

## Himmark Strand

Oversigt over estimerede nuværende fluxe af forurening til havet, samt fluxe fra forurening efterladt efter afvæрге

Projekt navn **Himmark Strand - Granskning og tilpasning**  
Projekt nr. **11100048603**  
Modtager **Region Syddanmark**  
Dokumenttype **Notat**  
Version **1.0**  
Dato **11.11.2025**  
Udarbejdet af **GILS**  
Kontrolleret af **METC**  
Godkendt af **GILS**

## Indhold

1.	Indledning og formål med notat	2
2.	Nuværende flux til havet af kulbrinter og klorerede ethener	2
2.1	Nuværende fluxe af klorerede ethener (PCE, TCE, cis-DCE og VC)	3
2.2	Nuværende fluxe af kulbrinter	5
3.	Flux af kulbrinter og klorerede ethener fra forurening efterladt efter afvæрге	6
3.1	Flux af klorerede ethener efter afvæрге	6
3.2	Flux af kulbrinter efter afvæрге	8
4.	Samlet flux til havet efter afvæрге og estimat af havvandskoncentrationer	10
5.	Opsummering af beregnede fluxe før og efter afvæрге	12
6.	Usikkerheder ved fluxberegninger	12
7.	Referencer	13

## Bilagsliste

### BILAG 1

Nuværende flux til havet fra forurening indenfor indsatsområder

### BILAG 2

Antagelser vedr. diffusionsberegninger af DCE fra intakt ler til havet (flux 1)

## 1. Indledning og formål med notat

Formålet med dette notat, er at give et overblik over de estimerede fluxe af forurening til havet ved Himmark strand dels før oprensning af forureningen og dels efter oprensningen af forureningen. Der er fokuseret på klorerede ethener (PCE, TCE, DCE og VC) samt kulbrinter. Fluxen inden oprensning er tidligere estimeret i forbindelse med ansøgning om udledningstilladelse /1/. Fluxe fra efterladt forurening i det intakte lerlag under indsatsområderne er tidligere estimeret i /3/ og /4/ med fokus på vinylchlorid (VC). Der er i forbindelse med nærværende notat udført supplerende beregninger af fluxen af cis-DCE fra efterladt forurening i det intakte lerlag samt supplerende beregninger af de nuværende fluxe. I forbindelsen med Miljøkonsekvensvurderingen /5/, blev det estimeret, hvilke fluxbidrag til havet, som kan stamme fra sandopfyld efter afgravningen.

I dette notat estimeres de samlede fluxe af klorerede ethener og kulbrinter før og efter afværge, og det estimeres yderligere, hvilke koncentrationer i havvandet de estimerede fluxe efter afværge kan give anledning til. Notatet har desuden til formål at diskutere usikkerheden af de beregnede fluxe.

## 2. Nuværende flux til havet af kulbrinter og klorerede ethener

Den nuværende flux  $J_{samlet}$  (g/år) til havet af klorerede ethener og kulbrinter er i miljøkonsekvensrapporten for afværge ved Himmark strand /5/ estimeret på baggrund af gennemsnittet af målte forureningskoncentrationer i havvand ud for kysten ganget med fortyndingsvoluminer ( $Q$ ) fra DHI's Dashboard model:

$$J_{samlet} = C_{havvand} \cdot Q$$

Der er i /5/ ligeledes beregnet en nuværende flux til havet baseret på gennemsnitlige koncentrationer i grundvand ( $C_{sandmagasin}$ ), tværsnitsarealet af forureningsfanen samt darcy fluxen i grundvandet:

$$J_{fra\ land} = C_{sandmagasin} \cdot d \cdot B \cdot K \cdot i$$

Hvor  $d$  er dybden af forureningsfanen,  $B$  er bredden af fanen vinkelret på strømningsretningen,  $K$  er den hydrauliske konduktivitet og  $i$  den hydrauliske gradient af grundvandsmagasinet.

DHI's Dashboard model beskriver hvilke fortyndinger, der forventes kystnært for en punktudledning langs kysten. Udledningen fra Himmark Strand kan ikke betegnes som en punktudledning, da der forventes at ske udsivning langs hele kyststrækningen indenfor de to indsatsområder. Ligeledes forventes det, at der også vil være bidrag til havvandet fra forurening i havbunden. Ved anvendelse af DHI's fortyndingsfaktorer antages således at hele forureningsfluxen udledes i ét punkt langs kysten. Det må på den baggrund forventes, at fortyndingen underestimeres ved brug af denne fremgangsmåde, idet der vil være større fortynding af en forureningsudledning, der foregår spredt ud over et større areal.

Der er i /6/ udført en lokalitetsspecifik simulering af forureningsspredning og -fortynding ved Himmark Strand vha. MIKE 3. Simuleringen er udført for vinylchlorid og beskriver situationen efter afværge af Himmark Strand, idet den simulerer de havvandskoncentrationer, der kan forventes som følge af udsivning fra forurening efterladt i det intakte lerlag, som ikke oprenses. Udsivningen af forureningen er i simuleringen forsøgt tilnærmet de faktiske forhold ved at udledningen sker i en række udsivningspunkter langs kysten, ligesom der også sker udsivning i en række punkter fordelt over indsatsområderne på havet. En beskrivelse af de anvendte udsivningspunkter og -størrelser ses af /4/. Den beregnede fortynding ved denne simulering forventes dermed i højere grad af afspejle den faktiske

situation ved Himmark Strand end fortyndingsfaktorerne fra DHI's Dashboard. Af denne årsag er der i dette notat lavet yderligere beregninger af de nuværende fluxe, der baserer sig på fortyndingsfaktorer fra MIKE 3 modellen. Der er valgt fortyndingsfaktorer, som beskriver minimums- og middelfortyndingen i et kystnært punkt. Der er anvendt fortyndingsfaktorer både for en situation med høj strøm og en situation med rolig strøm. De målte havvandskoncentrationer, som fluxberegningen tager udgangspunkt i, er ligeledes målt kystnært.

Samlet set er der således foretaget beregninger af den nuværende flux ud fra 3 forskellige tilgange, og i alt 8 varianter:

- **Flux estimeret ud fra gennemsnitlige havvandskoncentrationer og fortyndingsvoluminer fra DHI Dashboard**
  - Der er foretaget beregninger baseret på minimumsfortynding, 5% fraktil fortynding og middelfortynding fra DHI's Dashboard.
- **Flux estimeret ud fra gennemsnitlige havvandskoncentrationer og fortyndingsvoluminer fra lokalitetsspecifik MIKE 3 simulering**
  - Der er foretaget beregninger baseret på minimumsfortynding med henholdsvis rolig og høj strøm samt middelfortynding med henholdsvis høj og rolig strøm
- **Flux til havet baseret på gennemsnitlige grundvandskoncentrationer på land**
  - Denne flux omfatter alene bidraget fra forurening på land, og omfatter således ikke bidraget fra forurening i havbunden.

### 2.1 Nuværende fluxe af klorerede ethener (PCE, TCE, cis-DCE og VC)

De nuværende fluxe af klorerede ethener estimeret ved de 8 fremgangsmåder ses af Figur 2-1 og er opsummeret i Tabel 2-1. Bemærk at der er tale om summen af de estimerede fluxe fra begge indsatsområder (nordlige og sydlige indsatsområde).

