

# Geostatistiske analyser av miljøgifter i mudringsområde Borg 1



# RAPPORT

**Hovedkontor**

Gaustadalléen 21  
0349 Oslo  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 22 18 52 00  
Internett: www.niva.no

**NIVA Region Sør**

Jon Lilletuns vei 3  
4879 Grimstad  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 37 04 45 13

**NIVA Region Innlandet**

Sandvikaveien 59  
2312 Ottestad  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 62 57 66 53

**NIVA Region Vest**

Thormøhlensgate 53 D  
5006 Bergen  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 55 31 22 14

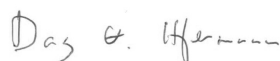
Tittel Geostatistiske analyser av miljøgifter i mudringsområde Borg 1	Løpenr. (for bestilling) 7057-2016	Dato 29.02.2016
	Prosjektnr. Undernr. 15374	Sider Pris 56
Forfatter(e) Hjermann, Dag Øystein	Fagområde Marin forurensing	Distribusjon
	Geografisk område Østfold, Fredrikstad, Glomma	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Rambøll AS	Oppdragsreferanse
--------------------------------	-------------------

**Sammendrag**

I forbindelse med planlagt mudring av området Borg 1 (innseilingen til Borg Havn, Fredrikstad kommune) har Rambøll AS foretatt kjemisk analyse av 227 sedimentprøver hentet fra 96 overflateprøver/kjerner i mudringsområdet. På bakgrunn av dette laget Rambøll AS et 3D-kart over sedimentmasser som kan deponeres i dypvannsdeponi i sjø (antatt forurensingsklasse 1-3) og masser som skal deponeres på land (antatt forurensingsklasse 4-5). Et slikt kart forutsetter at forurensingen er korrelert horisontalt og vertikalt, dvs. at prøver som ligger nær hverandre er mer like i kjemisk sammensetning enn prøver som ligger langt fra hverandre. Vi fant at disse forutsetningene stemmer i prinsippet, men forurensingen varierer imidlertid på relativt liten skala i forhold til den typiske avstanden mellom prøvene, slik at usikkerheten er stor. Spesielt gjelder det for sedimenter fra 1 til 2 meter under eksisterende sjøbunn. Av de 9 kjerner som er analysert for alle stoffer på mange eller alle dyp, var 4 sterkt forurenset i dype lag (under 1 m). Det synes å være spesielt mye forurensing i 10-30 cm dybde, der 67% av prøvene var i forurensingsklasse 4-5 (tallet er usikkert grunnet få prøver). Andelen forurensing i de andre dybdelagene ned til 2 m varierte ganske lite (fra 28% for 0.5-1 og 1-2 m dybde til 37% i 30-50 cm dybde). Volumberegninger tyder på at det er meget usikker forurensingsklasse for en del av mudringsmassene som man planlegger å deponere i dypvannsdeponi. Vi fant at det er betydelig usikkerhet i forureningsstilstand for en del av sedimentene (33% av det totale mudringsvolumet) som er kartlagt for deponering i sjø. Dersom disse sedimentene har omtrent samme volumandelen av forurensingsklasse som de analyserte prøvene (32%), betyr dette at et realistisk worst-case-scenario er at ca. 10% av det totale mudringsvolumet kan være "feilklassifisert" for sjødeponi. Det anbefales å utføre flere kjemiske analyser av innhentede kjerner, og innhente nye kjerner for enkelte områder. Forurensingen består av både metaller, PAH'er, PCB og TBT. Forurensing av tungmetaller er ikke en god pekepinn på forurensingsklasse generelt; bruk av tungmetaller som indikator på forurensing generelt vil føre til at en bare fanger opp omtrent halvparten av sedimentet med forurensingsklasse 4-5.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. Forurensing	1. Pollution
2. Miljøgifter - marin	2. Environmental contaminants - marine
3. Statistikk	3. Statistics
4. Sedimenter	4. Sediments



Dag Hjermann  
Prosjektleder



Kai Sørensen  
Forskningsleder

# **Geostatistiske analyser av miljøgifter i mudringsområde Borg 1**

## Forord

Denne rapporten er skrevet på oppdrag av Rambøll i forbindelse med den planlagte mudringen i området Borg 1. Jeg vil rette en takk til Tom Øyvind Jahren og Aud Helland ved Rambøll for godt samarbeid, Tore Slåtten (Rambøll) for hjelp og tålmodig forklaring av 3D-kartene, og til Hanne Vidgren (Rambøll) samt Tor-Petter Johnsen og Kai Sørensen (NIVA) for gode og konstruktive kommentarer på tidligere utkast.

Oslo, 28.06.2016

*Dag Ø. Hjermann*

---



# Innhold

	1
<b>Sammendrag</b>	<b>5</b>
<b>Summary</b>	<b>6</b>
<b>2. Innledning</b>	<b>7</b>
2.1 Bakgrunn	7
2.2 Mål med rapporten	7
2.3 Kort beskrivelse av området	7
<b>3. Metoder</b>	<b>11</b>
3.1 Datamateriale	11
3.1.1 Miljøgiftkonsentrasjoner i kjerneprøver	11
3.1.2 3D-modell	12
3.2 Statistiske metoder	12
3.2.1 Samvariasjon mellom stoffer	12
3.2.2 Analyse av enkeltstoffer	12
3.2.3 Korrelasjon vertikalt innen hver kjerne	12
3.2.4 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet: maksimum klasseverdi	13
3.2.5 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet, metode 1: geostatistikk	13
3.2.6 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet, metode 2: GAM	14
3.2.7 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet: gjennomføring	15
3.2.8 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet: kryssvalidering	15
3.2.9 Sammenligning av romlig modell med kartlegging av sedimentmasser for sjø- eller landdeponering	16
3.3 Resultater	16
3.3.1 Konsentrasjoner og fordeling av forurensingsklasser	16
3.3.2 Samvariasjon mellom stoffer	20
3.3.3 Klasseverdi for metaller sammenlignet med klasseverdi for andre stoffer	22
3.3.4 Samvariasjon i dybderetning innen hver kjerne	23
3.3.5 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet, metode 1: geostatistikk	25
3.3.6 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet, metode 2: GAM	26
3.3.7 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet: kryssvalidering	28
3.3.8 Sammenligning av romlig modell med kartlegging av sedimentmasser for sjø- eller landdeponering	29
<b>4. Diskusjon og konklusjon</b>	<b>39</b>
<b>5. Referanser</b>	<b>43</b>
<b>6. Appendix</b>	<b>44</b>

## Sammendrag

I forbindelse med planlagt mudring av området Borg 1 (innseilingen til Borg Havn, Fredrikstad kommune) har Rambøll AS foretatt kjemisk analyse av 227 sedimentprøver hentet fra 96 overflateprøver/kjerner i mudringsområdet, og på bakgrunn av dette laget et 3D-kart over sedimentmasser som kan deponeres i dypvannsdeponi i sjø (antatt forurensingsklasse 1-3) og masser som skal deponeres på land (antatt forurensingsklasse 4-5). Et slikt kart forutsetter at forurensingen er korrelert horisontalt og vertikalt, dvs. at prøver som ligger nær hverandre er mer like i kjemisk sammensetning enn prøver som ligger langt fra hverandre. Vi fant at disse forutsetningene stemmer i prinsippet, men forurensingen varierer imidlertid på relativt liten skala i forhold til den typiske avstanden mellom prøvene, slik at usikkerheten er stor. Spesielt gjelder det for sedimenter fra 1 til 2 meter under eksisterende sjøbunn. Av de 9 kjerner som er analysert for alle stoffer på mange eller alle dyp, var 4 sterkt forurenset i dype lag (under 1 m). Det synes å være spesielt mye forurensing i 10-30 cm dybde, der 67% av prøvene var i forurensingsklasse 4-5 (tallet er usikkert grunnet få prøver). Andelen forurensing i de andre dybdelagene ned til 2 m varierte ganske lite (fra 28% for 0.5-1 og 1-2 m dybde til 37% i 30-50 cm dybde). Volumberegninger tyder på at det er meget usikker forurensingsklasse for en del av mudringsmassene som man planlegger å deponere i dypvannsdeponi. Vi fant at det betydelig usikkerhet i forurensningstilstand for en del av sedimentene (33% av det totale mudringsvolumet) som er kartlagt for deponering i sjø. Dersom disse sedimentene har omtrent samme volumandelen av forurensingsklasse som de analyserte prøvene (32%), betyr dette at et realistisk worst-case-scenario er at ca. 10% av det totale mudringsvolumet kan være "feilklassifisert" for sjødeponi. Det anbefales å utføre flere kjemiske analyser av innhentede kjerner, og innhente nye kjerner for enkelte områder. Forurensingen består av både metaller, PAH'er, PCB og TBT. Forurensing av tungmetaller er ikke en god pekepinn på forurensingsklasse generelt; bruk av tungmetaller som indikator på forurensing generelt vil føre til at en bare fanger opp omtrent halvparten av sedimentet med forurensingsklasse 4-5.

## Summary

Title: Geostatistical analyses of environmental contaminants in the dredging area Borg 1

Year: 2016

Author: Dag Ø. Hjermann

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 978-82-577-6792-1

In connection with the planned dredging of the area Borg 1 (the approach to Borg Harbour, city of Fredrikstad, Norway) Rambøll AS has performed chemical analyses of 227 sediment samples from 96 surface samples and sediment cores in the dredging area. Based on this, a 3D map of the sediment has been made, showing the sediments that can be deposited in a deep sea area (assumed to be in pollution class 1-3) and the sediments that should be deposited in a landfill (assumed to be in pollution class 4-5). Such a map assumes that the pollution is correlated both horizontally and vertically, i.e., that samples taken close to each other are chemically more similar than samples separated by a larger distance. We found that this assumption holds in principle, but the spatial scale of variation is small compared to the typical distance between samples, leading to large uncertainty. That is especially true for sediments at 1.2 m depth below the existing sea bottom. Of 9 cores that have been analysed for all compounds at all or almost all depths, 4 showed strong contamination at depth (below 1 m). The 10-30 cm layer appears to be particularly contaminated, with 67% of the samples showing high (class 4-5) contamination (the number is very uncertain due to low sample size). Among the other depth layers, there was relatively little variation in the fraction of sediment samples that were substantially contaminated (from 28% at 0.5-1 and 1-2 m depth to 37% at 30-50 cm depth). Calculations of volume indicate that the degree of contamination is very uncertain for a part of the sediment that is planned to be deposited in the sea (around 33% of the total volume that will be dredged). If these sediments have the same fraction of class 4-5 contamination as the samples, a realistic worst-case scenario is that around 10% of the total dredging volume is "misclassified" for deposition in sea. It is recommended that more chemical analyses are performed from the existing sediment cores, and new cores should be collected for selected areas. The contamination consists of both metals, PAHs, PCB and TBT. Contamination by heavy metals is not a good indicator of contamination in general: if heavy metals is used as a general indicator of contamination, this method will capture only around half of the sediment with class 4-5 contamination.

## 2. Innledning

### 2.1 Bakgrunn

Dette prosjektet er utført i forbindelse med planene om mudring av innløpet til Borg havn i Fredrikstad kommune (tiltaksområde Borg 1). Sedimentene i området som skal mudres er til dels betydelig forurenset. På grunn av de store mengdene sediment er det planlagt at de mest forurensete massene skal legges i landdeponi (hos FREVAR på Øra), mens rent og moderat forurenset sediment skal legges i dypvannsdeponi (Møkkalassene og Svaleskjær). I prosjektet er det tatt kjerneprøver av sedimentene i sjøbunnen, og disse har blitt analysert for konsentrasjoner av miljøgifter. Baser på dette er det laget en 3D-modell for å dele sedimentet i tiltaksområdet er delt inn i ulike tilstandskategorier, som så skal brukes som graveplan for å bestemme hvilke masser som skal deponeres på land og hvilke som skal deponeres i sjødeponi.

