

Nanoteknik i vattenrening

En genomgång av nanoteknik som används inom råvatten-
och avloppsvattenrening

Jingjing Yang

Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området.

Författarna är ensamt ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

RAPPORTENS TITEL	Nanoteknik i vattenrening. En genomgång av nanoteknik som används inom råvatten- och avloppsvattenrening
TITLE OF THE REPORT	Nanotechnology for water cleaning. A review of nanotechnology used in raw water and wastewater treatment
FÖRFATTARE	Jingjing Yang, IVL Svenska Miljöinstitutet AB
RAPPORTNUMMER	2021-15
ANTAL SIDOR	29
SAMMANDRAG	Rapporten går igenom de senaste framstegen inom nanoteknik för råvatten- och avloppsvattenrening. Den granskar tillämpningarna utifrån deras funktion i olika behandlingsprocesser: adsorption, membranfiltrering, fotokatalys och desinfektion. Före fullskalig implementering av nanoteknik inom vattenrening behövs det fler studier i pilotskala i verkliga förhållanden, och det måste bedömas hur nanopartiklarna påverkar människor och miljö.
SUMMARY	The report provides a quick overview of various nanotechnologies that have been tested and applied in water and wastewater treatment. It is shown that nanotechnology is promising in water and wastewater treatment, especially in adsorption, membrane filtration, photocatalysis and disinfection. But most nanotechnologies for water treatment still have a long way to go for full-scale application. More pilot-scale experiment must be run to optimize the technology. In addition, the risk and fate of nanoparticles need to be evaluated.
SÖKORD	Nanoteknik, vatten- och avloppsvattenrening, nanoadsorbenter, kolnanorör, nanomembran, nanofotokatalys, desinfektion, mikrobiell kontroll
KEYWORDS	Nanotechnology, water/wastewater treatment, nano adsorbents, carbon nanotube, nanomembrane, photocatalysis, disinfection
MÅLGRUPPER	Personal som arbetar inom dricksvatten och avlopp
RAPPORT	Finns att hämta hem som pdf från Vattenbokhandeln. https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/
UTGIVNINGÅR	2021
UTGIVARE	© Svenskt Vatten AB
REFERENS	Yang J. (2021). Nanoteknik i vattenrening. En genomgång av nanoteknik som används inom råvatten- och avloppsvattenrening. SVU-rapport 2021-15. Stockholm, Svenskt Vatten.

Om projektet

PROJEKTNUMMER	20-107
PROJEKTETS NAMN	Nanoteknologi i vatten och avloppsvattenrening
PROJEKTETS FINANSIERING	Svenskt Vatten Utveckling, IVL Svenska Miljöinstitutet

Förord

Nanoteknik diskuteras och används mer och mer för tillämpningar inom biomedicin, elektronik, energisystem, livsmedelsindustrin och miljöområdet. Dagens forskningsläge pekar mot att det är möjligt att tillämpa nanoteknik även för vatten- och avloppsvattenrening. Men i nuläget utförs en stor del av forskningen endast i labbskala, och det behövs mer forskning och utveckling i pilotskala innan tekniken kan användas i fullskaletillämpningar. Nanoteknik för vattenrening är dock lovande, särskilt i vissa behandlingssteg såsom adsorption, membranfiltrering, fotokatalys och desinfektion.

Nanoteknikforskning har framför allt utförts i Kina, USA, Indien och Iran. Det finns ett stort behov av att öka kunskapsnivån inom fältet även i Sverige. Rapporten ger en överblick över lämpliga tekniker och deras utveckling för vatten- och avloppsvattenrening. För att få mer detaljerad kunskap om de presenterade teknikerna rekommenderar jag läsaren att vända sig till ämnesexperter eller mer djupgående litteratur.

Jag vill passa på att rikta ett stort tack till Joydeep Dutta, Ulrika Edlund och Jan-Erik Nordström för givande diskussioner de senaste åren. För granskning av rapporten tackar jag Linus Karlsson och Erik Svensson Grape.

Jingjing Yang

Innehåll

Förord.....	2
Sammanfattning.....	4
Summary	5
Terminologi och förkortningar	6
1 Introduktion.....	7
2 Bakgrund.....	9
3 Aktuella och potentiella applikationer för råvatten- och avloppsvattenrening.....	10
3.1 Nanoadsorbenter.....	10
3.2 Membran och membranprocesser.....	13
3.3 Nanofotokatalys	14
3.4 Desinfektion	15
3.5 Sensorer och övervakning.....	16
4 Teknikbedömning.....	18
5 Barriärer och forskningsbehov	19
6 Slutsats.....	20
Referenser.....	21
Bilaga A Exempel på projekt/program som innehåller nanoteknologi i vatten/avloppsvattenrening i Sverige de senaste 5 åren	26
Bilaga B Exempel på nanoprodukter för vatten- och avloppsvattenrening de senaste 5 åren.....	27

Sammanfattning

Rapporten går igenom de senaste framstegen inom nanoteknik för råvatten- och avloppsvattenrening. Den granskar tillämpningarna utifrån deras funktion i olika behandlingsprocesser: adsorption, membranfiltrering, fotokatalys och desinfektion. Före fullskalig implementering av nanoteknik inom vattenrening behövs det fler studier i pilotskala i verkliga förhållanden, och det måste bedömas hur nanopartiklarna påverkar människor och miljö.

Nanotekniken har utvecklats snabbt de senaste åren och används inom medicin, elektronik, biomaterial, energiproduktion och för konsumentprodukter. Nanoteknik ser lovande ut även för vattenbehandling där den kan användas dels för rening, dels för detektering av föroreningar med nanosensorer och -detektorer.

Nanomaterial definieras vanligtvis som material som är mindre än 100 nm i minst en dimension. I den skalan har material ofta nya egenskaper. Nanoapplikationer inom vattenrening utnyttjar ofta egenskaper som relaterar till materialens stora specifika yta, såsom snabb upplösning, hög reaktivitet och stark adsorption. Nanoteknik har framför allt visat sig vara effektiv för att reducera föroreningar som patogener, tungmetaller, bekämpningsmedel och andra beständiga och giftiga kemikalier. Exempelvis har kolnanorör visat sig vara en lovande adsorbent, och nanopartiklar av ädelmetall har visat sig kunna avskilja bekämpningsmedel från dricksvatten.

Mycket av forskningen på nanoteknik inom vattenrening har utförts i Kina, USA, Indien och Iran. I Europa driver framför allt Tyskland och Frankrike forskningen framåt. I allmänhet utförs nanoteknikforskning i laboratorieskala, och kunskapen om hur tekniken fungerar under verkliga förhållanden är därför begränsad. Målet med projektet var att sammanfatta utvecklingen inom nanoteknik för vatten- och avloppsvattenrening och sprida informationen till anställda i svenska VA-organisationer. Projektet har granskat litteratur och intervjuat experter.

Rapporten ger en översikt över olika nanotekniker som har testats och tillämpats för vatten- och avloppsvattenrening. Den täcker in flera grupper av tekniker och går inte in i detalj på respektive teknik. Nanoteknik är lovande för resurseffektiv rening av råvatten och avloppsvatten, särskilt för adsorption, membranfiltrering, fotokatalys och desinfektion, men även för detektering av föroreningar med nanosensorer.

I dagsläget finns det på marknaden vissa färdiga fullskaleprodukter baserade på nanoteknik för hushållen och VA-branschen (bilaga B i rapporten). Många nanotekniker kan enkelt anpassas för nuvarande vattenbehandlingsprocesser, men de flesta tekniker har fortfarande långt kvar innan de kan tillämpas i full skala. Före fullskaleimplementering måste de utvärderas med verkligt vatten genom långsiktiga experiment i pilotskala. Dessutom måste risken för utsläpp av nanopartiklar utvärderas, och deras påverkan på människor och miljö måste bedömas. Frågor som teknikoptimering, initialt höga kostnader samt osäkerheter när det gäller miljö- och hälsorisker går att överbrygga på sikt genom forskning och utveckling. För att eliminera hindren är det viktigt med samarbete mellan forskare, industri, myndigheter och andra intressenter.

Summary

Nanotechnology has been developed rapidly in the past years. Due to nanoparticles special unique characteristics, it has been used in nanomedicine, nanoelectronics, biomaterials, energy production and consumer products. Nanotechnology has been studied by researchers in the water and wastewater treatment field due to its special properties, such as low cost, large active surface area and reuse ability. A lot of research has been carried out in China, USA, India and Iran. In Europe, Germany and France lead the nanotechnology research. In general, nanotechnology research is performed in the lab-scale and the knowledge is limited to the research field. It is unclear for the staff in the water industry what is happening in nanotechnology research /applications in water and wastewater treatment. Therefore, the aim of the project is to summarize the current nanotechnology development in water and wastewater treatment and increase the information spread in the water purification sector in Sweden.

Literature review and communications with experts have been carried out in the project. The final report provides a quick overview of various nanotechnologies that have been tested and applied in water and wastewater treatment. The report covers several groups of technologies but does not go into too detailed knowledge in each technology.

