



# **Teknologikatalog**

## **Innovationspartnerskabet**

### **for miljøfarlige, forurenende stoffer**

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Caroline Kragelund Rickers, Teknologisk Institut  
Jonathan Guld Christensen, Teknologisk Institut  
Karin Cederkvist, Niras

Grafiker/bureau:

Tryk:

Fotos:

ISBN: [xxx]

# Indhold

<b>1.</b>	<b>Forord</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Resumé</b>	<b>5</b>
<b>1.</b>	<b>Innovationspartnerskabet for MFS</b>	<b>7</b>
1.1	Tilgang i Innovationspartnerskabet for MFS	7
<b>2.</b>	<b>Politisk dagsorden</b>	<b>9</b>
2.1	Skærpelser på området	10
<b>3.</b>	<b>Afholdelse og resultater af workshops</b>	<b>13</b>
3.1	Introduktion til TRL-niveau	13
<b>4.</b>	<b>Workshop 1: Tungmetaller</b>	<b>15</b>
4.1	Del 1: Identifikation og prioritering af vandtyper	15
4.2	Del 2: Nuværende teknologier til tungmetalrensning	17
4.3	Del 3: Kortlægning af teknologibehov til forbedret tungmetalfjernelse	17
4.4	Estimeret TRL-niveau af nye renseteknologier	18
4.5	Delkonklusion workshop 1	19
<b>5.</b>	<b>Workshop 2: Det 4. renses trin</b>	<b>20</b>
5.1	Præsentation af nuværende teknologier	20
5.1.1	Erfaringer fra udlandet	23
5.2	Del 1: Udviklingsbehov og barrierer for implementering af det 4. renses trin	23
5.3	Del 2: Håndtering af MFS-koncentreret slam og teknologiske udviklingsbehov	24
5.4	Udviklingsbehov	25
5.5	Teknologibeskrivelser for slamhåndtering	26
5.6	Delkonklusion workshop 2	27
<b>6.</b>	<b>Teknologileverandører og spørgeskema – håndtering af MFS i vandige strømme</b>	<b>28</b>
<b>7.</b>	<b>Sammenhæng mellem innovationspartnerskabet og det strategiske partnerskab</b>	<b>31</b>
<b>8.</b>	<b>Samlet konklusion</b>	<b>33</b>

# 1. Forord

Innovationspartnerskabet for miljøfarlige, forurenende stoffer (MFS) udgjorde en konkret del af det overordnede strategiske partnerskab beskrevet i Miljøministeriets strategi for miljøfarlige stoffer fra 2021. Formålet med innovationspartnerskabet for MFS var specifikt at understøtte teknologiudvikling og fremme innovative løsninger til at reducere udledningen af miljøfarlige stoffer til vandmiljøet. Innovationspartnerskabet blev bevilget af MUDP's bestyrelse i 2021 og har ligget under MUDP's sekretariat ved Nanna Rørbech. Innovationspartnerskabet blev ledet af Teknologisk Institut med deltagelse af NIRAS. I forbindelse med tilblivelsen af Innovationspartnerskabet for MFS' blev der nedsat en styregruppe bestående af:

- Myndigheder: Repræsentant fra Miljøstyrelsen og Miljøministeriet, KL og Danske Regioner
- Brancheforeninger: Repræsentant fra DANVA, Dansk Industri og Dansk Miljøteknologi.

Nanna Rørbech og styregruppen har deltaget aktivt i forbindelse med udvælgelsen af workshopemner og har bidraget med oplæg på de afholdte workshops.

Der er i Innovationspartnerskabet for MFS blevet afholdt to workshops omhandlende tungmetaller og det kommende 4. rensesrin. Formålet for begge workshops har været dels at få en status på gældende lovgivning, dels at afdække de eksisterende teknologiske løsninger og behovet for yderligere teknologisk innovation. Hvor det er muligt, er der i Teknologikataloget inkluderet information om anlægsomkostninger og driftsudgifter for de teknologiske løsninger. MUDP-rapporter fra 2011 og frem er blevet gennemgået med det formål at afdække dels vandmiljøtype, der blev undersøgt ift. MFS, dels rensesgrader for MFS samt anlægsomkostninger og driftsudgifter, også benævnt CAPEX/OPEX. Der er gennemgået rapporter for drikkevand og afværgvand, spildevand samt processpildevand fra industrier. Meget få MUDP-projekter har i den ovennævnte periode været gennemført på et tilstrækkelig højt TRL-niveau, og det har således ikke været muligt at bestemme omkostningerne til renses teknologierne. Derfor er projekterne ikke inkluderet i teknologikataloget, ej heller rensesgrader og økonomi. Det blev derfor besluttet at suppleret med et spørgeskema, der blev rundsendt til teknologileverandører, dels gennem netværk fra DI Vand, Dansk Miljøteknologi og netværk fra Teknologisk Institut, dels gennem deltagende teknologileverandører på de to workshops.

Der er planlagt endnu en workshop omhandlende PFAS-fjernelse.

## 2. Resumé

Formålet med Innovationspartnerskabet for MFS var todelt:

1. At afdække eksisterende teknologiske løsninger til begrænsning af miljøfarlige, forurenende stoffer (MFS) i vandmiljøet og identificere udviklingsbehovet for nye løsninger.
2. At facilitere vidensdeling om MFS-problematikken og mulige løsninger på tværs af forskellige brancher og interessenter.

Innovationspartnerskabet skulle således fungere som et vidensforum, hvor den eksisterende viden om teknologier til MFS-håndtering blev indsamlet, og behovet for nye teknologiske løsninger blev identificeret. Dette skulle ikke alene danne grundlag for konkrete teknologiske fremskridt inden for MFS-rensning, men også give input til den reguleringsmæssige indsats for at begrænse udledningen af MFS til vandmiljøet. Afdækning af dels eksisterende teknologier til MFS-begrænsning, dels identificering af udviklingsbehov for nye løsninger samt de lovgivningsmæssige udfordringer skete med en modificeret 'Double Diamond'-tilgang:

1. Identificerende workshop: Identificere relevante fokusområder.
2. Evaluerende workshop: Identificere muligheder, begrænsninger og udviklingsbehov.

Konkret bestod innovationspartnerskabets arbejde primært af afholdelsen af to workshops, som fokuserede på henholdsvis tungmetaller og det kommende 4. rensetrin for spildevandsbehandling. Formålet med de to workshops var at samle relevante interessenter, herunder forsyninger, myndigheder, teknologileverandører og forskere, for at danne et overblik over udfordringer, eksisterende løsninger og udviklingsbehov inden for de to fokusområder.

Workshop 1 fokuserede på tungmetaller. Formålet var at prioritere vandtyper og at identificere nuværende renseteknologier og fremtidige udviklingsbehov.

Spildevand blev prioriteret som den vigtigste vandtype i forhold til tungmetallforurening. Begrundelsen var, at spildevand udgør den største mængde vand med relativt høje koncentrationer af tungmetaller. Almindeligt belastet overfladevand og industrielt spildevand blev også prioriteret højt, da de to typer vand kan indeholde høje koncentrationer og lede til forurening af sårbare recipienter.

Workshoppen afdækkede, at der allerede eksisterer mange forskellige teknologier til fjernelse af tungmetaller fra vand. Disse spænder fra simple, mekaniske metoder som bundfældning og filtrering til mere avancerede membran- og adsorptionsteknologier som ionbytning, aktivt kul og nanofiltrering. Dette viser, at der er mange tilgængelige løsninger, men også et behov for yderligere optimering og udvikling.

Et af de områder, der blev identificeret som en afgørende barriere for implementering af nye tungmetallteknologier, var lovgivning og regulering. Deltagerne fremhævede behovet for ensartet regulering og klarere regler på tværs af kommuner og virksomheder. Dette ville lette udviklingen af teknologier, der er målrettet specifikke krav, i stedet for individuelt tilpassede løsninger.

Udover regulering blev teknologisk udvikling også udpeget som et vigtigt område. Der blev udtrykt behov for mere fleksible og fremtidssikrede løsninger, der kan tilpasses skiftende krav og nye rensetrin. Fokus bør være på udvikling af billigere teknologier samt metoder til genvinding af tungmetaller i stedet for blot fjernelse af samme.

De identificerede fremtidige teknologier spændte vidt i modenhedsniveau fra grundforskning (TRL 2-4) til næsten markedsklare løsninger (TRL 7-8), hvilket understreger behovet for både langsigtet forskning og mere kortsigtet udvikling og opskalering.

Workshop 2 fokuserede på det 4. rensetrin. Formålet var at diskutere udfordringer og behov relateret til implementering af teknologier til 4. rensetrin hos forsyninger.

En central udfordring identificeret på workshoppen var manglende viden om effektiviteten af de forskellige renseteknologier til 4. rensetrin og teknologiernes driftsforhold. Der blev udtrykt et behov for bedre dokumentation og overvågning. Derudover var der et klart ønske om klarere regulatoriske rammer og retningslinjer fra myndighederne for implementeringen af det 4. rensetrin. Dette er dog på vej med revisionen af byspildevandsdirektivet.

Workshoppen viste, at ozonering og aktivt kul er blandt de mest lovende og modne teknologier til fjernelse af miljøfarlige forurenende stoffer som lægemidler og pesticider på renseanlæg (TRL 9). Disse teknologier kan forventeligt opfylde de kommende krav i byspildevandsdirektivet. Dog blev det påpeget, at de nuværende løsninger ofte er meget energi- og ressourceintensive, hvilket kan modarbejde forsyningernes mål om energineutralitet.

Der blev identificeret et klart behov for, at fremtidens renseteknologier er mere fleksible og skalerbare, så de nemmere kan tilpasses skiftende krav og nye forurenende stoffer. Derudover skal der være øget fokus på bæredygtige og energieffektive løsninger samt integrerede koncepter, hvor værdifulde ressourcer som kvælstof og fosfor kan genvindes, og ikke som nu ende som restprodukter.

Et særligt fokusområde på workshoppen var håndteringen af restprodukter såsom slam med høje MFS-koncentrationer fra det 4. rensetrin. Der blev identificeret et stort udviklingsbehov for teknologier, der effektivt kan nedbryde eller destruere miljøfarlige stoffer i slammet, uden at det kræver enorme ressourcer i form af materialer og energi. Samtidig skal værdifulde næringsstoffer kunne genvindes.

En gennemgående pointe fra workshoppen var, at en holistisk tilgang er nødvendig for en vellykket implementering af det 4. rensetrin og for håndtering af MFS-slam. Aspekter som ressourceeffektivitet, klimapåvirkning, fleksibilitet og genanvendelse skal indtænkes allerede i designfasen af nye teknologier. Derudover understregede workshoppen betydningen af et styrket tværgående samarbejde mellem alle aktører - forsyninger, myndigheder, teknologileverandører og forskere - for at drive innovationen fremad og sikre bæredygtige løsninger.

# 1. Innovationspartnerskabet for MFS

Innovationspartnerskabet for miljøfarlige, forurenende stoffer (MFS) er et samarbejde faciliteret af Teknologisk Institut og NIRAS, hvor relevante interessenter inden for forskellige brancher og sektorer inddrages i forhold til at adressere problematikken med miljøfarlige stoffer i vandmiljøet.

Innovationspartnerskabet for MFS er finansieret af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljø- og Ligestillingsministeriet; MUDP deltager i planlægning og udførelse af workshops.

Følgende aktører indgår i partnerskabets styregruppe:

- Myndigheder: Repræsentanter fra Miljøstyrelsen, Miljø- og Ligestillingsministeriet, KL og Danske Regioner.
- Brancheforeninger: Repræsentant fra DANVA, Dansk Industri, Dansk Miljøteknologi.

Hvor det strategiske partnerskab i ministeriet har et bredt sigte om at styrke den samlede nationale indsats, er innovationspartnerskabets formål specifikt rettet mod den teknologiske dimension - at afdække eksisterende og fremtidige teknologibehov og fremme udviklingen af nye, innovative renseløsninger til begrænsning af miljøfarlige stoffer i udledninger til vandmiljøet. Derved understøtter innovationspartnerskabet en central del af den samlede strategi for miljøfarlige forurenende stoffer (MFS).