### 2.2 Mål med rapporten

Denne rapporten er en undersøkelse av antagelsene bak utarbeidelsen av 3D-modellen og en forsøksvis beregning av usikkerheten i hvor mye forurensete sedimentmasser som kan finnes i de massene som er klassifisert som rene/moderat forurenset. Siden kjerneprøvene viser miljøtilstanden i et punkt i horisontalplanet, baserer framgangsmåten seg på følgende antagelser:

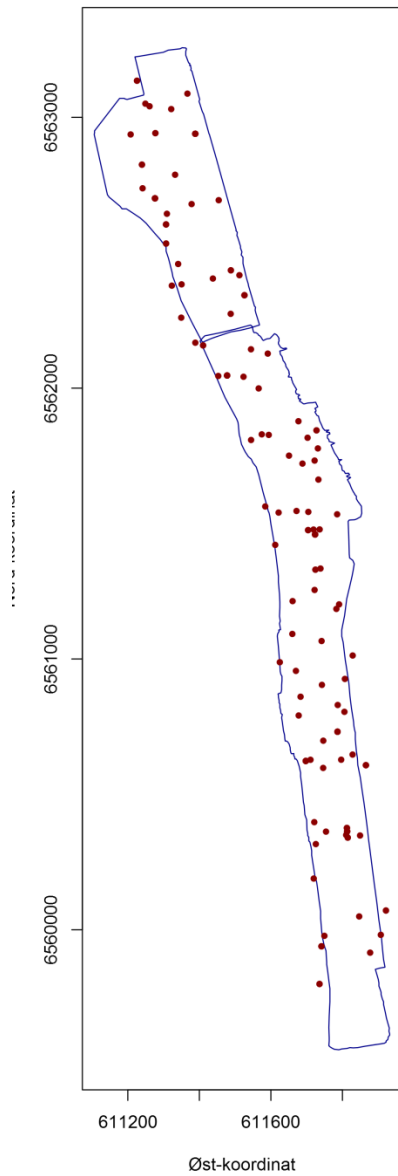
- de forurensete lagenes mektigheter følger bunntopografien
- forurensingen er korrelert i horisontalplanet, dvs. at dersom det er mye forurensing i en gitt posisjon, så er det omtrent samme forurensingsgrad i en viss omkrets rundt dette punktet
- forurensingen er korrelert vertikalt, slik at dersom det er omtrent samme forurensingsgrad ved to ulike dybder, så er det omtrent samme grad av forurensing også mellom disse dybdene

Disse temaene er tatt opp i denne rapporten. Videre har vi brukt geostatistiske metoder til å forsøke å estimere hvor mye miljøgifter som kan finnes i masser mellom prøvetakingspunktene, henholdsvis i masser klassifisert som rene og klassifisert som forurenset.

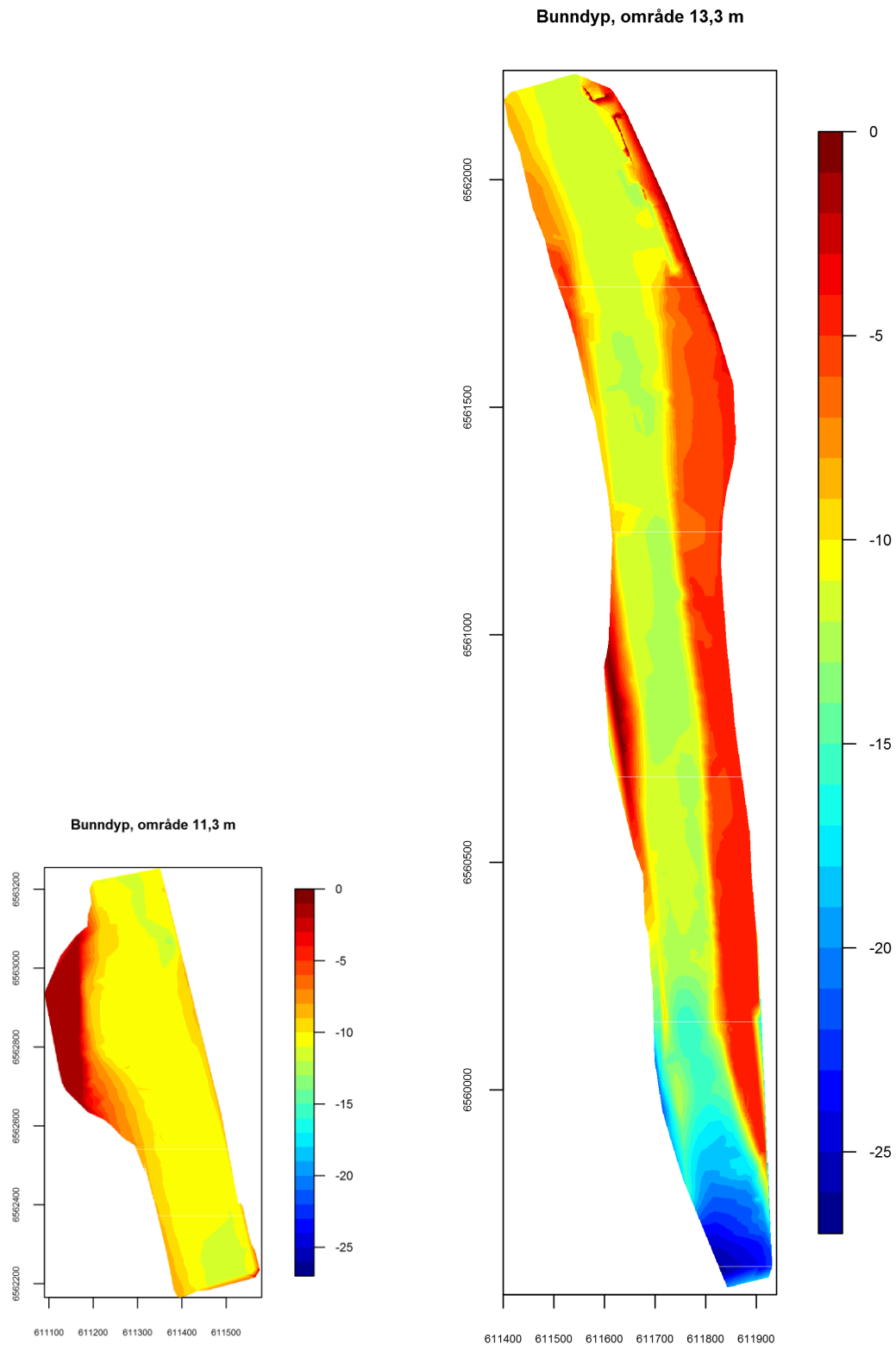
### 2.3 Kort beskrivelse av området

Området ligger i Fredrikstad kommune i utløpet av Glommas østre løp og strekker seg i N-S retning over ca. 3 km (**Figur 1, Figur 2**). Tiltaket består i å utvide bredden av skipsleden ved å mudre slik at man oppnår en dybde på 11.3 m i den nordlige delen og 13.3 m i den sørlige delen (**Figur 3**). Det er også planlagt å lage en snuplass på vestsiden av den nordlige delen av området. Sjøbunnen er preget av mange års utslipp/avfall fra nærliggende industri og befolkning. Det omliggende området (Fredrikstad-Hvaler) er både et mye brukt bade- og friluftsområde og inneholder også et naturreservat (Øra) og en marin nasjonalpark (Hvaler).

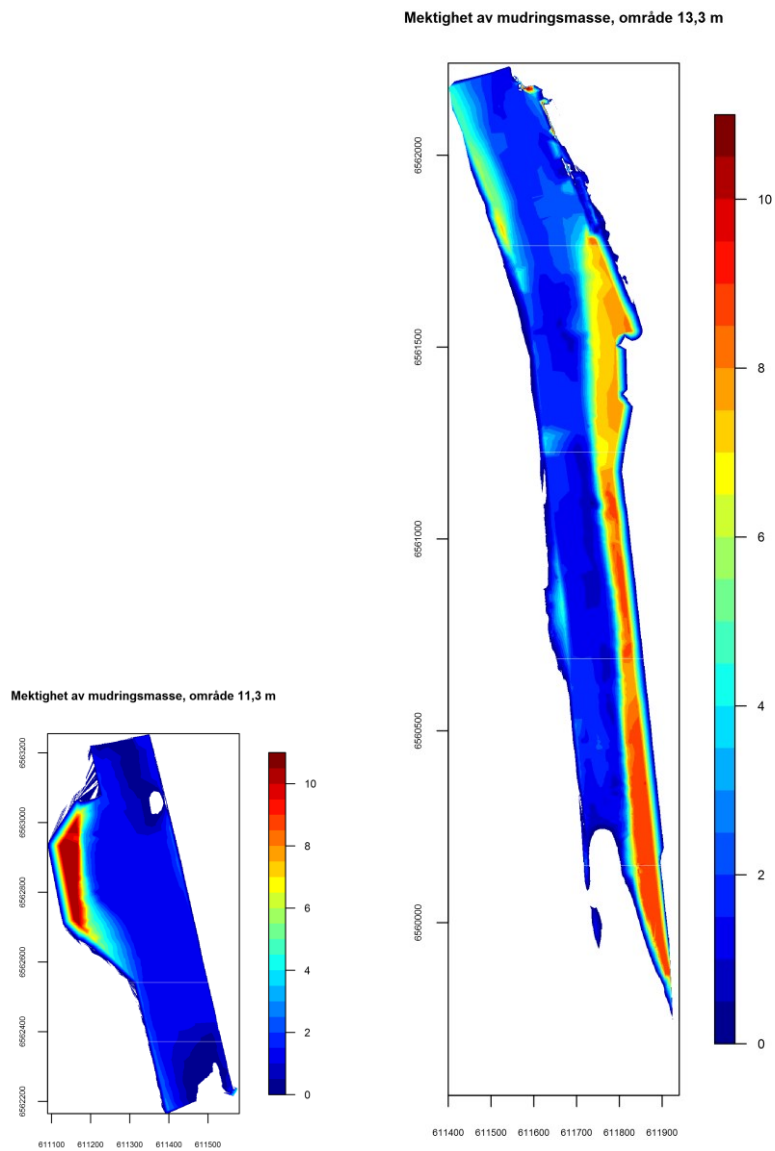




**Figur 1.** Tiltaksområdet Borg 1. De to linjene avgrensner hhv. et nordlig område (kalt "område 11.3" siden det her skal mudres til 11.3 m) og et sørlig område ("område 13.3"). Punktene viser hvor det er tatt prøver for innhold av miljøgifter (en del av punktene representerer en kjerne der det er tatt mange prøver).



**Figur 2.** Vanddyb i nordre del (a) og søndre del (b) av tiltaksområdet. Mudringen skal gjøres til et vanddyb på henholdsvis 11.3 m (a) og 13.3 m (b).



**Figur 3.** Mektighet av masser som skal mudres i nordre (a) og søndre (b) del av tiltaksområdet (henholdsvis 11.3-området og 13.3-området). I hvite områder trengs det ikke å mudres (området har allerede ønsket dyp).

## 3. Metoder

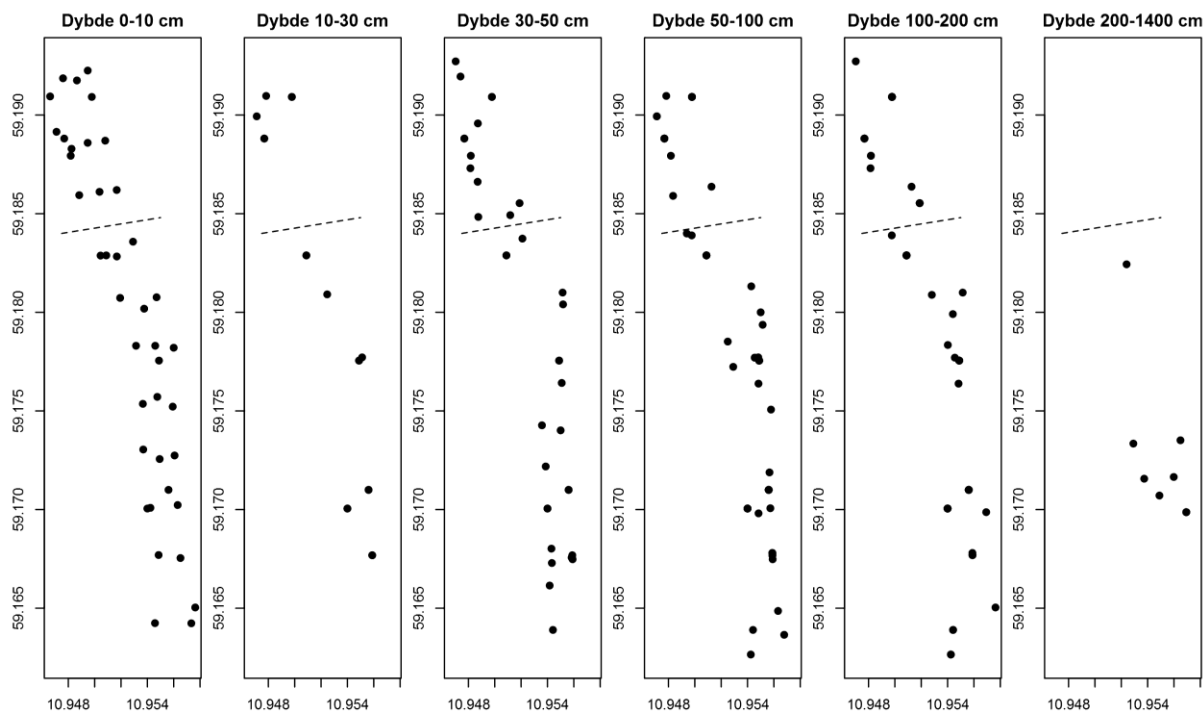
### 3.1 Datamateriale

#### 3.1.1 Miljøgiftkonsentrasjoner i kjerneprøver

Undersøkelsen baserer seg på 227 sedimentprøver hentet fra 96 overflateprøver/kjerner, hentet fra 0 til 13.6 m under sjøbunnen (**Figur 1**). Hver prøve representerer 10 cm av en kjerne. Prøvetakingen og utvalgelse av prøver beskrevet i Rambøll (2015). De fleste prøvene ble analysert for innhold av metaller, polyaromatiske hydrokarboner (PAHer), PCBer og TBT (noen få prøver ble kun analysert for metaller). I tillegg til prøvene som er gjengitt med grafer og tabeller i Rambøll (2015), ble det gjort ytterligere analyser av prøver fra seks kjerner i forkant av denne undersøkelsen, slik at en oppnådde å ha analysert tre kjerner på hver side av skipsleia i sin fulle lengde. Det er forholdsvis mange analyserte prøver fra overflaten, og mer spredt nedover i sedimentet (**Tabell 1, Figur 4**). Kun få prøver under 2 m sedimentdybde er analysert. I de videre undersøkelsene brukte vi den oppdelingen i dybdelag vist i **Tabell 1**, bortsett fra at det dypeste kategorien (under 200 cm dybde) ikke ble benyttet i de aller fleste beregningene.

