

# Tilførsel af miljøfarlige forurenende stoffer fra diffuse kilder til vandmiljøet

Det Nationale Overvågningsprogram for Vandmiljø og Natur (NO-VANA) overvåger vandmiljøets og naturens tilstand inden for de områder, der prioriteres i forhold til de politisk fastsatte rammer. Siden 1998 er målinger af en række miljøfarlige forurenende stoffer (MFS) i vandmiljøet – dvs. i vand, biota og sediment i kystvande, søer og vandløb – og i punktkilder indgået i programmet. Hvis et miljøkvalitetskrav for et givet stof ikke er overholdt, er der grund til at foretage en opsporing af kilderne til forureningen. Kildeopsporingen i indsatsprogrammet til de gældende vandområdeplaner fokuserer generelt på udledninger fra punktkilder, men MFS kan også tilføres vandmiljøet via diffuse kilder. Vi giver et kvantitativ bud på betydningen af de diffuse kilder til MFS i vandmiljøet.

DORTE RASMUSSEN, ANNE RATHMANN  
PEDERSEN, JENS TØRSLØV &  
INGELISE DIGE SEMARK

## Baggrund

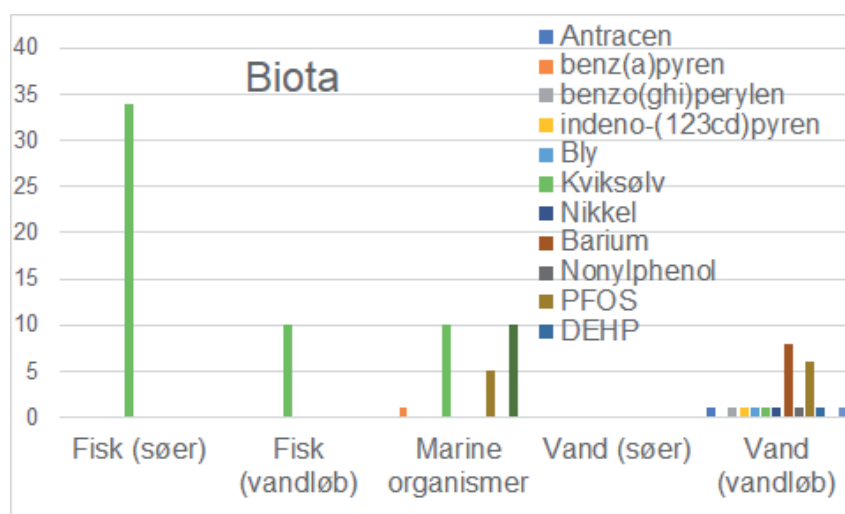
For en række vandområder blev der forud for vandplanperioden 2015-2021 konstateret forekomst af et eller flere miljøfarlige forurenende stoffer (MFS) i koncentrationer, der overskrider de fastsatte miljøkvalitetskrav. Figur 1 giver en oversigt over pågældende vandområder og stoffer.

I et projekt gennemført for Miljøstyrelsen blev tilførslen af MFS fra diffuse kilder til vandområderne kvantificeret med henblik på en vurdering af, i hvilket omfang MFS fra diffuse kilder kan have bidraget til overskridelserne. Dette blev gjort for de enkelte hovedvandoplande i Danmark samt særskilt for de vandområder, hvor der blev konstateret overskridelse af et eller flere miljøkvalitetskrav.

### Kort beskrivelse af kilderne og kvantificering af disse

De diffuse kilder kan inddeles i to grupper:

- Direkte kilder – hvor MFS primært i indstrømmende grundvand og i nogen grad deposition fra luften direkte til vandet er vigtige. Udveksling af MFS mellem kystvandene og de omgivende marine områder kan også nævnes.
- Indirekte kilder – hvor oplandet til vandområdet belastes med MFS fra fx slam, gødning og deposition fra luften. Vandløb og søer bliver efterfølgende belastet med en del af disse MFS som følge af run-off, dræning og erosion fra oplandet.



