Dimensioneringsgrondslagen van sparging

Samenvatting

Een van de in-situ saneringstechnieken voor grondwater die tot dusver succesvol is gebruikt is sparging, waarbij lucht onder het freatisch vlak geïnjecteerd wordt. Voor het gebruik in de praktijk is het nodig dat van te voren bekend is hoe de beluchting van het pakket beïnvloed wordt door te kiezen (injectiediepte, injectiedebiet) en systeemparameters, opdat dimensionering van sparging mogelijk is. In dit artikel wordt een analytische oplossing gegeven, die de luchtverzadiging in het beluchte gebied relateert aan dergelijke parameters. Getoond wordt dat deze oplossing in goede overeenstemming is met de resultaten van numerieke berekeningen die een lange rekentijd vergen. Dimensionering is derhalve goed mogelijk met de gegeven oplossing.

Inleiding

Vooral in het stedelijke gebied en industrieterreinen komt op veel plaatsen verontreiniging van de bodem en het grondwater met vluchtige organische koolwaterstoffen voor. Deze verontreiniging kan zich als puur product voordoen als een drijflaag op het freatisch vlak, als een zinklaag op de basis van een watervoerend pakket en als capillair gebonden fractie. Deze laatste fractie wordt bijna altijd aangetroffen wanneer sprake is van verontreiniging met koolwaterstoffen en is weinig mobiel.



S. E. A. T. M. VAN DER ZEE
Landbouwuniversiteit
Wageningen



M. I. J. VAN DIJKE
Landbouwuniversiteit
Wageningen

Onder invloed van de zwaartekracht zal capillair gebonden verontreiniging niet uitzakken. Om in dergelijke gevallen toch de bodem te kunnen reinigen wordt lucht geïnjecteerd en elders onttrokken om de vervluchtiging te vergroten en aërobe afbraak te versnellen [1, 4, 8, 11].
Wanneer sprake is van luchtinjectie beneden het freatische vlak om aldaar capillair gebonden koolwaterstoffen te verwijderen, wordt dit (air-)sparging genoemd. Op dit moment is sparging een veelbelovende *insitu* saneringstechniek die al in de praktijk wordt toegepast.
Sparging is een techniek die mogelijk is in relatief grof getextureerde pakketten, waarvoor de luchtintreewaarde klein is. Hoewel er modelmatige studies van zijn uitgevoerd [2, 3, 5, 1, 8] hebben deze niet geleid tot grondslagen voor de dimensionering. Hierdoor is het onmogelijk om *a priori* uitspraken te doen over de straal van invloed, waarbinnen aëratie van het grondwaterpakket plaatsvindt, of over de te verwachten mate van beluchting van het geäereerde pakket. Daarom hebben we een onderzoek uitgevoerd om instrumenten aan te leveren op basis waarvan een dergelijke dimensionering *a priori* uitgevoerd kan worden op basis van bodem- en vloeistofeigenschappen. Hierbij hebben we voor een homogene ondergrond berekeningen uitgevoerd aan water- en luchtstroming in een situatie die overeenkomt met sparging. Deze numerieke berekeningen zijn vervolgens gebruikt om een analytische benadering te maken voor onder andere de uiteindelijke stationaire situatie. Hiermee kan dimensionering (diepte injectiefilter, injectiesnelheid) plaatsvinden voor gegeven bodem- en vloeistofeigenschappen en de vereiste invloedsstraal. Daarnaast kan met deze resultaten vastgesteld worden welke stuurvariabele het meest optimaal is in de dimensionering.

