
Transportmodellering op de schaal van een megasite

Johan Valstar, Annemieke Marsman,

Esther van Baaren en Eric van Nieuwkerk

Samenvatting

Voor het opzetten van een gebiedsgericht beheer van verontreinigd grondwater in de Rotterdamse havens is een specifieke modelcode ontwikkeld. Hiermee wordt het transport van verontreinigd grondwater inclusief biologische afbraak langs stroombanen berekend. Met dit model kunnen op grote schaal de risico's van verontreinigingen en het effect van maatregelen worden bepaald. Het model vormt de basis voor de operationele invulling van gebiedsgericht grondwaterbeheer in de Rotterdamse haven.

Inleiding

Normaliter worden transportberekeningen vaak uitgevoerd met softwarepakketten zoals MT3D (Zheng, 1990), RT3D (Clement, 1997) en PHT3D (Prommer, 2002). Daarmee kan op locatieniveau heel goed het transport van één pluim gemodelleerd worden. Hierbij is de celgrootte van het model afhankelijk van de dimensie van de pluim. Een voorwaarde hierbij is dat de pluim in de transversale richting minimaal een aantal cellen moet beslaan om grote verdunning of numerieke dispersie te voorkomen. Ook wordt de tijdstap beperkt door de Courant conditie: het advectief transport in een tijdstap mag niet groter zijn dan de cellengte in de betreffende richting.

Voor een megasite als de Rotterdamse haven met zeer veel verschillende en complexe pluimen is dan snel duidelijk dat het benodigde aantal modelcellen en tijdstappen het toepassen van deze standaard codes onmogelijk maakt. Daarom is gekozen voor een pragmatische aanpak van transportberekeningen langs stroombanen. Dit transportmodel rekent zodanig snel dat ook de modelonzekerheid door middel van een Monte Carlo² analyse bepaald kan worden.

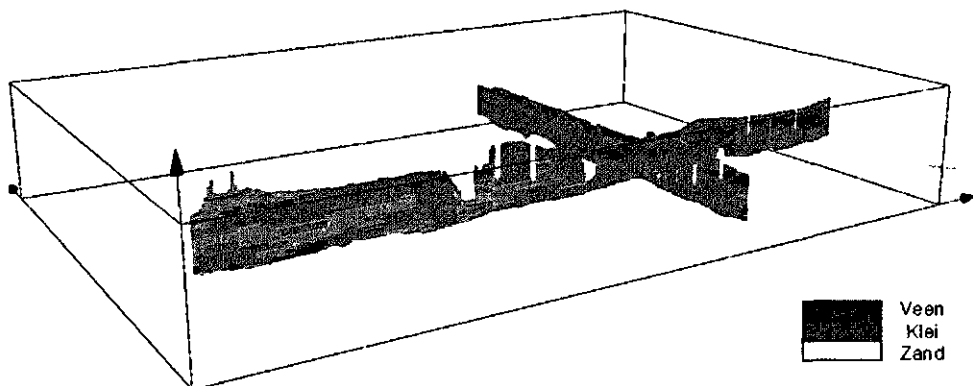
1 Johan Valstar (email: johan.valstar@deltares.nl; tel. 030-2564707), Annemieke Marsman (email: annemieke.marsman@deltares.nl), Esther van Baaren (email: esther.vanbaaren@deltares.nl) en Eric van Nieuwkerk (eric.vannieuwkerk@deltares.nl) zijn werkzaam bij Deltares, Postbus 85467, 3508 AL Utrecht, fax: 030-2564855.

2 Bij een Monte Carlo analyse worden een groot aantal realisaties gemaakt. Voor modelparameters die niet exact bekend zijn, worden voor iedere realisatie waarden getrokken uit hun kansverdeling. Vervolgens wordt voor iedere realisatie het model doorgerekend en wordt zo een schatting voor de kansverdeling van de modelresultaten verkregen. Voor literatuur, zie bijvoorbeeld Metropolis en Ulam, (1949).

De formulering van de transportberekeningen langs stroombanen wordt na de geohydrologische gebiedsbeschrijving in een aparte paragraaf uitgewerkt. In de daaropvolgende paragraaf wordt een correctie voor voorkeurstroming door zandpalen¹ beschreven. Vervolgens wordt de opzet van de Monte Carlo analyse uitgewerkt. Verder geven we beknopt aan hoe de resultaten te gebruiken zijn voor de uitwerking van gebiedsgericht grondwaterbeheer.

Geohydrologisch beschrijving van de Rotterdamse haven en omgeving

In het Rotterdamse havengebied is bij de aanleg een antropogene ophooglaag aangebracht op de Holocene deklaag. Het gebied ligt ongeveer van 4m +NAP (oostelijke deel) tot 6m+ NAP (Maasvlakte). Tijdens het bouwrijp maken zijn op een aantal locaties zandpalen² aangebracht om de consolidatie van de Holocene deklaag te versnellen. De Holocene deklaag bestaat in het oostelijk havengebied hoofdzakelijk uit klei en veen, maar bevat ook lokale zandige geulafzettingen. Naar het westen toe wordt de Holocene deklaag steeds zandiger. Op ongeveer 20 m -NAP begint het Pleistocene watervoerende pakket dat ongeveer 10 m dik is, maar plaatselijk sterk in dikte varieert. In het westelijke deel van de haven is dit 1^e watervoerende deels zout. Een doorsnede van de bodemopbouw is gegeven in figuur 1.



Figuur 1: Dwarsdoorsnede van de ondergrond

Het havengebied is een infiltratiegebied, waarbij het meeste infiltrerende regenwater verticaal doorstroomt naar het eerste watervoerende pakket. Dwars door het gebied loopt een waterscheiding. In het noordelijk deel stroomt het water vooral naar de grond-

1 Zandpalen worden gemaakt door een dicht netwerk van gaten te boren en op te vullen met grof zand of grind. Ze worden gebruikt tijdens het bouwrijp maken voor het versnellen van zettingen van kleilagen die extra belast worden, bijvoorbeeld door het aanbrengen van een ophooglaag. Onder normale omstandigheden zou dit proces langzaam verlopen omdat de zetting pas optreedt indien er water uit de poriën van de klei geperst wordt. Via de zandpalen wordt het overtollige poriewater sneller afgevoerd, en treedt de zetting sneller op. Het bouwterrein kan daardoor eerder in gebruik worden genomen.

wateronttrekking van DSM Gist in Delft of het kwelt op in de diepliggende Alexanderpolder bij Rotterdam. In het zuidelijk deel kwelt het water vooral op in de polders van Voorne Putten. Gemodelleerde stroombanen die beginnen in het havengebied zijn te zien in figuur 2.