Figur 1 Antal forekomster af miljøfarlige forurenende stoffer i overfladevandområder, hvor et eller flere miljøkvalitetskrav ikke er overholdt i planperioden 2015-2021. Antallet af overskridelser i de marine organismer henviser til antallet af overskridelser hvor miljøkvalitetskravet for biota ikke er overholdt i fisk/muslinger i kystvande.

Kvantificeringen af de direkte og de indirekte kilder er kort beskrevet i Tabel 1 og i Figur 2. Faktaboks 1 beskriver, hvordan transporten fra land til overfladevand og grundvand er kvantificeret.

### Usikkerhedsanalyse

Der er usikkerhed forbundet med fastsættelsen af de enkelte variable i de udførte beregninger – herunder vandstrømme, atmosfærisk deposition og koncentrationer i fx vejvand og vand fra andre befæstede arealer. Denne usikkerhed er så vidt muligt bestemt ud fra de tilgængelige data for de enkelte variable og variationen på disse.

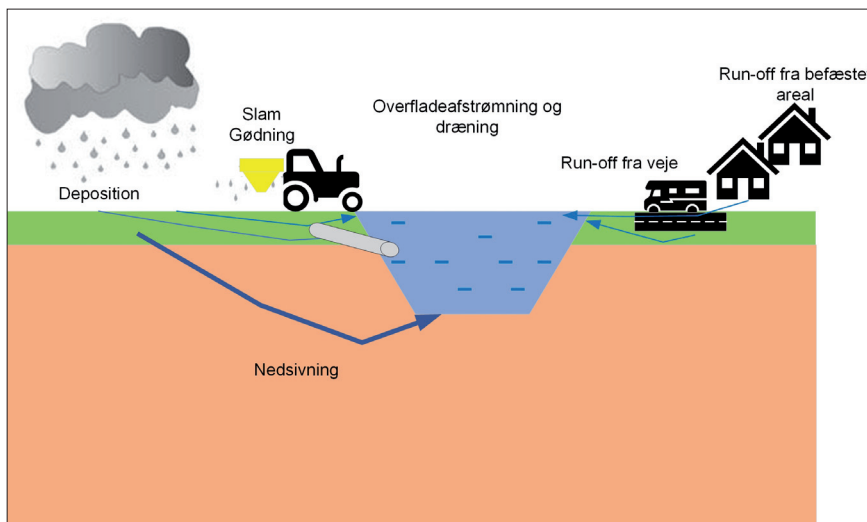
Beregningerne inkluderede en usikkerhedsanalyse af de enkelte variable, hvor beregningerne blev gentaget mere end 1000 gange med tilfældigt valgte værdier af de enkelte variable inden for deres respektive usikkerhedsintervaller.

### Vandstrømme

Data for samlede månedlige og årlige ferskvandsstrømme til kystvandene for samtlige hovedvandoplande for årene 2000-2017 har været tilgængelige for projektet fra ref. /3/.

Det månedlige grundvandsbidrag blev sat lig med den laveste månedlige vandtilførsel til kystvandet fra hovedvandoplandet angivet som 10%-percentilen af de enkelte års laveste ferskvandsstrømme til kystvandene. Grundvandsstrømmen betragtedes generelt som værende nogenlunde konstant.

Balancen mellem det tilførte ferskvand og det marine vand fra uden for kystvandene kan aflæses i saliniteten, som i kystvandene ligger



Figur 2. Principskitse af den anvendte metode til beregning af bidrag fra diffuse kilder til koncentrationer af MFS i vandmiljøet

mellem den marine salinitet og ferskvandets salinitet. Sidstnævnte blev sat til 0% i beregningerne. Den effektive vandudveksling mellem kystvand og det omgivende hav blev derfor bestemt på basis af en massebalance for salt – se illustrationen Figur 3.

### Resultater

Den udførte usikkerhedsvurdering på parametrene antyder en vis robusthed i resultaterne. Der blev konstateret en begrænset variation på beregningsresultaterne, hvor 90%-percentilen generelt var under en faktor 2 over gennemsnitsværdien.

