



# BTO Verkennend Onderzoek



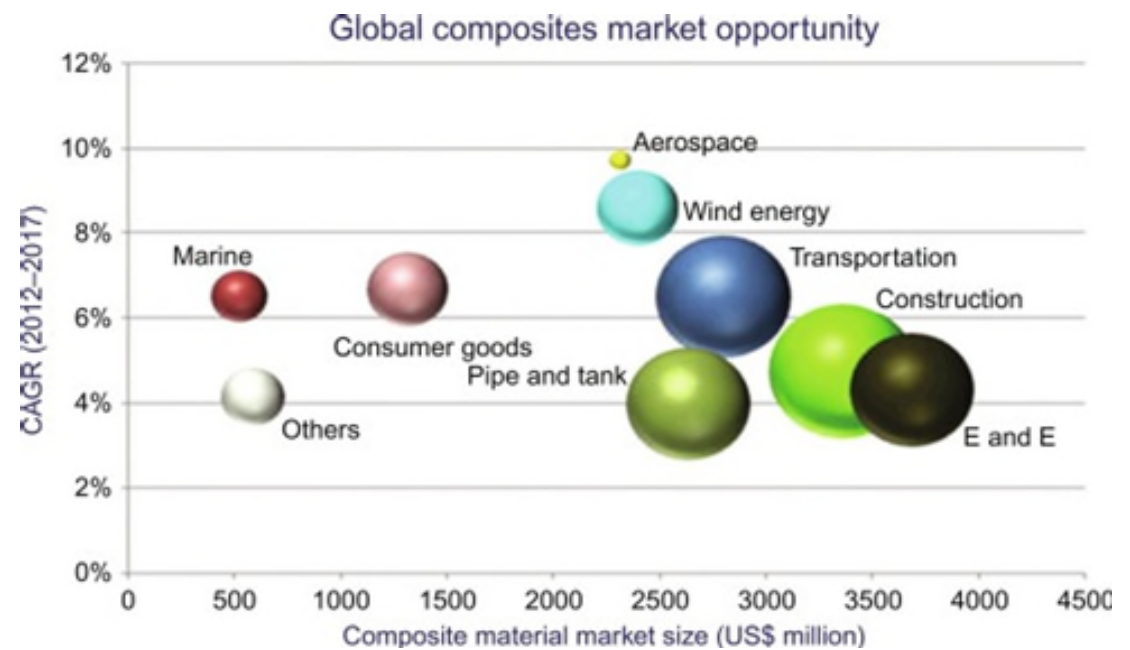
## Composietmaterialen in drinkwaterzuivering

### Samenvatting

Composietmaterialen staan volop in de belangstelling. Door de combinatie van verschillende materialen in één geheel kunnen ook verschillende eigenschappen worden gecombineerd, wat een synergistisch effect kan hebben. In de drinkwaterzuivering zijn verschillende voorbeelden van toepassing ervan bekend, waardoor processen meerdere doelen tegelijk kunnen bereiken (zoals een betere verwijdering van organische microverontreinigingen in combinatie met desinfectie, minder membraanvervuiling of een langere standtijd van filtermateriaal). Het is zelfs mogelijk afvalstoffen uit de zuivering als composietmaterialen nuttig toe te passen, waardoor de hoeveelheid af te voeren afval afneemt.

### Consequenties voor u

	Laag	Middel	Hoog	Beknopte uitleg
Impact			*	Toepassing kan leiden tot effectieve verwijdering organische microverontreinigingen, metalen, deeltjes en dergelijke, met minder kosten, energieverbruik, milieupact
Zekerheid		*		Meeste nu nog op lab- of pilotschaal getest



*Bijchrift: Toepassing ("Compound annual growth rate" (CAGR)) van composietmaterialen op diverse terreinen (İşmal and Paul 2018)*



## Trendbeschrijving en achtergrond **Composietmaterialen**

### Toepassingen in waterzuivering

Composietmaterialen bestaan uit combinaties van heel verschillende materialen. Hierdoor kunnen uiteenlopende eigenschappen worden gecombineerd in één deeltje of één systeem. Dit biedt nieuwe en interessante toepassingsmogelijkheden. Composietmaterialen worden dan ook op steeds meer terreinen ingezet. Analyse van publicaties toont aan dat dit ook het geval is voor de toepassing in de drinkwaterzuivering. Processen waarin composietmaterialen worden gebruikt zijn filtratie, flocculatie, desinfectie, adsorptie/katalyse/oxidatie. In bepaalde gevallen kunnen reststoffen uit de drinkwaterzuivering zelf worden ingezet in composietmaterialen die in het zuiveringsproces worden toegepast.

Door verschillende materialen te combineren, is het mogelijk om verschillende eigenschappen en activiteiten in één systeem te verenigen. Er zijn de afgelopen jaren verschillende composietmaterialen, vaak op nano-niveau, ontwikkeld die in de waterzuivering kunnen worden toegepast. Voorbeelden zijn nanocomposiet membranen, zilverdeeltjes in filtermaterialen, de combinatie van polymeren met ijzer- en aluminiumverbindingen voor de verwijdering van bijvoorbeeld arseen, katalysatoren, en adsorbentia gemaakt van afvalstoffen uit de drinkwaterproductie zelf.

