

Foryndingsberegninger og modellering

Fortyndingsberegning

Kalundborg Refinery A/S

Dato: 24. November 2022

Rev.nr.	Dato	Beskrivelse	Udarbejdet af	Kontrolleret af	Godkendt af
01	20220808	Draft	TEB	KLBU	TEB
02	20221124	Final, opdatering af fig.	TEB	KSCH	TEB

Indhold

1.	Indledning.....	5
2.	Hydraulisk model.....	5
2.1.	Modelopsætning	5
2.1.1.	Beregningsnet	5
2.1.2.	Vandstand og strøm.....	7
2.1.3.	Modelperiode	7
2.1.4.	Bathymetri	8
2.1.5.	Kilder	9
2.1.6.	Salinitet	11
2.1.7.	Vind	14
2.1.8.	Verifikation.....	14
3.	Spredningsmodel	16
3.1.	Modelopsætning	16
3.1.1.	Udledningskoncentrationer	16
3.1.2.	Eksisterende koncentrationer i Kalundborg Fjord	16
4.	Fortyndingsresultater	17
4.1.	Generel fortynding	17
4.2.	Generelle MKK.....	18
4.3.	Maksimale MKK.....	20
4.4.	Det generelle MKK i 95% af tiden.....	20
5.	Referencer.....	23

Appendix

Appendix 1 : Arsen, Årsmiddel kocation
Appendix 2 : Barium, Årsmiddel kocation
Appendix 3 : Kobber, Årsmiddel kocation
Appendix 4 : Selen, Årsmiddel kocation
Appendix 5 : Zink, Årsmiddel kocation
Appendix 6 : Benz(a)pyren, Årsmiddel kocation
Appendix 7 : Bor, Årsmiddel kocation
Appendix 8 : Kobolt, Årsmiddel kocation
Appendix 9 : Uran, Årsmiddel kocation

1. Indledning

Dette notat, er bilag 1 til notat omkring fortyndingsberegninger for udledning af rensset spildevand fra Kalundborg Refinery A/S.

2. Hydraulisk model

De hydrauliske strømme i Kalundborg Fjord modelleres med MIKE3 HD, som er en 3-dimensional numerisk hydraulisk model. Modellen medtager effekter fra varierende vandstande, vind, lufttryk og densitetsforskelle mellem det udledte brakke spildevand og den salte recipient. Den hydrauliske model har til hensigt at bestemme de horisontale og vertikale strømme i Kalundborg Fjord for at kunne bestemme spredningen af de udledte stoffer.

2.1. Modelopsætning

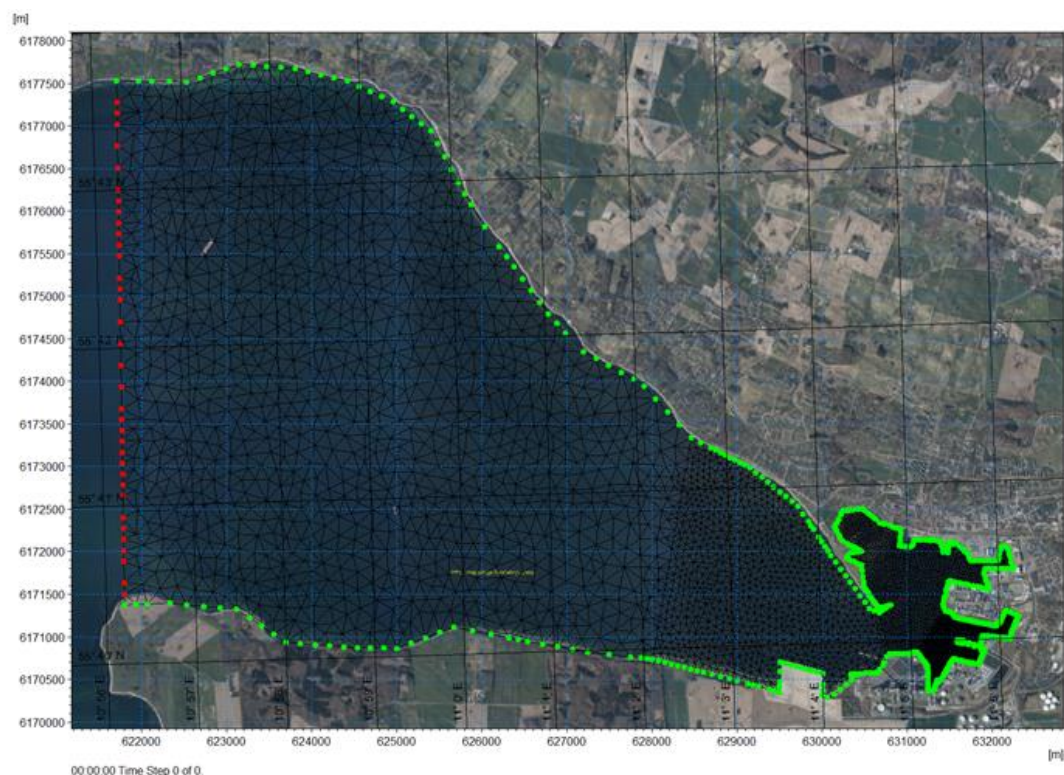
Generelt anvendes standardværdier i modelopsætningen.

2.1.1. Beregningsnet

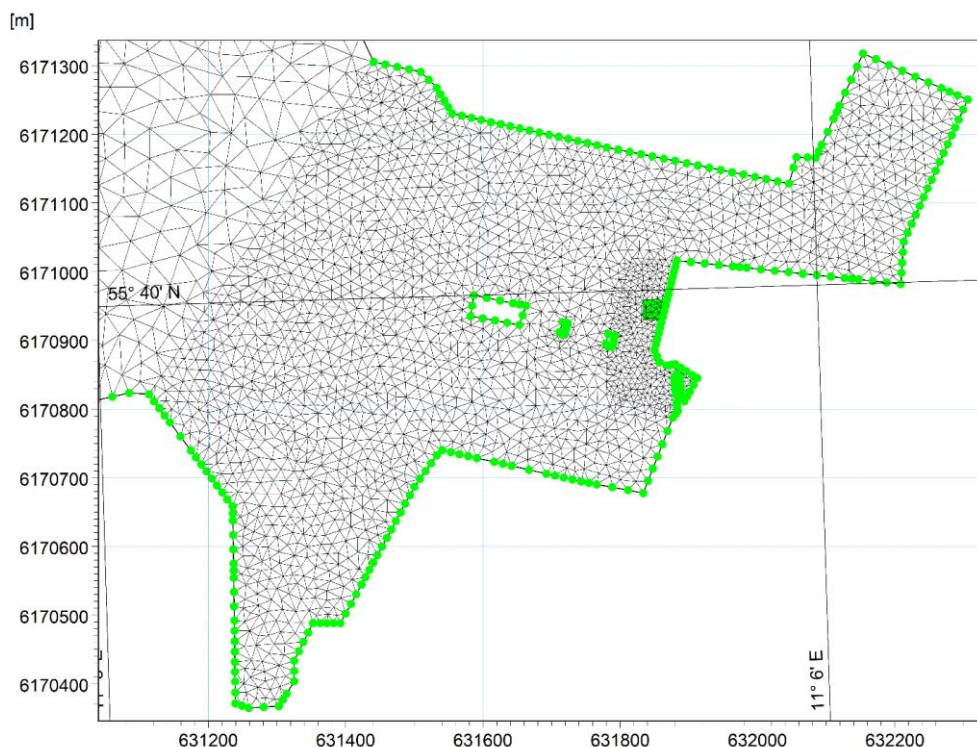
Modellen dækker hele Kalundborg Fjord med en åben rand ud mod Storebælt. Kalundborg Fjord er et lukket system, hvor strømmene i fjorden er domineret af tidevandsbevægelserne og kun i mindre grad af vindforholdene. Der er i modellen ikke medtaget effekter fra åudløb til fjorden.

Horisontalt er modellen inddelt i en række triangulære elementer som vist på **Error! Reference source not found.** og **Error! Reference source not found.** Elementerne er maksimalt 25.000 m² i den yderste del af fjorden og falder gradvist til 5.000 m², 1.000 m², 200 m² og til 50 m² i nærfeltet omkring udledningspunktet.

Vertikalt er modellen inddelt i 10 sigma-lag, der betyder, at elementerne udgør 1/10 af vanddybden på den aktuelle lokalitet.



Figur 2.1: Omfang af model samt beregningsnet



Figur 2.2: Beregningsnet af Kalundborg Havn omkring oliepien, som udgør nærfeltet omkring udløbspunktet. Udløbspunktet er vist med grøn firkant.

2.1.2. Vandstand og strøm

På den åbne rand i modellen, ud mod Storebælt, påsættes vandstand og strøm som randbetingelse. Randbetingelsen fås fra en regional hydraulisk model over Kattegat og Storebælt og kendes for året 2014.

Modellens resterende rand udgøres af fjordens kyster og påsættes derfor randbetingelsen "land".

2.1.3. Modelperiode

På baggrund af vandstanden målt i Kalundborg Havn kan vandudskiftningen i Kalundborg Fjord estimeres for derefter at bestemme en måned, hvor vandudskiftningen i fjorden er gennemsnitlig. For indeværende projekt haves vandstandsmaalinger for hvert 10. minut siden maj 2008 og frem til maj 2019.

Imellem hver måling tages forskellen i vandstanden. Denne forskel er et udtryk for den tidsmæssige ændring af vandstanden i Kalundborg Havn og kan dermed bruges til at estimere den relative vandudskiftning, idet en positiv ændring vil betyde, at vand løber ind i fjorden og en negativ forskel vil betyde, at vand løber ud af fjorden.

Forskellen i vandstanden summeres på månedsbasis og fremgår af **Error! Reference source not found.** For at opnå en periode uden nettotilførsel af vand til fjorden søges en måned, hvor vandstandsforskellen summeres til 0, således at lige store mængder vand strømmer ind i fjorden, som der strømmer ud af fjorden.

Tabel 2.1: Tidslige vandstandsforskelle summeret på månedsbasis. Værdier på 0 angiver, at lige store mængder vand strømmer ind i fjorden, som der strømmer ud af fjorden og angives med HVID baggrund. RØD angiver 5 % fraktilen, og GRØN angiver 95 % fraktilen