Regulering af MFS i vandmiljøet sker i dag gennem:

- EU's vandrammedirektiv med tilhørende datterdirektiver.
- Nationale love, bekendtgørelser og vejledninger, som bl.a. implementerer EU-reguleringen i dansk lovgivning.

Reguleringen sker således både gennem overordnede EU-direktiver og national lovgivning, som konkret udmønter sig i udledningskrav i tilladelser under overholdelse af fastsatte miljøkvalitetskrav for vandmiljøet. Dette beskrives nærmere i afsnittet om Politisk dagsorden.

## 1.1 Tilgang i Innovationspartnerskabet for MFS

Innovationspartnerskabet for miljøfarlige forurenende stoffer (MFS) har følgende overordnede formål:

- At afdække eksisterende teknologiske løsninger til begrænsning af MFS i vandmiljøet og identificere udviklingsbehov for nye løsninger.
- At facilitere vidensdeling om MFS-problematikken og mulige løsninger på tværs af forskellige brancher og interessenter.
- At fremme teknologiudvikling og innovation inden for renseløsninger, der reducerer udledning af MFS.

Teknologisk Institut og NIRAS var i tæt samarbejde med MUDP-ansvarlige for den overordnede facilitering af innovationspartnerskabet gennem aktiviteter som workshops, interviews, vidensindsamling og udarbejdelse af rapporter og teknologikatalog. Formålet var at skabe et vidensforum, hvor eksisterende viden blev indsamlet, og behovet for nye teknologiske løsninger blev identificeret. Dette danner grundlag for konkrete teknologiske fremskridt og bidrager

desuden til at give input til den konkrete myndighedsmæssige indsats for at begrænse udledningen af MFS til vandmiljøet.

Der blev afholdt i alt to workshops, som fokuserede på problematikken med udledning af tungmetaller hhv. en kommende implementering af det 4. rensesettrin på renseanlæg. Workshopmetodikken tager afsæt i innovationsprocessen 'Double Diamond' for at sikre en dyb forståelse af udfordringer og muligheder inden for hvert fokusområde. Tilgangen var modificeret således, at den identificerende og evaluerende workshop blev afholdt i samme session, som nærmere beskrevet nedenfor:

1. Den identificerende del af workshoppen identificerer relevante fokusområder (f.eks. miljøeffekter, forekomst, myndighedsbehandling).
2. Den evaluerende del af workshoppen identificerer muligheder, begrænsninger og udviklingsbehov - både tekniske og lovgivningsmæssige på baggrund af det indsamlede data.
3. Der suppleres med en vidensindsamlingsfase, hvor relevante primært MUDP-projekter gennemgås ift. projekter målrettet reduktion af MFS, og hvor teknologiudviklingen resulterer i en foreløbig businesscase. Det blev dog tydeligt ved gennemgang af MUDP-projekter målrettet MFS-fjernelse tilbage i tiden, at der ikke kunne findes ensartet data af tilstrækkelig kvalitet ift. at opstille teknologierne med rensesgrader og økonomi. Der er derfor ikke inkluderet data fra de gennemgåede MUDP-projekter i teknologikataloget. I stedet blev der oprettet et elektronisk spørgeskema, som blev rundsendt til forskellige aktuelle teknologileverandører mhp. at indhente yderligere information om teknologier til fjernelse af MFS og omkostninger hertil.
4. Der er identificeret et udviklingsbehov, herunder muligheder for nye, bedre og mere bæredygtige renseløsninger for den pågældende MFS-gruppe.

Udbyttet af de to afholdte workshops er samlet i dette teknologikatalog, som består af en gennemgang af den politiske dagsorden og reguleringsmæssige indsats, en beskrivelse af MFS af størst interesse samt en gennemgang af resultater fra de to gennemførte workshops. Resultaterne er afslutningsvis opsummeret i tabelform for at tydeliggøre de nuværende teknologier og de fremtidige udviklingsbehov.



## 2. Politisk dagsorden

EU's vandrammedirektiv skal sikre beskyttelsen af vandløb, søer, kystvande og grundvand i alle EU-lande (EU, 2000). Direktivet fastsætter miljømål og overordnede rammer for planlægning, gennemførelse af tiltag og overvågning af vandmiljøet. I henhold til vandrammedirektivet skal alle vandområder have opnået god økologisk og kemisk tilstand i 2027.

På baggrund af rammerne i direktivet skal Danmark og de øvrige EU-lande gennemføre en målrettet vandplanlægning for grundvand, vandløb, søer og den kystnære del af havet.

Det helt centrale element i vandplanlægningen er vandområdeplanerne med indsatsprogrammer og miljømål, som i Danmark er implementeret i en række forskellige love og bekendtgørelser. Bl.a. lov om vandplanlægning (LBK nr. 126 af 26/01/2017) og bekendtgørelse om indsatsprogrammer for vandområdedistrikter (BEK nr 797 af 13/06/2023) er vigtige elementer i implementeringen af vandrammedirektivet.

God tilstand i overfladevandområderne er opnået, når vandområdet har god kemisk tilstand og god økologisk tilstand<sup>1</sup>. Den kemiske tilstand er baseret på tilstanden af EU-prioriterede miljøfarlige forurenende stoffer (MFS), og den økologiske tilstand omfatter tilstanden af en række biologiske kvalitetselementer og nationalt specifikke miljøfarlige forurenende stoffer (MFS). (BEK nr 819 af 15/06/2023). (BEK nr 796 af 13/06/2023).

Et vandområde har god tilstand hvad angår MFS, når målte stofkoncentrationer ikke overskrider miljøkvalitetskrav (MKK). Hvis blot ét stof overskrider miljøkvalitetskravet<sup>2</sup> i vandområdet, klassificeres tilstanden som værende ikke-god.

For de EU-prioriterede stoffer er miljøkvalitetskrav oplyst i direktivet om miljøkvalitetsstandarder (EU, 2008), og kan findes i dansk lovgivning i bekendtgørelsen om fastlæggelse af miljømål for vandløb, søer, overgangsvande, kystvande og grundvand (BEK nr 796 af 13/06/2023). For de nationalt specifikke MFS gælder det, at disse ikke må overskride de nationalt fastsatte miljøkvalitetskrav, der er oplyst i samme bekendtgørelse.

I revisionen af EU-direktivet for miljøkvalitetsstandarder fra 2012 var der for overfladevand fastsat krav for 45 stoffer/stofgrupper der omfatter EU-prioriterede stoffer og visse andre stoffer (for 15 af disse er der fastsat krav både i vand og biota, for resten er der kun fastsat krav i vand).

I Danmark er der fastsat krav for 135 nationalt specifikke stoffer/stofgrupper i vand (for 9 af disse er der fastsat krav i både vand, sediment og/eller biota, for resten er der kun fastsat krav i vand). Der er yderligere fastsat nationale krav for 6 EU prioriterede stoffer i sediment og/eller biota (BEK nr 796 af 13/06/2023). Hvis blot et af disse MFS overskrider miljøkvalitetskravet, medfører det, at vandområdet er i ikke-god tilstand.

---

<sup>1</sup> For grundvand er den gode tilstand opnået, når der er god kemisk og god kvantitativ tilstand.

<sup>2</sup> Miljøkvalitetskrav (MKK) er den koncentration af et bestemt forurenende stof eller gruppe af forurenende stoffer i vand, sediment eller biota, som ikke bør overskrides af hensyn til beskyttelsen af menneskers sundhed og miljøet

## 2.1 Skærper på området

Vandrammedirektivet trådte i kraft i 2000, og skulle oprindeligt være opfyldt i 2015, med mulighed for fristforlængelse til 2027. På nuværende tidspunkt er Danmark langt fra at nå målet om god tilstand i de danske vandområder inden udgangen af 2027. Dette skyldes bl.a., at MKK for et eller flere MFS er overskredet i mange af vandområderne (MiljøGIS, 2024) (DCE, 2024a) (DCE, 2024b) (DCE, 2024c) (DCE, 2024d). Den dårlige tilstand i vandområderne gør sig også gældende i resten af EU.

Både direktiver og national lovgivning bliver løbende opdateret for at forbedre forholdene for vandmiljøet. I 2022 blev der stillet forslag om tilføjelse af 22 individuelle stoffer til listen over de 45 prioriterede stoffer i overfladevand i direktivet om miljøkvalitetsstandarder (EU, 2008) (EU, 2022). Dette inkluderer pesticider såsom glyphosat, visse lægemidler (smertestillende midler, antiinflammatoriske lægemidler og antibiotika), bisphenol A og sølv<sup>3</sup>. Derudover blev der også fremsat krav til summen af 24 per- og polyfluoralkylstoffer (PFAS), hvor der tidligere kun har været krav til PFOS (Europa-Parlamentet, 2024). Samtidig er der også stillet forslag om strengere krav for 14 stoffer, der allerede indgår, herunder også pesticider og bl.a. kviksølv og nikkel, PAH'er og nonylphenol. Forslaget er dog endnu ikke vedtaget.

Vandrammedirektivet understøttes af mere målrettede direktiver, de såkaldte datterdirektiver, som direktivet om rensning af byspildevand (byspildevandsdirektivet) (EU, 1991a) er et af. Byspildevandsdirektivet, der har til formål at beskytte miljøet mod virkninger fra udledninger af byspildevand og fra industrien har været under revision, med henblik på at forbedre spildevandsbehandlingen. Revisionen blev endeligt vedtaget af EU's ministerråd den 5. november 2024. Direktivet skal nu implementeres i national lovgivning og denne proces skal være afsluttet inden for tre år. Bl.a. medfører ændringerne at direktivets anvendelsesområde udvides til at omfatte mindre bebyggelser end det hidtil har gjort, at princippet om forureneren betaler kommer til at gælde for producenter af lægemidler og kosmetiske produkter, at energiforbrug og udledning af klimagasser fra spildevandsbehandlingen skal reduceres, at der kommer strammere krav til rensning for næringssaltene, hvor der er særligt fokus på kvælstof og fosfor, samt krav til rensning for MFS. Gennemførelsesplanlægningen for de vigtigste foranstaltninger, i det nuværende forslag, er opsummeret i FIGUR 1 **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.. OBS. Figuren er fra et ældre udkast til direktivet, og der arbejdes på en opdateret version.**

---

<sup>3</sup> Bisphenol A og sølv er allerede en del af de nationalt specifikke stoffer i Danmark.

	2025	2030	2035	2040
<b>Overløb efter voldsomt uvejr og byafløb (regnvand)</b>	Overvågning på plads	Integrerede planer for byområder med over 100 000 PE samt risikoområder udpegede	Integrerede planer for udsatte byområder med mellem 10 000 og 100 000 PE	Vejledende EU-mål for alle byområder med over 10 000 PE
<b>Egnede individuelle systemer</b>	Regelmæssig inspektion i alle medlemsstater + Rapporteringer for medlemsstater med høj grad af egnede individuelle systemer	EU-standards for egnede individuelle systemer		
<b>Mindre byområder</b>	Ny tærskel på 1 000 PE	Overholdelse for alle byområder med over 1 000 PE		
<b>Kvælstof og phosphor</b>	Udpegning af risikoområder (byområder med 10 000-100 000 PE)	Midlertidigt mål for fjernelse af kvælstof og phosphor i anlæg med over 100 000 PE + Nye standarder	Fjernelse af kvælstof og phosphor i alle anlæg med over 100 000 PE + Midlertidigt mål for risikoområder	Fjernelse af kvælstof og phosphor i alle risikoområder (med 10 000-100 000 PE)
<b>Forurenende mikrostofer</b>	Indførelse af ordninger for udvidet producentansvar	Risikoområder udpegede (10 000-100 000 PE) + Midlertidigt mål for anlæg over 100 000 PE	Alle anlæg over 100 000 PE udstyret + midlertidige mål for risikoområder	Alle anlæg ifm. risikoområder udstyret med avanceret rensning
<b>Energi</b>	Energisyn af anlæg over 100 000 PE	Syn af alle anlæg over 10 000 PE. Midlertidigt mål	Midlertidigt mål for energineutralitet	Opnået energineutralitet og reduktion af drivhusgasemissioner

**FIGUR 1.** Gennemførelsesplanlægningen for de vigtigste foranstaltninger (figur fra Forslag til Europa-parlamentets og rådets direktiv om rensning af byspildevand (omarbejdning) (EU, 2022)). Risikoområder er defineret som ferske vandområder som er eutrofiske eller som der er risiko for bliver eutrofiske. Overfladevandsområder der fungerer som indvindingsområder for drikkevand. Andre vandområder, hvor yderligere behandling er nødvendig for at sikre, at målene i andre direktiver opfyldes (EPRS, European Parliamentary Research Service, 2024).