**Tabell 1.** Antall prøver analysert i i ulike dybdelag.

Dybde (cm)	Antall prøver	Andel (%)
(0,10]	40	17.6
(10,30]	18	7.9
(30,50]	35	15.4
(50,100]	61	26.9
(100,200]	64	28.2
(200,1360]	9	4.0
SUM	227	100



**Figur 4.** Romlig fordeling av analyserte prøver i ulike dybdelag.



### 3.1.2 3D-modell

To 3D-modeller, en fra hver av de to delene av tiltaksområdet (11.3 m-delen i nord, og 13.3 m-delen i sør) ble eksportert fra AutoCAD som DXF-filer. Begge områder har 4 kartlag som definerer eksisterende sjøbunn, skiller mellom sediment for landdeponi (tilstandsklasse 4-5) og sediment som er rent nok for sjødeponi (tilstandsklasse 1-3), og prosjektert sjøbunn (**Tabell 16**). 3D-data fra disse filene ble hentet ut ved å ekstrahere samtlige unike 3D-koordinater for hvert kartlag (for hvert kartlag: 12530 og 43538 punkter i respektive område 11.3 og 13.3). Disse punktene ble så interpolert ved lineær interpolering i trianglene som dannes av datapunktene ved hjelp av prosedyren interpp i pakken Akima (Akima 0.5-12) i statistikkprogrammet R (R 3.2.2). Interpoleringen ble gjort på 1 x 1 m-skala. Tykkelsen på de ulike lagene er vist i Appendix (**Figur 20** og **Figur 21**). Forskjeller mellom volumene beregnet ved denne metoden (**Tabell 2**) og volumene beregnet direkte fra AutoCAD kan være et resultat av unøyaktigheter som oppstår ved interpolering fra 3D-punkter framfor beregning direkte fra 3D-flater.

**Tabell 2.** Volum (m<sup>3</sup>) av ulike sedimentmasser beregnet på grunnlag av interpolering av 3D-koordinater ekstrahert fra filer eksportert fra AutoCAD.

	Område 11,3 (m <sup>3</sup> )	Område 13,3 (m <sup>3</sup> )	Hele området (m <sup>3</sup> )
Øvre masser for sjødeponi	42926	215856	258782
Masser for landdeponi	34675	97936	132611
Nedre masser for sjødeponi	402901	1379774	1782675
Totalt volum	480502	1693566	2174068

## 3.2 Statistiske metoder

### 3.2.1 Samvariasjon mellom stoffer

Vi så på samvariasjon mellom stoffer med grafiske plott kombinert med clustering. Vi brukte denne metoden både for å plukke ut representative stoffer for hver gruppe av stoffer (PAH'er, metaller, PCB'er og tinnorganiske stoffer), og for å se på samvariasjon mellom stoffgrupper.

### 3.2.2 Analyse av enkeltstoffer

Noen analyser ble utført på konsentrasjoner enkeltstoffer; i disse tilfellene plukket vi ut noen fokusstoffer som representerte disse gruppene godt: tre PAH'er, tre metaller, sum PCB og TBT (tributyltinnkation). Analyse ble utført på log-transformerte korrelasjoner pga. skjev fordeling av verdier.

For mange av stoffene var det mange målinger under kvantifiseringsgrensen, dvs. oppgitt som konsentrasjon < X<sub>grenseverdi</sub>. Det mest "konservative" er å sette alle disse verdiene til X<sub>grenseverdi</sub> for videre analyse. Dette fører imidlertid til at det oppstår "kunstige" korrelasjonsmønstre fordi svært mange punkter har samme måleverdi. Vi byttet derfor ut disse verdiene med et tilfeldig tall (trukket fra en uniform fordeling) mellom 0.5\*X<sub>grenseverdi</sub> og X<sub>grenseverdi</sub>. Dette er en vanlig prosedyre (Katrine Borgå pers.com.) og gir realistiske verdier. I noen tilfeller (eks. kap. 3.2.6) gjentok vi denne trekningen flere ganger.

### 3.2.3 Korrelasjon vertikalt innen hver kjerne

Dette ble undersøkt i 7 kjerner der det var analysert prøver fra alle eller nesten alle 10 cm-seksjoner fra nedover i kjernen (i en av disse var det kun kvikksølv som var analysert). For hvert stoff og hver kjerne var prosedyren som følger: (1) Beregning av korrelasjon mellom påfølgende 10-cm segmenter. Om en kjerne eksempelvis hadde 12 segmenter, gjorde vi altså korrelasjon mellom segment 1-11 og segment 2-12. (2) Dataserien ble så stokket tilfeldig 1000 ganger og den samme korrelasjonen ble beregnet hver gang. (3) Hvis den observerte korrelasjonen var høyere enn 97.5% av de tilfeldige korrelasjonsverdiene, regnet vi dette som at korrelasjonen var signifikant på et 5%-nivå (P > 0.05). (4) Punkt 1-3 i denne prosedyren ble gjentatt 20 ganger, hver gang med en ny trekning for verdier under kvantifiseringsgrensen, for å forsikre oss om at det ikke tilfældigheter fra denne prosedyren ikke skulle gi kunstige resultater.

### 3.2.4 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet: maksimum klasseverdi

I de endelige analysene brukte vi maksimum klasseverdi for en gitt prøve på tvers av samtlige stoffer.

### 3.2.5 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet, metode 1: geostatistikk

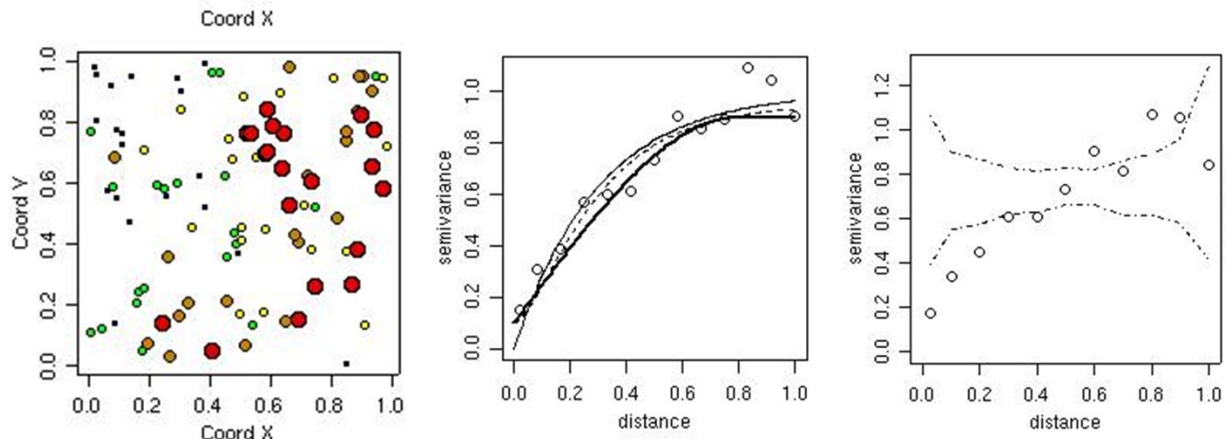
Vi brukte geostatistiske metoder for å undersøke korrelasjon i horisontalplanet. Geostatistikk er en gren av statistikken som er utviklet i gruveindustrien, nettopp for det formål å interpolere målinger (eks. konsentrasjon av interessante forbindelser) mellom kjerneprøver.

En typisk geostatistisk arbeidsrekkefølge er som følger:

- (1) Plotting av empirisk semivarians. *Semivariansen* beskriver samvariasjonen mellom verdien  $Z$  på to punkter som en funksjon av avstanden mellom punktene. Dersom eksempelvis konsentrasjonen av et stoff på to punkter er  $Z_A$  og  $Z_B$ , så er semivariansen definert som

$$\gamma(A, B) = 0.5 * E[(Z_A - Z_B)^2]$$

der  $E(\dots)$  står for forventningsverdien. Desto mindre forskjell mellom verdiene, desto lavere er semivariansen. Om det er romlig korrelasjon mellom målte verdier, slik at høye verdier har en tendens til å forekomme nær hverandre (**Figur 5a**), vil *variogrammet* (**Figur 5b**) vise et mønster med lavere semivarians for punkter som ligger nær hverandre (kort avstand). Ved randomisering av verdier kan en finne ut om mønsteret avviker fra tilfeldighetene, dvs, om en har statistisk signifikant romlig samvarians (**Figur 5c**).



**Figur 5.** Prinsippskisse for å forklare semivarians. (a) Målinger av en variabel  $Z$  i et område; store/røde sirkler representerer høye verdier av  $Z$ . Figuren antyder at det er romlig autokorrelasjon ved at punkter med lignende verdi har en tendens til å klumpe seg. (b) Variogram for  $Z$  i dette området, dvs. semivarians (y-akse) plottet mot avstand mellom punkter (x-akse). Punktene viser observert semivarians for målingene i (a) og viser en tydelig lavere semivarians for korte avstander. De tre linjene viser tre ulike tilpassede modeller. (c) For å sjekke om den observerte semivariansen (punkter) viser statistisk signifikant romlig korrelasjon, gjøres det tilfeldig omstokking (eks. 1000 ganger) av  $Z$ -verdiene i (a), og resultatet er plottet som to stiplede linjer som viser øvre og nedre avgrensning av forventede semivariansverdiene om man ikke har reell autokorrelasjon. Fordi punktene går under den nederste kurven for distanser kortere enn 0.4, er det statistisk signifikant romlig korrelasjon på skalaer kortere enn 0.4.

- (2) Modellering av semivarians, dvs. valg av modell (eks. eksponensiell, matern eller gaussisk) og estimeringa av parametrene i modellen. Valg av modell gjøres typisk ut fra plottene av semivarians.
- (3) Interpolering ved hjelp av *kriging*. Det finnes flere varianter av kriging, hvorav vi her benyttet to: ordinær kriging og universell kriging. Den første antar at det ikke er noen trender i variabelen over

området (selv om det er trender lokalt grunnet romlig samvariasjon), mens den andre metoden også tar med kovariater som kan forklare variasjonen i variabelen.

Vi beregnet variogrammer for hver av de utvalgte stoffene for separate dybdelag (vist i **Tabell 1**), og for området samlet samt området delt opp i tre. Vi brukte tilfeldig omstokking (**Figur 1c**) for å vurdere om semivariansen tyder på et statistisk signifikant romlig mønster, dvs. korrelasjon i horisontalplanet. For videre analyser utført ved å interpolere mellom kjerneprøvene tilpasset vi modeller til semivariansen som vist i (**Figur 1b**).