### Nanocomposieten in membranen

Er zijn verschillende manieren om “nanocomposiet” membraansystemen te maken<sup>1</sup>. Bij de eerste methode wordt een copolymeer gevormd van monomeren met verschillende specifieke eigenschappen. Dit kan via een “normale” copolymerisatie, maar

ook door crosslinking of grafting met polymere ketens toe te passen. Op deze manier kunnen bijvoorbeeld de poriegrootte en de oppervlaktelading als functie van de pH worden geregeld. Hierdoor kan verwijdering zowel op molecuulgrootte- als -lading worden gebaseerd<sup>2</sup>. Bovendien kunnen op deze manier bijvoorbeeld divalente ionen als  $\text{Ca}^{2+}$  en  $\text{Mg}^{2+}$  worden doorgelaten, terwijl organische microverontreinigingen (OMV) worden tegengehouden. Bij de tweede methode worden de polymeren gecombineerd met nano-materialen als ZnO of  $\text{SiO}_2$ <sup>3</sup>. Op deze manier kan fouling worden tegengegaan, en neemt de standtijd van de membranen met een factor 3-4 toe<sup>4</sup>. Door grafeenoxide toe te voegen zou ook de verwijdering van OMV verbeteren<sup>5</sup>. Door gebruik te maken van koolstof nanotubes (CNTs), eventueel gemodificeerd met bijvoorbeeld  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ -deeltjes, kan het debiet door het membraan worden verhoogd, en kunnen extra eigenschappen, als As-verwijdering worden

<sup>1</sup> Yin, J. and Deng, B. (2015) Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment. *Journal of Membrane Science* 479, 256-275

<sup>2</sup> Ge, S., Feng, L., Zhang, L., Xu, Q., Yang, Y., Wang, Z. and Kim, K.H. (2017) Rejection rate and mechanisms of drugs in drinking water by nanofiltration technology. *Environmental Engineering Research* 22(3), 329-338.  
Hu, P., Tian, B., Xu, Z. and Jason Niu, Q. (2020) Fabrication of high performance nanofiltration membrane on a coordination-driven assembled interlayer for water purification. *Separation and Purification Technology* 235. Nikbakht Fini, M., Madsen, H.T. and Muff, J. (2019) The effect of water matrix, feed concentration and recovery on the rejection of pesticides using NF/RO

membranes in water treatment. *Separation and Purification Technology* 215, 521-527.

<sup>3</sup> Cui, J., Zhou, Z., Xie, A., Meng, M., Cui, Y., Liu, S., Lu, J., Zhou, S., Yan, Y. and Dong, H. (2019) Bio-inspired fabrication of superhydrophilic nanocomposite membrane based on surface modification of  $\text{SiO}_2$  anchored by polydopamine towards effective oil-water emulsions separation. *Separation and Purification Technology* 209, 434-442.  
Li, X., Li, J., Van Der Bruggen, B., Sun, X., Shen, J., Han, W. and Wang, L. (2015) Fouling behavior of polyethersulfone ultrafiltration membranes functionalized with sol-gel formed ZnO nanoparticles. *RSC Advances* 5(63), 50711-50719.

<sup>4</sup> Chae, S.R., Yamamura, H., Ikeda, K. and Watanabe, Y. (2008) Comparison of fouling characteristics of two different poly(vinylidene fluoride) microfiltration membranes in a pilot-scale drinking water treatment system using pre-coagulation/sedimentation, sand filtration, and chlorination. *Water Research* 42(8-9), 2029-2042.

<sup>5</sup> Zambianchi, M., Durso, M., Liscio, A., Treossi, E., Bettini, C., Capobianco, M.L., Aluigi, A., Kovtun, A., Ruani, G., Corticelli, F., Bruciale, M., Palermo, V., Navacchia, M.L. and Melucci, M. (2017) Graphene oxide doped polysulfone membrane adsorbents for the removal of organic contaminants from water. *Chemical Engineering Journal* 326, 130-140



geïncorporeerd<sup>6</sup>. Binnen KWR is onderzoek gedaan naar commerciële TFC membranen met zeolieten erin, voor de verwijdering van OMV<sup>7</sup>.

Andere voorbeelden zijn point-of-use membranen met daarin zilveren nanodraad voor elektrochemische desinfectie<sup>8</sup>, en metalen membranen met een TiO<sub>2</sub>-coating. Zo kunnen antibacteriële eigenschappen worden geïncorporeerd in keramische membranen door ze te modificeren met zilveren nanodeeltjes, eventueel in combinatie met bijvoorbeeld grafeenoxide, om ook de verwijdering van OMV te bevorderen<sup>9</sup>. Geavanceerde membranen kunnen bijvoorbeeld worden toegepast om drinkwater te maken uit afvalwater<sup>10</sup>

### Andere filtermaterialen

De functionaliteit van filterbedmaterialen kan ook worden uitgebreid door nanodeeltjes toe te passen. Een ander voorbeeld zijn kiezelbedden met kleiballetjes waarin industrieel afval als zaagsel of aluminiumslib was verwerkt<sup>11</sup>, of actieve kool<sup>12</sup>. Actieve kool is zeer geschikt voor de adsorptie van OMV, maar kan door een combinatie met ijzeroxide ook As verwijderen<sup>13</sup>. Microcystinen werden uit water verwijderd met behulp van puinsteendeeltjes, gemodificeerd met koper- of ijzerionen<sup>14</sup>. Door het te combineren met TiO<sub>2</sub> konden humuszuren niet alleen worden geadsorbeerd in bijvoorbeeld CNTs, maar ook

onder invloed van UV-straling worden afgebroken ("self-cleaning systeem")<sup>15</sup>.

### Vlokmiddelen

Op het gebied van vlokmiddelen worden composietmaterialen gebruikt in de vorm van bijvoorbeeld polyaluminium- of polyijzerchloride (PAICl of PFeCl) in combinatie met polyacrylamide of kaliumpermanganaat<sup>16</sup> voor de verwijdering van fosfaat, of polydimethyldiallylammoniumchloride voor de verwijdering van algen<sup>17</sup>. Andere effectieve combinaties voor de verwijdering van algen of extracellulair materiaal bleken PACl/chitosan, en combinaties met polysilicaat aluminium magnesium (PSAM) en kationisch polyacrylamine (CPAM)<sup>18</sup>. Door PACl te

<sup>6</sup> Gao, S.J., Zhu, Y.Z., Zhang, F. and Jin, J. (2015) Superwetting polymer-decorated SWCNT composite ultrathin films for ultrafast separation of oil-in-water nanoemulsions. *Journal of Materials Chemistry A* 3(6), 2895-2902.  
Luan, H., Xu, J., Tan, Z., Zheng, A. and Huang, H. (2019) Adsorptive filtration of As(III) from drinking water by CuFe<math>2</math>-O<math>4</math> particles embedded in carbon nanotube membranes. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 94(9), 2816-2825.

