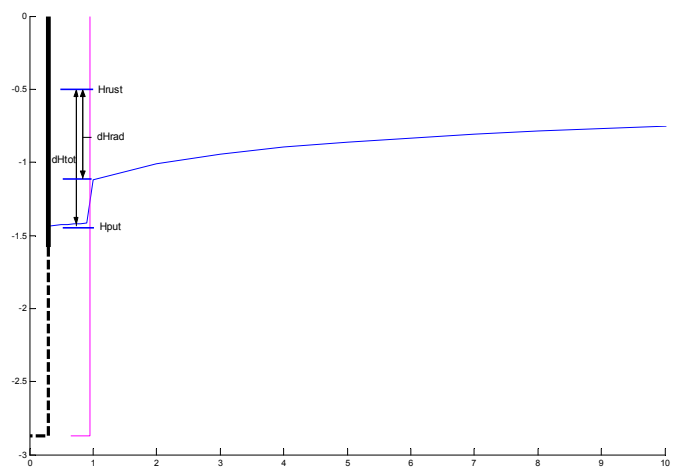


BTO 2003.037
november 2002

Verstopping van Pompputten

Beschrijving van een aantal processen



BTO 2003.037
november 2002

Verstopping van Pompputten

Beschrijving van een aantal processen

© 2002 Kiwa N.V.
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.

Opdrachtgever
BTO

Projectnummer
11.1456.400

Kiwa N.V.
Water Research
Groningehaven 7
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein

Telefoon 030 60 69 700
Fax 030 60 69 701
Internet www.kiwa.nl

Colofon

Titel

Verstopping van pompputten: beschrijving van een aantal processen

Projectnummer

11.1456.400

Projectmanager

ir. J. W. Kooiman

Kwaliteitsborger(s)

Ir. A.H. de Zwart

Auteur(s)

Ir. W. Beekman (Artesia)

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Samenvatting en vervolg

In het voorliggende rapport is een methode beschreven om het gedrag van verstopte putten te simuleren. Deze 'samenvatting en vervolg' bevat de stand van zaken van dit programma, opmerkingen over de aanpak en mogelijke aspecten voor ontwikkelingen in de toekomst.

Doelstelling

Het model simuleert het gedrag van mechanische verstopping. Het model is na uitbreiding te gebruiken om het effect van regeneraties te kunnen simuleren.

Stand van zaken module verstoppingverloop

Op dit moment bestaat de module uit een lineair, empirisch model die het verstoppingproces simuleert. Het model beschrijft het veranderen van het porievolume in de tijd met gebruik van de formules van Mualem (doorlaatbaarheidskarakteristiek). De stroomsnelheid wordt afgeleid van de theoretische beschrijving van de poriegrootteverdeling. Het vastraken en loslaten van deeltjes leidt tot een nieuwe poriegrootteverdeling. Daarmee ook tot een andere stroomsnelheidsverdeling en een toenemende weerstand van de boorgatwand. Het model gebruikt voor elk van de genoemde deelprocessen een empirische coëfficiënt. De waarde van deze coëfficiënten worden bepaald met een optimalisatieroutine tussen het berekende verstoppingsverloop en de veldgegevens van het verstoppingsverloop (stijghoogten).

Voorlopige resultaten

Een aantal verstopte putten is doorgerekend met de 1D module. In enkele gevallen levert het programma een goede fit, maar bij een behoorlijk aantal cases levert het gemodelleerde verstoppingsconcept geen goede verklaring van het opgetreden verstoppingsverloop. Dit kan gedeeltelijk liggen aan de aannamen betreffende de inputdata, zoals poriemodel en putgegevens. Anderzijds kan het ook betekenen dat de verstopping niet alleen beschreven kan worden door een relatie tussen stroomsnelheid en porieverdeling, maar dat ook andere processen een belangrijk rol spelen.

Opmerkingen

Empirische coëfficiënten: Alle gebruikte formules zijn empirisch en bevatten allemaal empirische coëfficiënten die bepaald moeten worden. Het model hangt van te veel van deze coëfficiënten af, waardoor de fit ook onbetrouwbaar wordt. Een aantal coëfficiënten zijn ook te bepalen met velddata, maar een aantal ook niet.

Fysica: De gebruikte theorie bevat niet de achterliggende fysica van deeltjes transport en aanhechting en mobilisatie van deeltjes. Wel is het conceptueel in orde; verkleinen en vergroten van poriën resulterend in een stromingsweerstand.

Regeneratiemodule: Het ontwikkelen van een regeneratiemodule is eigenlijk nog ver weg. Eerst moet je het verstoppinggedrag goed kunnen voorspellen.

Daarna kan je een stap verder gaan door te proberen te simuleren hoe het verstoppingsgedrag verandert door verschillende ingrepen.

