IR. G. F. J. KRUIJTZER
Wetenschappelijk medewerker TH Delft

Stijghoogteverliezen in en rond putfilters*

1. Inleiding

Aanleiding tot het schrijven van dit artikel is o.a. de publikatie „Berekeningen van hoofdafmetingen van waterwinputten met bijbehorende eenvoudige zandcontrole" in dit tijdschrift [1]. De schrijver, H. v. d. Hoek, stelt in deze publikatie: „Bekend is, dat het hydraulisch effect van een waterwinput en de zo goed mogelijk verdeelde radiale instroming van het water in het filter worden bevorderd, wanneer de volgende verhouding kan worden aangehouden: CL/D = gem. 6. Hierin betekenen: C het werkzame oppervlak van het filter met als gemiddelde waarde 0,15, L de lengte van het filter in meters, D de diameter van het filter in meters".

De schrijver ontleent de inhoud van dit citaat aan het Handbuch des Brunnenbaus van E. Bieske [2]. Bieske ontleent op zijn beurt deze gegevens aan een artikel van C. Rowher e.a. [3]. Rowher bepaalt het verlies aan stijghoogte van het water in een putfilter met de veronderstellingen dat de stroming in het putfilter laminair is en de stijghoogte aan de buitenzijde van het putfilter over de gehele lengte van het filter constant is.

In werkelijkheid echter is de stroming in putfilters veelal turbulent, terwijl de stijghoogte van het grondwater aan de buitenzijde van het filter over de hoogte (lengte) van het filter niet constant is. Door W. H. Li [4]) is de theorie van Rowher gewijzigd, door de veronderstelling van een constante stijghoogte van het grondwater aan de buitenzijde van het filter te vervangen door de veronderstelling van een over de hoogte constante radiale instroming. Voor grond met een geringe doorlatendheidcoëfficiënt is deze laatste veronderstelling nagenoeg juist. Ook Li echter beschouwt de stroming in de filterbuis laminair. Beiden passen echter bovendien de impulsvergelijking verkeerd toe. Hierdoor is de theorie van Rowher en Li geen geschikt uitgangspunt voor de bepaling van het stijghoogteverlies van het water in een putfilter en zijn de gegevens, die Bieske aan die theorie ontleent, met betrekking tot het hydraulisch effect van een waterwinput niet juist. Bovendien moet mijns inziens aan dit artikel van Rowher e.a. een andere interpretatie worden gegeven, dan door Bieske gegeven.

In [5] wordt door J. H. Ouwerkerk een formule gegeven voor stijghoogteverlies van water in drainage leidingen. De afleiding van de formule voor het stijghoogteverlies geschiedt m.b.v. een energiebeschouwing. Hierbij wordt een stijghoogteverlies gevonden, dat kleiner is dan het stijghoogteverlies, welk het resultaat van een impulsbeschouwing is. In dit artikel zal dan ook blijken dat een energiebeschouwing geen volledig antwoord geeft op de vraag naar het werkelijk optredende stijghoogteverlies van het water in het putfilter en zal een formule voor het stijghoogteverlies worden afgeleid.

Een tweede aanleiding tot het schrijven van dit artikel zijn de publikaties van D. Klotz [6 en 6a] over hydraulische eigenschappen van het putfilter. Het niet geheel open zijn van de wand van het putfilter (partiële perforatie) beïnvloedt het stijghoogteverlies van het grondwater in het grondmassief (het formatieverlies).

Volgens Klotz schijnt het uit physische overwegingen doelmatig de wand van het putfilter voor te stellen als een poreus medium. Zolang een bepaalde kritische snelheid van het water aan de wand van het filter niet wordt overschreden resulteert het model in de toepassing van de wet van Darcy op de wand van het filter, waarbij voor de doorlatendheidscoëfficiënt van de wand een formule wordt gegeven, waarin een aantal empirische grootheden voorkomen. Deze empirische grootheden, alsmede enige andere factoren, doen de theorie niet zonder meer geschikt zijn voor de bepaling van de invloed van de partiële perforatie op het formatie verlies. De methode voor de bepaling van de invloed van de partiële perforatie op het formatie verlies, in dit artikel gebruikt, is geïnspireerd op een idee van prof. dr. ir. G. Josselin de Jong (TH Delft). Het idee is uitgewerkt door A. Verruijt [7] met betrekking tot de stroming in een halfoneindige strip en een halfoneindige cilinder, welke aan het uiteinde een vernauwing bezitten, en door schrijver dezes [8] met betrekking tot het discretiseren van randvoorwaarden in een elektrisch analogon. Door P. Widmoser [9] is, onafhankelijk van Verruijt, op een soortgelijke manier de invloed van de partiële perforatie op het stijghoogteverlies van het grondwater bepaald. Widmoser doet dit dan voor drainageleidingen waarin de sleuven in de wand volgens een bepaalde configuratie zijn aangebracht. In dit artikel zal het resultaat van Widmoser worden weergegeven. Bovendien zullen met betrekking tot het extra stijghoogteverlies putfilters met verschillende sleuvenconfiguraties worden beschouwd.

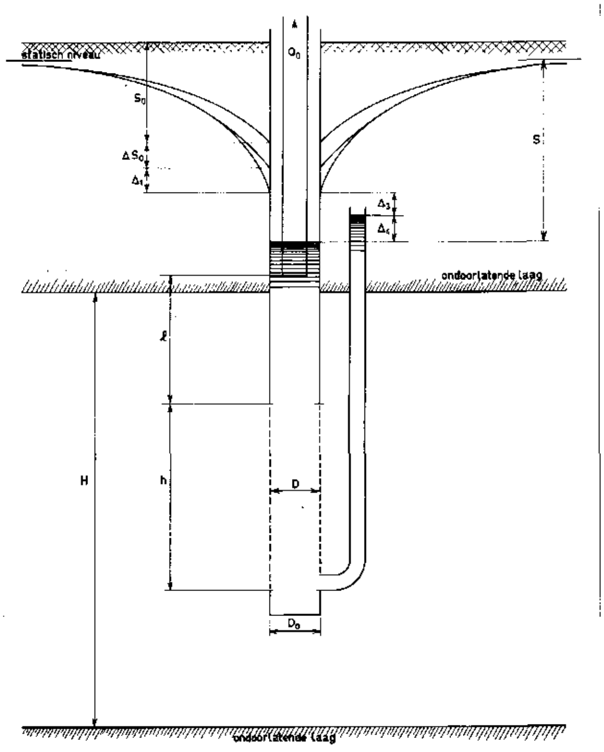
De opstelling van par. 2, de probleemstelling, is geschied met suggesties van prof. ir. L. Huisman (TH Delft). T.a.v. notatie en basisgegevens is gebruik gemaakt van een manuscript van Huisman [10], dat momenteel gedrukt wordt en waarin o.a. de resultaten van dit artikel zullen worden vermeld. Voor een verdere inleiding op dit artikel mag tenslotte naar [11] worden verwezen.
In par. 3 wordt de invloed van de partiële perforatie op het stijghoogteverlies in het grondmassief en in par. 4 het stijghoogteverlies in het putfilter beschouwd.

In par. 5 zullen de numerieke resultaten van het een en ander in een overzicht van alle bij de onttrekking van grondwater optredende stijghoogteverliezen worden gegeven. In par. 6 tenslotte zal een indicatie worden gegeven met betrekking tot de keuze van de straal en van het percentage perforatie van het putfilter.
In appendix I wordt een lijst van de te gebruiken symbolen gegeven. Als eenhedenstelsel is het „meter-kilogrammassa, seconde" stelsel gekozen, hetgeen in de vakliteratuur ook steeds meer gebruikelijk begint te worden.

2. Formulering van het probleem

Beschouwd wordt een grondmassief waarin zich een

*) De schrijver is prof ir. L. Huisman van de TH Delft veel dank verschuldigd voor de medewerking bij de totstandkoming van dit artikel.



Afb. 1 - De samenstelling van het totale stijghoogteverlies.

putfilter bevindt. Het in het grondmassief aanwezige grondwater stroomt door de filteropeningen in het putfilter, waaruit het water wordt opgepompt. T.g.v. het onttrekken van het water aan het putfilter ontstaat een stijghoogteverlies S, dat gelijk is aan het verschil tussen het statisch niveau van het grondwater en het waterniveau in het putfilter (afb. 1). Dit totale stijghoogteverschil is gelijk aan de som van het formatieverlies en het putfilterverlies.

A. *Het formatieverlies*

De grondwaterstroming ondervindt wrijvingsverliezen in het grondmassief tengevolge waaraan het formatieverlies ontstaat. De wrijvingsverliezen in de omgeving van het putfilter worden mede bepaald door de partiële perforatie van de wand van het putfilter en de partiële penetratie van het putfilter in het grondmassief. T.g.v. deze factoren ontstaat een stroomlijnen-patroon zoals geschetst in afb. 2a, 2b en 3. Opgemerkt wordt dat twee gevallen van partiële perforatie worden onderscheiden, te weten: de constante partiële perforatie, d.w.z. langs de gehele filterwand is de verhouding p_0 tussen open en gesloten oppervlak van de filterwand constant, en de niet constante partiële perforatie (afb. 2a), gedeeltelijk filter genoemd.