### Overskridelse af miljøkvalitetskrav

#### Biota

Eksempler på de beregnede koncentrationer

(inklusive usikkerhedsinterval) i biota, hvor alene de diffuse kilders bidrag er indregnet, er vist i Figur 4 (kystvande) sammen med variationen på resultaterne. Bidrag fra andre kilder er således ikke inkluderet. Miljøkvalitetskravene for de forskellige stoffer er ligeledes vist i figuren (rød linje). Koncentrationen i biota er meget enkelt beregnet ved at gange den beregnede koncentration i vandet med stoffets biokoncentrationsfaktor (BCF), hvilket i sagens natur er behæftet med stor usikkerhed, alene fordi biokoncentrationsfaktoren (BCF) kan variere en del for det enkelte stof. Beregningerne viser, at bidraget fra diffuse kilder i flere tilfælde kan forklare de målte overskridelser af miljøkvalitetskravene for biota. Dette gælder fx for kviksølv (undtagen i Grådyb Tidevandsområde), BDE og benz(a)pyren (BaP) i marine organismer.

#### Vandfase

Figur 5 viser de beregnede koncentrationsbidrag (inklusive usikkerhedsinterval) i vandfasen fra diffuse kilder for nogle af de MFS, for hvilke der er konstateret overskridelse af miljøkvalitetskravet. Variationen på resultaterne er vist i samme figur. Miljøkvalitetskravene for de enkelte stoffer er også vist i figuren (rød linje).

Overskridelser af miljøkvalitetskravene for PFOS, barium, DEHP, bly, nonylphenol, kviksølv og isoproturon samt PAH'erne antracen, indeno(1,2,3 cd)pyren og benzo(ghi)perylen er konstateret i flere vandløb. Det bør dog bemærkes, at miljøkvalitetskravet for benz(a)pyren er anvendt for PAH'erne indeno(1,2,3 cd)pyren og benzo(ghi)perylen. Beregningerne viser, at de diffuse kilder kan forklare overskridelserne for PFOS, bly, barium og kviksølv, men ikke for DEHP, nonylphenol og PAH'erne.

### Faktaboks 1. Beregning af de indirekte kilder

MFS vil - ud over at akkumuleres i jorden - blive nedbrudt (kun organiske forbindelser) og vil blive tilført overfladevand via erosion, run-off og dræning samt til grundvand via transport med det infiltrerende vand og eventuelt partikelfaciliteteret transport. Sidstnævnte mekanisme blev ikke taget i betragtning her. Generelt foregår processerne over en meget lang tidshorizont – og kunne teoretisk set nå en steady-state-tilstand (konstant niveau) efter mange år.

Stoftransporten til overfladevand og grundvand blev beregnet ved en steady-state-betragtning, og en enkel massebalance blev opstillet ved steady-state:

$$\text{Ind} = \text{Ud} + \text{Nedbrudt}$$

Ind = Tilførte mængder til jordmiljøet (med gødning, slam, deposition osv.)

Ud = Transporteret til overfladevand + transporteret til grundvand

Ud fra data for vandtilførslen til overfladevand kunne vandtilførslen til grundvand beregnes ved at fratække vandtilførslen til overfladevand fra nettonedbøren.

Andelen af den tilførte stofmængde, som blev nedbrudt eller blev ført til overfladevand eller grundvand, kunne herefter beregnes ud fra dette.

Koncentrationen i jordens porevand blev beregnet ved antagelse om ligevægt mellem bundet og opløst stof. Denne ligevægt blev beskrevet ved stoffernes vand-jord-fordelingskoefficient,  $K_d$ .

Vi antog endvidere en blandingsdybde i det øverste jordlag på 5 cm, en tørvegtsdensitet af jord på 1500 kg TS/m<sup>3</sup>; volumenbrøken for faststof i jorden blev sat til 0,6; volumenbrøken for vand i jorden blev sat til 0,2.

