

VVM-bilag 16 Himmark Strand

Flux af forurening fra rent sand til havvand

Udarbejdet af **Gitte Lemming Søndergaard**
Dato **2026-06-03**
Kontrolleret af **Mette Christophersen**
Godkendt af **Albert Ernest Coutant**

Dato 03-06-2026

1 Indledning

I forbindelse med afværgen af forureningen ved Himmark strand, vil der blive afgravet forurenede sand fra stranden samt fra havbunden. Efterfølgende retableres stranden og havbunden ved udlægning af en halv meter ler efterfulgt af sand. Der vil udelukkende blive udlagt en halv meter ler, såfremt der efterlades forurening i det underliggende intakte lerlag. I dette notat er der foretaget en vurdering af, hvorledes forureningsstoffer i dette sandfyld kan påvirke havvandet. For udvalgte metaller og PAH'er, som har potentiale for at ophobes i sediment, er det endvidere undersøgt, om der kan ske en påvirkning af det omgivende sediment i området.

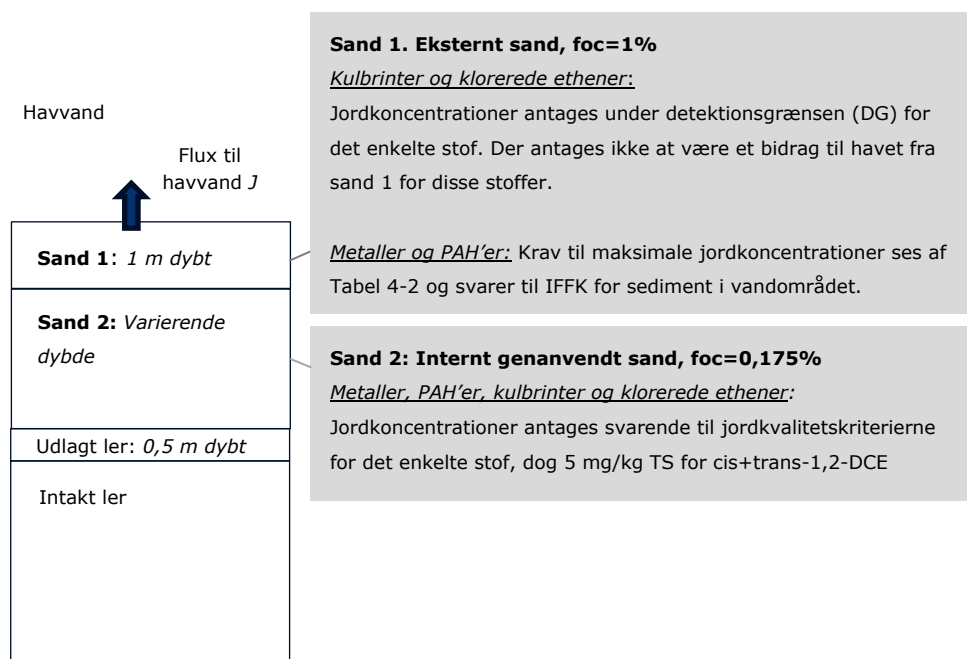
Rambøll
Hannemanns Allé 53
DK-2300 København S

T+45 5161 1000

2 Metodebeskrivelse for beregning af flux til havvand

I det følgende beskrives metoden, samt de forudsætninger og parametre, der er anvendt til at estimere forureningspåvirkningen for havvand (og sediment). Der er fokuseret på klorerede ethener og kulbrinter, da disse er de to grupper af forureningsstoffer, der udgør den primære forurening ved Himmark Strand, og er årsagen til at der foretages en oprensning. Derudover foretages der beregninger for påvirkningen af udvalgte metaller (Pb, Cd, Cr total, Cu, Ni, Zn, Ba og As) samt PAH'erne benz(a)pyren og dibenz(a,h)antracen, som har potentiale for at ophobes i sediment.

Der er i forudsætningerne for beregningerne skelnet mellem det sandlag (sand 1), der placeres i det øverste meter af havbunden, og som er i kontakt med havvandet, samt det sandlag der placeres herunder (sand 2). Figur 2-1 skitserer placering af disse sandlag. Sand 2 repræsenterer især det sand som genanvendes internt på lokaliteten, mens sand 1 især repræsenterer rene materialer, der tilkøres lokaliteten (eksternt sand). Dette sand kan enten stamme fra råstofindvinding på land eller fra havbunden.