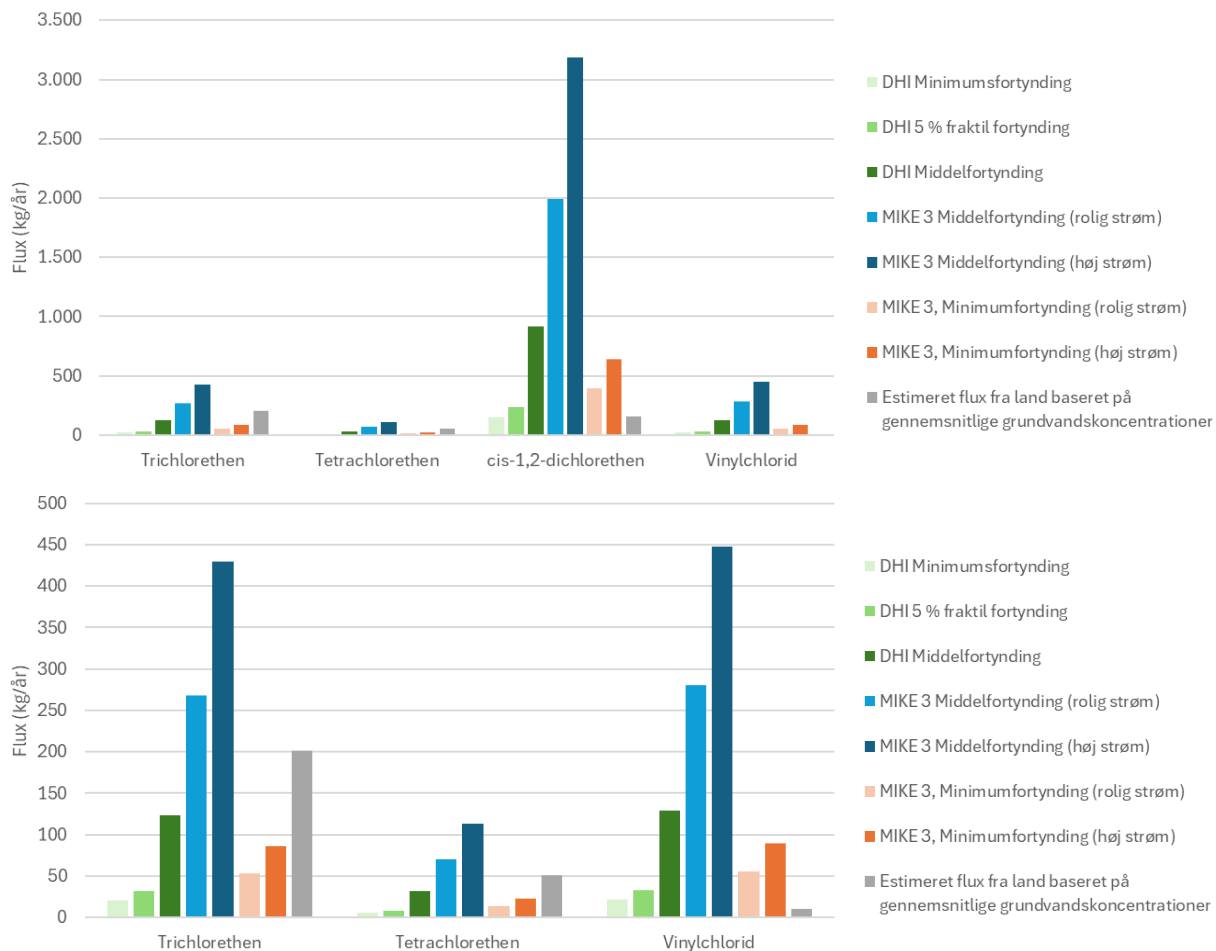
Som det ses af Figur 2-1, fås de højeste fluxe ved anvendelse af middelfortyndingerne fra MIKE 3, mens den tredjehøjeste flux beregnes på baggrund af middelfortyndingen fra DHI's Dashboard. For moderstofferne TCE og PCE beregnes den tredjehøjeste flux dog på baggrund af de gennemsnitlige grundvandskoncentrationer. De laveste stoffluxe beregnes baseret på DHI's minimumsfortynding efterfulgt af 5% fraktil fortynding fra DHI og dernæst de to minimumsfortyndinger fra MIKE 3 modellen. For vinylchlorid beregnes den laveste flux baseret på de gennemsnitlige vinylkoncentrationer i grundvandsmagasinet, da VC-koncentrationerne er lave her.

For vinylchlorid bestemmes en nuværende flux i intervallet 10-448 kg/år ved de otte fremgangsmåder. Den laveste flux er baseret på de gennemsnitlige grundvandskoncentrationer, mens den højeste flux er baseret på de gennemsnitlige havvandskoncentrationer og middelfortynding under høj strøm. Ses der alene på metoder, der er baseret på de gennemsnitlige havvandskoncentrationer samt en middel fortyndingsgrad bestemmes en flux i intervallet 129-448 kg/år.

En mere detaljeret oversigt over de estimerede fluxe, herunder fluxbidraget estimeret for hvert af de to indsatsområder, ses af Bilag 1.

Det vurderes, at fortyndingsfaktorer baseret på middelfortyndingerne giver det mest realistiske resultat for fluxen, mens minimumsfortyndingerne vil underestimere fluxen. Det vurderes desuden, at fortyndingsberegningerne baseret på MIKE 3 er mere realistiske end fortyndingsberegningerne baseret på DHI's Dashboard, da MIKE 3 simuleringen bedre afspejler den faktiske stedsmæssige fordeling af forureningspåvirkningen. Derudover beskriver MIKE 3 modellen også de aktuelle fysiske forhold bedre (dybde, vandgennemstrømning osv.)

Fluxene baseret på de gennemsnitlige grundvandskoncentrationer vurderes også at kunne underestimere fluxene, da denne beregning ikke tager højde for forureningsbidraget fra forurening i havbunden.



**Figur 2-1. Estimerede nuværende samlede fluxe (sydlige + nordlige indsatsområde) af TCE, PCE, cis-DCE og VC baseret på målte havvandskoncentrationer (kystnært) samt anvendelse af DHI's minimums-, 5% fraktil, og middelfortynding. Derudover er der anvendt middel- og minimumfortynding fra en lokalitetsspecifik MIKE 3 modellering for hhv. rolig og høj strøm. Der er desuden estimeret en flux til havet baseret på de gennemsnitlige grundvandskoncentrationer. Den nederste figur er en forstørrelse af den øverste figur, hvor cis-DCE er udeladt, så fluxen for de andre stoffer bedre kan ses.**

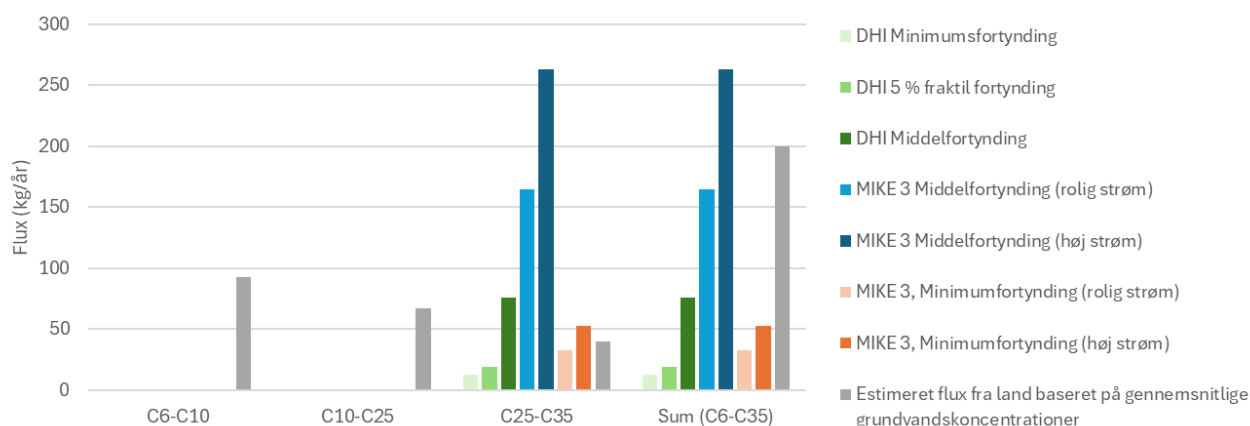
**Tabel 2-1. Resultat af samlet flux (kg/år) fra det sydlige og nordlige område indsatsområde estimeret dels ud fra fortynding fra DHI's Dashboard, dels fra fortynding fra lokalitetsspecifik MIKE 3 model, dels baseret på gennemsnitskoncentrationer i grundvand på land.**

