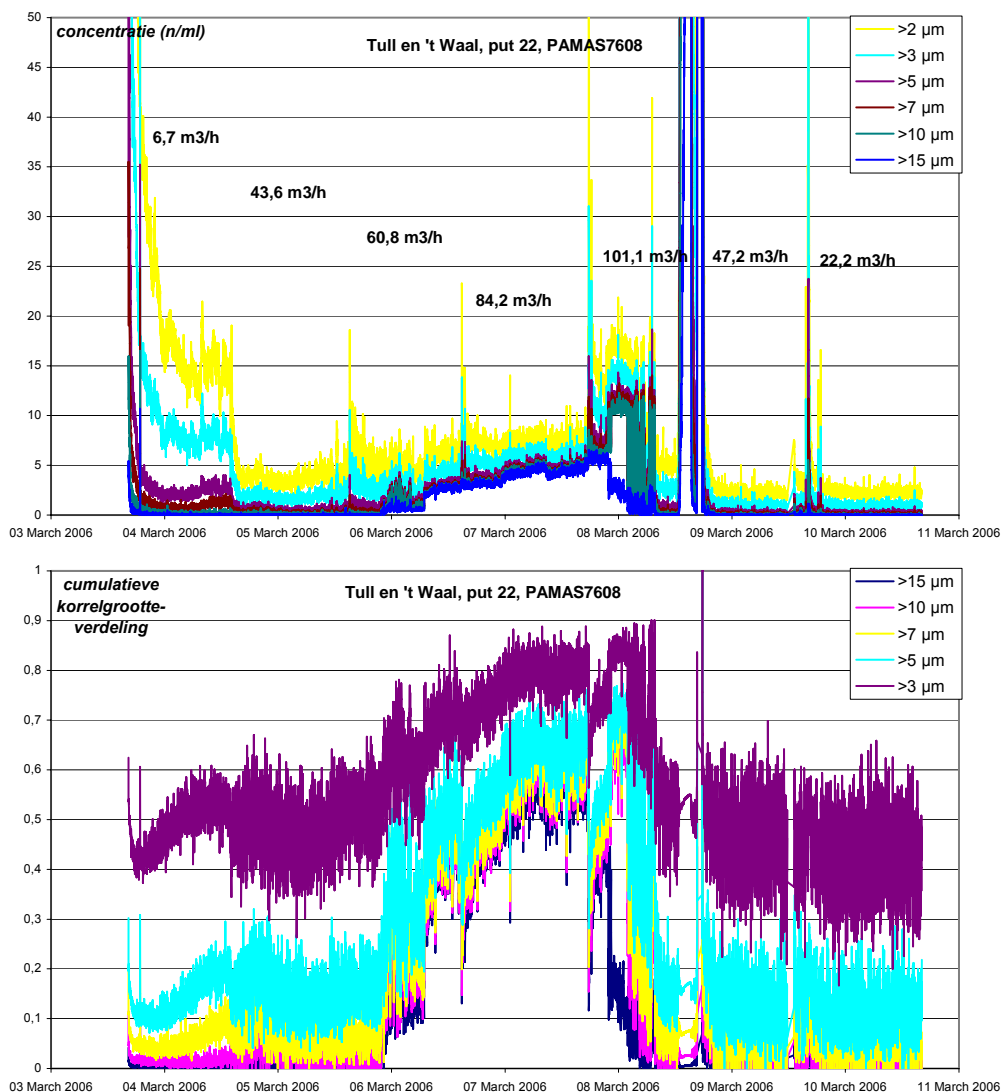
11. de resultaten van de tellingen en de daarvan afgeleide waarden dienen aan het eind van de meting een vlak verloop te vertonen. Dit betreft de deeltjes concentratie, de deeltjes grootte verdeling en de Pareto-helling. Metingen die geen constant eindniveau vertonen, zijn niet geschikt voor verdere verwerking.
12. hoe kleiner de deeltjes, des te groter de bijdrage. Metingen met een grote bijdrage van deeltjes met een diameter  $> 15 \mu\text{m}$  vallen af. (Deze buitensporige bijdrage wordt mogelijk veroorzaakt door de aanwezigheid van gasbellen, die als deeltje worden geteld. "Correctie" door het buiten beschouwing laten van de deeltjes  $> 15 \mu\text{m}$  is niet mogelijk, doordat waarschijnlijk ook gasbellen  $< 15 \mu\text{m}$  aanwezig zijn.)