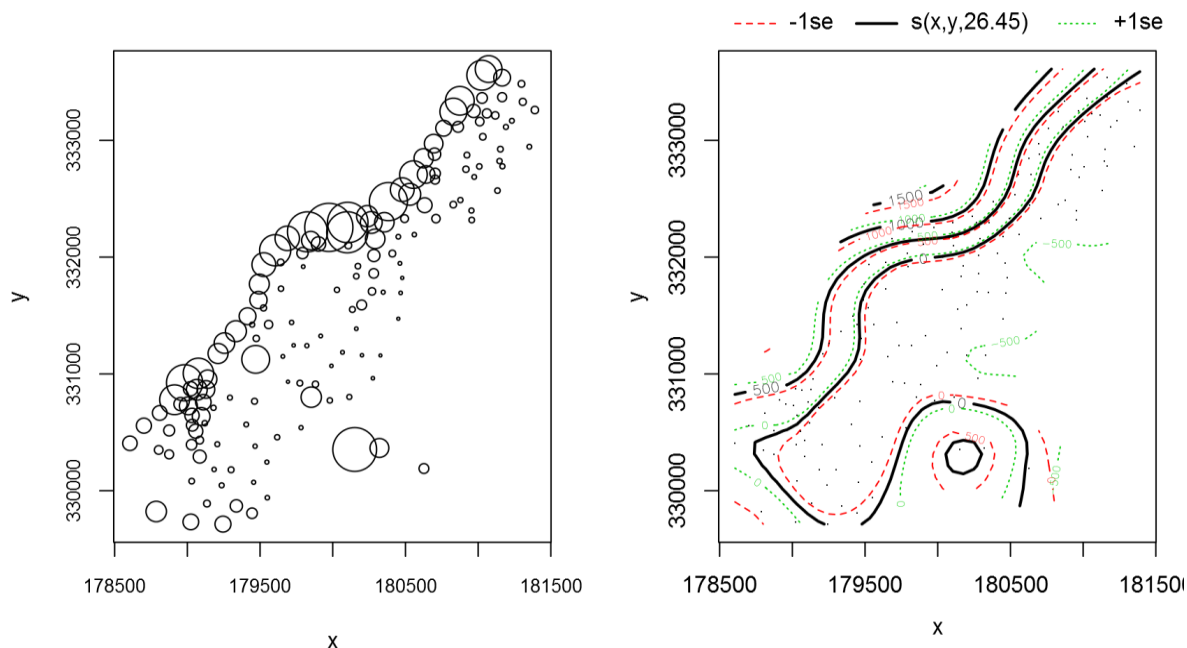
På grunn av områdets natur er det tenkelig at det er forskjellig samvariasjon langs og på tvers av skipsleia (anisotropi). Vi gjorde derfor også analyser av semivarians for retning langsmed og på tvers av skipsleia. Antatt omtrentlig retning på skipsleia ble satt til  $8^\circ$  mot øst.

For de utvalgte stoffene (kap. 3.2.2) utførte vi analyser ved ordinær kriging for hvert dybdelag for seg. For analyser av maksimum klasseverdi (kap. 3.2.3) utførte vi også universell kriging, se mer detaljert beskrivelse under.

Vi brukte pakken geoR (versjon 1.7-5.1) i R 3.2.2 for alle analysene.

### 3.2.6 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet, metode 2: GAM

GAM (Generalized Additive Models) er computerintensiv teknikk med et vidt bruksområde som først ble introdusert for 26 år siden (Hastie and Tibshirani 1990), men som først har blitt alment tatt i bruk de siste 15 årene pga. forbedret metodikk som følge av tilgang på regnekraft (Wood 2004). GAM er en teknikk som kan beskrives som en ikke-lineær variant av multipel regresjon, der hvert av leddene i regresjonen ikke er en lineær funksjon, men en ikke-lineær, fleksibel funksjon (i vårt tilfelle en spline-modell). Når et av disse leddene er en funksjon av romlige koordinater (x- og y-koordinater) kan GAM brukes som et alternativ til kriging. For å unngå overparametrisering av modellen brukes det som regel kryssvalidering ved hjelp av MGCV-metoden (Minimization by Generalized Cross Validation), som er implementert i pakken mgcv i R (Wood 2004). En annen fordel med GAM er at spline-funksjonene som tilpasses til det romlige mønsteret håndterer at konstrasjosjoner variere lite over et stort område, men i andre områder har store endringer over korte avstander (**Figur 6**).



**Figur 6.** Eksempel på bruk av GAM til romlige modeller, i dette tilfellet konsentrasjoner av sink i jordsmonnet i et område langs elva Meuse i Nederland (eksempeldata fra pakken *sp* i R). (a) Observerte konsentrasjoner av sink (diameter er proporsjonalt med konsentrasjon). (b) GAM-modell tilpasset til

dataene. Det svarte kurvene viser "høydekurver" for prediksjonene, de røde og grønne stiplede kurvene viser usikkerhet (95% konfidensintervall) for de svarte kurvene.

### 3.2.7 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet: gjennomføring

Kartlegging av områder med lite og nye forurensing (for senere skilling av masser) forutsetter at det til en viss grad er mulig å forutsi (predikere) klassetilstand på et gitt punkt der vi ikke har prøver. Vi forsøkte to metoder for prediksjon av maksimum klasseverdi. For begge metoder så brukte vi oppdelingen av datasettet i horisontale lag (dvs. avstand fra eksisterende havbunn) angitt i **Tabell 1**: 0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm, 50-100 cm, 100-200 cm og under 200 cm. Inndelingen ble delvis bestemt av at man forventer mindre variasjon i dypere lag, dels ut fra fordelingen av prøver (med eksempelvis mange prøver i overflatelaget på 0-10 cm dyp), og dels ut fra innledende analyser/tabeller som tydet på forskjeller i konsentrasjoner/klasser mellom dybdelag. For eksempel skilte vi ut dybdelaget 10-30 cm på tross av at det har få prøver (18) fordi det muligens er høyere andel kontaminert sediment i dette laget (1/3 av prøverne er i klasse 4, 1/3 er i klasse 5). Å slå sammen dette dybdelaget med laget over eller under ville føre til "kontaminering" av disse lagene, da de har en lavere andel kontaminerte prøver.

For begge metoder brukte vi det såkalte AIC-kriteriet (Akaike 1974) for å velge den optimale modellen (eksempelvis antall variable man skal ha med i modellen). Akaike-kriteriet er definert som

$$AIC = 2k - 2 \cdot \ln(L)$$

der  $k$  er antall parametre i modellen og  $L$  er modellens likelihood, dvs. sannsynligheten for å observere de dataene du har gitt modellen ( $L$  er altså beslektet med  $R^2$  for regresjonsmodeller). Den beste modellen er den med lavest AIC-verdi. En kan derfor si at AIC måler hvor godt modellen forklarer det datasettet du har ( $L$ ) men straffer deg for hver ekstra parameter du har med i modellen ( $k$ ). Om man for eksempel har en regresjonsmodell der man begynner med én forklaringsvariabel (eks.  $Y = a + bX_1$ ) og så legger til flere og flere forklaringsvariable ( $X_2, X_3$ , etc.) så vil AIC ofte synke først og deretter begynne å øke. Den sier altså når det er lurt å stoppe å legge til nye variable eller å gjøre modellen mer kompleks (Hastie et al. 2009).

- (1) Universell kriging (se kap. 3.2.5). For alle dybder i samme analyse, med variablene dybde, side (øst- eller vestsiden av skipsleia), x-koordinat og y-koordinat som kovariater. Ulike kombinasjoner av disse variablene ble sammenlignet med AIC-kriteriet for å velge den beste modellen (dvs. den beste kombinasjonen av kovariater). Vi brukte en eksponensiell modell for semivarians, tilpasset ved maximum likelihood. Nugget (semivarians ved avstand = 0) ble fiksert på 0, dvs. at vi antar at forskjellen mellom to kjerner synker mot null når avstanden mellom dem synker mot null. (Hvis man i motsatt fall lar metoden estimere nugget, blir den i noen tilfeller urealistisk høy, grunnet at datamaterialet har relativt få prøver med korte avstander mellom.)
- (2) GAM. Vi brukte x-koordinat, y-koordinat og dybde som romlige variable, og dybde og side som kovariater. Vi brukte alle dybder i samme analyse, men forsøkte både modeller der den romlige komponenten var den samme for alle dybder, og modeller der den romlige komponenten var separat for hver dybdekategori. Vi valgte den beste kombinasjonen av romlige variable og kovariable ved AIC (som for kriging). Vi brukte mgcv versjon 1.8-7.

### 3.2.8 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet: kryssvalidering

Det springende punkt i vårt tilfelle er hvorvidt vi er i stand til å predikere (forutsi) forurensingsklasse på et gitt sted mellom prøvepunktene ved hjelp av de omliggende prøvepunktene. Vi brukte derfor kryssvalidering, dvs. at man fjerner en del av dataene fra datasettet, tilpasser modellen (kriging eller GAM) til alle de gjenværende dataene, og så ser man om modellen kan forutsi (predikere) de dataene man fjerner. Vi gjorde dette på to nivåer: (1) "Konvensjonell" kryssvalidering ved å fjerne en og en prøve (dvs. en 10 cm-seksjon av en kjerne), og (2) ved å fjerne en og en kjerne. Den siste fremgangsmåten gir et mer realistisk bilde av hvor godt man kan forutsi klassetilstand mellom kjernene pga. den relativt sterke sammenhengen mellom prøver i en og samme kjerne. I dette tilfellet var den eksakte prosedyren som følger: (1) Modellen tilpasses til klasseverdi (maks-klasse) for alle kjerner utenom én, (2) modellen brukes til å predikere klasseverdi for prøvene i den kjernen som ble utelatt, (3) punkt 1-2 gjentas for alle prøver, og (4) predikert og faktisk klasseverdi sammenlignes for hele datasettet. Dette gir



en realistisk bedømming av modellens evne til å predikere klassetilstand på en gitt lokalitet og dybde mellom prøvene.

### 3.2.9 Sammenligning av romlig modell med kartlegging av sedimentmasser for sjø- eller landdeponering

Den beste modelleringsteknikken basert på resultater ovenfra (dvs kriging eller GAM) ble brukt for å predikere klasseverdier (maksimum klasse) for et regulært 3 x 3 m rutenett av punkter i ulike dybdelag (3 x 3 m ble brukt framfor 1 x 1 m pga. beregningstid). For hvert punkt (dvs. 3 x 3 m rute) har modellen en prediksjon for sannsynligheten for at sedimentet er i klasse 4-5, samt en usikkerhet for denne prediksjonen. Vi forenklet disse resultatene ved å dele prediksjonene opp i fire grupper:

- 1) < 50% forekomst av klasse 4-5
- 2) 50% -80% forekomst av klasse 4-5
- 3) >80% forekomst av klasse 4-5
- 4) Mulighet for >80% forekomst av klasse 4-5, men meget usikker prediksjon

Kartleggingen av sediment gjort av Rambøll ble også "griddet" i 3 dimensjoner ved å klassifisere hvordan sedimentet er kartlagt for celler med grunnflate på 3 x 3 m og høyde 10 cm. Disse cellene ble altså delt opp i følgende klasser:

- 1) Øvre lag for sjødeponi (antatt klasse 1-3)
- 2) Forurenset lag (antatt klasse 4-5)
- 3) Nedre lag for sjødeponi (antatt klasse 1-3)
- 4) Under prosjekttert dybde

Disse to klassifiseringene av sedimentet ble så kombinert i grafer og tabeller.

## 3.3 Resultater

### 3.3.1 Konsentrasjoner og fordeling av forurensingsklasser

Av 227 prøver var 73 (32%) forurenset sediment, dvs. forurensingsklasse 4 eller 5. Andelen forurenset sediment varierte forholdsvis lite fra sedimentoverflate ned til 200 cm dyp (**Tabell 3, Tabell 4, Figur 7, Figur 8**). Det er et mulig maksimum av andelen forurenset sediment i laget 10-30 cm, der 67% av prøvene er i klasse 4-5. I dette dybdelaget er det få prøver (18), men andelen klasse 4-5 er statistisk signifikant høyere i 10-30 cm-laget både i forhold til sedimentlaget over (Fisher exact test,  $P = 0.022$ ) og under (Fisher exact test,  $P = 0.049$ ). I dybdelagene 0-10 cm og 30-50 cm var 30-40% av prøvene i klasse 4-5, mens andelen er 28-29% fra 50 til 200 cm dybde. Det ble funnet høye verdier av bl.a. kobber, kvikksølv, PCB og TBT også langt nede i sedimentet. Under 2 meter var det ingen høye verdier, og de videre undersøkelsene ved hjelp av geostatistikk og GAM er utført på data fra de øverste 2 m av sedimentet.