Stofnavn	Samlet flux (kg/år), sydlige og nordlige område							
	Fortynding fra DHI Dashboard			Minimumsfortynding, MIKE 3		Middelfortynding, MIKE 3		Baseret på gennemsnitskoncentrationer i grundvand
	Minimumsfortynding	5% fraktil fortynding	Middelfortynding	Rolig strøm	Høj strøm	Rolig strøm	Høj strøm	
Trichlorethen	21	32	124	54	86	268	429	202
Tetrachlorethen	5,4	8,3	32	14	23	71	113	51
1,1-dichlorethen	0,2	0,3	1,1	0,4	0,7	2,1	3,4	0,3
trans-1,2-dichlorethen	0,5	0,8	3,1	1,5	2,1	7,5	12	0,3
cis-1,2-dichlorethen	152	234	915	398	637	1.990	3.184	159
Vinylchlorid	21	33	129	56	90	280	448	10
Samlet flux af klorerede ethener	201	308	1.205	524	838	2.618	4.190	423

## 2.2 Nuværende fluxe af kulbrinter

Der er ligeledes foretaget beregninger af den nuværende flux af kulbrinter. De samme fremgangsmåder, som for klorerede ethener er anvendt. De samlede fluxe fra det sydlige og det nordlige indsatsområde ses af Figur 2-2 og er opsummeret i Tabel 2-2.

Der gøres opmærksom på, at alle målte havvandskoncentrationer af kulbrinter ud for det sydlige indsatsområde er under detektionsgrænsen. De beregnede fluxe baseret på havvandskoncentrationer og fortyndingsfaktorer fra DHI eller MIKE 3 stammer derfor udelukkende fra det nordlige indsatsområde. I bilag 1 ses en mere detaljeret oversigt over de beregnede fluxe – herunder en opdeling i fluxe fra henholdsvis det sydlige og det nordlige indsatsområde.



**Figur 2-2. Estimerede nuværende samlede fluxe af C6-C10, C10-C25, C25-C36 og Sum (C6-C35) baseret på målte havvandskoncentrationer (kystnært) samt anvendelse af DHI's minimums-, 5% fraktil, og middelfortynding. Derudover er der anvendt middel- og minimumfortynding fra en lokalitetsspecifik MIKE 3 modellering for hhv. rolig og høj strøm. Der er desuden estimeret en flux til havet baseret på de gennemsnitlige grundvandskoncentrationer.**

**Tabel 2-2. Resultat af samlet flux (kg/år) af kulbrinter fra det sydlige og nordlige område indsatsområde estimeret dels ud fra fortynding fra DHI's Dashboard, dels fra fortynding fra lokalitetsspecifik MIKE 3 model, dels baseret på gennemsnitskoncentrationer i grundvand på land.**

Stofnavn	Samlet flux (kg/år), sydlige og nordlige område							
	Fortyning fra DHI Dashboard			Minimums-fortyning, MIKE 3		Middelfortyning, MIKE 3		Baseret på gennemsnits-koncentrationer i grundvand
	Minimums-fortyning	5% fraktil fortyning	Middel-fortyning	Rolig strøm	Høj strøm	Rolig strøm	Høj strøm	
C6-C10	0	0	0	0	0	0	0	93
C10-C25	0	0	0	0	0	0	0	67
C25-C35	12,6	19,3	76	165	263	33	53	39
Sum (C6-C35)	13	19	76	165	263	33	53	200

### 3. Flux af kulbrinter og klorerede ethener fra forurening efterladt efter afværge

I dette afsnit er der udarbejdet oversigter over de forskellige estimerede fluxe fra forurening, der efterlades efter afværge. Der er tale om tre forskellige fluxe:

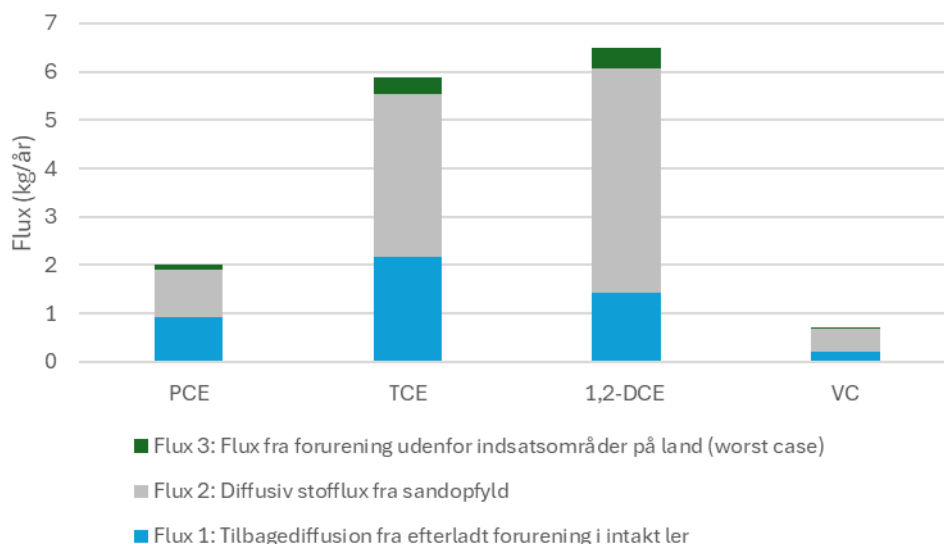
- Flux 1: Flux til havet fra forurening efterladt i intakt lerlag**  
 Der vil blive efterladt forurening i det intakte lerlag, som ligger under det sandlag der oprenses. Efter oprensning udlægges en halv meter ren ler inden der fyldes op med sand. Fluxen af forurening fra det intakte lerlag estimeres som en diffusionsstyret opadrettet flux gennem de 0,5 meter udlagt ler og de 2,5 m sandopfyld. Beregningsmetoden er beskrevet i /3/. Der er i forbindelse med nærværende notat udarbejdet supplerende diffusionsberegninger for DCE, da dette stof ikke var med i de oprindelige beregninger. Forudsætningerne for beregningerne, herunder den anvendte gennemsnitskoncentration af DCE i det efterladte lerlag, ses af bilag 2.
- Flux 2: Flux til havet fra sandopfyld på land og havbund efter afgravning af forurenede sand.** Efter afgravning af forurenede sand vil der blive genopfyldt med rent afgravet sand og tilkøbt rent sand. Fluxen er i /5/ bestemt på baggrund af en antagelse om, at der øverst på havbunden lægges 1 meter helt rent sand uden forurening (under detektionsgrænsen). Herunder lægges sand med koncentrationer svarende til jordkvalitetskriterierne for PCE, TCE og VC. For DCE antages sandet at have en koncentration på 5 mg/kg TS, hvilket er lavere end jordkvalitetskriteriet. Baseret herpå er der estimeret en diffusionsstyret flux til havet. Beregningsmetoden og de anvendte forudsætninger er beskrevet i /5/.
- Flux 3: Flux til havet fra forurening udenfor indsatsområder på land.** Udenfor indsatsområdet er der områder, som har lave niveauer af forurening, og som ikke renses op. Fluxen fra disse områder er estimeret i /2/, som også beskriver beregningsmetoden og forudsætningerne for beregningerne.