Aspecten voor ontwikkeling van verstoppingsmodule

De conclusie die getrokken kan worden uit de voorlopige resultaten is dat het model zeker een aantal aanpassingen nodig heeft om een betere fit te kunnen geven van de verstoppingsdata. De mogelijkheden zijn er:

- Gebruik van gedetailleerde inputdata zoals gevarieerde bodemsamenstelling over het filtertraject, putgeschiedenis met verklaring verstoppingsverloop, etc.
- Inpluggen van een kritische ontrekkingssnelheid. Uit deeltjestellingen blijkt dat er vaak een kritische snelheid is waarboven een exponentiele toename in deeltjes gemeten wordt.
- Uitzoeken van de effecten op verstopping door verstoringen (regeneratie)

Afstemming BTS-BTO

De module is in het kader van het BTO (onderdeel WWIS) ontwikkeld. De opzet van deze module sluit zeer goed aan bij het BTS-project. Binnen BTS wordt als doel gesteld om te komen tot een putverstoppingsmodel (WP 1 en WP 8). Wanneer deze module weer wordt opgepakt is het aan te bevelen om eerst te controleren in welk stadium de ontwikkeling van een model binnen het BTS is. Een samenwerking tussen beide projecten ligt voor de hand. Zowel de uitwisseling van data en kennis maar ook het ontwikkelen van het model.

Nieuwegein

Bert-Rik de Zwart

Inhoud

Inhoud	3
1 Inleiding	5
1.1 Probleembeschrijving	5
1.2 Gangbare metingen voor het vaststellen van putverstopping	5
1.3 Oorzaken van putverstopping	5
1.4 Opheffen van putverstopping	6
1.5 Optimalisatie van het beheer	6
2 Verstopping op de boorgatwand	9
2.1 Mechanische verstopping	9
2.2 Implementatie continue boorgatwandverstopping	11
2.2.1 <i>Inleesroutine voor data in EXCEL-formaat</i>	11
2.2.2 <i>Optimalisatie van de parameters van het verstoppingsproces</i>	12
2.2.3 <i>Bepaling betrouwbaarheidsinterval</i>	12
2.3 Toepassing van de methode	14
2.4 Kanttekeningen bij de modellering en zijn resultaten	17
Literatuur	19
BIJLAGE: Meer resultaten	21
Resultaten Gelderland	21
Resultaten Brabant	22

1 Inleiding

1.1 Probleembeschrijving

Putverstopping treedt op bij een groot deel van de puttenvelden van de Nederlandse waterleidingbedrijven [Kiwa, 2001]. In de meerderheid van de gevallen gaat het om verstopping van de boorgatwand (overgang tussen de oorspronkelijke bodem en het omstortingsmateriaal) en in de overige gevallen om verstopping van de filterspleten. Verstopping van de boorgatwand is relatief lastig op te heffen. De oorzaak en de vorm van een verstopping op de boorgatwand zijn moeilijk vast te stellen. Het opheffen van een dergelijke verstopping is daarom vaak duur en weinig duurzaam. Reden om door middel van gestructureerde monitoring en door bundeling van ervaringen en theorie in eerste instantie tot een beter beheer en uiteindelijk tot een duurzaam ontwerp voor winputten te komen.

1.2 Gangbare metingen voor het vaststellen van putverstopping

Het optreden van putverstopping wordt gewoonlijk vastgesteld aan de hand van het verloop van de verlaging in de pompput bij een vast pompdebiet, meestal uitgedrukt als het specifiek debiet: de onttrekking (m^3/s) per meter verlaging. Het teruglopen van het specifiek debiet is een indicatie van het optreden van putverstopping: de toestromingsweerstand naar de put neemt kennelijk toe. Het lokaliseren van de putverstopping vergt additionele stijghoogtegegevens in de omstorting. Uit deze gegevens kan respectievelijk het stijghoogteverval over de filterspleten en *verandering* van de stijghoogte over de boorgatwand worden afgeleid en daarmee kan de verstopping worden gelokaliseerd. Beide grootheden worden vertroebeld door (variaties in) de afpompingskegel. Die variaties kunnen onder meer worden veroorzaakt door de invloed van naburige pompputten en door temperatuurschommelingen van het water.

1.3 Oorzaken van putverstopping

Verstopping op de boorgatwand wordt meestal veroorzaakt door mechanische verstopping: ophoping van zwevend materiaal op de overgang van de bodem naar de omstorting. Deze locatie is preferent voor verstopping, omdat in veel gevallen hier een snelheidsverandering in de stroming optreedt, door verschillen in porositeit en verschillen in poriegrootteverdeling, wat beide leidt tot een stromingsdiscontinuïteit. Het zwevend materiaal kan bestaan uit minerale delen, maar ook uit organisch materiaal, die kunnen werken als kit tussen de minerale delen. Door drukverschillen in het stromingsveld kunnen ook chemische reacties worden getriggerd, die kunnen leiden tot chemische verstopping.

Het zwevend materiaal kan door de hoge stroomsnelheden rond de put uit de bodem zelf worden losgemaakt. Dit proces kan versterkt worden door het aantrekken van grondwater dat niet in evenwicht is met de afzetting rond de put. Het zwevend materiaal kan ook zijn ingebracht tijdens de boring als restant van de

boorspoeling. Ook de condities tijdens regeneratie van putten kunnen leiden tot een sterke herordening van bodemmateriaal door chemische en mechanische effecten. In alle gevallen van mechanische verstopping zou het een tijdelijk probleem moeten zijn, omdat de hoeveelheid fijne delen in principe begrensd is. Over de factoren die de verstopping bepalen en de termijn waarin het probleem zich zou kunnen oplossen is echter weinig bekend.