Het formatieverlies is nu gelijk aan de som van (afb. 1):

1. Het stijghoogteverlies S_0 t.g.v. de formatieweerstand waarbij de invloed hierop van de partiële perforatie en de partiële penetratie buiten beschouwing wordt gelaten.
2. Het extra stijghoogteverlies Δ_1 t.g.v. de constante partiële perforatie.
3. Het extra stijghoogteverlies Δ_0 t.g.v. het gedeeltelijk filter.
4. Het extra stijghoogteverlies ΔS_0 t.g.v. de partiële penetratie.

Indien rond het putfilter een grindstorting is aangebracht worden de voornoemde grootheden van een index w voorzien. Het stijghoogteverlies over de grindstorting wordt met Δ_2 aangeduid.

B. *Het putfilterverlies*

Het water, dat door de openingen van het filter stroomt, contraheert (afb. 5). Deze contractie gaat vergezeld van een versnelling van het water. Het energie-niveau van het water blijft hierbij constant. Op enige afstand van de binnenwand van het filter wordt het water vertraagd. Deze vertraging geeft een energieverlies, dat we het intrede verlies noemen. T.g.v. de radiale instroming is de over de doorsnede van het putfilter gemiddelde axiale snelheid $\bar{V}_z$ niet constant. Het putfilterverlies is nu de som van:

1. het intredeverlies Δ_3 t.g.v. de stroming door de openingen in de filterwand;
2. het stijghoogteverlies Δ_4 t.g.v. het niet constant zijn van de over de doorsnede van het putfilter gemiddelde axiale snelheid V_z en t.g.v. de wrijvingsverliezen en turbulentie van de stroming in het putfilter.

In deze publikatie worden in de eerste plaats de stijghoogteverliezen Δ_1 en Δ_0 t.g.v. respectievelijk de constante partiële perforatie en het gedeeltelijk filter bepaald.
Hierbij wordt het werk van P. Widmoser uitgebreid (par. 3). Vervolgens wordt het stijghoogteverschil Δ_4 in het putfilter bepaald (par. 4).
In par. 5 worden de resultaten van de paragrafen 3 en 4 en de overige bekende grootheden zoals S_0, ΔS_0 en Δ_3 in een overzicht samengevat.
Bij het een en ander worden t.a.v. de stroming in het grondmassief de volgende veronderstellingen gedaan, te weten:

A. de stroming is laminair en stationair en wordt beschreven door de wet van Darcy;
B. de doorlatendheid van het grondmassief is op iedere plaats en in iedere richting dezelfde d.w.z. het grondmassief is homogeen en isotroop met betrekking tot de doorlatendheid.

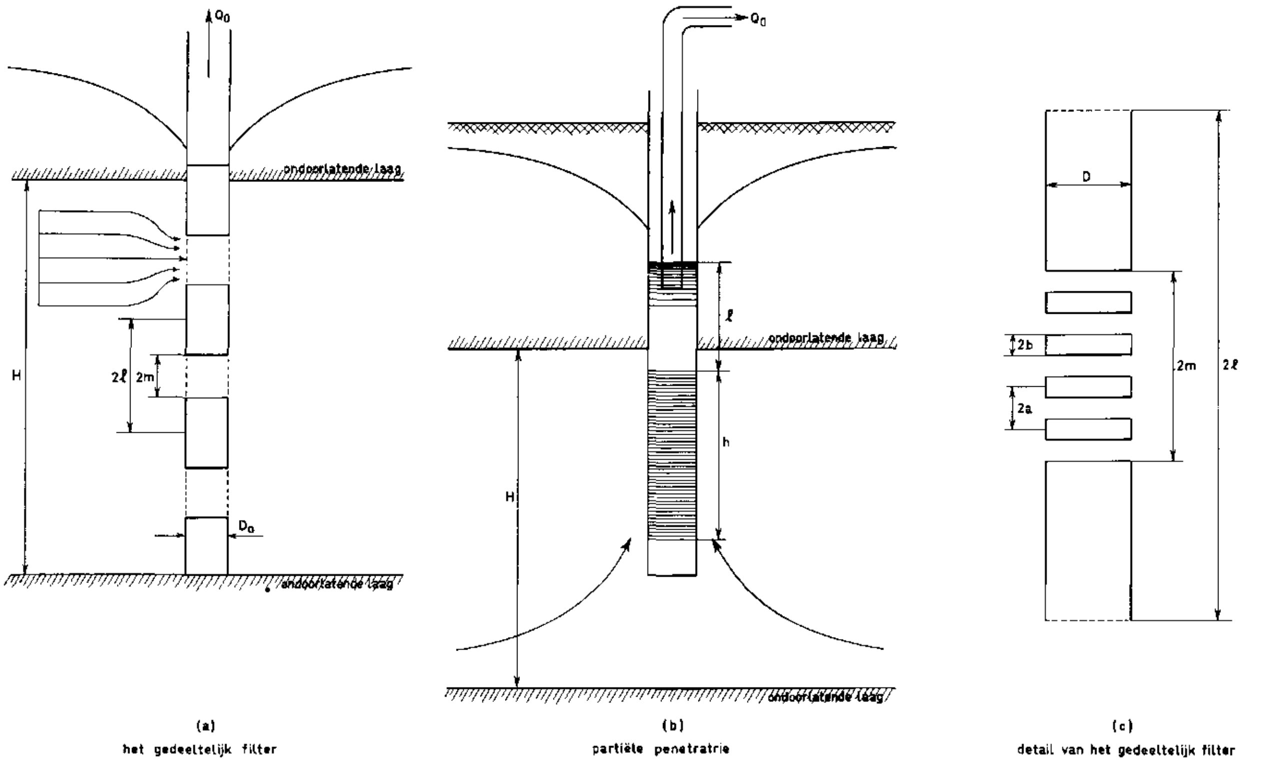
Bovendien zal worden verondersteld, dat het water in het putfilter boven het filtrerende deel van het putfilter staat.

3. De invloed van de partiële perforatie op het stijghoogteverlies in het grondmassief

3.1 *Constante partiële perforatie*

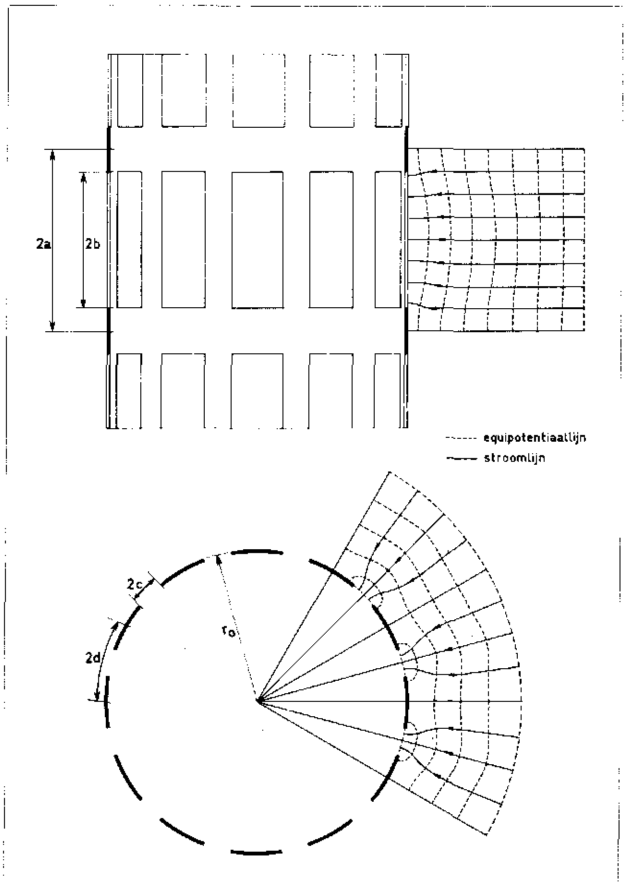
T.a.v. de constante partiële perforatie worden twee soorten putfilters onderscheiden, welke representatief zijn voor de vele in gebruik zijnde typen filters (afb. 3a en 3b). De perforatie in de wand van putfilter I is zodanig uitgevoerd, dat de openingen (sleuven) in de wand in de richting van de buisas lopen. De lengte van de sleuven is gelijk 2b en de onderlinge h.o.h.-afstand gelijk aan 2a. In de wand van putfilter II lopen de sleuven in de omtrek-richting van het filter. Hun lengte is gelijk 2c en hun onderlinge h.o.h.-afstand in omtrek-richting is gelijk 2d. Bij de bepaling van de invloed van de partiële perforatie op het stijghoogteverlies in het grondmassief wordt verondersteld dat voor de sleuven in de wand van filter I geldt:

$(2a - 2b) / 2a << 1$, en voor die van filter II geldt: $(2d - 2c) / 2d << 1$.