It is shown that nanotechnology is promising in water and wastewater treatment, especially in adsorption, membrane filtration, photocatalysis and disinfection. However, even though there are already products for household use and wastewater industry on the market based on nanotechnology, most nanotechnologies still need a long way to go for a full-scale application. Real water and wastewater must be tested, and the long-term pilot-scale experiment must be run to optimize the nanotechnology. In addition, the risk and fate of nanoparticles need to be evaluated to provide a complete evaluation on nanotechnology.

Terminologi och förkortningar

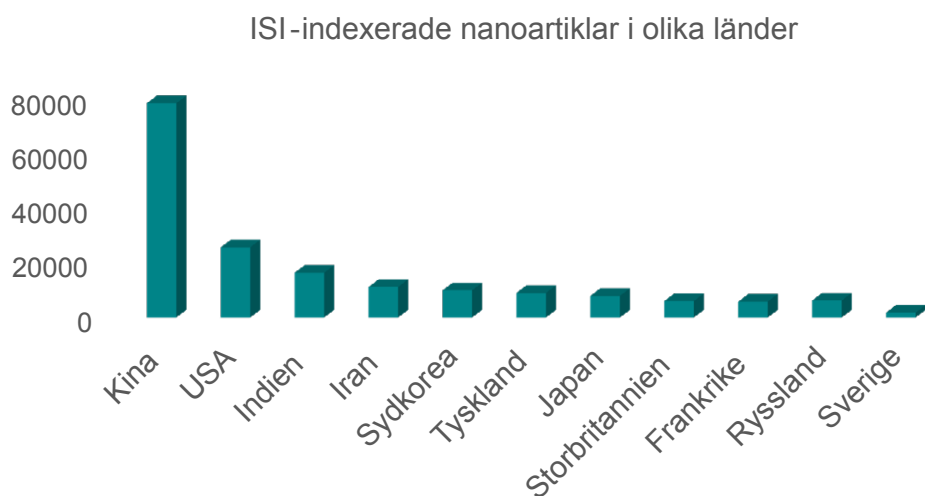
<i>Adsorptionskapacitet</i>	Mängden ämne som kan tas upp av en adsorbent per massenhet (eller volym) av adsorbenten
<i>Bimetallisk nZVI</i>	nZVI kombinerat med ädelmetall
<i>Dendrimer</i>	Förgrenade polymerer med en trädliknande struktur
<i>Elektrospinning</i>	En metod som använder elektrisk spänning för att skapa fibrer med en diameter på i storleksordningen 100nm från polymerlösningar eller smält polymer
<i>Emulgerad Nzvi</i>	Kolloidstora droppar som består av ett yttre lager ytaktivt ämne, såsom ett oljigt membran, och en inre kärna nollvalenta järnpartiklar i nanostorlek
<i>Fouling</i>	Igensättning av membranyta vilket resulterar i försämrat flöde genom membranet
<i>HDTMA</i>	Hexadecyltrimethylammonium
<i>Nanoteknik</i>	Tekniker med en storlek lämpligt mätbar i nanometer
<i>Nanozeolit</i>	Aluminiumsilikater med porös struktur i nanostorlek
<i>NOM</i>	Naturligt Organiskt Material
<i>nZVI</i>	Nano zero-valent iron (nollvalent järn, Fe ⁰ , i nanostorlek)
<i>MWCNT</i>	Multi-walled carbon nanotubes
<i>Opolära föroreningar</i>	En opolär molekyl har ingen laddningsseparation, d.v.s. inga positiva eller negativa poler bildas. Med andra ord fördelas de elektriska laddningarna i opolära molekyler jämnt över molekylen
<i>PAH</i>	Polycykliska aromatiska kolväten
<i>Socioekonomisk/institutionell kapacitet</i>	FN:s utvecklingsprogram (UNDP) och FN:s katastrofriskreduceringskontor (UNISDR) definierar institutionell kapacitet som en institutions förmåga att sätta och uppnå sociala och ekonomiska mål genom kunskap, färdigheter, system och institutioner
<i>SWCNT</i>	Single-walled carbon nanotubes
<i>TFS</i>	Tunnsfilmskompositmembranen
<i>TIPS</i>	Termiskt inducerad fassparation är en metod för att producera porösa material såsom membran från t.ex. polymerer
<i>TRL</i>	Technology Readiness Level

1 Introduktion

Vatten är en viktig naturresurs och nödvändig för människors överlevnad och välbefinnande. Men bara 2,5 % av jordens vatten är sötvatten och det mesta av detta är fryst i glaciärer och istäcken. Cirka 96 % av allt flytande sötvatten kan hittas under jord som grundvatten. För att globalt kunna garantera en tillgång på rent och prisvärt vatten för vardaglig konsumtion och industrianvändning krävs avsevärd behandling. Den traditionella vattenreningsprocessen baseras på mekaniska, kemiska och biologiska processer, t.ex. kemisk utfällning, aerob och anaerob biologisk behandling, sandfiltrering, sedimentering, och klorering. Syftet med dessa processer är att avlägsna partiklar, organiskt material, näringsämnen och patogener från vatten eller avloppsvatten. Utöver dessa vedertagna metoder finns det dessutom många tekniker, såsom jonbyte, destillation, adsorption (t.ex. med aktivt kol), membranfiltrering (t.ex. ultrafiltrering och omvänd osmos), och UV-behandling, som används för vatten- och avloppsvattenrening men vars implementering är begränsad. En del av anledningen är att dessa tekniker inte behövs för att uppnå gällande lagkrav.

Nanotekniken har utvecklats snabbt under de senaste åren. På grund av dess unika egenskaper har den använts i medicin, elektronik, biomaterial, energisystem och konsumentprodukter. I Figur 1.1 visas antalet artiklar om nanoteknik indexerade i Web of Science under 2019. Figuren visar att Kina och USA har genomfört mycket forskning om nanoteknik. I Europa har mest nanoteknikforskning utförts i Tyskland och Frankrike. Antalet publicerade artiklar om nanoteknik har också ökat i Sverige under de senaste åren (från 2015 till 2018). Dock kunde en liten minskning noteras under 2019 (Figur 1.2). De flesta svenska nanoteknikpublikationerna är från Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Karolinska Institutet och Lunds universitet. Exempel på forskningsprojekt/program som behandlar nanoteknologi för vatten- eller avloppsvattenrening i Sverige under de senaste 5 åren visas i Bilaga A.

I den här rapporten ger vi en översikt över de senaste framstegen inom nanoteknik för vatten- och avloppsvattenrening. I rapporten har vi granskat de viktigaste tillämpningarna av nanomaterial baserat på deras funktion i olika processer (adsorption, membranfiltrering och desinfektion). Vi har även kartlagt och diskuterat hinder för utveckling och fullskalig implementering av nanoteknik, samt identifierat forskningsbehov.



Figur 1.1

Antal artiklar om nanoteknik indexerade i ISI 2019 (Web of Science, 2020).



Figur 1.2

ISI-indexerade artiklar som behandlar nanoteknik i Sverige de senaste 5 åren (Web of Science, 2020).

2 Bakgrund

Nanomaterial definieras vanligtvis som material som är mindre än 100 nm i minst en dimension. I denna skala har material ofta nya egenskaper, varav många har undersökts i applikationer för vatten- och avloppsvattenrening (Qu m. fl. 2013). Nanoteknik har framför allt visat sig vara effektiv för att minska förekomsten av föroreningar såsom patogener, tungmetaller, bekämpningsmedel och andra beständiga och giftiga kemikalier (Kunduru m.fl. 2017, Kanichi 2014). Det mest kända nanomaterialet, kolnanorör (carbon nanotubes, CNTs), har visat sig vara en lovande adsorbent och den första studien med denna tillämpning publicerades redan 1997 (Mackie m. fl. 1997). Nanopartiklar av ädelmetall har även rönt ett stort forskningsintresse, framför allt efter att Nair m.fl. (2007) publicerade en artikel där nanopartiklar användes för att avskilja bekämpningsmedel från dricksvatten.