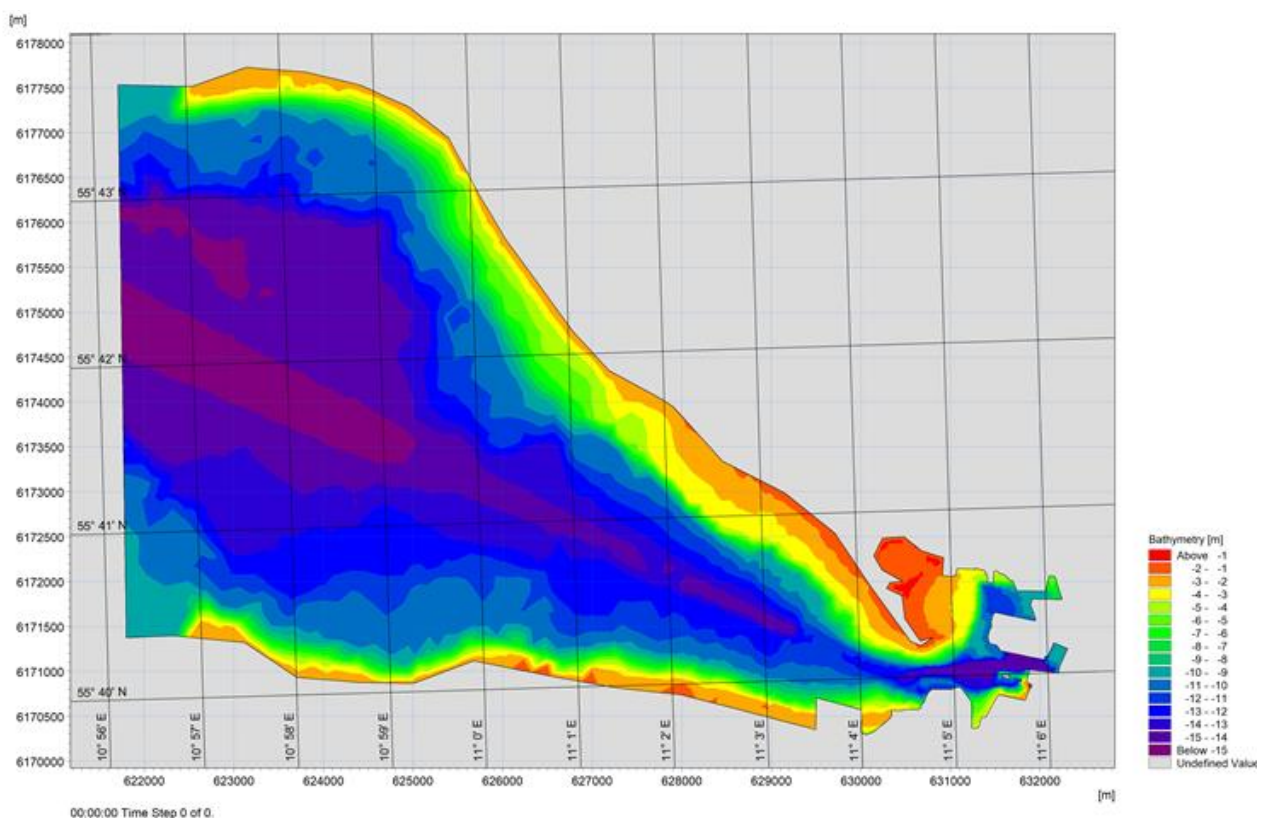
Måned \ år	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
01		0.00	-0.09	-0.18	-0.13	0.05	-0.26	0.24	0.49	-0.05	-0.07	-0.30
02		-0.09	0.23	-0.11	-0.03	-0.29	0.44	-0.36	-0.37	0.15	-0.13	0.22
03		0.12	-0.04	0.07	0.69	-0.02	-0.31	0.21	-0.05	0.08	0.19	0.18
04		-0.12	-0.13	-0.01	-0.55	-0.22	-0.04	0.03	-0.19	-0.26	-0.15	-0.21
05	-0.08	0.20	0.06	0.18	0.24	0.06	-0.28	-0.06	0.17	-0.03	-0.15	0.14
06	0.29	-0.04	-0.11	-0.01	0.03	-0.03	0.14	0.05	-0.02	0.04	0.10	
07	-0.13	0.38	-0.16	-0.06	0.14	0.46	0.12	0.00	0.26	0.00	-0.07	
08	0.08	-0.28	0.12	-0.04	0.06	0.34	0.22	0.09	-0.12	0.07	0.08	
09	0.10	0.15	-0.29	-0.06	0.04	-0.63	-0.19	-0.12	0.15	0.06	0.16	
10	0.02	-0.14	0.24	-0.02	0.01	-0.01	-0.12	-0.16	-0.24	-0.28	-0.34	
11	0.21	0.32	-0.21	0.24	0.09	-0.09	-0.08	0.79	0.18	0.07	-0.41	
12	-0.35	-0.18	0.60	-0.42	-0.03	0.20	0.59	-0.91	-0.18	0.10	0.10	

For perioden 2014, hvor randbetingelser til modellen haves, ses april måned som værende perioden, hvor nettotilførslen af vand til fjorden er tættest på 0.

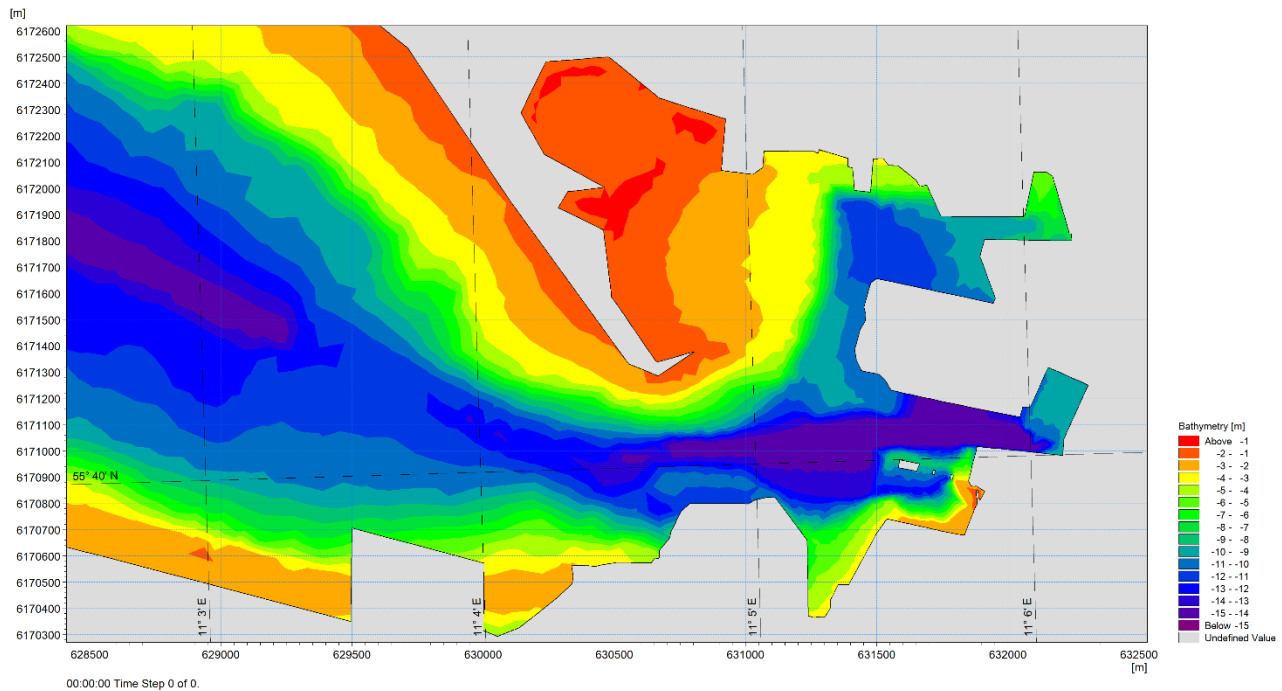
April måned i 2014 vælges som modelperiode.

2.1.4. Bathymetri

Bathymetrien er bestemt ud fra søkort 145 Kalundborg Fjord (Kort & Matrikelstyrelsen, 2009). I modellen er den nyeste havneudvidelse, Ny Vesthavn, medtaget. Dog er der i modellen ikke taget hensyn til eventuelle uddybninger foretaget i forbindelse med etablering af havneudvidelsen. Modelbathymetrien fremgår af **Error! Reference source not found.** og **Error! Reference source not found.**



Figur 2.3: Bathymetri i modelområdet



Figur 2.4: Bathymetri af Kalundborg Havn

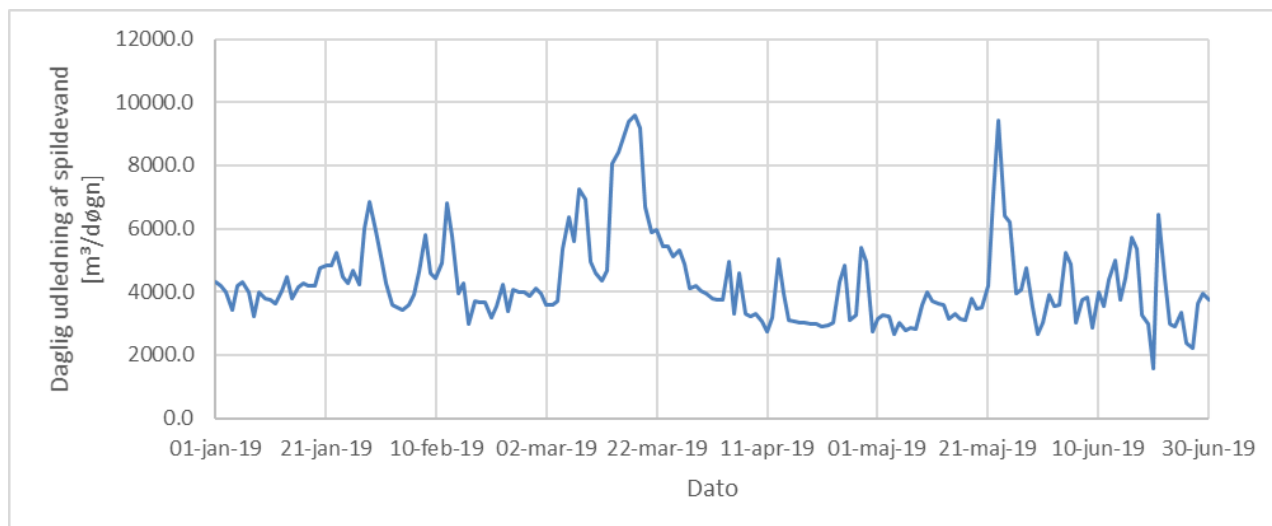
2.1.5. Kilder

Udledningen af rensset spildevand sker gennem kajvæggen lige nord for oliepien i Kalundborg Havn. Udledningen modelleres ved en punktkilde som vist i **Error! Reference source not found.** og i 2 meters dybde. Vanddybden i udledningspunktet er ca. 6 meter.



Figur 2.5: Position af udledningspunktet for modellering af spredning af udledt spildevand.

Equinor har leveret målinger af udledningsraterne for perioden fra den 1. januar 2019 til og med den 30. juni 2019 som vist på **Error! Reference source not found.** Udledningen varierer fra 1574 m³/døgn den 20. juni op til 9571 m³/døgn den 18. marts 2019. For perioden er den gennemsnitlige daglige udledning ca. 4350 m³/døgn.



Figur 2.6: Daglig udledning af spildevand. Data leveret af Equinor.

Udledningen af spildevandet defineres som en punktkilde med 'Jet' formuleringen. 'Jet' formuleringen udleder vand til recipienten med specificeret styrke og retning og kan bedst beskrive de aktuelle forhold.

For at modellere en middelsituation defineres punktkilden med en konstant udledning på 50 l/s svarende til middeldudledningen i første halvdel af 2019. Jetudledningen defineres med en diameter på 107 cm, svarende til den faktiske diameter af udledningsrøret, en horisontal vinkel med nord på 290°, svarende til vinkelret på kajvæggen, og en vertikal vinkel på 0° svarende til horisontal udledning.

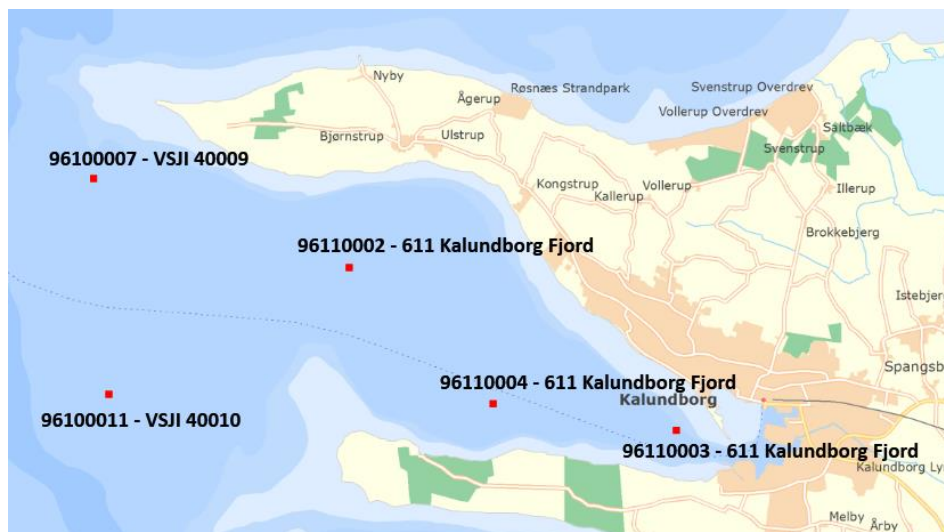
Det udledte spildevand er overvejende fersk, men indeholder salte grundet afsaltningsanlæg. Koncentrationen er dog ukendt og saliniteten er derfor sat til 0 g/l.