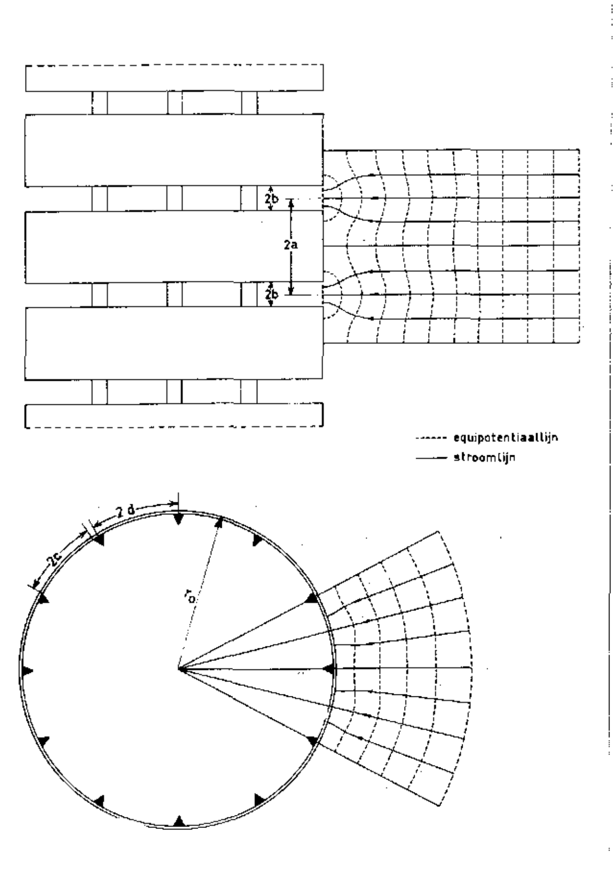


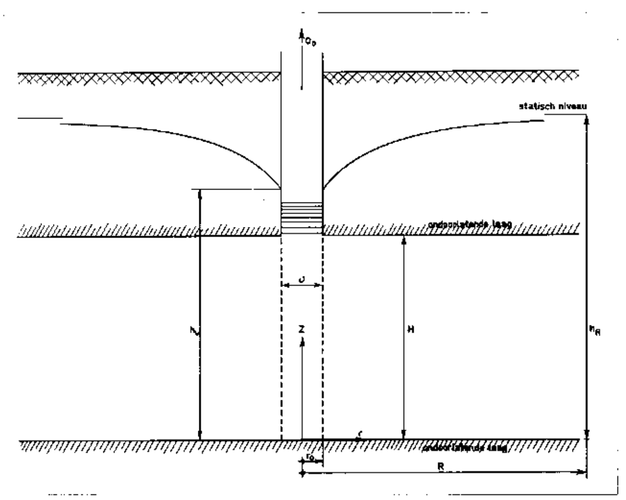
Afb. 2

Afb. 3a - Filter I.



Afb. 3b - Filter II.





Afb. 4 - Spanningswater.

In de omtrekrichting van putfilter I is de breedte van de sleuven 2c, en de onderlinge h.o.h. afstand 2d. Bij putfilter II is de breedte van de sleuven 2b en de h.o.h. afstand in de asrichting van het filter gelijk 2a. Als gevolg van de gemaakte veronderstellingen met betrekking tot de lengte afmetingen van de sleuven, zal blijken dat alleen de breedte en de onderlinge afstand van de sleuven in breedterichting van invloed zijn op het formatieverlies.

Als voorbeeld voor de bepaling van het formatieverlies wordt afb. 4 beschouwd. Het betreft hier de onttrekking van grondwater uit een horizontale watervoerende laag begrensd door twee ondoorlatende lagen. Het putfilter is over de volle hoogte van de watervoerende laag aangebracht en het water in de put staat boven het filtrerende deel van het putfilter. Het putfilter heeft een constante partiële perforatie (I of II). De stijghoogte van het statisch niveau van het grondwater is gelijk h_R, en is constant over de hoogte van de laag. De stijghoogte h_u van het grondwater aan de buitenwand van het filter is over de hoogte van de laag niet constant. Echter de invloed van het niet constant zijn van h_u is op het stijghoogteverschil $h_R - h_u$ van weinig invloed zodat $h_R - h_u$ over de hoogte van de laag nagenoeg constant is.

In appendix II worden de formules voor het stijghoogteverlies ($h_R - h_u$) in het grondmassief bij het gebruik van putfilter I of II afgeleid. De resultaten hiervan zijn:

Voor filter I, resp. II:

$$h_R - h_u = \frac{Q_o}{2\pi kH}\left[\ln\frac{R}{r_o} - \frac{2d}{\pi r_o}\ln\sin\left(\frac{\pi c}{2d}\right)\right] \qquad (3.1)$$

$$h_R - h_u = \frac{Q_o}{2\pi kH}\left[\ln\frac{R}{r_o} - \frac{2a}{\pi r_o}\ln\sin\left(\frac{\pi b}{2a}\right)\right] \qquad (3.2)$$

waarbij

- Q_o het totale debiet aan de watervoerende laag onttrokken (m^3/sec.);
- k de doorlatendheidscoëfficiënt van de watervoerende laag (m/sec.);
- H de hoogte van de watervoerende laag, tevens de lengte van het putfilter (m);
- r_o de uitwendige straal van het putfilter (m);
- R een constante, bepaald door de geo-hydrologische en topografische omstandigheden van het grondmassief (m). In de formules (3.1) en (3.2) is R de afstand, waar de stijghoogte van het grondwater gelijk h_R is.

De formules (3.1 en 3.2) zijn afgeleid onder de veronderstellingen t.a.v. de grondwaterstroming zoals in par. 2, gegeven en onder de in deze par. genoemde veronderstellingen t.a.v. de perforatie en het stijghoogteverschil $h_R - h_u$.

Met de definities voor S_o en $\triangle_1$, zoals in par. 2 gegeven, volgt uit de formules (3.1 en 3.2):

$$S_o = \frac{Q_o}{2\pi kH}\ln\frac{R}{r_o} \qquad (3.3)$$

en voor putfilter I:

$$\Delta_1 = -\frac{Q_o}{2\pi kH}\frac{2d}{\pi r_o}\ln\sin\left(\frac{\pi c}{2d}\right) \qquad (3.4)$$

en putfilter II:

$$\Delta_1 = -\frac{Q_o}{2\pi kH}\frac{2a}{\pi r_o}\ln\sin\left(\frac{\pi b}{2a}\right) \qquad (3.5)$$

De formule (3.3) is de bekende formule voor het formatieverlies waarbij de invloed van de partiële perforatie buiten beschouwing is gelaten. De formules (3.4) en (3.5) geven het extra stijghoogteverlies als gevolg van de constant partiële perforatie. De formule (3.4) is reeds door P. Widmoser opgesteld.

In vrijwel alle voorkomende gevallen is de verhouding tussen de breedte van de sleuven en de onderling h.o.h.-afstand van de sleuven in breedte-richting kleiner dan 0,5. De formules voor $\triangle_1$ kunnen hierdoor aanzienlijk vereenvoudigd worden. Deze vereenvoudigde formules zijn:

voor filter I

$$\Delta_1 = \frac{Q_o}{2\pi kH}\frac{2d}{\pi r_o}\ln\frac{2d}{\pi c} \qquad (3.4')$$

en voor filter II

$$\Delta_1 = \frac{Q_o}{2\pi kH}\frac{2a}{\pi r_o}\ln\frac{2a}{\pi b} \qquad (3.5')$$

In de formules (3.4′) en (3.5′) zijn de verhoudingen c/d en b/a bij benadering de verhouding tussen open en totaal oppervlak van de wand van het filter. Deze verhouding wordt p_o genoemd. De verhouding ($d/\pi r_o$) van filter I is te interpreteren als (2/n) waarbij n het aantal sleuven in de omtrekrichting van het putfilter is. Wordt de verhouding ($2a/\pi r_o$) van filter II eveneens gelijk (2/n) gesteld, dan is n het aantal sleuven in de lengterichting van de filterwand per lengte-eenheid gelijk aan de buiten omtrek van het putfilter. De formules (3.4′) en (3.5′) zijn nu door één formule te vervangen, nl.

$$\Delta_1 = \frac{Q_o}{2\pi KH}\frac{2}{n}\ln\frac{2}{\pi p_o} \qquad (3.6)$$

Hierbij is n het aantal sleuven per lengte-eenheid gelijk aan de buitenomtrek van het filter.

De verhoudingen (c/d) van filter I en (b/a) van filter II zijn slechts bij benadering de verhouding tussen open en totaal oppervlak van de filterwand. Een juiste uitdrukking voor de p_o wordt in [6] gegeven. Door het stellen van de voorwaarden: (2a — 2b)/(2a) << 1 voor filter I en 2d — 2c)/(2d) << 1 voor filter II is de gegeven benadering van p_o voldoende nauwkeurig. De openingen in het filter worden in de loop van de tijd als gevolg van bv. kalkafzettingen aan de randen van de openingen kleiner. De p_o wordt hierdoor kleiner en bij gevolg wordt de invloed van de partiële perforatie op het formatieverlies groter (zie 3.4′ en 3.5′).