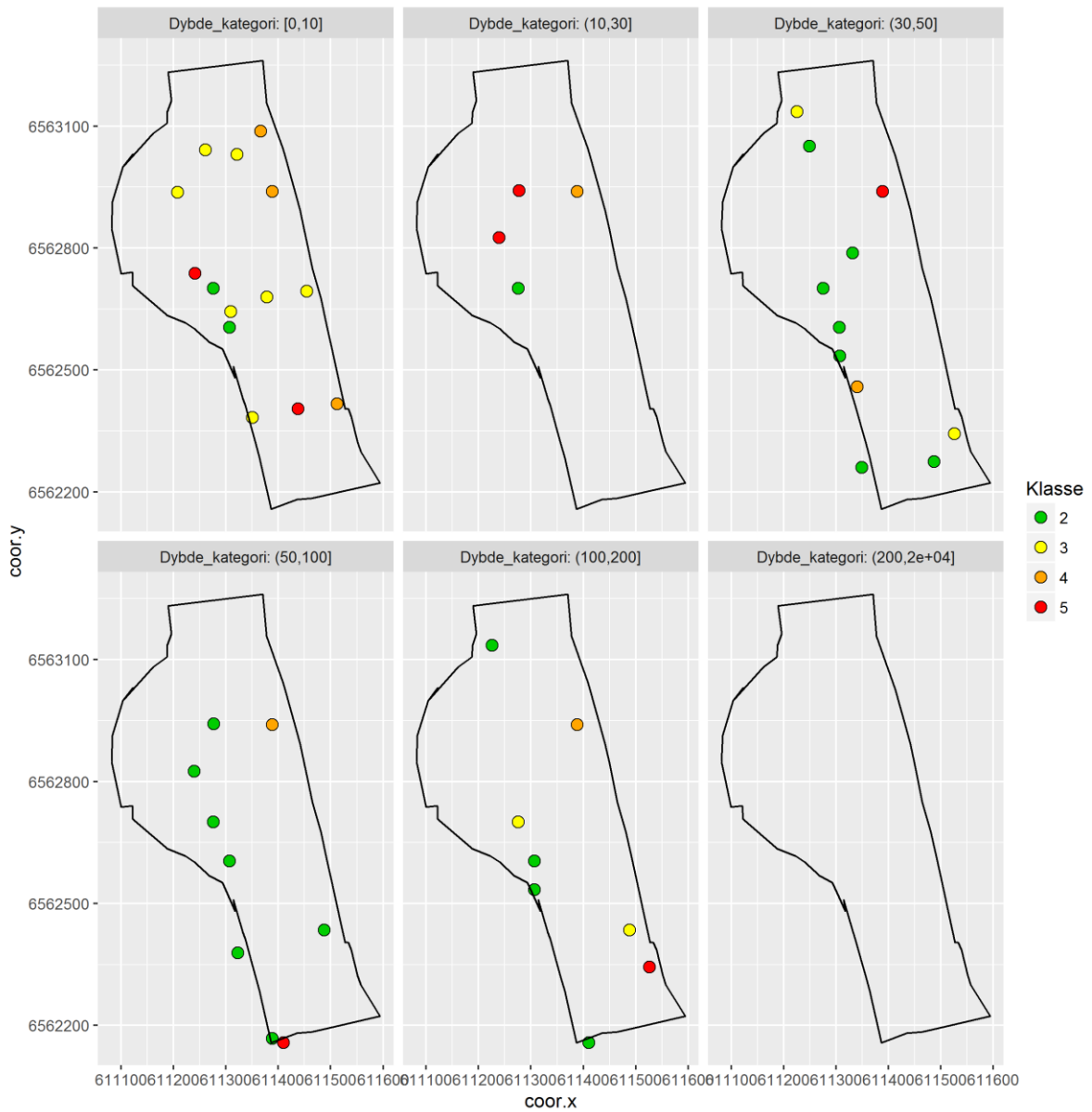
Fordelingen av konsentrasjoner viser for mange stoffer en meget skjev fordeling med mange lave verdier og noen få høye verdier (**Figur 9**), noe som er vanlig for forurensingsdata. Særlig kobber (Cu), kvikksølv (Hg) og enkelte PAHer (benso(a)antracen, benso(ghi)perylene) har mange tilfeller av konsentrasjoner i kategori 4 og enkelte i kategori 5.

**Tabell 3.** Fordeling av forurensingsklasser (høyeste forurensingsklasse for alle stoffer) og dybdeklasser (dybde i forhold til sedimentoverflaten).

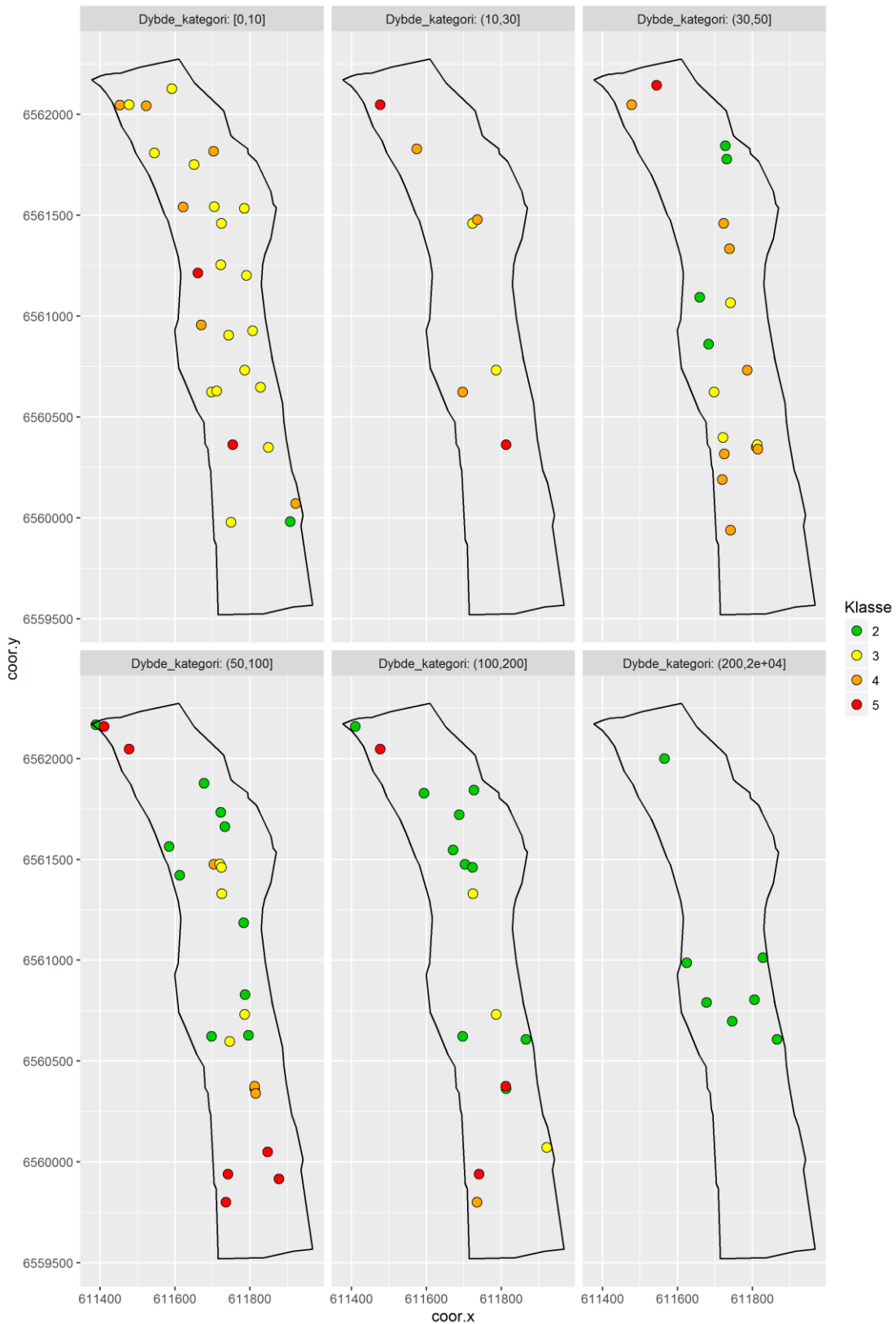
		Dybdeklasse (cm)						
		0-10	10-30	30-50	50-100	100-200	200-1360	Sum
<b>Klasse 2</b>	<b>antall</b>	3	2	13	32	39	9	98
<b>Klasse 3</b>	<b>antall</b>	24	4	9	12	7	0	56
<b>Klasse 4</b>	<b>antall</b>	9	6	10	9	5	0	39
<b>Klasse 5</b>	<b>antall</b>	4	6	3	8	13	0	34
<b>Sum</b>		40	18	35	61	64	9	227

**Tabell 4.** Som **Tabell 3**, men viser prosentvis fordeling av forurensingsklasser innen hver dybdekategori.

		Dybdeklasse (cm)						
		0-10	10-30	30-50	50-100	100-200	200-1360	Totalt
<b>Klasse 2</b>	%	7.5	11.1	37.1	52.5	60.9	100	43.1
<b>Klasse 3</b>	%	60	22.2	25.7	19.7	10.9	0	24.7
<b>Klasse 4</b>	%	22.5	33.3	28.6	14.8	7.8	0	17.1
<b>Klasse 5</b>	%	10	33.3	8.6	13.1	20.3	0	15.0
<b>Sum</b>	%	100	99.99	99.9	100.1	99.9	100	99.9



**Figur 7.** Samlet klasseverdi (høyeste klasseverdi for hvert av stoffene) i forhold til dybde for den nordlige delen av området (11,3 m mudredyp).

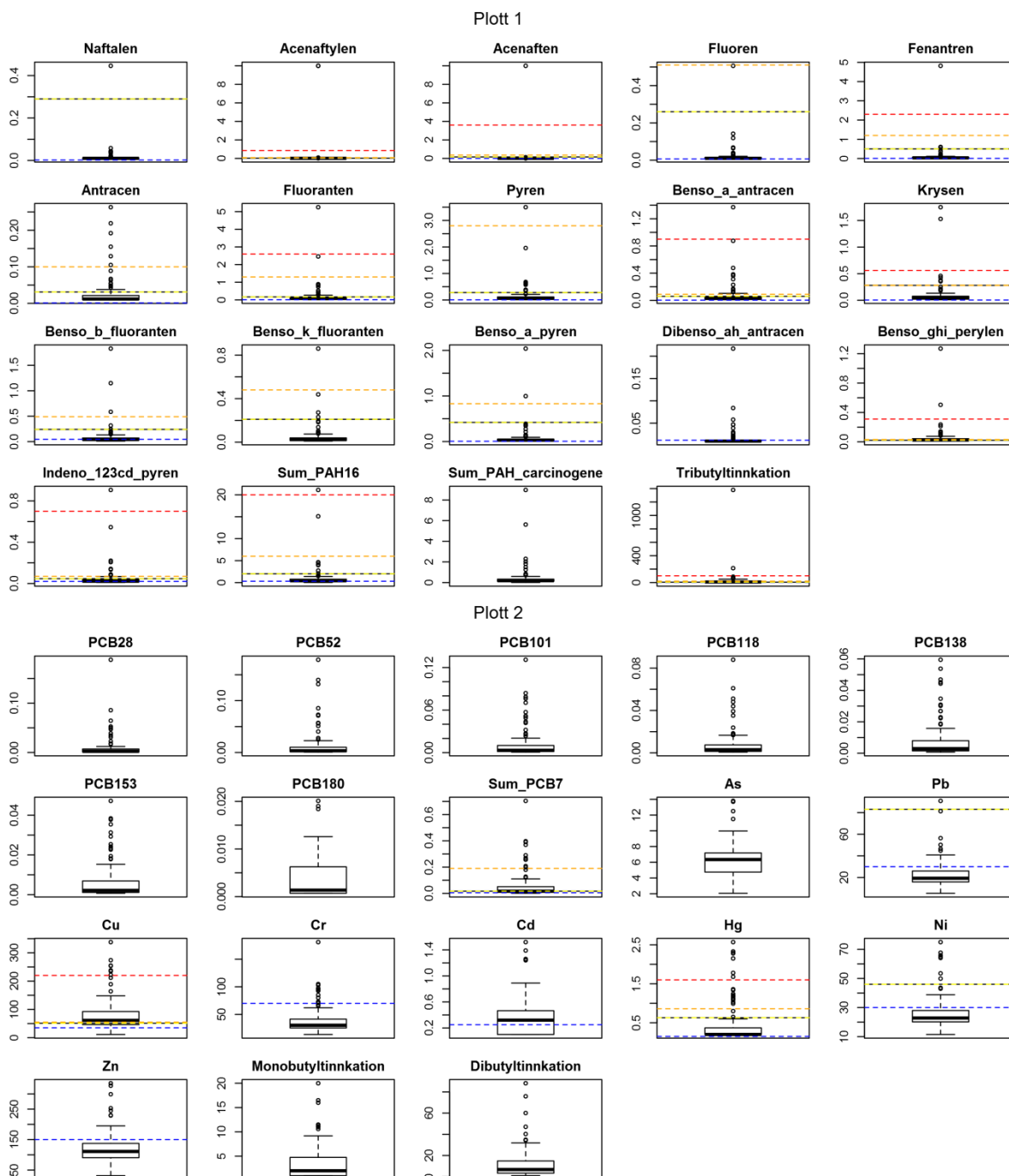


**Figur 8.** Samlet klasseverdi (høyeste klasseverdi for hvert av stoffene i forhold til dybde for den sørlige delen av området (13,3 m mudredyp).