### Resultaten

De resultaten van de metingen worden in onderstaande afbeeldingen gepresenteerd en besproken. De resultaten zijn op putnummer gerangschikt.





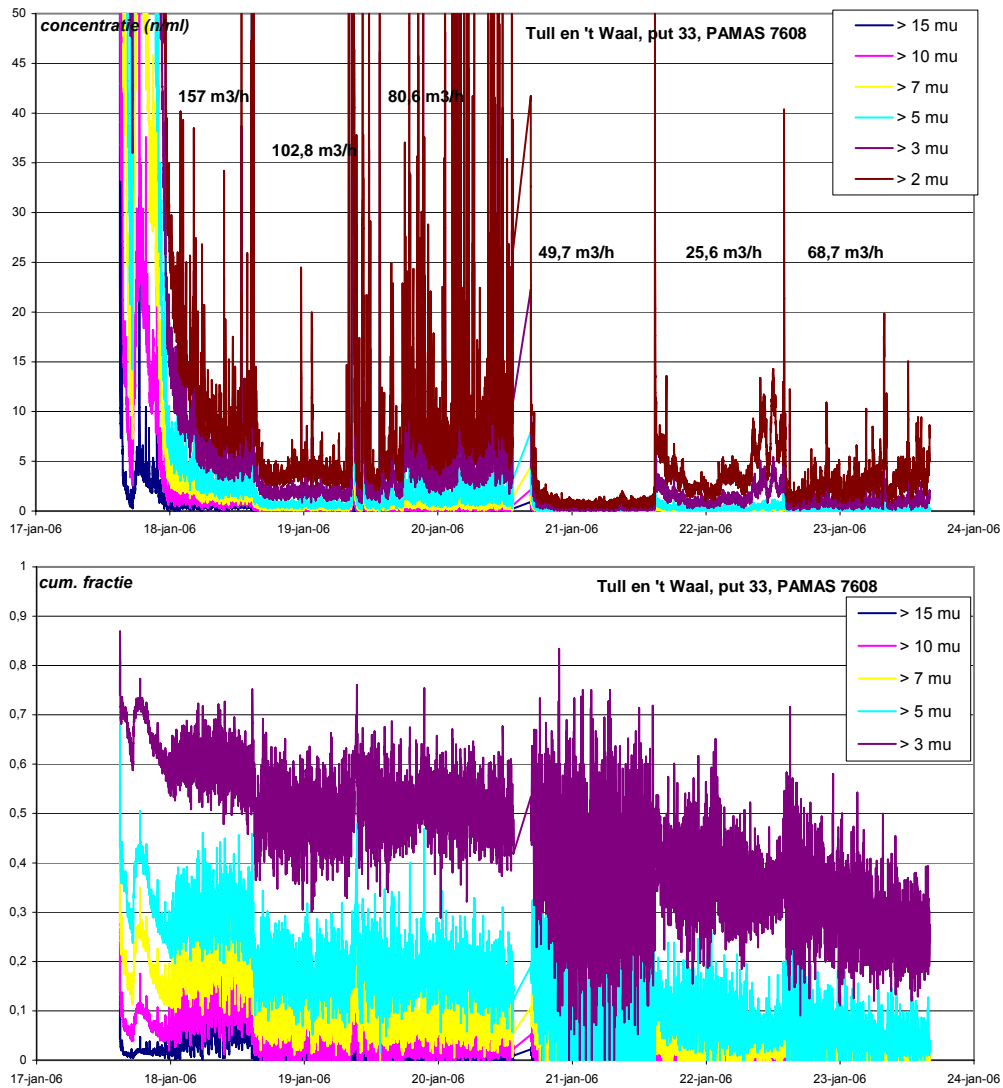


Als controle van de werking van de gebruikte deeltjestellers, zijn beide tellers tegelijkertijd op dezelfde put gezet, namelijk op put 22 gedurende de periode 3 t/m 10 maart 2006.