Bij de berekening dient dus de werkelijke p_o te worden ingevoerd. Opgemerkt moet worden, dat de formule 3.6 is afgeleid voor het geval dat het grondwater vrij in de opening kan stromen. Verondersteld is namelijk dat in de openingen van de wand geen grondmateriaal aanwezig is en dat de doorlatendheid van de grond in de omgeving van de opening gelijk is aan de doorlatendheid van het grondmassief. In werkelijkheid zal de doorlatendheid van het materiaal vlak voor de openingen (en of in de omgeving van de openingen) veelal kleiner zijn dan de doorlatendheid van het grondmassief.
Het kan zelfs voorkomen dat de openingen geheel verstopt zijn (k = o), zodat de stroming van het water hierdoor niet mogelijk is. Soms bevindt zich bovendien grondmateriaal in de openingen. Het is mogelijk voor al deze gevallen een berekening van het stijghoogteverlies Δ_1 te geven. De moeilijkheid hierbij is echter dat de vereiste gegevens ontbreken.
De verhoudingen in de doorlatendheden, de verdeling hiervan over de hoogte van de opening en de watervoerende laag zijn veelal niet bekend. Om toch tot een eenvoudig bruikbare formule te komen, welke de invloed van de genoemde factoren op het stijghoogteverlies tot uitdrukking brengt, wordt verstoppingsfactor $(1 - p_c)$ geïntroduceerd.

In de formule (3.6) voor Δ_1 wordt p_o door $p_o p_c$ vervangen zodat de formule overgaat in:

$$\Delta_1 = \frac{Q_o}{2\pi kH} \frac{2}{n} \ln \frac{2}{\pi p_o p_c} \qquad (3.7)$$

Het getal p_c wordt nu als volgt gedefinieerd:
Indien de doorlatendheid van het materiaal vlak voor of in de omgeving van het filter gelijk is aan die van het grondmassief is p_c gelijk 1. Indien voor de opening wat grondmateriaal is weggespoeld, is $p_c > 1$. Echter voor het geval dat $p_o \leq 0{,}1$, is de invloed van het wegspoelen van het materiaal op Δ_1 gering [9], zodat ook in dit geval p_c gelijk 1 gekozen mag worden. Men berekent dan met formule (3.7), met $p_c = 1$, een stijghoogteverlies dat slechts een weinig verschild van het werkelijk optredende verlies. Indien de doorlatendheid van het materiaal vlak voor of in de omgeving van het filter kleiner is dan die van het grondmassief is $p_c < 1$. In dit geval wordt de p_c gelijkgesteld aan de verhouding tussen open en totaal oppervlak van de opening. In werkelijkheid zal p_c groter zijn dan die verhouding, doch < 1, zodat het berekende stijghoogte verlies groter zal zijn dan dat in werkelijkheid. De orde van grootte, echter, zal dezelfde zijn voor het berekende als voor het werkelijk optredende verlies.

In par. 5 zullen enige numerieke resultaten van (3.7) worden gegeven.

3.2 *Het gedeeltelijk filter*

Het gedeeltelijk filter is in afb. 2a weergegeven. In afb. 2c is het filtrerende deel van het putfilter nader gedetailleerd. Het formatieverlies $h_R - h_u$, in het geval van afb. 4, wordt goed benaderd door

$$h_R - h_u = \frac{Q_o}{2\pi kH}\left[\ln\frac{R}{r_o} - \frac{2l}{\pi r_o}\ln\sin\left(\frac{\pi m}{2l}\right) - \frac{l}{m}\frac{2a}{\pi r_o}\ln\sin\left(\frac{\pi b}{2a}\right)\right] \qquad (3.8)$$

Voor de betekenis van l, m, a en b zie afb. 2c. De verhouding b/a is wederom bij benadering de verhouding tussen het open en het totale oppervlak $\pi D_o m$ en deze verhouding wordt nu p'_o genoemd. Bij de afleiding van (3.8) is verondersteld dat het water vrij in het putfilter kan stromen, d.w.z. de doorlatendheid in de omgeving van de opening is die van het grondmassief en in de openingen is geen grondmateriaal aanwezig. Evenals bij de constante partiële perforatie wordt de verstoppingsfactor $(1 - p_c)$ ingevoerd terwijl het aantal openingen per eenheid van lengte gelijk aan de buitenomtrek $2\pi r_o$ van het filter n' wordt genoemd. Uit de formule (3.8) is af te leiden dat het stijghoogteverlies S_o en het extra stijghoogteverlies Δ_o t.g.v. het gedeeltelijk filter worden bepaald volgens resp.

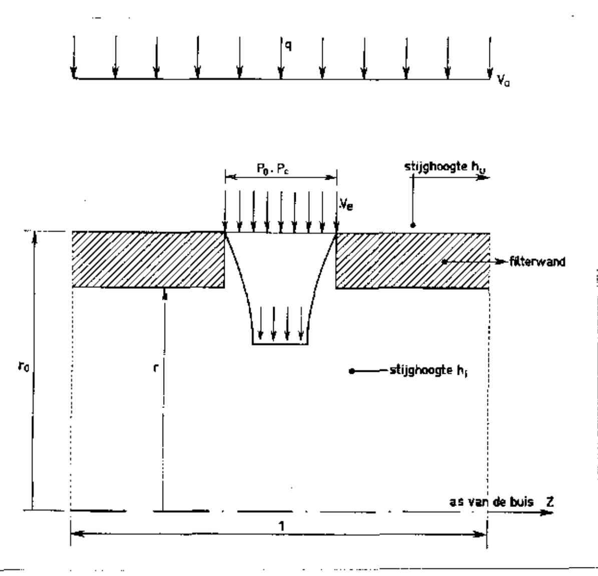
$$S_o = \frac{Q_o}{2\pi kH}\ln\frac{R}{r_o} \qquad (3.9)$$

$$\Delta_o = \frac{Q_o}{2\pi kH}\left[-\frac{2l}{\pi r_o}\ln\sin\left(\frac{\pi m}{2l}\right) - \frac{2}{n'}\frac{l}{m}\ln\sin\left(\frac{\pi p'_o p_c}{2}\right)\right] \qquad (3.10')$$

In vele gevallen geldt $\sin(\pi p'_o p_c/2) < 0{,}5$ zodat voor (3.10′) bij benadering te schrijven is

$$\Delta_o = \frac{Q_o}{2\pi kH}\left[-\frac{2l}{\pi r_o}\ln\sin\left(\frac{\pi m}{2l}\right) + \frac{2}{n'}\frac{l}{m}\ln\frac{2}{\pi p'_o p'_c}\right] \qquad (3.10)$$

Hiermede is de invloed van het gedeeltelijk filter, waarbij de openingen zoals bij filter II zijn geconfigureerd, bepaald als een formatieverlies.



Afb. 5

4. **Het stijghoogteverlies in het putfilter**

Bij de stationaire stroming van een vloeistof in een buis met constante doorsnede en gesloten buiswand is de snelheid van de vloeistof in de asrichting van de buis constant. Indien de stationaire stroming van de vloeistof een gevolg is van een radiale stationaire instroming door de buiswand, is de snelheid van de vloeistof in de richting van de buisas niet constant. De richting van de buisas wordt de z-richting genoemd. Zij q het radiale instroomdebiet per eenheid van lengte van de buis en V_z de over de doorsnede van de buis gemiddelde axiale snelheid van het water in de buis, dan geldt volgens de continuïteitswet (afb. 5).

$$\frac{d\bar{V}_z}{dz} = \frac{q}{A} \qquad (4.1)$$

waarbij A de inwendige doorsnede van de buis is. Bij radiale instroming in putfilters is het instroomdebiet over de hoogte van het putfilter nagenoeg constant [4]. Aan de onderzijde van het putfilter is $\bar{V}_z = o$. Zij Q_o het totale debiet aan het putfilter onttrokken en H de lengte van het putfilter dan volgt uit integratie van (4.1) naar z en de substitutie $q = (Q_o/H)$

$$\bar{V}_z = \frac{Q_o z}{AH} \qquad (4.2)$$

Voor de bepaling van het stijghoogteverlies van de vloeistof in een buis met gesloten buiswand (zonder radiale instroming) wordt onderscheid gemaakt tussen laminaire en turbulente stroming. De overgang van laminaire in turbulente stroming wordt bepaald door het getal van Reynolds

$$R_e = \frac{\bar{V}_z D}{\nu}$$

Hierin betekenen:

V_z de over de doorsnede van de buis gemiddelde snelheid (m/sec.);
D de inwendige diameter van de buis (m);
ν de *coëfficiënt* van kinematische viscositeit (m^2/sec.).

Voor $R_e < 2000$ à 2400 is de stroming laminair. Zoals zal blijken, is de stroming in filterbuizen over bijna de gehele lengte van de filterbuis turbulent.

Het stijghoogteverlies $\triangle_4$ van de vloeistof in een buis met constante doorsnede en gesloten wand en lengte H wordt uitsluitend door wrijving veroorzaakt en kan worden bepaald met de bekende formule [11]

$$\Delta_4 = \lambda \frac{H}{D} \cdot \frac{\bar{V}_z^2}{2g} \qquad (4.3)$$

waarbij λ de wrijvingscoëfficiënt is. Indien de stroming in de buis turbulent is en de eigenschappen van de wand t.a.v. de stroming in het overgangsgebied tussen hydraulisch ruw en glad liggen, wordt λ bepaald door de formule van Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\frac{1}{0{,}4 R_e \sqrt{\lambda}} + \frac{1}{3{,}7} \frac{K}{D} \right] \qquad (4.4)$$

waarbij k een maat voor de oneffenheden aan de wand van de buis is. Het stijghoogteverlies van de vloeistof in een buis met radiale instroming is niet door (4.3) en (4.4) te bepalen, omdat ten eerste V_z niet constant is en ten tweede de buiswand geperforeerd is.

