

HIMMARK STRAND VURDERING AF BETYDNING AF TILBAGEDIFFUSION EFTER AFVÆRGE

Projekt navn **Himmark Strand**
Projektnr. **1100048603**
Modtager **Region Syddanmark**
Dokumenttype **Notat**
Version **5.0**
Dato **09-08-2023**
Udarbejdet af **GILS, RTHN**
Kontrolleret af **METC**
Godkendt af **GILS**

INDHOLD

1.	Baggrund og formål	2
2.	Beregning af steady state flux som følge af tilbagediffusion	2
2.1	Estimat af porevandskoncentrationen i de øverste 10 og nederste 10 cm af havbunden	4
2.2	Estimat af porevandskoncentrationer i sandmagasinet på land	5
2.3	Samlet flux og beregning af havvandskoncentration	5
3.	Parametre til brug for beregning	6
4.	Resultater	8
4.1	Steady state fluxe med og uden udlagt ler	8
4.1.1	Betydende egenskaber for den udlagte ler	10
4.1.2	Tidsperspektiv for opnåelse af steady state koncentrationer	11
4.2	Estimat af porevandskoncentrationer i sandlag over ler samt reduktionsfaktor i forhold til før afværgen	11
4.2.1	Estimat af gennemsnitlige porevandskoncentrationer i sandmagasinet på land efter afværgen og ved opnåelse af steady state	12
4.2.2	Estimat af gennemsnitlige porevandskoncentrationer i de øverste og nederste 10 cm af havbunden efter afværgen og ved opnåelse af steady state	13
4.3	Estimat af havvandskoncentrationer i scenarie 1, hvor der udlægges 0,5 m ler	13
4.4	Estimat af forureningsfluxe til havvandet i dag	14
5.	Sensitivitetsberegninger	15
5.1	Det antages at al PCE og TCE omdannes til VC	16
5.2	Indholdet af organisk kulstof, f_{oc} , i det intakte lerlag sættes til 0,001	16
6.	Egenskaber for den udlagte lermembran	16
7.	Konklusioner	17
8.	Referencer	18

1. Baggrund og formål

Ved Himmark Strand skal der ske oprensning af forurening med bl.a. klorerede ethener og oliestoffer beliggende dels på stranden og dels under havbunden. Forureningen på stranden er især beliggende i et terrænnært grundvandsmagasin i et sandlag, der strækker sig ud under havbunden, og som er underlejret af et lerlag. Forureningen har bevæget ud gennem havbunden dels via fri fase transport på det skrånende lerlag ud under sandlaget, og dels ved transport af opløst forurening. Det underliggende lerlag er også forurenede flere steder.

Ved oprensningen af forureningen afgraves det forurenede sandlag, samt udvalgte områder i leret med kraftig forurening. Derefter udlægges først ½ m ekstra ler ovenover det eksisterende lerlag. Formålet med dette er at reducere tilbagediffusionen af forurening fra den underliggende ler til havvandet. Derefter udlægges rent sand.

Formålet med afværgeren er at sikre, at både badevandskvalitetskriterier og miljøkvalitetskrav for havvandet er opfyldt efter oprensningen af forureningen. Kriterierne fremgår af Tabel 1-1. Bemærk, at det er ikke fastsat specifikt, hvor i vandsøjlen kriterierne skal være overholdt.

Tabel 1-1. Badevandskvalitetskriterier og miljøkvalitetskrav for marint vand

	Badevandskvalitetskriterier (µg/l) /8/	Miljøkvalitetskrav ¹⁾ /1/ /1/(µg/l)
Vinylchlorid (VC)	0,3	0,05
Cis-1,2-dichlorethen (cis-1,2-DCE)	540	0,68
Trichlorethylen (TCE)	3,5	10
Tetrachlorethylen (PCE)		10

¹⁾ Miljøkvalitetskravet udtrykt som årgennemsnit (generelt kvalitetskrav) /1/

Formålet med arbejdet, som er afrapporteret i dette notat, er at vurdere/estimere følgende for oprensningen på havet og på landjorden:

- Hvilken betydning for tilbagediffusionens størrelse har det at udlægge lerlaget? Hvilke egenskaber for leret vil give den bedste reduktion af tilbagediffusionen? Derudover vil det, med baggrund i litteraturen, blive diskuteret hvordan den udlagte ler påvirker tidsaspektet for tilbagediffusionen.
- Hvilke gennemsnitlige koncentrationer i sandlagene på havet og på land vil tilbagediffusionen give anledning til efter afværge, når der er sket fuldt gennembrud gennem udlagt ler og sand?
- Hvilken reduktion i sandlagenes koncentrationer i forhold til før afværge opnås som følge af afværge og udlægning af ren ler og sand? Og hvilken reduktion i fluxen til havvand, samt dermed reduktion i havvandskoncentrationer forventes efter denne afværge?

2. Beregning af steady state flux som følge af tilbagediffusion

Fluxen som følge af tilbagediffusion kan estimeres vha. Ficks lov under antagelse af, at koncentrationen i det oprensede sandlag er nul, samt en antagelse af homogene og konstante koncentrationer i lerlaget. Vha. Ficks lov beregnes steady state fluxen J , som er den maksimale flux, der opnås, når der er sket fuldt gennembrud /5/. D betegner stoffets diffusionskoefficient, n er porøsiteten og dC/dx er koncentrationsgradienten:

$$J = -nD \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Ligning 1}$$

Ved antagelse om, at sandlaget er uforurenet til start, reduceres udtrykket til:

$$J = nD_e \frac{C_0}{L} \quad \text{Ligning 2}$$

Hvor C_0 er startkoncentrationen i det intakte lerlag, og L er afstanden, som diffusionen beregnes over.

Idet der er tale om diffusion gennem et porøst medium anvendes en effektiv diffusionskoefficient, D_e . Denne tager højde for, at diffusionskoefficienten er lavere i det porøse medium end i vand, idet de diffunderende stoffer bevæger gennem en snoet vej i hulrummet mellem jordpartiklerne. Dette udtrykkes ved tortuositeten, τ , som er en faktor mellem 0 og 1 /5/:

$$D_e = \tau \cdot D \quad \text{Ligning 3}$$

Ved diffusion gennem flere geologiske lag k med forskellige egenskaber, kan fluxen beregnes som:

$$J = DC_0 \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{L_k}{n_k \cdot \tau_k}} \right) \quad \text{Ligning 4}$$

Tortuositeten for ler er i litteraturen angivet i intervallet 0,20-0,33 /5/. Der findes også empiriske udtryk til estimering af tortuositeten på baggrund af porøsiteten, n , f.eks. følgende udtryk som anvendes i værktøjet Matrix Diffusion Toolkit /2/:

$$\tau = n^{1,1} \quad \text{Ligning 5}$$

Den beregnede flux vha. Ficks lov antager steady state forhold, og vil overestimere den faktiske flux, som vil aftage over tid. Beregningen anvendes til at vurdere worst case størrelsen af fluxen. Derudover anvendes den til at vurdere betydningen af det udlagte lerlag over det intakte lerlag, samt til at illustrere hvilke parametre for lerlaget, der har størst betydning i forhold til at reducere fluxen gennem lerlaget.

Alle beregninger antager, at forureningstransporten fra det intakte lerlag til toppen af sandlaget udelukkende er styret af diffusion. Der regnes for en gennemsnitssituation for henholdsvis hav og land i forhold til startkoncentrationer i den intakte ler. Disse skal således repræsentere gennemsnitskoncentrationerne for hele de forurenede arealer i den intakte ler.

For at vurdere betydningen af den udlagte ler, foretages der beregninger af steady state fluxen for følgende scenarier, som også er illustreret konceptuelt på Figur 2-1.