#### 3.1 Flux af klorerede ethener efter afværge

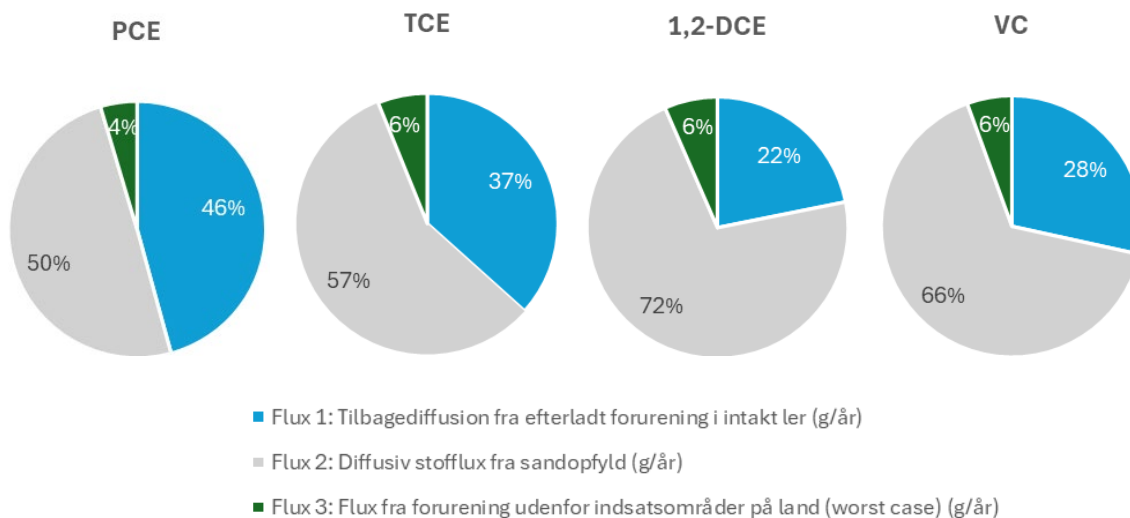
Figur 3-1 viser de estimerede fluxe af klorerede ethener efter afværge. Den højeste flux estimeres for DCE (6,5 kg/år), mens den laveste flux estimeres for VC (0,7 kg/år).

Det ses desuden, at den diffusive stofflux fra sandopfyld (flux 2) efterfulgt af tilbagediffusionen fra det intakte lerlag giver de største fluxbidrag. Bidraget fra forurening udenfor indsatsområder udgør en mindre andel (< 10%), som det også fremgår af de procentvise fordelinger på Figur 3-2. En mere detaljeret opgørelse ses af Tabel 3-1, der også angiver den beregnede flux for hvert af de to indsatsområder (nord og syd).

Det bemærkes, at der ved udførelsen af de supplerende diffusionsberegninger for DCE (flux 1) blev fundet en fejl i de tidligere beregninger af fluxene af PCE, TCE og VC. Således beregnes nu fluxe af PCE og TCE, der er ca. 30% højere end tidligere afrapporteret i /4/, mens fluxen for VC er ca. 20% højere end tidligere beregnet.



**Figur 3-1. Estimerede fluxe af klorerede ethener efter afværg (kg/år)**



**Figur 3-2. Procentvis fordeling af estimerede stoffluxe mellem tilbagediffusion fra efterladt forurening i intakt ler (flux 1), diffusiv stofflux fra sandopfyld (flux 2) og flux fra forurening udenfor indsatsområder på land (flux 3).**

**Tabel 3-1. Oversigt over beregnede fluxe til havet af klorerede ethener fra forurening efterladt efter afvæрге. Der er bereгnet en sum af alle fluxe.**

	Flux 1 Tilbagediffusion fra efterladt forurening i intakt ler (g/år)			Flux 2 Diffusiv stofflux fra sandopfyld (g/år)			Flux 3 Flux fra forurening udenfor indsatsområder på land <sup>2</sup> (g/år)			Flux 1 + Flux 2 + Flux 3 Samlet flux (g/år)		
	Syd	Nord	Syd + Nord	Syd	Nord	Syd + Nord	Syd	Nord	Syd + Nord	Syd	Nord	Syd + Nord
PCE	800	119	919	829	169	997	4,3	88	92	1.633	375	<b>2.008</b>
TCE	1.439	719	2.159	2.799	569	3.368	2,3	359	361	4.241	1.648	<b>5.888</b>
1,2-DCE <sup>1)</sup>	346	1.072	1.418	3.861	785	4.646	11	416	427	4.217	2.273	<b>6.490</b>
VC	148	57	206	397	81	477	24	16	40	569	154	<b>723</b>
Samlet flux, klorerede ethener	2.733	1.968	4.701	7.885	1.604	9.489	41	879	921	10.660	4.450	<b>15.110</b>

<sup>1)</sup> Flux 1 er bestemt for cis-1,2-DCE; flux 2 er bestemt for 1,2-DCE (cis og trans); flux 3 er bestemt for cis-1,2-DCE.

<sup>2)</sup> Fluxen fra det nordlige område vurderes at være en worst case flux, da den tager udgangspunkt i jordkoncentrationer, som er omregnet til porevandskoncentrationer. Denne metode vil typisk overestimere fluxen. Der er for VC desuden delvist taget udgangspunkt i jordkoncentrationer under detektionsgrænsen. Koncentrationerne er her sat til den halve detektionsgrænse jf. /2/.

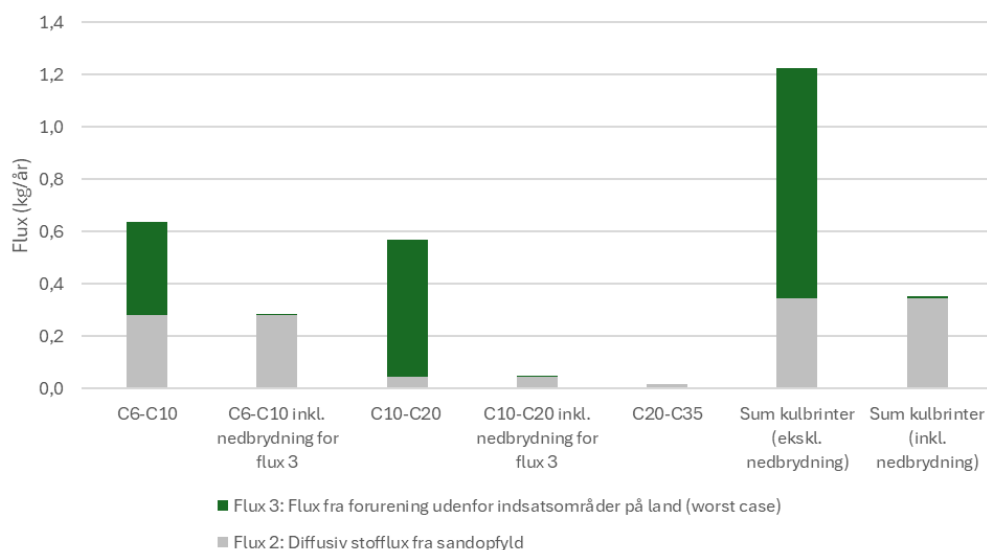
### 3.2 Flux af kulbrinter efter afvæрге

Figur 3-3 viser de estimerede fluxe af kulbrinter efter afvæрге, og resultaterne er opsummeret i Tabel 3-2.