Idet spildevandet har en laverer salinitet end recipienten vil spildevandet således også have en laverer densitet. Det udledte spildevand vil af denne grund søge op med overfladen og spredningen er derfor primært styret af overfaldestrømmene omkring udledningspunktet.

2.1.6. Salinitet

Profilmålinger af saliniteten er i Kalundborg Fjord målt på fem lokaliteter som vist på **Error! Reference source not found.**

Stationerne 96100007, 96100011 og 96110004 indeholder kun målinger fra én eller to dage og bruges ikke videre. På station 96110002 er der målinger med ca. en måneds mellemrum fra 1989 og frem til 2010 og igen fra 2017 til 2019. Station 96110003 indeholder målinger med ca. en måneds mellemrum fra 1989 til 2006.



Figur 2.7: Målestationer hvor profilmålinger af salinitet er foretaget i Kalundborg Fjord.

2006 er den seneste periode hvor der er foretaget profilmålinger i den indre og ydre del af Kalundborg Fjord samt digt. I Error! Reference source not found. ses saliniteten gennem vandsøjlen målt i 2006 for station 96110002 og i Error! Reference source not found. for station 96110003.

Der ses god overensstemmelse mellem saltkoncentrationerne mellem de to målestationer og det fremgår at der er tydelig lagdeling i store dele af 2006. Springlaget ligger typisk 7-10 meter under overfalden.

Målingerne indikerer at det tungere salte Kattegatvand strømmer ind i fjorden langs med fjordbunden og en modsat rettet vestgående strøm derved løber i overfladen. Disse strømme forårsaget af salinitetsforskelle er med til at drive vandudskiftningen i fjorden.

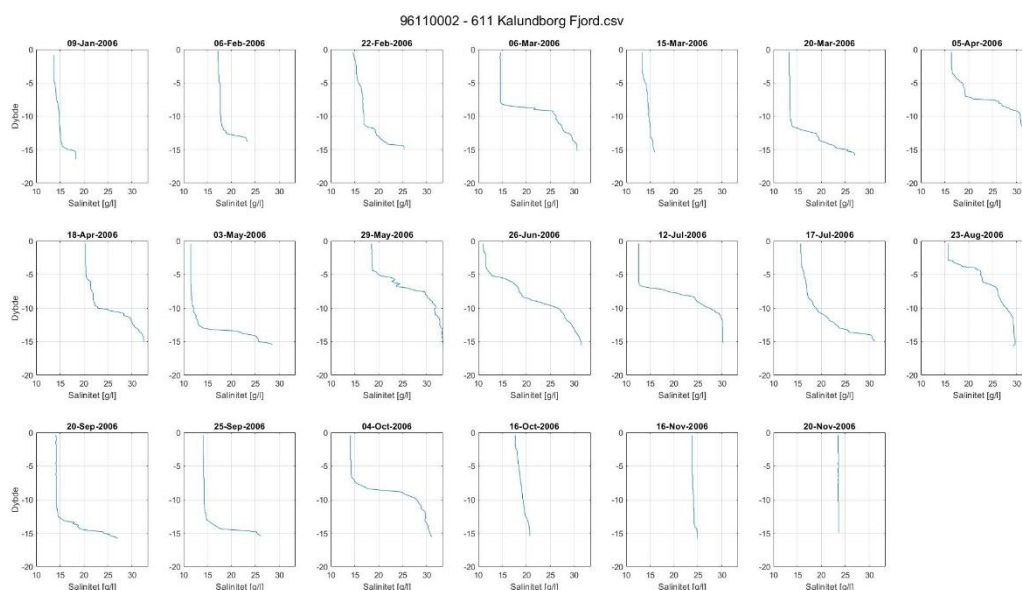
Vanddybden ved udledningspunktet er ca. 6 meter hvorved fjordbunden omkring udledningspunktet ligger over springlaget længere ude i fjorden. Strømme generet af salinitetsforskelle vil derved være mindre dominerende på lavere vand omkring udledningspunktet.

Det udledte spildevand har en lavere densitet end recipienten og vil derved søge mod overfladen. Det udledte spildevand vil derfor primært befinde sig i det øverste 2 meter af vandsøjlen. I overfladen er strømmen i fjorden vinddomineret.

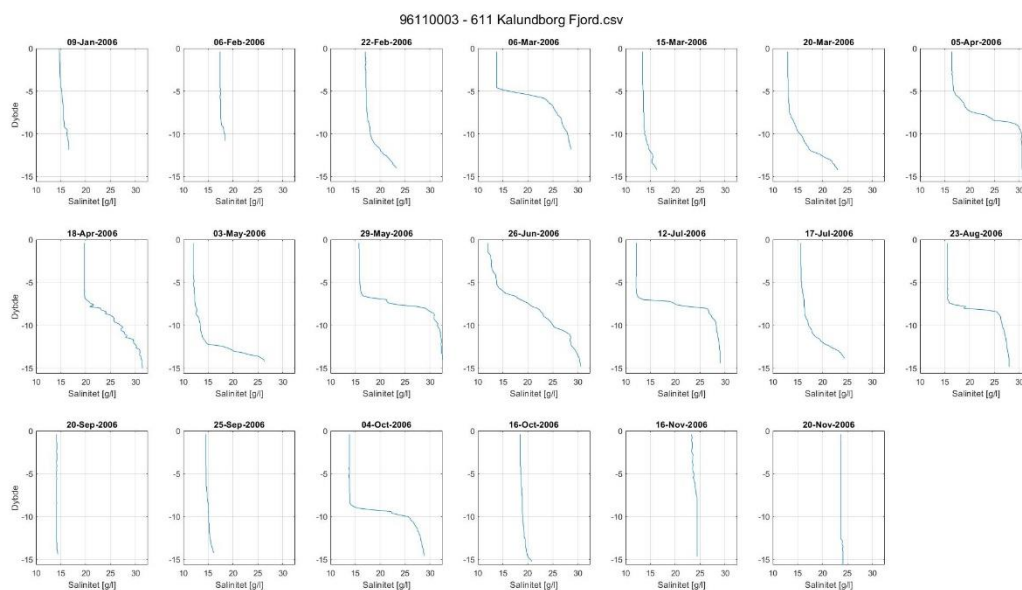
Lagdelingen i Kalundborg Fjord vurderes derfor ikke væsentlig for spredningen af spildevand i nærfeltet omkring udledningspunktet. På baggrund af profilmålingerne anvendes en konstant salinitet på 20 g/l som værende repræsentativ for saliniteten i Kalundborg Fjord.

Saliniteten sættes som initialbetingelse i hele recipienten og som randbetingelse.

[Insert image here]



Figur 2.8: Profilmålinger af saliniteten for station 96110002 i den ydre del af Kalundborg Fjord, jf. **Error! Reference source not found.**, foretaget i 2006. Saliniteten er angivet i g/l og dybden i m.

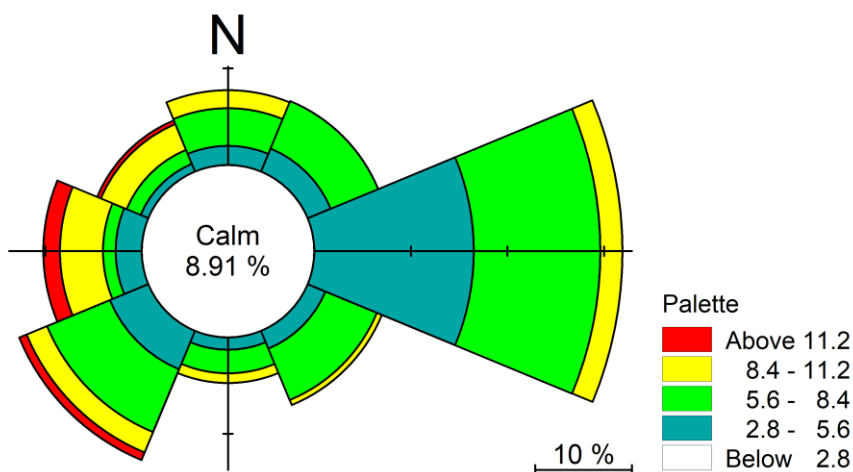


Figur 2.9: Profilmålinger af saliniteten for station 96110003 i den indre del af Kalundborg Fjord, jf. **Error! Reference source not found.**, foretaget i 2006. Saliniteten er angivet i g/l og dybden i m

2.1.7. Vind

Vind er påsat modellen i form af lufttryk samt vindstyrker og -retning 10 m over middelvandstanden fra (ECMWF, 2019). Vindfeltet har en rumlig opløsning på ca. 27 km og en tidslig opløsning på 1 time.

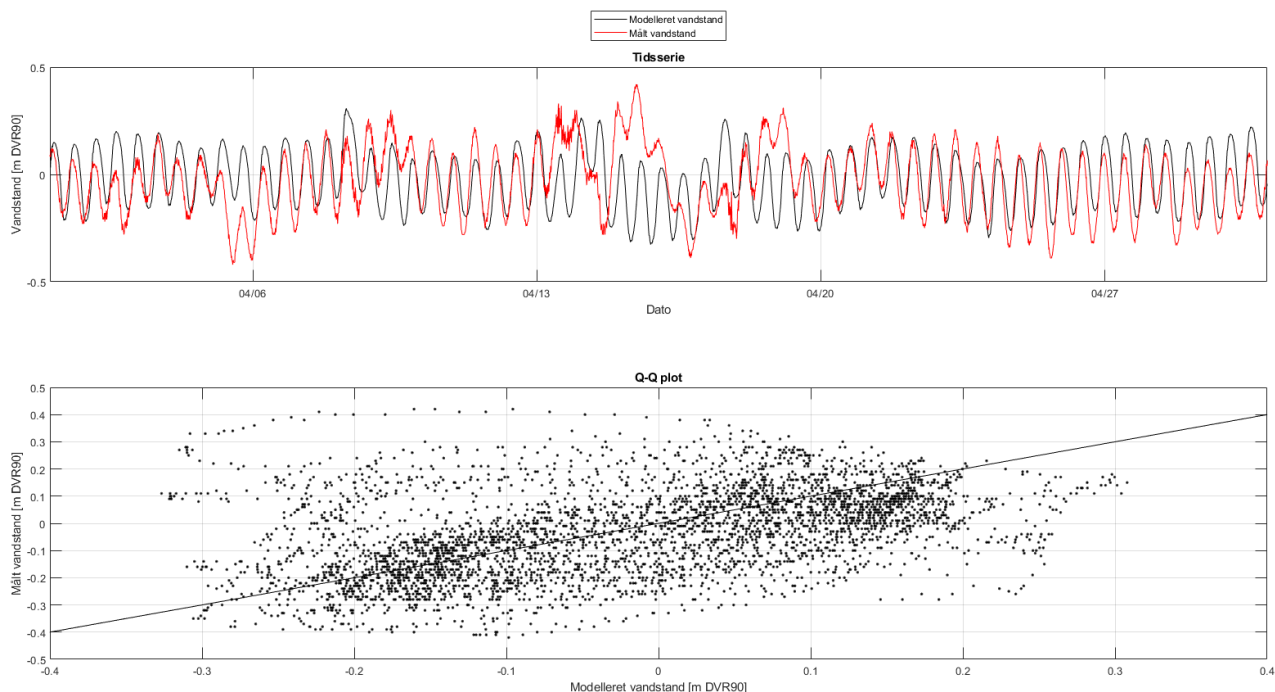
I **Error! Reference source not found.** ses vindrosen for Kalundborg Havn for modelperioden, hvor det ses at i cirka halvdelen af tiden er vinden mellem nordøst og sydøst, og det stærkeste vinde er fra vest.



Figur 2.10: Vindrose for Kalundborg Havn for modelperioden april 2014.