Opvallend is het gedrag van de deeltjes gedurende de nacht van 4 maart: beide tellers vertonen een vergelijkbaar variabel verloop in deeltjes concentratie (wel met een niveau verschil van 40%) en in deeltjes grootte verdeling. Omdat beide tellers een vergelijkbaar beeld laten zien, wordt dit gedrag veroorzaakt door de put (inclusief monsterkraan), en is voorlopig onverklaarbaar.

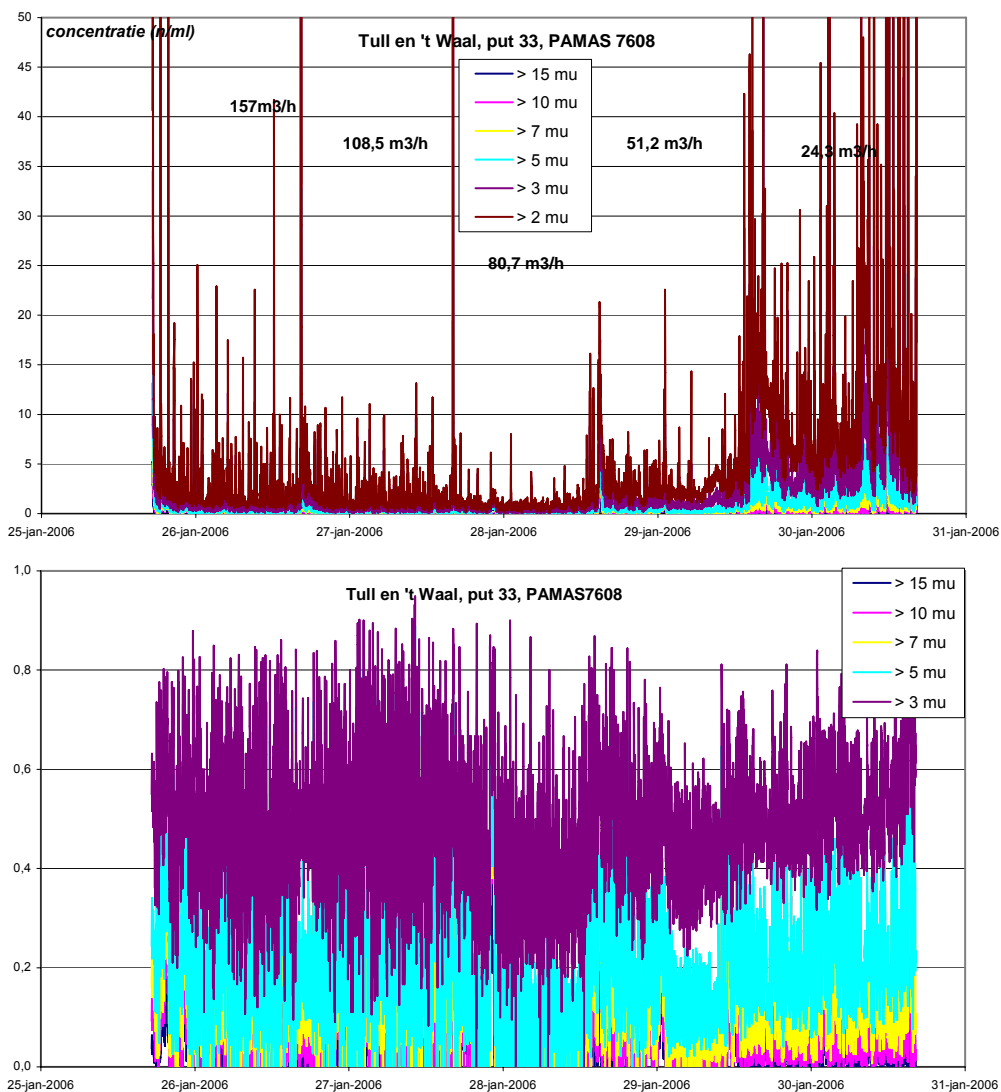
Teller 7608 vertoont de nachten van 6, 7 en 8 maart een grote bijdrage van deeltjes > 15 µm. Aangezien teller 6728 dit beeld niet vertoont, kunnen dit geen gasbellen in het onttrokken grondwater zijn, en moet dit resultaat aan het functioneren van de teller worden toegeschreven. Gedurende de nacht van 8 maart is teller 6728 uitgevallen.

De overige waarnemingen lijken bruikbaar.