Theoretische achtergrond

Bij (air-)sparging wordt lucht geïnjecteerd onder het freatisch vlak, bijvoorbeeld met een verticaal geïnstalleerd filter. Omdat lucht lichter is dan water, beweegt het zich naar boven. Dit stromingsproces kan beschreven worden met de wet van Darcy in combinatie met de continuïteitsvergelijking, voor zowel water als lucht. Hierbij wordt aangenomen dat de lucht niet samendrukbaar is (een acceptabele veronderstelling [7, 10]) en dat de aanwezige koolwaterstoffen het stromingsproces niet beïnvloeden. Naast deze vergelijkingen, is een aantal constitutieve relaties nodig, en uitdrukkingen voor de capillaire druk waaronder relatieve permeabiliteit, beide als functie van de verzadiging met lucht. Tenslotte zijn er begin- en randvoorwaarden vereist. De uitdrukkingen die zijn gebruikt voor de relaties tussen de capillaire druk en de relatieve permeabiliteit en de verzadiging zijn gegeven in [9]. Luchtinjectie geschiedt door een filter gelegen tussen H_l (onderkant) en H_u (top) en gemiddelde diepte H, in een initieel volledig met water verzadigd pakket beneden het freatisch vlak ($Z = 0$). Deze situatie is axiaal symmetrisch voor een homogeen pakket, waardoor we met twee coördinaten te maken hebben: de diepte (Z) en de horizontale afstand (R) tot de as van symmetrie (de injectie lans).
Uit onder andere numerieke berekeningen bleek dat de te verwachten verzadigingsgraad van lucht beneden het oorspronkelijke freatische vlak klein zal zijn [10].
Op basis daarvan kan een analytische oplossing gevonden worden die de luchtverzadiging als functie van de horizontale en verticale afstand van het injectiefilter geeft. Deze benadering geldt voor de stationaire situatie, wanneer de luchtbel niet langer verandert als functie van de tijd. De oplossing die de verzadiging van het poriënvolume met lucht geeft boven het injectiefilter ziet er als functie van de dimensieloze afstanden $z = Z/H$ en $r = R/H$ als volgt uit (symbolen zijn gedefinieerd in de appendix):

$$S(r,z) = n_S\left(\frac{p_D+1}{p_D}\frac{N_2}{f^2(z)}\right)^{p_S}\left(1-\left(\frac{r}{f(z)}\right)^2\right)^{p_S/p_D} \qquad (1)$$

voor $0 \leq r \leq f(z)$ en z-waarden tussen freatisch vlak ($z = 0$) en injectiefilter ($z = 1$). De functie $f(z)$ wordt gegeven door