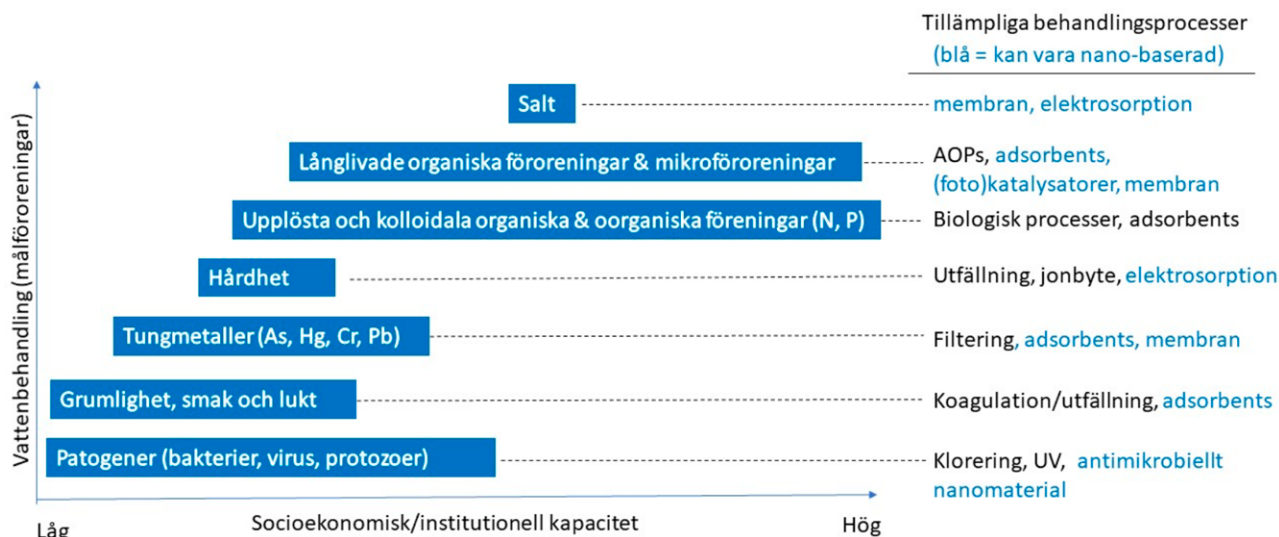
Applikationer som använder nanomaterial utnyttjar ofta egenskaper som relaterar till materialens stora specifika yta, såsom snabb upplösning, hög reaktivitet och stark adsorption. Enligt Patanjali m.fl. (2019) kan nanoteknik inom vattenbehandling delas in i tre huvudområden:

- rening (fullständig eller partiell reduktion av föroreningar);
- detektering av föroreningar (med nanosensorer och detektorer);
- förebyggande av att vatten förorenas.

Nedan kommer olika behandlingstekniker baserade på nanoteknik att beskrivas och diskuteras. Rapporten innehåller också information om nanosensorer och detektorer. Förebyggande åtgärder som förhindrar att vatten förorenas diskuteras inte i rapporten.

3 Aktuella och potentiella applikationer för råvatten- och avloppsvattenrening

De mest studerade och diskuterade nanoteknikerna som används för rening av vatten och avloppsvatten är nanoadsorbenter, nanofotokatalysatorer och nanofiltrering. Figur 3.1 visar att mer föroreningar generellt tas bort när socioekonomisk/institutionell kapacitet i ett samhälle går från låg till hög. Till exempel så fokuserar samhällen med låg socioekonomisk/institutionell kapacitet på förbättring av de fysiska egenskaperna hos vatten (grumlighet, smak och lukt) samt reduktion av patogener. Långlivade organiska föroreningar och mikroföroreningar (t.ex. mikroplast och läkemedel) tas bort när samhällets socioekonomiska/institutionella kapacitet är högre. Potentiella tillämpningar av nanoteknik för vatten- och avloppsvattenrening visas också i Figur 3.1, där vi kan se att de flesta målföroreningar som är aktuella idag kan avlägsnas med nanoteknik. Tekniska specifikationer, tillämpningar och framtida utveckling diskuteras nedan.



Figur 3.1

Processer för vattenrening som kan förbättras med nanoteknik (översatt och modifierat från Alvarez m.fl. 2018).

3.1 Nanoadsorbenter

Adsorption är en reningsteknik för att ta bort ett brett spektrum av föroreningar från grundvatten eller avloppsvatten. Adsorption implementeras oftast för avlägsnande av icke-nedbrytbara organiska föroreningar, t.ex. läkemedel, bekämpningsmedel. Adsorption sker när molekyler i en vätska binder till ytan hos en fast substans. Adsorbenter behöver därför en mycket stor specifik yta som tillåter effektiv adsorption.

Effektiviteten hos konventionella adsorbenter är vanligtvis begränsad av dess specifika yta, bristen på selektivitet och adsorptionskinetiken. En extremt stor specifik yta, korta diffusionsavstånd samt en flexibel porstorlek och ytkemi resulterar i att nano-adsorbenter har betydande fördelar jämfört med konventionella adsorbenter (Qu m. fl. 2013).

3.1.1 Kolbaserade nanoadsorbenter

Kolnanorör (carbon nanotubes CNTs) (Figur 3.2) har fått mycket uppmärksamhet som en effektiv adsorbent på grund av materialets stora specifika yta samtidigt som det

har hög termisk och kemisk stabilitet. CNT har visat sig ha högre effektivitet än aktivt kol vid adsorption av olika organiska kemikalier (Pan m. fl. 2008). Även om aktivt kol har jämförbar specifik yta som CNT, återfinns en stor andel av ytan i aktivt kol i små mikroporer som är oåtkomliga för många organiska molekyler, t.ex. vissa antibiotika och läkemedel (Ji m. fl. 2009). Då porerna är större i CNT har CNT fler tillgängliga adsorptionsställen och därför en mycket högre adsorptionskapacitet av vissa organiska molekyler. Dessutom kan ytan på CNT anpassas för att angripa specifika föroreningar och kan därmed ha fler unika applikationer genom större selektivitet.

Flera studier har visat att kolnanorör avlägsnar tungmetaller (t.ex. Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} och Zn^{2+}) mer effektivt än aktivt kol (Li m. fl. 2003, Lu m. fl. 2006). Regenerering av CNT från tungmetaller kan enkelt utföras genom att minska vätskans pH. Vid $\text{pH} < 2$ desorberas 90-100 % av metalljonerna från CNT och adsorptionskapaciteten kvarstår till stor del efter regenerering (Li m. fl. 2005, Lu m. fl. 2006). En nackdel med CNT är dock att en fullständig separation av tillsatt CNT från vattnet är svårt på grund av CNT:s partikelstorlek. Man har därför integrerat magnetiska nanopartiklar i CNT för att enkelt separera CNT från vatten med hjälp av magnetism (Oliveira m. fl. 2002, Gorria m. fl. 2006, Peng m. fl. 2005). En lista över CNT-applikationer som adsorbenter visas i Tabell 3.1. Figur 3.2 visar ett prov med flerväggiga kolnanorör (3-15 väggar), genomsnittlig innerdiameter 4nm, genomsnittlig ytterdiameter 13-16 nm, längd 1-10 μm .



Figur 3.2

Kolnanorör (Klean Commodities, 2020).

3.1.2 Metallbaserade nanoadsorbenter

Metalloxider såsom järnoxid, titandioxid, aluminiumoxid och volframoxid är billiga adsorbenter för tungmetaller och radionuklider. Om dessa oxider tas fram i nanoskala ökar deras kapacitet och adsorptionskinetik. Detta beror på nanomaterialets större specifika yta, kortare interpartikulära diffusionsavstånd och större antal ytreaktionsplatser (d.v.s. hörn och kanter) (Qu m. fl. 2013). T.ex. så ökar magnetits adsorptionsförmåga av arsenik med mer än 100 gånger om partikelstorleken hos adsorbenten minskas från 300 till 11 nm (Yean m. fl. 2005).

Järnoxid i nanoform har undersökts för avlägsnande av flera organiska föroreningar och har också visat sig ha en utmärkt adsorptionskapacitet för tungmetaller (Zhang m. fl. 2010, Hu m. fl. 2010). På grund av dess magnetiska egenskap kan järnoxid separeras magnetiskt från vattenfasen (Iram m. fl. 2010). Flera nanomaterial av metalloxid, inklusive magnetit och titandioxid, har uppvisat en adsorptionskapacitet för arsenik som är överlägsen den för aktivt kol (Deliyanni m. fl. 2003, Mayo m. fl. 2007). Dessutom

har studier visat att järnoxid och titandioxid i nanoform är effektiva adsorbenter för vissa antibiotika och läkemedel, t.ex. oxytetracyklin, tetracyklin, och acetaminofen (Fanourakis m. fl. 2020). Nanoadsorbenter av metalloxid kan enkelt regenereras genom att ändra lösningens pH (Sharma m. fl. 2009). I många fall består adsorptionsförmågan hos dessa nanomaterial även efter flera regenererings- och återanvändningscykler (Hu m. fl. 2006).

Framför allt kan metallbaserade nanoadsorbenter produceras till relativt låg kostnad. Den höga adsorptionskapaciteten, låga kostnaden, samt enkel separation och regenerering, gör metallbaserade nanoadsorbenter tekniskt och ekonomiskt fördelaktiga (Qu m. fl. 2013).