**OBS.** Figuren er fra et ældre udkast til direktivet, og der arbejdes på en opdateret version.

Særligt relevant for innovationspartnerskabet for MFS er det øgede fokus på rensning af MFS (benævnt forurenende mikrostofer i FIGUR 1 ovenfor), hvilket fremgår af artikel 8 i forslaget til byspildevandsdirektivet. Denne artikel indfører bl.a. en forpligtelse til at anvende yderligere et 4. rensetrin, også kaldet den kvaternære rensning. Det 4. rensetrin er et ekstra behandlingstrin ud over de tre traditionelle rensetrin (mekanisk, biologisk og kemisk rensning), der skal tilføjes i spildevandsbehandlingen for at fjerne det bredest mulige spektrum af MFS. Et ekstra behandlingstrin kan f.eks. være ozonering adsorption med aktivt kul, filtrering med membraner, eller UV-desinfektion, ofte i kombination, som også beskrevet i nærmere i afsnittet Workshop 2: Det .

For at overvåge rensningen af MFS, indeholder direktivet forslag til indikatorstoffer (lægemidler og et par korrosionsstoffer) inden for gruppen af MFS. Der er således 13 stoffer nævnt i bilag 1 til direktivet (EU, 2023). De er opdelt i kategori 1 og kategori 2, og fremgår af TABEL 1 nedenfor. Der er i det vedtagne direktiv krav til, at den mindste procentvise rensning er 80% og følgende fremgår af forslaget:

'Den procentvise nedbringelse beregnes for mindst seks stoffer. Der skal være dobbelt så mange stoffer i kategori 1 som i kategori 2. Hvis der ikke kan måles tilstrækkelige koncentrationer af seks stoffer, vælger den kompetente myndighed andre stoffer til beregning af den mindste procentvise nedbringelse, når det er nødvendigt. Gennemsnittet af alle de målte procentvise nedbringelser skal bruges til at vurdere, om den krævede mindste procentvise nedbringelse på 80 % er nået.'

**TABEL 1.** Oversigt over lægemidler og korrosionsmidler, der i forslaget til byspildevandsdirektivet indgår i hhv. kategori 1 og kategori 2, og som skal reduceres med minimum 80% i danske renseanlæg.

<b>Kategori 1 (stoffer der let kan fjernes):</b>	<b>Kategori 2 (stoffer der let kan bortskaffes):</b>
Amisulprid	Benzothiazol
Carbamazepin	Candesartan
Citalopram	Irbesartan
Clarithromycin	Blanding af 4-methylbenzotriazol og 5-methylbenzotriazol
Diclofenac	
Hydrochlorthiazid	
Metoprolol	
Venlafaxin	

På nuværende tidspunkt er der dog også nationale tiltag på vej i Danmark af betydning for rensning af spildevand, bl.a. er en ændring af tilslutningsvejledningen for industrispildevand til offentlige spildevandsanlæg (VEJ nr. 9810 af 31/05/2006), blevet sendt i høring i november 2024. Denne lægger op til skærpede grænseværdier for 11 stoffer og tilføjelse af grænseværdier for yderligere 17 stoffer, inklusiv PFAS 24.

Samtidig har afgørelser i Miljø- og Fødevarerklagenævnet medført skærpet praksis på området, og en revision af Miljøstyrelsens "Vejledning til bekendtgørelse om indsatsprogrammer for vandområdedistrikter" (VEJ nr 9210 af 18/04/2024), samt revision af dele af deres "Spørgsmål og svar om udledning af visse forurenende stoffer til vandmiljøet" (Miljøstyrelsen, 2024).

Disse revisioner og skærpelser på området vil berøre mange nuværende og kommende udledninger, og der er ingen tvivl om, at der vil være behov for mere målrettet rensning af vand for MFS og næringsstoffer fremover. Det nødvendiggør, at der findes nye renseløsninger.

# 3. Afholdelse og resultater af workshops

Det primære arbejde i Innovationspartnerskabet for MFS har været at facilitere to workshops. Fokus for disse workshops er blevet besluttet i samråd med styregruppen og er udvalgt blandt følgende mulige emner:

1) Perfluorerede forbindelser (PFAS); 2) **farmaceutiske stoffer, herunder antibiotika, samt østrogener**; 3) **tungmetaller**; 4) aromatiske kulbrinter, herunder PAH; 5) fenoler; 6) blødgørere; 7) pesticider og 8) mikroplast.

Valget faldt i første omgang på tungmetaller, da tilstedeværelsen af perfluorerede forbindelser (PFAS) og tungmetaller blev identificeret som de mest aktuelle problematikker, men ud fra en betragtning om at tungmetaller endnu ikke havde været i fokus i samme grad som perfluorerede forbindelser. Efterfølgende har MUDP's bestyrelse besluttet at afholde endnu en workshop om PFAS, som også bliver rapporteret i slutningen af 2024.

Valget af fokus for anden workshop faldt på farmaceutiske stoffer, herunder antibiotika, da de er højaktuelle i forbindelse med implementering af det 4. renses trin på forsyningsselskabernes renseanlæg, som vil blive implementeret frem mod 2040. Her stilles netop krav til rensegrader for en række farmaceutiske stoffer.

## 3.1 Introduktion til TRL-niveau

En vigtig del af resultaterne fra de to workshops var at identificere nuværende og fremtidige behov for teknologier til vandbehandling, mht. både tungmetalfjernelse og fjernelse af farmaceutiske stoffer. For at beskrive teknologiers modenhed i forhold til fuldskalaimplementering anvendes begrebet Technology Readiness Level (TRL), se FIGUR 2. Som angivet på figuren, bevæger teknologier sig op i TRL-niveauet fra grundforskning, til pilotskala og hele vejen til fuldskala. Oversættelsen af TRL-definitioner er baseret på definitioner fra EU's Horizon 2020.



TRL 9 - Teknologien/systemet er klar til produktion/drift på fuldskala

TRL 8 - Teknologien/systemet er komplet og færdigudviklet på kommercielt niveau

TRL 7 - Prototype er demonstreret i et drifts-/produktionsmiljø

TRL 6 - Teknologi er demonstreret i et relevant miljø

TRL 5 - Teknologi er testet og valideret i et relevant miljø

TRL 4 - Teknologi er testet og valideret i et laboratoriemiljø

TRL 3 - Eksperimentel eftersvisning af koncept

TRL 2 - Formulering af teknologisk koncept

TRL 1 - Grundforskning

**FIGUR 2.** Overblik over TRL-niveauer for teknologiudviklingen.

## 4. Workshop 1: Tungmetaller

Som det allerede er beskrevet, er tungmetaller en stor udfordring for vandmiljøet i Danmark. I mange recipienter overskrider et eller flere tungmetaller miljøkvalitetskravene og er dermed medvirkende til, at der ikke er god kemisk og økologisk tilstand i det pågældende vandmiljø. På den baggrund blev tungmetaller valgt som særlige fokusstoffer for workshop 1. Formålet med denne workshop var at:

- Identificere og prioritere relevante vandtyper, hvor tungmetaller findes i for høje koncentrationer, og som således kan være problematiske ved udledning til vandmiljøet.
- Identificere og rangere eksisterende teknologier, der anvendes til fjernelse af tungmetaller.
- Identificere behov for udvikling af ny teknologi samt barrierer for udvikling og implementering heraf.

I det samlede billede for dette teknologikatalog skulle workshoppen bidrage til prioritering af problematiske vandkilder til forurening af vandmiljøet samt indsatsområder. Derfor var programmet sammensat for som udgangspunkt at få overblik over og indblik i følgende:

- De kemiske tilstande i det danske vandmiljø (Miljøstyrelsen).
- Regulering af MFS i vandmiljøet (Miljøministeriet).
- Hvordan ovenstående ser ud i praksis fra en forsynings perspektiv (Hillerød Forsyning).

Deltagerne til workshoppen var inviteret gennem bl.a. netværk og via LinkedIn, og de repræsenterede følgende grupper:

- **Forsyninger:** 7 forsyninger, herunder BIOFOS, Hillerød Forsyning, Novafos, Silkeborg forsyning, Fors, Lyngby-Taarbæk Forsyning.
- **Brancheforeninger og lovgivere:** Danva, Dansk Miljøteknologi, DI Vand, Kommuner og Miljøstyrelsen samt Miljøministeriets departement.
- **Industrivirksomheder:** RGS Nordic, Argo, Duferco, DOT, Fjernvarme Fyn, Kalundborg bio-refinery.
- **Teknologileverandører:** Krüger, C4B, BG Byggros, DanSand, Alumichem, Larkom.
- **Vidensinstitutioner og rådgivere:** Teknologisk Institut, DTU Sustain, COWI, Krüger, NIRAS.

Workshoppen samlede således en bred vifte af interessenter fra forskellige sektorer og perspektiver relateret til forureningskilder til vandmiljøet og teknologiv ønsker. Interessenterne omfattede bl.a. forsyninger, myndigheder, brancheforeninger, teknologileverandører, rådgivere og vidensinstitutioner.

Selve workshoppen bestod af tre dele. Første del med overskriften 'Identifikation og prioritering af hver vandtype med fokus på tungmetaller' havde til formål at identificere og prioritere de mest belastende vandtyper i forhold til forurening af vandmiljøet med tungmetaller. Anden del af workshoppen omhandlede, hvilke løsninger der findes til rensning af de identificerede og prioriterede vandtyper. I forlængelse af første og anden del omhandlede tredje del af workshoppen behovet for udvikling af nye renseløsninger.

### 4.1 Del 1: Identifikation og prioritering af vandtyper

Ved første del af workshoppen blev deltagerne inddelt efter arbejdsområde, hhv. forsyninger, myndigheder, rådgivere, teknologileverandører og virksomheder. Forsyningerne blev bedt om at prioritere og begrunde valget af de fem vandtyper med størst relevans, og som de anså for at være den største udfordring i forhold til forurening af vandmiljøet med tungmetaller, se

TABEL 2. De øvrige grupper blev bedt om at uddybe deres mening om de angivne problematiske vandtyper.

Resultatet blev en prioritering af vandtyper i forhold til belastningsgrad ved udledning til vandmiljøet, som det fremgår af TABEL 2. Spildevand udledt fra renseanlæg er prioriteret som den vigtigste vandtype, da spildevand udgør den største mængde vand, der udledes til vandområder, og samtidig har relativt høje koncentrationer af tungmetaller. Spildevand fra renseanlæg blev efterfulgt af overfladevand fra befæstede arealer, idet det drejer sig om store mængder vand, som skal udledes til sårbare recipienter. Spildevand fra industri blev prioriteret som nummer 3, idet dette er en vandtype, der stedvis indeholder høje koncentrationer af tungmetaller, og da en kommende skærpe af renskrav kan stille teknologiske krav, som der i dag ikke findes en holdbar løsning på. Perkolat fra deponier samt afværgvand fra oprensning af jord- og grundvandsforurening blev prioriteret som nummer 4, fordi de to typer kan have en kompleks sammensætning og bidrager med en høj tilførsel af tungmetaller til renseanlæg. Grundvand/drikkevand blev prioriteret som nummer 5 på grund af den forekomst af metaller, der også kan findes her.