Verstopping van de filterspleten kan zowel mechanisch van aard zijn als chemisch/biologisch. In de put kunnen van verschillende kanten verschillende waterkwaliteiten worden aangetrokken, die aanleiding kunnen geven tot chemische reacties. Met name de menging van aëroob water en anaëroob water creëert vaak een milieu waar biologische groei mogelijk is. Mechanische verstopping van de filterspleten treedt op indien geen goede omstorting is aangebracht en kan dus gerekend worden onder de constructiefouten.

1.4 Opheffen van putverstopping

Verstopte putten kunnen met verschillende methoden worden geregenereerd [Kiwa, 2000]:

- mechanische reiniging (schrappen, trillen)
- hydraulische reiniging (hoge druk, jutteren)
- oxidatieve reiniging (van organische verstopping)
- reductieve reiniging (van chemische neerslagen)
- dispersieve reiniging (van kleimineralen)
- reiniging door oplossing in zuur (van chemische neerslagen)
- alternatieven (e.g. bevrozing met CO₂)

Om deze methoden over het gehele filter te laten werken is een sectiegewijze behandeling van de put noodzakelijk. In veel gevallen zal een combinatie van methoden worden toegepast, omdat ook de aard van de verstopping vaak een (onbekende) combinatie van mechanismen omvat.

1.5 Optimalisatie van het beheer

Uit de schets van de praktijk van het beheer van putten blijkt dat er veel onbekend is en er veel variabelen zijn, zowel in de verstoppingsprocessen als in de regeneratiemethoden. Tevens blijkt het beheer aanzienlijke kosten met zich mee te brengen, die gerechtvaardigd zijn omdat de vervangingswaarde van de putten hoog is. Het zal duidelijk zijn dat in een dergelijke situatie een aanzienlijke bezuiniging is te behalen door het beheer te optimaliseren.

Optimalisatie betekent de bundeling van algemene kennis, locatie specifieke kennis en theoretische kennis. Bundeling van kennis impliceert gestandaardiseerde werkwijzen, zodat de ervaringen uitwisselbaar worden. Inzet van theoretische kennis impliceert dat bekende processen worden gekwantificeerd aan de hand van lokale meetgegevens, om hiermee voorspellingen te onderbouwen. Bij een poging

om het verstoppingsproces te modelleren kan aan de volgende ingangen worden gedacht:

- continu proces, veroorzaakt door de stroomsnelheden op de boorgatwand
- discontinue proces, waarbij deeltjes vooral worden losgemaakt tijdens sterke veranderingen in de stroming door het schakelen van de putten
- nadruk op pure mechanische verstopping
- nadruk op de kleefeigenschappen van deeltjes onder invloed van elektrostatische- en Van der Waals-krachten

Het ligt voor de hand om deze processen successievelijk op te nemen in het verstoppingsmodel, naar gelang de theorie zich ontwikkelt en de voorspellingskracht van het ontwikkelde model nog te wensen over laat.

In deze notitie worden voorstellen gedaan over de implementatie van een aantal theoretische concepten, die behoren bij een verstoppingsverloop volgens het continue proces.

2 Verstopping op de boorgatwand

2.1 Mechanische verstopping

Mechanische verstopping wordt veroorzaakt door herschikking van deeltjes in de bodem. Deze herschikking wordt veroorzaakt door de toenemende stroomsnelheid van het water richting de put en de daardoor toenemende sleepkracht die het water uitoefent op de bodemmatrix. De mate waarin de bodem gevoelig is voor het losraken van deeltjes is sterk afhankelijk van de korrelgrootteverdeling, de korrelkarakteristieken en de chemische eigenschappen, waaronder de vorm en mate van bodemverkitting. Veranderingen in de chemische eigenschappen, door het aantrekken van water met een afwijkende samenstelling kan de gevoeligheid van de bodem voor mechanische verstopping sterk doen toenemen.

Mechanische verstopping is dus een samenspel van bodemeigenschappen, mobilisatie van deeltjes en het vastraken van gemobiliseerde deeltjes in poriën. Een model om dit proces te simuleren zal deze aspecten dus moeten beschouwen. Benodigd is daarom een beschrijving van de poriegrootteverdeling van de bodemmatrix. Deze bepaald namelijk enerzijds de grens van de transporteerbare deeltjes en anderzijds de snelheid en daarmee de tractie waarmee deeltjes gemobiliseerd kunnen worden. Deze tractie is weer een maat voor de maximale grootte van het te mobiliseren deeltje.

De poriegrootteverdeling kan worden beschreven met de onverzadigde doorlatendheidskarakteristiek van de bodem, conform Mualem [1976]:

$$K(h) = K_s * S_e^\gamma * \left(\frac{\int_0^S \frac{1}{h(x)} * dx}{\int_0^1 \frac{1}{h(x)} * dx} \right)^2$$

met: K_s = verzadigde doorlatendheid (cm/dag)
 S_e = effectieve verzadiging (-)
 γ = empirische parameter
 $h(x)$ = matrixspanning (cm)

De verdeling van de poriesnelheid op de boorgatwand kan met behulp van deze vergelijking worden uitgerekend:

$$v(h) = \frac{K(h)}{K_s} * \frac{Q}{A * \theta(h)}$$

met: Q = pompdebiet (m³/s)
 A = oppervlak van de boorgatwand (m²)
 $\theta(h)$ = vochtgehalte (-)

Het vochtgehalte ofwel cumulatief porievolume in deze laatste vergelijking kan worden benaderd met de vergelijking van Van Genuchten [1980]:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha * h|^n)^m}$$

met: θ_r = watergehalte immobiel water
 θ_s = verzadigde watergehalte
 α, n, m = empirische parameters

De empirische parameters in de vergelijking van Mualem en Van Genuchten kunnen door regressie op meetwaarden worden bepaald [e.g. Abid e.a. 1992].