Figur 2-1: Konceptuel model for beregningen af flux til havvand, samt antagelser omkring koncentrationer af klorerede ethener, metaller og PAH i beregningerne. IFFK: i forvejen forekommende koncentrationer for sediment i vandområdet (se Tabel 4-2). Der vil udelukkende blive udlagt en halv meter ler, såfremt der efterlades forurening i det underliggende intakte lerlag.

2.1 Klorerede ethener og kulbrinter

Det forudsættes i beregningerne, at sand 1 er helt uforurenet med klorerede ethener og kulbrinter dvs. at koncentrationerne er under detektionsgrænsen.

For sand 2 antages det, at koncentrationerne af kulbrinter samt PCE, TCE og VC er svarende til jordkvalitetskriterierne (JKK) på henholdsvis 5 mg/kg for PCE, 5 mg/kg for TCE samt 0,4 mg/kg for VC. JKK for 1,2-DCE er meget højt (85 mg/kg cis+trans 1,2 DCE), og vil, hvis denne koncentration anvendes, give meget stor flux til havet. Derfor er det i beregningerne valgt at sætte koncentrationen for DCE lig med JKK for TCE og PCE på 5 mg/kg. Disse koncentrationer vil udtrykke de maksimalt forventede koncentrationer i sand, der genindbygges på lokaliteten. Der er beregnet gennemsnit baseret på jordanalyser af jord fra lokaliteten med koncentrationer under jordkvalitetskriteriet. De beregnede gennemsnitskoncentrationer af PCE, TCE, 1,2-DCE og VC er på henholdsvis 0,43 mg/kg, 0,29 mg/kg, 0,48 mg/kg og 0,028 mg/kg (gennemsnit af 253-349 analyser afhængig af stof).

For de klorerede ethener foretages en omregning fra jord- til porevandkoncentrationer baseret på stoffernes K_d -værdi svarende til fremgangsmåden i Miljøstyrelsens JAGG-værktøj til risikovurdering af forurenede lokaliteter¹. I JAGG-værktøjet estimeres stoffets K_d værdi som $K_d = foc \cdot K_{oc}$, hvor foc er sandets fraktion af organisk indhold, og K_{oc} er stoffets fordelingskoefficient mellem organisk kulstof og vand. Der anvendes K_{oc} -værdier fra JAGG. Sand 2 repræsenterer især internt sand fra lokaliteten, og

¹ Miljøstyrelsen (2016): *Manual for program til risikovurdering – JAGG 2.1*. Miljøprojekt nr. 1880, september 2016

kan stamme dels fra afgravning på land og hav. Der anvendes en konservativ foc-værdi for sand 2 på 0,175%, som er baseret på foc-bestemmelser på baggrund af glødetab for sand fra de to indsatsområder på land.

For kulbrinte fraktionerne C6-C10, C10-C15, C15-20 og C20-35 er porevandskoncentrationerne vurderet baseret på Miljøstyrelsens rapport om håndtering af lettere forurenede jord². Her er der samlet data om udvaskningstests af jorde med forskellige forureningsindhold af kulbrinte fraktioner. Herudfra er der valgt konservative værdier (dvs. i den høje ende) for porevandskoncentrationerne for de 4 kulbrinte fraktioner. Der er desuden udført fugacitetsberegninger for modelstoffer for hver af kulbrinte fraktionerne vha. JAGG. Denne beregning vurderes dog usikker, da kulbrinte fraktionerne består af en lang række af forskellige kulbrinter. De anvendte porevandskoncentrationer baseret på udvaskningstests i² er således mere konservative, og vurderes bedre at repræsentere hele fraktionen, hvorfor disse er valgt som udgangspunkt for beregningen².