Figuur 2: Stroombanen die beginnen in de ophooglaag in de Rotterdamse haven met reistijd in jaren

Het oppervlaktewater van de haven heeft voornamelijk een infiltrerende werking, maar er stroomt ook grondwater vanuit de ophooglaag en het bovenste deel van het Holocene naar het oppervlaktewater. Deze grondwaterstroming is door Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam (2005) gemodelleerd met MODFLOW. Dit model is aangepast, waarbij ondermeer zoet-zout effecten zijn gemodelleerd en de Holocene deklaag in veel meer detail is ingevoerd.

Reactief transportmodel langs stroombanen

Met behulp van de modelcodes MODFLOW en MODPATH zijn de stijghoogten en de stroombanen berekend. De informatie die hieruit komt wordt gebruikt als input voor de transportberekeningen. Langs iedere stroombaan die begint bij een (potentiële) bron worden de volgende stappen doorlopen.

1. Voor de modelcellen die een bronzone vormen worden de begintijd en constante concentraties voor alle prioritaire stoffen vastgesteld. Bronzone zijn de locaties waar de oorsprong van de grondwaterverontreiniging is. Dit kan een drijfvlag zijn

indien de verontreiniging lichter is dan water of een zaklaag indien de verontreiniging zwaarder is dan water. De prioritare stoffen zijn BTEX, PER, TRI, CIS, VC, 1,1,1-trichloorethaan, 1,2-dichloorethaan, trichloormethaan, dichloormethaan en naftaleen. Aangezien de begintijd van een verontreiniging veelal niet bekend is, wordt hiervoor het begin van de betreffende industriële activiteit genomen. De beginconcentratie is de opgeloste concentratie die ter plaatste is gemeten of wordt getrokken tijdens de Monte Carlo analyse. Aangenomen wordt dat deze bronconcentraties voor de gehele modelcel geldig zijn en dat deze ook in de tijd constant blijven, totdat een bronzone eventueel gesaneerd wordt. Samen met de grondwaterflux in de betreffende cel ligt dan ook de massaflux van de verontreiniging vast.

2. Vervolgens wordt langs de stroombaan voor iedere cel de concentratieafname door biologische afbraak berekend, met behulp van de volgende vergelijking:

$$C^i = C^{i-1} \exp(-k\Delta t) \quad (1)$$

Waarbij C^i de concentratie is in de i^{de} cel die de stroombaan doorkruist; k is de eerste orde afbraakconstante, die afhankelijk is van de redox-conditie in de betreffende cel en het type verontreiniging en Δt is de verblijftijd van de stroombaan in de betreffende cel. Bij biologische afbraak wordt algemeen aangenomen dat bacteriën een verontreiniging alleen kunnen afbreken als de verontreiniging in de opgeloste fase is. Daarom wordt in deze vergelijking geen retardatiefactor gebruikt. Voor de redox-conditie en de afbraakconstantes geldt ook dat ze onzeker zijn en worden getrokken tijdens de Monte Carlo analyse.

3. Voor de gechloreerde koolwaterstoffen tetrachloorethyleen (Per), trichloorethyleen (Tri), 1,2 dichloorethyleen (CIS) en vinylchloride (VC) is er een sequentiële afbraakketen. Bij de afbraak van Per ontstaat Tri, enz. Het concentratieverloop voor stoffen die kunnen ontstaan door afbraak van een andere component wordt gemodelleerd als:

$$Tri^i = Tri^{i-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{k_{Tri}\Delta t}{2}\right) + Y_{Per,tri} Per^{i-\frac{1}{2}} \left(1 - \exp\left(-\frac{k_{Per}\Delta t}{2}\right)\right) \quad (2)$$

with

$$Tri^{i-\frac{1}{2}} = Tri^{i-1} \exp\left(-\frac{k_{Tri}\Delta t}{2}\right) + Y_{Per,tri} Per^i \left(1 - \exp\left(-\frac{k_{Per}\Delta t}{2}\right)\right) \quad (3)$$

$$Per^{i-\frac{1}{2}} = Per^{i-1} \exp\left(-\frac{k_{Per}\Delta t}{2}\right)$$

Waarbij $Y_{Per,tri}$ is de zogenoemde stoichiometrische constante¹ is. In deze formules wordt de Per en Tri-concentratie berekend op de helft van de tijdstap. De Tri die in de eerste helft van de tijdstap wordt geproduceerd tijdens de afbraak van Per, kan dan in de tweede helft van de tijdstap verder worden afgebroken. De hoeveelheid Tri die gevormd

1 Deze stoichiometrische constante is de verhouding tussen de hoeveelheid massa Tri die ontstaat en de massa Per die verdwijnt bij deze chemische omzetting.

wordt tijdens de tweede helft van de tijdstap kan niet meer verder kan worden afgebroken tijdens dezelfde tijdstap. Voor de afbraak van Tri naar Cis en van Cis naar VC worden identieke formules toegepast.

4. De aankomsttijd van de verontreiniging in een cel langs de stroombaan, t^i , wordt uitgerekend met de volgende formule:

$$t^i = t^{i-1} + R\Delta t \quad (4)$$

Waarbij R de retardatiecoëfficiënt is voor de betreffende stof in de betreffende cel. Deze is afgeleid van het organische stofgehalte van de bodem en de organisch stof – water partitie coëfficiënt (K_{OC}) van de betreffende verontreiniging (zie bijvoorbeeld Appelo en Postma, 1994). Voor t^0 geldt dat dit de begintijd is van de industriële activiteit op de locatie waar de stroombaan begint.