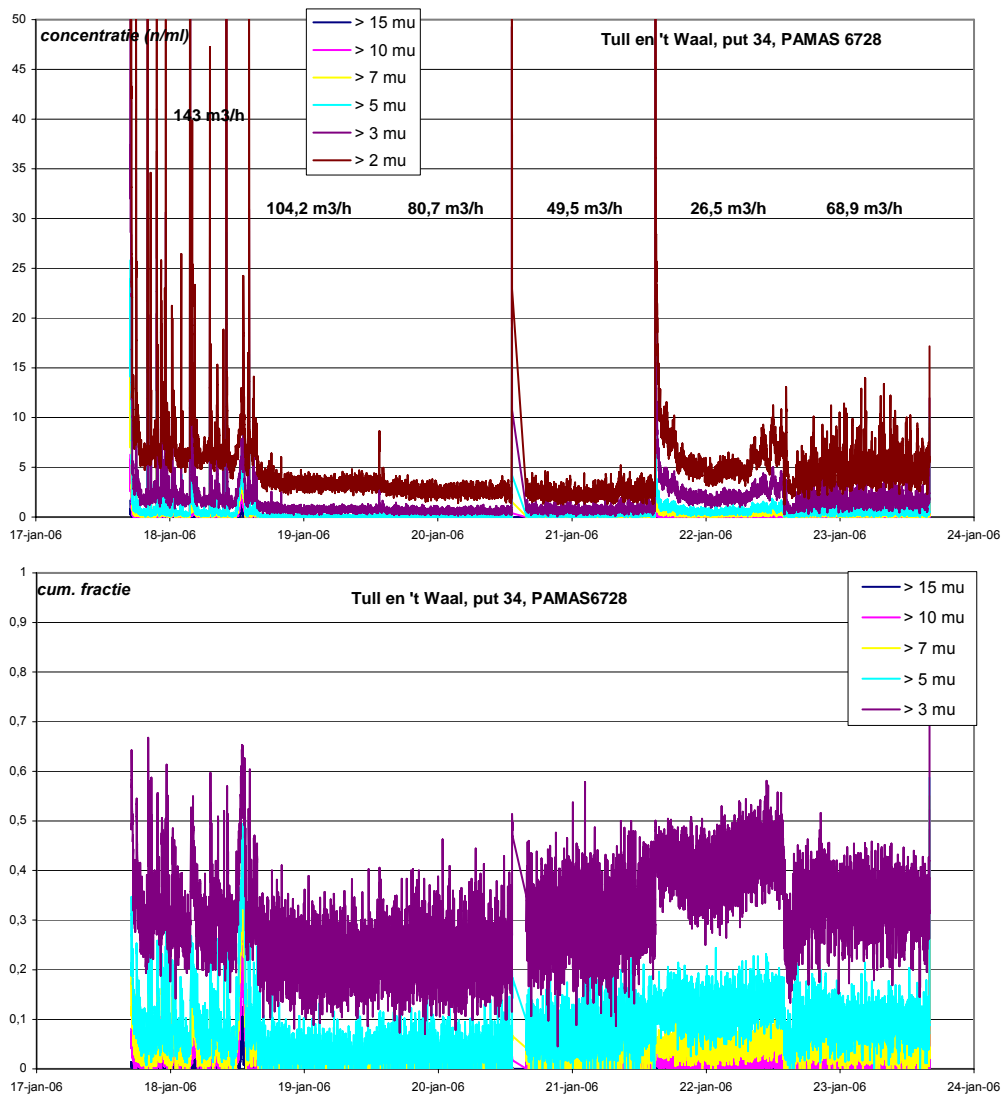


Opvallend is het grillige verloop in de spreiding van de deeltjes concentratie: nauwelijks spreiding in de nacht van 21 jan, en een grote spreiding de nacht ervoor en de nacht erna.

Merkwaardig is de voortdurende afname in de deeltjes grootte verdeling (met uitzondering van de nacht van 19 en 20 januari) gedurende de periode: de fractie > 3 µm neemt af van circa 0,6 naar 0,25. De grote spreiding in de fractie > 3 µm op 21 januari wordt veroorzaakt door de lage gemeten concentraties. De resultaten lijken niet bruikbaar.