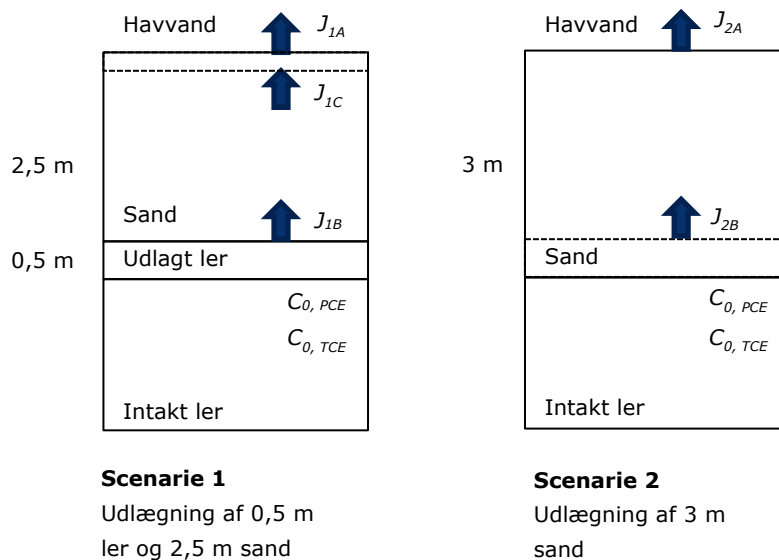
- **Scenarie 1A:** Der beregnes en flux J_{1A} fra den intakte ler til toppen af sandlaget vha. ligning 4, dvs. gennem 0,5 m ler efterfulgt af 2,5 m sand.
- **Scenarie 2A:** Der beregnes en flux J_{2A} vha. ligning 2 fra den intakte ler til toppen af sandlaget, for situationen, hvor der udelukkende udlægges sand i alt 3 m sand.

For havbunden beregnes i scenarie 1A og 2A fluxen til toppen af sandlaget dvs. gennem i alt 3 meter geologisk materiale. I tillæg hertil er der udført beregninger, hvor der alene regnes på fluxen gennem den øverste halve meter over den intakte ler. Disse scenarier betegnes 1B og 2B:

- **Scenarie 1B:** Der beregnes en flux J_{1B} fra den intakte ler til toppen af de 0,5 m udlagt ler vha. ligning 2.
- **Scenarie 2B:** Der beregnes en flux J_{2B} fra den intakte ler og gennem 0,5 m sand vha. ligning 2.

For den efterladte forurening på land, beregnes den diffusive flux fra det intakte lerlag til sandmagasinet ovenover leren svarende til scenarie 1B (der udlægges 0,5 m ler over det intakte lerlag) og denne flux antages at være lig med den horisontale advektive flux i grundvandsmagasinet, som fører forureningen mod havet.

Beregningerne kan anvendes til at vurdere betydningen af egenskaberne for den udlagte ler fx porøsitet, samt til at estimere koncentrationerne i sandlaget under havbunden og på land efter afværge.



Figur 2-1. Konceptuel model for Scenarie 1 og 2 med angivelse af de beregnede fluxe J . Modellen beskriver scenarierne for beregningerne for havbunden. For sandmagasinet på land beregnes fluxe tilsvarende J_{1B} og J_{2B} . På land vil der over sandmagasinet være umættet sand til terræn. Det antages, at hele fluxen ender i sandmagasinet, hvorfra den efterfølgende transporteres horisontalt i sandmagasinet.

Der foretages beregninger af den diffusionsstyrede flux til sandlaget af henholdsvis PCE og TCE, som er de primære klorerede ethener, der findes i lerlaget. Derudover foretages der beregninger af fluxen af VC under antagelse af, at der sker en omdannelse af en andel af stofferne til VC i lerlaget. VC kan herefter diffundere tilbage til sandlaget. Det er som udgangspunkt antaget at 10 % af massen af PCE og TCE omdannes til VC.

2.1 Estimat af porevandskoncentrationen i de øverste 10 og nederste 10 cm af havbunden

I de øverste 10 cm af havbunden forventes det, at der vil ske en hurtig udskiftning af vandet. Således vurderes det, at der tættest på stranden vil være en udskiftning af porevandet indenfor få timer, mens der længere ude på havet vil være mere langsom udskiftning, der dog stadig vurderes at være hyppig,

idet havbunden løbende vil påvirkes af turbulens fra lavtvandsbølger. Det er konservativt antaget, at der gennemsnitligt i oprensingsområdet vil være en vandudskiftning i de øverste 10 cm af havbunden på minimum 100 gange pr år.

Koncentrationerne af PCE, TCE og VC i de øverste 10 cm sand beregnes ud fra en steady state flux J_{1c} gennem 0,5 m ler og 2,4 m sand divideret med vandflowet Q (se ligning 6). Q estimeres som porevoluminet i de 10 cm sand ganget med det antal gange porevoluminet udskiftes pr år (antaget 100 gange):

$$C = \frac{J}{Q} = \frac{J}{(A \cdot d \cdot n)(\text{antal udskiftninger pr år})} \quad \text{Ligning 6}$$

Hvor A er det horisontale areal af forureningen, d er dybden af sandlaget, og n er porøsiteten af sandlaget.

Bemærk, at der ved beregningen af porevandskoncentrationer i sandlaget ikke tages højde for sorption. Dette skyldes, at sorptionen ikke vil have nogen netto-betydning for koncentrationerne i vandfasen når steady state situationen med fuldt gennembrud af fluxen er opnået.

På lignende vis estimeres koncentrationen i de 10 cm sand, der ligger lige over det udlagte ler baseret på fluxen J_{1A} (se Figur 2-1). Porevandskoncentrationen beregnes vha. ligning 6, ved at antage at porevoluminet udskiftes 1 gang pr år, ud fra en forudsætning om at koncentrationen ikke opbygges i de nederste 10 cm som følge af den fortsatte opadrettede diffusionsstyrede transport i sandlaget.

2.2 Estimat af porevandskoncentrationer i sandmagasinet på land

På land estimeres en worst case koncentration i sandmagasinet som steady state fluxen J (g/s) gennem den udlagte ler divideret med grundvandsflowet, Q , (m^3/s) gennem et tværsnit af magasinet med dybde d og bredde B :

$$C = \frac{J}{Q} \quad \text{Ligning 7}$$

Grundvandsflowet Q beregnes som darcyhastigheden ($q = K \times i$) ganget med magasinet's tværsnitsareal ($d \times B$):

$$Q = K \cdot i \cdot d \cdot B \quad \text{Ligning 8}$$

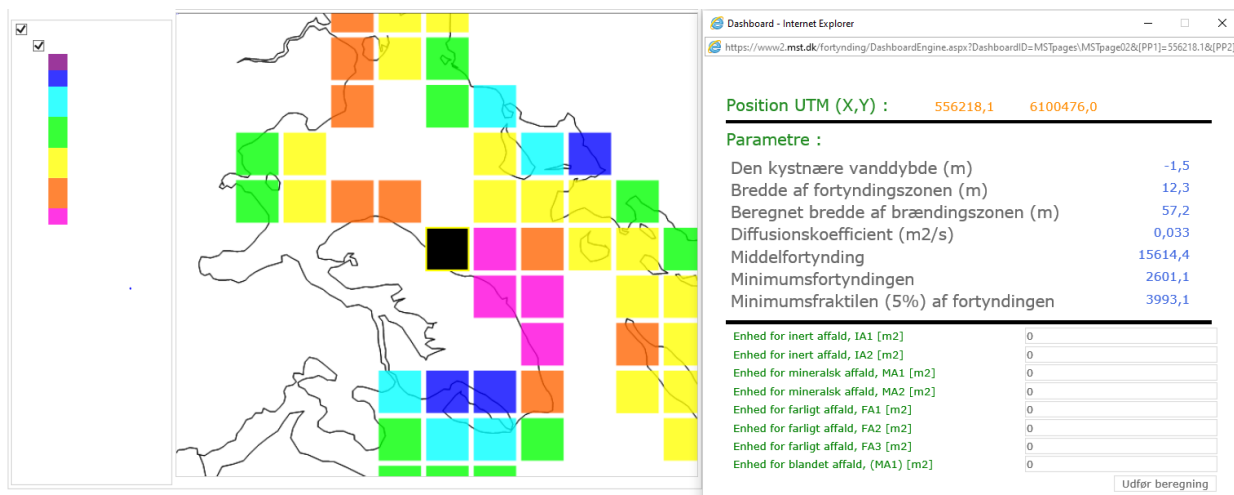
Beregningen af koncentrationen i sandmagasinet svarer til fremgangsmåden anvendt i Matrix Diffusion Toolkit /2/.