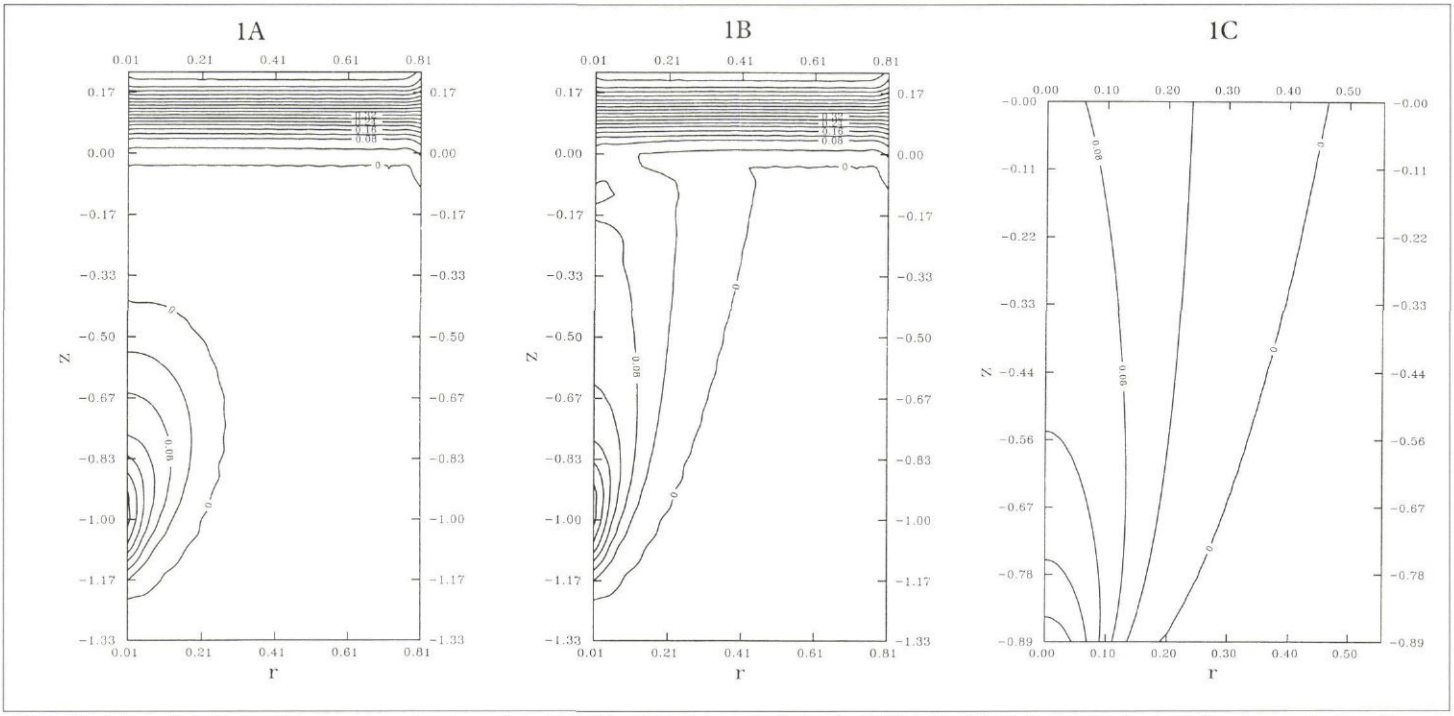
$$f(z) = f_0.(z+1)^{1/(2(p_D+1))},$$

$$f_0 = \left(\frac{4n_D}{N_1}N_2^{p_D}\right)^{1/(2(p_D+1))}\left(\frac{p_D+1}{p_D}\right)^{1/2} \qquad (2)$$

en stelt de buitengrens voor van de conus van lucht die gevormd wordt. De grootheid f_0 is de maximale uitbreiding in radiale richting van de gevormde luchtconus, op $z = 0$, en deze noemen we de straal van invloed. Om de werkelijke positie $f(z)$ te vinden moeten we $f(z)$ met H (de gemiddelde diepte van het injectiefilter) vermenigvuldigen. Voor $f_0 \cdot H$ levert dit F_0 op.

Illustratie van resultaten

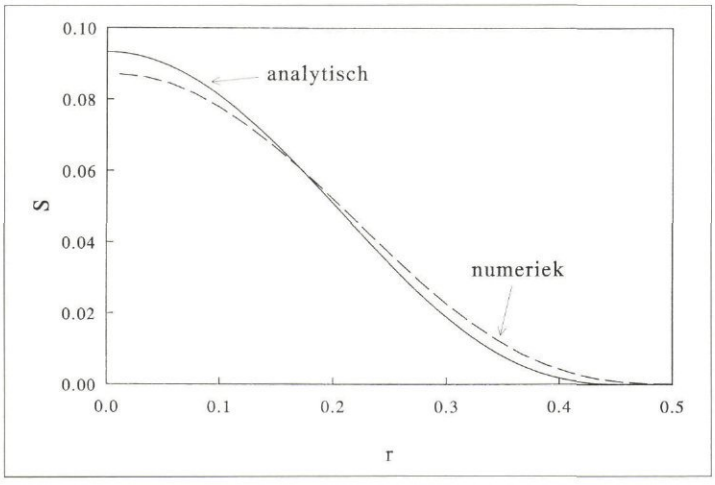
Uitgaand van een referentiegeval met de parameters zoals gegeven in de appendix, is een aantal numerieke berekeningen uitgevoerd. In afbeelding 1 wordt een tweetal profielen van de verzadiging met lucht getoond voor korte en lange tijd. Op het eerste tijdstip is de luchtbel nog niet bij het freatisch vlak gearriveerd. Voor de langere tijd geldt dat geen veranderingen meer optreden: er is een stationaire situatie bereikt. Er is geen watercirculatie door de bewegende luchtstroom en de waterdruk is hydrostatisch. Zodra de stationaire situatie is ingetreden, verandert de hoeveelheid lucht in de bel niet meer. Voor de gevallen die zijn doorgerekend wordt de stationaire situatie binnen één of twee uur ruim bereikt. Een dergelijke tijdsduur is ook in de praktijk waargenomen [7]. In afbeelding