**TABEL 2.** Prioritering af vandtyper på baggrund af input fra workshopdeltagere.

Prioritering	Vandtype
1	Spildevand fra forsyningsselskabernes renseanlæg
2	Almindelig, belastet overfladevand (fx vejvand o.a. vand fra helt eller delvist befæstede arealer, tagrender mv.)
3	Spildevand (fra industri, hospitaler, vaskehaller, forbrændingsanlæg mv.)
4	Perkolat fra deponier
5	Grundvand/drikkevand

De resterende grupper blev instrueret i at give input til de fem udvalgte vandtyper i forhold til opmærksomhedspunkter, når man arbejder med håndtering af tungmetaller i netop denne vandfraktion (TABEL 3).

**TABEL 3.** Input til opmærksomhedspunkter for de fem prioriterede vandtyper mht. tungmetaller.

Underoverskrift	Prioritering	Begrundelse	Teknologileverandør	Virksomheder/ forsyninger?	Miljøstyrelsen/ kommuner	Rådgivere
Spildevand fra forsyningsselskabernes renseanlæg (herunder udledning af urensset spildevand fra overløb)	1	Største mængde, relativt høje koncentrationer i urensset vand	Især vigtigt med et samtidigt fokus på spildevands-slam	Uacceptabelt høje koncentrationer, hvilket umuliggør en udledningstilladelse, mangler retningslinjer for udledningstilladelser til overløb	Kommunikation mellem forsyning/kommune og virksomheder kan være problematisk, proportionalitet i tilladelser i forhold til diffuse kilder	Kommunikation mellem forsyning/kommune og virksomheder kan være problematisk, proportionalitet i tilladelser i forhold til diffuse kilder
Almindelig, belastet overfladevand (vejvand, tagrender mv.)	2	Stor mængde, sårbar recipient	Uklarhed om BAT (nuværende anses ikke for god nok), uklare grænseværdier, mangler definition af punktkilder og diffuse kilder	Skærpe stiller teknologiske krav, der ikke nødvendigvis er løsninger på, mangler bedre overvågning	Uacceptabelt høje koncentrationer, hvilket umuliggør tildeling af udledningstilladelse. Det er en kilde til potentiel stor forurening, som vi mangler hjemmel til at regulere	Zink i tagrender mv, Vaskehaller (tungmetaller)
Spildevand fra industri (hospitaler, vaskehaller, forbrændingsanlæg mv.)	3	Forholdsvis høje koncentrationer, afhænger af kilde	Vanskeligt at gennemskue hvilke krav der stilles i en tilslutningstilladelse, da det bl.a. afhænger af modtager renseanlægget	Vand fra industri tilledes til centralrenseanlæg med koncentrationer af tungmetaller over udlederkravet, så renseanlægget i stedet står med problemet. Skærpe stiller også krav til rensning der ikke nødvendigvis kan	Brug af rensset sekundavand, bliver mere udbredt (fx til Power-to-X, køling). Der mangler retningslinjer på området.	Skisma mellem mængde og koncentration



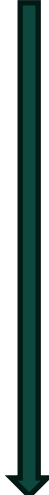
Underoverskrift	Prioritering	Begrundelse	Teknologileverandør	Virksomheder/ forsyninger?	Miljøstyrelsen/ kommuner	Rådgivere
				opnås med nuværende teknologier.		
Perkolat fra deponier	4	Kompleks sammensætning	Ingen overvågning eller rensning, ukendt udledning	Høj tilførsel af MFS til rensanlæg		
Drikkevand/grundvand	5	Øget koncentration af forurenende stoffer i grundvandet		Naturligt høje niveauer af metaller	Fortidens synder, fx kviksølv ligger i balance med vandmiljøet.	Fortidens synder, fx kviksølv ligger i balance med vandmiljøet.

På baggrund af ovenstående input blev det besluttet, at teknologikataloget skulle tage udgangspunkt i vandtypen 'spildevand fra rensanlæg', der blev berørt i forhold til tungmetaller og det 4. rensetrin, samt i vandtypen, der dækker over industrielt spildevand, dvs. 'Spildevand (industri, hospitaler, vaskehaller, forbrændingsanlæg mv.)', der blev berørt i forhold til tungmetaller.

## 4.2 Del 2: Nuværende teknologier til tungmetalrensning

De enkelte grupper blev efterfølgende bedt om at identificere eksisterende renseløsninger til tungmetalforurening. Der blev udpeget en lang række teknologier, som efterfølgende er inddelt i seks kategorier. Fra hver kategori er udvalgt tre teknologier, som er opsummeret i nedenstående TABEL 4.

**TABEL 4.** Oversigt over eksisterende teknologier til tungmetalfjernelse fra vand.

Komplexitet/omkostning	Kategorier	Identificerede teknologier		
	Forskellige simple teknologier	Mekanisk bundfældning og filtrering (sedimentation, sand)	Flotationsanlæg	Biosorption
	Forskellige simple teknologier i det åbne land	Nature Based Solutions	Filtrering i træflis	Phyto Remediering
	Teknologier til overfladevand	Filtermuld - nedsivning af regnvand/lokal afledning af regnvand	Bassiner	Mineralsk filtermedie
	Adsorptionsteknologier	Aktivt kul-filter	Ionbytning og adsorption	Selektiv adsorption
	Membranteknologier	Membranfiltrering - omvendt osmose og nanofiltrering eller mikro- og ultrafiltrering	Fældning + membranfiltrering	Membrane Bioreactor
	Forskellige avancerede teknologier	Inddampning/destillation/fordampning	Elektrodialyse	Elektroplating

## 4.3 Del 3: Kortlægning af teknologibehov til forbedret tungmetalfjernelse

Workshoppens tredje del havde til formål at identificere teknologier, som har potentiale til implementering i forbindelse med tungmetalrensning i fremtiden. De identificerede teknologier er uddybet i forhold til deres potentialer og i forhold til, hvilke investeringer/tiltag der kræves for at forløse potentialet. På baggrund af dette er teknologierne blevet inddelt i seks kategorier i forhold til, hvilken type tiltag der kræves for at begynde at anvende teknologien (TABEL 5).

**TABEL 5.** Oversigt over, hvad der mangler, for at teknologien bliver implementeret.

Kategori (hvad mangler teknologien?)	Antal teknologier identificeret
Fortolkning/håndtering af lovgivning	11
Teknologisk udvikling	10
Opskalering af teknologien	4
Tilpasning til nyt område	2
Teknologi findes, men udnyttes ikke i Danmark	2
Bedre samarbejde	1

De to områder/barrierer, der af deltagerne blev identificeret som de vigtigste i forhold til implementering af ny teknologi til tungmetalfjernelse, var hhv. lovgivning og decideret teknologisk udvikling. Hvad angår lovgivning blev det fremhævet, at der med de gældende regler skal foretages en individuel vurdering ved tilslutning til kloak, for at forsyningsselskabernes renseanlæg fortsat kan overholde deres udledningstilladelser. Det betyder, at bl.a. tilslutningstilladelserne er forskellige fra kommune til kommune og fra renseanlæg til renseanlæg. Hvis der i stedet gjaldt samme regler for alle anlæg, ville det være lettere at udvikle en overordnet teknologi. I øjeblikket skal der udvikles teknologier, der er skræddersyet til de individuelle anlæg. Reglerne kunne samtidig gøres klarere, så administrationen lettes for f.eks. kommuner og sagsbehandlingstiden nedbringes, hvilket mange virksomheder efterspørger. Derudover er der fortsat mulighed for en øget præventiv indsats for at dæmme op for udledningen af tungmetaller, bl.a. ved at virksomheder erstatter brug af tungmetaller med andre mindre forurenede alternativer.

Når det kommer til teknologiudvikling, blev det pointeret, at der bør tænkes længere frem end til 4. rensetrin. Der bør prioriteres fleksible løsninger, der nemmere kan tilpasses evt. kommende nye krav til et 5. eller 6. rensetrin, som kan opfylde krav til rensning for en række i dag ukendte forureningsstoffer. Der er også ønske om et øget fokus på udvikling af billigere teknologier og af teknologier, der ikke alene fjerner tungmetaller, men gør det muligt at udvinde og genanvende dem.

#### 4.4 Estimeret TRL-niveau af nye renseteknologier

I forbindelse med tungmetalworkshoppen blev TRL-niveauer (Technology Readiness Level) estimeret for de i del tre identificerede teknologier (TABEL 6). I tabellen er teknologierne oplistet med tilhørende TRL-niveauer og inddelt efter, hvad teknologien mangler for at kunne realiseres. Dette tæller bl.a. teknologier med behov for opskalering, optimeret styring og muligheder for teknologioverførsel fra andre industrier. Et eksempel er teknologier fra mineindustrien til udvinding af metaller, der måske vil kunne anvendes indenfor andre områder, herunder på deponier, hvor der i dag sker en væsentlig udledning af metaller, men hvor man ikke arbejder med udvinding. Her vil teknologier fra eksempelvis mineindustrien kunne give mulighed for vandrensning og en efterfølgende udvinding og oparbejdning. Dog vil TRL-niveauet for en sådan applikation være væsentligt lavere end ved den oprindelige anvendelse.

**TABEL 6.** Overblik over deltagerne identifikation af teknologiske mangler og det efterfølgende estimerede TRL-niveau for renseteknologierne. TRL-niveauet er vurderet med et afsæt i selve teknologien samt det angivne anvendelsesområde.

Kategorier (hvad mangler teknologien?)	Renseteknologier (anslået TRL-niveau)					
Teknologisk udvikling	Bedre specifikke sorbenter (5-6)	Forøgelse af adsorptionskapacitet og reducere i pris, herunder	Selektiv udvinding af metaller,	Elektroplating til udvinding af	Nanopartikler og andre	Muslinge- og

Kategorier (hvad mangler teknologien?)	Renseteknologier (anslået TRL-niveau)					
		billigere alternative teknologier (n.a.)	f.eks. magnetisk (2-4)	metaller (3-4)	coatingmateria- ler (3-4)	østers- filtre (2-4)
Opskalering af teknologien	Mineralsk filtermedie (6-7)	Indretning/funktion af regnvandsbassi- ner (6-7)	Smart-styring af pumpe/rørsyste- mer for øget ka- pacitet (n.a.)			
Tilpasning til nyt område	Waste Mining af spil- devandsstrømme for tungmetaller (2-3)					
Teknologi findes, men udnyttes ikke i Danmark	Filtrering, herunder (mikro, ultra og revers osmose) (9)	Lokal rensning i samlebrønde/gen- nemløbsbrønde, fx for zink (9)				

En oplagt mulighed for finansiering af de identificerede behov for teknologiudvikling er Miljøstyrelsens Udviklings- og Demonstrationsprogram, MUDP.

#### 4.5 Delkonklusion workshop 1

Workshoppen om tungmetaller gav indsigt i de nuværende udfordringer og fremtidige behov for teknologiudvikling inden for håndtering af tungmetalforurening i vandmiljøet. Spildevand blev identificeret som den mest belastende vandtype i forhold til tungmetalforurening, efterfulgt af almindeligt belastet overfladevand og dernæst industrielt spildevand. Denne prioritering afspejler både mængden af vand og koncentrationen af tungmetaller i de forskellige vandtyper. Workshoppen afdækkede en bred vifte af eksisterende renseteknologier, rangerende fra simple, mekaniske metoder til avancerede membran- og adsorptionsteknologier, hvilket viser, at der allerede findes mange løsninger, men at der er behov for yderligere optimering og udvikling også i forhold til drift og pris.