<sup>7</sup> Albergamo, V., B. Blankert, W. G. J. van der Meer, P. de Voogt and E. R. Cornelissen (2020). "Removal of polar organic micropollutants by mixed-matrix reverse osmosis membranes." *Desalination* 479

<sup>8</sup> Tan, X., Chen, C., Hu, Y., Wen, J., Qin, Y., Cheng, J. and Chen, Y. (2018) Novel AgNWs-PAN/TPU membrane for point-of-use drinking water electrochemical disinfection. *Science of the Total Environment* 637-638, 408-417.

Wen, J., Tan, X., Hu, Y., Guo, Q. and Hong, X. (2017) Filtration and Electrochemical Disinfection Performance of PAN/PANI/AgNWs-CC Composite Nanofiber Membrane. *Environmental Science and Technology* 51(11), 6395-6403.

<sup>9</sup> Lv, Y., Liu, H., Wang, Z., Liu, S., Hao, L., Sang, Y., Liu, D., Wang, J. and Boughton, R.I. (2009) Silver nanoparticle-decorated porous ceramic composite for water treatment. *Journal of Membrane Science* 331(1-2), 50-56.

Şimşek, B., Sevgili, I., Ceran, O., Korucu, H. and Şara, O.N. (2019) Nanomaterials based drinking water purification: Comparative study with a conventional water purification process. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 63(1), 96-112.

<sup>10</sup> Tang, C.Y., Yang, Z., Guo, H., Wen, J.J., Nghiem, L.D., Cornelissen, E. Potable Water Reuse through Advanced Membrane Technology (2018) *Environmental Science and Technology*, 52 (18), pp. 10215-10223

<sup>11</sup> Rajapakse, J., Gallage, C., Dareeju, B., Madabhushi, G. and Fenner, R. (2017) Estimation of poisson's ratio and variation of tensile yield strength of composite clay balls used in pebble matrix filtration. *Journal of Materials in Civil Engineering* 29(9).

<sup>12</sup> Chaukura, N., Chiworeso, R., Gwenzi, W., Motsa, M.M., Munzeiwa, W., Moyo, W., Chikurunhe, I. and Nkambule, T.T.I. (2020) A new generation low-cost biochar-clay composite 'biscuit' ceramic filter for point-of-use water treatment. *Applied Clay Science* 185.

<sup>13</sup> Zhao, Y., Chen, Y., Lin, S., Wang, C. and Cao, Y. (2004) Development and evaluation of a composite structural filter for removal of arsenic in drinking water. *Wei sheng yan jiu = Journal of hygiene research* 33(4), 413-415.

<sup>14</sup> Gurbuz, F., Ceylan, Ş., Odabaşı, M. and Codd, G.A. (2016) Hepatotoxic microcystin removal using pumice embedded monolithic composite cryogel as an alternative water treatment method. *Water Research* 90, 337-343.

<sup>15</sup> Orha, C., Manea, F., Pop, A., Bandas, C. and Lazau, C. (2016) TiO<math>2</math>-nanostructured carbon composite sorbent/photocatalyst for humic acid removal from water. *Desalination and Water Treatment* 57(30), 14178-14187.

<sup>16</sup> Yang, J., Zhang, H., Yu, M., Emmanuelawati, I., Zou, J., Yuan, Z. and Yu, C. (2014) High-content, well-dispersed  $\gamma$ -Fe<math>2</math>-O<math>3</math>

nanoparticles encapsulated in macroporous silica with superior arsenic removal performance. *Advanced Functional Materials* 24(10), 1354-1363.  
Yang, Y.L., Li, X., Feng, Q.Y., Nie, X.F. and Li, G.B. (2007) Experimental study of phosphorus removal technique by coagulation in drinking water treatment. *Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology* 39(6), 989-992

<sup>17</sup> Zhang, Y.J., Zhao, X.L., Li, X.X., Liu, C. and Zhu, L.L. (2010) Performance of PAC/PDM composite coagulants for removal of algae from Lake Taihu waters in summer. *Water Science and Technology* 62(2), 330-339.

<sup>18</sup> Ma, C., Hu, W., Pei, H., Xu, H. and Pei, R. (2016) Enhancing integrated removal of *Microcystis aeruginosa* and adsorption of microcystins using chitosan-aluminum chloride combined coagulants: Effect of chemical dosing orders and coagulation mechanisms. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 490, 258-267.

Ma, C., Pei, H., Hu, W., Wang, Y., Xu, H. and Jin, Y. (2017) The enhanced reduction of C- and N-DBP formation in treatment of source water containing *Microcystis aeruginosa* using a novel CTSAC composite coagulant. *Science of the Total Environment* 579, 1170-1178.

Ma, J., Wang, R., Wang, X., Zhang, H., Zhu, B., Lian, L. and Lou, D. (2019) Drinking water treatment by stepwise flocculation using polysilicate aluminum magnesium and cationic polyacrylamide. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7(3).



combineren met CNT kunnen tijdens coagulatie/flocculatie meer humuszuren worden verwijderd<sup>19</sup>. Ook hier bleek het mogelijk te zijn een zelfreinigend systeem te maken door de CNT te combineren met TiO<sub>2</sub>, waarbij humuszuren niet alleen via adsorptie worden verwijderd, maar ze tegelijkertijd ook worden afgebroken<sup>20</sup>. Dit systeem werd ook gebruikt om As(III) te verwijderen. Een hoge affiniteit voor ammonia werd verkregen door actieve kool te combineren met een type zeoliet (fausiasiet)<sup>21</sup>. In alle gevallen bleek wel dat de pH een belangrijk aandachtspunt was voor het verkrijgen van goede resultaten.