Der gøres opmærksom på, at der for kulbrinter ikke er foretaget en beregning af den potentielle tilbagediffusion fra kulbrinteforurening efterladt i lerlaget (flux 1). Bidraget herfra fremgår derfor ikke af Figur 3-3 og Tabel 3-2. Da kulbrinterne sorberer til jorden i højere grad end de klorerede ethener, vil der være om en meget lang tidshorisont før de diffunderer gennem det udlagte lerlag. Der vil derfor være et stort potentiale for nedbrydning under denne transport, hvorfor bidraget til havet vurderes at være af mindre betydning.

Det bemærkes desuden, at det for fluxen fra forurening efterladt udenfor indsatsområder er foretaget et estimat af fluxen både uden og med nedbrydning af kulbrinter. Da forureningen er placeret i en vis afstand fra havet, og har en høj retardation grundet sorption og dermed en lang transporttid, vurderes det, at der vil være et væsentligt nedbrydningspotentiale under transporten til havet jf. /5/. Der er anvendt en konservativ nedbrydningsrate, der repræsenterer nedbrydning under anaerobe forhold. Som det ses af Figur 3-3, udgør forurening efterladt udenfor indsatsområder et større bidrag til fluxen end den diffusive flux fra sandfyld. Såfremt nedbrydning inkluderes i vurderingen, vil fluxen fra forurening udenfor indsatsområder reduceres betydeligt, og ikke længere udgøre et væsentligt bidrag til fluxen af kulbrinter til havet. Således beregnes en samlet flux af sum af kulbrinter efter afvæрге på 1,2 kg/år, når der ikke tages højde for afvæрге og på 0,3 kg/år når der tages højde for nedbrydning.

Detaljerede beregningsresultater, der viser bidragene fra henholdsvis det nordlige og sydlige delområde ses af Bilag 1.



**Figur 3-3. Estimerede fluxe af kulbrinter efter afværge (kg/år). Bemærk at fluxen fra tilbagediffusion fra lerlaget (flux 1) ikke er beregnet for kulbrinter.**

**Tablet 3-2. Oversigt over beregnede fluxe til havet af kulbrinterforurening efterladt efter afværge.**

	Flux 1 Tilbagediffusion fra efterladt forurening i intakt ler (g/år)			Flux 2 Diffusiv stofflux fra sandopfyld (g/år)			Flux 3 Flux fra forurening udenfor indsatsområder på land (g/år)			Flux 2 + Flux 3 Samlet flux ekskl. tilbagediffusion fra intakt ler (g/år)		
	Syd	Nord	Syd + Nord	Syd	Nord	Syd + Nord	Syd	Nord	Syd + Nord	Syd	Nord	Syd + Nord
C6-C10	Ikke beregnet, vurderes af mindre betydning			235	48	283	198	156	353	198	156	<b>637</b>
C6-C10 inkl. nedbrydning <sup>1)</sup>				235	48	283	1,4	0	1,4	237	48	<b>284</b>
C10-C20				38	7,8	283	499	23	523	538	31	<b>569</b>
C10-C20 inkl. nedbrydning <sup>1)</sup>				38	7,8	46	3,5	0	3,5	42	7,8	<b>50</b>
C20-C35				15	3,0	18	Vurderet neglignibel			15	3,0	<b>18</b>
Sum kulbrinter C6-C35 (ekskl. nedbrydning)				289	59	347	697	179	876	986	238	<b>1223</b>
Sum kulbrinter C6-C35 (inkl. nedbrydning) <sup>1)</sup>				289	59	347	5	0	5	294	59	<b>352</b>

<sup>1)</sup> Nedbrydning er inkluderet for forurening udenfor indsatsområder, da der her er en vis transportafstand, og dermed opholdstid, inden forureningsfanen rammer havet.

<sup>2)</sup> Den estimerede flux af C6-C10 tager delvist udgangspunkt i jordkoncentrationer under detektionsgrænsen. Koncentrationerne er her sat til den halve detektionsgrænse jf. /2/.

#### 4. Samlet flux til havet efter afværgelse og estimat af havvandskoncentrationer

Den samlede flux til havet er estimeret baseret på de tre beregnede fluxe, der repræsenterer henholdsvis en diffusionsstyret flux fra det intakte ler gennem udlagt ler og sand til havet, en diffusionsstyret flux fra sandfyld med lavt indhold af forurening gennem 1 meter sandfyld uden indhold af forurening, samt flux via grundvandet fra forurening efterladt udenfor indsatsområderne på land.

For de diffusionsstyrede fluxe, er fluxen estimeret som steady state fluxen, som betegner den maksimale flux, der opnås, når fluxen har fået fuldt gennembrud. Forureningen der efter afværgelse befinder sig i det intakte ler, skal således først diffundere gennem et 0,5 m tykt lerlag og derefter et ca. 2,5 meter tykt sandlag inden det når havvandet. Dette vurderes at tage årtier jf. /3/. Forureningen der befinder sig udenfor indsatsområderne, vil også have en vis transporttid inden havvandet nås, især hvad angår kulbrinter, der sorberes til jordpartiklerne i højere grad end de klorerede ethener. De klorerede ethener vil til gengæld have en mere begrænset transporttid til havet, da de kun tilbageholdes i begrænset omfang som følge af sorption.

Der er derfor tale om en worst case betragtning, når alle tre fluxe lægges sammen, idet dette forudsætter, at de alle er på deres maksimale niveau samtidigt.

For at estimere hvilke havvandskoncentrationer, som den beregnede samlede flux efter afværgelse vil give anledning til, er der anvendt de gennemsnitlige fortyndingsfaktorer fra den udførte MIKE 3 modellering. Det er valgt at tage udgangspunkt i MIKE 3 simuleringen, fordi denne bedre afspejler de faktiske lokalitetsspecifikke forhold, idet forureningsudsivningen her er fordelt langs med kysten ud for de to indsatsområder, ligesom den også inkluderer forureningsudsivning fra havbunden.

De resulterende havvandskoncentrationer baseret på de samlede fluxe af PCE, TCE, DCE og VC ses af Tabel 4-1. Det ses, at alle beregnede havvandskoncentrationer er under miljøkvalitetskravene (MKK) samt badevandskriterierne for stofferne. Der er på baggrund af det laveste kriterium (MKK eller badevandskriterium) for hvert stof samt fortyndingsfaktorerne fra MIKE 3 beregnet en "tåleflux" for hvert af stofferne. Tålefluxen betegner den maksimale flux, der kan tillades uden at hverken MKK eller badevandskriterierne er overskredet. Der er for hvert stof ligeledes beregnet, hvilken faktor der er fra den estimerede flux og op til tålefluxen. Det ses, at der for især PCE, men også for TCE er en meget høj faktor op til tålefluxen. For PCE vil der således kunne være en flux til havet, der er 530-850 gange større før den bliver kritisk i forhold til kriterierne, og for TCE vil fluxen kunne være 60-100 gange højere. Intervallet for tålefluxen er fremkommet ved, at der dels er anvendt fortyndingsfaktorer fra MIKE 3 under høj strøm, og dels er anvendt fortyndingsfaktoren under rolig strøm. For DCE ses fluxen at være en faktor 11-18 under tålefluxen, mens den for VC er en faktor 7-12 under tålefluxen.