In bovenstaande afbeelding valt in het verloop van de deeltjes concentratie en van de deeltjesgrootte verdeling geen trend te herkennen. (Als er al een trend valt te herkennen zou dat een toename van grovere deeltjes bij afname van de volumestroom zijn, wat tegen de logica indruist.) De resultaten lijken voorlopig niet bruikbaar.

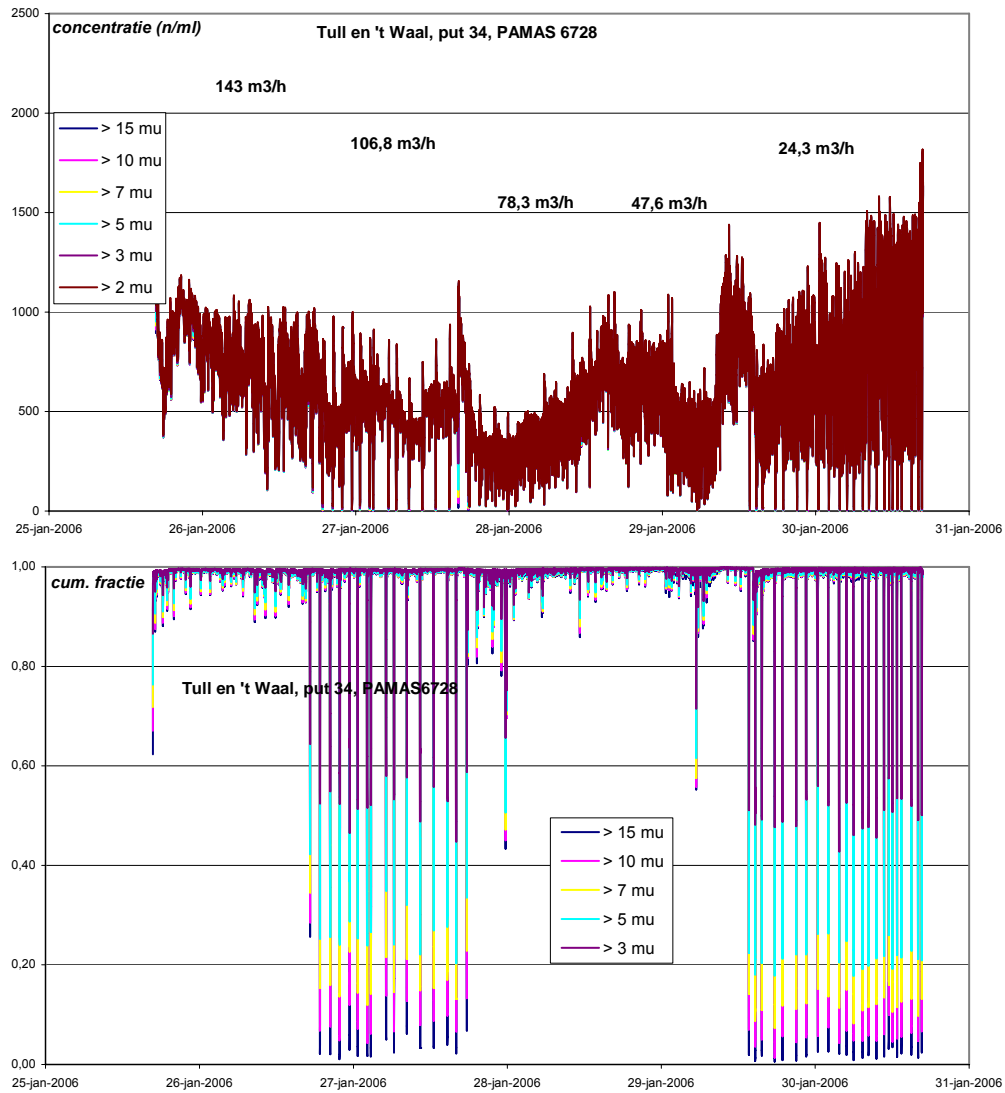


De resultaten van de deeltjestelling van de nacht van 18 jan vertonen een grote spreiding. Vervolgens komen 3 nachten met resultaten met een geringe spreiding, waarna de spreiding weer toeneemt.