### Adsorptie/katalyse en reacties

In bovenstaande paragrafen zijn composietmaterialen die betrokken zijn in chemische reacties of katalyse al ter sprake gekomen, maar er zijn ook composietmaterialen die speciaal met dit oogmerk worden toegepast. Koper-zeoliet

composieten bleken in staat te zijn het nitraatgehalte van drinkwater te verlagen, maar hadden het nadeel dat er koper in het water lekte<sup>22</sup>. Magnetisch grafeenoxide, verkregen door co-precipitatie van FeCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O en FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O op nanosheets van grafeenoxide, kon As(V) verwijderen<sup>23</sup>. Door  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> te incapsuleren in macroporeus silica, of door Al-slib te combineren met g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> zou echter ook As(III) verwijderd kunnen worden<sup>24</sup>. CNTs gemodificeerd met TiO<sub>2</sub> zijn al eerder genoemd, maar door het TiO<sub>2</sub> te modificeren met N en Pd ontstond een synergistisch effect, waardoor de fotoactiviteit van het TiO<sub>2</sub> voor de afbraak van NOM toenam<sup>25</sup>. Formaldehyde bleek effectief afgebroken te kunnen worden door O<sub>3</sub>/UV in combinatie met Si-N-Fe en B-N-Fe composieten<sup>26</sup>, en een nanocomposiet bestaande uit Ag, TiO<sub>2</sub> en  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bleek onder invloed van UV-A straling het nitraatgehalte van het water effectief te verlagen<sup>27</sup>. Broomaat in water kon fotokatalytisch worden omgezet bij een breed spectrum aan golflengtes door

een driedimensionaal polyaniline/WO<sub>2,72</sub> composietmateriaal<sup>28</sup>. Een ander voorbeeld is een hoog adsorptie-oppervlak te gebruiken om veel microverontreinigingen of humuszuren op te verzamelen, waar ze dan door een (katalytische) reactie kunnen worden afgebroken. Dit leidt niet alleen tot een betere zuivering, maar heeft vaak ook een zelfreinigend vermogen van het filtermateriaal tot gevolg, waardoor de totale behandelingskosten lager worden.

### Desinfectie

Zoals hierboven al eens genoemd, kunnen composietmaterialen een desinfecterend effect teweeg brengen. Met name zilveren nanodeeltjes hebben een antibacteriële werking, die in een zandfilter kan worden toegepast in combinatie met alginaat, polyvinylalcohol of polyvinyl pyrrolidon, of bio-

<sup>19</sup> Hui, X., Jiao, R., Xiao, F. and Wang, D. (2016) Enhanced removal for humic acid (HA) and coagulation process using carbon nanotubes (CNTs)/polyaluminum chloride (PACl) composites coagulants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 490, 189-199.

<sup>20</sup> Orha, C., Manea, F., Pop, A., Bandas, C. and Lazau, C. (2016) TiO<sub>2</sub>-nanoparticle-structured carbon composite sorbent/photocatalyst for humic acid removal from water. *Desalination and Water Treatment* 57(30), 14178-14187.

<sup>21</sup> Wongcharee, S., Aravinthan, V. and Erdei, L. (2020) Removal of natural organic matter and ammonia from dam water by enhanced coagulation combined with adsorption on powdered composite nano-adsorbent. *Environmental Technology and Innovation* 17.

<sup>22</sup> Zanter, K.D., Brehm, A., Antons, U., Deeken, S. and Knauss, M. (2001) Production of MFI-copper composites. *Chemie-Ingenieur-Technik* 73(8), 941, 1028-1032.

<sup>23</sup> Sheng, G., Li, Y., Yang, X., Ren, X., Yang, S., Hu, J. and Wang, X. (2012) Efficient removal of arsenate by versatile magnetic graphene oxide composites. *RSC Advances* 2(32), 12400-12407.

<sup>24</sup> Yang, J., Zhang, H., Yu, M., Emmanuelawati, I., Zou, J., Yuan, Z. and Yu, C. (2014) High-content, well-dispersed  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nanoparticles encapsulated in macroporous silica with superior arsenic removal performance. *Advanced Functional Materials* 24(10), 1354-1363.

Kim, J.G., Kim, H.B., Yoon, G.S., Kim, S.H., Min, S.J., Tsang, D.C.W. and Baek, K. (2020) Simultaneous oxidation and adsorption of arsenic by one-step fabrication of alum sludge and graphitic carbon nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). *Journal of Hazardous Materials* 383.

<sup>25</sup> Ndlangamandla, N.G., Kuvarega, A.T., Msagati, T.A.M., Mamba, B.B. and Nkambule, T.T.I. (2018) A novel photodegradation approach for the efficient removal of natural organic matter (NOM) from water. *Physics and Chemistry of the Earth* 106, 97-106.

<sup>26</sup> Skvortsova, L.N., Chukhlomina, L.N., Mokrousov, G.M. and Krotov, A.E. (2013) Use of Si-N-Fe and B-N-Fe compositions for formaldehyde degradation in combined heterogeneous and homogeneous catalytic processes. *Russian Journal of Applied Chemistry* 86(1), 37-41.

<sup>27</sup> Zarei, S., Farhadian, N., Akbarzadeh, R., Pirsaeed, M., Asadi, A. and Safaei, Z. (2019) Fabrication of novel 2D Ag-TiO<sub>2</sub>/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Chitosan nano-composite photocatalyst toward enhanced photocatalytic reduction of nitrate. *International Journal of Biological Macromolecules*.

<sup>28</sup> Zhao, X., You, Y., Huang, S., Cheng, F., Chen, P., Li, H. and Zhang, Y. (2019) Facile construction of reduced graphene oxide supported three-dimensional polyaniline/WO<sub>2,72</sub> nanobelts as a full solar spectrum light response catalyst for efficient photocatalytic conversion of bromate. *Chemosphere* 222, 781-788.



houtschool gecoat met chitosan<sup>29</sup>. Ook andere metalen, als zink hebben een desinfecterende werking, en zijn toegepast in combinatie met bijvoorbeeld bentoniet<sup>30</sup>. Het zink in dit materiaal diffundeerde naar het oppervlak, waardoor bacteriën in het water werden geïnactiveerd. Overigens bleek ook een gelaagd systeem van grafeen en quaternair ammoniumzout (benzalkoniumchloride) antibacteriële eigenschappen te vertonen<sup>31</sup>.