4.1 *Het stijghoogteverlies van water in een putfilter in het geval van laminaire stroming*

De stijghoogte van het water in het putfilter wordt h_i genoemd. In Appendix III wordt aangetoond, dat — zij het onder een bepaalde voorwaarde — het stijghoogteverschil over een afstand dz in de asrichting van de buis bepaald wordt volgens

$$\frac{dh_i}{dz} = -\frac{1}{g} \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{q}{A}\right)^2 z \qquad (4.5)$$

(voor de betekenis van de symbolen zie 4.1). De verdeling van de axiale snelheid V_z over de dwarsdoorsnede van het filter wordt gegeven door

$$V_z = \frac{qz}{\pi D} \cos 2\pi (r/D)^2 \qquad (4.6)$$

De voorwaarde bij de afleiding van (4.5) en 4.6) is, dat in de bewegingsvergelijkingen de visceuze termen t.o.v. de versnellingstermen kunnen worden verwaarloosd of anders uitgedrukt

$$\frac{q}{2\pi\nu} > 1$$

Met $q = \pi D_o p_o p_c V_e$ (afb. 5) is voor deze voorwaarde te schrijven

$$\frac{D_o p_o p_c V_e}{2\nu} > 1 \qquad (4.7)$$

Aan de voorwaarde (4.7) wordt bij de radiale instroming in putfilters veelal voldaan. Het verwaarlozen van de visceuze termen betekent intussen, dat de wrijvingsweerstand buiten beschouwing blijft en het stijghoogteverlies uitsluitend door de radiale instroming wordt veroorzaakt. Opgemerkt wordt nog dat de stijghoogte h_i over de dwarsdoorsnede van het putfilter niet constant is, hetgeen voor de bepaling van stijghoogteverschil niet in beschouwing genomen behoeft te worden. Volgens (4.6) is de snelheid van de vloeistof over een groot gedeelte van de dwarsdoorsnede van de buis nagenoeg constant. Een goede benadering van (4.5) kan daarom met een impulsbeschouwing worden verkregen, waarbij de snelheid V_z over de doorsnede van het filter constant verondersteld wordt. Deze impulsbeschouwing is in appendix III uitgevoerd met als resultaat:

$$\frac{dh_i}{dz} = -\frac{1}{g} \cdot 2 \cdot \left(\frac{q}{A}\right)^2 z \qquad (4.8)$$

Ook bij de impulsbeschouwing worden de visceuze eigenschappen van de vloeistof niet in rekening gebracht. Een vergelijk tussen (4.5) en (4.8) toont aan dat deze resultaten niet veel verschillen.

Zoals reeds vermeld kan q over de hoogte van het filter nagenoeg constant verondersteld worden. Zij nu $\triangle_4$ het verschil tussen de stijghoogte voor z = O en de stijghoogte voor z = H, dan volgt uit integratie van resp. (4.5) en (4.8) naar z:

$$\Delta_4 = \frac{1}{2g} \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{Q_o}{A}\right)^2 \qquad (4.9)$$

en

$$\Delta_4 = \frac{1}{2g} \cdot 2 \cdot \left(\frac{Q_o}{A}\right)^2 \qquad (4.9')$$

waarbij $Q_o = q\,H$

Opgemerkt wordt dat (4.9) een stijghoogteverschil $\triangle_4$ geeft, waarvan de waarde 2 maal groter is dan de waarde die in de literatuur veelal wordt gegeven. Een energiebeschouwing i.p.v. impulsbeschouwing geeft voor $\triangle_4$ een waarde die 0,75 maal de waarde van (4.9′) is. De formule voor het stijghoogteverlies van water in drainageleidingen, die in [8] is opgesteld, behoeft bovengenoemde correctie.

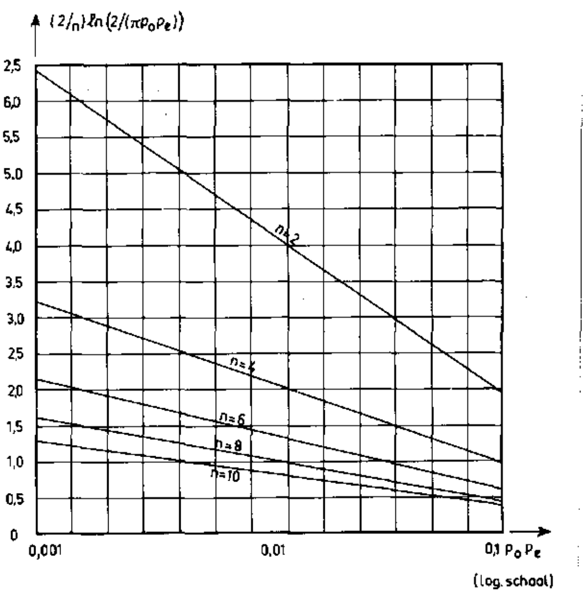
Met de formule (4.9) of (4.9′) is het stijghoogteverlies $\triangle_4$ van het water in het putfilter bepaald, waarbij de stroming in het putfilter laminair is en de invloed van de visceuze eigenschappen op dit verlies verwaarloosd zijn.

4.2 *Het stijghoogteverlies van het water in een putfilter in het geval van turbulentie*

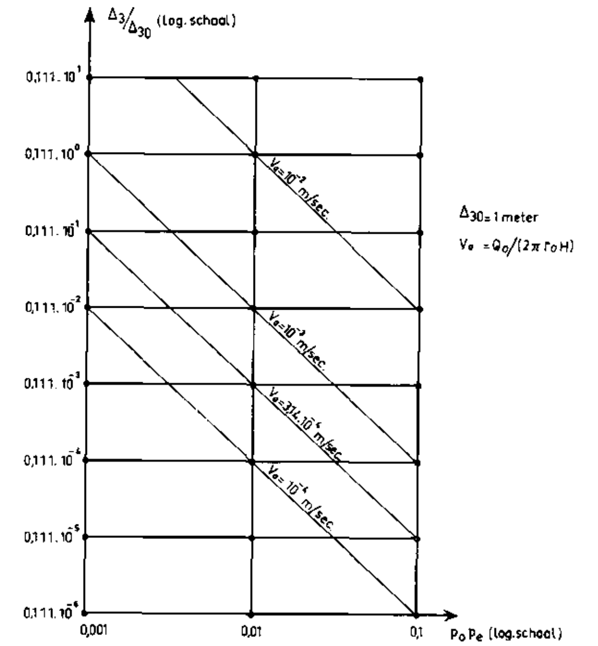
Voorgesteld wordt om bij turbulentie het stijghoogteverlies in het putfilter over een afstand dz te bepalen volgens

$$\frac{dh_i}{dz} = -\frac{\lambda}{D} \frac{\bar{V}_z^2}{2g} - \frac{1}{g} \cdot 2 \cdot \left(\frac{q}{A}\right)^2 z \qquad (4.10)$$

waarbij V_z de over de doorsnede van het filter gemiddelde axiale snelheid is.



Grafiek I - Het verband tussen $(^2/_n)$ ln $(2/\pi\ p_o p_e$ en $p_o p_e$ voor $n = 2, 4, 6, 8, 10$.



Grafiek II - Het verband tussen $\triangle_3$ en $p_o p_e$ voor verschillende V_a.

De tweede term van het rechterlid van (4.10) is gelijk aan (4.8) en geeft het verlies aan stijghoogte t.g.v. de radiale instroming. Bij turbulente stroming is de snelheid V_z over de dwarsdoorsnede van de buis nagenoeg constant. Daarom verdient (4.8) de voorkeur boven (4.5) om als uitgangspunt te dienen voor de opstelling van (4.10). De eerste term van het rechterlid van (4.10) komt overeen met (4.3) en geeft het verlies aan stijghoogte weer als gevolg van de turbulentie van het water. De wrijvingscoëfficiënt λ is echter niet die, volgens (4.6) bepaald. Voor λ in (4.10) zijn geen formules bekend. Daar V_z met z varieert zal ook λ met z variëren. De onbekendheid van een uitdrukking voor λ en de z-afhankelijkheid bemoeilijkt de integratie van (4.10) naar z. In de literatuur en dit artikel wordt de waarde van λ volgens (4.6) bepaald voor $z = H$ en in (4.10) gesubsidieerd. Bij integratie van (4.10) naar z is λ dan verder constant.

Uit integratie van (4.10) naar z volgt na enig omrekenen dat het stijghoogteverlies $\triangle_4$ van het water in het putfilter bepaald wordt volgens

$$\Delta_4 = \left(\frac{Q_o}{A}\right)^2 \frac{1}{2g} \left(\frac{\lambda H}{3D} + 2\right) \qquad (4.11)$$

Deze formule bepaalt dus het stijghoogteverlies over de lengte van het filtrerende deel van het putfilter. Indien $h = H$ de lengte van het filtrerende deel van het putfilter is en l de lengte van het niet-filtrerende deel van het putfilter (zie afb. 2b) dan wordt het totale stijghoogteverlies in het putfilter bepaald volgens

$$\Delta_4 = \left(\frac{Q_o}{A}\right)^2 \cdot \frac{1}{2g} \left[\frac{\lambda H}{3D} + \frac{\lambda_c l}{D} + 2\right] \qquad (4.12)$$

waarbij λ_c de wrijvingscoëfficiënt is behorend bij de stroming over de lengte l van het putfilter. Daar over deze lengte het debiet constant is, is ook λ_c in dit gebied constant. De eigenschappen van de wand van het putfilter over de lengte l liggen veelal in het overgangsgebied ruw-glad en de waarde van (k/D) is ongeveer (1/200). In par. 5 zal een voorbeeld worden gegeven.