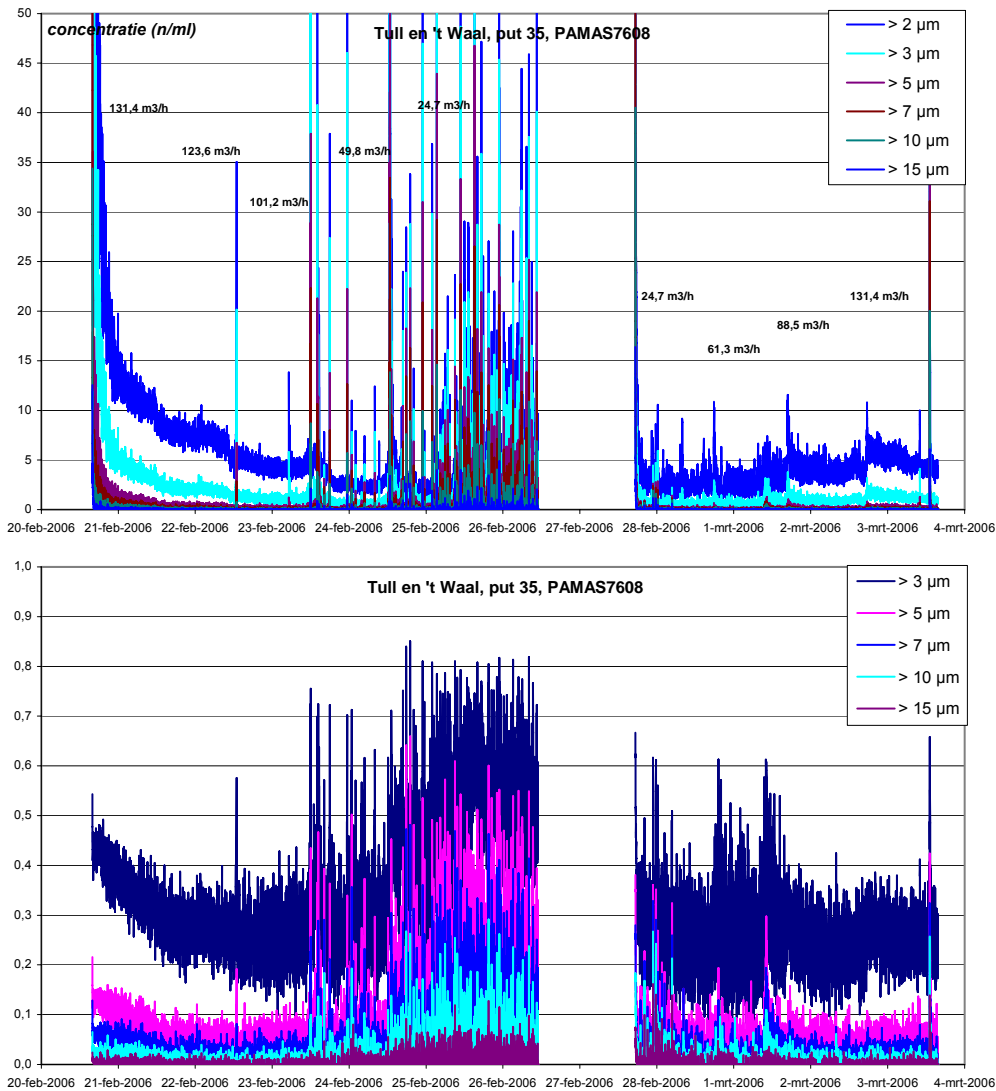
De kleine piek in concentratie op de overgang in volumestroom van 104 naar 80,6 m<sup>3</sup>/h duidt erop, dat dit een kleine ingreep is geweest, evenals de piek op de overgang van 80,6 naar 50 m<sup>3</sup>/h. De overgang in volumestroom van 50 naar 25 m<sup>3</sup>/h laat een grote piek in volumestroom zien. Blijkbaar heeft het enige moeite gekost om op de juiste waarde voor de volumestroom uit te komen (en is de afsluiter enige keren op en neer gedraaid?).

Opvallend is de bijdrage van deeltjes > 3  $\mu$ m aan het totaal aantal deeltjes, namelijk circa 0,3, tegenover gewoonlijk circa 0,4.

De resultaten van de tellingen zijn gedeeltelijk bruikbaar.