Adsorbent	Föroreningar	Kommentar	Referens
CNT aktiverat genom etsning med kaliumhydroxid.	Läkemedel och antibiotika, t.ex. sulfamethoxazole, tetracycline, tylosin.	Aktiverat CNT visade en ökad absorptionskapacitet för antibiotika.	Sheng m.fl. (2010)
MWCNTs (multi-walled carbon nanotubes)	Naturligt organiskt material (NOM).	Högmolekyler NOM adsorberas företrädesvis.	Hyung och Kim, (2008)
CNT renat med salpetersyra och svavelsyra.	Polycykliska aromatiska kolväten (PAH).	SWCNT (single walled CNT) uppvisar en större adsorptionskapacitet mot PAH än MWCNT.	Yang m.fl. (2006)

3.1.3 Nanoadsorbenter

Förutom kol- och metalloxidbaserade nanoadsorbenter finns det andra nanoadsorbenter. Dong m.fl. (2010) modifierade nanozeolit (zeoliter är porösa silikater eller aluminiumsilikater som även förekommer i naturen) med hexadecyltrimetylammonium (HDTMA) och använde materialet för adsorption av fenolderivat i vatten. Bai m.fl. (2010) modifierade nanozeolit biologiskt för att avlägsna pyridin och kinolin från vatten.

Dendrimerer, förgrenade polymerer med en trädliknande struktur, är polymeriska nanoadsorbenter som kan anpassas för att avlägsna organiska föroreningar och tungmetaller. De inre skalerna i dendrimerer kan göras hydrofoba för adsorption av opolära organiska föroreningar medan de yttre grenarna kan anpassas för adsorption av tungmetaller (Qu m. fl. 2013). Diallo m. fl. (2005) visade att ett ultrafiltreringssystem baserat på dendrimerer fullständigt kunde reducera löst koppar från en initial nivå på 10 ppm. Efter adsorption kan dendrimererna regenereras genom att sänka pH till 4.

Ett annat nanomaterial på frammarsch är nano zero-valent iron (nZVI) som kan användas för att avlägsna olika organiska och oorganiska föroreningar från vatten. Det mycket reaktiva nZVI har en kort livslängd och därför har flera modifieringar av materialet utvecklats, såsom ytmodifierad nZVI (högre specificitet), emulgerad nZVI (bättre blandbarhet) och bimetallisk nZVI (högre reaktivitet). Tungmetallerjonerna är antingen reducerade till metaller vid nZVI-ytan (för joner såsom t.ex. Cu^{2+} , Ag^{2+}) eller adsorberas direkt till nZVI-ytan (som är fallet för t.ex. Zn^{2+} , Cd^{2+}). De magnetiska egenskaperna hos nZVI möjliggör även enkel separering av tillsatt adsorbent från vattenfasen (Bora, 2014).

Tabell 3.1

Applikationsexempel av CNT som adsorbent (översatt och modifierat från Liu m. fl. 2013).

3.2 Membran och membranprocesser

Membranteknik som används för att ta bort partiklar från vattenfasen vid vatten- och avloppsvattenrening är vanligtvis baserad på ultrafiltrering eller mikrofiltrering. En stor utmaning för branschen är avvägningen mellan membranselektivitet och permeabilitet. Den höga energiförbrukningen som medföljer membranfiltrering är ett betydande hinder för en mer storskalig implementering av denna process. Användandet av funktionella nanomaterial i membran erbjuder en fantastisk möjlighet för att förbättra membranpermeabiliteten, beständigheten mot ingensättning, samt den mekaniska och termiska stabiliteten, vilket kan resultera i nya funktioner för nedbrytning av föroreningar och självrengöring.

3.2.1 Nanofibermembran

Nanofibrer är fibrer med en diameter i nanoskala och är ett relativt nytt material inom filtreringsteknik. Nanofibrer genereras från polymerer och har olika fysiska egenskaper och applikationspotentialer baserat på polymerernas egenskaper. Det finns många olika metoder för att tillverka nanofibrer, såsom dragning, elektrospinning, självmontering, mallsyntes och termiskt inducerad fassparation. Elektrospinning är ett enkelt, effektivt och billigt sätt att tillverka ultrafina fibrer från olika material (t.ex. polymerer, keramik eller metaller) (Li m. fl. 2004). De resulterande nanofibrerna har hög specifik yta och porositet, och formar nanofibermattor med komplexa porstrukturer (Li m. fl. 2004). Man kan även tillverka kompositliknande porösa strukturer med olika polymera nanofiberskikt. Elektrospunna membran har generellt högre porositet med en mer enhetlig porstorleksfördelning jämfört med konventionella membran. Den porösa strukturen som nanofibrerna skapar resulterar i membran med hög permeabilitet (Yalcinkaya 2019). Nanofibermembran kan även vara ett bra alternativ för membrandestillation.

3.2.2 Nanokompositmembran

Ett betydande antal studier om membran och nanoteknik har fokuserat på att skapa synergier och multifunktionalitet genom att tillsätta nanomaterial i konventionella polymeriska eller oorganiska membran. Nanomaterial som används för sådana applikationer inkluderar hydrofila metalloxider (t.ex. Al_2O_3 och TiO_2), antimikrobiella nanopartiklar (t.ex. nanosilver och CNT), och (foto)-katalytiska nanomaterial (t.ex. bi-metalliska nanopartiklar, TiO_2).

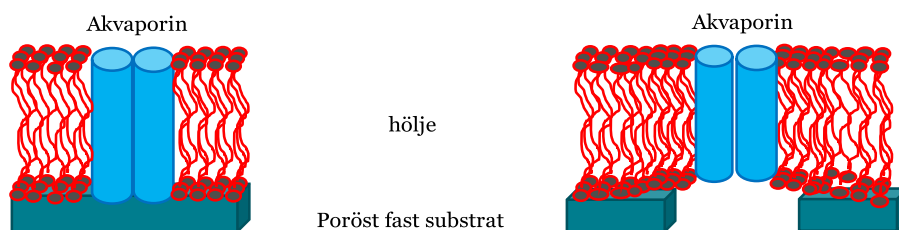
Huvudmålet med att tillsätta hydrofila nanopartiklar av metalloxid är att minska fouling av membranen genom att öka deras hydrofilicitet. Tillsats av metalloxider, såsom aluminiumoxid (Maximous m. fl. 2010), kiseldioxid (Bottino m. fl. 2001), titandioxid (Bae m. fl. 2005) och zeolit (Pendergast m. fl. 2010) till polymera ultrafiltreringsmembran har visat sig öka membranytans hydrofilicitet, permeabilitet och beständighet mot fouling. Effekten på membranpermeabiliteten och selektiviteten beror på typ, storlek och mängd av de tillsatta nanopartiklarna. Dessa oorganiska nanopartiklar hjälper också till att förbättra den mekaniska och termiska stabiliteten hos polymera membran, vilket i sin tur minskar den negativa påverkan som komprimering och värme har på membranpermeabiliteten från (Ebert m. fl. 2004). Ett exempel på denna teknikutveckling är de så kallade tunnfilmskompositmembranen (TFC). I dessa membran fokuserar man på att integrera nanomaterial i det aktiva skiktet på TFC-membran genom att tillsätta små mängder nanomaterial under tillverkningen eller genom att modifiera membranen efter tillverkning. I dessa fall har framför allt nanozeoliter visat sig kunna förbättra membranpermeabiliteten.

3.2.3 Biomimetiska membran

Biomimetiska membran för separationer har sett ett förnyat intresse under de senaste åren. De har fått sitt namn för att de innehåller biologiska element eller lånar koncept,

idéer och inspiration från biologiska system (Shen m. fl. 2014). De kan sorteras i följande membrangrupper: (1) lipid och kopolymerbaserade membran, (2) aquaporinbaserade membran och (3) membran baserade på linjerade kolnanorör (CNT). De utmärkta vattentransportegenskaperna hos akvaporiner och kolnanorör (CNT) har gjort dem populära inom membranfältet (Sengur-Tasdemir m. fl. 2016).

Akvaporinbiomimetiska membran tillverkas genom att man kombinerar tre huvudkomponenter: akvaporiner – membranproteiner som fungerar som vattenkanaler; ett hölje, i vilket akvaporinproteinerna integreras; och ett poröst fast substrat, vilket förbättrar den mekaniska stabiliteten (Fuwad m. fl. 2019). Exemplet på en akvaporinbaserad biomimetiska membrandesign visas nedan i Figur 3.3. Jämfört med traditionell membrantechnik är ingensättning inte ett problem för akvaporinbiomimetiska membran. En annan fördel är att ett högt flöde uppnås tack vare den låga por densiteten i membranen.



Figur 3.3

Exempel på en akvaporinbaserad biomimetisk membrandesign. Akvaporin (blå) inbäddade i membran (röd) direkt på en platt fast yta (grön). Modifierad från (Sengur-Tasdemir m. fl. 2016).

Vertikala kolnanorör (VACNT) i membran (Figur 3.4) har väckt betydande uppmärksamhet för vattenrening på grund av deras extremt höga vattengenomsläpplighet och antibakteriella egenskaper. Dessa membran har många egenskaper som är lovande för avsaltning. För att ersätta polymermembran som idag används för avsaltning har dock VACNT-membran vissa problem som måste lösas. Dessa inkluderar problem med saltavstötning från CNT med mindre diametrar och en stort behov av CNT per genererad membranyta (Lee m. fl. 2020).