De poriesnelheid levert de benodigde energie waarmee deeltjes eventueel kunnen worden gemobiliseerd. Zoals gesteld is de mate van mobilisatie afhankelijk van veel factoren. Een daarvan is de grootte van het deeltje. De relatie tussen snelheid en grootte kan worden benaderd met de volgende relatie:

$$r_{\max} = a * \sqrt{v_p}$$

met: r_{\max} = maximale grootte van gemobiliseerde deeltjes
 a = factor voor verdisconteren matrix interactie
 v_p = poriesnelheid

Of een deeltje van een bepaalde grootte zich daadwerkelijk door een porie kan verplaatsen hangt af van de grootte van de porie. Deze kan worden afgeleid van matrixspanning. De equivalente straal van een capillair als functie van de matrixspanning wordt beschreven met:

$$r_{\text{por}} = \frac{2 * \gamma}{\rho_w * g * 10^{(pF-2)}}$$

met: r_{por} = equivalentstraal van een porie
 γ = oppervlaktespanning water (N/m)
 ρ_w = dichtheid water (kg/m³)
 g = zwaartekrachtversnelling (m/s²)
 pF = log(matrixspanning (cm))

De toename van de stromingsweerstand in de capillairen op de boorgatwand kan met deze ingrediënten beschreven worden in de tijd:

$$R(h, t) = R(h, 0) + \int_0^t \max((r_{\max} - r_{\text{por}}), 0) * b * (v_p(R(h, t)))^2 * dt$$

met: $R(h, t)$ = weerstand per porie in de tijd
 b = factor voor het disconteren van deeltjesinteractie
 $v_p(R(h, t))$ = poriesnelheid, afhankelijk van de weertandsontwikkeling

Deze weerstand kan vervolgens vergeleken worden met de weerstand die berekend wordt uit het specifiek debiet. De empirische parameters a (matrix interactie) en b (deeltjesinteractie) kunnen hiermee geoptimaliseerd worden.

2.2 Implementatie continue boorgatwandverstopping

2.2.1 Inleesroutine voor data in EXCEL-formaat

Waterleidingbedrijven registreren van tijd tot tijd de conditie van hun putten. Voor het vaststellen en de lokalisatie van eventuele putverstopping en de hier voorgestelde modelmatige simulatie daarvan zijn de volgende gegevens en metingen noodzakelijk, of *wenselijk* (cursief aangegeven) met het oog op toekomstige ontwikkelingen:

- identificatie gegevens:
 - naam puttenveld
 - putnummer
- put kenmerken:
 - nom. cap.
 - diepte
 - filtertrajecten
 - boorgatdiameter
 - putdiameter
- omgevingskenmerken:
 - KD geëxploiteerde pakketten
 - c waarde scheidende lagen
 - *korrelgrootteverdeling geëxploiteerde pakketten*
 - parameters van het poriemodel volgens de theorie van Van Genuchten
 - *mineralogische samenstelling geëxploiteerde pakketten*
 - *pH onttrokken water*
 - *MFI onttrokken water*
 - *mineralogische samenstelling filtraat*
- monitoringsgegevens:
 - datum moment van de monitoring
 - cap onttrokken debiet (m³/uur)
 - pb1 stijghoogte in put tijdens bedrijf
 - wf1 stijghoogte in omstorting tijdens bedrijf
 - pb0 stijghoogte in put tijdens rust
 - wf0 stijghoogte in omstorting tijdens rust
 - cyclus nummer van de regeneratiecyclus
 - *reg.meth. laatste regeneratiemethode*

De inleesroutine leest de monitoringsgegevens in uit een excel-bestand met de aangegeven kolommen. Uit deze gegevens worden de volgende grootheden afgeleid:

- totale stijghoogteverval uit het verschil tussen de metingen tijdens pomp in rust en in bedrijf
- stijghoogteverval over de filterwand uit het verschil tussen de metingen in omstorting en in pompput

- stijghoogte op de boorgatwand door radiale toestroming, berekend met behulp van de formule van De Glee
- stijghoogteverval over de boorgatwand uit het verschil tussen stijghoogte in omstorting en stijghoogte op de boorgatwand

Met behulp van deze grootheden worden respectievelijk de volgende kenmerken berekend:

- het specifiek debiet

$$Q_{\text{spec}} = \frac{\text{(het onttrokken debiet)}}{\text{(het totale stijghoogteverval)}}$$

- de boorgatweerstand

$$c_{\text{bg}} = \frac{\text{stijghoogteverval over de boorgatwand} * \text{oppervlak boorgat}}{\text{het onttrokken debiet}}$$