5. Indien de stroombaan door een cel stroomt waarbij een deel van het grondwater naar het oppervlaktewater stroomt, wordt de massaflux van de verontreiniging naar het oppervlaktewater $F_{\text{oppervlaktewater}}$ als volgt bepaald.

$$F_{\text{oppervlaktewater}}^i = C^i \cdot Q^{i-1} \cdot \frac{Q_{\text{uit,oppervlaktewater}}^i}{\sum Q_{\text{uit,w}}^i} \quad (5)$$

Waarbij Q^{i-1} de waterflux is die bij binnenkomst van de cel voor de stroombaan geldt. Deze waterflux neemt proportioneel af indien de stroombaan door een cel stroomt waarin een flux naar het oppervlaktewater optreedt:

$$Q^i = Q^{i-1} \cdot \frac{\sum Q_{\text{uit}}^i - Q_{\text{uit,oppervlaktewater}}^i}{\sum Q_{\text{uit}}^i} \quad (6)$$

Q^0 wordt bepaald uit de waterflux van de cel met de bronzone (grondwateraanvulling maal oppervlakte van de cel).

6. Bij het passeren van een voorgedefinieerde grens wordt gekeken wat de massaflux is van de verontreiniging. Ook wordt gekeken of de concentratie van de betreffende stof een bepaalde norm (bijvoorbeeld de interventiewaarde of de tussenwaarde volgens de Wet bodembescherming) op een bepaald tijdstip overschrijdt. In de praktijk zal voor receptoren, zoals oppervlaktewater of onttrekkingen, de massaflux van belang zijn, terwijl bij een grens van een beheersgebied bevoegd gezag veelal op concentraties zal willen toetsen.

Ook het effect van saneringsmaatregelen kan worden gemodelleerd. Bij de maatregelen bronverwijdering en pump & treat worden de concentraties van de verontreiniging vanaf het betreffende tijdstip op de betreffende plaats op nul gesteld. Bij de maatregel gestimuleerde afbraak is er in een aantal modelcellen een voor de verontreiniging gunstige redox conditie met een bijbehorende hogere afbraakconstante. Indien de verontreiniging

al 10 jaar voorbij de betreffende locatie is zal op ieder stroomafwaarts gelegen grensvlak vanaf het moment van doorbreken ook 10 jaar een hogere concentratie gemodelleerd worden, voordat de saneringsmaatregel effect gaat sorteren.

Bovengenoemde formules zijn in de nieuwe modelcode geprogrammeerd. Deze modelcode leest onder andere de stroombanen die MODPATH berekend heeft en leest ook relevante databestanden die in GIS zijn gemaakt. Uitvoer met een ruimtelijke verdeling kan weer in GIS worden verwerkt.

Bij deze aanpak worden een aantal processen verwaarloosd of gesimplificeerd: ten eerste worden processen als diffusie en dispersie verwaarloosd. Dit is vooral een conservatieve aanname; verlaging van de maximumconcentraties door dit proces worden niet meegenomen. Ten tweede wordt het opdrogen van de bronzones niet meegenomen. Ook dit is een conservatieve aanname. Ten derde wordt het effect van de afbraak van de verontreinigingen op de redox condities niet meegenomen. Dit effect is in de praktijk vaak gering omdat de concentraties van de verontreinigingen (microparameters) relatief laag zijn en de redox condities vooral worden beïnvloed door de afbraak van organisch stof in de antropogene ophooglaag en de Holocene dek'laag.

Effect voorkeurstroming door zandpalen

In het gebied zijn in het verleden zandpalen toegepast tijdens het bouwrijp maken van het terrein. In het kader van de pilot studie in de Botlek is ook gepoogd om in detail uit te zoeken hoe deze zandpalen zijn toegepast en wat het potentiële effect is van de zandpalen op transport van verontreiniging. In bijlage A staat een samenvatting van deze inventarisatie.

In het transportmodel is het effect van zandpalen verdisconteerd door de stroombaan op te delen in 2 substroombanen. De eerste substroombaan stroomt wel door de zandpaal en krijgt een kortere reistijd dan dat de MODPATH berekening aangeeft. De tweede substroombaan stroomt door de Holocene dek'laag en krijgt een langere reistijd dan dat MODPATH aangeeft.

De bepaling van de fluxratio van beide substroombanen en de aanpassingfactoren van de reistijden zijn gebaseerd op de analyse van de weerstanden langs beide substroombanen. Voor de stroming via de zandpaal, bestaat de weerstand uit een drietal bijdragen te weten de radiale stroming naar de zandpaal toe in de ophooglaag, de verticale stroming door de zandpaal en de radiale stroming vanuit de zandpaal naar het Holocene pakket. Voor alle drie de stromingsituaties berekenen we het stijghoogteverschil bij een debiet $Q_{z,p}$ door de zandpaal.

Voor de radiale stroming in de ophooglaag geldt:

$$\Delta h_1 = \frac{Q_{z,p}}{2\pi k D_{ophooglaag}} \left[\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right) \right] \quad (7)$$

Hierin is $kD_{\text{ophooglaag}}$ de transmissiviteit van de ophooglaag, r_1 is de straal van de zandpaal en r_2 is de afstand tussen het midden van de zandpaal en de rand van haar invloedsgebied. Voor r_2 nemen we de helft van de hart-op-hart afstand aan. De afleiding van deze vergelijking wordt gegeven in bijlage B.

Voor de verticale stroming door de zandpaal geldt:

$$\Delta h_2 = \frac{Q_{zp} L}{A_{zp} k_{zp}} \quad (8)$$

Hierin is L de lengte van de zandpaal in het Holoceen, A_{zp} is de oppervlakte van een dwarsdoorsnede van de zandpaal en k_{zp} is de doorlatendheid van de zandpaal.

De horizontale radiale uitstroming vanuit de onderkant de zandpaal geeft:

$$\Delta h_3 = \frac{Q_z}{2\pi k_{\text{aquif}} D} \left[\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right) \right] \quad (9)$$

Hierin is k_{aquif} de horizontale doorlatendheid van de laag waarin het onderste deel van de zandpaal zich bevindt. Aangenomen wordt hierbij dat de uitstroming vanuit de zandpaal uitsluitend in de onderste meter van de zandpaal optreedt ($D=1\text{m}$). In werkelijkheid zal de in- en uitstroming over het gehele traject van de zandpaal kunnen optreden. Het meest van belang zijn de uiterste situaties: de snelste (stroombanen lopen door tot onderkant zandpaal) en de langzaamste (stroombanen gaan niet door de zandpaal) verspreidingsroutes om zo het eerste moment van aankomst en het laatste moment van effecten van saneringsmaatregelen te voorspellen.