Figur 3.4

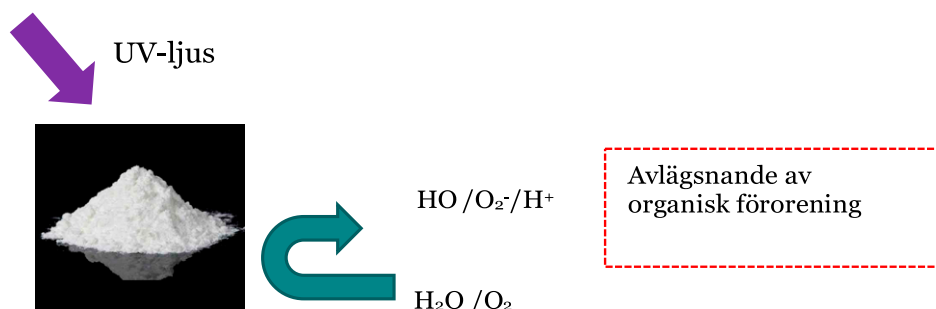
Prototyp av ett vertikalt CNT-membran.

3.3 Nanofotokatalys

Fotokatalytisk oxidation är en avancerad oxidationsprocess för avlägsnande av mikroföroreningar och mikrobiella patogener. Det är en användbar förbehandling för toxiska och icke-biologiskt nedbrytbara föroreningar för att förbättra deras biologiska nedbrytbarhet. Fotokatalys kan också användas som ett poleringssteg för att behandla persistenta organiska föroreningar. Den största barriären för en bred tillämpning är en långsam reaktionskinetik på grund av begränsade ljuskällor och relativt låg fotokatalytisk aktivitet. Aktuell forskning fokuserar på att öka den fotokatalytiska reaktionskinetiken och fotoaktivitetens räckvidd i mediet (Qu m. fl. 2013).

Fotokatalys använder ljus för att aktivera ett ämne och ändrar då hastigheten för en kemisk reaktion. Titandioxid är den mest använda fotokatalysatorn för vatten- och avloppsvattenrening på grund av dess låga toxicitet, kemiska stabilitet och låga kostnad. Fotokatalytisk behandling av kemiska och mikrobiologiska föroreningar i avloppsvatten

kan uppnås med solljus eller UV-ljus. Titanoxid bryter vattenmolekylen för att bilda vätgas, en hydroxylradikal samt en superoxidanjön (Figur 3.5). Fotokatalys med titandioxid har flera fördelar, såsom hög förmåga att bryta molekylära bindningar, samt en god tillgång på förbrukningsmaterial som också är billigt att framställa.



Figur 3.5

TiO₂ fotokatalysmekanism.

Förutom TiO₂ finns det också ZnO, WO₃ och BiVO₄ som kan användas för att avlägsna kemikalier och patogener från avloppsvatten. Som exempel kan BiVO₄ beläggas på stål-nät och användas för att rena industriellt avloppsvatten från organiska föreningar.

Olika processkonfigurationer för fotokatalys kan användas och många använder TiO₂ som katalysator. Omfattande undersökningar har utförts i lab- och pilotskalesystem och har visat att fotokatalys har en stor potential eftersom metoden är billig och miljövänlig. Det finns dock flera tekniska utmaningar innan en storskalig implementering är möjlig. Forskningsutmaningen är framförallt att: 1) optimera katalysatorn för förbättrad effektivitet och/eller kunna använda synligt ljus istället för UV-ljus; 2) utforma en reaktor som ger en effektiv reaktion och god katalysatoråtervinning; och 3) förbättra reaktionens selektivitet (Qu m. fl. 2013).

3.4 Desinfektion

Den mest traditionella desinfektionsmetoden är klorering. Denna metod har dock flera nackdelar: t.ex. relativt dålig reduktion av protozoer; lägre effektivitet i grumliga vatten; potentiell smak och lukt; och bildande av potentiellt skadliga biprodukter. Många nanomaterial, inklusive nano-Ag, nano-ZnO, nano-TiO₂, nano-Ce₂O₄, och kolnanorör (CNT), har antimikrobiella egenskaper utan att vara kraftigt oxiderande vilket minskar risken för skadliga biprodukter. Mer detaljerad information om antimikrobiella nanomaterial presenteras i Tabell 3.2. Antimikrobiella nanomaterial är framförallt lovande för att lösa tre utmaningar i renvatten- och avloppsvattensystem:

- (1) desinfektion,
- (2) kontroll av membranfouling från biologisk påväxt och
- (3) förhindrande av oönskad biologisk påväxt på andra ytor.

Nano-Ag är för närvarande det mest använda antimikrobiella nanomaterialet. Dess starka antimikrobiella effekt, breda antimikrobiella spektrum, låga toxicitet för människor och användarvänlighet gör materialet lovande för vattendesinfektion och kontroll av oönskad biologisk påväxt på ytor. Den antimikrobiella aktiviteten hos nano-Ag uppkommer till stor del från frisättningen av silverjoner (Xiu m. fl. 2011, Xiu m. fl. 2012). Silverjoner binder till tiolgrupper i proteiner som är viktiga för mikrobernas fortlevnad (Liao m. fl. 1997). Det har också rapporterats att silverjoner kan förhindra DNA-replikering och inducera strukturella förändringar i cellmembran (Feng m. fl. 2000).

De antimikrobiella egenskaperna, den porösa strukturen och förmåga att transportera vatten hos CNT gör materialet lovande för att fungera i filter för reduktion av

bakterier och virus. CNT tar effektivt bort bakterier och virus, då bakterierna är för stora för att passera genom porerna och virus asorberas inuti materialet (Brady-Estévez m. fl. 2010). De kvarhållna mikroberna inaktiveras till stor del av CNT inom några timmar.

En vanlig nackdel med många desinficerande nanomaterial är att de inte lämnar efter sig någon desinfektionsbiprodukt, vilket behövs för att kontrollera mikrobiell tillväxt under lagring och distribution av vatten. Nanoteknologibaserad desinfektion minskar dock bildningen av oönskade biprodukter. Långvarig funktion av nanomaterial som används för desinfektion är också en annan stor osäkerhet. Effekten hos antimikrobiella nanomaterial är också beroende av frisättning av biocidjoner vilken så småningom klingar av vartefter materialet töms. Kontroll vad gäller frisättning av joner och en utveckling av påfyllnadsstrategier behövs således.

Nanomaterial	Applikationer	Referens
Kolnanorör (CNT)	• avlägsnande av organiska och oorganiska föroreningar; • katalysator eller samkatalysator för nedbrytning av biologiskt material och beständiga organiska föroreningar; • antimikrobiella egenskaper; • lovande kandidat för avsaltning av havsvatten; • mikrobiell bränslecell.	Liu m.fl. (2013)
Metalloxider i nanoskala	• avlägsnande av tungmetaller; • reduktion av bakteriella patogener.	Soni m.fl.(2020)
Nanokatalysatorer	• reducerar följande föroreningar: PCB (polyklorerade bifenyl); färgämnen; bekämpningsmedel.	Muhammad m. fl. (2020)
Bioaktiva nanopartiklar	• avlägsnande av bakterier.	Savage m. fl. (2005)
Biomimetiska membran	• jonfiltrering; • organisk lösningsmedelsfiltrering.	Fuwad m.fl. (2019)
Nanonollvalent järn (nZVI)	• avlägsnande av giftiga och organiska föroreningar; • nedbrytning av halogenerade organiska föroreningar; • borttagning av tungmetaller och metalloxider.	Pasinszki (2020)
Magnetiska nanopartiklar	• avlägsnande av organiska föroreningar; • reduktion av tungmetalljoner.	Martinez-Boubeta m. fl. (2019)

Tabell 3.2

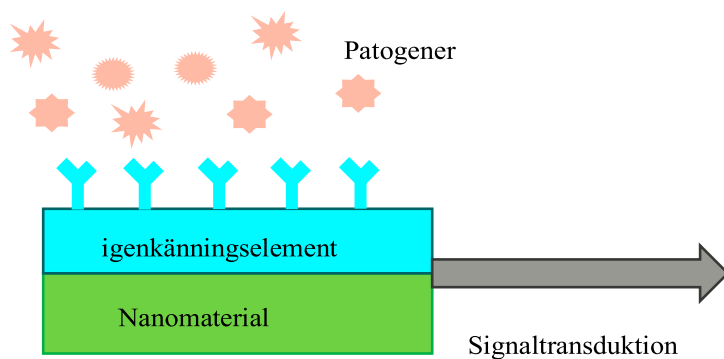
Nanomaterialapplikationer.

3.5 Sensorer och övervakning

Dricksvatten måste vara säkert att konsumera och således fritt från höga halter av patogener som kan äventyra människors hälsa. I traditionell vatten- och avloppsvattenrening saknas dock metoder för snabb detektering av patogener. För detta behövs online-sensorer med hög känslighet och selektivitet.