- en de risico's van luchthappen bij maximale belasting van de put. Dit treedt op indien het specifiek daalt tot de volgende grenswaarde:

$$Q_{\text{spec}} \leq \frac{\text{(maximale onttrekkingsniveau van put)}}{\text{(waterdekking pompfilter)}}$$

2.2.2 Optimalisatie van de parameters van het verstoppingsproces

De doorlatendheidsfunctie de waterretentie en de equivalent poriegrootte worden berekend met behulp van de formules, zoals beschreven in paragraaf 2.1. Dit zijn analytische functies, die dus een continu beeld geven van de beide grootheden. In de routine die de ontwikkeling van de verstopping simuleert wordt de functie gediscrètiseerd op een naar believen in te stellen aantal punten. Op deze punten wordt eveneens conform de beschrijving in paragraaf 2.1 respectievelijk de stroomsnelheid, de daarmee samenhangende transporteerbare deeltjesgrootte en de verstoppingsnelheid bepaald. Geïntegreerd over alle punten en de tijd geeft dit het verloop van de weerstand over de boorgatwand weer.

De sleepfunctie voor transporteerbare deeltjes en de formulering van de verstoppingsnelheid bevatten empirische te fitten parameters. Bij gebrek aan gemeten waarden van de doorlatendheid wordt ten behoeve van deze principe berekeningen ook de verzadigde doorlatendheid gefit aan de metingen. De doelfunctie van de fit-procedure is het minimum van het verschil tussen de 'gemeten' (zie paragraaf 2.2.1) en de berekende boorgatweerstand. De fit-procedure wordt uitgevoerd middels de standaard optimalisatie routine van MATLAB® (die gebruik maakt van de Nelder-Mead simplex methode [Lagarias e.a., 1998]).

2.2.3 Bepaling betrouwbaarheidsinterval

In het model is de weerstand op de boorgatwand beschreven als een functie van twee empirische parameters. Van deze relatie kunnen statistische kenmerken

worden afgeleid, die iets zegt over de samenhang tussen de gekozen modelparameters en over de betrouwbaarheid van de modelresultaten. Daartoe worden de volgende grootheden berekend:

- De Jacobiaan: dit is de matrix van de afgeleide van de boorgatweerstand naar elk van de parameters op alle beschikbare meetpunten:

$$Jac = \begin{pmatrix} \left[\frac{d(c_{bg})}{d(a)} \right]_{1,1} & \left[\frac{d(c_{bg})}{d(b)} \right]_{1,2} \\ \dots & \dots \\ \left[\frac{d(c_{bg})}{d(a)} \right]_{1,n} & \left[\frac{d(c_{bg})}{d(b)} \right]_{1,n} \end{pmatrix}$$

- De foutenmatrix: dit is het verschil tussen de 'gemeten' boorgatweerstand en de met het model berekende boorgatweerstand:

$$e = c_{bg}(\text{gemeten}) - c_{bg}(\text{berekend})$$

- De covariantie: deze matrix geeft het verband tussen de verschillende parameters:

$$\text{covar} = \text{var}(e) * \text{inv}(Jac * Jac)$$

- De variantie van de beide parameters (var(a) en var(b)) liggen op de diagonaal van de covariantiematrix.
- De correlatie: deze matrix geeft het genormaliseerde verband tussen de parameters:

$$\text{corr} = \frac{\text{covar}}{\sqrt{\text{var}(a) * \text{var}(b)}}$$

- En met behulp van deze grootheden wordt tot slot de variantie van de berekende boorgatweerstand berekend:

$$\text{var}(c_{bg}) = Jac(:,1)^2 * \text{var}(a) + Jac(:,2)^2 * \text{var}(b) + 2 * Jac(:,1) * Jac(:,2) * \text{covar}$$

- Het betrouwbaarheids interval van het model wordt berekend op een afstand van 2* de standaardafwijking (wortel(var(c_{bg})) vanaf de gefitte curve.

Voorwaarde van deze benadering is een normale verdeling van de foutenmatrix. Daar waar de modelbeschrijving niet aan deze voorwaarde voldoet zullen andere processen dominant zijn boven het beschreven proces voor de verstopping van de boorgatwand.

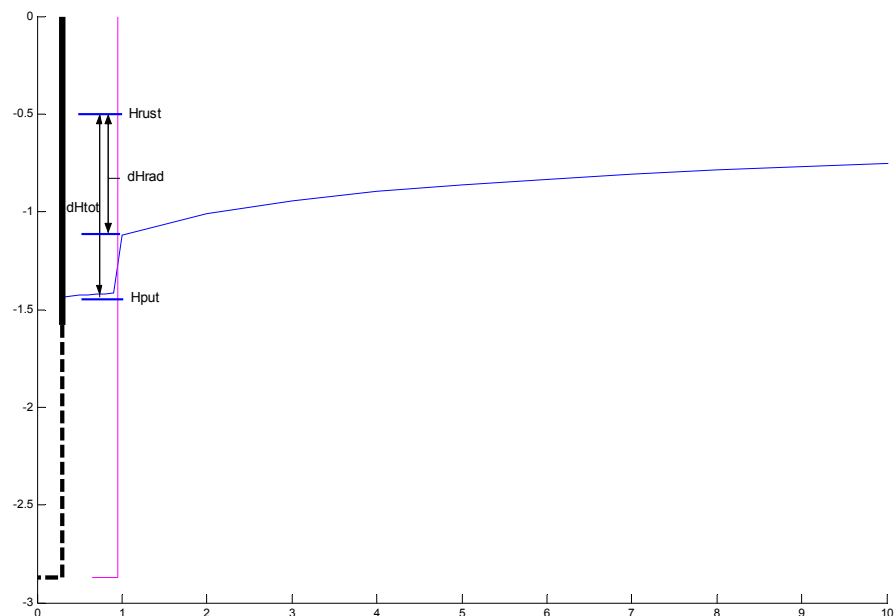
In deze benadering van het betrouwbaarheidsinterval is de ruis van de waarnemingen zelf niet verdisconteerd. Daarom liggen de waarnemingen naar verwachting verspreid buiten het betrouwbaarheids interval van het model.