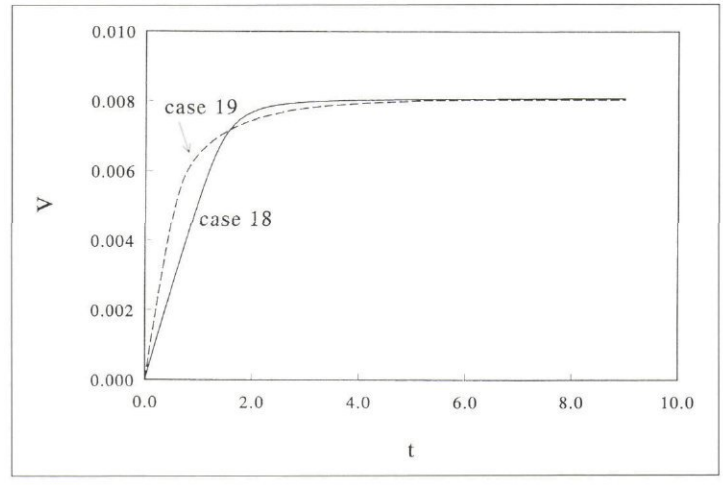
Afb. 1 - Profiel van de luchtverzadiging voor het referentiegeval van Tabel I, na 2 (1a) en na 100 minuten luchtinjectie (1b). Profiel berekend voor de situatie van afbeelding 1b met de analytische oplossing in afbeelding 1c. Saturaties S van lucht op volumetrische basis (volume lucht gedeeld door porie-volume).

1c wordt het profiel getoond volgens de analytische oplossing. Deze beschrijving komt goed overeen met de numerieke berekeningen van afbeelding 1b. Dit laatste is een belangrijk resultaat omdat de numerieke berekeningen zeer lange rekentijden vergden, in verband met de fijne discretisatie in ruimte en tijd. Een karakteristiek beeld van de luchtbel wordt gegeven in afbeelding 2 waar de luchtverzadiging als functie van de radiale afstand getoond wordt. Het blijkt dat de verzadiging met lucht klein is. De overeenstemming van deze dwarsdoorsnede voor de analytische oplossing met het simulatieresultaat blijkt ook goed te zijn.
De analytische oplossing kan beschouwd worden als de grondslag waarop dimensionering kan worden gebaseerd voor min of meer homogene ondergrond. Door variatie van de parameters kan worden vastgesteld welke van grote invloed zijn (bijv. op de invloedsstraal) en welke invloedsstraal verwacht mag worden. Zoals al blijkt uit de analytische oplossing kunnen in plaats van in de stromingsvergelijkingen en randvoorwaarden voorkomende parameters ook enkele dimensieloze grootheden (die elk een aantal parameters combineren) gevarieerd worden. Hierdoor wordt de parametervariatie-analyse sterk gereduceerd. De betreffende dimensieloze getallen zijn N_1, N_2 en m die we ook in vergelijking (1)–(4) aantreffen. De controle dat doorgerekende gevallen met gelijke dimensieloze getallen maar verschillende daaraan ten grondslag liggende basisparameters dezelfde resultaten opleveren voor de stationaire situatie wordt in afbeelding 3 gegeven. Hierin zien we dat het volume lucht beneden het freatische vlak snel toeneemt tot dat van de stationaire situatie. Gevallen met verschillende basisparameters maar gelijke dimensieloze getallen benaderen het volume voor de stationaire situatie verschillend, maar geven hetzelfde resultaat voor de langere termijn. In Tabel I laten we voor de diverse gevallen zien hoe groot de maximale invloedsstraal (ter hoogte van het initiële freatische vlak) is. We zien dat voor deze gevallen stralen te verwachten

Afb. 2 - Verzadiging van lucht (S) als functie van de dimensieloze afstand r tot de injectielans.



Afb. 3 - Volume lucht beneden het oorspronkelijke freatische vlak voor diverse gevallen (gevallen gekarakteriseerd in Tabel I).