To hovedområder blev fremhævet som afgørende for implementering af nye teknologier: lovgivning og myndighedstilladelser/regulering samt teknologisk udvikling. Deltagere på workshoppen fremhævede et behov for ensartning mht. godkendelser/regulering og klarere regler på tværs af kommuner og virksomheder for at lette udviklingen og implementeringen af nye teknologier. Samtidig er der behov for mere fleksible og fremtidssikrede løsninger, der kan tilpasses fremtidige rensetrin og krav, med fokus på udvikling af billigere teknologier og metoder til genvinding af tungmetaller. De identificerede fremtidige teknologier spænder over et bredt spektrum af TRL-niveauer, fra grundforskning til næsten markedsmodne løsninger, hvilket indikerer, at der er behov for både langsigtet forskning og mere kortsigtet udvikling og opskalering.

Workshoppen understregede vigtigheden af samarbejde mellem forskellige aktører i branchen, herunder forsyninger, myndigheder, teknologileverandører og forskningsinstitutioner, for at adressere udfordringerne effektivt. Samlet set peger resultaterne fra workshoppen på et betydeligt potentiale for innovation inden for tungmetallrensning, men også på behovet for en koordineret indsats på tværs af myndighedsgodkendelser/regulering, teknologiudvikling og implementering for at realisere dette potentiale fuldt ud.

## 5. Workshop 2: Det 4. rensetrin

Formålet med workshoppen om det 4. rensetrin, der skal implementeres på forsyningsselskabernes renselanlæg, var dels at diskutere udfordringer og behov relateret til implementering af 4. rensetrins-teknologier ved forsyninger ift. lovgivning, dels gennem teknologileverandørernes indsigt at identificere yderligere udviklingsbehov for teknologier til 4. rensetrin. Den anden session omhandlede slamdestruktion, nødvendigheden heraf, status på teknologiernes formåen ift. MFS (i særdeleshed PFAS), samt identificering af yderligere udviklingsbehov. Workshopprogrammet var sammensat som følger:

- Opdatering på byspildevandsdirektivet ved Miljøministeriet.
- Danske teknologileverandører (Krüger, Suez og Ultraaqua) med de mest modne teknologikoncepter til 4. rensetrin.
- Præsentation af udenlandske erfaringer med fjernelse af miljøfarlige, forurenede stoffer med 4. rensetrin ved Envidan.
- Belysning af udfordringer med slamfraktioner ift. miljøfarlige, forurenende stoffer præsenteret af DANVA og Teknologisk Institut.

Workshoppens deltagere, der var inviteret gennem bl.a. netværk og via LinkedIn, repræsenterede følgende grupper:

- **Forsyninger:** 11 forsyninger, herunder Arwos, Skanderborg Forsyning, Samn Forsyning, Hjørring Vandselskab, Kalundborg Forsyning, Vandcenter Syd, Aarhus Vand, Lejre Forsyning, Billund Vand, Frederikshavn Forsyning og Silkeborg Forsyning.
- **Brancheforeninger og lovgivere:** medarbejdere fra Danva, Dansk Miljøteknologi, DI Vand, kommuner, Miljøstyrelsen og Miljøministeriets departement.
- **Undervisning:** Ferskvandscenteret.
- **Teknologileverandører:** 2 grupper med deltagere fra Krüger, Techras, CWT Nordic, Ultra Aqua og Suez.
- **Vidensinstitutioner og rådgivere:** COWI, NIRAS, Rambøll, Envidan, Aarhus Universitet og Teknologisk Institut.

Workshoppen samlede således en bred vifte af interessenter fra forskellige sektorer og perspektiver relateret til 4. rensetrin og til slambehandling. Blandt andre deltog forsyninger, myndigheder, brancheforeninger, teknologileverandører, rådgivere og vidensinstitutioner.

### 5.1 Præsentation af nuværende teknologier

Som en indledning til workshoppen var en række teknologileverandører inviteret til at præsentere deres nuværende bud på en renseløsning, der kan leve op til kravene for et 4. rensetrin. Som oplyst herunder er det primært ozonering og brug af aktivt kul, der for nuværende er i spil (TABEL 9).

Ozonering er en proces, hvor ozon ( $O_3$ ) anvendes til at nedbryde og oxidere organiske forbindelser. Ozon er en meget reaktiv form for ilt, som effektivt kan nedbryde mange miljøfarlige stoffer såsom lægemidler, aromatiske kulbrinter, phenoler, pesticider og klorholdige opløsningsmidler.

Aktivt kul er en meget porøs form for kulstof med et uforholdsmæssigt stort overfladeareal og anvendes som granulat eller pulver (GAC/PAC). Det bruges til at adsorbere (binde) forurenende stoffer fra luft eller vand. De forurenende molekyler bindes til overfladen af det aktive

kul via svage intermolekylære kræfter. Aktivt kul er effektivt til at fjerne mange forskellige typer af forurenende stoffer, bl.a. lægemidler og pesticider. Efter brug kan det aktive kul enten regenereres (ved opvarmning), destrueres eller deponeres. Aktivt kul er ofte kendetegnet ved et stort klimaaftryk, da det i stort omfang importeres.

**TABEL 7.** Oversigt over teknologileverandørernes præsenterede teknologier til et 4. rensetrin.

Teknologier	Beskrivelse
Aktivt kul-filtrering med GAC	Denne løsning anvender granuleret aktivt kul (GAC) til at adsorbere MFS fra spildevandet. Det er en effektiv metode, som dog kan være dyr i drift pga. behovet for regelmæssig udskiftning af det brugte kul.
Ozonering	Ozon (O <sub>3</sub> ) tilsættes spildevandet for at oxidere og nedbryde MFS. Ozon er meget reaktivt og effektivt overfor en lang række stoffer, men nogle stoffer som f.eks. PFAS nedbrydes ikke.
Ozonering + filtrering	Ozonering + sandfilter: Ozoneringen nedbryder en række MFS, og sandfilteret fjerner MFS der er bundet til partikler.  Ozonering + GAC-filtrering: Delvis ozonering efterfulgt af adsorption på aktivt kul-filter. Mere effektiv fjernelse af svært nedbrydelige stoffer såsom PFAS og tungmetaller, men dyrere drift pga. kulskift.
Ozonering + biologisk behandling	Ozoneringen nedbryder forureningen, og derefter fjernes restprodukterne biologisk. Der findes pt kun en kommercielt tilgængelig løsning, nemlig en Moving Bed Biofilm reactor (MBBR) baseret teknologi ved navn eXenO3™ hvor en biofilm på plastikmedier nedbryder de tilbageværende stoffer.

Teknologileverandørerne blev ligeledes bedt om at byde ind med priser på den angivne behandling, hvilket er opsummeret i nedenstående afsnit.

### Krüger

Krüger præsenterede virksomhedens teknologier til 4. rensetrin, og alle løsninger vurderes at kunne opfylde det forventede fjernelseskrav på 80 % for udvalgte miljøfarlige forurenende stoffer, som er krævet i byspildevandsdirektivet.

Driftsomkostninger (OPEX) for de forskellige teknologier estimeres nedenfor og antagelser ift. fx energipriser er angivet i TABEL 8.

**TABEL 8.** Overblik over estimerede driftsomkostninger for udvalgte renseteknologier til 4. rensetrin fra Krüger/Veolia. DOC: dissolved organic carbon.

Teknologikoncept	OPEX-estimer
Ozonering + sandfilter	OPEX 2,2-2,7 cent €/m <sup>3</sup> ved specifik ozondosis på 0,4-0,6 g O <sub>3</sub> /g DOC* OPEX 3,4-4,1 cent €/m <sup>3</sup> , ved specifik ozondosis på 0,4-0,6 g O <sub>3</sub> /g DOC**
Ozonering + GAC-filtrering	OPEX 3,8 cent €/m <sup>3</sup> ved ozondosis 0,2 g O <sub>3</sub> /g DOC + 10 g GAC/m <sup>3</sup> *** OPEX 4,5 cent €/m <sup>3</sup> ved ozondosis 0,1 g O <sub>3</sub> /g DOC + 14 g GAC/m <sup>3</sup> ***
Ozonering + eXenO3™#	OPEX 1,7-2,1 cent €/m <sup>3</sup> ved specifik ozondosis på 0,4-0,6 g O <sub>3</sub> /g DOC* OPEX 2,8-3,6 cent €/m <sup>3</sup> ved specifik ozondosis på 0,4-0,6 g O <sub>3</sub> /g DOC**

\* Beregnet ud fra en energipris på 0,10 EUR/kWh

\*\* Ved energipris på 0,25 EUR/kWh er OPEX 3,4-4,1 cent €/m<sup>3</sup>

\*\*\* Beregnet ud fra energipris på 0,10 EUR/kWh og GAC-pris på 1950 EUR/ton.

# eXenO3™ er patenteret af Krüger/Veolia.

Der angives ingen generelle anlægsomkostninger, da det fremhæves, at CAPEX er afhængig af fx jordbundsforhold. Baseret på et konkret eksempel for Egå Renseanlæg, angives CAPEX for et ozonanlæg uden bygværker og dimensioneret til 1.800 m<sup>3</sup>/t at koste ca. 16 mio. DKK. Hertil kommer evt. ændringer på udløb, etablering af kontakttanke samt lagertank til LOx (Liquid Oxygen System).

## SUEZ

SUEZ præsenterede virksomhedens teknologier til 4. renses trin, og alle løsninger vurderes at kunne opfylde det forventede fjernelseskrav på 80 % for udvalgte miljøfarlige, forurenende stoffer, som er krævet i byspildevandsdirektivet. Her anvendes to hovedteknologier, nemlig ozonering og adsorption på aktivt kul, og nedenstående teknologikoncepter er patenterede af SUEZ, se TABEL 9.

**TABEL 9.** Oversigt over SUEZ' teknologier til et 4. renses trin.

Teknologier	Beskrivelse
Integreret ozonering (OxyBlue™ BiO3)	Ozon tilsættes direkte i biologiske reaktortanke for at optimere nedbrydningen af MFS.
Integreret pulveraktivt kul (BioPACTM)	Pulveraktivt kul tilsættes i de biologiske reaktortanke for at adsorbere miljøfremmede stoffer.
Ozonering + granuleret aktivt kul-filter (CarbaBlue™ Up)	En opstrøms ozonering efterfulgt af et specialdesignet opstrøms GAC-filter med kontinuerlig tilførsel af friskt kul.

Der opgives ikke driftsomkostninger af de enkelte teknologikoncepter, men derimod et bud på etableringsomkostninger for et 100.000 PE-anlæg med ozonering + GAC-filter. Investeringssomkostningerne vil typisk ligge i intervallet 70-100 millioner DKK plus udgifter for forsyning til ilt og aktivt kul. Der gives ikke detaljerede driftsomkostninger, men det understreges, at de eksisterende renseprocesser og kravene til rensning har stor indflydelse på de samlede omkostninger.

## ULTRAAQUA

ULTRAAQUA præsenterede virksomhedens teknologier til 4. renses trin, og oplægget var baseret på erfaringer fra et pilotanlæg på Slagelse Renseanlæg, hvor forskellige teknologier til 4. renses trin er blevet testet i storskala. De undersøgte teknologier er beskrevet i TABEL 10.

**TABEL 10.** Oversigt over ULTRAAQUAs erfaring fra pilotskala test ved Slagelse Renseanlæg og estimerede driftsomkostninger (OPEX) inkl. energiforbrug.

Teknologikoncept	OPEX-estimer
Aktivt kul	ca. 2,5 kr/m <sup>3</sup> for aktivt kul ca. 0,5 kr/m <sup>3</sup> for gammelt reaktiveret kul
Lav ozondosis (dosis ikke opgivet) kombineret med gammelt aktivt kul og UV	Energiforbruget 0,8 kWh/m <sup>3</sup> inkl. iltproduktion Energiforbruget for ozonering er ca. 0,4 kWh/m <sup>3</sup> eks. iltproduktion
Vakuumbeskyttelse Placeret efter gammelt kul	Energiforbrug på 1,5 kWh/m <sup>3</sup> (forventet optimeret til 0,9 kWh/m <sup>3</sup> )

Der er ikke opgivet forventede priser på aktivt kul eller reaktiveret aktivt kul, ej heller priser på energi. Energiforbruget for en ny ULTRAAQUA ozongenerator (til 30 m<sup>3</sup>/t), er ca. 0,05 kWh/m<sup>3</sup>.