2.3 Samlet flux og beregning af havvandskoncentration

Ved at summere de beregnede forureningsfluxe fra det intakte lerlag på land og på havet, fås et estimat for den samlede udledning af klorerede ethener pr år. For at vurdere om denne udledning er problematisk foretages en beregning af de opblandede havvandskoncentrationer baseret på fortyndingsfaktorer fra DHI's Dashboardmodel /6/. Som det ses af Figur 2-2 er der en minimumsfortynding på en faktor 2.600 ud for kysten ved Himmark Strand, en 5% fraktil fortynding på en faktor 3.993 og en middelfortynding på en faktor 15.600.

Denne fortynding er gældende for en udledning på 0,1 l/s. Dette svarer til, at en udledt forureningsflux som minimum opblandes i et vandflow på 260 l/s. DHI's model antager, at hele forureningsfluxen

udledes i et punkt langs kysten, og estimerer de opblandede havvandskoncentrationer 50 m nedstrøms udledningen. Ved Himmark strand sker udledningen dog over en længere strækning langs kysten samt fra et stort areal af havbunden. Denne "udspredning" af den udledte flux giver en større fortynding end den, der beregnes med DHI's Dashboardmodel. Beregningen anvendes således udelukkende til at vurdere størrelsesordenen af fluxen, men er yderst konservativ i forhold til at vurdere de forventede havvandskoncentrationer.



Figur 2-2. Fortyndingsfaktorer fra DHI's Dashboardmodel (www2.mst.dk/fortynding/) for området ud for Himmark strand. Fortyndingerne er gældende for en punktudledning på 0,1 l/s /6/.

3. Parametre til brug for beregning

De anvendte startkoncentrationer i den intakte ler på henholdsvis hav og land ses i Tabel 3-1 sammen med yderligere stofspecifikke parametre og beregnede størrelser. For beregninger for både land og hav ses udelukkende på det sydlige forurenede område.

Startkoncentrationerne af PCE og TCE i jord er beregnet baseret på gennemsnittet af jordprøver i indsatsområdet udtaget ved toppen af lerlaget. Enkelte steder er der ikke taget prøver i toppen af lerlaget, her er der anvendt koncentrationer fra sandlaget ovenover i stedet. Der er således få koncentrationer, der trækker gennemsnittet meget op.

Jordkoncentrationerne er omregnet til vandfasekoncentrationer baseret på f_{oc} -værdier fra DMR /4/. For vinylchlorid antages det, at 10% af stofmængden af både PCE og TCE omdannes til vinylchlorid som følge af nedbrydning i den intakte ler. Denne vandkoncentration af VC er derefter anvendt som udgangspunkt til at beregne tilbagediffusionen af VC gennem den udlagte ler. De beregnede gennemsnitlige startkoncentrationer i vandfasen i den intakte ler er henholdsvis 3,5 mg/l (PCE), 1,4 mg/l (TCE) og 0,2 mg/l (VC) i indsatsområdet på land og 8,8 mg/l (PCE), 13 mg/l (TCE) og 1 mg/l (VC) for indsatsområdet på havet (jf. Tabel 3-1).

Anvendte parametre for de forskellige jordlag (intakt ler, udlagt ler og sand) ses af Tabel 3-2.

Fraktionen af organisk stof, f_{oc} , er beregnet som et vægtet gennemsnit baseret på fordelingen af fed moræneler og sandet ler i leroverfladen. For fed moræneler er anvendt DMRs gennemsnitsværdi for f_{oc} for ler på 1,36% (0,0136) og for sandet ler er anvendt DMRs gennemsnitsværdi for moræneler på 0,38% (0,0038). Dette giver et vægtet gennemsnit for f_{oc} på 0,011 (1,1%) både for leroverfladen på

land og på havet. F_{oc} -værdien har stor betydning for den beregnede vandfasekoncentration, som fluxberegningerne tager udgangspunkt i.

Øvrige parameterværdier, der anvendes til beregningerne for henholdsvis situationen på havbunden og situationen på land, ses af Tabel 3-3 (havbunden) og Tabel 3-4 (land). Det drejer sig bl.a. om samlede arealer af indsatsområderne, samt hydrogeologiske parametre for sandmagasinet på land.

Tabel 3-1. Stofspecifikke parametre. Molvægte, K_{oc} -værdier og diffusionskoefficienter er fra JAGG. Diffusionskoefficienter for 10°C er beregnet baseret på /3/

Parameter	Enhed	PCE	TCE	VC
Startkoncentration i intakt ler (hav). Beregnet gennemsnit af koncentrationer i efterladt ler	mg/kg TS	50	10	
Startkoncentration i intakt ler (land). Beregnet gennemsnit af koncentrationer i efterladt ler	mg/kg TS	20	1,1	
Andel af PCE og TCE der omdannes til VC		0,1	0,1	
Molvægt	g/mol	165,83	131,39	62,5
Fordelingskoefficient mellem organisk kulstof og vand, K_{oc}	l/kg	496,59	47,51	7
Diffusionskoefficienter i vand (25 °C)	m ² /s	6,38E-10	7,17E-10	1,04E-09
Diffusionskoefficienter i vand (10 °C)	m ² /s	5,83E-10	6,55E-10	9,50E-10
Beregnete størrelser				
K_d , intakt ler ($K_d=f_{oc} \cdot K_{oc}$)	l/kg	5,46	0,52	0,077
Retardationsfaktor, intakt ler, $R=1+K_d \cdot (\rho_b/n)$		23,1	3,1	1,3
K_d , udlagt ler ($K_d=f_{oc} \cdot K_{oc}$)	l/kg	0,497	0,048	0,007
Retardationsfaktor, udlagt ler, $R=1+K_d \cdot (\rho_b/n)$		3,0	1,2	1,0
Startkoncentration i vandfase i ler, efter afvæрге: $C_w=(C_t \cdot \rho_b)/(k_d \cdot \rho_b \cdot n)$ (hav)	mg/l	8,76	13,00	0,95 ¹⁾
Startkoncentration i vandfase i ler, efter afvæрге: $C_w=(C_t \cdot \rho_b)/(k_d \cdot \rho_b \cdot n)$ (land)	mg/l	3,50	1,43	0,20 ¹⁾

¹⁾ Vandfasekoncentrationen af VC er beregnet ved at antage, at 10% af PCE og TCE omdannes til VC

Tabel 3-2. Parametre for jordlag. Bulkdensitet og porøsitet er standardværdier fra JAGG. Tortuositeten er estimeret porøsiteten vha. udtryk fra Matrix Diffusion Toolkit /2/. F_{oc} for intakt ler er baseret på et vægtet gennemsnit af glødetabsbestemmelser for henholdsvis ler og moræneler udtaget på land fra /4/. f_{oc} for udlagt ler er som udgangspunkt sat til standardværdi fra JAGG.