2.3 Toepassing van de methode

Het verstoppingsverloop wordt meestal gevolgd met de volgende meetprocedure:

1. meting van stijghoogte in de put en het waarnemingsfilter in de omstorting;
2. uitschakelen van de put en het tot rust laten komen van de toestroming naar de put;
3. meting van de referentiehoogte van de stijghoogte in het pakket (in de put en in de omstorting).

De metingen moeten zorgvuldig zijn uitgevoerd, waarbij het onder meer van belang is dat de rustsituatie daadwerkelijk wordt benaderd en dat de metingen in dezelfde volgorde worden uitgevoerd. Tevens moeten de stromingscondities (functioneren van nabijgelegen putten, maar ook de watertemperatuur) rond de put gelijk zijn omdat deze de toestromingsweerstand bepalen.



Figuur 1: Principe-schets stijghoogteverloop rond een put met een verstopping op de boorgatwand

In figuur 1 is het principe-verloop van de stijghoogte rond een put weergegeven, met een aanduiding van een aantal te meten of te berekenen variabelen. De totale weerstand, uitgedrukt in stijghoogteverval, wordt gemeten. Deze bestaat uit de volgende componenten:

$$\Delta H_{\text{tot}} = \Delta H_{\text{boorgatwand}} + \Delta H_{\text{filter}} + \Delta H_{\text{radiaal}} = H_{\text{rust}} - H_{\text{put}}$$

en het stijghoogteverval over de filterspleten kan worden benaderd met (indien de doorlatendheid van de omstorting relatief groot is ten opzichte van het pakket):

$$\Delta H_{\text{filter}} = H_{\text{put}} - H_{\text{omstorting}}$$

Het verval over de boorgatwand kan als volgt worden berekend:

$$\Delta H_{\text{boorgatwand}} = H_{\text{rust}} - H_{\text{omstorting}} - \Delta H_{\text{radiaal}}$$

waarin: $\Delta H_{\text{radiaal}}$ het stijghoogteverval op de boorgatwand is ten gevolge van de afpompings

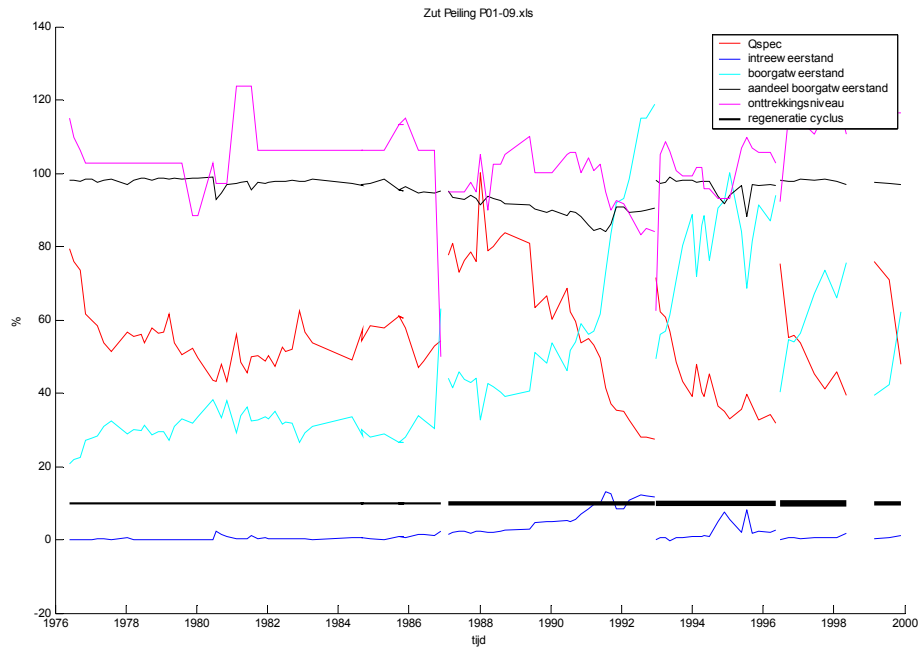
De verlaging op de boorgatwand ten gevolge van de pompkegel kan worden benaderd met de formule van De Glee.

Figuur 2 laat een voorbeeld zien van metingen van het pompstation Zutphen. Deze data reeks strekt zich uit over een periode van 25 jaar, waarin 4 regeneraties zijn uitgevoerd. De geohydrologische condities (c en KD, voor de berekening van de pompkegel) zijn niet gebaseerd op de lokale omstandigheden, maar aangenomen.