5. Overzicht van de stijghoogteverliezen en enige berekeningen

Bij de probleemstelling in par. 2 is een overzicht van de stijghoogteverliezen gegeven. Aan de hand van enige voorbeelden zal de orde van grootte van deze stijghoogteverliezen worden bepaald. Bovendien zal worden nagegaan wat de invloed is van een grindomstorting rond het filter op het formatieverlies.

5.1 *Constante partiële perforatie, geen grindstorting, geen partiële penetratie*

Beschouwd wordt wederom het geval van spanningswater (afb. 4). Het stijghoogteverlies S_o, dit is het formatieverlies waarbij de invloed van de partiële perforatie gelijk nul gesteld is, wordt bepaald volgens (3.3):

$$S_o = \frac{Q_o}{2\pi k H} \ln \frac{R}{r_o} \qquad (5.1)\,(bis)$$

Bij de toepassingen varieert (R/r_o) van 1000 tot 100000. dus ln (R/r_o) varieert van 6,9 — 11,5.

Het extrastijghoogteverlies $\triangle_1$ in het grondmassief t.g.v. de constante partiële perforatie van de filterwand wordt bepaald volgens (3.7):

$$\Delta_1 = \frac{Q_o}{2\pi k H} \frac{2}{n} \ln \frac{2}{\pi p_o p_c} \qquad (5.2)\,(bis)$$

waarbij n het aantal openingen is per lengte eenheid gelijk de buitenomtrek van het filter, p_o de verhouding tussen open en totaal wand oppervlak en $(1 - p_c)$ de verstoppingsfactor (filter I of II). In de grafiek I is $(2/n)$ ln $(2/\pi\ p_o p_c))$ tegen $p_o p_c$ uitgezet. De waarde van $p_o p_c$ varieert hierbij van 0,001 tot 0,1 en n van 2 tot 10. Uit de grafiek is duidelijk te zien dat bij een gering werkzaam open oppervlak van bv. 1 %, het stijghoogteverschil $\triangle_1$ kleingehouden kan worden, als het open oppervlak gelijkmatig over de filterwand verdeeld is, d.w.z. n groot.

Voorbeeld: Gegeven is: $Q_o = 0{,}015$ m³/sec., $D = 0{,}14$ m, $H = 20$ m, $k = 0{,}3 10^{-3}$ m/sec. Hieruit volgt $V_o = Q_o/A \approx 1$ m/sec., $Q_o/\pi\ k\ H = 0{,}4$ m en $\pi\ D = 0{,}47$ m. Stel $p_o = 0{,}1$, $p_c = 0{,}1$, d.w.z. de openingen zijn voor 90 % verstopt, en $n = 10$, dan is de h.o.h.-afstand van de sleuven $(\pi\ D/n) = 0{,}044$ m en $(^2/n)\ \ln\ (2/\pi\ p_o p_c) \approx 0{,}8$. Hieruit volgt $\triangle_1 = 0{,}4 \times 0{,}8 = 0{,}32$ m.

In het geval $n = 40$ en de overige gegevens gelijk blijven, geldt $\triangle_1 = 0{,}08$ m.

Opgemerkt wordt dat de formule (5.2) een stijghoogteverlies geeft, dat veelal groter is dan het werkelijke verlies. De orde van grootte van $\triangle_1$ volgens (5.2) is echter juist. Indien de doorlatendheid van de grond vlak voor en in de omgeving van het filter gelijk is aan de doorlatendheid van het grondmassief, dan is de p_c gelijk 1 en formule (5.2) juist. Indien de doorlatendheid van de grond voor de opening kleiner is dan die van het grondmassief is $p_c < 1$ en wordt voor de eenvoud de waarde van p_c gelijk gesteld aan de verhouding tussen het open en het totaal oppervlak van de opening. Tussen deze verhouding en 1 zal de werkelijke grootte van p_c liggen.

Het intredeverlies $\triangle_3$ is het vertragingsverlies dat de radiale instroming vergezeld. Een „gebruikelijke" formule voor het intredeverlies is:

$$\Delta_3 = \frac{V_e^2}{2g\,\mu^2}$$

waarbij V_e de over het oppervlak van de opening gemiddelde radiale snelheid van het water aan de buitenwand van het filter is (afb. 5) en μ de contractie coëff. van de radiale instroming. De waarde μ is gelijk 0,67 te stellen. De snelheid V_e ter plaatse van de openingen wordt over de hoogte van het filtrerende deel van het putfilter constant verondersteld. Geïntroduceerd wordt wederom een verstoppingsfactor $(1 - p_c')$. Het getal p_c' is hierbij de verhouding tussen open en totaaloppervlak van de opening $(p_c' \leq 1)$. Deze definitie van p_c' verschilt van die voor p_c in par. 3 omdat zowel voor het geval dat voor de opening grond is weggespoeld als voor het geval dat de doorlatendheid van de grond vlak voor de opening gelijk is aan die van het grondmassief (vrije uitstroming) p_c' juist gelijk 1 is. Echter voor de praktische toepassing stemt p_c overeen met p_c'.

Uit het bovenstaande volgt

$$V_e = \frac{Q_o}{2\pi r_o\, H\, p_o p_c}$$

Geïntroduceerd wordt de filtersnelheid van het grondwater $V_a = Q_o/2\pi\ r_o\ H)$, dus $V_a = P_o p_c$. Met $1/(2\,g\,.\,\mu^2) \approx 1/9$, volgt dat voor $\triangle_3$ te schrijven is:

$$\Delta_3 = \frac{1}{9}\,\frac{V_a^2}{(p_o\, p_c)^2} \qquad (5.3)$$

In de grafiek II is $\triangle_3$ tegen het getal $p_o p_c$ uitgezet. De waarde van V_a varieert doorgaans tussen 0,0001 (extreem laag) en 0,01 m/sec. (extreem hoog).

Voorbeeld: Gegeven is: $Q_o = 0{,}025$ m³/sec., $r_o = 0{,}10$ m en $H = 20$ m. Hieruit volgt $V_a = Q_o/(2\pi\ r_o\ H) = 2{,}0\ 10^{-3}$ m/sec. Bij $p_o p_c = 0{,}01$ volgt dan $\triangle_3 = 0{,}0044$ m en bij $p_o p_c = 0{,}001$: $\triangle_3 = 0{,}44$ m.

Opgemerkt moet worden dat de formule (5.3) voor het stijghoogteverlies $\triangle_3$, het stijghoogteverlies $\triangle_3$ mijns inziens niet goed beschrijft. Een onderzoek naar deze formule zal nog moeten plaatsvinden.

Het stijghoogteverlies $\triangle_4$ van het water in het putfilter wordt bepaald volgens (4.12)

$$\Delta_4 = \left(\frac{Q_o}{A}\right)^2 \frac{1}{2g}\left[\frac{\lambda H}{3D} + \frac{\lambda_c l}{D} + 2\right] \qquad (5.4)\ (\text{bis})$$

waarbij $h = H$ de lengte van het filtrerende deel van het putfilter is en l de lengte van het niet filtrerende deel, dat boven het filtrerende deel gelegen is. De wrijvingscoëfficiënt wordt met de formule van Colebrook bepaald. Het getal van Reynolds in deze formule wordt bepaald bij snelheid van het water van $(Q_o/A) = V_o$.

Voorbeeld: Gegeven is: $(Q_o/A) = 1$ m/sec.; $\lambda = 0{,}04$, $\lambda_c = 0{,}02$, $H = 20$ m, $l = 40$ m en $D = 0{,}4$ m. De waarde van het stijghoogteverlies $\triangle_4$ is dan volgens (5.4):

$$\Delta_4 = \left\{\frac{1}{3}(0{,}04)\frac{20}{0{,}4} + (0{,}02)\frac{40}{0{,}4} + 2\right\}\frac{(1{,}0)^2}{2(9{,}81)} = 0{,}24\ \text{m.}$$

Hierbij dient te worden opgemerkt, dat de gegeven waarden van (Q_o/A), λ en λ_c extreem hoog zijn.

5.2 *Constante partiële perforatie, grindomstorting, geen partiële penetratie*

Beschouwd wordt wederom het geval van spanningswater. Indien rond het putfilter een grindomstorting wordt aangebracht, blijven de formules voor de stijghoogteverliezen $\triangle_3$ en $\triangle_4$ ongewijzigd. De waarde van het stijghoogteverlies $\triangle_3$ kan echter door de grindomstorting belangrijk beïnvloed worden. Immers bij toepassing van de grindstorting zal verstoppingsfactor $(1 - p_c)$ nagenoeg gelijk nul zijn, zodat $p_c \approx 1$.