Enligt Vikesland och Wigginton (2010) kan online-detektering av patogener uppnås med nanobaserade biosensorer (Figur 3.6). Selektivitet uppnås genom igenkänning av antigener eller andra epitoper (den faktiska bindningspunkten på antigener) på utsidan av en patogen. Hög känslighet och snabb respons uppnås genom signaltransduktion vid igenkännandet. I en nanomaterialbaserad biosensor är igenkänningsselementet vanligtvis bundet till nanomaterialets yta. De mest använda nanomaterialen vid patogendetektering är magnetiska nanopartiklar, kvantprickar (QD), ädelmetaller, färgdopade nanopartiklar och kolnanorör (CNT).

Även om framtiden för nanomaterialbaserade biosensorer är lovande så finns det fortfarande många hinder, t.ex. biosensors robusthet i de förhållanden som råder i t.ex. ett avloppsreningsverk. Problem finns och måste utvecklas vad gäller icke-selektiv bindning och partiklarnas stabilitet (Vikesland och Wigginton 2010).



Figur 3.6

Mekanismen för en nanomaterialbaserad biosensor.

4 Teknikbedömning

Precis som andra nya teknologier har nanoteknik inte bara potentiella fördelar utan också potentiella risker. Det är viktigt att upprätta en dialog om nanoteknik som involverar forskare, konsumenter, driftpersonal, industrier och andra intressenter för att reflektera över vilka konsekvenser dessa nya tekniker kan medföra på folkhälsan och arbetsmiljö.

Det finns flera etiska frågor som fortfarande behöver klargöras kring nanoteknik. Enligt Schummer (2007) och Ajdary (2018) är den viktigaste etiska frågan kring nanoteknik huruvida nanopartiklarna skapar hälso- och miljöfaror på grund av deras storlek och form. Därför måste eventuella risker associerade med tillverkning och hantering av nanopartiklar i industriell skala, tillsammans med möjliga miljö- och hälsorisker noggrant övervägas (Baran 2016). Dreher (2004) räknade med att exponeringen för nanopartiklar kommer att öka när mängden och typerna av nanopartiklar som används i samhället ökar. Stander m. fl. (2011) förklarade att nanomaterial utgör hälsorisker genom att undgå kroppens normala försvarsmekanismer som är utvecklade för större partiklar. Nanopartiklar kommer in i kroppen via luft eller vatten/mat genom inandning, absorption genom huden eller förtäring.

Dessutom finns det aspekter med nanoteknik som relaterar till användning av sällsynta naturresurser och avfallshantering. I allmänhet är nanoteknik som undviker användningen av kritiska naturresurser eller som ersätter resurskrävande tekniker attraktiva. Det är därmed också önskvärt att produkter erhållna från sällsynta naturresurser kan återvinnas, vilket dock kan vara svårt när det kommer till nanostrukturerade kompositmaterial (Babatunde m. fl. 2020).

Vanligtvis kostar ny teknik mer än befintlig teknik, men den initiala högre kostnaden för nya tekniker kan kompenseras av förbättrad prestanda. Kostnaden för produktion av nanomaterial, såsom nano-TiO₂ eller andra metalloxider och polymernanofibrer är otroligt hög. För att minska den höga kostnaden finns det idag två strategier. En metod är att använda nanomaterial med låg renhet utan avsevärt lägre effektivitet (Qu m. fl. 2013). Den andra strategin är att förbättra kostnadseffektiviteten genom att regenerera och återanvända nanomaterial.

5 Barriärer och forskningsbehov

Nanoteknik har visat lovande resultat inom vatten- och avloppsreningsprocesser i laboratoriestudier. Vissa fullskaleapplikationer för hushåll och VA-branschen finns redan på marknaden (Bilaga B), medan andra tekniker kräver betydande forskning innan de kan implementeras.

Enligt Qu m. fl. (2013) kan behovet av forskning som behövs för att möjliggöra en storskalig implementering av nanoteknik i vattenrening delas in i två områden. För det första behöver utvecklade nanoteknologier testas under verkliga förhållanden. För det andra är långsiktiga effekter och funktion i stort sett okänt för nanoteknik i stort eftersom de flesta laboratoriestudier endast har genomförts under relativt kort tid. Således är forskningsbehovet av långtidsstudier under verkliga förhållanden stort.

Nanomaterial har unika utmaningar vad gäller risk vid hantering eftersom materialen utgörs av små partiklar och inte molekyler eller joner, för vilka ramar för riskbedömning och protokoll redan finns. Bättre förståelse och hantering av potentiella risker förknippade med användningen av nanomaterial kommer att leda till en bredare acceptans hos allmänheten. Detta är avgörande för en bred implementering. Således kräver utvecklingen av tekniska lösningar baserat på nanoteknik också ytterligare forskning om hur nanopartiklar transporteras i människan och miljön samt övergripande kunskap om vilka skador nanopartiklar kan orsaka.

Förslag på framtida forskning är:

- Pilotstudier med nanoteknik tillämpad i vatten- och avloppsrening vid verkliga förhållanden;
- Långtidsstudier vid verkliga förhållanden för att öka förståelsen för hur nanopartiklar transporteras och vilka de potentiella riskerna med en storskalig användning av nanopartiklar kan vara.

6 Slutsats

Det krävs innovativ och effektiv vattenreningsteknik för att trygga en säker tillgång på dricksvatten. Nanoteknik har stor potential inom vatten- och avloppsvattenrening. Denna rapport ger en snabb översikt över olika nanoteknologier som har testats och tillämpats för vatten- och avloppsvattenrening (Tabell 6.1). Rapporten täcker in flera grupper av tekniker men går inte så djupt in i varje teknik. I allmänhet är nanotekniken mycket lovande för applikationer inom vatten- och avloppsvattenbehandling, särskilt vad gäller adsorption, membranfiltrering, fotokatalys och desinfektion. Många nanoteknologier kan enkelt anpassas till den nuvarande behandlingsprocessen och det finns färdiga produkter på marknaden baserade på nanoteknologi, men de flesta tekniker är i TRL nivå mindre än 6 (teknologi demonstrerad i relevant miljö) och behöver fortfarande mycket utveckling innan fullskaleapplikationer är möjliga.

Tabell 6.1

Nanoteknik tillämpas i vatten- och avloppsvattenrening.

Processer	Exempel	TRL
Nanoadsorbtion för att avlägsna organiska och oorganiska föroreningar, tungmetaller	Kolbaserade nanoadsorbenter; metallbaserade nanoadsorbenter;	TRL 1-6
Membranprocesser	Nanofibermembran; nanofibermembran; nanokompositmembran; biomimetiska membran	TRL 1-5
Nanofotokatalys för att avlägsna persistenta organiska föroreningar	Titandioxid, CNT	TRL 1-5
Desinfektion	Nanometalloxider (nano-Ag, nano-ZnO, nano-TiO ₂ m.fl.), CNT, nZVI	TRL 1-6

Framförallt saknas forskning under verkliga förhållanden och med verkligt vatten/avloppsvatten samt långtidsstudier i pilotskala. Dessutom måste risken med att använda nanopartiklar vidare utredas för att ge en fullständig bild av teknikområdets potential. Därmed finns det många utmaningar som måste övervinnas innan nanoteknik kan implementeras i stor skala. Många av dessa frågor, såsom teknikoptimering, initialt höga kostnader, och osäkerheter vad gäller miljöaspekter och mänsklig risk, går dock att överbrygga på sikt genom forskning och utveckling. För att eliminera dessa hinder är samarbete mellan olika sektorer, såsom forskare, industri, myndigheter och andra intressenter viktigt.