2.1.1 Beregning af diffusionsstyret flux til havvandet

Vha. Ficks 1. lov beregnes en diffusionsstyret flux af klorerede ethener og kulbrinter fra sand 2 og gennem sand 1, som jf. Figur 2-1 består af 1 m sand, som til start er uforurenede med disse stoffer. Ficks 1. lov beregner steady state fluxen J , som er den maksimale flux, der opnås, når der er sket fuldt gennembrud af forureningen³:

$$J = nD_e \frac{C_0}{L}$$

C_0 er startkoncentrationen i det genopfyldte sand (sand 2), og L er dybden af det uforurenede sandlag (sand 1), som diffusionen beregnes over. D_e er stoffets effektive diffusionskoefficient i vand, som tager højde for at diffusionskoefficienten er lavere i det porøse medium end i vand, idet de diffunderende stoffer bevæger sig gennem en snoet vej i hulrummet mellem jordpartiklerne. Dette udtrykkes ved tortuositeten, τ , som er en faktor mellem 0 og 1 beregnes som

$$D_e = \tau \cdot D$$

Forudsætninger for fastsættelse af inputparametre:

- For sandlaget antages en bulkdensitet på 1,46 kg/l og en porøsitet på 0,45 baseret på standardværdier fra JAGG.
- Tortuositeten for sand sættes konservativt til 1.
- Diffusionskoefficienter (D) i vand er beregnet for 10°C baseret på⁴. Der er taget udgangspunkt i diffusionskoefficienter for 25°C fra JAGG.
- Foc-værdien (fraktionen af organisk stof), der anvendes ved omregning fra jord- til vandkoncentrationer, sættes til 0,175% baseret på foc-værdier fra lokaliteten fastsat på baggrund af glødetab i⁵. Der er anvendt et gennemsnit af sandprøver fra begge indsatsområder på land, som er vurderet relevante i⁵.
- Der tages i beregningerne ikke højde for, at der kan ske en eventuel nedbrydning af PCE, TCE og DCE til VC som følge af anaerob deklorering. Sandlaget forventes til en start at være aerobt,

² Miljøstyrelsen (2009): *Håndtering af lettere forurenede jord – konsekvensvurdering*. Miljøprojekt nr. 1287, 2009.

³ Johnson, R.L., Cherry, J.A. & Pankow, J.F. (1989): Diffusive Contaminant Transport in Natural Clay: A Field Example and Implications for Clay-Lined Waste Disposal Sites. *Environmental Science & Technology*, 1989, s. 340-349.

⁴ Kjeldsen, P. & Lindhardt, B. (1997): *Simple Models for Predicting Vapour Migration in the Vadose Zone*. Department of Environmental Science and Engineering, Technical University of Denmark.

⁵ 523 05725 – Himmark Strand, Nordborg. Indsats overfor jordforurening. Videregående undersøgelse oktober 2019. Dansk Miljørådgivning A/S

da det i forbindelse med udgravning og genindbygning vil blive iltet, og betingelserne for anaerob omsætning af PCE og TCE til VC vurderes derfor at være dårlige.

Øvrige forudsætninger for beregningen af den diffusionsstyrede flux:

- Den diffusionsstyrede flux estimeres uden hensyntagen til, at der også over tid vil være en påvirkning fra den forurening med klorerede ethener, der efterlades i lerlaget, og som over tid vil diffundere gennem det udlagte 0,5 m lerlag og op igennem sandet i havbunden. Denne flux fra lerlaget vil dog være meget forsinket i forhold til fluxen gennem sand, da diffusion gennem ler er meget langsommere.
- Det antages, at den opadrettede flux til havbunden udelukkende sker ved diffusion, og ikke som en opadrettet advektiv transport.

2.2 Metaller og PAH'er

For metaller og PAH'er antages, at sand 1 (eksternt tilført sand) maksimalt indeholder koncentrationer svarende til de i forvejen forekommende koncentrationer (IFFK) for vandområdet. Disse fremgår af Tabel 4-2, og er indsamlet i forbindelse med ansøgningen om udledningstilladelse (se rapportens bilag 18). Der foretages en omregning fra jord- til porevandskoncentrationer baseret på kd-værdier for marint sediment fra vejledningen *Risikovurdering af forurenset sediment* fra Miljødirektoratet i Norge⁶. Kd-værdierne er gældende for sediment med et organisk indhold (foc) på 1%. For barium anvendes en kd-værdi fra ECHA gældende for marint sediment⁷. De beregnede porevandskoncentrationer er sammenlignet med stoffernes MKK (se Tabel 4-2). For barium, cobolt, arsen, benz(a)pyren og dibenzo(a,h)antracen giver jordkoncentrationer svarende til IFFK anledning til at porevandskoncentrationerne overstiger MKK. Da porevandskoncentrationerne er beregnet ud fra de i forvejen forekommende koncentrationer, vil de svare til dem, der allerede findes i vandområdet som helhed.