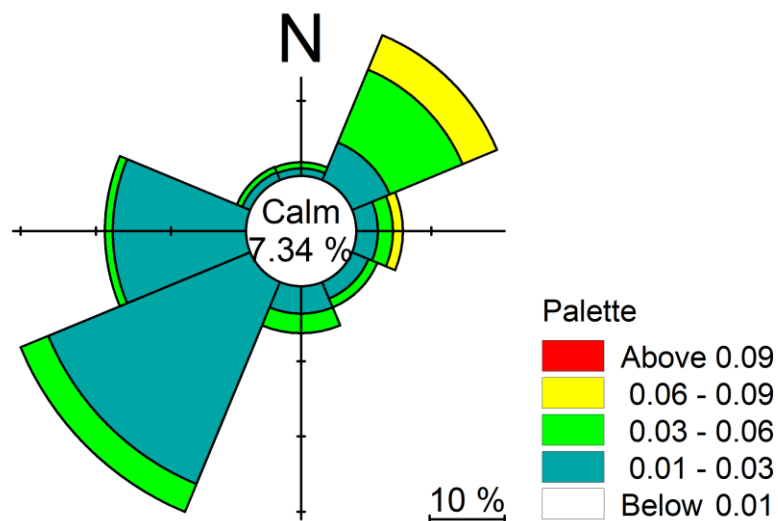
2.1.8. Verifikation

Modellen verificeres ved sammenligning af den modellerede vandstand i Kalundborg Havn med den målte for samme periode som vist i **Error! Reference source not found.** Tidevandsfasen ses at passe, dog er der mindre variation i tidevandsamplituderne. Det vurderes dog ikke at have stor indflydelse på vandskiftet i fjorden og på spredningen af spildevandet.



Figur 2.11: Sammenligning af modelleret vandstand med målt vandstand i Kalundborg Havn. Øverst sammenlignes tidsserier. Nederst sammenlignes modellerede og målte værdier på samme tidspunkt.

I Error! Reference source not found. ses strømrøsen for den modelleret overfladestrøm nær udledningspunktet. S trømrøsen viser en dominerende kajparallel strømning med overvægt af strømme mod sydvest.



Figur 2.12: : Strømrøse for overfladestrømmen i Kalundborg Havn nær udledningspunktet.

3. Spredningsmodel

Spredningen af de udledte stoffer modelleres med MIKE3 AD, som køres samtidigt med den hydrauliske model. MIKE3 AD er en advektion/diffusions model, der medtager effekter som spredning pga. densitetsforskelle af stofferne og spredning pga. strømninger i vandmasserne.

3.1. Modelopsætning

Generelt anvendes standardværdier i modelopsætningen. For fuld oversigt over modelparameter henvises til **Error! Reference source not found.** Modellen er kørt for et hele året 2014 for at medtage årstidsvariationerne i vurdering af koncentrationsniveauet i fjorden.

3.1.1. Udledningskoncentrationer

Stofkoncentrationer i det udledte spildevand er angivet i (Miljø- & Fødevareministeriet. Miljøstyrelsen, 22. maj 2009). Stofkoncentrationer målt i februar og december 2018 som total og som filtreret. I modelberegningerne anvendes den højeste målte filtrerede værdi for hvert enkelt stof som en konservativt betragtning. Benzo(a)pyren er ikke påvist i målingerne, men stoffet anbefales at medtages i modellen med en koncentration svarende til detektionsgrænsen på 0,01 µg/l jf. brev fra Miljøstyrelsen til Equinor.

Udledningskoncentrationer anvendt i modellen er angivet i **Error! Reference source not found.**

Stofkoncentrationer påføres det vand, der tilføres modellen gennem punktkilden defineret i afsnit 2.1.5 Kilder.

3.1.2. Eksisterende koncentrationer i Kalundborg Fjord

Stofferne findes i Kalundborg Fjord i forvejen. De eksisterende koncentrationer (IFFK) i recipienten anvendt i modellen fremgår af **Error! Reference source not found.** Eksisterende koncentrationerne påsættes som initialbetingelse i hele modelområdet og som randbetingelse på den åbne rand mod Storebælt.

Tabel 3.1: Udledningskoncentrationer og eksisterende koncentrationer i Kalundborg Fjord anvendt i modelberegninger. Tal i parentes angiver MKK (miljøkvalitetskrav) inklusive naturlig baggrundskoncentration (gælder kun for metaller). IFFK; i forvejen forekommende koncentration – dvs. baggrundskoncentrationen i fjorden (Storebælt).

	Udledt konc ug/l (total)	IFFK (Storebælt)	Naturlig baggrund	Tissø vand	Generelle MKK med Tissø	Generelle MKK	Maksimum MKK
Enhed:	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Arsen	1.8	2	1.45			(0.6) 2.05	(1.1) 2.55
Barium	213.3	11.25	5.78	42,8	48,6	(5.8) 11.58	(145) 150.78
Kobber	3.3	0.34	0.25	2,8	3,8	1. 1.25	2. 2.25
Selen	3.7	0.1	0.001	0,46	0,54	(0.08) 0.081	(31) 31.001
Zink	8.7	3.21	0.21			(7.8) 8.01	(8.4) 8.61
Benz(a)pyren	0.01	0	-			1.7 * 10 ⁻⁴	0.027
Bor	260	2475	2475			(94) 2569	(2080) 4555
Kobolt	0.4	<0.2	0.03			(0.28) 0.31	(34) 34.03
Uran	2.8	1.88	1.88			(0.015) 1.90	(2.3) 4.18

4. Fortyndingsresultater

Resultater af spredningsmodelleringen præsenteres som

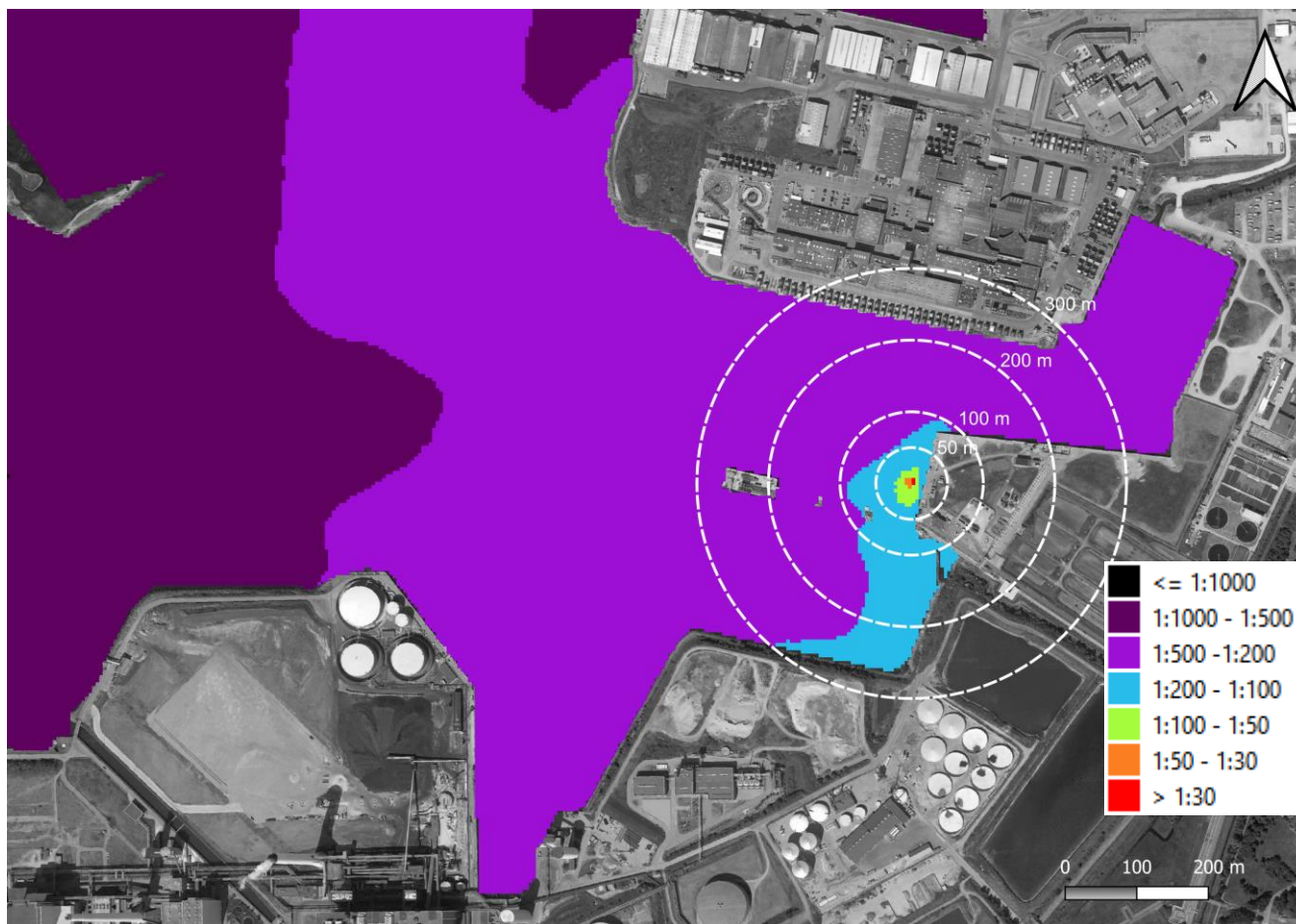
- 1) Den generelle fortynding dvs. den fortynding som der sker ved opblandingen af det udledte vand i fjorden
- 2) Varighed af koncentrationer over det generelle MKK
- 3) Varighed af koncentrationer over det maksimale MKK
- 4) Udbredelsen med koncentration over det generelle MKK i 95% af tiden

Hvis stofkoncentrationen er højere i det udledte vand end den eksisterende koncentration i recipienten, vil udledningen øge den resulterende koncentration i recipienten. Omvendt vil koncentrationen falde i recipienten hvis koncentrationen i det udledte vand er lavere end i recipienten.

Først nævnte er gældende for Barium, Kobber, Selen, Zink, Benz(a)pyren, Kobolt og Uran, mens sidste nævnte er gældende for Arsen og Bor – for disse 2 stoffer hvor udledningskoncentrationen er mindre end den eksisterende koncentration i recipienten og for de stoffer hvor MKK er overskredet i mindre end 1 time/år vise resultatet ikke. Herudover skal det bemærkes at IFFK for Selen er højere end det generelle MKK.

4.1. Generel fortynding

I middel over året vil der ske en fortynding af det udledte spildevand svarende til mere end 1:100 inden for de første 40 m og 1:200 inden for de 100 m mod nord og vest og ca. 300 m mod syd, Figur 4.1.



Figur 4.1: Gennemsnitlig fortynding af det udledte spildevand.

Den estimeret gennemsnitlige koncentration for et år er for hver stof præsenteret i Appendix 1 til Appendix 9.

4.2. Generelle MKK

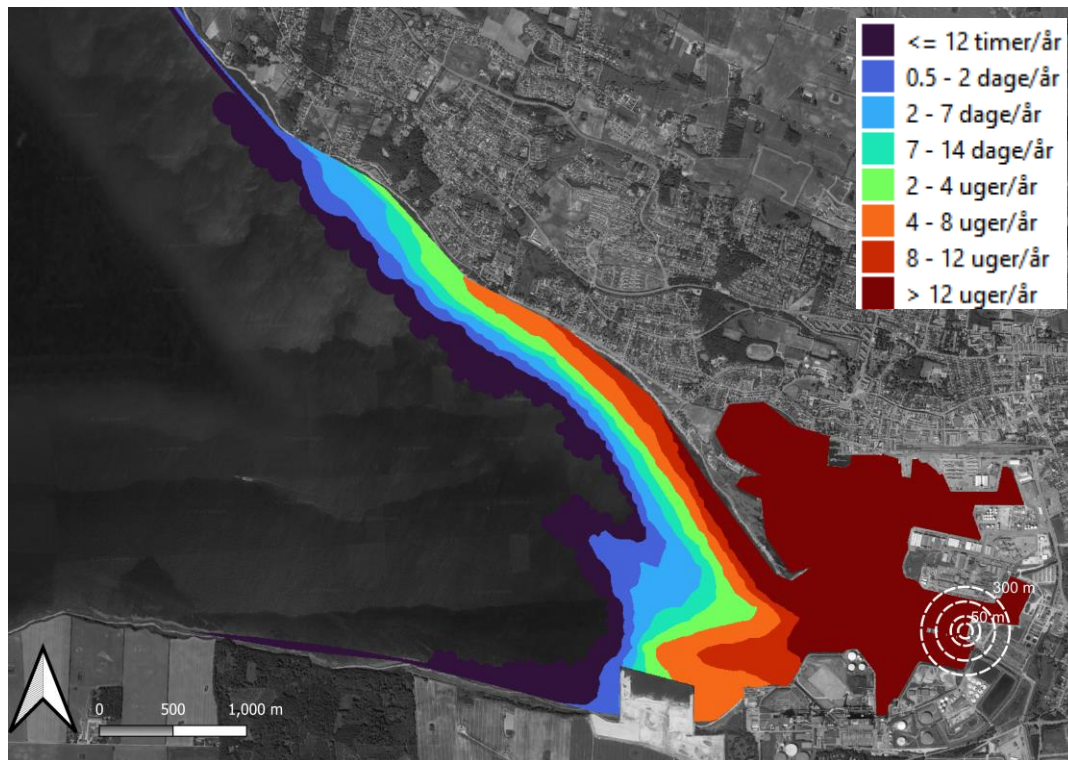
Det generelle MKK overskrides for Barium, Benz(a)pyren og Uran, mens niveauet for de resterende stoffer ligger under det angivne kriterium.