**Tabel 4-1. Samlet flux (kg/år) af PCE, TCE, DCE og VC til havet efter afværg, samt estimerede havvandskoncentrationer (µg/l) baseret på middelfortynding fra MIKE 3 modellering under hhv. rolige forhold og høj strøm. Der er desuden estimeret et interval for en "tåleflux", som beskriver den maksimale flux der kan tillades under hhv høj strøm og rolig strøm uden at MKK overskrides.**

	Samlet flux til havet (kg/år)	Estimeret havvandskoncentration, rolige forhold (µg/l)	Estimeret havvandskoncentration høj strøm (µg/l)	MKK (µg/l)	Badevands-kriterium (µg/l)	Tåleflux (kg/år)	Faktor op til tåleflux
PCE	2,0	0,0188	0,0117	10	-	1070-1700	530-850
TCE	5,9	0,0551	0,0344	10	3,5	375-600	60-100
DCE	6,5	0,0607	0,0380	0,68	540	73-116	11-18
VC	0,72	0,0068	0,0042	0,05	0,3	5,3-8,5	7-12

Tabel 4-2 opsummerer de beregnede samlede fluxe af kulbrinter fordelt på fraktionerne C6-C10, C10-C20 og sum af kulbrinter C6-C35. Som det ses af tabellen, er der for fraktionerne C6-C10 og C10-C20 foretaget estimerer både uden og med nedbrydning. Dette skyldes, at der for fluxen fra forurening udenfor indsatsområderne (flux 3) er en vis transporttid før forureningen når havvandet. Der vil derfor være mulighed for nedbrydning under denne transport. Der er ved fluxberegningen for flux 3 udelukkende regnet på fluxen af fraktionerne C6-C10 og C10-C20, mens det er vurderet at fraktionen C20-C35 ikke vil transporteres til havet grundet den meget store retardation som følge af sorption og dermed meget lille mobilitet jf. Tabel 3-2.

Baseret på de samlede fluxe er det estimeret hvilke havvandskoncentrationer, der opnås af de tre kulbrintefraktioner samt sum af kulbrinter. Som det ses af Tabel 4-2 estimeres havvandskoncentrationer for sum af kulbrinter på maksimalt 0,007 µg/l. Der er ikke noget miljøkvalitetskrav for overfladevand for kulbrinter, men sammenlignet med grundvandskvalitetskriteriet på 9 µg/l vurderes den efterladte forurening udenfor indsatsområder samt fra sandopfyld ikke at udgøre en risiko for havvandet.

**Tabel 4-2. Samlet flux til havet (g/år) af kulbrinter efter afværg samt estimerede havvandskoncentrationer (µg/l) baseret på middelfortynding fra MIKE 3 modellering under hhv. rolige forhold og høj strøm.**

	Samlet flux til havet (g/år)	Estimeret havvandskoncentration, rolige forhold (µg/l)	Estimeret havvandskoncentration høj strøm (µg/l)	Grundvandskvalitetskriterium (µg/l)
C6-C10 ekskl. nedbrydning	637	0,0060	0,0037	-
C6-C10 inkl. nedbrydning <sup>1)</sup>	284	0,0027	0,0017	-
C10-C20 ekskl. nedbrydning	569	0,0053	0,0033	-
C10-C20 inkl. nedbrydning <sup>2)</sup>	50	0,0005	0,0003	-
C20-C35	18	0,0002	0,0001	-
Sum kulbrinter C6-C35 ekskl. Nedbrydning	1223	0,0114	0,0072	9
Sum kulbrinter C6-C35 inkl. nedbrydning <sup>1)</sup>	352	0,0033	0,0021	9

<sup>1)</sup> Nedbrydning er kun inkluderet for den forurening, der ligger udenfor indsatsområderne på land (flux 3)

## 5. Opsummering af beregnede fluxe før og efter afvæрге

I Tabel 5-1 er der lavet en sammenligning af fluxstørrelserne (kg/år) estimeret før og efter afvæрге af forureningen ved Himmark Strand. I tabellen er det valgt at repræsentere fluxen før afvæрге på beregningerne, der anvender fortyndingsfaktorer fra MIKE 3 simuleringen, da denne bedste repræsenterer den faktiske rumlige udbredelse af forureningspåvirkningen, og dermed vurderes at give mere pålidelige resultater end fortyndingsfaktorerne fra DHI Dashboard. De angivne intervaller for fluxen før afvæрге er beregnet ud fra middelfortynding under henholdsvis rolige forhold og forhold med høj strøm. Det vurderes, at middelfortyndingen bedre beskriver de gennemsnitlige forhold over året end minimumsfortyndingen. Derfor er denne anvendt.

**Tabel 5-1. Samlet flux til havet (g/år) af kulbrinter samt estimerede havvandskoncentrationer (µg/l) baseret på middelfortynding fra MIKE 3 modellering under hhv. rolige forhold og høj strøm.**

	Nuværende flux, før afvæрге (kg/år)	Flux efter afvæрге (kg/år)
PCE	270-430	2,0
TCE	71-113	5,9
Cis-DCE	1.990-3.180	6,5
VC	280-450	0,7
Sum C6-C35 ekskl. nedbrydning <sup>1)</sup>	33-53	1,2
Sum C6-C35 inkl. nedbrydning <sup>1)</sup>	Ikke vurderet	0,3

<sup>1)</sup> Bemærk at den potentielle tilbagediffusion af kulbrinter fra forurening efterladt i det intakt lerlag til havvandet ikke er estimeret og derfor ikke indgår de beregnede fluxe efter afvæрге.

## 6. Usikkerheder ved fluxberegninger

De udførte fluxberegninger må forventes at være behæftet med en væsentlig usikkerhed grundet kompleksiteten af forureningssituationen på lokaliteten med forurening fordelt over store arealer både på land og under havbunden. Usikkerhederne kan overordnet set karakteriseres som *konceptuelle* usikkerheder og *parameterusikkerheder*.

Parameterusikkerheder omfatter eksempelvis antagelser omkring hvor stor en andel af PCE og TCE, der omdannes til vinylchlorid via anaerob deklorering. For den efterladte forurening i det intakte lerlag er det antaget at 10% af PCE og TCE omdannes til vinylchlorid, og det antages at vinylchlorid ikke nedbrydes videre. For DCE er det antaget, at 20% af PCE og TCE omdannes til cis-DCE. Der er antaget en større omdannelsesgrad til DCE baseret på forholdene på lokaliteten, hvor DCE generelt er fundet i høje koncentrationer i grundvand og havvand (jf. Tabel 7-2 og Tabel 7-3 i Bilag 1). For sandopfyldet er det antaget, at der ikke sker omdannelse af TCE og PCE til DCE eller VC. Dette skyldes, at sandfyldet i forbindelse med afgravning og genindbygning vil blive iltet, og betingelserne for anaerob reaktiv deklorering vurderes derfor at være dårlige. For forurening beliggende udenfor indsatsområder er det heller ikke antaget, at der sker en yderligere omdannelse til DCE og VC, men at de målte koncentrationer i grundvandet udtrykker den forventede fordeling af stofferne også fremadrettet.

Generelt er fluxberegningerne udført som relativt grove estimater baseret på gennemsnitskoncentrationer og gennemsnitsdata hvad angår f.eks. hydrauliske konduktiviteter, gradienter og foc-værdier. Således er der en vis usikkerhed på beregninger af de forskellige delfluxe. Ved beregningen af fluxen fra sandfyld (flux 2) er det antaget, at koncentrationerne er lig med jordkvalitetskriterierne for tilbagefyldt sand placeret nederst på havbunden. Dette er en worst case antagelse, da gennemsnitskoncentrationen i sandfyldet forventes at være lavere.

Den udførte afværgeindsats indebærer en afgravning af grundvandsmagasinet ned til den intakte ler. Herefter udlægges først 0,5 m ler, hvorefter sandmagasinet retableres ved udlægning af rent internt sand fra lokaliteten samt tilført sand fra sandsugning/grusgrav. Denne proces forventes at kunne have indflydelse på grundvandets strømningshastighed og strømningsretning. Grundvand opstrøms for de to indsatsområder vil muligvis til dels strømme udenom det retablerede grundvandsmagasin, som følge af den lave permeabilitet i de 0,5 m ler nederst i magasinet. Der tages ikke højde for disse potentielle ændringer af grundvandsflowet efter afværge. Således vil det blive anvendt hydraulisk ledningsevne og gradienter, samt dybder af grundvandsmagasinet baseret på de eksisterende forhold inden afværge.