For at estimere en flux (g/år) af metaller og PAH ud af sandet antages det, at porevoluminet i de øverste 10 cm af sand 1 udskiftes 100 gange pr. år. En udskiftning i størrelsesordenen 100 gange pr. år vurderes som et fornuftigt bud på en gennemsnitsbetragtning for den strækning af havbunden, der kigges på (fra kysten og flere hundrede meter ud). Det vurderes ligeledes, at udskiftningen vil være højere tæt på kysten, hvor bølger, tidevand mv. har indvirkning, mens udskiftningen vil være mindre end 100 gange pr. år længere ude på havet, hvor der er højere vanddybde. Idet de stoffer, der regnes på (metaller og PAH'er) sorberer stærkt til jorden, vurderes det også, at det vil tage tid for en ligevægt mellem sorberet og opløst fase at indstille sig, når porevandet udskiftes. Denne ligevægt vil således ikke indstille sig momentant, hvilket derfor også udgør en begrænsning for hvor mange gange porevandet kan nå op på ligevægtskoncentrationen i løbet af et år.

Med et samlet areal af de to indsatsområder på 28.400 m² og en antaget porøsitet af sandet på 0,45 giver dette et vandflow til havvandet på 127.800 m³/år. Fluxen af metaller og PAH estimeres dernæst ved at gange porevandskoncentrationen med vandflowet, idet det konservativt antages, at der løbende vil indstille sig en ligevægt mellem koncentrationerne på den faste fase og porevandet, samt at koncentrationen på den faste fase ikke reduceres over tid.

⁶ Miljødirektoratet (2015): *Risikovurdering af forurenset sediment – veileder*.

⁷ European Chemicals Agency (ECHA): *Registration Dossier – Barium*. Tilgængelig på: <https://echa.europa.eu/da/registration-dossier/-/registered-dossier/19625/5/5/2>