TABEL I – *Parameters and dimensionless numbers used in computations. Relative to the reference case (case 1), m is varied for cases 2-5, N_g for cases 6-9, N_c for cases 10-13 and A for cases 14-17.*

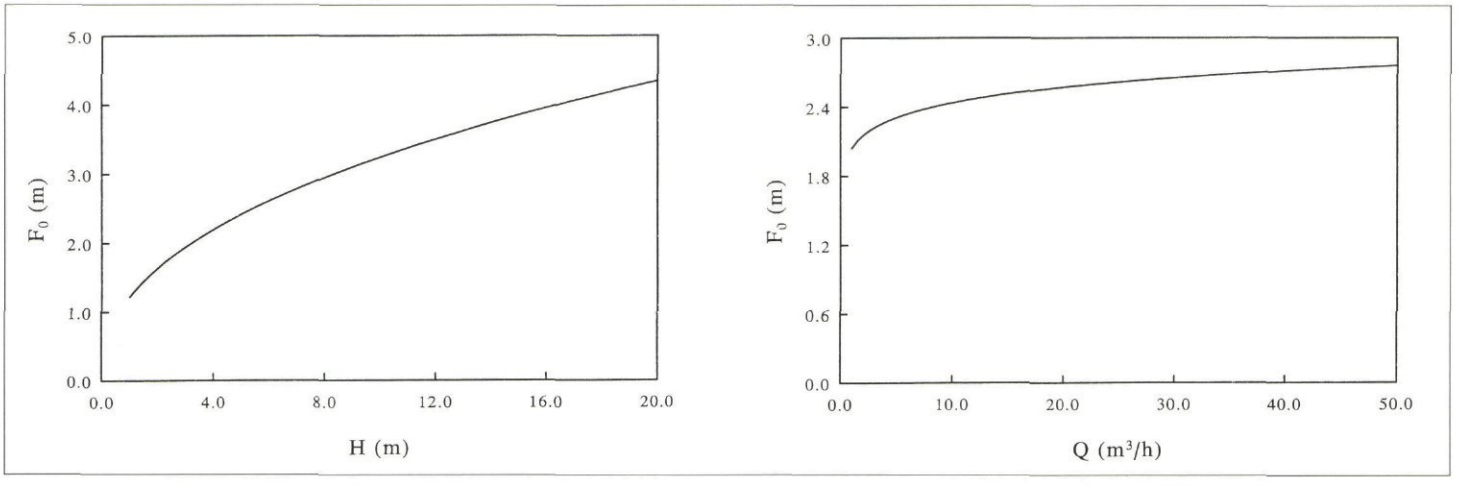
case	α (m^{-1})	$U_i \cdot 10^{-3}$ ($m\ s^{-1}$)	H (m)	m	N_1	$N_2 \cdot 10^{-4}$	F_0 (m)
1	2,00	4,42	4,50	0,667	8,99	7,45	2,31
2	2,00	4,42	4,50	0,400	8,99	7,45	1,61
3	2,00	4,42	4,50	0,500	8,99	7,45	1,87
4	2,00	4,42	4,50	0,750	8,99	7,45	2,53
5	2,00	4,42	4,50	0,800	8,99	7,45	2,65
6	0,800	11,1	4,50	0,667	3,59	18,6	3,65
7	1,00	8,84	4,50	0,667	4,49	14,9	3,27
8	1,50	5,90	4,50	0,667	6,74	10,0	2,67
9	3,00	2,95	4,50	0,667	13,5	4,96	1,89
10	2,50	4,42	4,50	0,667	11,2	7,45	2,10
11	1,67	4,42	4,50	0,667	7,49	7,45	2,50
12	1,00	4,42	4,50	0,667	4,49	7,45	3,10
13	0,500	4,42	4,50	0,667	2,25	7,45	4,15
14	1,20	4,42	7,50	0,667	8,99	2,68	3,56
15	1,46	4,42	6,17	0,667	8,99	3,97	3,02
16	1,64	4,42	5,50	0,667	8,99	4,98	2,74
17	2,57	4,42	3,50	0,667	8,99	12,3	1,87
18	1,00	4,42	7,50	0,667	7,49	2,68	3,85
19	1,41	2,21	5,30	0,667	7,49	2,68	2,72