Het stijghoogteverlies t.g.v. de formatieweerstand wordt S_{ow} genoemd en dat t.g.v. de weerstand van de grindstorting $\triangle_2$. Eenvoudig is af te leiden dat de stijghoogteverliezen S_{ow} en $\triangle_2$ bepaald worden door

$$S_{ow} = \frac{Q_o}{2\pi k H}\ \ln\frac{R}{r_w} \qquad (5.5)$$

$$\Delta_2 = \frac{Q_o}{2\pi k H}\ \frac{k}{k_w}\ \ln\frac{r_w}{r_o} \qquad (5.6)$$

Hierbij is k_w de doorlatendheid van het grindpakket en $2\pi\ r_w$ de buitenomtrek van het pakket. Het extra stijghoogteverlies $\triangle_{1w}$ t.g.v. de constante partiële perforatie, wordt, zij het onder een voorwaarde, bepaald door

$$\Delta_{1w} = \frac{Q_o}{2\pi k H}\ \frac{k}{k_w}\ \frac{2}{n}\ \ln\frac{2}{\pi p_o\, p_c} \qquad (5.7)$$

De voorwaarde is, dat de invloed van de partiële perforatie buiten de grindstorting niet meer merkbaar is, d.w.z. dat t.p.v. de overgang van de grindstorting en het grondmassief de stroomlijnen recht zijn.

Bij $(k/k_w) = 1/20$, $\ln(R/r_o) = 6{,}9$ à 11,5 en $(r_w/r_o) = 2$ is de waarde van $S_{ow} + \triangle_2$ ongeveer 90 á 93 % van S_o. Indien $(r_w/r_o) = 3$, zal bij dezelfde gegevens voor (k/k_w) en $\ln(R/r_o)$, het stijghoogteverlies $S_{ow} + \triangle_2$ ongeveer 84 à 90 % van S_o zijn. Een grindomstorting vermindert de formatie weerstand dus aanzienlijk. Bovendien is in dit geval de invloed van de partiële perforatie op het formatieverlies zeer gering. Immers de verstoppingsfactor $(1 - p_c)$ zal nagenoeg gelijk nul zijn, zodat $p_o p_c \approx \approx p_o$. Bovendien bevat (5.7) een factor (k/k_w), b.v. (1/20), zodat het stijghoogteverlies $\triangle_{1w}$ verwaarloosbaar klein zal zijn.

Indien de invloed van de partiële perforatie in het gebied buiten de grindstorting merkbaar is, kan geen eenvoudige formule voor de verliezen S_{ow}, Δ_2 en Δ_{1w} gegeven worden.

De waarde van het formatieverlies zal in dit geval gelegen zijn tussen de waarde van ($S_o + \Delta_1$) (volgens 5.1 en 5.2) en de waarde van ($S_{ow} + \Delta_2 + \Delta_{1w}$) (volgens 5.5, 5.6, 5.7).

5.3 *Gedeeltelijk filter, geen partiële penetratie*

Indien i.p.v. de constante partiële perforatie, het gedeeltelijk filter wordt toegepast, is dit niet van invloed op de formule voor de stijghoogteverliezen S_o, S_{ow}, Δ_3 en Δ_4 (volgens resp. 5.1, 5.5, 5.3, 5.4).

5.3.1 Geen-grindstorting

Het stijghoogteverlies Δ_o t.g.v. het gedeeltelijk filter (afb. 2), wordt volgens par. 3 bepaald door:

$$\Delta_o = \frac{Q_o}{2\pi kH}\left[-\frac{2l}{\pi r_o}\ln\sin\left(\frac{\pi m}{2l}\right) + \frac{l}{m}\,\frac{2}{n'}\ln\frac{2}{\pi p_o' p_c}\right] \quad (5.8)(bis)$$

Hierbij is p_o de verhouding tussen open en totaal oppervlak $\pi D_o m$ en n' het aantal openingen per lengte πD_o (buitenomtrek van het filter).

Voorbeeld

Gegeven: de hoogte van de watervoerende laag (zie afb. 2) is gelijk 40 meter; de lengte m is gelijk 0,50 meter; $l/m = 2$ en de diameter van het putfilter is 0,3 meter; de verhouding tussen het open oppervlak en het oppervlak $\pi D_o m$ is 0,01. Het aantal (n') openingen over de lengte πD_o is gelijk 8, en de factor ($Q_o/2\pi kH$) = 0,3. Het stijghoogteverlies wordt dan

$$\Delta_4 = 0{,}3\left[-\frac{2}{0{,}15\pi}\ln\left(\sin\left(\frac{0{,}5\pi}{2}\right)\right) + \frac{4}{8}\ln\left(\frac{2}{0{,}01\pi}\right)\right] \approx 1 \text{ meter}$$

Het stijghoogteverschil Δ_o kan dus vrij groot worden.

5.3.2 Grindomstorting

Indien rond het putfilter een grindomstorting is aangebracht is het stijghoogteverlies Δ_{ow}, zij het onder een bepaalde voorwaarde, gelijk aan $(k/k_w)\,\Delta_o$, dus

$$\Delta_{ow} = \frac{Q_o}{2\pi kH}\,\frac{k}{k_w}\left[-\frac{2l}{\pi r_o}\ln\sin\left(\frac{\pi m}{2l}\right) + \frac{l}{m}\,\frac{2}{n'}\ln\frac{2}{\pi p_o' p_c}\right] \quad (5.9)$$

De voorwaarde is, dat de invloed van het gedeeltelijk filter op het stroomlijnen patroon buiten het grindpakket niet meer merkbaar is. Dit wordt o.a. bepaald door de verhouding ($2l/r_w$) waarbij r_w de straal van de buitenomtrek van de grindomstorting is. In vele gevallen zal aan de voorwaarde niet zijn voldaan. In deze gevallen is de waarde van Δ_{ow} gelegen tussen die welke het resultaat van (5.8) is en die waarde welke het resultaat van (5.9) is. Bij verhoudingen van $(k/k_w) = {}^1/_{20}$, $(r_w/r_o) = 5$ en $l/2m = 2$, zal de waarde van Δ_o de 0,25 meter veelal niet overschrijden.

5.4 *Partiële penetratie*

Beschouwd wordt het geval van spanningswater zoals in afb. 2b is aangegeven. Het formatieverlies is samengesteld uit het stijghoogteverlies S_o, waarbij de invloed van de partiële penetratie en partiële perforatie buiten beschouwing wordt gelaten, het stijghoogteverlies ΔS_o t.g.v. de partiële penetratie, en het extra stijghoogteverlies Δ_1 t.g.v. de partiële perforatie. Het verlies S_o wordt bepaald volgens

$$S_o = \frac{Q_o}{2\pi kH}\cdot\ln\frac{R}{r_o}$$

waarbij H de hoogte van de watervoerende laag is. Het stijghoogteverlies ΔS_o wordt bepaald door [10]

$$\Delta S_o = \frac{Q_o}{2\pi kH}\cdot\frac{1-p}{p}\ln\frac{\alpha h}{r_o} \quad (5.10)$$

waarbij h de hoogte van het filtrerende deel van het filter en p de verhouding tussen de filterlengte h en de hoogte H van de watervoerende laag is. De factor α hangt af van de verhouding p en de eccentriciteit van de penetratie. In [10] wordt in grafiekvorm als functie van p en de excentriciteit gegeven. Bij de afleiding van het extra stijghoogteverlies t.g.v. de partiële perforatie in het geval van volledige penetratie is verondersteld dat het stijghoogteverschil $h_R - h_u$ over de hoogte van de watervoerende laag nagenoeg constant is. In geval van partiële penetratie zijn de stroomsnelheden van het grondwater aan de onderzijde van het putfilter aanzienlijk groter dan die over het overige deel van het putfilter.

Deze stroomconcentratie vindt echter over slechts een klein gedeelte van het putfilter plaats. In grond met een zeer kleine doorlatendheid is de verandering van de filtersnelheid over de hoogte van het filter anderzijds klein. Wordt nu tevens verondersteld dat door de bodem van het putfilter geen water in het putfilter dringt, dan wordt het extra stijghoogteverlies Δ_1 bij benadering bepaald door

$$\Delta_1 = \frac{Q_o}{2\pi kH}\,\frac{H}{h}\,\frac{2}{n}\ln\frac{2}{\pi p_o p_c} \quad (5.11)$$

Indien rond het putfilter een grindomstorting is aangebracht wordt het stijghoogteverlies t.g.v. de partiële perforatie en het gedeeltelijk filter verwaarloosbaar klein, zoals in de voorgaande paragraphen is aangetoond.
Het stijghoogteverlies Δ_2 over het grindpakket wordt bepaald door:

$$\Delta_2 = \frac{Q_o}{2\pi k_w h_w}\ln\frac{r_w}{r_o} \quad (5.12)$$

Hierbij is h_w de hoogte van de grindstorting welke nagenoeg gelijk aan de hoogte h van het putfilter is.

Door de stroomconcentratie aan de onderzijde van het putfilter is ook het intredeverlies Δ_3 over de hoogte van het filter niet constant. Wordt verondersteld dat door de bodem van het putfilter geen water in het putfilter treedt, dan is $V_a = (Q_o/2\pi r_o h)$ de over de hoogte van het filter gemiddelde filtersnelheid van het grondwater. Substitutie van deze waarde van Va in (5.3) geeft het over de hoogte van het filter gemiddelde intredeverlies. Indien de bodem van het putfilter open is, zal het gemiddelde intredeverlies kleiner zijn.
Het stijghoogteverlies Δ_4 in het putfilter wordt bepaald door (5.4) met de substitutie h = H.