Parameter	Enhed	Intakt ler	Udlagt ler	Sand
Bulkdensitet, ρ_b	kg/l	1,62	1,62	1,46
Porøsitet, n	-	0,4	0,4	0,45
Fraktion af organisk kulstof, f_{oc}		0,011	0,001	
Tortuositet: $\tau = n^{(1,1)}$	m		0,365	1
Dybde af lag (Scenarie 1), der udlægges ler og sand	m		0,5	2,5
Dybde af lag (Scenarie 2), der udlægges ingen ler, kun sand	m			3

Tabel 3-3. Øvrige input for situationen på havet (det sydlige indsatsområde)

Parameter	Enhed	Værdi
Samlet horisontalt areal af forurening i intakt lerlag	m ²	21.387
Dybde af sandlag	m	2,5

Tabel 3-4. Øvrige input for situationen på land (det sydlige indsatsområde). Hydraulisk ledningsevne og gradient for sandmagasinet er fastsat på baggrund af potentialekort og sigteanalyser i /4/

Parameter	Enhed	Værdi
Samlet horisontalt areal af forurening af lerlag på land	m ²	9.341
Hydraulisk gradient for sandmagasin, <i>i</i>	-	0,005
Hydraulisk ledningsevne for sandmagasin, <i>K</i>	m/s	5E-5
Dybde af sandmagasin, <i>d</i>	m	3
Bredde af forurenede område, <i>B</i>	m	129

4. Resultater

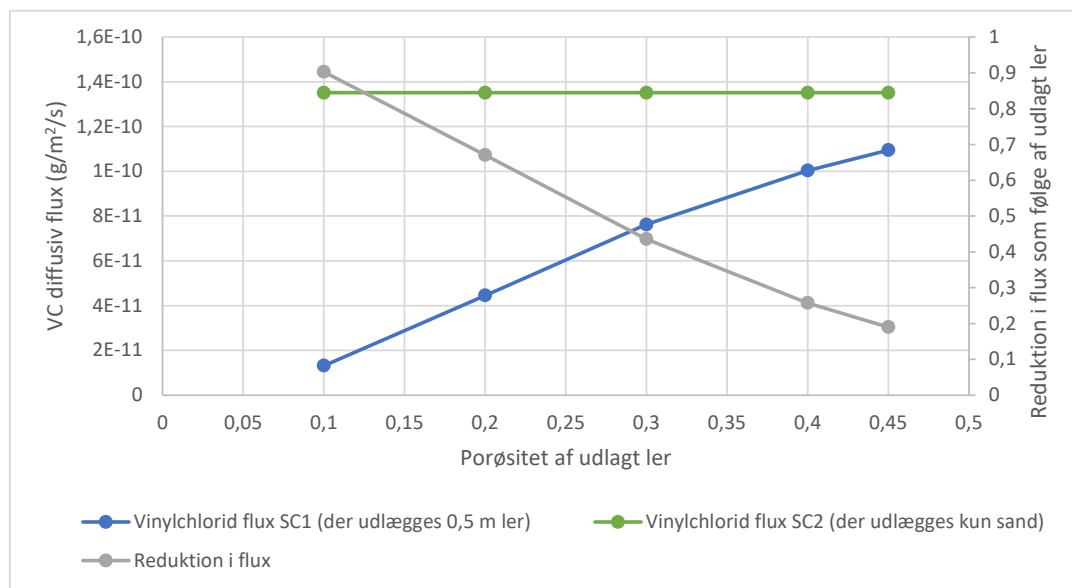
4.1 Steady state fluxe med og uden udlagt ler

De beregnede diffusive fluxe for henholdsvis scenarie 1A, hvor der udlægges 0,5 m ler over den intakte ler samt for scenarie 2A, hvor der udelukkende udlægges rent sand, ses i Tabel 4-1. Beregningen i tabellen er foretaget for forureningen under havbunden, men de samme reduktioner beregnes for forureningen på land, da reduktionerne udelukkende afhænger af tykkelse og egenskaber af det udlagte lerlag.

Den beregnede reduktion i fluxen vil især afhænge af, hvor tykt et lag ler, der udlægges samt porøsiteten af dette lag. Figur 4-1 viser steady state fluxen af vinylchlorid for scenarie 1 som funktion af det udlagte lerlags porøsitet. Det ses, at reduktionen stiger med faldende porøsitet af lerlaget. Der beregnes en reduktion i fluxen på 26% for en ler med en porøsitet på 0,4, som svarer til JAGGs standardporøsitet for dybe lerjorde. For en porøsitet af lerlaget i intervallet 0,2-0,45 vil reduktionen i fluxen som følge af den udlagte ler variere fra 67% (porøsitet på 0,2) til 19% (porøsitet på 0,45).

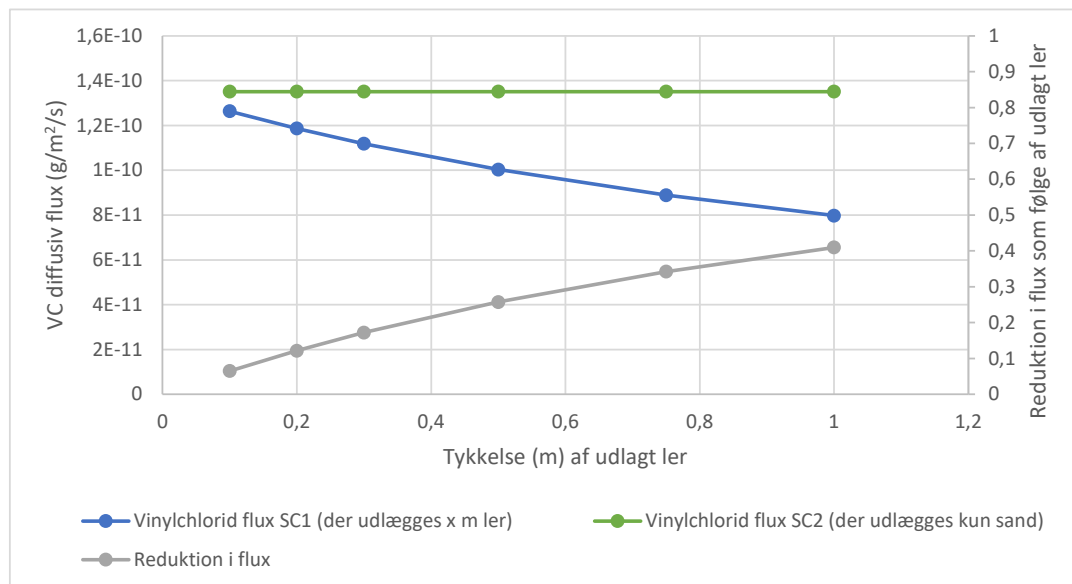
Tabel 4-1. Estimerede steady state fluxe med (scenarie 1A) og uden udlagt ler (scenarie 2A). Scenarie 1A: Flux gennem 0,5 m ler og 2,5 m sand. Scenarie 2A: Flux gennem 3 m sand.

Parameter	Enhed	PCE	TCE	VC
På havet				
Steady state flux J_{1A} (scenarie 1A)	g/m ² /s	5,68E-10	9,48E-10	1,00E-10
Steady state flux J_{2A} (scenarie 2A)	g/m ² /s	7,66E-10	1,28E-09	1,35E-10
Reduktion i flux som følge af udlagt ler		26%	26%	26%



Figur 4-1. Sammenligning af beregnede diffusive steady state flux af vinylchlorid i toppen af sandlaget for scenarie 1 (der udlægges 0,5 m ler over det intakte lerlag) samt scenarie 2 (der udlægges udelukkende sand). Den diffusive flux i scenarie 1 afhænger af lerens porøsitet. Reduktionen i flux som følge af den udlagte ler er vist på den sekundære vertikale akse.

Figur 4-2 viser de beregnede steady state fluxe som funktion af tykkelsen af den udlagte ler. Det ses, at steady state fluxen for scenarie 1 aftager med stigende tykkelse af den udlagte ler. Ved en 0,5 m tykkelse af den udlagte ler ses en reduktion af fluxen på 26% i forhold til scenarie 2, hvor der ikke udlægges ler. Ved en fordobling af lerlagets tykkelse (dvs. udlægning af 1 m ler) ses en reduktion af fluxen på 41% i forhold til scenarie 2.