Ook voor de verticale stroming door de Holocene klei over de lengte van de zandpaal wordt een stijghoogteverval voor een flux Q_{Hol} berekend:

$$\Delta h_4 = \frac{Q_{\text{Hol}} L}{A_{\text{Hol}} k_v} \quad (10)$$

Hierin is A_{Hol} de oppervlakte van de Holocene deklaag binnen het invloedsgebied van 1 zandpaal en k_v is de verticale doorlatendheid van de Holocene deklaag.

Door de stijghoogtevervallen via beide routes aan elkaar gelijk te zetten:

$$\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 = \Delta h_4 \quad (11)$$

kan nu de verhouding tussen de fluxen die via beide routes stromen worden uitgerekend.

De aanpassingfactoren voor de reistijd ten opzichte van de gemiddelde reistijd die met behulp van MODPATH is berekend worden vervolgens bepaald met

$$T_{zp} = T_{origineel} \cdot \left(\frac{D_{Hol} - L}{D_{Hol}} + \frac{LA_{zp / totaal}}{D_{Hol} Q_{zp / totaal}} \right) \quad (12)$$

en

$$T_{Hol} = T_{origineel} \cdot \left(\frac{D_{Hol} - L}{D_{Hol}} + \frac{LA_{Hol / totaal}}{D_{Hol} Q_{Hol / totaal}} \right) \quad (13)$$

Hierin is T de reistijd door het Holocene pakket en D_{Hol} de dikte van het Holocene pakket. Het onderschrift *zp/totaal* geeft voor deze parameter het aandeel van de zandpaal in deze parameter weer.

De linkerterm van het deel tussen de haken wordt bepaald door de reistijd door het onderste deel van het Holoceen waarin geen zandpalen zitten en het rechter deel heeft betrekking op de versnelling respectievelijk vertraging in het bovenste deel van het Holoceen waarin de zandpalen zitten.

Een gevoeligheidsanalyse voor parameters wordt beschreven in Bijlage C. Hieruit blijkt dat vooral de lengte van de zandpaal een grote invloed heeft op de reductiefactor van de reistijd, maar dat de uitkomsten relatief ongevoelig zijn voor de overige parameters.

Monte Carlo analyse

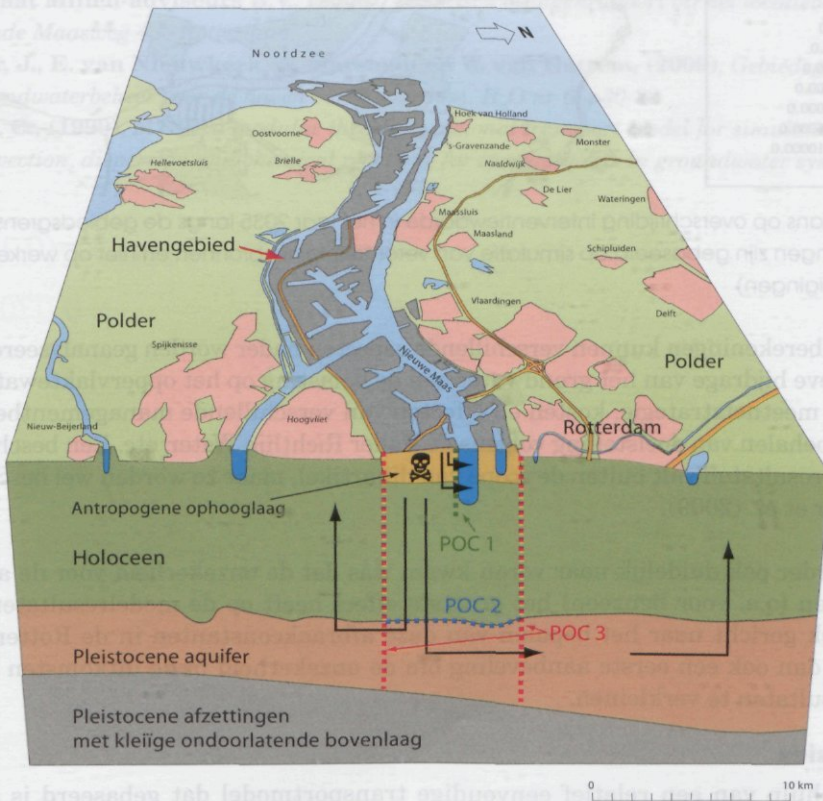
Een groot aantal parameters in het model is niet exact bekend. Daarom is besloten om een Monte Carlo analyse uit te voeren, waarin de meest relevant geachte parameters worden gevarieerd. Dit zijn de beginconcentraties, de redox condities en de bijbehorende afbraakconstante per stof. De kansverdelingen voor de beginconcentraties en de redox condities zijn voor een aantal onderscheiden klassen gebaseerd op veldmetingen. De afbraakconstanten zijn gebaseerd op literatuurwaarden en expert judgement. Geo-hydrologische parameters zoals doorlatendheid en grondwateraanvulling worden wel van belang geacht voor de ligging van de individuele stroombanen en de bijbehorende pluimen, maar niet direct op de managementbeslissingen die met de uitkomst van dit model gedaan zullen worden.

Resultaten

Voor het model is besloten om op een drietal grenzen (planes of compliance: POC) de doorbraak van verontreinigingen bij te houden, te weten: de grens met het oppervlaktewater (POC1), de grens met het Pleistocene watervoerende pakket (POC 2) en de rand van het havengebied (POC 3). Deze POC zijn schematisch weergegeven in figuur 3.



Figuur 3: Schematische weergave van de POC



Figuur 4: Berekende massaf flux naar oppervlaktewater (berekeningen zijn gebaseerd op simulatie van verontreinigingsbronnen en niet op werkelijke verontreinigingen)

Op de grenzen is de massaflux aan verontreinigingen en de kans op overschrijding van een norm (interventiewaarde) bepaald met behulp van de Monte Carlo analyse. Voorbeelden van deze resultaten zijn: de gemiddelde massaflux naar het oppervlaktewater (figuur 4) en de kans op overschrijding van de interventiewaarde op elke POC in een bepaald jaar, zie voorbeeld in figuur 5.