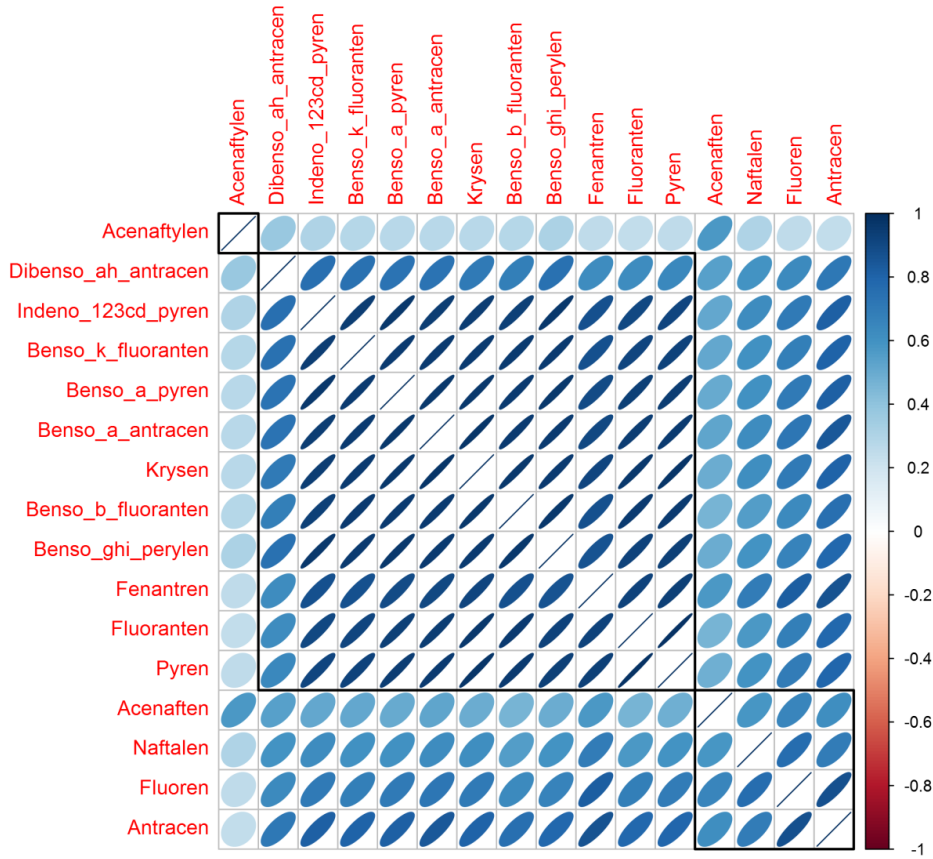
### 3.3.2 Samvariasjon mellom stoffer

PAHene skiller seg i 3 til 4 grupper, der det innbyrdes er meget stor korrelasjon (Figur 10a). Blant metallene korrelerer kobber med bl.a. nikkel og bly, mens kvikksølv ikke samvarierer noe særlig med andre metaller (Figur 10b).

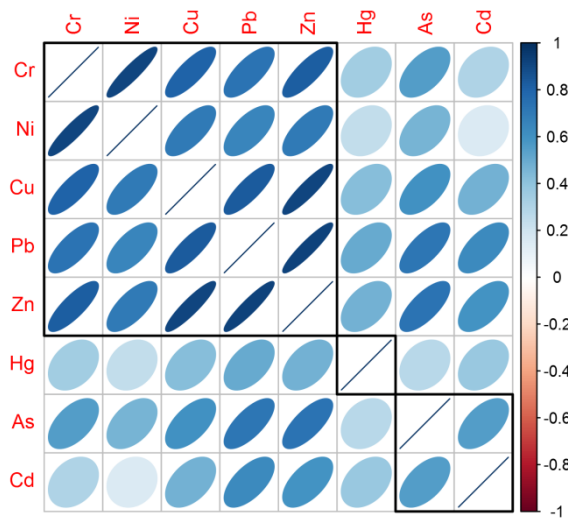


**Figur 9.** Fordeling av konsentrasjoner for hvert stoff. De stiplede linjene viser grenseverdier for kategori 5 (over rød linje), 4 (over oransje linje), 3 (over svart/gul linje), og 2 (over blå linje). For de enkelte kongenerene av PCB og for mono- og ditributyltinn er det ikke fastsatt grenseverdier, og for Ag var alle prøver under øvre grense for kat. 1.

(a)



(b)



**Figur 10.** Samvariasjon og gruppering av PAHer (a) og metaller (b). Linjene avgrensner grupper av stoffer sik de framkommer ved clusteranalyse med 3 clustere.

### 3.3.3 Klasseverdi for metaller sammenlignet med klasseverdi for andre stoffer

Konsentrasjon av metaller kan hurtig påvises i felt (f.eks. på lekter) med XRF, et håndholdt instrument som benytter røntgenstråler som eksiterer elektroner i elementene i prøven. Metoden er ikke velegnet for organiske miljøgifter. (I prinsippet kan XRF detektere klor i PCB og tinn i TBT, men konsentrasjonen i sedimentene er trolig for lav for XRF-måling.) Det er derfor relevant å undersøke om høye konsentrasjoner av metaller (f.eks. Cu, Hg) kan brukes som indikator på høy forurensing generelt. Dette vises av **Tabell 5** -

**Tabell 8).**

For PCB var det en viss sammenheng: 67% av prøver med PCB klasse 4-5 hadde klasse 4-5 av metaller (**Tabell 7**). Tabellene viser at metaller ikke er noen god indikator på dette. Av 73 prøver med kategori 4-5 av et eller annet stoff, hadde 36 (49%) lite forurensing (klasse 2-3) av metaller, dvs. at bruk av XRF for metaller ville "miste" omtrent halvparten av prøvene i klasse 4-5 (**Tabell 5**). 60-70% av prøvene med klasse 4-5 av PAH og TBT hadde klasse 1-3 av metaller (**Tabell 6**, x

**Tabell 5.** Sammenhengen mellom forurensing av metaller og forurensing generelt. Tabellen viser hver prøve klassifisert etter maksimum klasse med hensyn til metaller og maksimum klasse med hensyn til alle stoffer. De fargede cellene markerer prøver som har lav klasse (1-3) for metaller men likevel høy klasse (4-5) for andre typer forurensing. Eksempelvis er det 35 prøver (25 + 10) som har lite forurensing (klasse 2) av metaller, men mye forurensing (klasse 4 og 5) av andre stoffer.

Max klasse metaller	Max klasse for alle stoffer			
	2	3	4	5
2	98	53	25	10
3	0	3	1	0
4	0	0	13	7
5	0	0	0	17
<b>I klasse 2-3 for metaller</b>	100.0 %		49.3 %	

**Tabell 6.** Sammenhengen mellom forurensing av metaller og PAH. Se også **Tabell 5.**

Max klasse metaller	Max klasse PAH'er			
	2	3	4	5
2	151	13	11	2
3	3	0	0	0
4	10	6	3	1
5	7	6	1	1
<b>I klasse 2-3 for metaller</b>	85.2 %		68.4 %	

**Tabell 7.** Sammenhengen mellom forurensing av metaller og PCB. Se også **Tabell 5.**

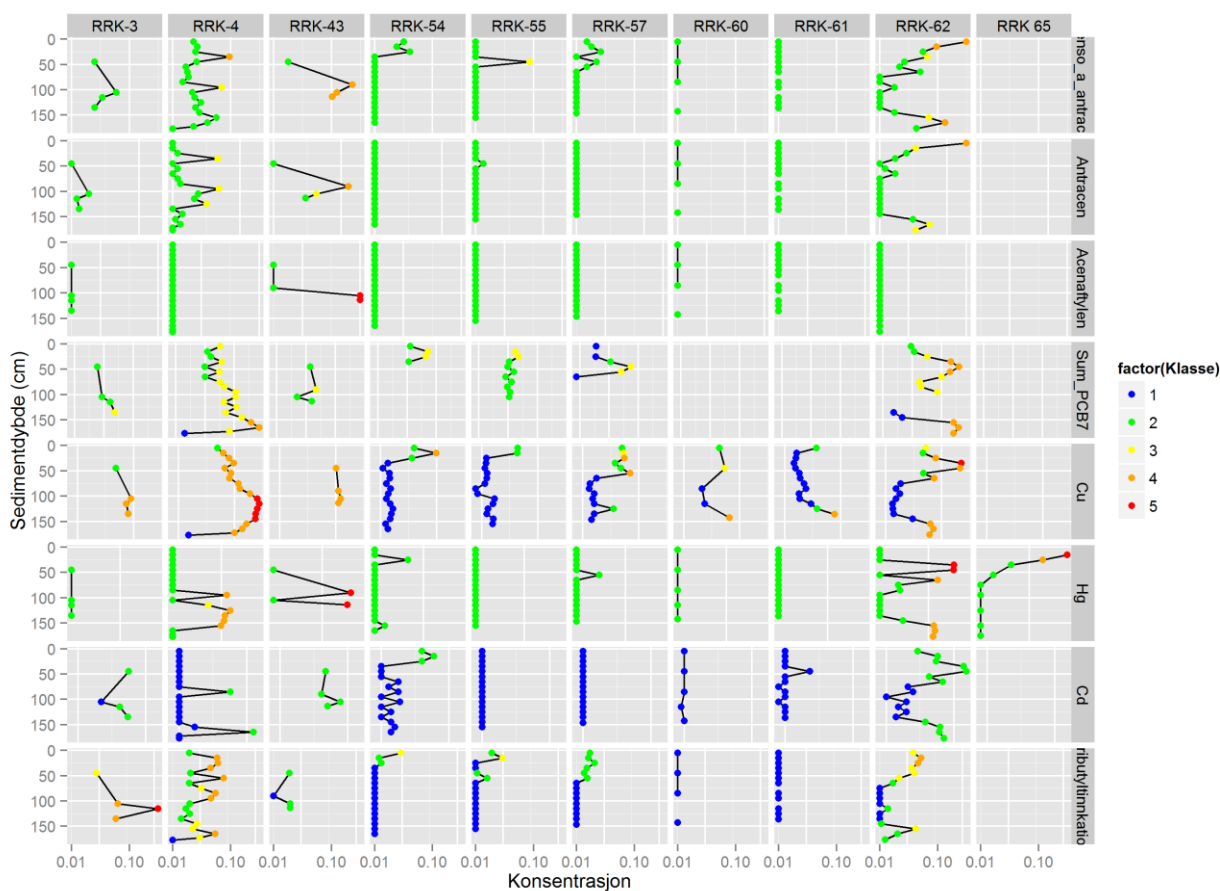
Max klasse metaller	Klasse Sum PCB7			
	2	3	4	5
2	11	60	9	0
3	0	1	1	0
4	0	11	8	1
5	2	2	11	0
<b>I klasse 2-3 for metaller</b>	82.8 %		33.3 %	

**Tabell 8.** Sammenhengen mellom forurensing av metaller og TBT (tributyltinnkation). Se også **Tabell 5.**

Max klasse metaller	Klasse TBT			
	2	3	4	5
2	115	40	13	9
3	2	1	0	0
4	3	8	3	6
5	2	10	3	0
<b>I klasse 2-3 for metaller</b>	87.3 %		64.7 %	

### 3.3.4 Samvariasjon i dybderetning innen hver kjerne

De ti kjernene med flest analyser er vist i **Figur 11**. Av de 9 kjernene som er analysert for alle stoffer, er det 4 som er sterkt forurenset (tilstandsklasse 5 for kobber eller tilstandsklasse 4-5 for en andre stoffene) i dype lag under 1 meters sedimentdybde. Noen av kjernene viser at de er mest forurenset på stort dyp (RRK-4, RRK-43) eller har to lag med mye forurensing, adskilt av et renere lag (RRK-62). De andre kjernene viser et bilde mer som forventet, med mest forurensing i eller like under overflaten (RRK-54, 55, 57 og 65).



**Figur 11.** Dybdeprofiler for utvalgte stoffer innen de kjernene med flest analyserte data. Fargene viser tilstandsklasse.

Ved testing av signifikant autokorrelasjon ble det funnet at kobber har den klareste strukturen i dybden, med signifikant struktur i samtlige kjerner (**Tabell 9**). Kobber er også det eneste stoffet som var over deteksjonsgrensen i samtlige av disse prøvene. TBT har også en klar struktur i nesten alle kjerner der den var over deteksjonsgrense, i de fleste tilfeller med høye konsentrasjoner nær overflaten. Bortsett fra acenaftylen, som var viste seg å være under deteksjonsgrensen i samtlige av disse kjernene, viste PAH'ene signifikant struktur i den ene av de to kjernene med signifikante mengder (RRK-62) men ikke i den andre (RRK-4).

Det går klart fram av **Figur 11** at korrelasjonen vertikalt er på ganske kort skala. Forurensingsgraden i en dybde sier lite om forurensingsgraden 50 cm lenger opp eller ned.