For de 3 stoffer forekommer Koncentrationer over MKK:

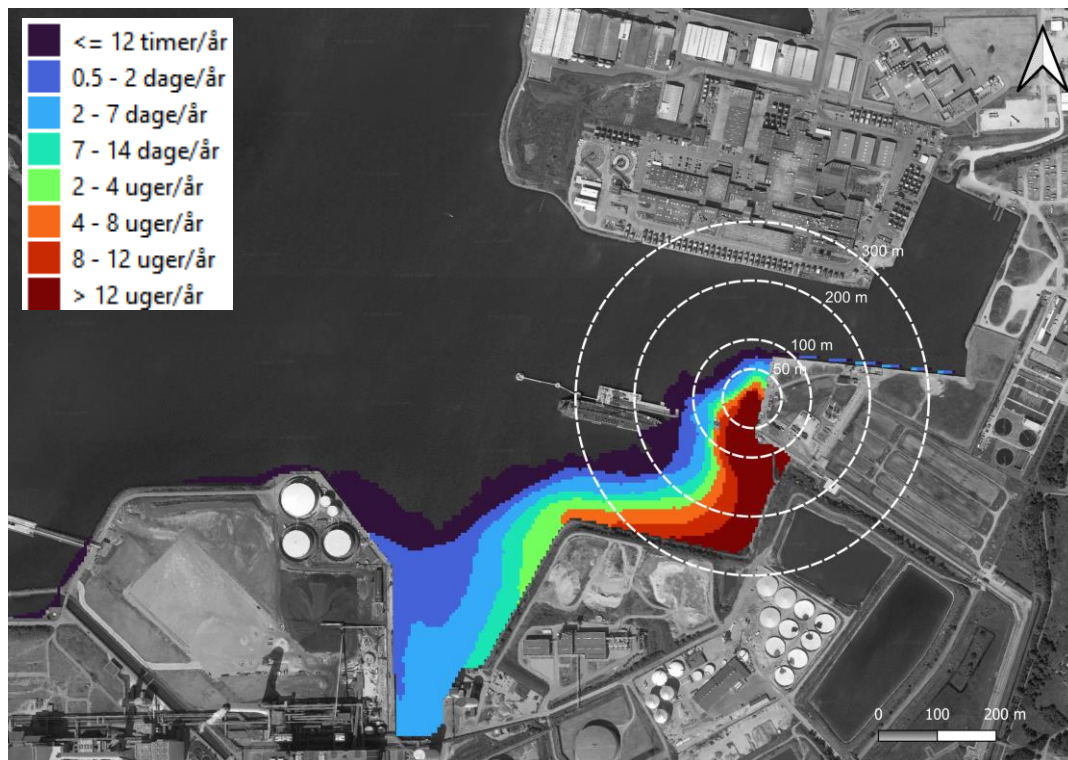
Barium: tæt på kilden i mere end 95%, i inderfjorden i mere end 12 uger/år og op langs kysten i yderfjorden i mere end 12 timer/år.

Benz(a)pyren: inden for de første 50 m mod syd i mere end 50% af tiden, i hjørnet mod syd i mere end 30% af tiden inden for 300 m zonen, 300 m fra kilden mod sydvest er varigheden 12 uger/år og inden for 1 km mod sydvest er varigheden under 12 timer/år

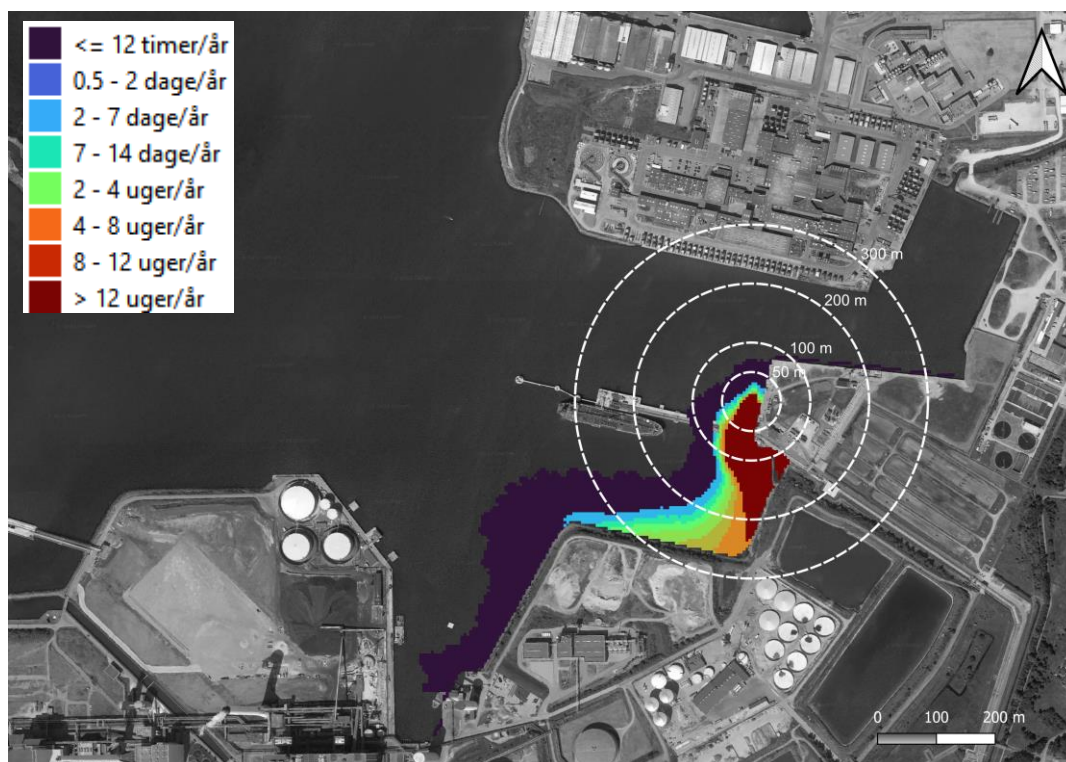
Uran: 50 m mod er varigheden 27% af tiden, den højeste inden for 200 m mod syd 15% af tiden og ca. 750 m mod sydvest under 12 timer/år.



Figur 4.2: Barium, varighed med koncentrationsniveauer over MKK.



Figur 4.3: Benz(a)pyren, varighed med koncentrationsniveauer over MKK.



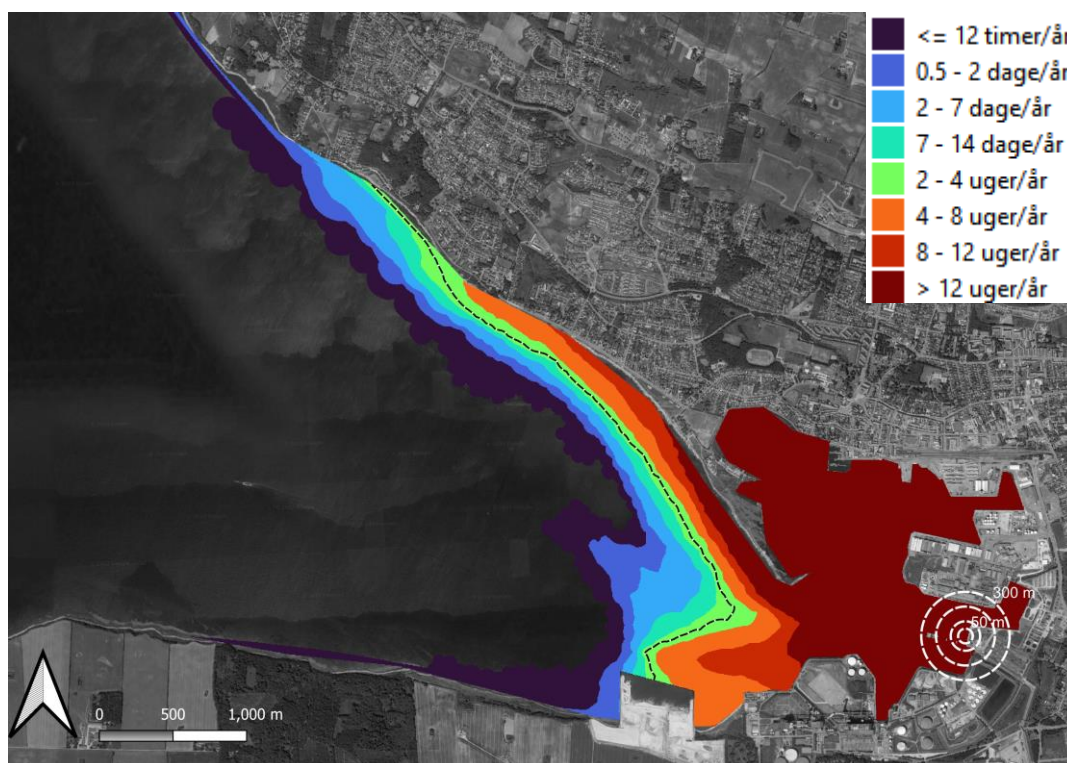
Figur 4.4: Uran, varighed med koncentrationsniveauer over MKK.

4.3. Maksimale MKK

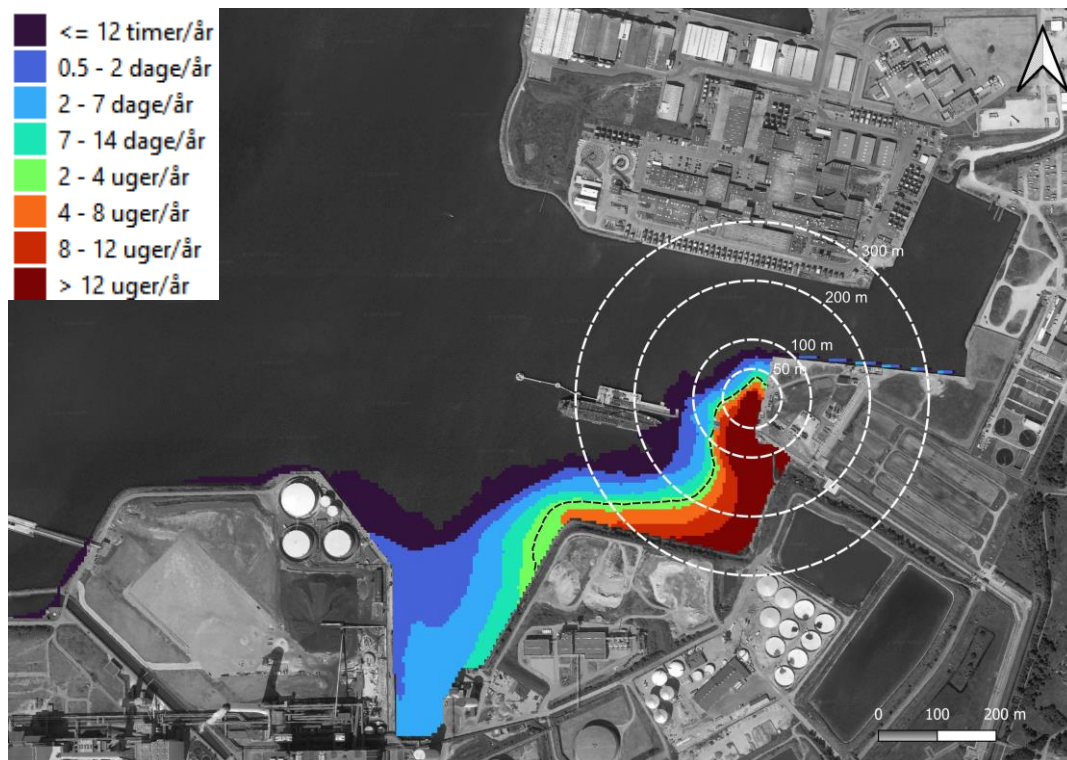
For ingen af de undersøgte stoffer kommer koncentrationen over det angivet kriterium, efter initialfortynding i udledningspunktet har fundet sted. Det er derfor ikke muligt at modellere end udbredelseszone for de enkelte stoffer.