Figuur 5: Kans op overschrijding interventiewaarde in het jaar 2035 langs de gebiedsgrens (berekeningen zijn gebaseerd op simulatie van verontreinigingsbronnen en niet op werkelijke verontreinigingen)

Met de berekeningen kunnen verschillende aspecten nader worden geanalyseerd, zoals de relatieve bijdrage van het grondwater aan de belasting op het oppervlaktewater, een optimale meetnetstrategie, kosten en effecten van verschillende managementbeslissingen, het behalen van doelstelling volgens de Kader Richtlijn Water, etc. Een beschrijving van deze resultaten valt buiten de scope van dit artikel, maar ze worden wel beschreven in Valstar et al. (2009).

Wat verder ook duidelijk naar voren kwam was dat de onzekerheid voor de afbraakconstanten (o.a. voor benzeen) het grootste effect heeft op de modelresultaten. Veldonderzoek gericht naar het bepalen van deze afbraakconstanten in de Rotterdamse haven is dan ook een eerste aanbeveling om de onzekerheid in de uitkomsten van de modelresultaten te verkleinen.

Conclusies

Met behulp van een relatief eenvoudige transportmodel dat gebaseerd is op een stroombaananalyse is het mogelijk om transportberekening op de schaal van een megasite, zoals de Rotterdamse haven uit te voeren. De methode rekent zodanig snel dat

zelfs het uitvoeren van een onzekerheidsanalyse met een Monte Carlo analyse mogelijk is. Door deze aanpak is het mogelijk om het effect van voorkeurstroming door zandpalen mee te nemen. Deze voorkeurstroming heeft een significant effect op de reistijd van verontreinigingen door het Holoceen.

Literatuur

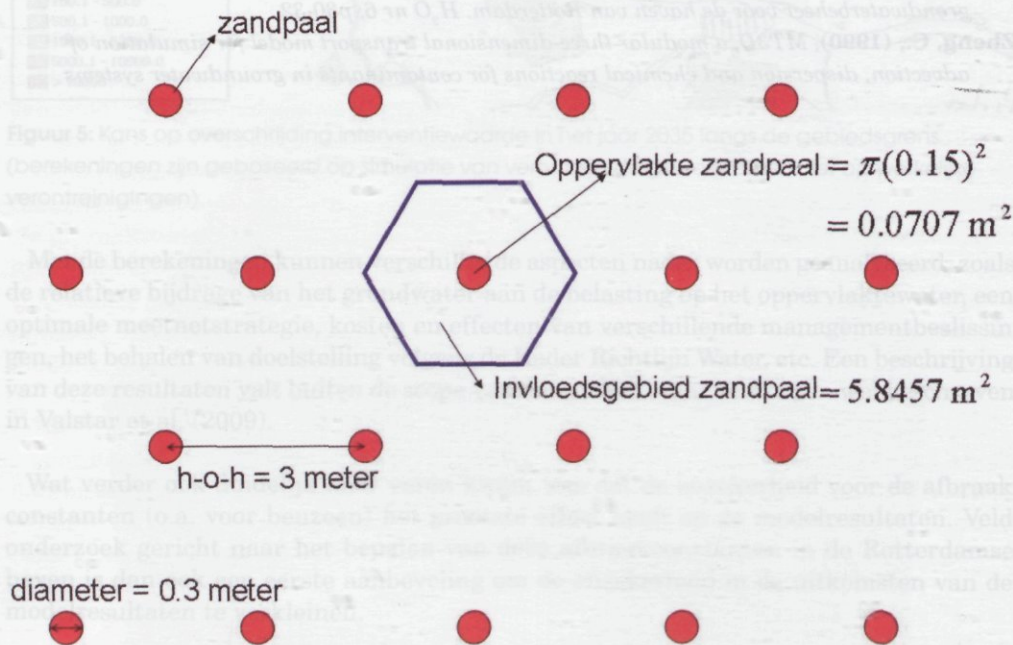
- Appelo, C.A.J. en Postma, D. (1994)**, *Geochemistry, groundwater and pollution*, A.A. Balkema, Rotterdam/ Brookfield
- Clement, T.P., (1997)**, *RT3D, a modular computer code for modeling reactive multi-species transport in 3-dimensional groundwater systems*
- Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam, (2005)**, *BIO diepgrondwater, projectcode 2000-0640*
- Metropolis, N en Ulam, S. (1949)**, "The Monte Carlo Method". *Journal of the American Statistical Association* 44 (247): 335–341. doi:10.2307/2280232
- Prommer, H., (2002)**, *PHT3D, A reactive multicomponent transport model for saturated porous media*, University of Edinburgh, UK
- De Straat Milieu adviseurs B.V., (2000)**, *Technisch bijlagenrapport bij het locatiebeheerplan Oude Maasweg 4 te Rotterdam*
- Valstar, J., E. van Nieuwkerk, A. Marsman en W. van Hattem, (2009)**, *Gebiedsgericht grondwaterbeheer voor de haven van Rotterdam. H₂O nr 6; p30-32*
- Zheng, C., (1990)**, *MT3D, a modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions for contaminants in groundwater systems*

Bijlage A: Inventarisatie gegevens zandpalen

In de jaren 1960 tot 1980 zijn in de Botlek door zowel de aanwezige bedrijven als de gemeente zandpalen aangebracht. De locaties van deze palen zijn echter lastig te achterhalen. De zandpalen zijn destijds uitsluitend geplaatst voor geotechnische doelen zoals een versnelde zetting en het garanderen van stabiliteit tijdens het bouwrijp maken. Een enkele keer (bv bij de Brielse dijk) hadden de zandpalen afwatering tot doel, het drainerende effect van de zandpalen kan in de meeste gevallen echter gezien worden als een neveneffect.

In het verleden is er een inventarisatie gemaakt van de toepassing van zandpalen in de Rotterdamse haven en stad door consultatie van verschillende experts bij DCMR, Deltares en Gemeentewerken Rotterdam. Daarbij zijn vier typen zandpalen onderscheiden: korte zettingspalen, lange zettingspalen, funderingspalen en verticale ribbel drains. Voor lange zettingspalen moet een boorgat gesteund worden en dat is kostbaar. Deze lange zettingspalen werden niet door Gemeentewerken Rotterdam in de Botlek geplaatst. Wellicht wel door bedrijven zelf maar ook dat is niet waarschijnlijk. De aanwezigheid van verticale ribbel drains kan in dit gebied verwaarloosd worden.