De anvendte fortyndingsfaktorer fra MIKE 3 simuleringen udført i /6/ vurderes at være de bedst tilgængelige fortyndingsfaktorer til at beregne VC koncentrationerne i havvand efter afværge. Dette skyldes, som tidligere nævnt, at de bedre afspejler den specifikke forureningsituation end fortyndingsfaktorer fra DHI's Dashboard. Det skal dog bemærkes, at simuleringen udelukkende er udført for udsivningen af VC fra det intakte lerlag, og derfor har en samlet mindre forureningsudsivning og fordeling end hvis alle de tre tilbageværende fluxe var inkluderet. Det vurderes dog, at fordelingen af fluxen stemmer meget bedre overens med virkeligheden, end hvis der antages udledning fra et enkelt punkt, hvilket er forudsætningen i DHI's fortyndingsfaktorer. Fortyndingsfaktoren fra den udførte simulering er skaleret således, at de stemmer overens med de højere fluxe, der udover fluxen fra lerlaget (flux 1) også inddrager fluxen fra sandfyld (flux 2) og flux udenfor indsatsområder (flux 3).

I forhold til den konceptuelle usikkerhed, så vurderes en af de største usikkerheder, at være, om der sker en væsentlig udsivning fra havbunden via opadrettet advektiv transport i et større område end antaget. I de udførte beregninger er fluxen fra forurening i havbunden udelukkende estimeret som en diffusionsstyret flux. Inde ved kysten antages det dog, at udsivningen fra land sker som en advektionsstyret flux via grundvandet. Det er dog usikkert, om der i højere grad sker en advektionsstyret opadrettet flux fra havbunden, og om fluxen fra havbunden derfor er underestimeret.

En anden konceptuel usikkerhed er, at de estimerede fluxe fra lerlaget og sandfyldet vil påvirke hinanden. Beregningen af diffusionen fra det intakte lerlag op igennem det udlagte rene ler og sand, antager at disse lag er uforurenede til start. Idet sandfyldet kan indeholde lave niveauer af forurening (under jordkvalitetskriterierne) kan dette påvirke den opadrettede flux, da koncentrationsgradienten vil reduceres med en reduceret flux til følge. Det vurderes dog, at betydningen heraf er begrænset.

## 7. Referencer

- /1/ Oprensning ved Himmark Strand. Ansøgning om midlertidig udledningstilladelse til oppumpet grundvand og havvand. Region Syddanmark, april 2025. Bilag 8 Fluxberegninger.
- /2/ Himmark Strand. Flux fra forurening udenfor indsatsområder. Notat. Rambøll. Version 1.9 10-07-2025.
- /3/ Himmark Strand. Vurdering af betydning af tilbagediffusion efter afværge. Notat. Rambøll. Version 5.0. 09-08-2023.
- /4/ Himmark Strand – Input til MIKE 3 modellering af VC-koncentrationer i havvand efter afværge. Notat. Rambøll 2023.
- /5/ Oprensning af forurening på Himmark Strand. Miljøkonsekvensrapport (VVM) & Natura 2000 konsekvensvurdering. Region Syddanmark 23-05-2025. Bilag 16: Flux af forurening fra rent sand til havvand.
- /6/ Himmark Strand – Spredning af opsivende forurening. Notat. Rambøll. Version 1.0. 28-08-2023.

/7/ Peter Kjeldsen og Bo Lindhardt (1997) Simple Models for Predicting Vapour Migration in the Vadose Zone. Department of Environmental Science and Engineering. Technical University of Denmark.

## Bilag 1

Nuværende flux til havet fra forurening indenfor indsatsområder

## Nuværende flux af klorerede ethener fordelt på indsatsområder

I tabellerne nedenfor opsummeres fluxberegningerne for hvert indsatsområde (sydlige og nordlige område). Der er foretaget beregninger af den nuværende flux ud fra 3 forskellige tilgange, og i alt 8 varianter:

- **Gennemsnitlige havvandskoncentrationer og fortyndingsvoluminer fra DHI Dashboard** (Tabel 7-1)
  - Der er foretaget beregninger for middelfortynding, 5% fraktil fortynding og minimumsfortynding
- **Gennemsnitlige havvandskoncentrationer og fortyndingsvoluminer fra lokalitetsspecifik MIKE 3 simulering** (Tabel 7-2)
  - Der er foretaget beregninger for middelfortynding med henholdsvis høj og rolig strøm, samt for minimumsfortynding med henholdsvis høj og rolig strøm
- **Flux til havet baseret på gennemsnitlige grundvandskoncentrationer på land** (Tabel 7-3)

**Tabel 7-1. Gennemsnitkoncentrationer i havvand, samt estimeret samlet flux (kg/år) til havet af klorerede ethener baseret på fortyndingsfaktorer fra DHI's Dashboardmodel. Beregningen er foretaget henholdsvis for det nordlige og det sydlige indsatsområde. DG: Detektionsgrænse.**

Stofnavn	Middel havvands-koncentration (µg/l)		Flux (kg/år), Sydlige område			Flux (kg/år), Nordlige område		
	Syd	Nord	DHI, Minimums-fortynding	DHI, 5% fraktil fortynding	DHI, Middel-fortynding	DHI, Minimums-fortynding	DHI, 5% fraktil fortynding	DHI, Middel-fortynding
Trichlorethen	1,16	1,35	10	15	57	11	17	67
Tetrachlorethen	0,47	0,19	3,9	5,9	23	1,5	2,3	9,2
1,1-dichlorethen	0,02	< DG	0,2	0,3	1,1	0	0	0
trans-1,2-dichlorethen	0,03	0,04	0,2	0,3	1,3	0	0	1,8
cis-1,2-dichlorethen	10,9	7,72	89	137	535	63	97	380
Vinylchlorid	1,72	0,90	14	22	85	7,3	11	44

**Tabel 7-2. Gennemsnitkoncentrationer i havvand, samt estimeret samlet flux (kg/år) til havet af klorerede ethener baseret på fortyndingsfaktorer fra lokalitetsspecifik MIKE 3 simulering. Beregningen er foretaget henholdsvis for det nordlige og det sydlige indsatsområde. DG: Detektionsgrænse.**

Stofnavn	Middel havvandskoncentration (µg/l)		Flux (kg/år), Sydlige område				Flux (kg/år), Nordlige område			
	Syd	Nord	Minimums-fortynding, MIKE 3		Middel-fortynding, MIKE 3		Minimums-fortynding, MIKE 3		Middel-fortynding, MIKE 3	
			Rolig strøm	Høj strøm	Rolig strøm	Høj strøm	Rolig strøm	Høj strøm	Rolig strøm	Høj strøm
Trichlorethen	1,16	1,35	25	40	124	198	29	46	144	231
Tetrachlorethen	0,47	0,19	10	16	50	80	4,1	6,5	20	32
1,1-dichlorethen	0,02	< DG	0,4	0,7	2,1	3,4	0	0	0	0
trans-1,2-dichlorethen	0,03	0,04	0,6	1,0	3,2	5,1	0,9	1,4	4,3	6,8
cis-1,2-dichlorethen	10,9	7,72	233	373	1.165	1.864	165	264	825	1.320
Vinylchlorid	1,72	0,90	37	59	184	294	19	31	96	154

**Tabel 7-3. Gennemsnitkoncentrationer i grundvandsprøver på land samt estimerede fluxe (kg/år) fra land for klorerede ethener. Beregningen er foretaget for henholdsvis det nordlige og det sydlige indsatsområde.**