Referenser

- Ajdary, M., Moosavi, M., Rahmati, M., Falahati, M., Mahboubi, M., Mandegary, A., Jangjoo, S., Mohammadinejad, R., Varma, R. 2018 Health Concerns of Various Nanoparticles: A Review of Their in Vitro and in Vivo Toxicity. *Nanomaterials*, 8 (9): 634
- Alvarez, P. J. J., Chan, C. K., Elimelech, M., Halas, N. J. & Villagrán, D. 2018. Emerging opportunities for nanotechnology to enhance water security. *Nature Nanotechnology*, 13, 634-641.
- Babatunde, D. E., Denwigwe, I. H., Babatunde, O. M., Gbadamosi, S. L., Babalola, I. P. & Agboola, O. 2020. Environmental and Societal Impact of Nanotechnology. *IEEE Access*, 8, 4640-4667.
- Bae, T. & Tak, T. 2005. Effect of TiO₂ nanoparticles on fouling mitigation of ultrafiltration membranes for activated sludge filtration. *Journal of Membrane Science*, 249, 1-8.
- Bai, Y., Sun, Q., Xing, R., Wen, D. & Tang, X. 2010. Removal of pyridine and quinoline by bio-zeolite composed of mixed degrading bacteria and modified zeolite. *Journal of hazardous materials*, 181, 916-922.
- Baran, A. 2016. Nanotechnology: legal and ethical issues. *Engineering Management in Production and Services*, 8, 47-54.
- Bora, T. & Dutta, J. 2014. Applications of nanotechnology in wastewater treatment--a review. *J Nanosci Nanotechnol*, 14, 613-26.
- Bottino, A., Capannelli, G., D'asti, V. & Piaggio, P. 2001. Preparation and properties of novel organic-inorganic porous membranes. *Separation and Purification Technology*, 22-23, 269-275.
- Brady-Estévez, A. S., Schnoor, M. H., Kang, S. & Elimelech, M. 2010. SWNT-MWNT Hybrid Filter Attains High Viral Removal and Bacterial Inactivation. *Langmuir*, 26, 19153-19158.
- Deliyanni, E. A., Bakoyannakis, D. N., Zouboulis, A. I. & Matis, K. A. 2003. Sorption of As(V) ions by akaganéite-type nanocrystals. *Chemosphere*, 50, 155-163.
- Diallo, M. S., Christie, S., Swaminathan, P., Johnson, J. H. & Goddard, W. A. 2005. Dendrimer Enhanced Ultrafiltration. 1. Recovery of Cu(II) from Aqueous Solutions Using PAMAM Dendrimers with Ethylene Diamine Core and Terminal NH₂ Groups. *Environmental Science & Technology*, 39, 1366-1377.
- Dong, Y., Wu, D., Chen, X. & Lin, Y. 2010. Adsorption of bisphenol A from water by surfactant-modified zeolite. *J Colloid Interface Sci*, 348, 585-90.
- Dreher, K. L. 2004. Health and Environmental Impact of Nanotechnology: Toxicological Assessment of Manufactured Nanoparticles. *Toxicological Sciences*, 77, 3-5.
- Ebert, K., Fritsch, D., Koll, J. & Tjahjajawiguna, C. 2004. Influence of inorganic fillers on the compaction behaviour of porous polymer based membranes. *Journal of Membrane Science*, 233, 71-78.
- Fanourakis, S. K., Peña-Bahamonde, J., Bandara, P. C. & Rodrigues, D. F. 2020. Nano-based adsorbent and photocatalyst use for pharmaceutical contaminant removal during indirect potable water reuse. *npj Clean Water*, 3, 1.

-
- Feng, Q. L., Wu, J., Chen, G. Q., Cui, F. Z., Kim, T. N. & Kim, J. O. 2000. A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *J Biomed Mater Res*, 52, 662-8.
- Fuwad, A., Ryu, H., Malmstadt, N., Kim, S. M. & Jeon, T.-J. 2019. Biomimetic membranes as potential tools for water purification: Preceding and future avenues. *Desalination*, 458, 97-115.
- Gorria, P., Sevilla, M., Blanco, J. A. & Fuertes, A. B. 2006. Synthesis of magnetically separable adsorbents through the incorporation of protected nickel nanoparticles in an activated carbon. *Carbon*, 44, 1954-1957.
- Hu, H., Wang, Z. & Pan, L. 2010. Synthesis of monodisperse Fe₃O₄@silica core-shell microspheres and their application for removal of heavy metal ions from water. *Journal of Alloys and Compounds*, 492, 656-661.
- Hu, J., Chen, G. & Lo, I. M. C. 2006. Selective Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater Using Maghemite Nanoparticle: Performance and Mechanisms. *Journal of Environmental Engineering*, 132, 709-715.
- Hyung, H. & Kim, J.-H. 2008. Natural Organic Matter (NOM) Adsorption to Multi-Walled Carbon Nanotubes: Effect of NOM Characteristics and Water Quality Parameters. *Environmental Science & Technology*, 42, 4416-4421.
- Iram, M., Guo, C., Guan, Y., Ishfaq, A. & Liu, H. 2010. Adsorption and magnetic removal of neutral red dye from aqueous solution using Fe₃O₄ hollow nanospheres. *J Hazard Mater*, 181, 1039-50.
- Ji, L., Chen, W., Duan, L. & Zhu, D. 2009. Mechanisms for strong adsorption of tetracycline to carbon nanotubes: A comparative study using activated carbon and graphite as adsorbents. *Environmental Science & Technology*, 43, 2322-2327.
- Kanichi, S. 2014. Nanotechnology for water treatment. *Environmental Analytical Chemistry*, 1.
- Kolnanörör, W. O. E. H. 2020. https://sv.qaz.wiki/wiki/Optical_properties_of_carbon_nanotubes.
- Kunduru, K. R., Nazarkovsky, M., Farah, S., Pawar, R. P., Basu, A. & Domb, A. J. 2017. 2 - Nanotechnology for water purification: applications of nanotechnology methods in wastewater treatment. In: Grumezescu, A. M. (ed.) *Water Purification*. Academic Press.
- Lee, J. H., Kim, H.-S., Yun, E.-T., Ham, S.-Y., Park, J.-H., Ahn, C. H., Lee, S. H. & Park, H.-D. 2020. Vertically Aligned Carbon Nanotube Membranes: Water Purification and Beyond. *Membranes*, 10.
- Li, D. & Xia, Y. 2004. Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel? *Advanced Materials*, 16, 1151-1170.
- Li, Y.-H., Di, Z., Ding, J., Wu, D., Luan, Z. & Zhu, Y. 2005. Adsorption thermodynamic, kinetic and desorption studies of Pb²⁺ on carbon nanotubes. *Water Research*, 39, 605-609.
- Li, Y., Ding, J., Luan, Z., Di, Z., Zhu, Y., Xu, C., Wu, D. & Wei, B. 2003. Competitive adsorption of Pb²⁺, Cu²⁺ and Cd²⁺ ions from aqueous solutions by multiwalled carbon nanotubes. *Carbon*, 41, 2787-2792.
- Liau, S. Y., Read, D. C., Pugh, W. J., Furr, J. R. & Russell, A. D. 1997. Interaction of silver nitrate with readily identifiable groups: relationship to the antibacterial action of silver ions. *Lett Appl Microbiol*, 25, 279-83.
- Liu, X., Wang, M., Zhang, S. & Pan, B. 2013. Application potential of carbon nanotubes in water treatment: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 25, 1263-1280.
-

-
- Lu, C., Chiu, H. & Liu, C. 2006. Removal of Zinc(II) from Aqueous Solution by Purified Carbon Nanotubes: Kinetics and Equilibrium Studies. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 2850-2855.
- Mackie, E. B., Wolfson, R. A., Arnold, L. M., Lafdi, K. & Migone, A. D. 1997. Adsorption Studies of Methane Films on Catalytic Carbon Nanotubes and on Carbon Filaments. *Langmuir*, 13, 7197-7201.
- Martinez-Boubeta, C. & Simeonidis, K. 2019. Chapter 20 - Magnetic Nanoparticles for Water Purification. In: Thomas, S., Pasquini, D., Leu, S.-Y. & Gopakumar, D. A. (eds.) *Nanoscale Materials in Water Purification*. Elsevier.
- Maximous, N., Nakhla, G., Wong, K. & Wan, W. 2010. Optimization of Al₂O₃/PES membranes for wastewater filtration. *Separation and Purification Technology*, 73, 294-301.
- Mayo, J. T., Yavuz, C., Yean, S., Cong, L., Shipley, H., Yu, W., Falkner, J., Kan, A., Tomson, M. & Colvin, V. L. 2007. The effect of nanocrystalline magnetite size on arsenic removal. *Science and Technology of Advanced Materials*, 8, 71-75.
- Muhammad, S. & Muhammad Bilal, T. 2020. Role of Nanocatalyst (Photocatalysts) for Waste Water Treatment. *Current Analytical Chemistry*, 16, 1-12.
- Oliveira, L. C. A., Rios, R. V. R. A., Fabris, J. D., Garg, V., Sapag, K. & Lago, R. M. 2002. Activated carbon/iron oxide magnetic composites for the adsorption of contaminants in water. *Carbon*, 40, 2177-2183.
- Pan, B. & Xing, B. 2008. Adsorption Mechanisms of Organic Chemicals on Carbon Nanotubes. *Environmental Science & Technology*, 42, 9005-9013.
- Pasinszki, T., Krebsz, M. 2020. Synthesis and Application of Zero-Valent Iron Nanoparticles in Water Treatment, Environmental Remediation, Catalysis, and Their Biological Effects. *Nanomaterials*, 10, 917.
- Patanjali, P., Singh, R., Kumar, A. & Chaudhary, P. 2019. Chapter 20 - Nanotechnology for water treatment: A green approach. In: Shukla, A. K. & Iravani, S. (eds.) *Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles*. Elsevier.
- Pendergast, M. T. M., Nygaard, J. M., Ghosh, A. K. & Hoek, E. M. V. 2010. Using nanocomposite materials technology to understand and control reverse osmosis membrane compaction. *Desalination*, 261, 255-263.
- Peng, X., Luan, Z., Di, Z., Zhang, Z. & Zhu, C. 2005. Carbon nanotubes-iron oxides magnetic composites as adsorbent for removal of Pb(II) and Cu(II) from water. *Carbon*, 43, 880-883.
- Qu, X., Alvarez, P. J. J. & Li, Q. 2013. Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Research*, 47, 3931-3946.
- Savage, N. & Diallo, M. S. 2005. Nanomaterials and Water Purification: Opportunities and Challenges. *Journal of Nanoparticle Research*, 7, 331-342.
- Schummer, J. Identifying Ethical Issues Of Nanotechnologies. 2007.
- Sengur-Tasdemir, R., Aydin, S., Turken, T., Genceli, E. A. & Koyuncu, I. 2016. Biomimetic Approaches for Membrane Technologies. *Separation & Purification Reviews*, 45, 122-140.
- Sharma, Y. C., Srivastava, V., Singh, V. K., Kaul, S. N. & Weng, C. H. 2009. Nano - adsorbents for the removal of metallic pollutants from water and wastewater. *Environmental Technology*, 30, 583-609.
- Shen, Y.-X., Saboe, P. O., Sines, I. T., Erbakan, M. & Kumar, M. 2014. Biomimetic membranes: A review. *Journal of Membrane Science*, 454, 359-381.
-