Figur 4-2. Sammenligning af beregnede diffusive steady state flux af vinylchlorid i toppen af sandlaget for scenarie 1 som funktion af tykkelsen af den udlagte ler, samt scenarie 2 (der udlægges udelukkende sand). Reduktionen i flux som følge af den udlagte ler er vist på den sekundære vertikale akse.

I Tabel 4-2 ses resultaterne for Scenarie 1B og 2B, hvor fluxen udelukkende beregnes for den nederste halve meter udlagt materiale, dvs. gennem 0,5 m ler i scenarie 1B og igennem 0,5 m sand i scenarie 2B. Reduktionen i fluxen som følge af udlægning af ler i stedet for sand bliver større, end når der ses på fluxen gennem hele jordsøjlen. Således vil steady state fluxen lige over den udlagte 0,5 m ler være 68% lavere end fluxen over 0,5 m sand. Den procentvise reduktion i flux er den samme for andre dybder af ler og sand, så længe det er de samme dybder der sammenlignes. Men de faktiske størrelser af fluxene vil aftage jo større dybde af lagene, der regnes på.

Reduceres porøsitet af den udlagte ler i scenarie 2B til 0,2 i stedet for 0,4, vil den resulterende steady state flux gennem leren være 92% lavere end gennem udlagt sand, der antages at have en porøsitet på 0,45.

Tabel 4-2. Estimerede steady state fluxe med og uden udlagt ler. Scenarie 1B: Flux gennem 0,5 m ler. Scenarie 2B: Flux gennem 0,5 m sand.

Parameter	Enhed	PCE	TCE	VC
På havet				
Steady state flux J_{1B} (scenarie 1B)	g/m ² /s	1,49E-09	2,49E-09	2,63E-10
Steady state flux J_{2B} (scenarie 2B)	g/m ² /s	4,59E-09	7,66E-09	8,11E-10
Reduktion i flux som følge af udlagt ler		68%	68%	68%

4.1.1 Betydende egenskaber for den udlagte ler

De parametre for leren, som især har betydning for den beregnede flux, og dermed for hvor stor en reduktion der beregnes, er:

- Porøsiteten, n , af den udlagte ler, idet denne er styrende for den diffusive flux (ligning 2) og styrende for tortuositeten (ligning 5). Jo højere porøsitet og jo større tortuositet desto højere flux og mindre reduktion.. For at minimere fluxen skal den udlagte ler dermed have så lav porøsitet som muligt, som det ses af Figur 4-1
- Dybden af det udlagte lag. Jo tykkere lerlag der udlægges, jo mere vil steady state fluxen reduceres (ligning 2). Ved en fordobling af tykkelsen af lerlaget halveres steady state fluxen gennem leren.
- Indholdet af organisk stof, f_{oc} . f_{oc} -værdien indgår ikke i beregningen af steady state fluxen, da denne beskriver fluxen, når der er sket gennembrud gennem den udlagte ler. Til gengæld har indholdet af organisk stof betydning for, hvor lang tid det tager, inden der sker gennembrud. Dette beskrives nærmere i afsnit 4.1.2.

Det er undersøgt, om hydraulisk ledningsevne, K , kan fungere som en indikator for n i en udlagt lermembran, idet K kan kontrolleres i en udlagt lermembran ved plasticitet, kalkindhold, komprimeringsgrad, vandindhold og kornstørrelse (jf. DS INF 466), er denne mulige sammenhæng et potentielt brugbart redskab. Det er undersøgt i litteraturen, om der findes empiriske relationer mellem n og K for ler. Generelt for sediment findes der flere empiriske sammenhænge, hvor K bestemmes bl.a. vha. n . Ofte er de baseret på Kozeny-Carmen type ligninger, hvor K beregnes fra en kornstørrelses fordelings koefficient, d_m , og n :

$$K = \frac{\rho g}{\mu} * \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \left(\frac{d_m^2}{180} \right) \quad \text{Ligning 9}$$

Hvor ρ er densiteten af vand (kg/m^3), g er tyngdekraften (m/s^2) og μ er den dynamiske viskositet ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) af væsken, her vand (/12/ & /13/). Senere arbejde fra /13/ og /14/ har kombineret forskellige anvendte variationer af Kozeny-Carmen type ligninger for at undersøge sammenhæng mellem kornstørrelsesfordelinger, bestemt i laboratoriet fra sedimentprøver, K og n . Siden mange af de anvendte empiriske relationer er udviklet specifikt med henblik på sand, er der i /13/ ingen metode til beregning i ren ler, og /14/ har en nedre grænse for K på $2,87\text{e-}7$ m/s, hvilket udelukker anvendelse i ler. Således er det indtil videre konkluderet, at hydraulisk ledningsevne ikke er en anvendelig parameter i denne konkrete sammenhæng. Dette skyldes, at hydraulisk ledningsevne ikke umiddelbart kan bruges til at kvantitativt at estimere n i en lermembran, og fordi det er antaget, at diffusion er den dominerende transportmekanisme for forureningen.

4.1.2 Tidsperspektiv for opnåelse af steady state koncentrationer

Som det ses af resultaterne i Figur 4-1, forventes det udlagte lerlag på 0,5 m at reducere steady state fluxen med 19-67% for en porøsitet i intervallet 0,2-0,45.

Den udlagte ler vil dog også have betydning i forhold til at forsinke gennembruddet af forurening til sandlaget ovenfor, og dermed hvor lang tid der går før de beregnede steady state koncentrationer kan forventes. Ifølge /5/ der har modelleret den diffusive flux som funktion af tid gennem en 1 m tyk lermembran med porøsitet 0,37 og f_{oc} på 0,011, vil det tage i størrelsesordenen 40 år at opnå steady state situation for et ikke sorberende stof, mens det for moderat sorberende stoffer vurderes at tage i størrelsesordenen hundreder af år, at opnå steady state. I perioden indtil steady state opnås, vil der være en koncentrationsgradient igennem lerlaget. For et ikke sorberende stof vil fluxen opnå en størrelse svarende til 10% af steady state fluxen indenfor 10 år, mens det for moderat sorberende stoffer vil tage i størrelsesordenen 20 år, inden der sker gennembrud svarende til 1-10% af steady state koncentrationen.

For stoffer, der sorberer, vil den effektive diffusionskoefficient blive påvirket af sorptionen, dette beskrives i /5/ ved en effektiv dispersionskoefficient D_e' , der reduceres som følge af retardation ($D_e' = D_e/R$). Ved steady state er der sket fuldt gennembrud, og der vil ikke være en nettoeffekt af sorptionen. Retardationsfaktoren indgår således ikke i steady state beregningen (ligning 2).

Retardationsfaktoren R , er i Tabel 4-3 beregnet for henholdsvis en f_{oc} -værdi på 0,001 (0,1%), en f_{oc} -værdi på 0,01 (1%) samt en f_{oc} -værdi på 0,05 (5%). Som det ses har f_{oc} -værdien stor betydning for retardationen af især PCE og TCE, mens betydningen er relativt lille for VC, som ikke sorberer i særlig stor udstrækning. Ved den høje f_{oc} -værdi på 5% vil der dog også ses en betydelig forsinkelse af VC fluxen.

Tabel 4-3. Retardationsfaktor R for den udlagte ler beregnet for henholdsvis f_{oc} på 0,001 (0,1%), 0,01 (1%) og 0,05 (5%). Bulkdensitet, porøsitet, K_{oc} er som angivet i Tabel 3-1. K_d estimeres som $K_d = f_{oc} \cdot K_{oc}$

Parameter	Enhed	PCE	TCE	VC
Retardationsfaktor R for $f_{oc}=0,001$, $R=1+K_d \cdot (\rho_b/n)$	-	3,0	1,2	1,0
Retardationsfaktor R for $f_{oc} = 0,01$, $R=1+K_d \cdot (\rho_b/n)$	-	21	2,9	1,3
Retardationsfaktor R for $f_{oc} = 0,05$, $R=1+K_d \cdot (\rho_b/n)$	-	102	11	2,4

4.2 Estimat af porevandskoncentrationer i sandlag over ler samt reduktionsfaktor i forhold til før afværge

Med udgangspunkt i de gennemsnitlige jordkoncentrationer i det intakte lerlag som angivet i Tabel 3-1, samt en antagelse om at 10% af mængden af PCE og TCE omdannes til VC, samt udlægning af 0,5 m

ler med en porøsitet på 0,4, er der vha. ligning 6 og 7 beregnet gennemsnitlige porevandskoncentrationer i sandmagasinet på land samt de øverste og nederste 10 cm af sandlaget på havet. Estimerede steady state fluxe ($\text{g/m}^2/\text{år}$ og $\text{g}/\text{år}$), porevandskoncentrationer ($\mu\text{g}/\text{l}$) samt reduktionsfaktorer i forhold til de gennemsnitlige koncentrationer målt før afværgen er angivet i Tabel 4-4 og beskrives yderligere nedenfor.