### Reststoffen gebruik in waterzuivering

Het gebruik van composietmaterialen waarin Al- of Fe-slib werd gebruikt is al eerder genoemd voor de verwijdering van fosfaat en arseen<sup>32</sup>. Slib uit de drinkwaterproductie bevat ook vaak silicaten, en adsorbentia die worden gevormd uit een combinatie van ijzer- en siliciumoxide kunnen worden ingezet voor de verwijdering van kleurstoffen en bijvoorbeeld nitriet<sup>33</sup>. Door het waterijzer te pyrolyseren in een argon-atmosfeer ontstond Fe<sup>0</sup>/Fe<sub>3</sub>C, dat als

katalysator fungeerde voor de afbraak van ciprofloxacin<sup>34</sup>. Een extra voordeel van deze katalysator is dat het materiaal eenvoudig te verwijderen is, omdat het magnetisch is. Er hoeven niet per se afvalstoffen uit de drinkwaterzuivering zelf te worden gebruikt. Combinatie van drinkwaterslib met as uit de verbranding van stedelijk afval of met hoogovenslakken bleek te leiden tot een composiet met adsorptiecapaciteit voor Cd, Pb, Zn, arsenaat en dichromaat uit water<sup>35</sup>.

<sup>29</sup> Hu, Z., Zhang, L., Zhong, L., Zhou, Y., Xue, J. and Li, Y. (2019) Preparation of an antibacterial chitosan-coated biochar-nanosilver composite for drinking water purification. *Carbohydrate Polymers* 219, 290-297.  
<sup>30</sup> Lin, S., Huang, R., Cheng, Y., Liu, J., Lau, B.L.T. and Wiesner, M.R. (2013) Silver nanoparticle-alginate composite beads for point-of-use drinking water disinfection. *Water Research* 47(12), 3959-3965.  
<sup>31</sup> Skiba, M., Pivovarov, A., Kateryna, S. and Vorobyova, V. (2018) One-pot synthesis of silver nanoparticles and composite materials for drinking water disinfection.  
<sup>32</sup> Pouraboulghasem, H., Ghorbanpour, M., Shayegh, R. and Lotfiman, S. (2016) Synthesis, characterization and antimicrobial activity of alkaline ion-exchanged ZnO/bentonite nanocomposites. *Journal of Central South University* 23(4), 787-792.

<sup>33</sup> Xie, A.G., Cai, X. and Tan, S.Z. (2010) The preparation and property of few-layered graphene/benzalkonium chloride composite, pp. 742-744  
<sup>34</sup> Choi, D., Oh, J.J., Lee, J., Park, Y.K., Lam, S.S. and Kwon, E.E. (2019) Valorization of alum sludge via a pyrolysis platform using CO<sub>2</sub> as reactive gas medium. *Environment International* 132.  
<sup>35</sup> Meng, L., Chan, Y., Wang, H., Dai, Y., Wang, X. and Zou, J. (2016) Recycling of iron and silicon from drinking water treatment sludge for synthesis of magnetic iron oxide@SiO<sub>2</sub> composites. *Environmental Science and Pollution Research* 23(6), 5122-5133.  
<sup>36</sup> Zhu, S., Wang, W., Xu, Y., Zhu, Z., Liu, Z. and Cui, F. (2019) Iron sludge-derived magnetic Fe<sub>0</sub>/Fe<sub>3</sub>C catalyst for oxidation of ciprofloxacin via peroxymonosulfate activation. *Chemical Engineering Journal* 365, 99-110.  
<sup>37</sup> Zhu, S., Xu, Y., Zhu, Z., Liu, Z. and Wang, W. (2020) Activation of peroxymonosulfate by magnetic Co-Fe/SiO<sub>2</sub> layered catalyst

derived from iron sludge for ciprofloxacin degradation. *Chemical Engineering Journal* 384.  
<sup>38</sup> Ji, Z. and Pei, Y. (2019) Geopolymers produced from drinking water treatment residue and bottom ash for the immobilization of heavy metals. *Chemosphere* 225, 579-587.  
<sup>39</sup> Ji, Z. and Pei, Y. (2020) Immobilization efficiency and mechanism of metal cations (Cd<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup>) and anions (AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup> and Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>) in wastes-based geopolymer. *Journal of Hazardous Materials* 384.  
<sup>40</sup> Ji, Z., Su, L. and Pei, Y. (2020) Synthesis and toxic metals (Cd, Pb, and Zn) immobilization properties of drinking water treatment residuals and metakaolin-based geopolymers. *Materials Chemistry and Physics* 242.



## Relevantie

### Combinatie van verschillende effecten

Verschillende materialen hebben ook verschillende eigenschappen. Door in één geheel meerdere materialen te combineren, kunnen ook verschillende eigenschappen gecombineerd worden, zoals verwijdering met het zelfreinigend vermogen van het oppervlak. Ook kunnen verwijdering van stoffen en desinfectie in één processtap worden gecombineerd. Er zijn veel mogelijkheden om stoffen te combineren, en dit wordt nog interessanter als hiervoor stoffen gebruikt kunnen worden die (in hetzelfde proces) als afvalstof vrijkomen. Dit biedt drinkwaterbedrijven de mogelijkheid om efficiëntere processen te maken, en eventueel de hoeveelheid te lozen afval te verminderen.

### Efficiëntere processen

Doordat verschillende effecten kunnen worden gecombineerd, kan de drinkwaterzuivering efficiënter worden. Dit betekent dat minder chemicaliën en energie nodig zijn, dat standtijden toenemen door het ontstane zelfreinigende vermogen, en/of dat stoffen worden hergebruikt. Dit is niet alleen interessant vanuit duurzaamheids oogpunt, maar ook vanuit het oogpunt van het verlagen van de milieu-impact.