zijn van enkele meters, al zijn de luchtverzadigingen ver van de injectielans wel klein. Dit is van belang voor de effectiviteit van de saneringsmethode omdat de overdracht van koolwaterstoffen naar de luchtfase en van elektronacceptoren naar de gebonden fractie koolwaterstoffen trager verloopt bij een geringe luchtverzadiging S. Dit impliceert dat zowel het 'strippen' als biodegradatie trager zullen verlopen dan in geval van grote luchtverzadiging.
Voor de dimensionering komt een tweetal sturingsvariabelen in aanmerking. Dit zijn de diepte van het injectiefilter en de injectiesnelheid, want alle overige grootheden in de vergelijkingen (1)-(4) zijn voor een gegeven verontreinigingssituatie nauwelijks te beïnvloeden. Het blijkt uit de vergelijkingen en de uitgevoerde numerieke berekeningen dat de invloedsstraal beter beïnvloed kan worden door de diepte van het filter aan te passen dan door de injectiesnelheid te veranderen. De invloedsstraal is hier namelijk gevoeliger voor dan voor de injectiesnelheid. Ter illustratie wordt uitgaand van het referentiegeval (nr. 1 in Tabel I) de grootte van de invloedsstraal (F_0) als functie van de diepte van het filter en als functie van het injectiedebiet getoond. Hieruit blijkt inderdaad dat de invloedsstraal veel gevoeliger is voor de diepte van het filter dan voor het debiet. Als echter een hogere verzadiging met lucht benodigd is in verband met bijv. de afbraak- of vervluchtigingssnelheid van de organische verontreiniging, moet de injectiesnelheid vergroot worden. De luchtverzadiging is namelijk vooral gevoelig voor de injectiesnelheid en niet voor de filterdiepte. Vanzelfsprekend kan de filterdiepte alleen kleiner gemaakt worden (wat leidt tot een geringe vergroting van de luchtverzadiging bij het freatisch vlak) wanneer de verontreiniging nog ondieper zit.
Momenteel zijn er diverse plekken waar 'air sparging' in de praktijk wordt toegepast. Een groot probleem hierbij is dat de lucht niet altijd gelijkmatig door de ondergrond stroomt, maar soms via lokale kanalen afgevoerd wordt. Dit is een gevolg van heterogeniteit van de lithologie van de ondergrond en van de effecten hiervan op doorlatendheid en luchtintreewaarde.
Voor relatief homogene pakketten zijn er aanwijzingen dat de luchtstroom via een dicht netwerk van continue kanaaltjes plaatsvindt [7]. Bij zeer grof getextureerde pakketten (grindfractie) kan ook luchtverplaatsing als belletjes plaatsvinden [4, 6] en hiervoor is niet zeker of de hier gepresenteerde oplossing bruikbaar is. Voor fijn getextureerde pakketten (leemfractie) is de luchtintreewaarde veelal te hoog om airsparging mogelijk te maken en als dit al mogelijk is dan stroomt de lucht voornamelijk via enkele preferente kanalen [8]. Voor pakketten van fijn tot grof zand is sparging mogelijk tenzij ook hier preferente kanalen gevormd worden doordat fijne en grove lenzen elkaar afwisselen. Door de gevoeligheid van het stromingsproces voor dergelijke texturele veranderingen in de diepte, is de vorming van een luchtconus zoals hier beschreven zeer de vraag.

Conclusie

Bij sparging van lucht onder het freatisch vlak wordt een luchtbel gevormd, die voor die gevallen waarin sparging mogelijk is (geringe luchtintreewaarde, relatief grote doorlatendheid), binnen een paar uur stationair wordt qua vorm en luchtverzadiging. Voor de stationaire situatie kan een analytische oplossing afgeleid worden voor de luchtverzadiging als functie van de afstand tot het injectiefilter en voor de invloedsstraal van sparging.
Met deze analytische oplossing kan *a priori* vastgesteld worden welke injectiediepte of injectiesnelheid gerealiseerd moeten worden om een bepaalde invloedsstraal of beluchting te realiseren. Zo blijkt dat de invloedsstraal het beste kan worden beïnvloed door de diepte van het filter aan te passen.

Afb. 4 - Invloedsstraal op het freatisch vlak (F_0 in meters) als functie van a: filterdiepte H (meters) en b: injectiedebiet Q in m^3/uur.