4.4. Det generelle MKK i 95% af tiden

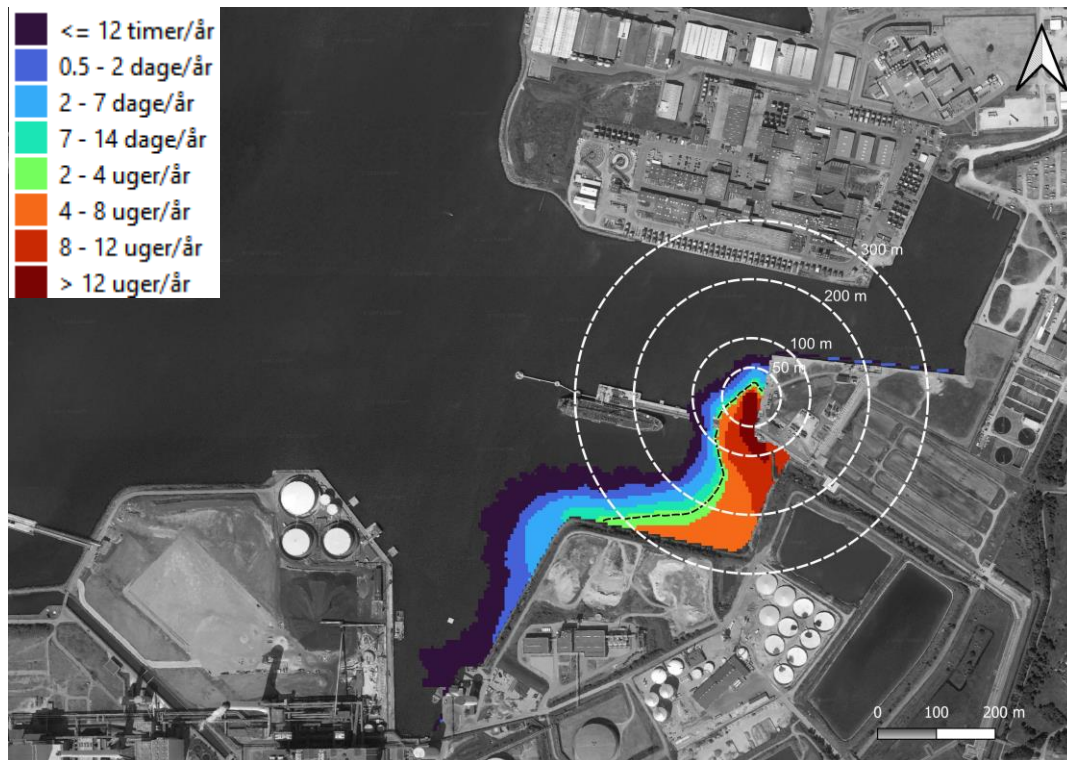
Tiden med koncentrationer for hhv. Barium, Benz(a)pyren og Uran over det generelle MKK er vist på Figur 4.5, Figur 4.6 og Figur 4.7.



Figur 4.5: Barium, markering af område (øst fra den stiplede sorte linje) med koncentrationer over MKK i mere end 95% af tiden.



Figur 4.6: Benz(a)pyren, markering af område (øst fra den stiplede sorte linje) med koncentrationer over MKK i mere end 95% af tiden.



Figur 4.7: Uran, markering af område (øst fra den stiplede sorte linje) med koncentrationer over MKK i mere end 95% af tiden.

5. Referencer

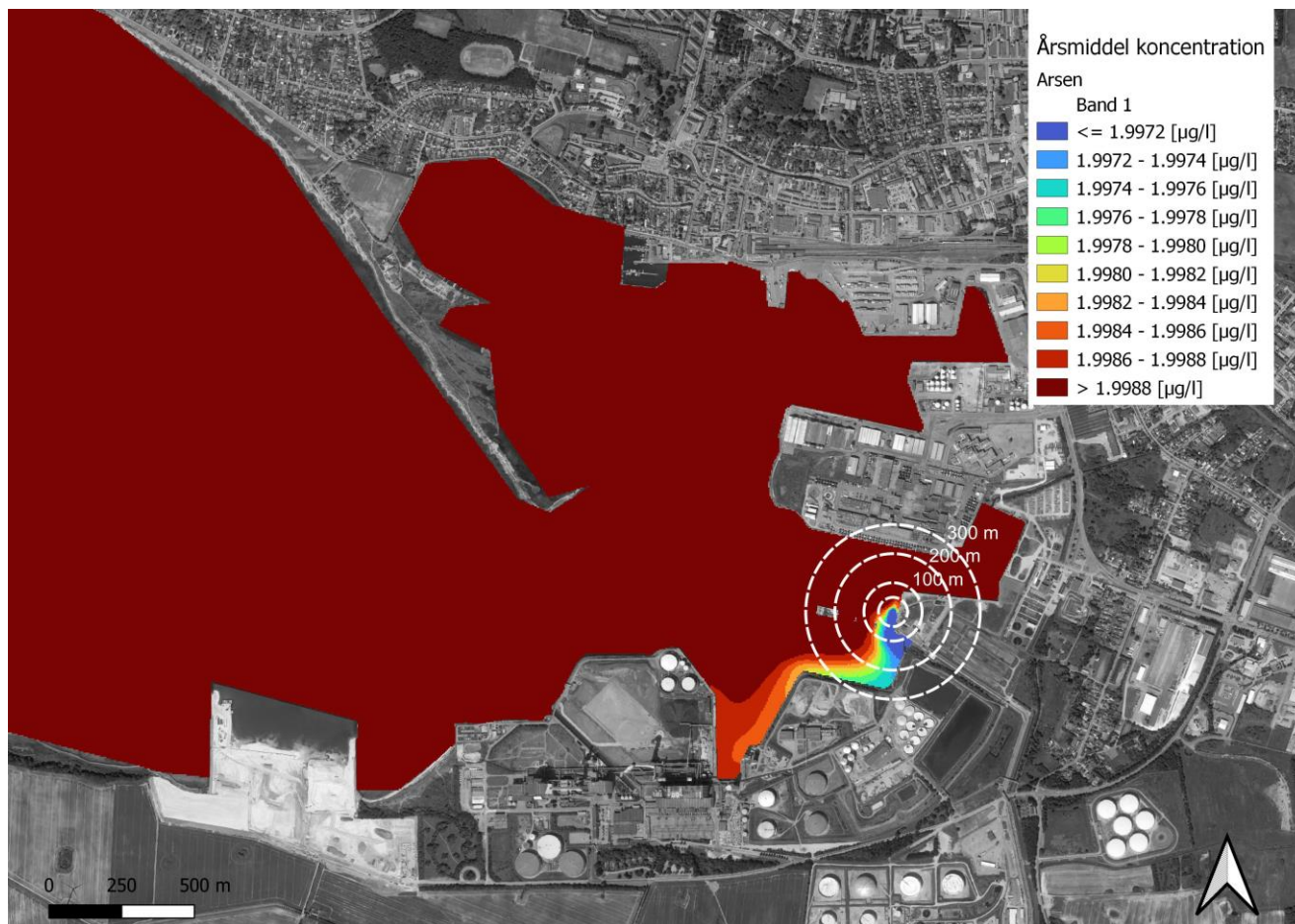
ECMWF. (01. 03 2019). *Climate Data Store*. (ECMWF) Hentet fra

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>

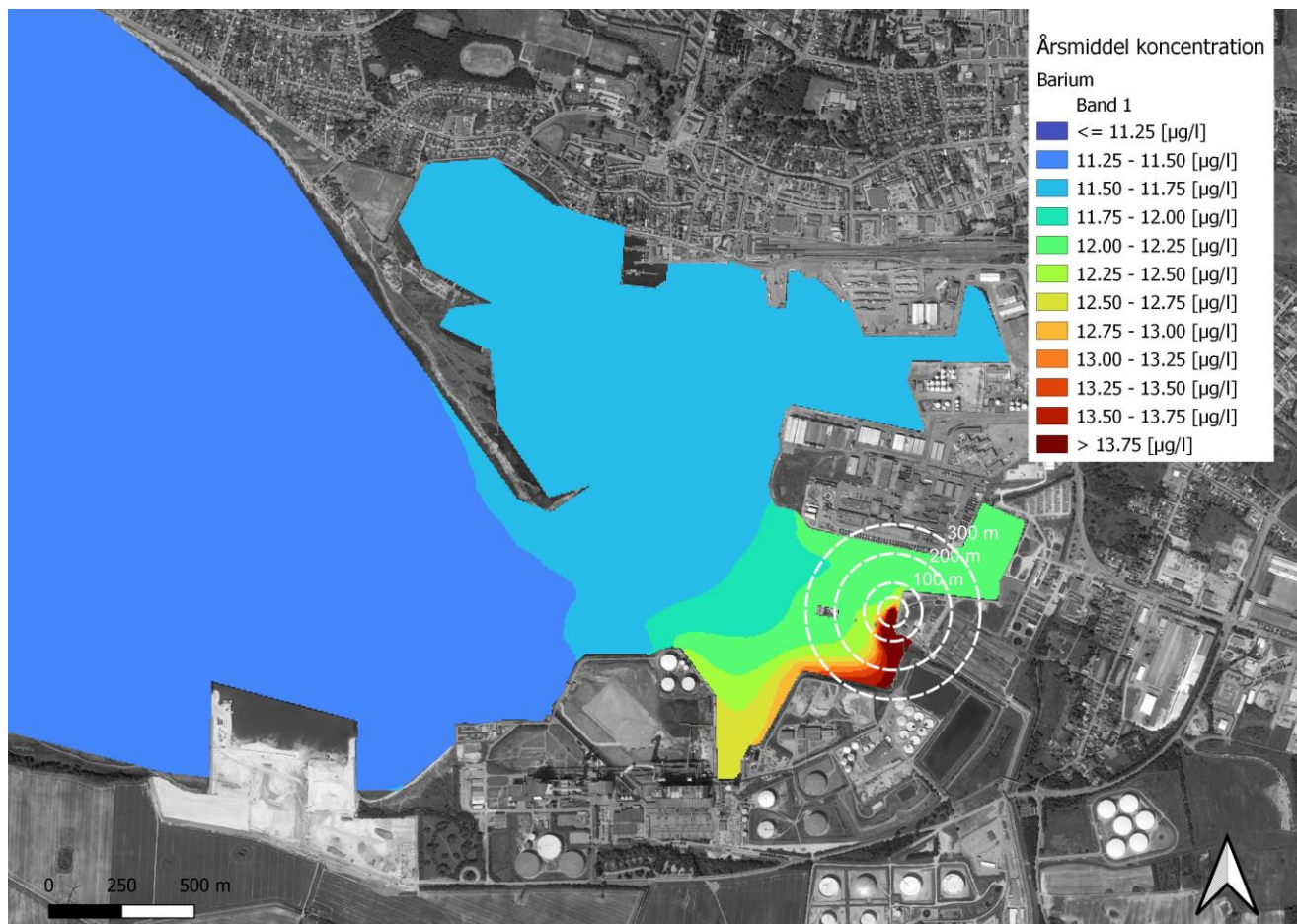
Kort & Matrikelstyrelsen. (2009). Kort & Matrikelstyrelsen, Danmark.