De zandpalen die in de jaren 1960-1980 zijn aangelegd hebben een diameter van circa 30 centimeter en een hart-op-hart afstand van 3 meter. Figuur A1 toont een schematisch bovenaanzicht van de zandpalen.



Figuur A1: Schematisch bovenaanzicht zandpalen in de Botlek

Verondersteld kan worden dat de zandpalen tot 1 meter boven de bovenkant van de eerste zandige laag zijn aangelegd. Voor het Botlekgebied geldt dat de Holocene deklaag sterk heterogeen is en dat de diepte van de eerste zandige laag sterk varieert. Vooral in de beginfase van de aanleg van de Botlek kunnen de palen incidenteel doorgeprikt zijn tot de tussenzandlaag. Later kreeg men het inzicht dat het beter was de klei/veenlaag niet helemaal te doorsnijden tot op het zand. Het is zeer onwaarschijnlijk dat ze helemaal zijn doorgezet tot het Pleistocene watervoerende pakket.

De zandpalen zijn gespoten of geboord (nooit met casing aangelegd), waarbij ze met drainzand of grind werden gevuld. De zandpalen zijn waarschijnlijk niet dichtgeslibd omdat ze bestaan uit heel grof zand of grind. Bij grof zand en grind zijn de korrels te grof voor dichtslibben.

De grootste onzekerheid met betrekking tot zandpalen in het Botlekgebied is de locatie waar ze zijn toegepast. Dit is deels wellicht te achterhalen bij het archief van Gemeentewerken Kotterdam. De meeste zandpalen zijn echter aangelegd door bedrijven zelf en dus niet te vinden in dit archief. Voor dit onderzoek is aangenomen dat de zandpalen op alle terreinen zijn aangebracht tot 1 m boven de eerste zandlaag die in het Holoceen wordt aangetroffen.

Bijlage B: Afleiding stijghoogteverschil voor radiale stroming

De situatie voor radiale stroming naar de zandpaal lijkt sterk op de situatie waarvoor de formule van Dupuit-Thiem is afgeleid. Er is echter wel een verschil. In de situatie bij de zandpalen is er grondwateraanvulling en is de flux over de rand van het invloedsgebied gelijk aan nul.

Indien alle grondwateraanvulling (q) naar de zandpaal stroomt, is het debiet als functie van de straal r :

$$Q(r) = -\pi(r_2^2 - r^2)q$$

De stroomsnelheid is dan eenvoudig af te leiden:

$$v(r) = -\frac{Q}{2\pi r D} = -\frac{r_2^2 q}{2rD} + \frac{rq}{2D}$$

Hierin is D nu de verzadigde dikte van de ophooglaag. Aangenomen wordt dat het stijghoogteverval verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de verzadigde dikte: D is constant. Met behulp van de vergelijking van Darcy kan dan het stijghoogteverval worden bepaald:

$$h(r_2) - h(r_1) = \int_{r_1}^{r_2} -\frac{v(r)}{k} dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{r_2^2 q}{2rkD} - \frac{rq}{2kD} dr$$

Het oplossen van deze integraal geeft:

$$h(r_2) - h(r_1) = \frac{q}{2kD} \left[r_2^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \frac{1}{2}(r_2^2 - r_1^2) \right]$$

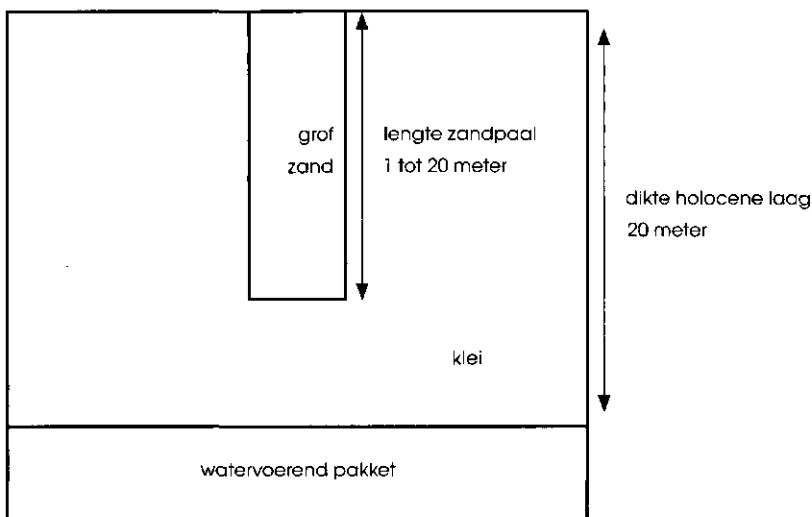
Indien we nu aannemen dat alle flux door de zandpaal stroomt, kunnen we de relatie tussen de flux door de zandpaal en het stijghoogteverval Δh_1 bepalen.

$$\Delta h_1 = \frac{Q_z / \pi r_2^2}{2kD} \left[r_2^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \frac{1}{2}(r_2^2 - r_1^2) \right] = \frac{Q_z}{2\pi k D} \left[\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right) \right]$$

Bijlage C: Gevoeligheidsanalyse effect zandpalen

In vergelijking (7) tot (13) staat de aanpak van het modelleren van zandpalen beschreven. Voor een generieke situatie is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Deze generieke situatie is schematisch weergegeven in figuur C1. Hierbij wordt uitgegaan van een 20 meter dikke Holocene laag. De lengte van de zandpaal varieert van 1 tot 20 meter. Een zandpaal van 20 meter is een zogenaamde doorgeprikte zandpaal en eindigt in het Pleistocene watervoerende pakket.



Figuur C1: Schematisatie testprobleem

In tabel 1 staan de waarden van de parameters die in de gevoeligheidsanalyse zijn gebruikt. Deze waarden zijn bepaald oa. uit de REGIS database en soms ook gebaseerd op veldmetingen (De Straat Milieu-adviseurs B.V., 2000). In deze bijlage wordt gekeken naar de afhankelijkheid van k_{zp} , L en k_{Hol} (horizontaal) op de reductie van de reistijd.