Table 1. Anvendte metoder til beregning af bidragene fra diffuse kilder til koncentrationer af MFS i vandmiljøet

Diffus kilde	Metode	Antagelser	Datakilder
Tilførsel fra grundvand Direkte ved vandløbenes udspring	[Grundvandstilførsel til overfladevand m <sup>3</sup> /år] × [koncentration i grundvand].	Konstant koncentration i grundvandet Konstant grundvandsflow	Jupiter database for koncentrationer af MFS i grundvand (ref. /1/). Beregne ferskvandstilførsler til kystvandene fordelt på måned og år, ref. /3/
Atmosfærisk deposition Direkte kilde til overfladevand Indirekte kilde ved deposition på oplandet til ferskvandsområdet	Direkte (kun inkluderet for kystvandene): [Årlig deposition (g/ha/år)] × [Areal af kystvandet (ha)] Indirekte: [Årlig deposition (g/ha/år)] × [samlet areal af oplandet (ha)]	Deposition antaget den samme i hele landet – både på land og på vand	Målinger af deposition for Danmark (primært, dog ikke dækkende for alle stoffer). Målinger af deposition i lande – primært data for Sydsverige Beregne depositions-rater ud fra luftkoncentrationer
Overfladeafstrømning fra befæstede arealer minus vejarealer Indirekte kilde	[Koncentration i vand fra befæstet areal] × [årlig netto nedbør fra ikke-kloakeret befæstet areal]	Der anvendes målte stofkoncentrationer i afstrømninger fra befæstede arealer til at repræsentere denne kilde.	Indhold af MFS i afstrømmende regnvand fra befæstede arealer. GIS baserede data for befæstede arealer ref. /7/. Data fra Danmarks Statistik, ref. /5/
Afstrømning fra vejarealer Indirekte kilde	[Koncentration i vejvand] × [årlig nettonedbør] × [Ikke kloakeret vejareal]	Primært veje i det åbne land er ikke kloakeret Ca. 5 % af vejarealet udgøres af høj intensivt belastede veje, hvor vandet nedsives direkte Ca. 10 % af arealet udgøres af lav intensivt belastede veje, hvor vandet nedsives direkte. afløbskoefficient fra vejene på 0,85.	Målinger af MFS i vejvand fra litteraturen. GIS baserede data for befæstede arealer – herunder veje.
Overfladeafstrømning fra ubefæstede arealer, ikke-opdyrkede arealer samt skove Indirekte kilde	[Årlig deposition (g/ha/år)] × [samlet ubefæstet og ikke opdyrket areal (ha)]		Indsamlede depositions-rater GIS baserede data for ubefæstede og udyrkede arealer, ref. /7/
Overfladeafstrømning fra dyrkede arealer • slam • kunstgødning • husdyrgødning • indirekte kilde	[Koncentration af MFS i gødning hhv. slam] × [dosering (kg/ha/år)] × [landbrugsareal]	Anvendelse af slam og gødning er baseret på en gennemsnitsbetragtning. Der er anvendt standardbetragtninger ved beregning af afstrømning og erosion	Data for stofindhold i slam, kunstgødning og husdyrgødning. Data for forbrug af kunstgødning, naturgødning og spildevandsslam i Danmark.
Udveksling med omgivende kystvande	Se Figur 3	Se Figur 3	Koncentration i havmiljøet hentet fra OSPAR/ ICES-database ref. /2/, Novana data ref. /6/, vandbalancedata ref. /3/

Enkelte kilders betydning

Figur 6 viser den relative betydning af de enkelte diffuse kilder for et af hovedvandoplandene (hovedvandopland 1.1: Nordlige Kattegat og Skagerrak). Bidraget fra udvekslingen med det omgivende hav er ikke medregnet i figuren. Tendensen er fundet at være sammenlignelig mellem forskellige hovedvandoplande.