5.5 *Vrij wateroppervlak*

Tot nu toe is alleen gesproken over de onttrekking van water, met de hierbij behorende stijghoogteverliezen, uit een watervoerende laag begrensd door twee ondoorlaatbare lagen (spanningswater). In het geval van een vrij oppervlak (phreatisch water) ondergaan de formules voor S_o, ΔS_o een belangrijke wijziging [10]. De formule voor het stijghoogteverlies S_o voor dit geval

$$S_o = \frac{Q_o}{2\pi k(H - \frac{S_o}{2})} \cdot \ln \frac{R}{r_o} \qquad (5.13)$$

waarin H de hoogte van het water voor het afpompen is. Het extra stijghoogteverlies $\triangle S_o$ t.g.v. de partiële penetratie wordt bepaald volgens:

$$\Delta S_o = \frac{Q_o}{2\pi k(H - S_o - \frac{\Delta S_o}{2})} \cdot \frac{1-p}{p} \ln \frac{\alpha h}{r_o} \qquad (5.14)$$

waarbij h de lengte van het filter en p de verhouding tussen de filterlengte h en de hoogte (H-S_o-$\triangle S_o/2$) van het verzadigde gedeelte voorstelt.

De overige formules voor $\triangle_0$, $\triangle_1$, $\triangle_2$, $\triangle_3$, $\triangle_4$ etc. ondergaan verder geen verandering.

Hiermede is in het kort een overzicht van de stijghoogteverliezen gegeven. Voor zover de formules niet zijn afgeleid wordt verwezen naar de handboeken over dit onderwerp.

6. De keuze van de diameter en het openingspercentage van het putfilter

Conclusies

Er bestaat tegenwoordig de neiging om putfilters met een zo groot mogelijk percentage open oppervlak te gebruiken. De motivering hiervan is veelal niet geheel duidelijk of berust op een onjuiste toepassing van formules.

Uit de voorafgaande paragrafen blijkt, dat bij een goed ontwerp putfilters met een klein percentage open oppervlak kunnen worden toegepast zonder dat daarbij de waarde van de extra stijghoogteverliezen $\triangle_1$ en $\triangle_0$ t.g.v. de partiële perforatie een bedrag van 0,25 meter overschrijden. Een gelijkmatige verdeling van het open oppervlak over de filterwand, d.w.z. het aantal openingen groot, leidt tot een zeer kleine waarde van dit extra stijghoogteverlies. De toepassing van een grindomstorting doet de extra stijghoogteverliezen $\triangle_1$ en $\triangle_0$ zelfs verwaarloosbaar klein zijn. Dit wordt mede veroorzaakt doordat de waarde van de verstoppingsfactor in dit geval nagenoeg gelijk nul is.

De waarde van het intredeverlies $\triangle_3$ door (5.3) bepaald zal veelal een bedrag van 0,25 meter niet overschrijden. Opgemerkt wordt, dat voor de bepaling van $\triangle_3$ een nader onderzoek nodig is. Indien een grindomstorting rond het filter wordt aangebracht zal, doordat de verstopping van de openingen dan gering is, de orde van grootte van $\triangle_3$ slechts enige centimeters zijn.

De waarde het stijghoogteverlies $\triangle_4$ in het putfilter wordt door de diameter van het putfilter zeer sterk beinvloed. De diameter van het putfilter wordt in hoofdzaak bepaald door de toetelaten axiale snelheid V_o in het putfilter en het daarmede samenhangende verlies $\triangle_4$. De waarde van het stijghoogteverlies zal in vele gevallen een bedrag van 0,25 m niet overschrijden. De grootte van de diameter van het putfilter heeft eveneens invloed op het formatieverlies S_o. De toepassing van een grindomstorting doet het formatieverlies in niet geringe mate kleiner worden .De toepassing van het gedeeltelijk filter (volgens afb. 2a) levert een kostenbesparing, zonder dat de waarde van het extra stijghoogteverlies $\triangle_o$ groot wordt. Zoals gezegd, is bij de toepassing van een grindomstorting, ook het verlies $\triangle_0$ verwaarloosbaar klein.

Nawoord

Bij het overzicht van de stijghoogteverliezen zijn de voor dit artikel niet relevante aspekten buiten beschouwing gelaten. Gedacht hierbij wordt aan een nadere precisiëring van de verhouding R/r_o en het verband tussen korreldiameter en toelaatbare filtersnelheid.

De gekozen voorbeelden geven veelal een resultaat, dat extreem is t.a.v. de werkelijkheid en zijn bedoeld om het één en ander duidelijk naar voren te brengen.

Appendix I

Lijst van symbolen

Stelsel	lengte-eenheid: meter m tijd-eenheid: seconde sec. massa-eenheid: kilogram kg
A	inwendige doorsnede filterbuis (m^2)
a b c d	lengten en breedten van de openingen in filter I en II (m)
D	inwendige diameter van de filterbuis (m)
D_o	uitwendige diameter van de filterbuis (m)
g	versnelling t.g.v. de zwaartekracht (9,81 m/sec²)
h	lengte van het filtrerende deel van het putfilter (m)
h_i	stijghoogte in het putfilter (m)
h_u	stijghoogte aan buitenwand van het filter (m)
h_w	lengte van de grind-storting (m)
H	de hoogte van de watervoerende laag of de hoogte van het verzadigde deel van de grond (m)
k	1) doorlatendheidscoëfficiënt van de grond (m/sec.) 2) hoogte van de oneffen-heden van de buiswand (m)
k_w	doorlatendheidscoëfficiënt van de grindomstorting (m/sec.)
m	lengte waarover de openingen in de filterwand zijn aangebracht (m)
l	de hart op hart afstand van de gedeelten ter lengte m (m)
	lengte van het niet-filtrerende deel van het putfilter
ln	natuurlijke logarithme
p	de verhouding tussen de lengte h van het filter en de hoogte H van de watervoerende laag
p_c	$(1 - p_c)$ de verhouding tussen het verstopte en niet verstopte deel van de openingen in de wand van het putfilter
p_o	de verhouding tussen open en totaal oppervlak van de wand van het putfilter
q	het radiale instroomdebiet in het putfilter per eenheid van lengte van het filter (m^2/sec.)
Q_o	het totale debiet (m^3/sec.)
V_a	de filtersnelheid van het grondwater in de omgeving van het putfilter (m/sec.)
V_e	de werkelijke snelheid t.p.v. de openingen in de filterwand en wel aan de buitenzijde van de wand (m/sec.)
v_o	de maximale over de doorsnede van het filter gemiddelde axiale snelheid

v_z de over de dwarsdoorsnede van het putfilter gemiddelde snelheid (m/sec.)

μ contractie coëfficiënt van de radiale instroming

υ kinematische viscositeit (m/sec.)

ρ de dichtheid van het water (kg/m^3)

Appendices II, III

Deze appendices kunnen bij de auteur worden opgevraagd.

Literatuur

1. Van den Hoek, H. *„Berekeningen van de hoofdafmetingen van waterwinputten met bijbehorende eenvoudige zandcontrole"*. Tijdschrift H_2O, 7 aug. V pag. 384, 1969.
2. Bieske, E. *Handbuch des Brunnenbaus.* Band II, Verlag Rudolf Schidt, Berling 1965.
3. Rowher, C. e.a. *„Effect of wellscreens on flow into Wells"*. Transact of Am. soc. of Civil Engineers, Vol. 120, 1955.
4. Li, W. H. *„Discussion on effect of wellscreens on flow into wells"* (zie C. Rowher).
5. Van Ouwerkerk, J. H. *„Equations of steady flow through trains completely filled with water"*. De Ingenieur, 1 april 1966.
6. Klotz. D. *„Beschreibung der hydraulyschen Eigenschaften von Filterrohren"*. Bohrtechniek, Brunnenbau, Rohrleitungsbau (BBL) nr. 9, sept. 1969.

6a. Klotz, D. *Hydraulische Eigenschaften der Schlitz-brückenfilter.* Bohrtechniek, Brunnenbau, Rohrletungsbau (BBL) nr. 12, dec. 1969.

7. Verruyt, A. *„De equivalente lengte van een vernauwing"*. Laboratorium rapport van het Laboratorium voor grondmechanica van de TH Delft, no. 24-1, 1966.
8. Kruijtzer, G. F. J. *„Het discretiseren van randvoorwaarden in een elektrisch analogon"*. Tijdschrift H_2O, 4 sept. 1969, pag. 420 t/m 424.
9. Widmoser, P. *„Potentialströmung zu geschlitzten Rohren"*. Schweizerische Bauzeitung. Heft 62, december 1966.
10. Huisman, L. *„Groundwater Recovery"*. Mac Millan, London.
11. Huisman, L. *„Stromingsweerstanden in leidingen"*. Mededeling no. 14 van het KIWA NV, 1969.
12. Todd, D. K. *Groundwater hydrology.* Wiley, Chapman & Hall, 1959.
13. Verruyt, A. *Lectures notes on groundwater-flow* (international courses in hydraulic and sanitary engineering), 1968.
14. *Groundwater and wells.* A reference book for the well Industry, Publ. E. Johnson, Inc., Saint Paul, Minnesota, 1966.
15. Bieske, E. *Nold-Brunnen Filterbuch.* 4 Auflage, 1968. Nold & Co. Stochstadt am Rhein.