3 Metodebeskrivelse for fortynding i havvand

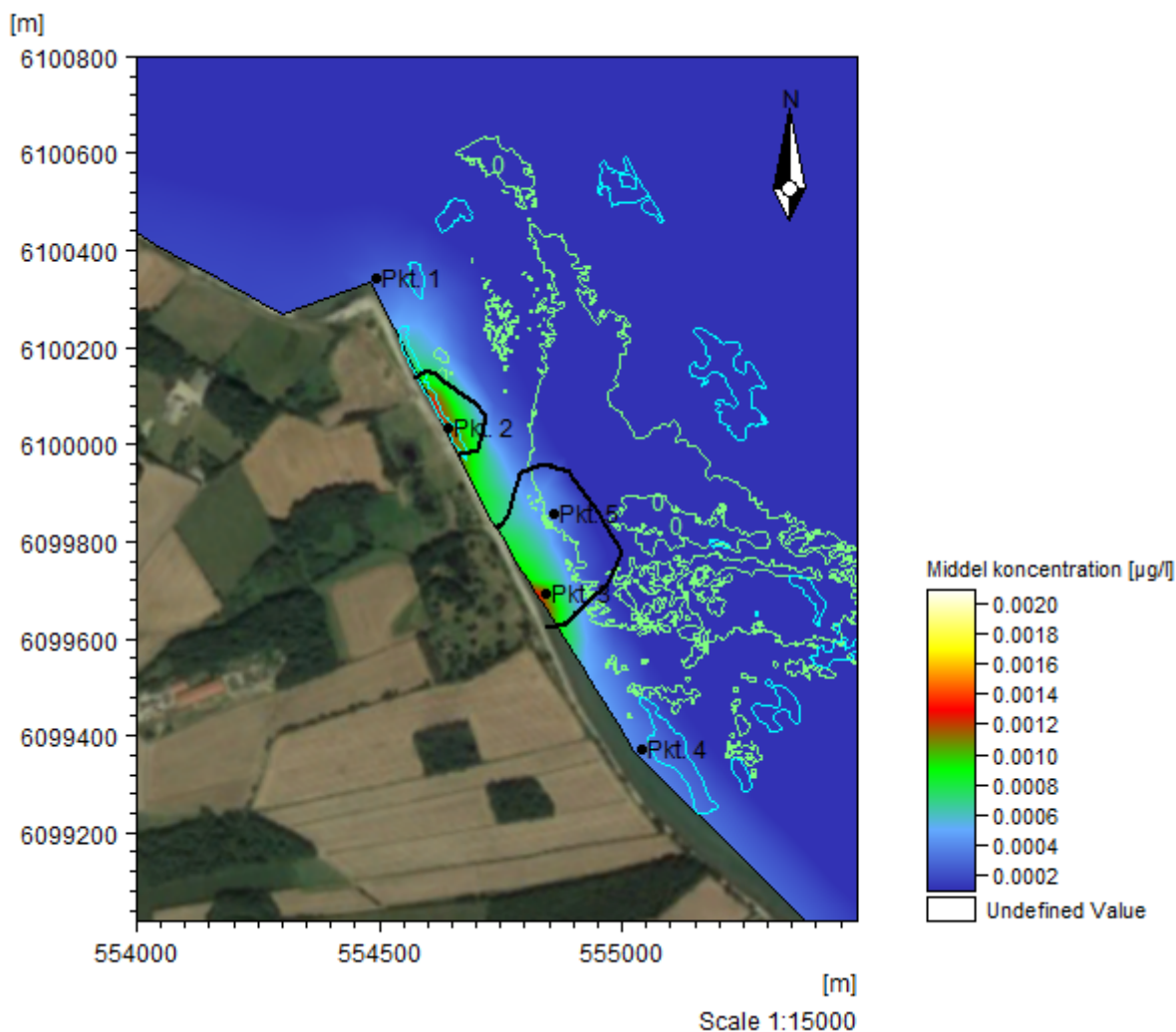
For at vurdere størrelsen af fortyndingen i havvandet, er der taget udgangspunkt i en eksisterende modellering af havvandskoncentrationer udført for Himmarn Strand⁸. På baggrund af et samlet fluxbidrag af vinylchlorid på 171 g/år til forskellige punkter i havbunden blev de resulterende havvandskoncentrationer modelleret vha. MIKE 3. Figur 3-1 viser de resulterende koncentrationer af vinylchlorid i havvandet under rolige strømforhold. Fluxbidraget i modelleringen var størst inde ved kysten og lavere længere fra land. Der er beregnet fortyndingsfaktorer baseret på gennemsnitskoncentrationer over dybden i vandsøjlen i punkt 2, som er beliggende nær kysten i det sydlige indsatsområde (se Figur 3-1). Disse er omregnet til et vandvolumen, som den samlede flux opblandes i (se Tabel 3-1). Da fluxinputtet fra havbunden i simuleringen i⁸ ikke er jævnt fordelt over indsatsområderne på land, men er højere inde ved kysten (beskrevet i⁸), vurderes de angivne fortyndingsvolumener, baseret på punkt 2, der er kystnært placeret, at være konservative i forhold til at beskrive en fortynding af en fluxpåvirkning, der er mere jævnt fordelt over hele indsatsområdet på land, som er tilfældet i nærværende vurdering.

Tabel 3-1: Fortyndingsvolumener estimeret for rolige forhold og høj strøm baseret på MIKE 3 simulering af havvandskoncentrationer for Himmarn Strand i Notat om spredning af opsivende forurening⁹.

	Rolige forhold	Høj strøm
Samlet flux af vinylchlorid (g/år)	171	171
Gennemsnitlig dybdemidlet koncentration (kystnært) (µg/l)	0,0016	0,001
Fortyndingsvolumen (m ³ /år)	106.875.000	170.000.000

⁸ Rambøll (2023): *Himmarn Strand – spredning af opsivende forurening*. Notat.

⁹ Himmarn Strand. Spredning af opsivende forurening. Notat. Rambøll 2023. Bilag 19.



Figur 3-1: Gennemsnitlig dybdemidlet koncentration af vinylchlorid i den simulerede periode, der repræsenterer rolige strøm- og vandstandsforhold. Grøn streg markerer ålegræsområder, cyan streg er stenrev. Udtrækspunkter for koncentrationstidsserier er ligeledes vist. ¹⁰

4 Estimerede fluxe fra sandfyld og resulterende havvandskoncentrationer

De estimerede fluxe og havvandskoncentrationer samt miljøkvalitetskriterier (MKK) for havvandet ses af Tabel 4-1 (klorerede ethener og kulbrinter) samt Tabel 4-2 (metaller og PAH'er).