Generelle observationer

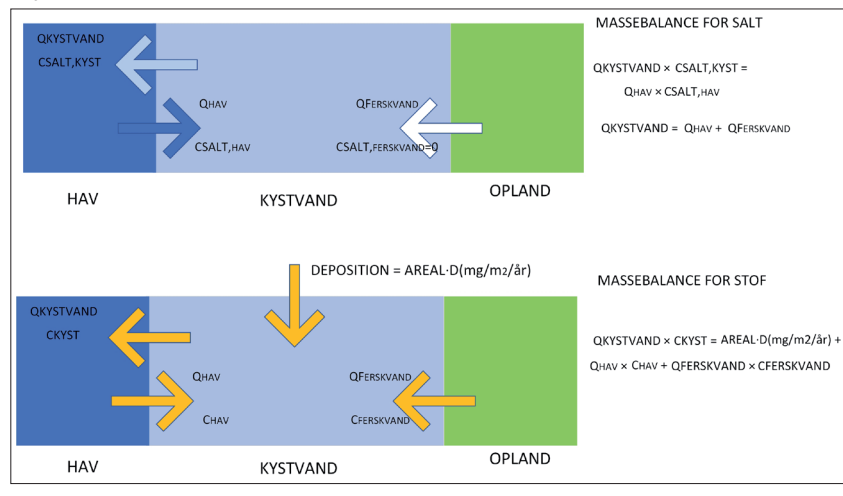
Følgende observationer omkring de estimerede bidrag fra forskellige kilder er gjort:

- Deposition er generelt en væsentlig diffus kilde til metallerne bly, kviksølv og barium. Det samme gælder for PAH'erne antracen, benz(a)pyren og benzo(ghi)perylene.
- Slam bidrager til den diffuse belastning med alle de omfattede stoffer. Det er konstateret, at bidraget fra slam er meget lavere for antracen end for de mere

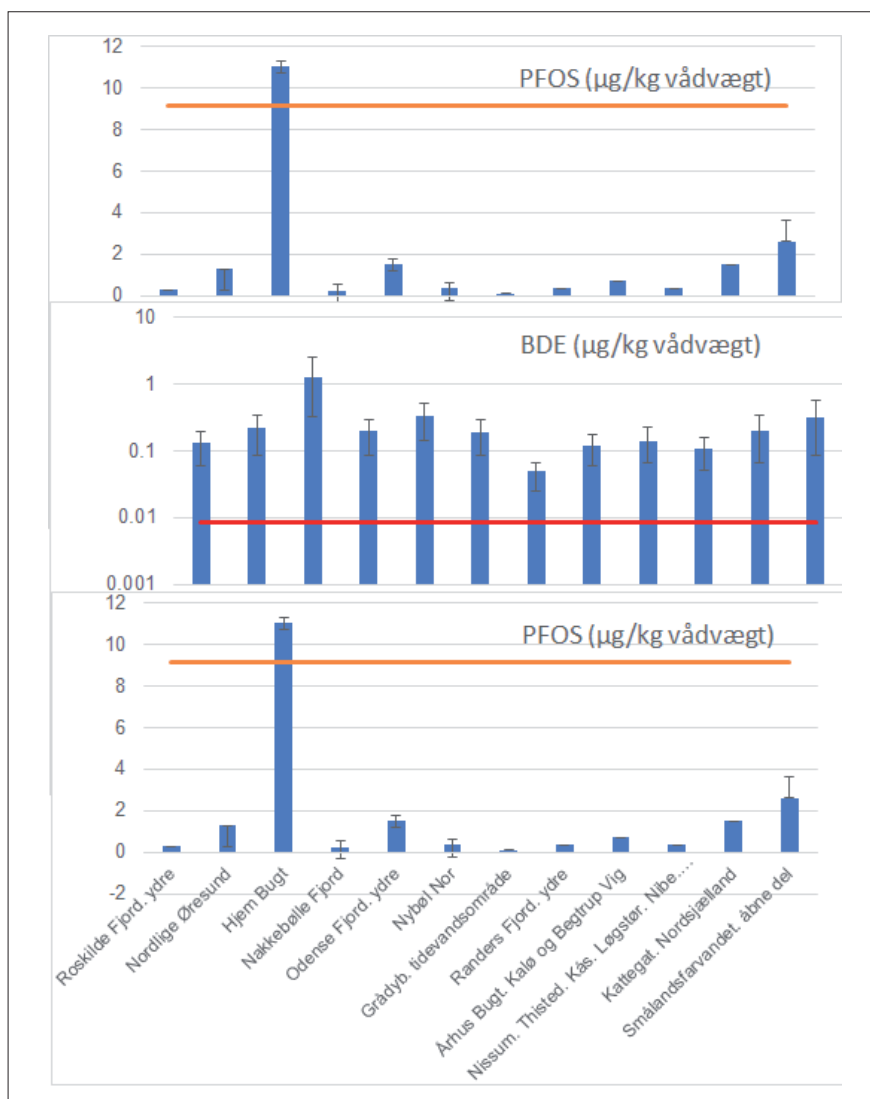
højmolekylære PAH'er, og at slam er den dominerende diffuse kilde til BDE.