### 5.1.1 Erfaringer fra udlandet

Nedenstående afsnit er en opsummering af Jacob Krags (Envidan) oplæg fra workshoppen. Referencer på de pågældende studier findes i oplægget, som kan tilgås [her](#).

Schweiz har været foregangsland inden for implementering af det fjerde rensetrin, med krav om over 80% reduktion af 12 indikatorstoffer indført i 2014. I marts 2023 var der 19 anlæg i drift og yderligere 47 projekter under udvikling. Teknologierne anvendt i Schweiz omfatter primært ozonering og aktivt kul (GAC/PAC), med estimerede omkostninger på cirka 70 kr. per person pr. år frem til 2034.

I Tyskland er der en frivillig indsats i delstaterne Baden-Württemberg og Nordrhein-Vestfalen. I oktober 2023 havde Baden-Württemberg 29 renseanlæg med 4. rensetrin og 28 projekter under udvikling, fortrinsvis ved brug af aktivt kul. I Nordrhein-Vestfalen var der 30 renseanlæg med tilsvarende teknologier.

Nederlandene har gennemført et femårigt innovationsprogram (2019-2023) med en bevilling på 12 millioner euro til forbedring og udvikling af teknologier til fjernelse af lægemiddelstoffer. Programmet vurderede teknologierne ud fra effektivitet, reduktion af økotoksicitet, omkostninger og CO<sub>2</sub>-aftryk. Resultaterne viste, at en kombination af teknologier kan give en bredere reduktionsprofil, lavere driftsomkostninger og større miljømæssig bæredygtighed.

I Sverige er der endnu ingen regulering af MFS i udløb fra renseanlæg, men flere forsyninger får krav om det, ved nybyggeri eller udbygning. Den svenske miljøstyrelse har siden 2018 finansieret 60 forstudieprojekter og 10 implementeringsprojekter, der omfatter teknologier som ozonering, aktivt kul, membraner, UV og avanceret oxidation (AOP). Disse projekter har i højere grad karakter af udviklingsprojekter.

Disse erfaringer viser, at mens Schweiz og Tyskland har taget føringen med implementering af fjerde rensetrin, er der også betydelig innovationsaktivitet i Nederlandene og Sverige, som fokuserer på udvikling og optimering af renseteknologier. Det understreger behovet for, at vi i Danmark samarbejder med andre lande, for fortsat at være med forrest i teknologiudviklingen inden for vandteknologi, og viser hvordan lovgivning med ambitiøse krav til reduktion af MFS kan være med til at drive udvikling og implementering af ny teknologi.

## 5.2 Del 1: Udviklingsbehov og barrierer for implementering af det 4. rensetrin

Ved første del af workshoppen blev deltagerne inddelt efter arbejdsområde: forsyninger og myndigheder sammen hhv. rådgivere og teknologileverandører sammen. Deltagerne fra hvert arbejdsområde blev inddelt i mindre undergrupper, og der blev arbejdet med en række spørgsmål. Disse omhandlede barrierer for at implementere løsninger i drift, herunder organisatoriske barrierer hos eksempelvis forsyninger, samt opstilling af udfordringer, der ikke bliver løst med de tilgængelige teknologier, og hvilke behov der derfor er for udvikling på nuværende tidspunkt.

**TABEL 11.** Antal respondentinput inden for hver af syv kategorier, når der spørges til barrierer for implementering af 4. rensetrin. Svarene baserer sig på input fra fire arbejdsområder, hhv. forsyninger, myndigheder, rådgivere og teknologileverandører.

Kategori (hvad er der behov for ift. 4. rensetrin?)	Antal svar indenfor kategorien
Viden	38
Teknologi	30
Krav/lovgivning	26
Økonomi	17
Miljø	3



Kategori (hvad er der behov for ift. 4. rensetrin?)	Antal svar indenfor kategorien
Overblik	3
Tid	1

Som det også blev identificeret i første workshop om tungmetaller, står klare krav og lovgivning samt teknologiudvikling højt på listen over barrierer for implementering af 4. rensetrin ved landets forsyninger. Med klare krav menes der ensretning i forvaltning af eksisterende lovgivning på tværs af kommuner og virksomheder, så udledere og teknologileverandører nemt kan skabe sig et overblik over mål/krav, hvad angår implementering af renseteknologi. Dette sikrer, at man som udleder er ligestillet med andre lignende virksomheder, og at forvaltningen derfor ikke bliver konkurrenceforvridende. Dette punkt inkluderer også en hurtigere behandling af anmodning om tilslutnings- og udledningstilladelser.

I lige så høj grad mangler der viden, ikke kun om rensegrader og drift af en lang række teknologier, men også internt ved forsyningerne i forhold til at træffe de rette beslutninger, når det gælder, hvilke tiltag der skal sættes på. Økonomi er også en væsentlig barriere, da implementering af teknologi til 4. rensetrin er en stor omkostning for den enkelte forsyning. Der er også i mindre grad barrierer, der relaterer sig til klima - eksempelvis, at implementeringen af et 4. rensetrin kan modarbejde forsyningernes egne mål om energineutralitet, da de nuværende teknologier til 4. rensetrin både er energi- og ressourceintensive.

På baggrund af deltagerinput er der identificeret en række udviklingsbehov og opmærksomhedspunkter, når fremtidens teknologi til 4. rensetrin skal udvikles. Generelt skal håndtering af slam, forbrug af ressourcer og klimabelastning indtænkes, allerede i designfasen. Dette kan være i form af en samlet livscyklusanalyse LCA for teknologikonceptet, både ift. produktion af teknologien og under selve driften, hvor der bruges energi og genereres reststrømme. Fokus skal også være på modulære og fleksible løsninger, der bedre kan tilpasses skærpede krav til nuværende eller nye stoffer. På denne måde mindsker man det ressourcospild, der kan være ved gentagne gange at udskifte funktionel teknologi, da man i stedet for helt ny teknologi, tilpasser og optimerer det eksisterende til den nye virkelighed. Det vil også være gavnligt med bedre sensorer og analyser, der mere effektivt vil kunne monitorere rensegrader og gøre opmærksom på periodiske overskridelser, der hjælper med driften.

### 5.3 Del 2: Håndtering af MFS-koncentreret slam og teknologiske udviklingsbehov

Anden del af workshoppen indledtes med en række oplæg, der forholdt sig til håndtering af restfraktioner fra teknologier til det 4. rensetrin, herunder slam, kul og resiner med høje koncentrationer af miljøfarlige forurenende stoffer. De teknologier, der blev præsenteret i første del, fjerner MFS fra spildevandet, men udfordringen består i at sikre, at disse stoffer i slammet destrueres eller deponeres korrekt.

Slam fra det 4. rensetrin forventes at indeholde høje koncentrationer af MFS, hvilket begrænser mulighederne for udbringning af slammet på landbrugsjord som gødning, hvilket i dag er udbredt praksis for almindeligt overskudsslam fra renseanlæg. Dette medfører øgede omkostninger til deponering eller forbrænding samt meromkostninger til transport og behandling. Derudover skal der tages højde for håndtering af andre restfraktioner såsom kul og resiner, der også vil være mættet med MFS.

For at kunne anvende slammet og genbruge adsorptionsmaterialer, skal MFS destrueres eller nedbrydes effektivt. Udvikling af teknologi til denne nedbrydning kan kombineres med regulering af produkter der indeholder MFS, herunder PFAS og tungmetaller, således at udledningen begrænses. Lovende teknologier til nedbrydning af MFS i slam inkluderer termisk behandling og kemisk oxidation.



Termisk behandling af slam indebærer en række teknologier, herunder monoforbrænding, pyrolyse, hydrothermal liquefaction (HTL) og gasificering. Disse teknologier anvender forskellige kombinationer af temperatur, tryk og ilt for at opnå en hel eller delvis nedbrydning af de miljøfarlige, forurenende stoffer.

Under workshoppen blev flere centrale behov og udfordringer i håndteringen af restprodukter fra spildevandsrensning identificeret af deltagerne. Et vigtigt punkt var forbedrede analysemetoder til at detektere og måle miljøfremmede stoffer mere præcist. Dette skyldes, at de nuværende detektionsgrænser ofte ligger tæt på de regulatoriske grænseværdier, hvilket skaber usikkerhed i vurderingen af slammets kvalitet og anvendelighed. Der var fokus på at finde en balance mellem flere mål: destruktion af MFS, genvinding af værdifulde næringsstoffer (især fosfor, kvælstof og kulstof) og opretholdelse af overordnet bæredygtighed i processerne, set i forhold til omkostningerne. For at opnå denne balance blev der efterlyst mere omfattende risikovurderinger og livscyklusanalyser som grundlag for beslutningstagning. Udvikling af fleksible og alsidige løsninger blev foreslået for at imødekomme fremtidige udfordringer og kommende regulatoriske krav. Endelig blev det påpeget, at et styrket samarbejde mellem forsyninger, myndigheder og industri er nødvendig for effektivt at håndtere de komplekse problemstillinger forbundet med slamhåndtering og genanvendelse af ressourcer.

## 5.4 Udviklingsbehov

Selvom teknologier til fjernelse af MFS fra en række vandtyper allerede eksisterer, mangler der implementering i fuldskala. Teknologier som avanceret oxidation (AOP), filtrering med aktivt kul og membranfiltrering har vist lovende resultater i forhold til 4. rensetrin, men teknologiernes integration i eksisterende renseanlæg kræver betydelige investeringer og teknisk tilpasning. Desuden er der behov for udvikling af mere bæredygtige og energieffektive teknologier til både 4. rensetrin og til slambehandling, da mange af de nuværende løsninger er energikrævende. For at opnå energineutralitet, som også er et krav i byspildevandsdirektivet senest i 2045, er det nødvendigt at fokusere på teknologier, der kan minimere energiforbruget eller endda bidrage til energiproduktion. Nedenstående TABEL 12 opsummerer de identificerede udviklingsbehov fra workshoppen.

**TABEL 12. Overblik over deltagernes identifikation af teknologiske mangler i forhold til 4. rensesettrin og slamhåndtering.**

Kategori	Udviklingsbehov
Teknologiudvikling	Nye teknologier til håndtering af den producerede slamfraktion
	Undersøgelse af erstatning for GAC (flotation, filtrering, etc.), som også kan anvendes i kombination med GAC
	Mulighed for ombygning af teknologi, hvis krav ændres, så man er fleksibel
	Teknologier skal fremtidssikres til at rense for i dag ukendte MFS
	Teknologier, der renser tilstrækkeligt, men samtidig er ressourceeffektive
	Udvikling af biologiske løsninger frem for kun kemisk/mekaniske løsninger, da disse ofte kræver færre ressourcer
Anden udvikling / vidensindsamling	Dokumentation af renseeffektivitet for forskellige teknologier
	Udvikling af bedre analysemetoder, herunder lavere detektionsgrænse og hurtige analyser (gerne online)
	Klarere krav fra myndighederne (jf. afsnit 4.2), ligesom nævnt mht. tungmetaller. Dette vil gøre det mere sikkert at investere i specifik teknologi
	Mangler viden om skalerbarhed og CAPEX/OPEX for teknologi
	Der skal udføres LCA for de teknologier man påtænker at anvende til 4. rensesettrin. LCA af det totale aftryk af den anvendte teknologi

## 5.5 Teknologibeskrivelser for slamhåndtering

**Monoforbrænding** er en teknologi, hvor slam afbrændes ved høje temperaturer (800-1.000° C) under tilstedeværelse af ilt, hvilket resulterer i komplet oxidation af organisk materiale og effektiv nedbrydning af MFS. Teknologien kræver ofte støttebrændsel og producerer overskudsvarme, røggas, flyveaske og bundaske som restprodukter. Røggassen kræver rensning for at fjerne skadelige stoffer, mens flyveasken typisk deponeres. Bundasken kan potentielt anvendes som gødningskilde. Monoforbrænding er veletableret i Danmark og har vist sig effektiv til at nedbryde lægemidler og PFAS, selvom der kan opstå flygtige tungmetaller i flyveasken ved ufuldstændig oxidation.