Det ses, at de resulterende havvandskoncentrationer for klorerede ethener er langt under MKK. For kulbrinter er der ikke et miljøkvalitetskriterium for overfladevand. De beregnede havvandskoncentrationer er dog langt under grundvandskvalitetskriteriet på 9 µg/l.

¹⁰ Himmark Strand. Spredning af opsvivende forurening. Notat. Rambøll 2023. Bilag 19.

Tabel 4-1: Estimerede fluxe og havvandskoncentrationer for kulbrinte fraktioner og klorerede ethener, PCE (tetrachlorethen), TCE (trichlorethen), 1,2-DCE (1,2-dichlorethen (cis og trans) og VC (vinylchlorid).

Stof	Jordkoncentration (Jordkvalitetskriteriet)	Adsorptionskoefficient, K_d	Estimeret porevandskoncentration	Diffusionskoefficient i vand (10°C)	Estimeret diffusiv stofflux til havet gennem 1 m sand	Estimeret gennemsnitlig havvandskoncentration, rolige forhold	Estimeret gennemsnitlig havvandskoncentration høj strøm	Generelt MKK ¹¹
Stof	mg/kg TS	l/kg	mg/l	m^2/s	g/år	$\mu\text{g}/\text{l}$	$\mu\text{g}/\text{l}$	$\mu\text{g}/\text{l}$
C6-C10	25		1,0	7,03E-10	283	0,0026	0,0017	Intet kriterie
C10-C15	40		0,10	6,29E-10	25	0,00024	0,00015	
C15-C20	55		0,10	5,15E-10	21	0,00019	0,00012	
C20-C35	100		0,10	4,47E-10	18	0,00017	0,00011	
PCE	5	0,869	4,25	5,83E-10	997	0,0093	0,0058	10
TCE	5	0,083	12,76	6,55E-10	3368	0,032	0,020	10
1,2-DCE	5	0,022	15,13	7,62E-10	4646	0,044	0,027	0,68
VC	0,4	0,012	1,25	9,50E-10	477	0,0045	0,0028	0,05

For metaller og PAH ses det ligeledes, at de beregnede havvandskoncentrationer er under MKK for alle stoffer. For bly, zink og arsen overskrider de i forvejen forekommende koncentrationer (IFFK) i vandområdet MKK. Bidraget fra sandfyldet er dog beregnet til at være under 1% af MKK, hvorfor påvirkningen ikke vurderes væsentlig jf. Miljøstyrelsens FAQ43. IFFK for øvrige stoffer i Tabel 4-2 er ikke overskredet i vandområdet¹. I dette tilfælde vurderes påvirkningen som væsentlig, hvis den er over 5% af MKK (jf. Miljøstyrelsens FAQ43). Dette er dog kun tilfældet for benz(a)pyren, hvor den estimerede stigning i havvandskoncentrationen svarer til 12,6% af MKK. For de resterende metaller og dibenzo(a,h)antracen estimeres en koncentrationsstigning fra 0-1,1% af MKK. Da vurderingen tager udgangspunkt i at koncentrationerne af sandet maksimalt er lig med de i forvejen forekommende koncentrationer i sedimentet, vil påvirkningen ikke medføre en forværring for vandområdet.

Tabel 4-2: Estimerede fluxe og havvandskoncentrationer for metaller og PAH'er baseret på koncentrationer for sand 1. MKK inkl. baggrundskoncentration samt i forvejen forekommende koncentrationer (IFFK) er fra ansøgning om udledningstilladelse (bilag 18). IFFK der overskrider MKK er markeret med rød skrift.