- Forskellige gødningstyper bidrager tilsammen i væsentligt omfang til den diffuse belastning med bly, kviksølv, nikkel og PAH'erne benz(a)pyren, benzo(ghi)perylene og indeno(1,2,3cd)pyren. Derudover er gødning også en vigtig diffus kilde til nonylphenol, PFOS og DEHP.
- Befæstede arealer er generelt en mindre betydningsfuld kilde til diffus belastning

Massebalancen i kystvandene beregnes ved anvendelse af en meget simpel opblandningsmodel:  
Den effektive vandudveksling mellem kystvand og det omgivende hav bestemmes på basis af en massebalance for salt. Herefter beregnes koncentrationen i kystvandet ud fra en massebalance for stoffet.



Figur 3. Principskitse over beregning af udvekslingen mellem kystvandene og det omgivende hav. QKystvand: vandstrøm fra kystvand til havet; CKystvand: stof- (eller salt)koncentration i kystvandet; QHav: vandstrøm fra havet til kystvandet; CHav: stof- (eller salt)koncentration i havvandet; QFerskvand: vandtilførsel til kystvand; CFerskvand: stof- (eller salt) koncentration i ferskvandstilførslen (saltkoncentrationen er sat til 0 i beregningerne).



med stofferne omfattet af projektet.

- Trafik synes at være en væsentlig diffus kilde til nonylphenol. Trafik er også en tydelig, men dog mindre betydningsfuld kilde til bly, kviksølv, nikkel, PAH'er og DEHP.

### Konklusioner

Projektets konklusion er, at diffuse kilder kan have en væsentlig betydning for forekomsten af MFS i vandmiljøet og de overskridelse af miljøkvalitetskrav, som er konstateret for nogle stoffer i forbindelse med vandområdeplan 2015-2021. Det er derfor ikke sikkert, at en stram regulering af punktkildeudledninger alene vil kunne sikre overholdelse af miljøkvalitetskrav for alle MFS.