**Tabell 9.** Resultater av tester for samvariasjon i dybderetning. For hvert stoff/kjerne ble det gjort 20 tester, hver av disse med nye tilfeldige tall for konsentrasjoner under kvantifiseringsgrensen. Tallene i tabellen angir hvor mange av de 20 testene som viste signifikant korrelasjon (på 0.05-nivå) mellom påfølgende dybder (fra en 10 cm-prøve til den neste). Tilfeller de over halvparten av testene ( $\geq 10$ ) var signifikante er markert i grått. De tilfeller der samtlige prøver var under deteksjonsgrense er markert med "u.d.".

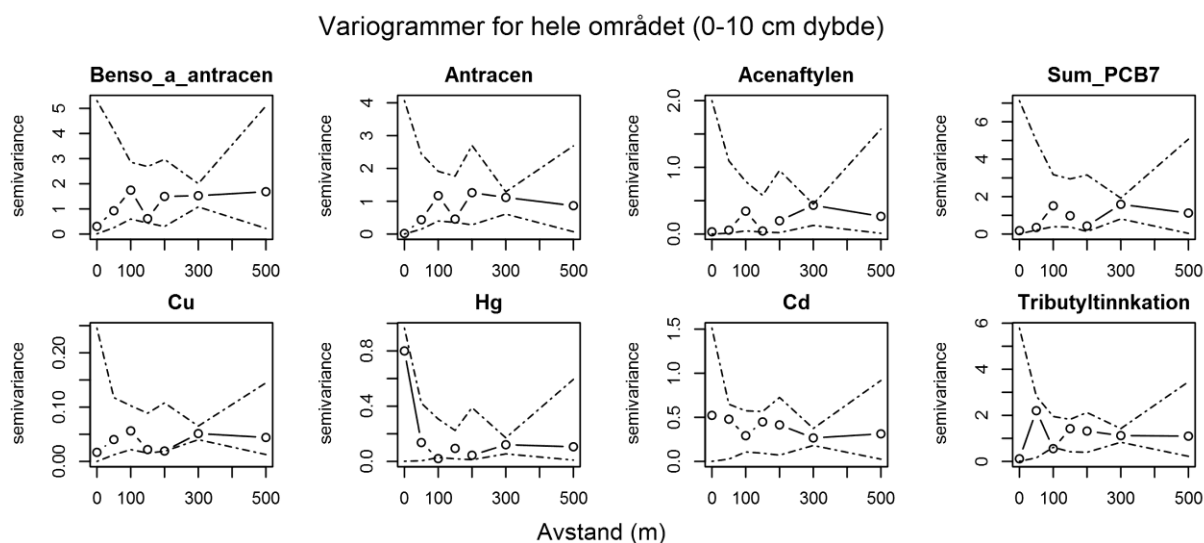
	Benso(a)antracen	Antracen	Acenaftylen	PCB7	Cu	Hg	Cd	TBT
RRK-4	0	0	u.d.	20	20	20	0	0
RRK-54	20	u.d.	u.d.	0	20	0	18	20
RRK-55	4	0	u.d.	0	20	u.d.	u.d.	20
RRK-57	12	u.d.	u.d.	0	20	2	u.d.	20
RRK-61	u.d.	u.d.	u.d.	0	20	u.d.	2	u.d.
RRK-62	20	20	u.d.	20	20	10	20	20
RRK 65						20		

### 3.3.5 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet, metode 1: geostatistikk

Det ble laget variogrammer for noen utvalgte variable (som representerer ulike komponenter av forurensing) for hver dybdekategori. Både i overflaten (**Figur 12**) og i dypere lag (Appendix, **Figur 24**) var det sterke tendenser til lav semivarians for korte avstander. Det er relativt få av diagrammene viser klart signifikant romlig samvariasjon, dvs. at variogrammet krysser den nederste stiplede linjen i venstre del av diagrammet (som vist i **Figur 5c**). Imidlertid er det spesielt for PAHene og TBT en tendens til romlig samvariasjon på alle dybder. Metallene viser mindre romlig mønstre i overflaten enn i enkelte dybdelag lenger ned, mens det muligens er motsatt tendens for PCB. For kvikksølv er det ikke noe påviselig romlig mønster i variasjonen i overflatemålingene overhodet (men denne viser korrelasjon i dypere lag).

Skalaen på den romlige korrelasjonen synes å være ganske liten. I overflaten er det tendenser til samvariasjon for kjerner som er under 50 m fra hverandre, noe som vises av at punktet lengst til venstre i hvert korrelogram i **Figur 12** ligger ned mot de stiplede linjene som viser signifikans (det er riktignok ingen av punktene som ligger klart under denne linjen, noe som ville indikere klart signifikant samvarians). Også for prøver 50-100 m fra hverandre (punkt nr. 2) er det en tendens til samvarians i PCB-innhold. For prøver som ligger over 100 m fra hverandre er det ingen klare tegn til samvariasjon; det er enkelte lave verdier for noen stoffer, eks. Hg (**Figur 12**), men disse viser ingen klar trend til lavere semivarians for korte avstander, som vist i **Figur 5c**. Lenger ned i sedimentet, under 50 cm, er det tegn til samvariasjon for PAHer, kobber og kvikksølv opp til 200 m skala.

At det er relativt få klart signifikante resultater kan delvis skyldes at det er få kjerneprøver som ligger veldig nær hverandre. Dette er årsaken til at de stiplede linjene "spriker" når avstanden blir liten, slik at for å oppnå signifikans (kryssing av nederste linje ved kort avstand) så kreves det nesten en semivarians på ned mot null, dvs. meget stor grad av likhet.



**Figur 12.** Variogram for utvalgte stoffer i overflatelaget (0-10 cm sedimentdybde). Punktene viser det empiriske variogrammet for dataene. Avvik utenfor de to stiplede linjene tyder på et statistisk signifikant romlig mønster. Grupperingene som er brukt for distanse er 0-50, 50-100, 100-150, 150-200, 200-300, 300-500 og 500-1000 m. Punktet lengst til venstre i hvert diagram viser altså semivarians mellom prøver som ligger under 50 m fra hverandre (lav semivarians = høy samvariasjon mellom prøvene). Statistisk signifikant romlig autokorrelasjon vil vises ved at punktet eller punktene lengst til venstre i hvert variogram går under den nederste stiplede linjen.

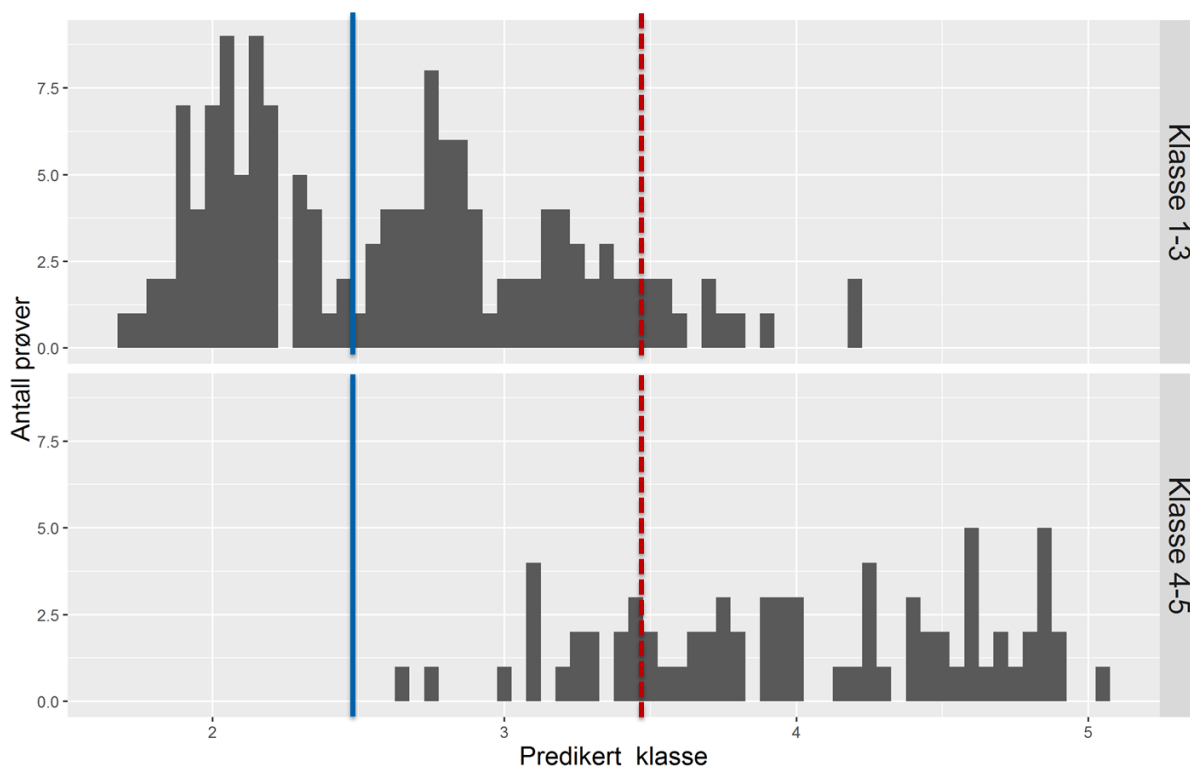


En kan tenke seg at det er større romlig samvarians i enkelte deler av området enn i andre. Ekstra undersøkelser av dette (Appendix: **Figur 25**, **Figur 26**, **Figur 27**) viser imidlertid ikke noen klare mønstre som tyder på dette. Siden tiltaksområdet er formet som en kanal, kunne man også tenke seg at romlig samvarians er forskjellig langs etter tiltaksområdet i forhold til på tvers, men det er ikke klare tegn til dette (**Figur 28**).

For kriging valgte vi ut den beste modellen ved hjelp av AIC-verdier (Appendix, **Tabell 17**), som viste seg å være modellen med alle kovariater inkludert.

### 3.3.6 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet, metode 2: GAM

Den beste GAM-modellen for forurensingsklasse for hver prøve (Appendix, **Tabell 18**) var en modell med to termer: en tre-dimensjonal romlig modell (x.rot, y.rot, Dybde), pluss en kategorisk term for dybdekategori, dvs. dybde i 5 kategorier som vist tidligere. Dybde er altså med to ganger i modellen (som dybdekategori og som en av de tre dimensjonene i den tredimensjonale termen), men dette er tydeligvis "lønnsomt" siden dybdekategori kun har en "kostnad" på 4 ekstra parametre. Modeller med én to-dimensjonal modell for hvert dybdelag var vesentlig dårligere, mens en modeller med én felles to-dimensjonal modell for alle dybdelag hadde mye lavere forklaringsgrad (selv med Dybdekategori med i modellen), noe som sterkt tyder på at det er ulike romlige mønstre i ulike dybdelag. Denne modellen forklarte 76.4% av variasjonen (devians) i forurensingsklasse (**Figur 13**). Fordi predikert klasse er en funksjon av flere kontinuerlige forklaringsvariable, er dette ikke en heltallsverdi 1-5, men en kontinuerlig verdi (som for visse verdier av forklaringsvariablene til og med kan bli mindre enn 1 og større enn 5).



**Figur 13.** Forklaringsstyrke hos den beste GAM-modellen. X-aksen viser modellens predikerte klasseverdi (som ikke nødvendigvis er et heltall) for hver prøve, fordelt på om prøvene faktisk var i klasse 1-3 eller 4-5. De to linjene viser grenseverdiene i **Tabell 10**; den blå, heltrukne linjen (Predikert klasse = 2.47) er trukket slik at prøver til høyre for den har ca. 50% kategori 4-5; den røde, stiplede linjen (Predikert klasse = 3.42) er trukket slik at prøver til høyre for den har ca. 80% kategori 4-5 (se tekst).