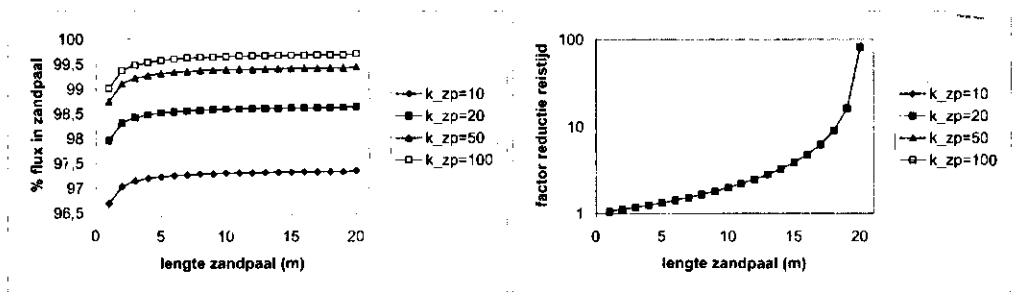
| | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| $k_{D_{oluhooqloag}}$ | 2 m ² /dag |
| k_{wvp} | 30 m/dag |
| k_{Hol} (horizontaal) | Variabel 0.0033, 0.033, 1.5 m/dag |
| k_{Hol} (verticaal) | 0.0033 m/dag |
| r_1 | 0.15 m |
| r_2 | 1.5 m |
| A_{zp} | 0.0707 m ² |
| A_{Hol} | 5.7750 m ² |
| k_{zp} | Variabel: 10, 20, 50, 100 m/dag |
| L | Variabel: 1, ..., 20 m |

Tabel 1: Parameters voor de zandpalen in de Botlek.

Figuur C2a toont het deel van de flux die door de zandpaal stroomt als functie van de lengte van de zandpaal voor een viertal waarden voor de doorlatendheid van de zandpaal. Figuur C2b toont de reductiefactor van de reistijd door het Holoceen. In dit voorbeeld is gekozen voor k_{Hol} (horizontaal)=1.5 m/dag en $k_{\text{wvp}}=30$ m/dag. De overige parameters kunnen in tabel 1 gevonden worden. Wat direct opvalt is dat vrijwel al het grondwater via de zandpaal stroomt. De k -waarde van de zandpaal heeft voor realistische waarden van grof zand geen significante invloed op de reductiefactor van de reistijd. De lengte van de zandpaal heeft voor de range 1 -20 m ook een beperkt effect op het deel van de flux dat door de zandpaal stroomt. Wel heeft de lengte van de zandpaal een grote invloed op de reductiefactor voor de reistijd.

$k_{\text{Doloceen}}(\text{horizontaal})=15 \text{ m}^2/\text{dag}$, $k_{\text{Doloceen}}(\text{verticaal})=81 \text{ m}^2/\text{dag}$

| lengte zandpaal | | kzandpaal=10 | | kzandpaal=20 | | kzandpaal=50 | | kzandpaal=100 | | |
|-----------------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------|----------|
| | | travel time | % flux in vt | travel time | % flux in vt | travel time | % flux in vt | travel time | % flux in vertical drain | |
| 1 | 0,05 | 0,05 | 1,051939 | 96,68807 | 1,051948 | 97,96468 | 1,051953 | 98,74696 | 1,051955 | 99,0105 |
| 2 | 0,1 | 0,1 | 1,109574 | 97,03042 | 1,109594 | 98,31615 | 1,109607 | 99,10408 | 1,109611 | 99,36953 |
| 3 | 0,15 | 0,15 | 1,173892 | 97,14508 | 1,173925 | 98,43387 | 1,173945 | 99,22369 | 1,173952 | 99,48979 |
| 4 | 0,2 | 0,2 | 1,246124 | 97,20251 | 1,246174 | 98,49283 | 1,246205 | 99,28368 | 1,246215 | 99,55002 |
| 5 | 0,25 | 0,25 | 1,327828 | 97,237 | 1,3279 | 98,52625 | 1,327943 | 99,31959 | 1,327957 | 99,5862 |
| 6 | 0,3 | 0,3 | 1,420998 | 97,26001 | 1,421097 | 98,55187 | 1,421156 | 99,34359 | 1,421176 | 99,61033 |
| 7 | 0,35 | 0,35 | 1,528231 | 97,27645 | 1,528364 | 98,56875 | 1,528444 | 99,36074 | 1,52847 | 99,62756 |
| 8 | 0,4 | 0,4 | 1,652968 | 97,28878 | 1,653146 | 98,58141 | 1,653253 | 99,37361 | 1,653278 | 99,64051 |
| 9 | 0,45 | 0,45 | 1,799877 | 97,29838 | 1,800114 | 98,59126 | 1,800257 | 99,38362 | 1,800300 | 99,65058 |
| 10 | 0,5 | 0,5 | 1,975447 | 97,30605 | 1,975765 | 98,59815 | 1,975856 | 99,39163 | 1,976019 | 99,65863 |
| 11 | 0,55 | 0,55 | 2,188971 | 97,31234 | 2,189401 | 98,60356 | 2,189659 | 99,39819 | 2,189745 | 99,66522 |
| 12 | 0,6 | 0,6 | 2,454248 | 97,31757 | 2,454838 | 98,61097 | 2,455192 | 99,40365 | 2,455328 | 99,67071 |
| 13 | 0,65 | 0,65 | 2,79269 | 97,322 | 2,793517 | 98,61552 | 2,794013 | 99,40827 | 2,794179 | 99,67536 |
| 14 | 0,7 | 0,7 | 3,239405 | 97,3258 | 3,240603 | 98,61942 | 3,241322 | 99,41224 | 3,241562 | 99,67935 |
| 15 | 0,75 | 0,75 | 3,865244 | 97,3291 | 3,868063 | 98,6228 | 3,859155 | 99,41567 | 3,859519 | 99,6828 |
| 16 | 0,8 | 0,8 | 4,76325 | 97,33198 | 4,76621 | 98,62516 | 4,767588 | 99,41868 | 4,768581 | 99,68562 |
| 17 | 0,85 | 0,85 | 6,228131 | 97,33452 | 6,233513 | 98,62837 | 6,236745 | 99,42133 | 6,237823 | 99,68849 |
| 18 | 0,9 | 0,9 | 8,994201 | 97,33678 | 9,006085 | 98,63069 | 9,01323 | 99,42369 | 9,015614 | 99,69086 |
| 19 | 0,95 | 0,95 | 16,78024 | 97,3388 | 16,22089 | 98,63277 | 16,24537 | 99,4258 | 16,25355 | 99,69298 |
| 20 | 1 | 1 | 30,00126 | 97,36113 | 31,57165 | 98,65568 | 32,22766 | 99,44909 | 32,44868 | 99,7184 |