Stof	Krav til jordkoncentration svarende til IFFK for sediment	Adsorptionskoefficient, K_d , marint sediment	Estimeret porevandskoncentration	Estimeret stofflux til havet	Estimeret gennemsnitlig havvandskoncentration, rolige forhold	Estimeret gennemsnitlig havvandskoncentration, høj strøm	I forvejen forekommende koncentrationer i vandområdet	Generelt MKK ¹¹ *inkl. baggrundskoncentration
Stof	mg/kg TS	l/kg	$\mu\text{g}/\text{l}$	g/år	$\mu\text{g}/\text{l}$	$\mu\text{g}/\text{l}$	$\mu\text{g}/\text{l}$	$\mu\text{g}/\text{l}$
Bly (Pb)	31	154882	00,20	26	0,0002	0,0001	3,08	1,3
Cadmium (Cd)	0,8	130000	0,006	0,79	7,36E-06	4,60E-06	0,14	0,2
Chrom total (Cr)	62,9	120000	0,52	67	0,0006	0,0004	1,01	3,4
Kobber (Cu)	29,9	24409	1,2	157	0,0015	0,0009	< 3	1,5*
Nikkel (Ni)	26,4	7079	3,7	477	0,0045	0,0028	Ingen data	8,6
Zink (Zn)	142	110000	1,3	165	0,0015	0,0010	22,1	8,8
Barium (Ba)	537	3478	154	19730	0,185	0,115	17,45	55,8*
Cobolt (Co)	14,7		16,9	2156	0,02	0,01	< 1,5	1,78*
Arsen (As)	16,4	6607	2,5	317	0,003	0,002	2,06	1,6*
Benz(a)-pyren	0,149	8318	0,017	2,3	2,14E-05	1,34E-05	< 0,03	1,70E-04
Dibenz(a,h)-antracen	0,0341	50119	0,00068	0,09	8,14E-07	5,08E-07	< 0,03	1,40E-04

¹¹ Bekendtgørelse om fastlæggelse af miljømål for vandløb, søer, overgangsvande, kystvande og grundvand. BEK nr 796 af 13/06/2023

5 Påvirkning af sediment

Da metaller og PAH'er har potentiale for at ophobes i sediment, er det vurderet hvorledes de estimerede stoffluxe af stofferne kan påvirke omkringliggende sedimenter. Dette er gjort ud fra en antagelse om at fluxen spredes ud til et areal på 2.000.000 m², og er svarende til arealet anvendt i ansøgningen om udledningstilladelse (bilag 18). Dette svarer til et areal med en længde på 2,5 km langs kysten og en bredde på 800 m ud fra kysten, og svarer til at fluxen fra forureningen vil spredes ca. 500 m i hver retning i forhold til det eksisterende indsatsområde. Det er på denne baggrund estimeret hvordan fluxen vil påvirke koncentrationen i de øverste 5 cm af sedimentet. Resultaterne ses i Tabel 5-1. Det ses, at de beregnede stigninger i sedimentkoncentrationen for alle stoffer er under 1% af sedimentkriteriet, hvorfor de ikke vurderes at være væsentlige jf. Miljøstyrelsens FAQ43 og 51.

Tabel 5-1: Estimerede stoffluxe, i forvejen forekommende koncentrationer (IFFK) og beregnede koncentrationsstigninger i sediment. Såfremt IFFK overskrider sediment MKK er de markeret med rød skrift.

Stof	Estimeret stofflux til havet g/år	I forvejen forekommende koncentration mg/kg TS	Beregnet koncentrationsstigning i sediment mg/kg TS	Resulterende koncentration i sediment mg/kg TS	Sediment MKK/SKK/PNEC ¹⁾ mg/kg TS	Stigning i % af MKK
Bly (Pb)	26	31	0,00018	31,00	163	0,0001%
Cadmium (Cd)	0,79	0,8	0,0000054	0,80	3,8	0,0001%
Chrom total (Cr)	67	62,9	0,000	62,90	9,2	0,00%
Kobber (Cu)	157	29,9	0,00	29,90	64	0,00%
Nikkel (Ni)	477	26,4	0,0033	26,40	23,8	0,01%
Zink (Zn)	165	142	0,0011	142,00	49	0,002%
Barium (Ba)	19730	537	0,135	537,14	130	0,10%
Cobolt (Co)	2156	14,7	0,015	14,715	Ingen data tilgængelig	
Arsen (As)	317	16,40	0,0022	16,40	0,4	0,54%
Benz(a)-pyren	2,3	0,149	1,57E-05	0,149	0,007	0,22%
Dibenz(a,h)antracen	0,09	0,0341	5,97E-07	0,0341	0,0636	0,0009%

¹⁾ For Pb og Cd er der angivet sedimentkriterier fra BEK 796 ¹¹. For Cr, As og benz(a)pyren er der tale om sedimentkriterier (SKK) fra Miljøstyrelsen. For Cu og Zn er der anvendt sedimentkriterier fra Norge, og for Ba er kriteriet fra Canada. For Dibenzo(a,h)antracen er der tale om en PNEC-værdi fra Norman Ecotoxicology database. De anvendte sedimentkriterier svarer til kriterierne angivet i ansøgningen om udledningstilladelse (Bilag 18).