Verantwoording
Deze studie werd mogelijk gemaakt door het programma Niet-lineaire Transportverschijnselen in Poreuze Media van NWO (project NLS 61-251) en het door NOBIS gefinancierde project Bioventing en Biosparging.

Appendix: symbolen en parameterkeuze
De analytische oplossing is afhankelijk van drie dimensieloze grootheden: m, N_1 en N_2. In de vergelijkingen komt m (een parameter van de relaties van Van Genuchten) voor in vier groepen:

$$n_S = m^{4m/(4m+1)},$$

$$n_D = \frac{2(1-m)}{4m+1} m^{(m-1)/(4m+1)},$$

$$p_S = \frac{2}{4m+1},\ p_D = \frac{2(1-m)}{4m+1} \qquad (3)$$

Realistische waarden zijn $0{,}3 < m < 0{,}9$.
De grootheden N_1 en N_2 zijn:

$$N_1 = \frac{(\rho_w - \rho_a) H \alpha}{\rho_w},$$

$$N_2 = \frac{2\mu_a U_i E (H_l - H_u)}{K_{abs}(\rho_w - \rho_a) g H^2} \qquad (4)$$

Hierin is pw de dichtheid van water (1000 kg/m^3) en ρ_a de dichtheid van lucht (1,24 kg/m^3), H de filterdiepte (m), α een parameter (ref. [9], (1/m)), μ_a de viscositeit van lucht (1,77x10^{-5} Pa s), U_i de snelheid van lucht bij injectiefilter (m/s), E de filterstraal (0,05 m), K_{abs} de absolute permeabiliteit (5,3x10^{-11} m^2), g de zwaartekrachtsversnelling (9,8 m/s^2), en H_l en H_u zijn de afstanden (m) tussen freatisch vlak en onder- en bovenkant van het filter met filterlengte 1m. De parameters die niet zijn gespecificeerd werden gevarieerd (Tabel I).

Literatuur
1. Böhler, U., Brauns, J., Hötzl, H. and Nahold, M. (1990). *Air injection and soil-air extraction as a combined method for cleaning contaminated sites – observations from test sites in sediments and solid rocks,* in Contaminated Soil '90, F. Ahrendt (ed.), Kluwer Acad. Publ. Dordrecht, 1039-1044, 1990.
2. Crow, W. L., Anderson, E. P. and Minugh, E. M., (1987). *Subsurface venting of vapors emanating from hydrocarbon product on ground water,* Ground Water Mon. Rev., 7, 51-57, 1987.
3. Dijke, M. I. J. van, Zee, S. E. A. T. M. van der, and Duijn, C. J. van (1995). *Multiphase flow modeling of air sparging,* Adv. Water Resour., 18(6), 319-333, 1995.
4. Forsyth, P. A. en Shao, B. Y. (1991). *Numerical simulation of gas venting for NAPL site remediation,* Adv. Water Resour., 14, 354-367, 1991.
5. Ji, W., Dahmani, A., Ahlfeld, D. P., Lin, J. D. and Hill III, E. H. (1993). *Laboratory study of air sparging: Air flow visualization,* Ground Water Mon. Rev. 13, 115-126, 1993.
6. Johnson, P. C., Kemblowski, M. W., and Colthart, J. D. (1990). *Quantitative analysis for the cleanup of hydrocarbon-contaminated soils by in-situ soil venting,* Ground Water, 28, 413-429, 1990.
7. Johnson, R. L., Johnson, P. C., McWorther, D. B., Hinchee, R. E. and Goodman, I. (1993). *An overview of in-situ air sparging,* Ground Water Mon. Rev., 13, 127-135, 1993.
8. Lundegard, P. D. and LaBrecque, D. (1995). *Air sparging in a sandy aquifer (Florence, Oregon, USA): Actual and apparent radius of influence,* J. Contam. Hydrol., 19, 1-27, 1995.
9. Marley, M. C., Hazebrouch, D. J. and Walsh, M. T. (1992). *The application of in-situ air sparging as an innovative soils and ground water remediation technology,* Ground Water Mon. Rev., 12, 137-145l, 1992.
10. Parker, J. C., and R. J. Lenhard (1987). *A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow, 1. saturation-pressure relations,* Water Resour. Res., 23, 2187-2196, 1987.
11. Wehrle, K. (1990). *In-situ cleaning of CHC contaminated sites: Model-scale experiments using the air injection (in-situ stripping) method in granular soils,* in Contaminated Soil '90, F. Ahrendt, (ed.), Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1061-1062, 1990.