Miljø- & Fødevareministeriet. Miljøstyrelsen. (22. maj 2009). *Miljøstyrelsens anmodning om fortyndingsberegning for en række stoffer i spildevandet (opdateret)*.

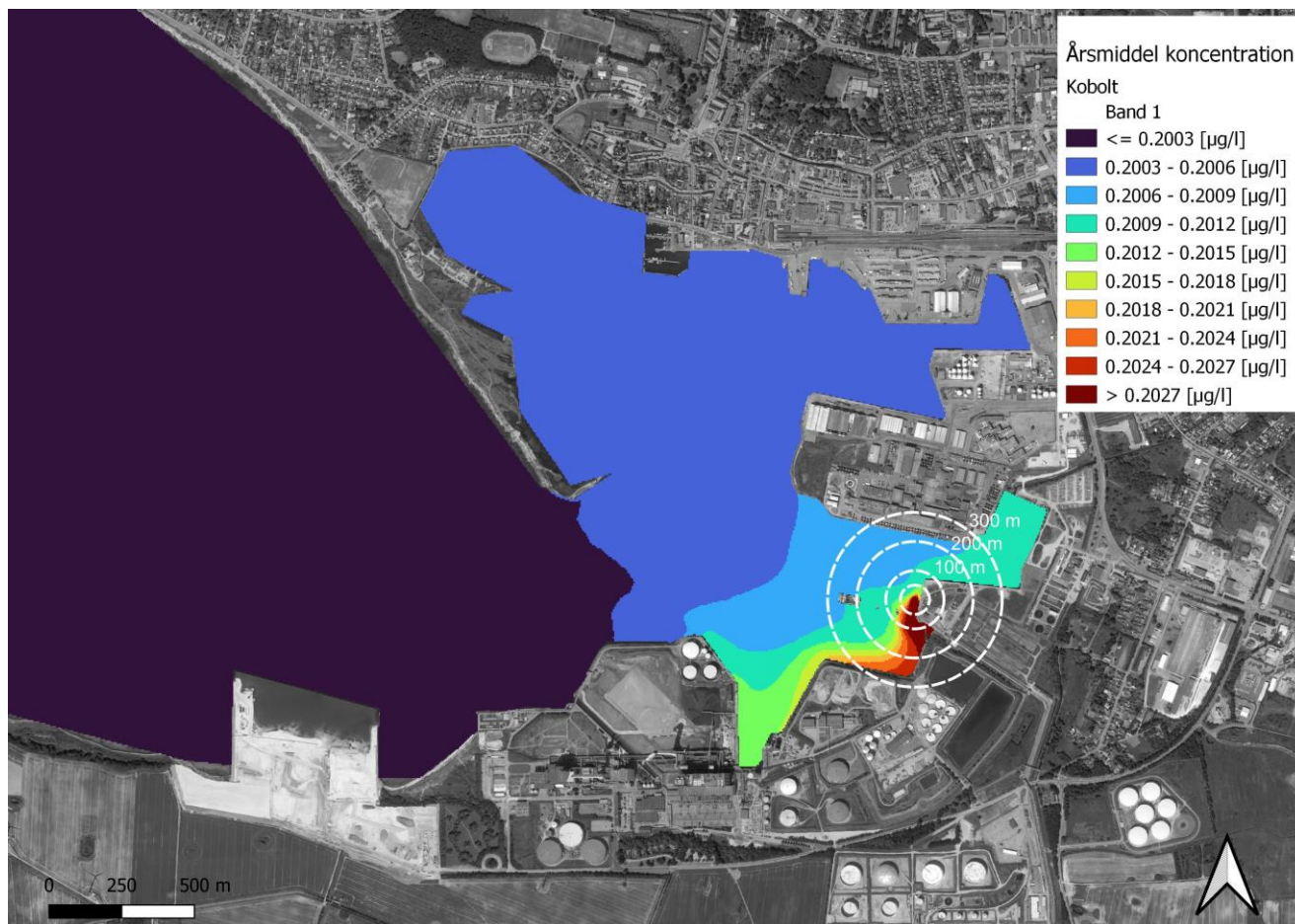
Appendix 1: Arsen, Årsmiddel koncentration



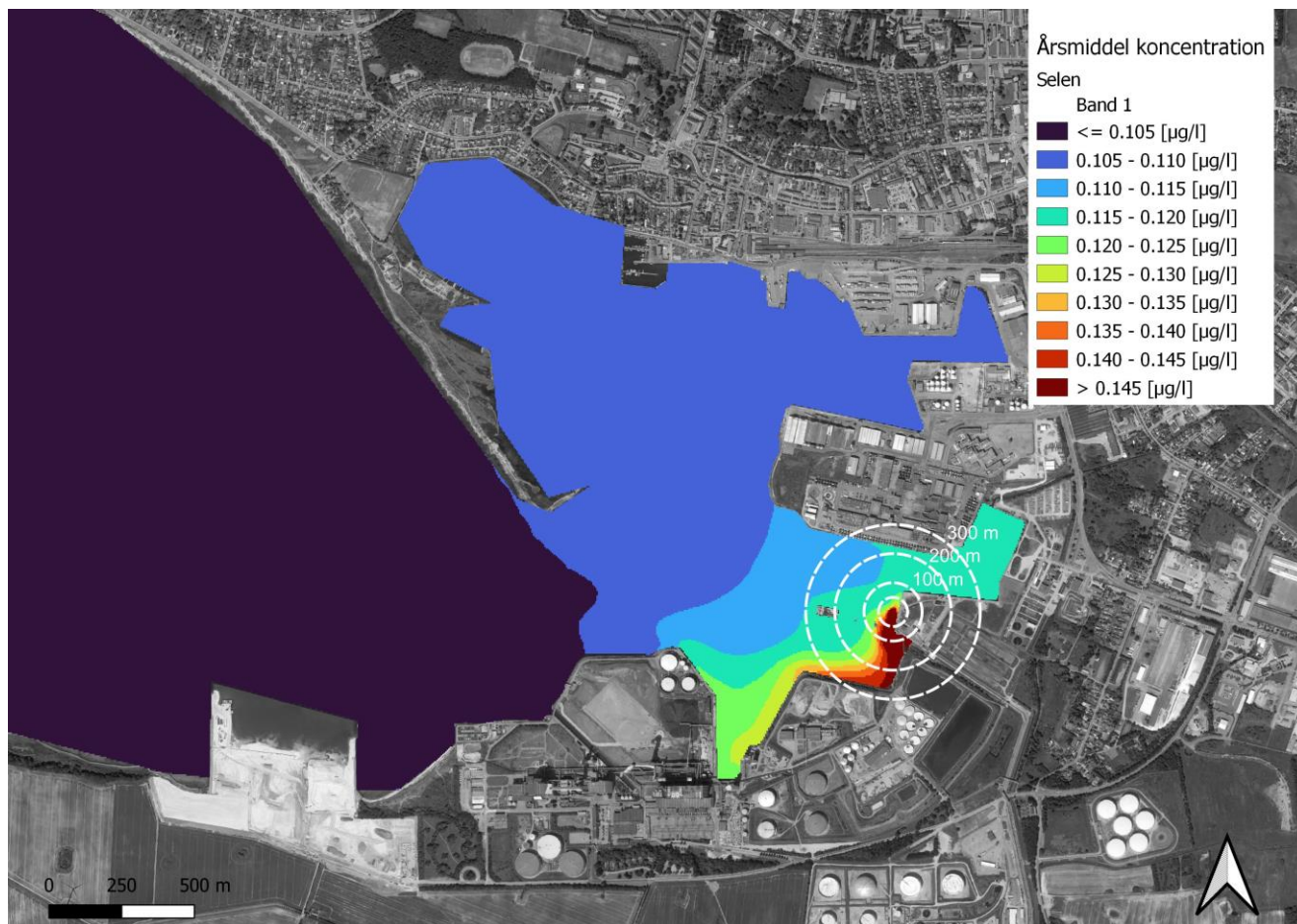
Appendix 2: Barium, Årsmiddel koncetration



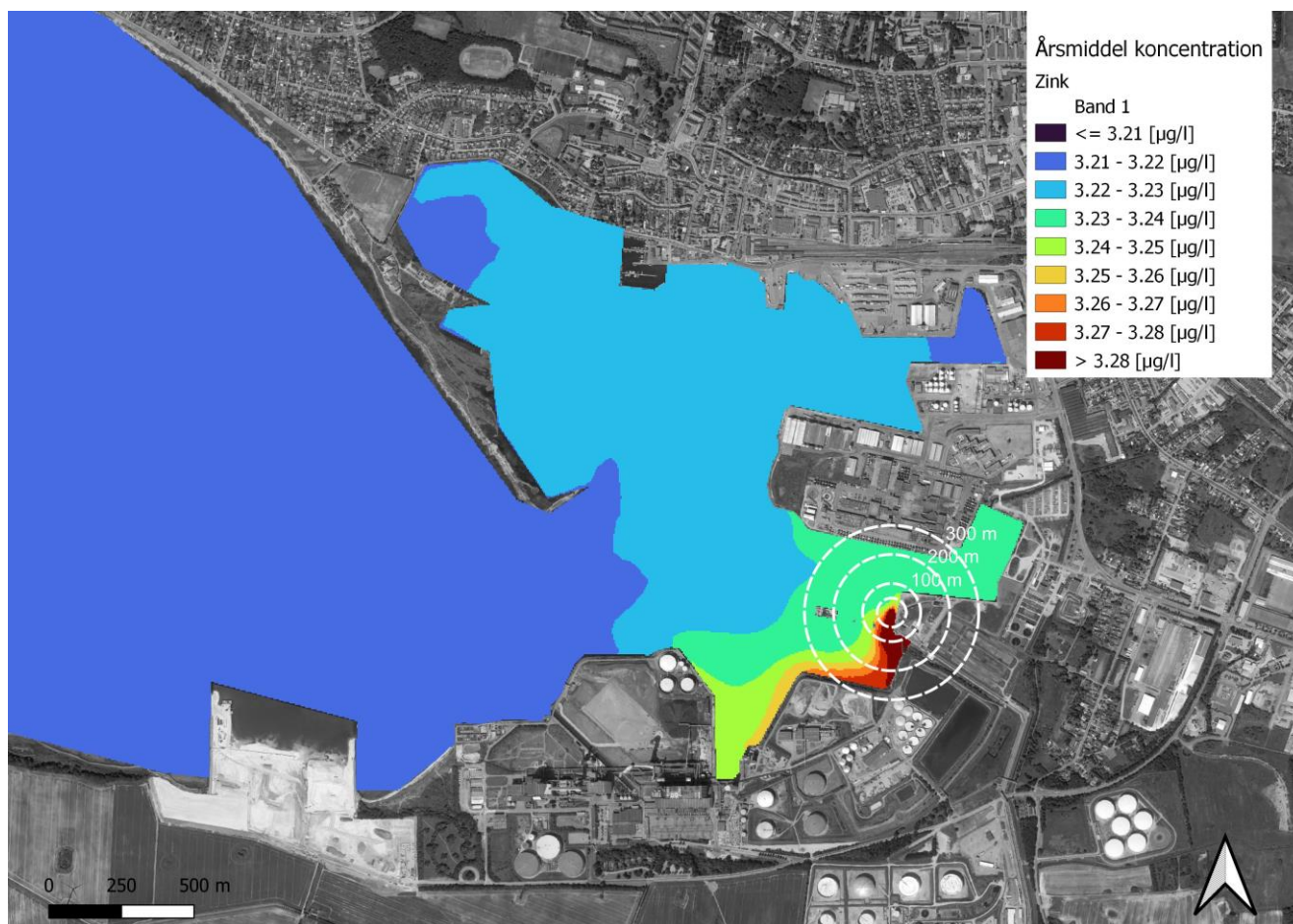
Appendix 3: Kobber, Årsmiddel koncentration