-
- Sheng, G. D., Shao, D. D., Ren, X. M., Wang, X. Q., Li, J. X., Chen, Y. X. & Wang, X. K. 2010. Kinetics and thermodynamics of adsorption of ionizable aromatic compounds from aqueous solutions by as-prepared and oxidized multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Hazardous Materials*, 178, 505-516.
- Soni, R., Pal, A. K., Tripathi, P., Lal, J. A., Kesari, K. & Tripathi, V. 2020. An overview of nanoscale materials on the removal of wastewater contaminants. *Applied Water Science*, 10, 189.
- Stander, L. & Theodore, L. 2011. Environmental implications of nanotechnology--an update. *International journal of environmental research and public health*, 8, 470-479.
- Vikesland, P. J. & Wigginton, K. R. 2010. Nanomaterial Enabled Biosensors for Pathogen Monitoring - A Review. *Environmental Science & Technology*, 44, 3656-3669.
- Xiu, Z.-M., Ma, J. & Alvarez, P. J. J. 2011. Differential Effect of Common Ligands and Molecular Oxygen on Antimicrobial Activity of Silver Nanoparticles versus Silver Ions. *Environmental Science & Technology*, 45, 9003-9008.
- Xiu, Z.-M., Zhang, Q.-B., Puppala, H. L., Colvin, V. L. & Alvarez, P. J. J. 2012. Negligible Particle-Specific Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles. *Nano Letters*, 12, 4271-4275.
- Yalcinkaya, F. 2019. A review on advanced nanofiber technology for membrane distillation. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14, 1558925018824901.
- Yang, K., Zhu, L. & Xing, B. 2006. Adsorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Carbon Nanomaterials. *Environmental Science & Technology*, 40, 1855-1861.
- Yean, S., Cong, L., Yavuz, C. T., Mayo, J. T., Yu, W. W., Kan, A. T., Colvin, V. L. & Tomson, M. B. 2005. Effect of magnetite particle size on adsorption and desorption of arsenite and arsenate. *Journal of Materials Research*, 20, 3255-3264.
- Zhang, S., Niu, H., Hu, Z., Cai, Y. & Shi, Y. 2010. Preparation of carbon coated Fe₃O₄ nanoparticles and their application for solid-phase extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from environmental water samples. *J Chromatogr A*, 1217, 4757-64.

Bilagor

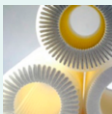
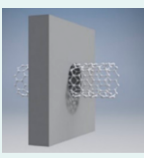
Bilaga A

Exempel på projekt/program som innehåller nanoteknologi i vatten/avlopps-
vattenrening i Sverige de senaste 5 åren

År	Projekt/Program	Projektägare
2018-2019	Future ion-channel based membranes for water purification: utveckling av nya avancerade membran för att säkerställa en hållbar dricksvattenförsörjning.	Lunds universitet
2017-2021	Mistra TerraClean: skapa billiga, hållbara, säkra och smarta material för integrerade filtersystem för att rena luft och vatten från miljöfarliga substanser.	KTH
2015-2018	Advanced multifunctional nanostructured materials applied to remove arsenic in Argentinian groundwater: utveckla och implementera en pilotanläggning, baserad på avancerade multifunktionella nanostrukturerade material, för behandling av arsenik-förorenat vatten.	KTH
2018-2022	Cleaning Litter by developing and Applying Innovative Methods in European seas – CLAIM programme: en fotokatalytisk anordning utvecklas och kommer att användas för att påskynda nedbrytning av mikroplaster från produkter för personhygien med UV-ljus.	KTH
2014-2023	Mistra Environmental Nanosafety: ta fram nya och förbättrade metoder åt tillsynsmyndigheter och den industri som utvecklar och/eller använder nanomaterial för riskbedömning av nanoteknik.	Lunds universitet

Bilaga B

Exempel på nanoprodukter för vatten- och avloppsvattenrening de senaste 5 åren (registrerade på webbsidan StatNano (2020-11): www.statnano.com ej fullständig lista)

Produktnamn	Bild	Tillämpning och egenskaper	Land
Antibakteriellt vattenreningsfilter		Antibakteriell (innehåller nanopartiklar).	IR
Nanofiberfilter		Virus, bakterier och cystor, reduktion >99 %.	USA
NANOWEB Process		Hög mikrofiltreringsprestanda med lågt tryckfall.	USA
Dricksvattenautomat HU-200 - B-Ware		4-filtersystem med lågt underhåll som består av ett sedimentfilter, två kolfilter i serie, och ett nanosilvermembranfiltret (HN-200) alternativt ett ultrafilter (HU-200). Renar vatten från bekämpningsmedel, tungmetaller, klor, läkemedelsrester (hormoner), skadliga salter, virus och bakterier.	DE
Membran i nanorör		Nanorörsmembran för tillverkning av biobränslen och koldioxidneutrala bränslen samt för cellfria biologiska processer och precis molekylär separationer.	USA
Blue Marine LED UV-ljus från WaterSprint		Borttagning av giftiga föroreningar och bakterier.	SE
Omvänt osmosfilter med mineralisering		Vattenbehandling inklusive mineralisering.	SE
Super Nano-filter SNW3		Super Nano Filter SNW3 är ett filter som är extremt effektivt genom ett 13-stegsfilter med absorptionsmedium för alla slags föroreningar.	SE
FluidWorker 210/300		Intelligent bakteriereduktion.	SE

Produktnamn	Bild	Tillämpning och egenskaper	Land
Organo-Clay Coagulants & Flocculants		Nanopulver. Produkten har: 1) stor yta, 2) bra neutraliseringsförmåga, 3) bra absorptionförmåga, 4) är enkel att avvattna och 5) binder föroreningar.	USA
Organoclay med aktivt kol		Pulvrerade och granulära produkter för avlägsnande av lösliga föroreningar inklusive BOD, COD, bekämpningsmedel, PCB och färger.	IN
ORGANOLOC		Exklusiv sorbent för organiska ämnen.	UK
ORGANOCLAY® MRM		Svavel-impregnerat organofilter granulärt filtreringsmedium som adsorberar organiska vätskeföroreningar (NAPL) och lösta organiska molekyler med låg löslighet i vatten. Materialet binder också kvicksilver och arsenik från vattenfasen.	USA
Multibore		Nanoporöst material som ger genomgående hög filtratkvantitet och har hög kemisk beständighet och bra antifoulingegenskaper	DE
Applexion® NF150		Sanitära spiralmembran som vanligtvis används i mejeriindustrin för nanofiltrering.	FR
MEXFIL™ WMC200 dNF20		NXF MexFil™-moduler för direkt nanofiltrering (dNF).	NL
Water Purifier		Nanopartiklar/nanopulver baserat på silver. Tar bort tungmetaller, sediment, olika föroreningar (smuts, sand, rost) från vatten. Tar bort virus, bakterier och svampar.	KS
Nanomembrane		Nano-membranfilter.	KS
Ultrafiltration inopor®		Membran TiO ₂ , ZrO ₂ , Al ₂ O ₃	DE
MBCR Filtreringsbehållare		Moving Bed Ceramic Reactor (MBCR) är en avancerad processkombination av MBBR med platta keramiska membran.	DE
FUSHUI direkt dricksvattenmaskin		Nano AgO.	CH
Pure Nature Soils		Nanoporös zeolit.	USA
Nano PH FILTER		Katalys för att producera väte och skapa turmalinpulver med elektrisk laddning.	KS

Produktnamn	Bild	Tillämpning och egenskaper	Land
CIW-1001		Nanosilverpartikel; Antibakteriell aktivitet.	KS
Kolblock med nano-silver		Nanosilverpartikel; Minskar smak, lukt, klor; även antibakteriell aktivitet.	TW

Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se