De resultaten van deze tellingen zijn niet bruikbaar.



In bovenstaande afbeelding is het verloop van de deeltjesconcentratie gedurende de nachten 21, 22 en 23 februari stabiel. Vanwege het ontbreken van pieken in de concentratie, is de volumestroom hier blijkbaar naadloos veranderd. Gezien de hoge piek in concentratie verliep de verandering in volumestroom op 23 februari blijkbaar niet probleemloos. Vervolgens neemt de spreiding in de metingen toe, in het bijzonder vanaf middernacht 24/25 februari. Ook de deeltjesgrootte verdeling vertoont vanaf die tijd een afwijkende verhouding. In hoeverre deze metingen de werkelijkheid weergeven, dan wel artefacten, is onbekend.

Gedurende de nacht van 27 februari is de teller uitgevallen.

Vanaf 28 februari vertoont de deeltjesconcentratie een stabiel beeld. Merk op dat ook hier geen pieken in concentratie worden aangetroffen bij het aanpassen van de volumestroom. Merk tevens op dat de fractie deeltjes > 3 μm hier circa 0,25 bedraagt, in plaats van gewoonlijk circa 0,45.

Uit bovenstaande volgt dat de resultaten van deze metingen gedeeltelijk bruikbaar zijn.

Bovenstaande waarnemingen leiden tot de volgende conclusies:

1. Het verloop van de deeltjesconcentratie laat soms een volledig afwijkend wisselvallig verloop zien (put 22 op 4 maart 2006). De oorzaak van dit wisselvallige verloop is onbekend.
2. De aanwezigheid van gasbellen in het onttrokken grondwater wordt door de deeltjesteller als (grote) deeltjes geregistreerd. Vanwege de oververtegenwoordiging van deze grove deeltjes, kunnen dergelijke niet correcte resultaten van metingen gemakkelijk worden herkend (put 34, 25 t/m 31 jan 2006, PAMAS 6728).
3. Echter uit een duplo meting bleek dat de ene teller een oververtegenwoordiging van grove deeltjes registreerde en de andere teller niet. Aangezien in dit geval geen sprake kan zijn van de aanwezigheid van gasbellen, is de gebruikte apparatuur blijkbaar niet betrouwbaar (put 22, 6 tot 9 maart, PAMAS 7608).
4. Het voorkomen van zeer wisselvallige resultaten (put 33, 157 m<sup>3</sup>/h (eerste dag), 80,6 m<sup>3</sup>/h, put 34, 143 m<sup>3</sup>/h (eerste dag) en put 35, middengedeelte) lijkt niet gebonden aan specifieke bedrijfsomstandigheden, maar lijkt toevallig. Indien dit voorkomen inderdaad toevallig is, hangt het samen met (het gebruik van) de deeltjesteller.
5. Het gebruik van onbetrouwbare apparatuur maakt het onmogelijk onderscheid te maken tussen bijzondere situaties en niet correcte waarnemingen (of alle metingen zouden in duplo moeten worden uitgevoerd).
6. De gebruikte apparatuur valt regelmatig uit, en is daarom niet bedrijfszeker.
7. Iedere verstoring van of in het watervoerend pakket leidt tot een beïnvloeding van de resultaten: de eerste dag van de metingen laat vaak een afwijkend verloop in deeltjes concentratie zien of de evenwichtssituatie is nog niet bereikt. Hoe kleiner de verstoring ten gevolge van aanpassing van de volumestroom, des te beter resultaat. Grote verstoringen leiden tot langdurige wisselvallige deeltjes concentraties, en waarschijnlijk ook tot afwijkende (evenwichts) concentraties.

Onderstaande tabel geeft een samenvatting van bruikbare resultaten van de metingen.

putnr	meetperiode 2006	teller	bruikbaarheid	
22	3 t/m 10 maart	6728	gedeeltelijk	
22	3 t/m 10 maart	7608	gedeeltelijk	
33	17 t/m 23 jan	7608	niet	
33	25 t/m 30 jan	7608	niet	
34	17 t/m 23 jan	6728	gedeeltelijk	
34	25 t/m 30 jan	6728	niet	
35	20 feb t/m 3 maart	7608	gedeeltelijk	





## Bijlage 5: Putschakeling en afpompning