**Pyrolyse** indebærer opvarmning af slam til 300-650° C under iltfrie forhold, hvilket resulterer i ufuldstændig forbrænding og produktion af biokul, bioolie og pyrolysegas. Biokul er det primære produkt og kan anvendes som jordforbedringsmiddel og til kulstoflagring. Teknologien kræver et højt tørstofindhold i slammet og varierer i opholdstid, op til 3 timer. Pyrolyse er under indtog i Danmark og har potentiale til at nedbryde lægemidler fuldstændigt, selvom der kan opstå PAH'er ved ufuldstændig oxidation (bl.a. i biochar). Tungmetaller vil primært findes i biokul, mens PFAS kan findes i kondensvand og biokul. Pyrolysegas kan anvendes som brændstof, men kræver rensning, afhængigt af indholdet.

**Hydrothermal Liquefaction (HTL)** er en teknologi, hvor vådt slam behandles ved 300-400° C og 200-300 bar, hvilket resulterer i bioolie og biokul som primære produkter. Vand i kritisk tilstand (højt tryk og temperatur) anvendes som katalysator og reaktant, hvilket muliggør en accelereret olieredningsproces. HTL er velegnet til vådt fødemateriale med et tørstofindhold under 25 %. Teknologien har potentiale til fuldstændig nedbrydning af lægemidler, selvom PAH'er kan være til stede. Tungmetaller forventes opkoncentreret i biokul. Ikke-nedbrudt PFAS forventes primært at findes i bioolien, men kan også være i kul ved lavere temperaturer. HTL er stadig under udvikling og kræver yderligere demonstrationer for at bevise sin effektivitet.

**Kemisk oxidation** anvender stærke oxidationsmidler som ozon, hydrogenperoxid eller persulfat til at danne reaktive hydroxyl-radikaler, der kan nedbryde miljøfarlige, forurenende stoffer.

Fordelene ved denne teknologi inkluderer potentiel nedbrydning ved lave temperaturer og tryk samt kendte og simple processer. Ulemperne omfatter behovet for høje doser af oxidationsmidler og høje driftsomkostninger samt begrænset effektivitet over for PFAS og tungmetaller.

## 5.6 Delkonklusion workshop 2

Workshoppen om det 4. rensesrin har givet indsigt i de aktuelle udfordringer ved og fremtidige behov for implementering af avancerede renses teknologier i danske renses anlæg. Deltagerne, som repræsenterede et bredt spektrum af interessenter fra forsyninger, myndigheder, teknologileverandører og vidensinstitutioner, identificerede flere nøgleområder for fremtidig udvikling og opmærksomhed.

En central udfordring er behovet for mere viden og klarere regulatoriske rammer. Dette omfatter både viden om teknologiernes effektivitet og driftsforhold samt tydelige retningslinjer fra myndighederne for implementering af det 4. rensesrin, hvilket nu er på vej i form af krav i byspildevandsdirektivet. Økonomiske aspekter blev også identificeret som en væsentlig barriere, da implementeringen af avancerede renses teknologier udgør en betydelig investering for forsyningerne.

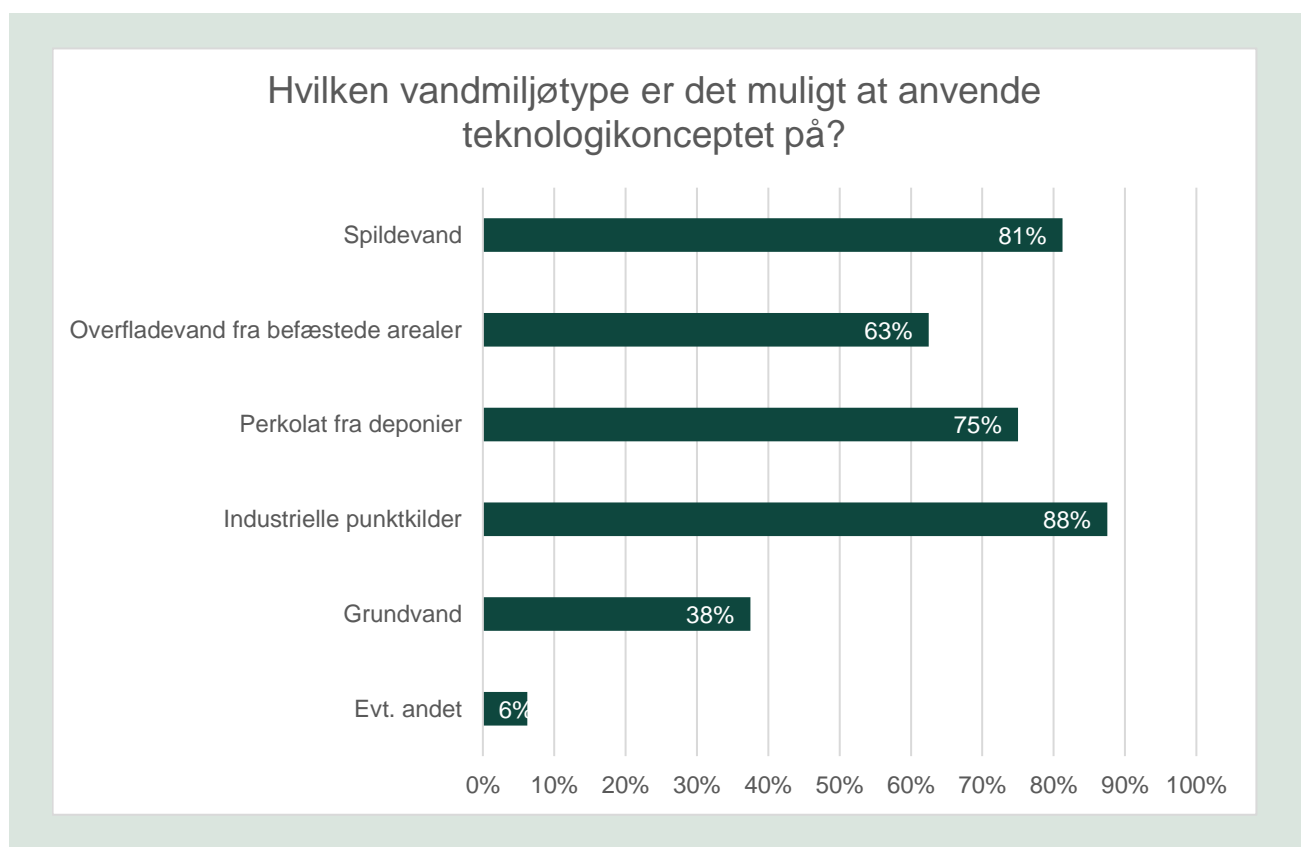
Teknologisk set viste workshoppen, at der allerede eksisterer en række lovende løsninger til rensning af spildevand, primært baseret på ozonering og aktivt kul. Dog blev der udtrykt behov for yderligere udvikling af mere bæredygtige og energieffektive teknologier, der kan imødekomme fremtidige skærpede krav til rensning af miljøfarlige stoffer uden at kompromittere forsyningernes mål om energineutralitet. Herunder blev der også arbejdet med håndteringen af restprodukter som særligt fokusområde. Her blev der efterlyst innovative løsninger til effektiv nedbrydning eller destruktion af MFS, samtidig med at værdifulde næringsstoffer bevares og genanvendes.

Workshoppen understregede vigtigheden af at anlægge en holistisk tilgang til udviklingen af det 4. rensesrin, hvor aspekter som ressourceeffektivitet, klimapåvirkning og fleksibilitet indtænkes allerede i designfasen. Dette inkluderer behovet for modulære løsninger, der kan tilpasses fremtidige krav, samt forbedrede analysemetoder og overvågningssystemer til at sikre optimal drift og dokumentation af renses effektivitet.

## 6. Teknologileverandører og spørgeskema – håndtering af MFS i vandige strømme

Spørgeskemaet blev udsendt til i alt 35 teknologileverandører, og i alt har 16 leverandører svaret på spørgsmål relateret til teknologikoncepter til fjernelse af miljøfarlige forurenende stoffer (MFS) fra vandige spildstrømme. Deraf har SUEZ, CWT, IWS og Kilian Water budt ind med priser på konkrete teknologikoncepter.

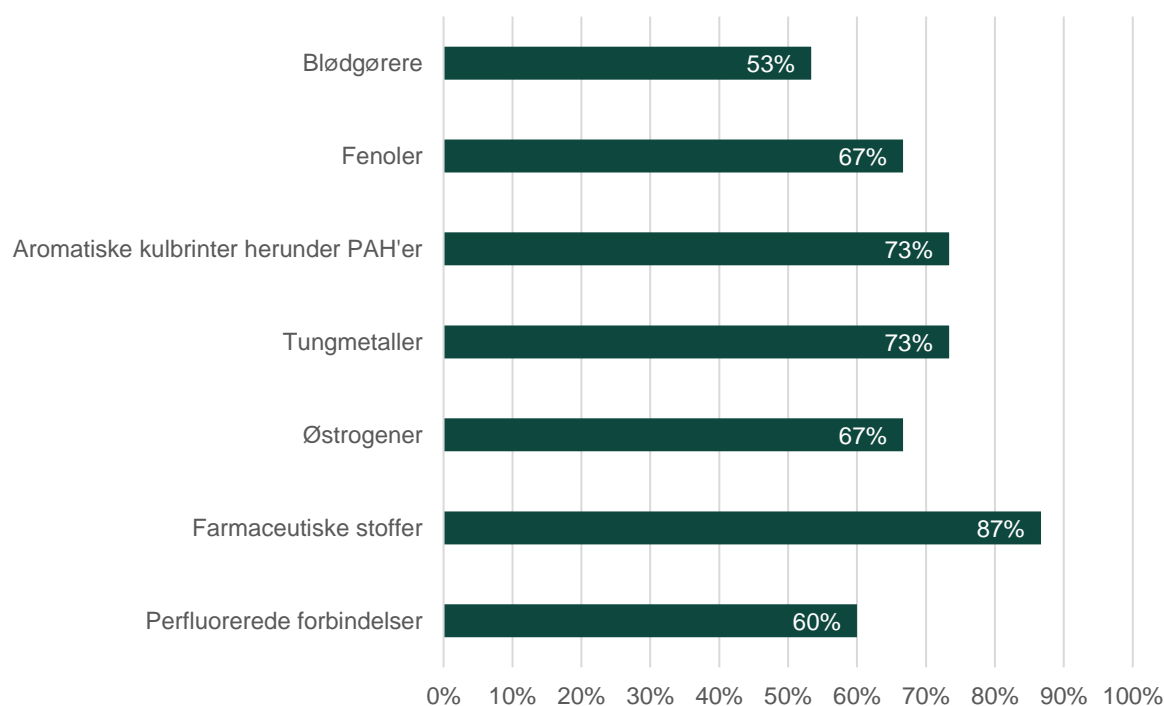
Deltagerne blev stillet en række spørgsmål om den teknologi, de kan levere til at fjerne MFS fra vandige strømme, bl.a. med hensyn til effektivitet og økonomi.



**FIGUR 3.** Andelen af respondenter, der har svaret, at deres teknologikoncept kan behandle den angivne vandtype mht. fjernelse af MFS. Procentsatserne er baseret på 16 respondenter. Hver respondent har haft mulighed for at vælge flere vandtyper.

Det er tydeligt, at fokus for teknologileverandørerne har været spildevand, industrielle punktkilder og perkolat, og i mindre grad almindelig, belastet overfladevand og grundvand, se FIGUR 3. Dette reflekterer den generelle udfordring med MFS, der findes i højere koncentrationer i industrielle punktkilder, perkolat og spildevand end i overfladevand og grundvand. Teknologileverandørerne har altså fokuseret kræfterne der, hvor problemet er størst, i forhold til udbud af teknologi.