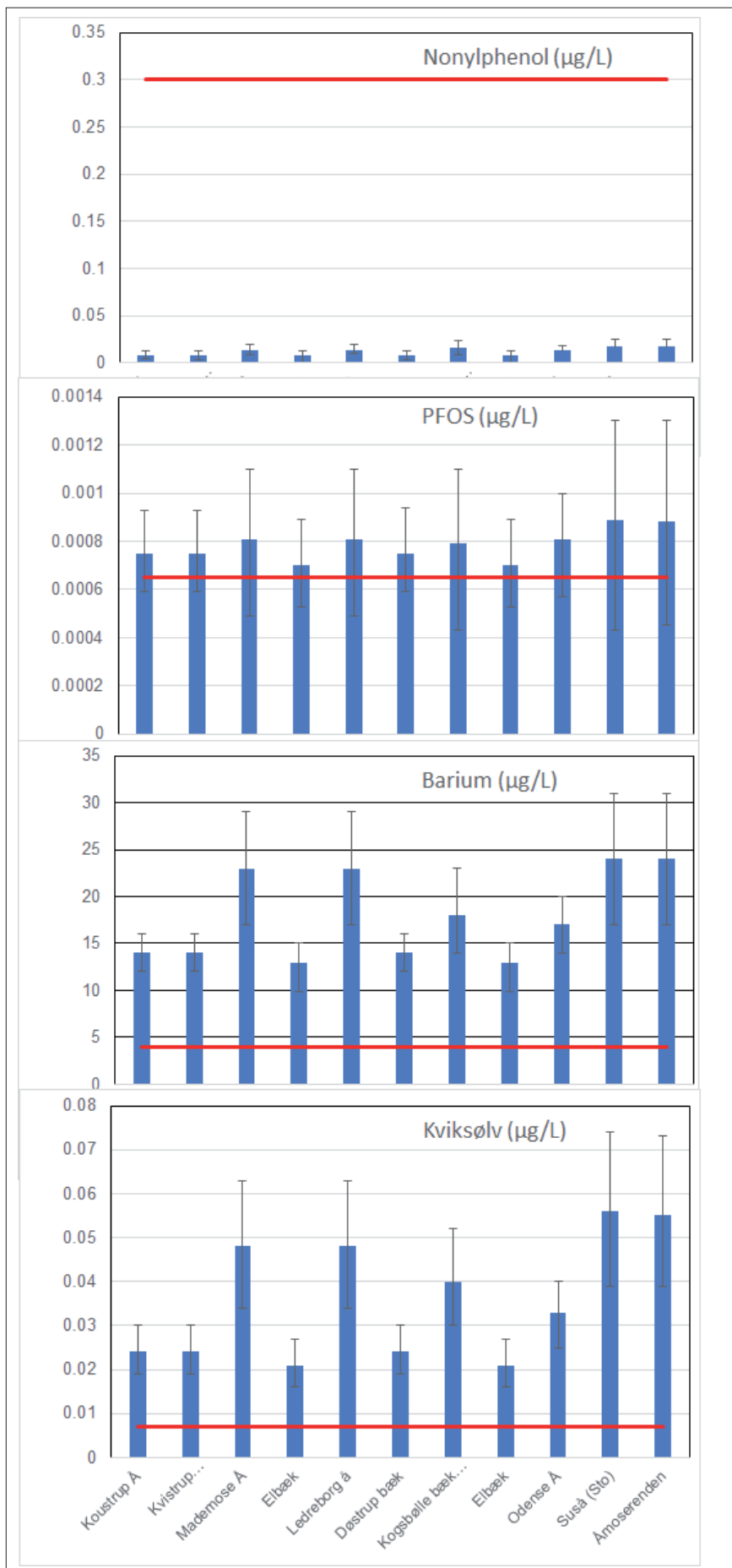
En mere uddybende beskrivelse af arbejdet samt resultaterne kan findes i vores rapport, ref. /4/.

### Referencer

- 1/ GEUS. National Boringsdatabase (Jupiter). Data kan tilgås via PCJupiter. <http://data.geus.dk/JupiterWWW/downloadpcjupiter.jsp>
- 2/ ICES/CIEM online database. <http://www.ices.dk/data/data-portals/Pages/default.aspx>
- 3/ Månedlige og årlige opgørelser af tilførslen af ferskvand til kystvandene. Ikke offentligt tilgængelige data, som er gjort tilgængelige for DHI
- 4/ Rasmussen Dorte, Anne Rathmann Pedersen, Jens Tørslov og Ingelise Dige Seemark (2020): Kvantificering af tilførsel af miljøfarlige forurenende stoffer fra diffuse kilder til vandmiljøet. Rapport fra Miljø- og Fødevarerministeriet.
- 5/ Danmarks Statistik, [www.statistikbanken.dk](http://www.statistikbanken.dk)
- 6/ OdaForAlle, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, <https://www.dce.au.dk/overvaagning/databaser/oda/>
- 7/ Aarhus Universitet. BASEMAP02 Technical documentation of a model for elaboration of a land-use and land-cover map for Denmark

DORTE RASMUSSEN (dor@dhigroup.com), ANNE RATHMANN PEDERSEN, JENS TØRSLOV og INGELISE DIGE SEEMARK er alle ansat på DHI A/S, Miljø & Toksikologi, som arbejder med miljø- og sundhedsvurderinger af kemiske stoffer, produkter og artikler.

Figur 4. Beregnede bidrag fra diffuse kilder til koncentrationer af PFOS, BDE og benz(a)pyren (BaP) i biota i kystvande. De røde streger angiver miljøkvalitetskravene.



Figur 5. Beregnede bidrag fra diffuse kilder til koncentrationer af nonylphenol, PFOS, barium og kviksølv i vandløb. De røde streger angiver miljøkvalitetskravene