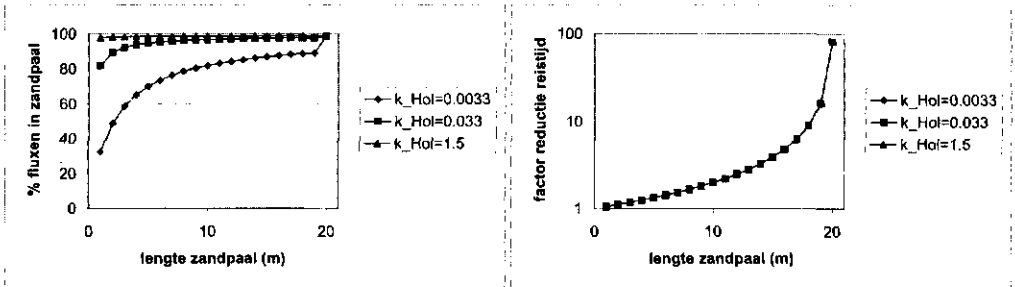


Figuur C2: Invloed van de k -waarde van de zandpaal op a. het percentage van de flux door de zandpaal en b. de reductiefactor van de reistijd.

Figuur C3 toont de invloed van de horizontale k -waarde van het Holoceen op het percentage van de flux door de zandpaal en de bijbehorende reductiefactor van de reistijd. Voor de doorlatendheid van de zandpaal is in deze berekening 20 m/dag gekozen. Hieruit blijkt dat alleen voor een lage waarde van de doorlatendheid dit een effect heeft op het deel van de flux dat door de zandpaal stroomt. In werkelijkheid weten we echter dat de bodemopbouw in het Holoceen op de locatie sterk gelaagd is en is te verwachten dat er een forse anisotropie zal zijn. Ook zullen zandpalen in praktijk al gauw meerdere meters in het Holoceen liggen, dus is de verwachting dat het overgrote deel van de flux via de zandpaal zal stromen.

$k_{zandpaal} = 20$ m/dag gekozen. Nog steeds geldt $KD_{\text{Holocene/zandpaal}} = 81 \text{ m}^2/\text{dag}$.

| lengte zandpaal | holoceen=0.0033 | | holoceen=0.033 | | holoceen=1.5 | | |
|-----------------|-----------------|-------------|----------------|-------------|--------------|--------------------------|----------|
| | travel time | % flux in v | travel time | % flux in v | travel time | % flux in vertical drain | |
| 1 | 0.05 | 1.050567 | 32.39432 | 1.051813 | 81.74647 | 1.051948 | 97.96468 |
| 2 | 0.1 | 1.108058 | 48.77527 | 1.109444 | 89.41456 | 1.109594 | 98.31615 |
| 3 | 0.15 | 1.172206 | 58.66346 | 1.173756 | 92.3006 | 1.173925 | 98.43387 |
| 4 | 0.2 | 1.244237 | 65.28061 | 1.245984 | 93.81462 | 1.246174 | 98.49283 |
| 5 | 0.25 | 1.3257 | 70.01946 | 1.327684 | 94.74712 | 1.3279 | 98.52825 |
| 6 | 0.3 | 1.418578 | 73.58037 | 1.42085 | 95.37915 | 1.421097 | 98.55187 |
| 7 | 0.35 | 1.525451 | 76.35397 | 1.528078 | 95.83579 | 1.528364 | 98.56975 |
| 8 | 0.4 | 1.649738 | 78.57539 | 1.652811 | 96.18115 | 1.653146 | 98.58141 |
| 9 | 0.45 | 1.796075 | 80.39459 | 1.799718 | 96.45148 | 1.800114 | 98.59128 |
| 10 | 0.5 | 1.970899 | 81.91175 | 1.975287 | 96.66885 | 1.975765 | 98.59915 |
| 11 | 0.55 | 2.183428 | 83.19632 | 2.188814 | 96.84743 | 2.189401 | 98.6056 |
| 12 | 0.6 | 2.447332 | 84.29799 | 2.4541 | 96.99674 | 2.454838 | 98.61097 |
| 13 | 0.65 | 2.7838 | 85.26321 | 2.792562 | 97.12345 | 2.793517 | 98.61552 |
| 14 | 0.7 | 3.227534 | 86.08937 | 3.239317 | 97.23232 | 3.240603 | 98.61942 |
| 15 | 0.75 | 3.839554 | 86.82742 | 3.856241 | 97.32687 | 3.858063 | 98.6228 |
| 16 | 0.8 | 4.737994 | 87.48368 | 4.76343 | 97.40975 | 4.76621 | 98.62576 |
| 17 | 0.85 | 6.185339 | 88.07102 | 6.228758 | 97.483 | 6.233513 | 98.62837 |
| 18 | 0.9 | 8.905869 | 88.58976 | 8.998162 | 97.5482 | 9.006085 | 98.63069 |
| 19 | 0.95 | 15.89866 | 89.07826 | 16.18873 | 97.60662 | 16.22089 | 98.63277 |
| 20 | 1 | 81.57165 | 88.65569 | 81.57165 | 98.65569 | 81.57165 | 98.65569 |



Figuur C3: Invloed van de k -waarde van de Holocene laag op a. het percentage van de flux door de zandpaal en b. de reductiefactor van de reistijd

Uit de gevoeligheidsanalyse kan geconcludeerd worden dat een groot deel van het transport door het bovenste deel van het Holoceen via de zandpalen zal lopen. De grootste onzekerheid zit in de reistijdreductie, die sterk wordt beïnvloed door de lengte van de zandpaal. Hierbij is beschouwd dat de stroombaan via het Holoceen naar het Pleistocene watervoerende pakket stroomt. Indien de stroombaan via een zandige geulopvulling horizontaal naar het oppervlaktewater stroomt, zal de reductiefactor voor de reistijd nog groter zijn. In deze berekening wordt de factor sterk gedempt door de stroming door het onderste deel van het Holoceen waarin de zandpaal niet ligt.