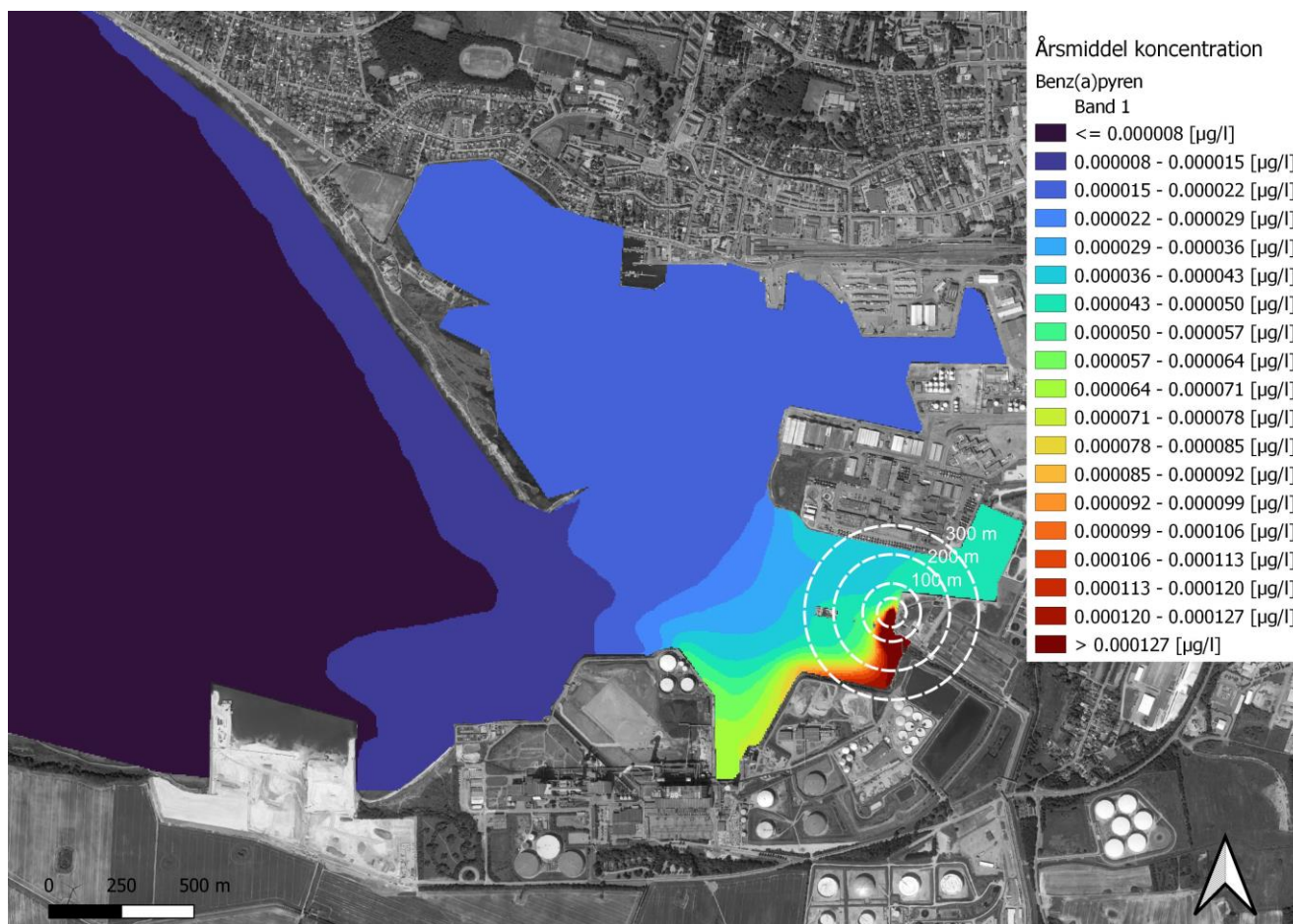
Appendix 4: Selen, Årsmiddel koncetration



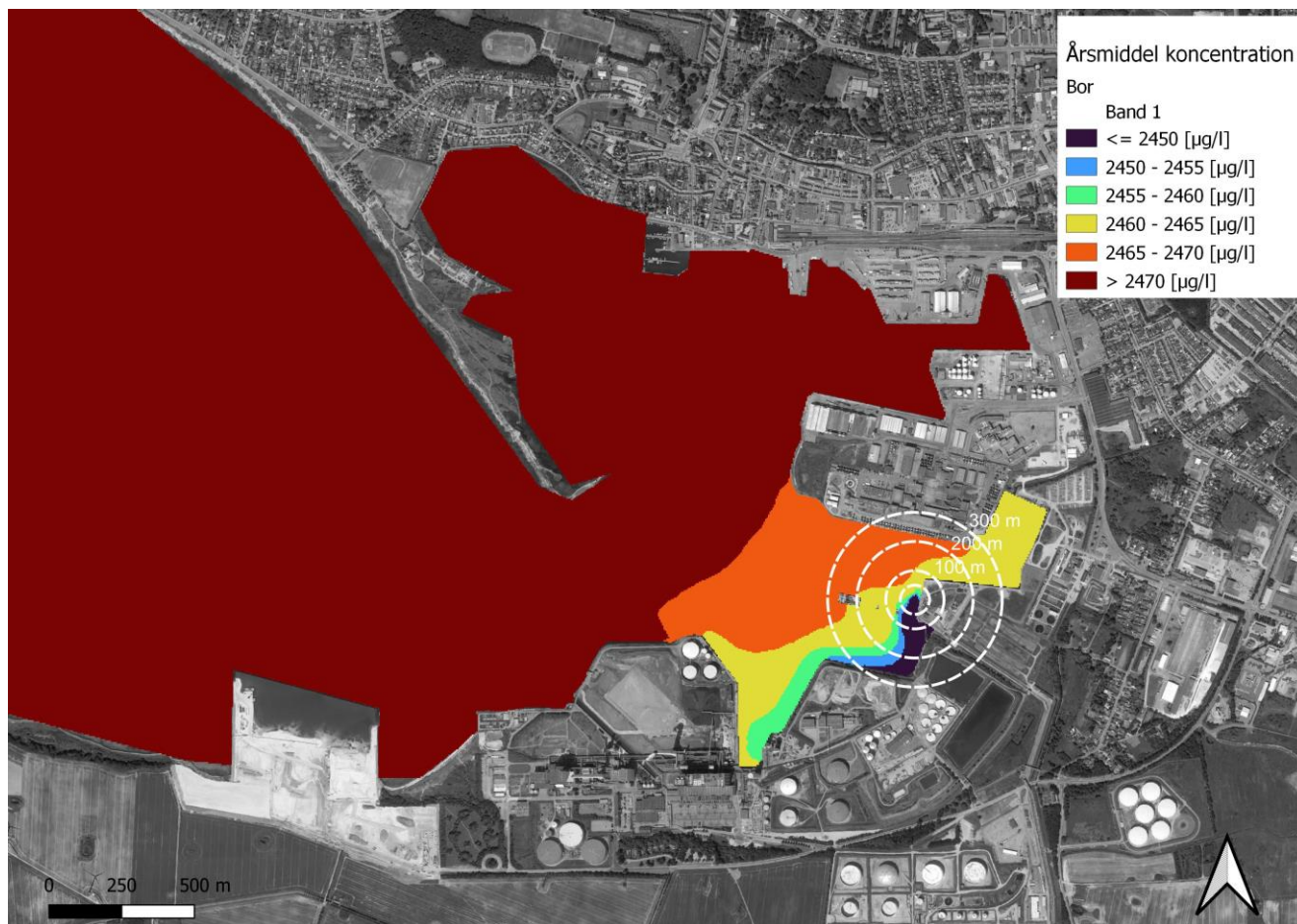
Appendix 5: Zink, Årsmiddel koncentration



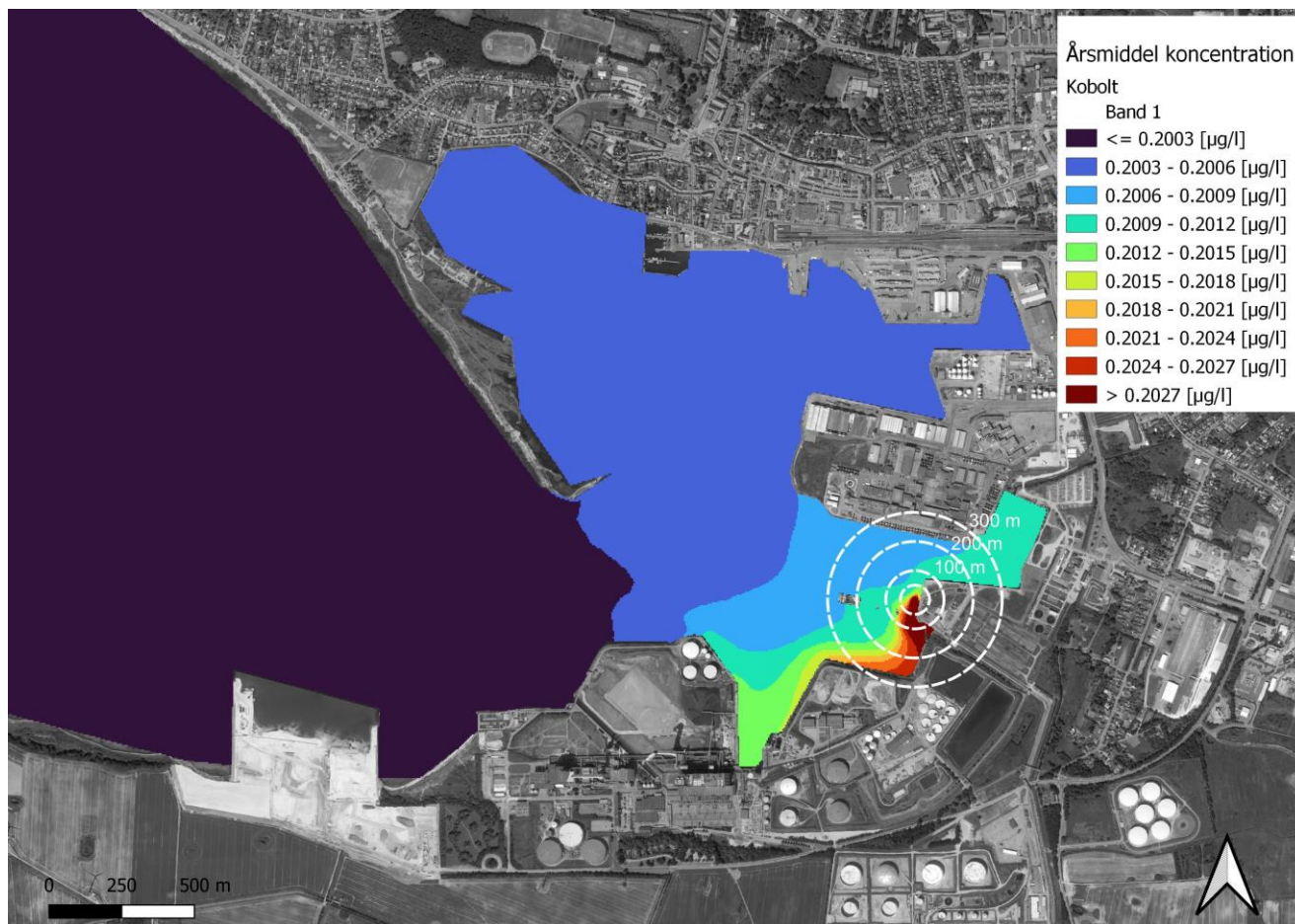
Appendix 6: Benz(a)pyren, Årsmiddel koncetration



Appendix 7: Bor, Årsmiddel koncentration



Appendix 8: Kobolt, Årsmiddel kocation



Appendix 9: Uran, Årsmiddel koncetration