Niet alle genoemde processen zijn al even ver in hun ontwikkeling. Sommige worden al op full-scale toegepast (zoals bepaalde membraanmaterialen), terwijl andere nog alleen op labschaal zijn uitgetest. Het is mogelijk dat opschalen tot full scale dus nog wel een uitdaging is, afhankelijk van het type materiaal en/of de toepassing. Een punt dat vaak meer aandacht verdient zijn eventuele nadelen van het gebruik van composietmaterialen, zoals het lekken van stoffen (bijvoorbeeld metalen) in het water.

### Keywords

Electrocoagulatie, electroflocculatie, electro-dialyse, electrically conductive membranes, electro-oxidation, electro-Fenton, electro-peroxone



## Meer informatie

- Ajmani, G.S., Abbott-Chalew, T., Teychene, B., Wang, Y., Jacangelo, J.G. and Huang, H. (2014) Effect of hydrodynamic diameter on the sieving of waterborne carbon nanotubes by porous membranes. *Journal of Membrane Science* 470, 470-478.
- Al-Aseeri, M. and Bu-Ali, Q. (2006) Membrane filtration systems: Classification & selection. *Chemical Engineer* (778), 44-46.
- Albergamo, V., Blankert, B., van der Meer, W.G.J., de Voogt, P., Cornelissen, E.R. Removal of polar organic micropollutants by mixed-matrix reverse osmosis membranes (2020) *Desalination*, 479, art. no. 114337.
- Apul, O.G., Hoogesteijn von Reitzenstein, N., Schoepf, J., Ladner, D., Hristovski, K.D. and Westerhoff, P. (2017) Superfine powdered activated carbon incorporated into electrospun polystyrene fibers preserve adsorption capacity. *Science of the Total Environment* 592, 458-464.
- Chae, S.R., Yamamura, H., Ikeda, K. and Watanabe, Y. (2008) Comparison of fouling characteristics of two different polyvinylidene fluoride microfiltration membranes in a pilot-scale drinking water treatment system using pre-coagulation/sedimentation, sand filtration, and chlorination. *Water Research* 42(8-9), 2029-2042.
- Chaukura, N., Chiworeso, R., Gwenzi, W., Motsa, M.M., Munzeiwa, W., Moyo, W., Chikurunhe, I. and Nkambule, T.T.I. (2020) A new generation low-cost biochar-clay composite 'biscuit' ceramic filter for point-of-use water treatment. *Applied Clay Science* 185.
- Choi, D., Oh, J.I., Lee, J., Park, Y.K., Lam, S.S. and Kwon, E.E. (2019) Valorization of alum sludge via a pyrolysis platform using CO<sub>2</sub> as reactive gas medium. *Environment International* 132.
- Cui, J., Zhou, Z., Xie, A., Meng, M., Cui, Y., Liu, S., Lu, J., Zhou, S., Yan, Y. and Dong, H. (2019) Bio-inspired fabrication of superhydrophilic nanocomposite membrane based on surface modification of SiO<sub>2</sub> anchored by polydopamine towards effective oil-water emulsions separation. *Separation and Purification Technology* 209, 434-442.
- Frías, M., Vigil De La Villa, R., De Soto, I., García, R. and Baloa, T.A. (2014) Influence of activated drinking-water treatment waste on binary cement-based composite behavior: Characterization and properties. *Composites Part B: Engineering* 60, 14-20.
- Fu, J., Ji, M., Wang, Z., Jin, L. and An, D. (2006) A new submerged membrane photocatalysis reactor (SMPR) for fulvic acid removal using a nano-structured photocatalyst. *Journal of Hazardous Materials* 131(1-3), 238-242.
- Gao, S.J., Zhu, Y.Z., Zhang, F. and Jin, J. (2015) Superwetting polymer-decorated SWCNT composite ultrathin films for ultrafast separation of oil-in-water nanoemulsions. *Journal of Materials Chemistry A* 3(6), 2895-2902.
- Ge, S., Feng, L., Zhang, L., Xu, Q., Yang, Y., Wang, Z. and Kim, K.H. (2017) Rejection rate and mechanisms of drugs in drinking water by nanofiltration technology. *Environmental Engineering Research* 22(3), 329-338.
- Gurbuz, F., Ceylan, Ş., Odabaşı, M. and Codd, G.A. (2016) Hepatotoxic microcystin removal using pumice embedded monolithic composite cryogel as an alternative water treatment method. *Water Research* 90, 337-343.
- Hu, P., Tian, B., Xu, Z. and Jason Niu, Q. (2020) Fabrication of high performance nanofiltration membrane on a coordination-driven assembled interlayer for water purification. *Separation and Purification Technology* 235.