De beregnede porevandskoncentrationer skal udelukkende ses som estimater for den størrelsesorden af koncentrationer, der som gennemsnit vil være efter opnåelse af steady state for henholdsvis sandmagasinet på land og de øverste/nederste 10 cm af havbunden. Der vil således være stedvise variationer over de oprensede arealer.

4.2.1 Estimat af gennemsnitlige porevandskoncentrationer i sandmagasinet på land efter afværgen og ved opnåelse af steady state

Som det ses af Tabel 4-4 beregnes for sandmagasinet på land gennemsnitlige porevandskoncentrationer af PCE, TCE og VC i størrelsesordenen $60 \mu\text{g}/\text{l}$ (PCE), $25 \mu\text{g}/\text{l}$ (TCE) og $5 \mu\text{g}/\text{l}$ (VC) når steady state er opnået efter afværgen.

Koncentrationerne i sandmagasinet på land er beregnet under antagelse af at sandmagasinet har en vertikal udstrækning på gennemsnitligt 3 m svarende til situationen før afværgen. Inden afværgen er de gennemsnitlige koncentrationer i sandlaget på land i størrelsesordenen $11.000 \mu\text{g}/\text{l}$ (PCE), $17.600 \mu\text{g}/\text{l}$ (TCE) og $1300 \mu\text{g}/\text{l}$ (VC). De gennemsnitlige koncentrationer er beregnet på baggrund af vandprøver udtaget fra 50 borer i indsatsområdet baseret på alle de udførte undersøgelser /7//9//10/.

De beregnede koncentrationer i sandmagasinet efter afværgen svarer således til en reduktion på en faktor 190 (PCE), 670 (TCE) og 240 (VC).

Tabel 4-4. Estimerede steady state fluxe, samt koncentrationer i sandlaget på havet (estimeret vha. ligning 6) og koncentrationer i sandmagasinet på land (estimeret vha. ligning 7 og 8). Alle beregnede fluxe og koncentrationer repræsenterer situationen efter afværgen og ved opnåelse af steady state, dvs. fuldt gennembrud.

Parameter	Enhed	PCE	TCE	VC
HAV				
Estimeret koncentration i øverste 10 cm af sandlaget				
Diffusiv flux gennem udlagt ler og sand J_{IC}	$\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$	5,83E-10	9,72E-10	1,03E-10
Diffusiv flux gennem udlagt ler og sand J_{IC}	$\text{g}/\text{år}$	285	476	50
Gennemsnitlig koncentration i 10 cm sandlag	$\mu\text{g}/\text{l}$	3	5	0,5
Estimeret koncentration i nederste 10 cm af sandlaget				
Diffusiv flux gennem udlagt ler (scenarie 1A) J_{IB}	$\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$	1,49E-09	2,49E-09	2,63E-10
Diffusiv flux gennem udlagt ler (scenarie 1A) J_{IB}	$\text{g}/\text{år}$	730	1217	129
Gennemsnitlig koncentration i 10 cm sandlag	$\mu\text{g}/\text{l}$	758	1265	134
Koncentration i sandlag målt før afværgen				
Koncentration i sandlag før afværgen (gennemsnit, baseret på 12 borer filtersat i varierende dybde)	$\mu\text{g}/\text{l}$	43.901	45.314	10.731
Minimum reduktionsfaktor (koncentrationer før afværgen sammenlignet med koncentrationer i nederste 10 cm af sandlag)		58	36	80

LAND				
Diffusiv flux gennem udlagt ler (scenarie 1)	g/år	176	81	16
Koncentration i sandmagasin	µg/l	58	26	5,4
Koncentration i sandlag målt før afværg (gennemsnit baseret på 50 boringer på land /7/, /9/, /10/)	µg/l	11.063	17.631	1.292
Reduktionsfaktor		190	670	240

4.2.2 Estimat af gennemsnitlige porevandskoncentrationer i de øverste og nederste 10 cm af havbunden efter afværg og ved opnåelse af steady state

For de øverste 10 cm af havbunden estimeres der porevandskoncentrationer på henholdsvis 3 µg/l (PCE), 5 µg/l (TCE) og 0,5 µg/l (VC) (se Tabel 4-4). Denne beregning antager, som tidligere beskrevet, at porevandet i de øverste 10 cm af havbunden udskiftes 100 gange pr år. Den præcise strømning og vandudveksling i havbunden er ukendt. Beregningerne af koncentrationerne i havbunden er derfor behæftet med en væsentlig usikkerhed.

Inden afværg er de gennemsnitlige koncentrationer indenfor indsatsområdet i sandlaget på havet i størrelsesordenen 44.000 µg/l (PCE) og 45.000 (TCE) og 10.700 µg/l (VC). Dette gennemsnit er beregnet på baggrund af vandprøver udtaget fra 12 boringer i havbunden /7/. I forhold til områdets størrelse, er de dermed ikke helt repræsentative. Eksempelvis er der ikke udtaget vandprøver fra indsatsområdet længst ude på havet, hvor der vil forventes lavere koncentrationer. Derudover skal det bemærkes, at koncentrationerne i disse boringer er målt på vandprøver udtaget fra 1 m filtre med toppen af filteret placeret i varierende dybder fra 1-3 m under havbundens overflade.

Hverken de beregnede koncentrationer for de øverste eller nederste 10 cm sand er derfor direkte sammenlignelige med gennemsnitskoncentrationerne baseret på disse vandprøver. Uanset dette, er det dog tydeligt, at de beregnede koncentrationer i sandlaget efter tilbagediffusion er slået fuldt igennem, er markant lavere end de eksisterende koncentrationer. Således beregnes der en reduktion på en faktor en faktor 58 (PCE), 36 (PCE) og 80 (VC) selv når de højest beregnede koncentrationer i bunden af sandlaget anvendes.

I dag ses gennemsnitlige koncentrationer af VC i havvandet på 1,7 µg/l ud for det sydlige indsatsområde. Hvis det antages, at fluxen til havvandet er proportional med koncentrationen i sandlaget, skal der dermed ske en gennemsnitlig reduktion af VC koncentrationerne i sandlaget med en faktor 34 for at miljøkvalitetskravet på 0,05 µg/l skal være overholdt. Baseret på den markante reduktion i koncentrationer af klorerede ethener i sandlaget efter afværg, vurderes det ligeledes, at fluxen til havvandet vil reduceres markant og tilstrækkeligt til at havvandskoncentrationerne vil overholde de fastsatte kriterier i Tabel 1-1.

4.3 Estimat af havvandskoncentrationer i scenarie 1, hvor der udlægges 0,5 m ler

Tabel 4-5 opsummerer de beregnede fluxe til havvandet fra henholdsvis forureningen i den intakte ler under havbunden samt forureningen i den intakte ler på land under antagelse af, at der både på land og hav udlægges 0,5 m ler. For havbunden er fluxen til havvandet konservativt antaget at være lig med den diffusionsstyrede flux lige over den udlagte 0,5 m ler (J1B på Figur 2-1). Den samlede flux fra både havbund og land af henholdsvis PCE, TCE og VC beregnes i størrelsesordenen 900 g/år, 1300 g/år og 145 g/år.