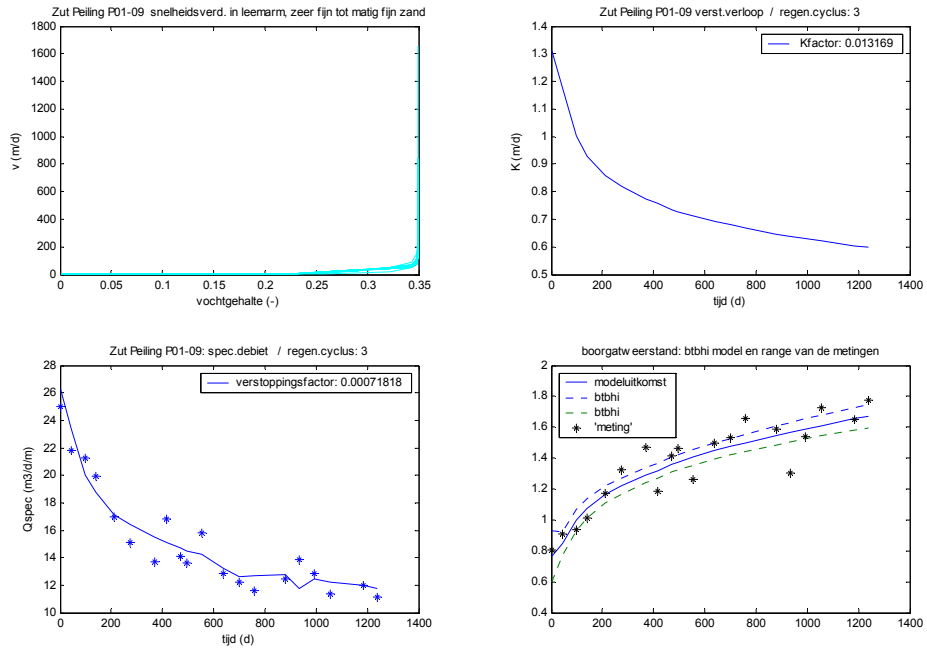
1. De eerste regeneratie (in 1987) betrof een vergroting van de pompcapaciteit
2. De tweede regeneratie vond plaats in 1992
3. De derde regeneratie vond plaats in 1996
4. De vierde regeneratie vond plaats in 1999: deze betrof ook een chemische behandeling

Uit deze sequentie blijkt dat de frequentie sterk is toegenomen. Het lijkt erop dat er een duidelijke verandering is opgetreden in de condities van de put, die niet direct kunnen worden toegeschreven aan de verhoging van de pompcapaciteit. Mogelijk spelen de omgevingscondities of de aangetrokken waterkwaliteit een rol. Deze laatste veronderstelling wordt ondersteund door het moment dat ook verstopping van de filterspleten begint op te treden.

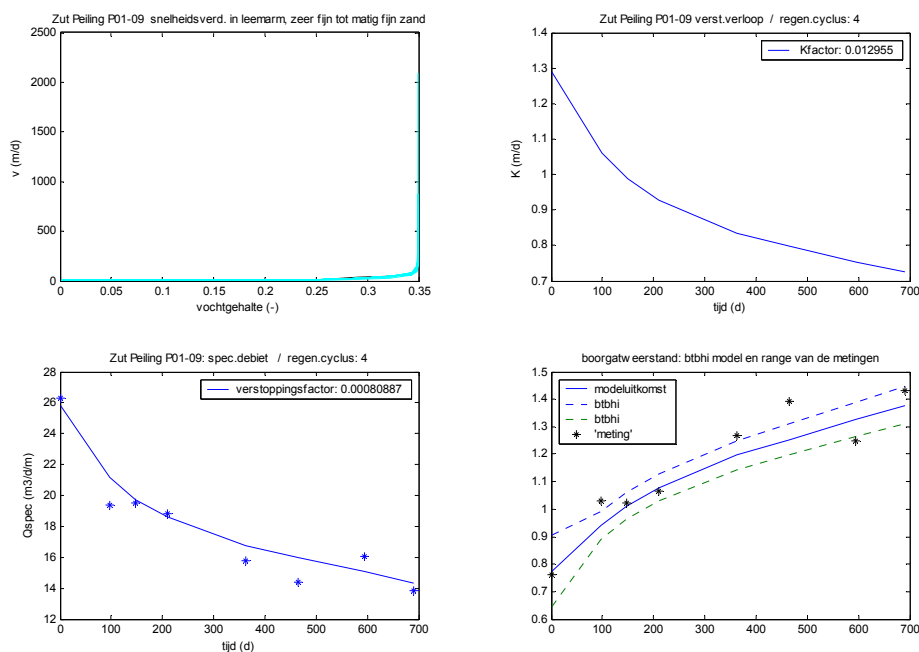
- De eerste periode laat een weliswaar fluctuerend, maar na een snelle initiële toename van de weerstand een qua grootteorde stabiel verloop. Hier lijken twee onderscheiden fasen/processen te zijn opgetreden, die zich dus slecht laten beschrijven met de beschreven benadering voor de verstopping
- De tweede periode (na vergroting van de pompcapaciteit) verloopt gedurende 2 jaar stabiel, waarna opeens verstopping begint op te treden. Dit verloop laat zich met het gepresenteerd concept niet goed beschrijven
- In de derde, vierde en vijfde periode zet de verstopping gelijk na regeneratie weer in. Dit verstoppingsverloop laat zich goed beschrijven met het gehanteerde concept (figuur 2 en 3).