- Hu, Z., Zhang, L., Zhong, L., Zhou, Y., Xue, J. and Li, Y. (2019) Preparation of an antibacterial chitosan-coated biochar-nanosilver composite for drinking water purification. *Carbohydrate Polymers* 219, 290-297.
- Hui, X., Jiao, R., Xiao, F. and Wang, D. (2016) Enhanced removal for humic-acid (HA) and coagulation process using carbon nanotubes (CNTs)/polyaluminium chloride (PACl) composites coagulants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 490, 189-199.
- İsmail, Ö. E. and R. Paul (2018). 17 - Composite textiles in high-performance apparel. *High-Performance Apparel*. J. McLoughlin and T. Sabir, Woodhead Publishing: 377-420.
- Ji, Z. and Pei, Y. (2019) Geopolymers produced from drinking water treatment residue and bottom ash for the immobilization of heavy metals. *Chemosphere* 225, 579-587.
- Ji, Z. and Pei, Y. (2020) Immobilization efficiency and mechanism of metal cations ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$ ) and anions ( $\text{AsO}_4^{3-}$  and  $\text{CrO}_7^{2-}$ ) in wastes-based geopolymer. *Journal of Hazardous Materials* 384.
- Ji, Z., Su, L. and Pei, Y. (2020) Synthesis and toxic metals (Cd, Pb, and Zn) immobilization properties of drinking water treatment residuals and metakaolin-based geopolymers. *Materials Chemistry and Physics* 242.
- Kim, J.G., Kim, H.B., Yoon, G.S., Kim, S.H., Min, S.J., Tsang, D.C.W. and Baek, K. (2020) Simultaneous oxidation and adsorption of arsenic by one-step fabrication of alum sludge and graphitic carbon nitride ( $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ). *Journal of Hazardous Materials* 383.
- Kim, J.H., Park, P.K., Lee, C.H. and Kwon, H.H. (2008) Surface modification of nanofiltration membranes to improve the removal of organic micro-pollutants (EDCs and PhACs) in drinking water treatment: Graft polymerization and cross-linking followed by functional group substitution. *Journal of Membrane Science* 321(2), 190-198.
- Li, Q., Pan, S., Li, X., Liu, C., Li, J., Sun, X., Shen, J., Han, W. and Wang, L. (2015a) Hollow mesoporous silica spheres/polyethersulfone composite ultrafiltration membrane with enhanced antifouling property. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 487, 180-189.
- Li, X., Li, J., Van Der Bruggen, B., Sun, X., Shen, J., Han, W. and Wang, L. (2015b) Fouling behavior of polyethersulfone ultrafiltration membranes functionalized with sol-gel formed ZnO nanoparticles. *RSC Advances* 5(63), 50711-50719.
- Lin, S., Huang, R., Cheng, Y., Liu, J., Lau, B.L.T. and Wiesner, M.R. (2013) Silver nanoparticle-alginate composite beads for point-of-use drinking water disinfection. *Water Research* 47(12), 3959-3965.
- Liu, Y.L., Wang, X.M., Yang, H.W., Xie, Y.F. and Huang, X. (2019) Preparation of nanofiltration membranes for high rejection of organic micropollutants and low rejection of divalent cations. *Journal of Membrane Science* 572, 152-160.
- Luan, H., Xu, J., Tan, Z., Zheng, A. and Huang, H. (2019) Adsorptive filtration of As(III) from drinking water by  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  particles embedded in carbon nanotube membranes. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 94(9), 2816-2825.
- Luan, H., Zhang, Q., Cheng, G.A. and Huang, H. (2018) As(III) Removal from Drinking Water by Carbon Nanotube Membranes with Magnetron-Sputtered Copper: Performance





- and Mechanisms. ACS Applied Materials and Interfaces 10(24), 20467-20477.
- Lv, Y., Liu, H., Wang, Z., Liu, S., Hao, L., Sang, Y., Liu, D., Wang, J. and Boughton, R.I. (2009) Silver nanoparticle-decorated porous ceramic composite for water treatment. Journal of Membrane Science 331(1-2), 50-56.
  - Ma, C., Hu, W., Pei, H., Xu, H. and Pei, R. (2016) Enhancing integrated removal of Microcystis aeruginosa and adsorption of microcystins using chitosan-aluminum chloride combined coagulants: Effect of chemical dosing orders and coagulation mechanisms. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 490, 258-267.
  - Ma, C., Pei, H., Hu, W., Wang, Y., Xu, H. and Jin, Y. (2017) The enhanced reduction of C- and N-DBP formation in treatment of source water containing Microcystis aeruginosa using a novel CTSAC composite coagulant. Science of the Total Environment 579, 1170-1178.
  - Ma, J., Wang, R., Wang, X., Zhang, H., Zhu, B., Lian, L. and Lou, D. (2019) Drinking water treatment by stepwise flocculation using polysilicate aluminum magnesium and cationic polyacrylamide. Journal of Environmental Chemical Engineering 7(3).
  - Meng, L., Chan, Y., Wang, H., Dai, Y., Wang, X. and Zou, J. (2016) Recycling of iron and silicon from drinking water treatment sludge for synthesis of magnetic iron oxide@SiO<sub>2</sub> composites. Environmental Science and Pollution Research 23(6), 5122-5133.
  - Ndlangamandla, N.G., Kuvarega, A.T., Msagati, T.A.M., Mamba, B.B. and Nkambule, T.T.I. (2018) A novel photodegradation approach for the efficient removal of natural organic matter (NOM) from water. Physics and Chemistry of the Earth 106, 97-106.
  - Nikbakht Fini, M., Madsen, H.T. and Muff, J. (2019) The effect of water matrix, feed concentration and recovery on the rejection of pesticides using NF/RO membranes in water treatment. Separation and Purification Technology 215, 521-527.
  - Orha, C., Manea, F., Pop, A., Bandas, C. and Lazau, C. (2016) TiO<sub>2</sub>-nanostructured carbon composite sorbent/photocatalyst for humic acid removal from water. Desalination and Water Treatment 57(30), 14178-14187.
  - Pouraboulghasem, H., Ghorbanpour, M., Shayegh, R. and Lotfiman, S. (2016) Synthesis, characterization and antimicrobial activity of alkaline ion-exchanged ZnO/bentonite nanocomposites. Journal of Central South University 23(4), 787-792.
  - Rajapakse, J., Gallage, C., Dareeju, B., Madabhushi, G. and Fenner, R. (2017) Estimation of poisson's ratio and variation of tensile yield strength of composite clay balls used in pebble matrix filtration. Journal of Materials in Civil Engineering 29(9).
  - Sabir, A., Shafiq, M., Islam, A., Sarwar, A., Dilshad, M.R., Shafeeq, A., Zahid Butt, M.T. and Jamil, T. (2015) Fabrication of tethered carbon nanotubes in cellulose acetate/polyethylene glycol-400 composite membranes for reverse osmosis. Carbohydrate Polymers 132, 589-597.
  - Shen, J.N., Ruan, H.M., Wu, L.G. and Gao, C.J. (2011) Preparation and characterization of PES-SiO<sub>2</sub> organic-inorganic composite ultrafiltration membrane for raw water pretreatment. Chemical Engineering Journal 168(3), 1272-1278.
  - Sheng, G., Li, Y., Yang, X., Ren, X., Yang, S., Hu, J. and Wang, X. (2012) Efficient removal of arsenate by versatile magnetic graphene oxide composites. RSC Advances 2(32), 12400-12407.
  - Şimşek, B., Sevgili, I., Ceran, Ö., Korucu, H. and Şara, O.N. (2019) Nanomaterials based drinking water purification: Comparative