Såfremt der i stedet anvendes den diffusionsstyrede flux gennem 0,5 m ler efterfulgt af 2,5 m sand (J1A på Figur 2-1) bliver steady state fluxen ca. 40% lavere.

Under antagelse af at hele fluxen (fra både havbund og land) udledes fra et punkt langs kysten samt anvendelse af fortyndingsfaktorer fra DHI's Dashboardmodel beregnes havvandskoncentrationer efter afværgen af henholdsvis PCE, TCE og VC i størrelsesordenen 0,11 µg/l, 0,16 µg/l og 0,018 µg/l ved brug af minimumsfortyndingen. Fortyndingen vil dog reelt være større, da udledningen sker over et meget stort område og ikke i et samlet punkt. Idet de beregnede koncentrationer selv under de anvendte konservative forudsætninger ikke fører til en overskridelse af miljøkvalitetskrav eller badevandskvalitetskriterier som angivet i Tabel 1-1, vurderes fluxen fra den tilbageværende forurening i den intakte ler ikke at udgøre en risiko.

Tabel 4-5. Estimerede havvandskoncentrationer baseret på minimumsfortynding i DHI's Dashboard model.

	Enhed	PCE	TCE	VC
Samlede fluxe samt beregnede koncentrationer i havvand				
Sum af fluxe til havvand	g/år	905	1298	145
Koncentration i havvand ved minimumsfortynding	µg/l	0,11	0,16	0,018
Koncentration i havvand ved 5% fraktil fortynding	µg/l	0,072	0,10	0,012
Koncentration i havvand ved middelfortynding	µg/l	0,018	0,026	0,0029

4.4 Estimat af forureningsfluxe til havvandet i dag

De ovenstående fluxberegninger omhandler alle situationen efter afværgen. Der er desuden foretaget følgende beregninger for at estimere størrelsesordenen af fluxen til havvandet i dag:

- **Samlet flux (J_{samlet}) til havvandet** for hvert af stofferne PCE, TCE, c-DCE og VC baseret på havvandskoncentrationerne samt vandflowet Q til fortynding fra DHIs Dashboardmodel:

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

Denne flux er et estimat for den samlede udledning fra forurening på land og på havet.

- **Flux til havet fra forureningen på land ($J_{fra\ land}$)**. Denne estimeres ud fra de gennemsnitlige koncentrationer af PCE, TCE, c-DCE og VC i 50 borer på land (se Tabel 4-5/Tabel 4-4; for c-DCE er gennemsnitskoncentrationen beregnet til 50.000 µg/l) samt det vertikale tværsnitsareal af magasinet beregnet som dybden, d , gange bredden, B , samt den hydrauliske konduktivitet og gradient af magasinet på land:

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

Der er tale om et meget groft estimat af fluxen, da der for alle inputværdier anvendes gennemsnitsværdier for hele strækningen der repræsenterer tværsnittet af fanen ud mod havet. De anvendte parameterværdier ses af Tabel 3-4. Denne flux fra land vil bidrage til den samlede flux J_{samlet} estimeret ud fra havvandskoncentrationerne og kan dermed opfattes som en delmængde af J_{samlet} .

Den estimerede samlede flux J_{samlet} afhænger af hvilken fortyndingsfaktor, der regnes med. Der er i Tabel 4-6 foretaget beregninger med både minimums- og 5% fraktil- og middelfortynding fra DHIs Dashboard.

Den samlede flux af VC til havvandet i dag estimeres i størrelsesordenen 14-84 kg/år afhængig af hvilken fortyndingsfaktor fra DHI's Dashboard, der benyttes. Fra land estimeres en flux af VC på 4 kg/år. Denne udgør en delmængde af den samlede flux og repræsenterer dermed 5-28% af den samlede flux,

For c-DCE estimeres en samlet flux på 90-540 kg/år, hvoraf ca. 150 kg estimeres at stamme fra forureningen på land.

For PCE og TCE estimeres samlede fluxe til havvandet på henholdsvis 4-25 kg/år og 10-60 kg/år. Samtidig estimeres det af fluxen fra land af PCE er på 34 kg/år og for TCE er 54 kg/år. Disse høje fluxe af PCE og TCE fra land indikerer at størstedelen af udledningen af disse stoffer kan stamme fra forureningen på land. Der er dog, som nævnt ovenfor, store usikkerheder ved fluxestimererne.

Tabel 4-6. Estimerede samlede fluxe af PCE, TCE, DCE og VC til havvand i dag samt estimater af fluxe til havet fra forureningen beliggende på land.

	Enhed	PCE	TCE	c-DCE	VC
Samlet flux (J_{samlet}) til havet i dag baseret på havvandskoncentrationer					
Gennemsnitlig koncentration i havvand i dag	µg/l	0,5	1,2	10,9	1,7
Estimeret flux til havet i dag (minimumsfortynding)	kg/år	4,1	9,8	89	14
Estimeret flux til havet i dag (5% fraktil fortynding)	kg/år	6,3	15	137	21
Estimeret flux til havet i dag (middelfortynding)	kg/år	25	59	537	84
Flux til havet fra grundvandsmagasin på land ($J_{\text{fra land}}$)					
Estimeret flux til havet fra forurening på land (minimumsfortynding)	kg/år	34	54	154	3,9

5. Sensitivitetsberegninger

For at undersøge sensitiviteten af de udførte beregninger er der udført sensitivitetsberegninger i forhold til at vurdere betydning af udvalgte parametre, som er usikkert bestemt, og som har stor betydning for resultatet, nemlig:

- Andelen af PCE og TCE der omdannes til VC
- Indholdet af organisk kulstof, f_{oc} , i det intakte lerlag

5.1 Det antages at al PCE og TCE omdannes til VC

I de udførte beregninger ovenfor blev det antaget, at 10% af mængden af PCE og TCE blev omdannet til VC i det intakte lerlag. I det følgende er der foretaget beregninger baseret på en worst case antagelse om, at al PCE og TCE omdannes til VC og at VC ikke nedbrydes videre til ethen og ethan. Dette medfører, at fluxen af VC stiger med en faktor 10, og dermed stiger også de beregnede koncentrationer i sandlaget med en faktor 10. Den samlede flux af VC fra både hav og land stiger således også med en faktor 10 (til 1450 g/år). Ligesom de estimerede havvandskoncentrationer for VC stiger med en faktor 10. Ved minimumsfortyndingen fås derved en havvandskoncentration på 0,18 µg/l. Denne overstiger således miljøkvalitetskravet for vinylklorid på 0,05 µg/l. Den beregnede havvandskoncentration antager, at hele fluxen udledes fra et punkt langs kysten. I virkeligheden udledes fluxen fra en strækning langs kysten, samt fra et stort areal på havbunden. Den faktiske fortynding må derfor forventes at være større end den angivne i Dashboardet. Derudover forventes det heller ikke realistisk med en 100% omdannelse af al PCE og TCE til VC, idet nedbrydningen i det intakte lerlag vurderes at være mere begrænset.

Ved en fluxstigning med en faktor 10, vil den estimerede VC koncentration i sandlaget på havbunden og på land ligeledes stige med en faktor 10 til ca. 54 µg/l på land og til ca. 5 µg/l (øverste 10 cm af sandlaget på havbunden) samt til 1340 µg/l (de nederste 10 cm af sandlaget på havbunden). Sammenlignet med gennemsnitskoncentrationen i dag, vil det dog stadig give en væsentlig reduktion svarende til en faktor 24 for sandmagasinet på land, og en faktor 8-2146 for sandlaget på havet afhængig af om der sammenlignes med koncentrationen i de nederste eller øverste 10 cm af havbunden.