### Hvilke MFS forventes teknologikonceptet at kunne reducere fra vandet?



**FIGUR 4.** Andelen af respondenter, der har angivet, at deres teknologikoncept kan reducere det givne stof fra den vandtype, der behandles. Procentsatserne er baseret på 15 respondenter. Hver respondent har haft mulighed for at vælge flere stofgrupper.

Der er flest teknologier til rådighed til at håndtere farmaceutiske stoffer, herunder antibiotika (FIGUR 4), hvilket stemmer overens med, at disse stoffer har været i fokus i lang tid, og også er det primære fokus i det nye byspildevandsdirektiv, hvor effekten af det krævede 4. rensetrin skal dokumenteres ved 80 % reduktion af udvalgte farmaceutiske stoffer. Perfluorerede forbindelser (PFAS) og blødgørere er de stoffer, som færrest teknologikoncepter kan håndtere. PFAS er sværere at fjerne end eksempelvis farmaceutiske stoffer, og blødgørere har ikke haft lige så stort et fokus som en række af de øvrige MFS.

**TABEL 13. Overblik over teknologileverandørers besvarelser fra spørgeskemaet og præsentationer på workshops. OPEX inkluderer estimeret vedligehold, råmaterialeforbrug (kemikalier, aktivt kul etc.) samt strømforbrug. CAPEX inkluderer alene prisen på udstyret, ikke tilslutning, bygninger mm., og er opgivet som en behandlingspris pr. m<sup>3</sup> behandlet i anlæggets estimerede levetid.**

Teknologi	Vandmængde (m <sup>3</sup> /år)	CAPEX (DKK/m <sup>3</sup> )	OPEX (DKK/m <sup>3</sup> )
Ozonering	6.000.000	0,44	0,29
Aktivt kul	6.000.000	0,44	0,45
Gas-energy-mixing	180.000	0,06	0,28
Beplantet filteranlæg	3.650	6,85	4,36
Aktivt kul	262.000	Lokalitetsbestemt	2,50

Ozonering + sandfilter	>3.832.500*	Lokalitetsbestemt	0,16-0,31
Ozonering + GAC	>3.832.500*	Lokalitetsbestemt	0,28-0,34
Ozonering + MBBR	>3.832.500*	Lokalitetsbestemt	0,13-0,27

\*tilsvarende >100.000 PE

De teknologier, der er præsenteret, spænder over en bredde fra beplantet filteranlæg til kul og ozonering, der etableres i forbindelse med eksisterende spildevandsanlæg. Nedbrydning af farmaceutiske stoffer med ozon og bortfiltrering med kul, er de fremherskende teknologier til 4. rensetrin ved kommunale renseanlæg. Behandlingsprisen pr. m<sup>3</sup> vand afhænger i høj grad af lokation og de rensegrader man ønsker at opnå for udvalgte MFS, samt størrelsen af det etablerede anlæg (TABEL 13).

# 7. Sammenhæng mellem innovationspartnerskabet og det strategiske partnerskab

Det strategiske partnerskab er et initiativ under Miljøministeriets "Strategi for miljøfarlige stoffer - et vandmiljø uden farlig kemi" fra december 2021.

Formålet med det strategiske partnerskab er at styrke indsatsen for at reducere udledningen af miljøfarlige forurenende stoffer til vandmiljøet gennem et tværgående samarbejde mellem forskellige interessenter.

Strategien indeholder 20 nye initiativer inden for 5 overordnede målsætninger:

1. Identificere og prioritere de væsentligste miljøfarlige forurenende stoffer og kilderne til disse i vandmiljøet. Dette inkluderer at få mere viden om forekomst, transportveje og effekter af stofferne.
2. Identificere relevante virkemidler og teknologiske løsninger, der kan begrænse udledningen af de prioriterede miljøfarlige forurenende stoffer. Herunder afdækning af behov for nye renseløsninger og substitution af problematiske stoffer.
3. Bidrage til en mere målrettet regulering af miljøfarlige stoffer ved at kvalificere grundlaget for fastsættelse af miljøkvalitetskrav, kildeopsporing og vurdering af virkemidler.
4. Fremme teknologiudvikling og innovation inden for rensemetoder og overvågning af miljøfarlige stoffer gennem vidensdeling og samarbejde på tværs af sektorer.
5. Etablere et samlet overblik over status, udfordringer og løsningsmuligheder for at reducere forurening med miljøfarlige stoffer fra både punktkilder og diffuse kilder.

Initiativerne spænder fra fastsættelse af nye miljøkvalitetskrav, modellering, kildeopsporing og lovgivningsgennemgang til etablering af det tværgående partnerskab og fremme af innovativ teknologiudvikling. Det strategiske partnerskab er således en central del af den samlede nationale indsats for at adressere udfordringen med miljøfarlige stoffer i vandmiljøet gennem vidensdeling, regulering og nye teknologiske løsninger.

Innovationspartnerskabet for MFS - i regi af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) - er en konkret del af det overordnede strategiske partnerskab beskrevet i Miljøministeriets strategi for miljøfarlige stoffer fra 2021<sup>4</sup>. Formålet med innovationspartnerskabet for MFS er specifikt at understøtte teknologiudvikling og fremme innovative løsninger til at reducere udledningen af miljøfarlige stoffer til vandmiljøet.

Årsagen til etablering af de to partnerskaber udspringer af det gældende vandrammedirektiv, hvori et af målene er, at alle vandområder skal have opnået god kemisk og økologisk tilstand i 2027. Dette har vist sig at være en vanskelig opgave, og derfor er der prioriteret forskellige initiativer, således at målene kan opnås.

EU's vandrammedirektiv skal sikre beskyttelsen af vandløb, søer, kystvande og grundvand i alle EU-lande (EU, 2000). Det fastsætter miljømål og overordnede rammer for planlægning,

---

<sup>4</sup> [https://mim.dk/media/4lhku3yb/strategi-for-miljoefarlige-stoffer\\_17122021.pdf](https://mim.dk/media/4lhku3yb/strategi-for-miljoefarlige-stoffer_17122021.pdf)

gennemførelse af tiltag og overvågning af vandmiljøet. En vigtig parameter for både den kemiske tilstand og den økologiske tilstand er de miljøfarlige forurenende stoffer (MFS).

En oversigt over vandområdernes kemiske tilstand og økologiske tilstand i 2021-2027, fremgår af TABEL 14 og TABEL 15.

**TABEL 14.** Kemisk tilstand ifølge MiljøGIS for offentliggørelse af vandområdeplanerne 2021-2027 (MiljøGIS, 2024).

Vandområdetype	Målsat	God tilstand	Ikke-god tilstand	Ukendt tilstand
Kystvande (antal)	123	8 (7%)	111 (90%)	4 (3%)
Søer (antal)	986	92 (9%)	201 (20%)	692 (71%)
Vandløb (antal)	18.600	240 (1%)	870 (5%)	17.460 (94%)

**TABEL 15.** Tilstand for nationalt specifikke stoffer under den økologiske tilstand iflg. vandområdeplanerne 2021-2027 (MiljøGIS, 2024).

Vandområdetype	Målsat	God tilstand	Ikke-god tilstand	Ukendt tilstand
Kystvande (antal)	109	82 (75%)	16 (15%)	11 (10%)
Søer (antal)	986	9 (1%)	164 (17%)	813 (82%)
Vandløb (antal)	18.600	190 (1%)	900 (5%)	17.490 (94%)

Som det fremgår af ovenstående, er status, at der generelt er et stort videnshul, hvad angår tilstanden for MFS i vandmiljøet, men de eksisterende data tyder på omfattende overskridelser af miljøkvalitetskravene for en række problematiske stoffer i alle vandområdetyper. Mange vandområder opfylder altså ikke miljømålene for MFS i de kommende danske vandområdeplaner som er gældende fra 2027. Miljøkvalitetskravene overskrides især for tungmetaller (kviksølv, bly, cadmium), PAH'er, perfluorerede stoffer (PFOS) og pesticider.

De væsentlige kilder til MFS i vandmiljøet er:

- Atmosfærisk deposition (fra luften)
- Forurenede grunde
- Industri
- Landbrug
- Regnvandsudløb
- Renseanlæg.

Kilderne spænder fra punktkilder som renseanlæg, industri og regnvandssystemer til diffuse kilder som luftbåren forurening, landbrug og jordforureninger. Dette indikerer, at der er mange forskellige kilder, som bidrager til MFS i vandmiljøet.

Af ovennævnte årsager er der nedsat to partnerskaber: det strategiske partnerskab og innovationspartnerskabet for MFS.



## 8. Samlet konklusion

Innovationspartnerskabet for MFS har gennem to målrettede workshops og omfattende dialog med interessenter i vandbranchen belyst de væsentligste udfordringer og udviklingsbehov relateret til håndtering af miljøfarlige stoffer (MFS) i det danske vandmiljø. Fokus har været på tungmetaller og implementeringen af det 4. renses trin, hvilket afspejler de aktuelle prioriteter i den nationale og europæiske vandmiljøindsats.

Undersøgelserne har vist, at der er et presserende behov for at adressere MFS-problematikken i forskellige vandtyper, med særlig vægt på spildevand, almindelig, belastet overfladevand og industrielle punktkilder. Der eksisterer allerede en række teknologiske løsninger, men der er fortsat behov for optimering og tilpasning for at imødekomme fremtidige regulatoriske krav og bæredygtighedsmål.

Et gennemgående tema i begge workshops var behovet for ensartede krav på tværs af kommuner og virksomheder. Den gældende lovgivning kræver en individuel vurdering af virksomheder ved tilslutning til kloak men disse vil afhænge af forsyningernes udledningstilladelser. Det bevirker at kravene er forskellige, hvilket kan være en udfordring ift. udviklingen og implementeringen af nye teknologier som sikrer en mere effektiv og ensartet indsats mod MFS. Samtidig er der identificeret et stort behov for vidensopbygning, både hvad angår teknologiernes effektivitet og driftsforhold, samt deres miljømæssige og økonomiske konsekvenser. Innovationspartnerskabet har afdækket, at fremtidens teknologier til MFS-håndtering bør fokusere på:

1. Øget fleksibilitet og skalerbarhed for at kunne tilpasses skiftende krav og nye forureningsstoffer.
2. Forbedret ressource- og energieffektivitet for at understøtte forsyningernes mål om energineutralitet og reducerede klimagas emissioner.
3. Integrerede løsninger, der ikke blot fjerner MFS, men også muliggør genanvendelse af værdifulde ressourcer som fosfor og kvælstof.
4. Avancerede overvågnings- og analysemetoder til at sikre optimal drift og dokumentation af renseseffektivitet.

En særlig udfordring, som kræver yderligere teknologiudvikling, er håndteringen af restprodukter, især slam med høje koncentrationer af MFS. Her er der behov for teknologier, der effektivt kan nedbryde eller destruere miljøfarlige stoffer, samtidig med at værdifulde næringsstoffer nyttiggøres, og uden at det kræver enorme ressourcer i form af adsorptionsmaterialer og energi. Vigtigheden af en holistisk tilgang til MFS-problematikken er blevet klarlagt, en tilgang hvor regulering, teknologiudvikling, og implementering går hånd i hånd. Der er behov for styrket samarbejde mellem forsyninger, myndigheder, teknologileverandører og forskningsinstitutioner for at drive innovation og sikre, at de udviklede løsninger er både miljømæssigt og økonomisk effektive og bæredygtige.

Afslutningsvis peger innovationspartnerskabet på, at Danmark har potentiale til at blive førende inden for udvikling og implementering af avancerede teknologier til MFS-håndtering. Dette kræver dog en målrettet og koordineret indsats, hvor investeringer i forskning og udvikling kombineres med en fremsynet regulering og en proaktiv tilgang fra alle aktører i vandsektoren. Ved at adressere de identificerede udfordringer og udviklingsbehov kan Danmark ikke blot forbedre tilstanden af sit vandmiljø, men også styrke sin position som global frontløber inden for vandteknologi og bæredygtig vandforvaltning.