- study with a conventional water purification process. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 63(1), 96-112.
- Skiba, M., Pivovarov, A., Kateryna, S. and Vorobyova, V. (2018) One-pot synthesis of silver nanoparticles and composite materials for drinking water disinfection.
  - Skvortsova, L.N., Chukhlomina, L.N., Mokrousov, G.M. and Krotov, A.E. (2013) Use of Si-N-Fe and B-N-Fe compositions for formaldehyde degradation in combined heterogeneous and homogeneous catalytic processes. *Russian Journal of Applied Chemistry* 86(1), 37-41.
  - Tan, X., Chen, C., Hu, Y., Wen, J., Qin, Y., Cheng, J. and Chen, Y. (2018a) Novel AgNWs-PAN/TPU membrane for point-of-use drinking water electrochemical disinfection. *Science of the Total Environment* 637-638, 408-417.
  - Tan, X., Hu, Y. and Chen, C. (2018b) Electrochemical disinfection performance of a point-of-use drinking water treatment device constructed with silver nanowires composite electrospun membrane. *Huanjing Kexue Xuebao/Acta Scientiae Circumstantiae* 38(10), 3964-3972.
  - Tang, C.Y., Yang, Z., Guo, H., Wen, J.J., Nghiem, L.D., Cornelissen, E. Potable Water Reuse through Advanced Membrane Technology (2018) *Environmental Science and Technology*, 52 (18), pp. 10215-10223
  - Wen, J., Tan, X., Hu, Y., Guo, Q. and Hong, X. (2017) Filtration and Electrochemical Disinfection Performance of PAN/PANI/AgNWs-CC Composite Nanofiber Membrane. *Environmental Science and Technology* 51(11), 6395-6403.
  - Wongcharee, S., Aravinthan, V. and Erdei, L. (2020) Removal of natural organic matter and ammonia from dam water by enhanced coagulation combined with adsorption on powdered composite nano-adsorbent. *Environmental Technology and Innovation* 17.
  - Xie, A.G., Cai, X. and Tan, S.Z. (2010) The preparation and property of few-layered graphene/benzalkonium chloride composite, pp. 742-744.
  - Yang, J., Zhang, H., Yu, M., Emmanuelawati, I., Zou, J., Yuan, Z. and Yu, C. (2014) High-content, well-dispersed  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles encapsulated in macroporous silica with superior arsenic removal performance. *Advanced Functional Materials* 24(10), 1354-1363.
  - Yang, Y.L., Li, X., Feng, Q.Y., Nie, X.F. and Li, G.B. (2007) Experimental study of phosphorus removal technique by coagulation in drinking water treatment. *Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology* 39(6), 989-992.
  - Yang, Y.L., Li, X., Nie, X.F. and Li, G.B. (2006) Study of phosphorus removal technique in drinking water treatment by enhanced coagulation. *Beijing Gongye Daxue Xuebao / Journal of Beijing University of Technology* 32(10), 939-943.
  - Yin, J. and Deng, B. (2015) Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment. *Journal of Membrane Science* 479, 256-275.
  - Zambianchi, M., Durso, M., Liscio, A., Treossi, E., Bettini, C., Capobianco, M.L., Aluigi, A., Kovtun, A., Ruani, G., Corticelli, F., Brucale, M., Palermo, V., Navacchia, M.L. and Melucci, M. (2017) Graphene oxide doped polysulfone membrane adsorbents for the removal of organic contaminants from water. *Chemical Engineering Journal* 326, 130-140.
  - Zanter, K.D., Brehm, A., Antons, U., Deeken, S. and Knauss, M. (2001) Production of MFI-copper composites. *Chemie-Ingenieur-Technik* 73(8), 941, 1028-1032.
  - Zarei, S., Farhadian, N., Akbarzadeh, R., Pirsahab, M., Asadi, A. and Safaei, Z. (2019) Fabrication of novel 2D Ag-TiO<sub>2</sub>/



$\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Chitosan nano-composite photocatalyst toward enhanced photocatalytic reduction of nitrate. International Journal of Biological Macromolecules.

- Zhang, Y.J., Zhao, X.L., Li, X.X., Liu, C. and Zhu, L.L. (2010) Performance of PAC/PDM composite coagulants for removal of algae from Lake Taihu waters in summer. Water Science and Technology 62(2), 330-339.
- Zhao, X., You, Y., Huang, S., Cheng, F., Chen, P., Li, H. and Zhang, Y. (2019) Facile

construction of reduced graphene oxide supported three-dimensional polyaniline/WO<sub>2.72</sub> nanobelt-flower as a full solar spectrum light response catalyst for efficient photocatalytic conversion of bromate. Chemosphere 222, 781-788.

- Zhao, Y., Chen, Y., Lin, S., Wang, C. and Cao, Y. (2004) Development and evaluation of a composite structural filter for removal of arsenic in drinking water. Wei sheng yan jiu = Journal of hygiene research 33(4), 413-415.

- Zhu, S., Wang, W., Xu, Y., Zhu, Z., Liu, Z. and Cui, F. (2019) Iron sludge-derived magnetic Fe<sub>0</sub>/Fe<sub>3</sub>C catalyst for oxidation of ciprofloxacin via peroxymonosulfate activation. Chemical Engineering Journal 365, 99-110.
- Zhu, S., Xu, Y., Zhu, Z., Liu, Z. and Wang, W. (2020) Activation of peroxymonosulfate by magnetic Co-Fe/SiO<sub>2</sub> layered catalyst derived from iron sludge for ciprofloxacin degradation. Chemical Engineering Journal 384.