Stofnavn	Sydlige område			Nordlige område		
	Antal prøver	Middelkonc. grundvand (µg/l)	Flux (kg/år)	Antal prøver	Middelkonc. grundvand (µg/l)	Flux (kg/år)
Trichlorethen	51	17.501	46	41	25.630	156
Tetrachlorethen	51	10.080	27	41	4.080	25
1,1-dichlorethen	37	44,2	0,1	29	23,6	0,1
trans-1,2-dichlorethen	51	31,2	0,08	41	32,9	0,2
cis-1,2-dichlorethen	51	20.940	55	41	17.079	104
Vinylchlorid	51	632	1,6	41	1.393	8,5

## Nuværende flux af kulbrinter fordelt på indsatsområder

I tabellerne nedenfor opsummeres fluxberegningerne for hvert indsatsområde (sydlige og nordlige område). Der er foretaget beregninger af den nuværende flux ud fra 3 forskellige tilgange, og i alt 8 varianter:

- **Gennemsnitlige havvandskoncentrationer og fortyndingsvoluminer fra DHI Dashboard (Tabel 7-4)**
  - Der er foretaget beregninger for middelfortynding, 5% fraktil fortynding og minimumsfortynding
- **Gennemsnitlige havvandskoncentrationer og fortyndingsvoluminer fra lokalitetsspecifik MIKE 3 simulering (Tabel 7-5)**
  - Der er foretaget beregninger for middelfortynding med henholdsvis høj og rolig strøm, samt for minimumsfortynding med henholdsvis høj og rolig strøm
- **Flux til havet baseret på gennemsnitlige grundvandskoncentrationer på land (Tabel 7-6)**

**Tabel 7-4 Gennemsnitkoncentrationer i havvand, samt estimeret samlet flux (kg/år) til havet af kulbrinter baseret på fortyndingsfaktorer fra DHI's Dashboardmodel. Beregningen er foretaget henholdsvis for det nordlige og det sydlige indsatsområde. DG: Detektionsgrænse.**

Stofnavn	Middel havvandskoncentration (µg/l)		Flux (kg/år), Sydlige område			Flux (kg/år), Nordlige område		
	Syd	Nord	DHI, Minimumsfortynding	DHI, 5% fraktil fortynding	DHI, Middelfortynding	DHI, Minimumsfortynding	DHI, 5% fraktil fortynding	DHI, Middelfortynding
C6-C10	< DG	< DG	0	0	0	0	0	0
C10-C25	< DG	< DG	0	0	0	0	0	0
C25-C35	< DG	1,54	0	0	0	12	19	76
Sum (C6-C35)	< DG	1,54	0	0	0	12	19	75

**Tabel 7-5 Gennemsnitkoncentrationer i havvand, samt estimeret samlet flux (kg/år) til havet af kulbrinter baseret på fortyndingsfaktorer fra lokalitetsspecifik MIKE 3 simulering. Beregningen er foretaget henholdsvis for det nordlige og det sydlige indsatsområde. DG: Detektionsgrænse.**

Stofnavn	Middel havvandskoncentration (µg/l)		Flux (kg/år), Sydlige område				Flux (kg/år), Nordlige område			
	Syd	Nord	Minimumsfortynding, MIKE 3		Middelfortynding, MIKE 3		Minimumsfortynding, MIKE 3		Middelfortynding, MIKE 3	
			Rolig strøm	Høj strøm	Rolig strøm	Høj strøm	Rolig strøm	Høj strøm	Rolig strøm	Høj strøm
C6-C10	< DG	< DG	0	0	0	0	0	0	0	0
C10-C25	< DG	< DG	0	0	0	0	0	0	0	0
C25-C35	< DG	1,54	0	0	0	0	33	53	165	263
Sum (C6-C35)	< DG	1,54	0	0	0	0	33	53	165	263

**Tabel 7-6 Gennemsnitkoncentrationer samt estimeret flux fra land for kulbrinter i grundvandsprøver indenfor indsatsområdet på land. Beregnet for henholdsvis det nordlige og det sydlige indsatsområde.**

Stofnavn	Nordlige område			Sydlige område		
	Antal prøver	Middelkonc. grundvand (µg/l)	Flux (kg/år)	Antal prøver	Middelkonc. grundvand (µg/l)	Flux (kg/år)
C6H6-C10	29	9.788	59	38	12.517	33
C10-C25	29	1.466	8,9	38	22.063	58
C25-C35	29	1.194	7,2	38	12.163	32
Sum (C6H6-C35)	29	12.431	75	38	47.095	125

## Bilag 2

Antagelser vedr. diffusionsberegninger for DCE fra intakt ler til havet (flux 1)

## Forudsætninger for beregning af tilbagediffusion for DCE fra det intakte lerlag

Der er foretaget en beregning af tilbagediffusionen af DCE fra det intakte lerlag gennem 0,5 m udlagt ler og 2,5 m udlagt sand. Beregningsmetode, forudsætninger og parameterværdier til brug for beregningen svarer til de allerede udførte fluxberegninger for PCE, TCE og VC, som er beskrevet i /3/ og /4/. Til brug for de nye diffusionsberegninger for DCE, er stofs specifikke parametre for DCE i Tabel 7-7 benyttet

**Tabel 7-7. Stofspecifikke parametre for DCE. Molvægt,  $K_{oc}$ -værdi og diffusionskoefficient er fra JAGG. Diffusionskoefficienter for 10°C er beregnet baseret på /7/.**

Parameter	Enhed	DCE
Molvægt	g/mol	96,94
Fordelingskoefficient mellem organisk kulstof og vand, $K_{oc}$	l/kg	12,42
Diffusionskoefficienter i vand (25 °C)	m <sup>2</sup> /s	8,34E-10
Diffusionskoefficienter i vand (10 °C)	m <sup>2</sup> /s	7,62E-10

Til brug for beregningerne er der beregnet gennemsnitlige koncentrationer af cis-DCE i det intakte lerlag. Der er lavet gennemsnitsberegninger for hvert indsatsområde (nord og syd), og for hvert område er der beregnet både en gennemsnitskoncentration for indsatsområdet på land og for indsatsområdet på havet. For boringer, hvor der er udtaget flere jordprøver fra forskellige dybder i lerlaget, er gennemsnittet udelukkende beregnet ud fra de højeste koncentrationer målt over dybden svarende til fremgangsmåden anvendt for PCE og TCE. Tabel 7-8 viser en oversigt over de beregnede gennemsnitskoncentrationer. Der er udelukkende inddraget koncentrationer af cis-1,2-DCE. Trans-1,2-DCE er generelt meget lav (oftest under detektionsgrænsen).

**Tabel 7-8. Gennemsnitlige koncentrationer (mg/kg TS) i intakt lerlag baseret på de højeste koncentrationer målt i hvert punkt i lerlaget.**

	cis-DCE (mg/kg TS)
<b>Nord</b>	
Land	3,2
Hav	1
<b>Syd</b>	
Land	0,4
Hav	0,7

Udover at DCE er tilstede i det intakte lerlag til start, antages det også, at der sker en omdannelse af PCE og TCE til DCE. Således antages det, at 20% af hvert af moderstofferne omdannes til DCE. Denne omregning sker på molbasis jf. /3/. For VC er der antaget en omdannelse på 10% jf. /3/. Baseret på de eksisterende forureningsforhold på lokaliteten, hvor der ses meget høje koncentrationer af DCE i både grundvand og havvand (jf. Tabel 7-1 og Tabel 7-3), vurderes det dog, at en større procentdel af moderstofferne ender som DCE end som VC.