5.2 Indholdet af organisk kulstof, f_{oc} , i det intakte lerlag sættes til 0,001

Indholdet af organisk kulstof i det intakte lerlag er en styrende parameter for beregningen af forureningskoncentrationerne i vandfasen, som er udgangspunktet for den beregnede diffusive flux. Der er som udgangspunkt anvendt en f_{oc} -værdi på 0,011 baseret på et vægtet gennemsnit af udbredelsen af fed ler og moræneler samt gennemsnitlige f_{oc} -værdier for disse lertyper på lokaliteten bestemt af DMR /4/ jf. afsnit 3.

Hvis det i stedet, yderst konservativt antages, at f_{oc} -værdien for den intakte ler er på 0,001, vil de beregnede vandfasekoncentrationer være væsentligt højere og fluxen af VC stige med en faktor 4,4 (land) og en faktor 6 (hav). Dette vil give en samlet flux af vinylklorid fra både hav og land på 660 g/år samt en havvandskoncentration på 0,08 µg/l ved brug af minimumsfortyndingen fra DHIs Dashboardmodel.

6. Egenskaber for den udlagte lermembran

Jf. sektion 4.1.1 er det især vigtigt, at lerlaget har følgende egenskaber:

- Lav porøsitet for sikring af lav tortuositet (ligning 5)
- Tilstrækkelig tykkelse (ligning 2)

Indholdet af organisk stof har betydning for gennembrudstiden, men ikke på størrelsen af fluxen gennem laget. Tykkelsen af laget er bestemt til at skulle være 0,5 m.

Der er i sektion 4.1 regnet med en porøsitet af lermembranen på 0,2-0,45, og på baggrund af dette ansås en porøsitet for den udlagte lermembran på maksimalt 0,4 at begrænse forureningsdiffusionen i tilstrækkelig grad. Dette er både i kraft af porøsitetens egen indvirkning på den samlede diffusionstransport (jf. ligning 2) og porøsitetens effekt på tortuositeten (ligning 5). For at sikre at den

udlagte membran har en porøsitet under 0,4, er det ved etablering af membranen vigtigt, at der (jf. DS/INF 466):

- Før installering udføres stikprøveudtagning af den anvendte ler til laboratorieanalyse.
- Før installering bestemmes porøsitet af de udtagne stikprøver ved laboratorieanalyse jf. /11/, Bulletin 1: 1995.
- Efter installering testes indbygningsegenskaber for lermembran ved Standard Proctor-forsøg, beskrevet i /11/. Ud fra komprimeringsgraden og laboratorieanalysen af det anvendte materiales oprindelige porøsitet, bestemmes porøsiteten af den udlagte lermembran.

Materialevalg til lermembran følger anbefalinger fra /11/, kapitel 3, for at sikre fysisk styrke, holdbarhed, ensartethed og resistens for kemiske forbindelser i forureningen.

7. Konklusioner

Der er udført beregninger for gennemsnitsforhold på lokaliteten. Beregningerne har til formål at vurdere om tilbagediffusionen af klorerede opløsningsmidler vil give en påvirkning af havvandet, der medfører koncentrationer større end badevands- og miljøkvalitetskriterier. Beregningerne er udført for et hovedscenarium med konservative antagelser. Beregningerne er sat op i Excel med mulighed for at ændre på parameterværdier, således at effekten af ændrede parameterværdier/nye scenarier hurtigt kan vurderes.

De beregnede diffusionsstyrede fluxe er konservative, idet de er beregnet under antagelse af, at koncentrationerne i den intakte ler er konstante over tid. De beregnede fluxe beskriver desuden de maksimale fluxe, der opnås når stationære forhold er opnået. For en lerbarriere på 0,5 m vurderes det med baggrund i litteraturen, at det vil tage årtier før en sådan stationaritet er opnået for ikke sorberende stoffer som VC, mens det vil tage betydeligt længere tid for PCE og TCE, der i højere grad sorberes.

Beregningerne tager ikke højde for nedbrydning af PCE, TCE og VC. Med den lange tidsramme for opnåelse af stationære forhold, er der mulighed for at fluxene vil kunne reduceres som følge af nedbrydning.

På baggrund af de beregnede fluxe, er der beregnet gennemsnitskoncentrationer i sandlagene på havet og på land efter afværge. For vinylchlorid vil der ske en reduktion af de gennemsnitlige koncentrationer med minimum en faktor 80 (på havet) samt en faktor 240 på land, hvilket ligeledes forventes at nedbringe havvandskoncentrationerne til niveauer, der overholder de fastsatte kriterier for vandkvalitet. Det samme gør sig gældende for de øvrige klorerede ethener, for hvilke der også beregnes markante reduktioner i koncentrationer i sandlaget sammenlignet med situationen i dag.

Ved en antagelse om at den samlede flux af henholdsvis PCE, TCE og VC udledes i et punkt langs kysten er der på baggrund af DHI's Dashboardmodel beregnet havvandskoncentrationer for et punkt 50 m nedstrøms udledningen. Disse koncentrationer overskrider ikke hverken badevands- eller miljøkvalitetskravene for de klorerede ethener. Beregningen af havvandskoncentrationer er konservativ, da fluxen reelt vil udledes over et meget større areal langs kysten samt fra havbunden. Den reelle fortynding af fluxen vurderes derfor at være større end den anvendte minimumsfertynding for en punktudledning langs kysten.

I forhold til den rene ler, som skal udlægges over den intakte ler, kan det med baggrund i beregningerne anbefales, at porøsiteten for leren er så lav som muligt. Derudover vil et højt indhold af

organisk stof bidrage til at forsinke diffusionen gennem leren, og dermed øge tiden til eventuel nedbrydning.

Der er tale om meget lange tidshorisonter for opnåelse af stationære forhold. Der gøres i den forbindelse opmærksom på, at kysten ved Himmarnk strand påvirkes af sedimenttransport og erosionsprocesser. Disse vil over tid kunne påvirke stoftransportprocesserne for den tilbagediffererende forurening, hvilket dette notat ikke tager højde for.

8. Referencer

- /1/ BEK nr 1625 af 19/12/2017. Bekendtgørelse om fastlæggelse af miljømål for vandløb, søer, overgangsvande, kystvande og grundvand. Miljø- og fødevareministeriet.
- /2/ Matrix Diffusion Toolkit. User's manual. Version 1.0. September 2012. https://clu-in.org/download/contaminantfocus/dnapl/Detection_and_Site_Characterization/MatrixDiffusionToolkit_UsersManual.pdf
- /3/ 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.
- /4/ 523-05725 – Himmarnk Strand, Nordborg. Indsats overfor jordforurening, Videregående undersøgelse- Oktober 2019. Dansk Miljørådgivning A/S.
- /5/ 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. Environ. Sci. Technol. 1989, 340-349
- /6/ DHI (2006). Fortynding langs danske kyster. Miljøstyrelsen. Projekt nr. 53504
- /7/ Afværge ved Himmarnk Strand. Datagrundlag og undersøgelser. Rambøll Maj 2021.
- /8/ Notat vedr. vejledende grænseværdier for forurening ved Himmarnk Strand, Miljøstyrelsen, 13. maj 2020.
- /9/ Himmarnk Strand, Nordborg, Videregående undersøgelser. Udarbejdet af DMR for Region Syddanmark 2019 (opdateret 2020)
- /10/ Remedial Design Characterization and Remedial Alternatives Analysis Report. Udarbejdet af Ejlskov for Danfoss A/S, oktober 2019
- /11/ Dansk Standard (1999) DS INF 466 – Membraner til deponeringsanlæg. 1. udgave. København.
- /12/ Bear, J. (1972) Dynamics of Fluids in Porouse Media. American Elsevier, New York, USA.
- /13/ Freeze, A. & Cherry, J. (1979) Groundwater. ISBN: 0-13-365312-9.
- /14/ Devlin, J. F. (2015) HydrogeosieveXL v.2.3.9. University of Kansas.
- /15/ Peche & Houben (2022) Estimating Characteristic Grain Sizes and Effective Porosity from Hydraulic Conductivity Data. Groundwater. <https://doi.org/10.1111/gwat.13266>.