• • •

Minder water, meer natuur

Op 1 september jl. gaven algemeen directeur drs. P. Jonker van Duinwaterbedrijf Zuid-Holland (DZH) en de gedeputeerde van provincie Zuid-Holland, de heer J. Heijkoop het startsein voor de uitvoering van de regeneratie- en optimalisatieprojecten in de duingebieden Berkheide en Meijendel. Het startsein betekent tevens de officiële ingebruikneming van het diepinfiltratieproject Berkheide, waardoor kan worden gestart met de uitvoering van de projecten. Doel van de regeneratie- en optimalisatieprojecten is het verhogen van de natuurwaarde van het door DZH beheerde duingebied. De verminderde productiecapaciteit die door deze projecten ontstaat, wordt gecompenseerd door het diepinfiltratieproject Berkheide.
Onder regeneratie wordt verstaan: het herstellen van vochtige en natte duinvalleien door het opheffen van waterwinactiviteiten. Met optimalisatie wordt bedoeld het renoveren van de waterwinning, zoals putten en leidingen en het verbeteren van de infiltratieplassen, waardoor eveneens natuurwinst is te behalen.

De aanleiding
In de jaren zeventig steeg het waterverbruik vrij snel. Om aan de toenemende vraag naar drinkwater te voldoen, werden meer en meer infiltratieplassen in het duin aangelegd en gevuld met rivierwater. Dit water bevatte echter meer voedingsstoffen dan regenwater. Veranderingen van de plantengroei bleven dan ook niet uit. Vochtige valleien en de randen van de plassen raakten begroeid met riet, wilgenroosjes en brandnetels en verdrongen de bijzondere plantensoorten, zoals Parnassia uit het duin.

Vanaf 1975 is de situatie veranderd. Als duinwaterbedrijf zijn wij ons steeds meer bewust geworden van het belang van een zuiver milieu in de duinen. Daarom werd besloten om het rivierwater vergaand voor te zuiveren en onderzoek te doen naar alternatieve winningsmethoden, zoals diepinfiltratie.

Afspraken
In 1995 is in een bestuursovereenkomst tussen de provincie Zuid-Holland en ons bedrijf vastgelegd, dat zowel in Berkheide als in Meijendel de hoeveelheid oppervlaktewater wordt beperkt en de beginsituatie zoveel mogelijk wordt hersteld.
In de overeenkomst is vastgelegd op welke plaatsen en wanneer de oppervlakte-infiltratie wordt verminderd en hoe het verlies aan wincapaciteit wordt gecompenseerd.
Door deze projecten maakt DZH een begin met het uitvoeren van de gemaakte afspraken.
Tegelijkertijd laten de projecten zien dat DZH werkt aan een evenwicht tussen zijn twee bedrijfsdoelstellingen: het continu leveren van goed en betrouwbaar drinkwater en het goed beheren van de aan ons bedrijf toevertrouwde duingebieden.

De werkzaamheden
De uitvoering zal zeker enige jaren in beslag nemen. Om bezoekers en dieren zo min mogelijk te storen vinden de werkzaamheden plaats buiten het broedseizoen, dus in de herfst- en winterperiode.
(Persbericht DZH)

Ontwerp NEN-EN 12918 ter kritiek gepubliceerd

Het Nederlands Normalisatie-instituut heeft ter kritiek het ontwerp NEN-EN 12918 'Water- Bepaling van parathion, parathionmethyl en enkele andere organofosforverbindingen in water'. Kritiek op het ontwerp NEN-EN 12918 wordt verwacht vóór 15 november 1997. Exemplaren van het ontwerp zijn tegen vergoeding verkrijgbaar bij het Nederlands Normalisatie-instituut, Postbus 5059, 2600 GB Delft, telefoon 015-2690390.