Figuur 2: Metingen van een put van pompstation Zutphen (relatieve eenheden)



Figuur 3: Berekend verstopingsverloop in de 3^e periode



Figuur 4: Berekend verstoppingsverloop in de 4^e periode

2.4 Kanttekeningen bij de modellering en zijn resultaten

Provisorisch lijstje:

Het beheer vertoont veel discontinuïteiten, waaronder het schakelen van de putten, sterke debietveranderingen en verschillende vormen van regeneratie. Deze discontinuïteiten hebben vermoedelijk een sterke invloed op de ontwikkeling van de putverstopping en zijn mogelijk in een aantal gevallen verre dominant over de gesimuleerde putverstopping. Als dat zo is vormt dat een aanknopingspunt om deze effecten nader te onderzoeken.

De metingen veronderstellen dat de meting van de stijghoogte in de omstorting eenduidig is. In de praktijk kunnen echter gezien de grote verschillen in doorlatendheid in de lagen van de bodemmatrix en de grote stroomsnelheden in de omstorting aanzienlijke verschillen optreden.

In een behoorlijk aantal van de verstoppingsmetingen levert het gemodelleerde verstoppingsconcept geen goede verklaring van het opgetreden verstoppingsverloop. Dit kan gedeeltelijk liggen in het gekozen poriemodel: dat is gebaseerd op standaardprofielen van de bovengrond. Van grindachtige profielen, die veel voorkomen in de geëxploiteerde aquifers, is nog geen poriemodel beschreven. Het kan ook liggen aan het feit dat in het model nog niet de juiste gegevens van het filter (lengte en diameter) zijn gehanteerd.

Het kan natuurlijk ook goed zijn dat stromingsafhankelijke samenklontering en eventueel erosie van dergelijke klonters een belangrijker proces vormen.

Voor een aantal putten geeft het concept wel een mogelijk goede beschrijving van het verstoppingsverloop. Het betrouwbaarheidsinterval laat echter zien dat de ruis van de metingen groter is dan dat met het model kan worden beschreven.

De gevoeligheid van het model is gebaseerd op een discreet aantal trajecten van de doorlatendheid. Hierdoor verloopt ook de gevoeligheid voor verstopping enigszins getrapt.

Literatuur

Abid, M., W. Beekman, J. Beekma, Anwar-ul-Hassan, M.A. Moghal and L. Ali (1992): Determination of soil hydraulic properties with the pressure outflow method. In: Proceedings of the 5th Int. Drainage Workshop, Lahore-Pakistan, Vol. II 1.65-1.76

Kiwa, (2000): Kennisdocument Putten(velden). *BTO* 2000.110 (c)

Kiwa, (2001): Quick scan putverstopping en regeneratie bij vijf waterbedrijven. *BTO* 2001.169 (c)

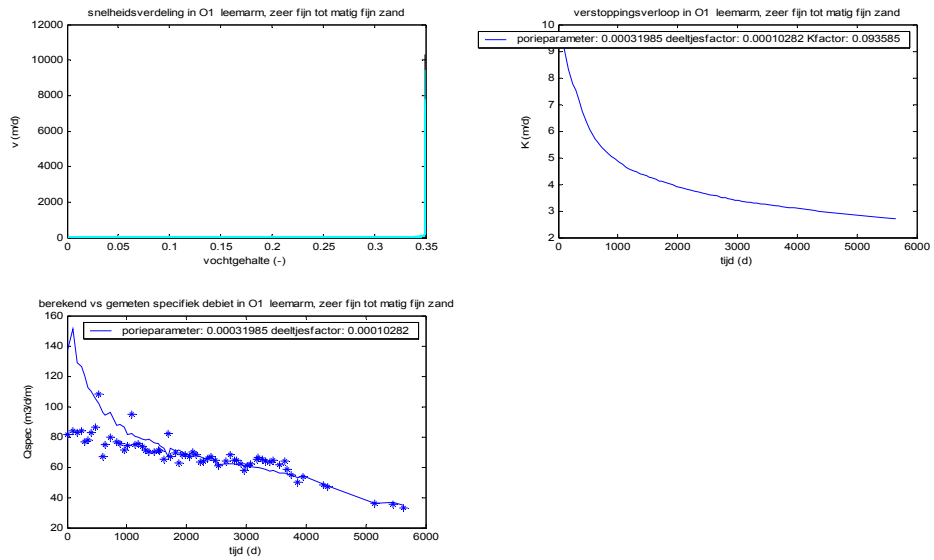
Lagarias, J.C., J.A. Reeds, M.H. Wright, P. E. Wright (1998): Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal of Optimization*, **9(1)**: p.112-147, 1998.

Mualem, Y. (1976) A new model for the predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media., *Wat Res Res*, **12**, 513-522.

Van Genuchten, M. Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci Soc Am J*, **44**, 892-898.

BIJLAGE: Meer resultaten

Resultaten Gelderland



Figuur 5: Pompput in puttenveld Vorden

Resultaten Brabant