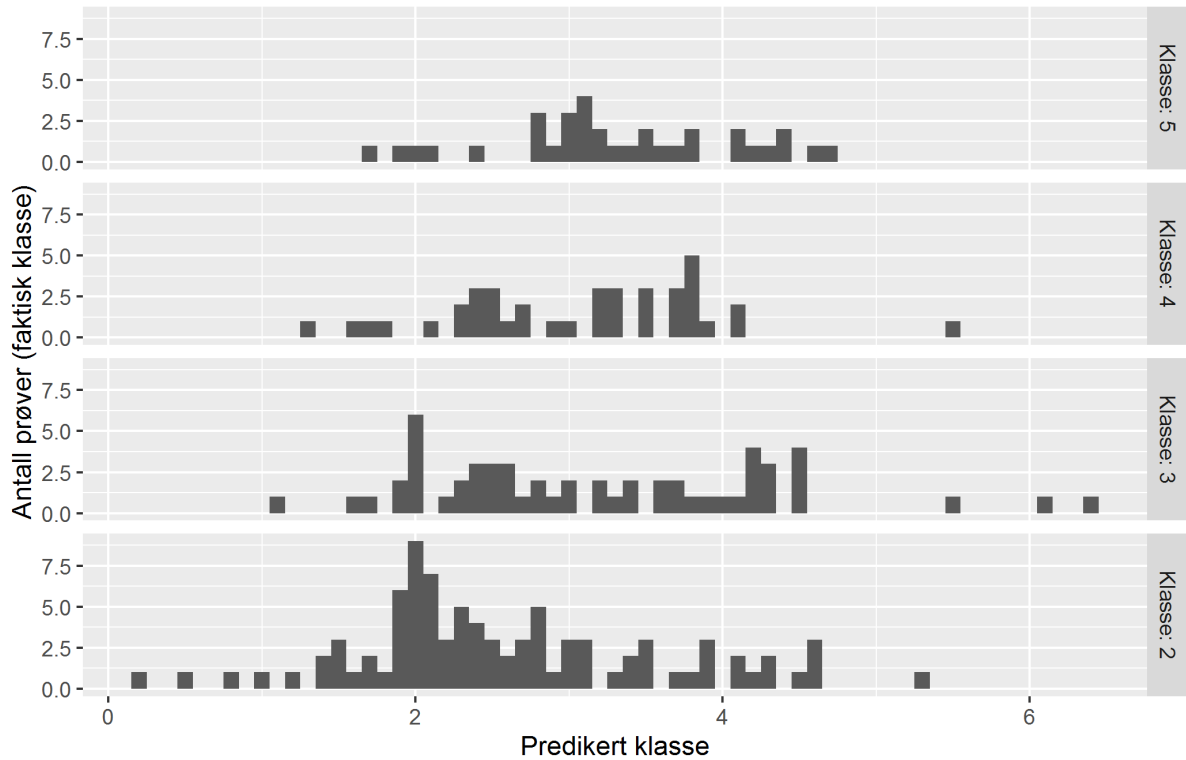
Med denne modellen fant vi to grenseverdier for bruk i sedimentkartleggingen: (1) en grenseverdi som er slik at ca. 50% av prøvene over denne verdien er i klasse 4-5, og (2) en grenseverdi slik at ca. 80% av prøvene over denne verdien er i klasse 4-5 (**Tabell 10**; se også de lodrette linjene i **Figur 13**). Denne predikerteklassen kan regnes ut for alle deler av sedimentet, og kan i teorien brukes til å velge sediment som skal til land- eller sjødeponi. Velger man å landdeponere alt sediment over den grenseverdi 1 får man med seg samtlige prøver i klasse 4-5, men altså på bekostning av å få med seg mye sediment med lavere forurensingsklasse. Velger man å landdeponere alt sediment over den grenseverdi 2, får man langt mindre sediment inneholdende ca. 80% kategori 4-5 masser, men på bekostning av å også "miste" en del prøver i klasse 4-5.

**Tabell 10.** Grenseverdier brukt ved sammenligning av romlig modell med kartlegging av sedimentmasser for sjø- eller landdeponering. Bruker man en grenseverdi på 2.47, er om lag halvparten (48%) av prøvene med predikert klasse over denne grenseverdien i forurensingsklasse 4-5.

		Faktisk kategori 1-3	Faktisk kategori 4-5	% kategori 4-5
<b>Grenseverdi: Predikert klasse = 2.47</b>				
	Prob <= 2.47	66	0	0%
	Prob > 2.47	79	73	48%
<b>Grenseverdi: Predikert klasse = 3.42</b>				
	Prob <= 3.42	131	14	10%
	Prob > 3.42	14	59	81%

### 3.3.7 Modellering av klasseverdi i horisontalplanet: kryssvalidering

I kryssvalidering på prøve-nivå oppnådde den beste kriging-modellen en oppnådde en korrelasjon ( $r$ ) mellom observerte og faktiske verdier på 0.52, mens GAM oppnådde  $r = 0.61$ . Det var imidlertid mye større forskjell når vi gjorde kryssvalidering på kjerne-nivå, der den beste kriging-modellen kun oppnådde  $r = 0.09$  mens enkelte GAM-modeller oppnådde så mye som  $r = 0.61$ . Dette var ikke GAM-modellen med lavest AIC (**Tabell 18**), som viste seg å være noe følsom/ustabil i en slik kryssvalideringstest. Den viste likevel signifikant sammenheng mellom observerte og faktiske verdier ( $P < 0.001$ ; **Figur 14**). Vi brukte derfor GAM-modellen med lavest AIC for kartlegging av sedimentmassene.



**Figur 14.** Kryssvalideringstest av GAM-modellen med lavest AIC. Predikert klasse for hver prøve er estimert ved hjelp av en modell som ikke brukte kjernen som denne prøven var en del av. Fordi modellen er lineær vil en del av prediksjonsfeilene (variasjonen rundt regresjonslinjen) få det utslaget at man får verdier under 1 og over 5.

### 3.3.8 Sammenligning av romlig modell med kartlegging av sedimentmasser for sjø- eller landdeponering

Vi delte sedimentmassen opp i forhold til både predikert klasseverdi (med grenseverdier angitt i Tab. 10) og etter usikkerhet. Det siste ble gjort ved å skille ut de tilfellene der predikert forekomst hadde en standardfeil (SE) på  $>0.6$  som "svært usikker" (se **Figur 30**). En standardfeil på 0.6 betyr at konfidensintervallet går omtrent 1.2 i hver retning fra den estimerte klasserverdien. Eksempelvis si at en predikert klasseverdi på 4 har et konfidensintervall på  $4 \pm 1.2$ , dvs. fra 2.8 til 5.2. Dette betyr at den reelle andelen sediment i klasse 4-5 kan være omtrent fra 0% til 100% (jamfør **Figur 13**).

En del av sedimentmassen, 133 000 m<sup>3</sup>, planlagt for sjødeponi hadde med en viss sannsynlighet en forekomst av  $>80\%$  sedimenter i klasse 4-5 (

**Tabell 11**). Dette utgjør i størrelsesorden 5% av det totale mudringsvolumet. Ytterligere 206 000 m<sup>3</sup> (8%) har en viss sannsynlighet for 50-80% klasse 4-5. Imidlertid er det et stort volum det er knyttet stor usikkerhet til, anslagsvis 509 000 m<sup>3</sup> av massene som planlegges å gå til dypvannsdeponi (ca. 20% av totalt mudringsvolum). Det meste av dette har et punktestimert som tilsier lav forurensingsklasse, men usikkerheten er så stor at det i realiteten ikke er mulig å si noe om forurensingsklassen.

Summen av disse volumene - tilsammen 33% (5% + 8% + 20%) av mudringsvolumet - kan tolkes som et ekstremt "worst-case" scenario med hensyn til mengde sediment i forurensingsklasse 4-5 som kan ende opp i sjødeponi. Dette worst-case-scenarioet oppstår dersom 100% av dette volumet i realiteten er i forurensingsklasse 4-5, altså et ekstremt usannsynlig scenario. Et mer realistisk worst-case scenario er at volumandelen av forurensingsklasse 4-5 er i størrelsesorden 30% av det usikre volumet (dvs. tilsvarende den observerte andelen forurensingsklasse 4-5 der vi faktisk har prøver). Dette realistiske worst-case-scenariet tilsvarer altså ca. 10% av det totale mudringsvolumet. Flere analyserte prøver vil redusere denne usikkerhetsrommet.

Når vi ser på disse resultatene i forhold til dybdeklasser (**Tabell 12**), er det klart at det mye av volumet med stor usikkerhet befinner seg fra 0.5 til 2 meters dybde under eksisterende havbunn. Her er antallet prøver forholdsvis lavt og det er til dels ganske langt mellom noen av prøvene.

Vi har også laget kart for fordelingen av sedimentmassene i noen dybder som representerer dybdelagene (**Figur 15, Figur 16**). Kartene viser både den romlige modellen for området (som farger) og oppdelingen i landdeponi/sjødeponi (som separate kart). Når man studerer kartene må man ta med i betraktning at de er representative for lag av forskjellig tykkelse. For eksempel viser figur (a) (i begge figurer) klassifisering og prediksjoner for 5 cm dybde, som igjen er representativt for 0-10 cm dybde av sedimentet, altså et mye mindre volum enn figurene (e) og (f), som representerer mye større masser (hvh. 50-100 cm og 100-200 cm dybde). Ideelt sett vil man ønske at røde områder i størst mulig grad havner på venstre side av kartet. Én årsak til at dette ikke er tilfelle for en del områder, spesielt i øvre lag (5 og 15 cm dybde på kartene) er at modellen ikke har en 100% riktig fordeling av de aktuelle prøvene, vil derfor en del prøver være "feilplassert" (eksempelvis at prøver med forurensingsklasse 1-3 havner i områder med høy sannsynlighet for forurensing). Mesteparten av volumet av sediment med usikker beskaftenhet befinner seg på 1-2 m dyp (på figuren representert som 145 cm dybde). Figurene viser at mye av disse massene befinner seg i den vestlige utbulingen (det planlagte snuplassarealet) i det nordlige 11,3 m-feltet og i den østlige halvparten av 13,3 m-området.

**Tabell 11.** Beregnede massevolumer (1000 m<sup>3</sup>) i forhold til modellert forekomst av sedimenter i klasse 4-5 og i forhold til om området er kartlagt for å gå til sjødeponi eller landdeponi. Kun masser mellom eksisterende sjøbunn og 2 m dyp er regnet med i tabellen. Beregningene er basert seg på celler med grunnflate 3 x 3 m og høyde 0.1 m. Radene merket "svært usikker" skiller ut sedimenter med standardfeil over 0.6. Tallene må sees på som en indikasjon på fordelingen av forurensede masser, snarere enn en eksakt beregning.

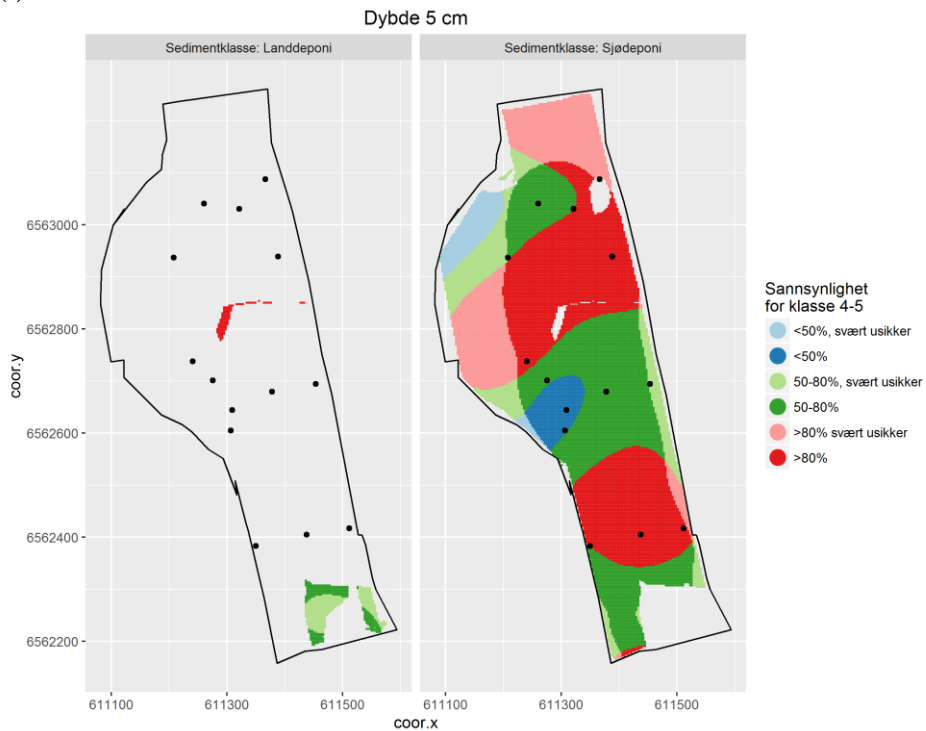
Predikert forekomst av klasse 4-5	Område: 11,3 m-dyp		Område: 13,3 m-dyp		Hele området	
	Sjødeponi (1000 m <sup>3</sup> )	Landdeponi (1000 m <sup>3</sup> )	Sjødeponi (1000 m <sup>3</sup> )	Landdeponi (1000 m <sup>3</sup> )	Sjødeponi (1000 m <sup>3</sup> )	Landdeponi (1000 m <sup>3</sup> )
<50%, svært usikker	76	7	259	3	335	10
<50%	66	2	131	2	197	4
50-80%, svært usikker	19	4	60	8	79	12
50-80%	69	10	137	25	206	35
>80%, svært usikker	16	3	79	8	95	10
>80%	30	8	102	47	133	56
<b>Sum</b>	276	34	769	93	1046	127

**Tabell 12.** Som

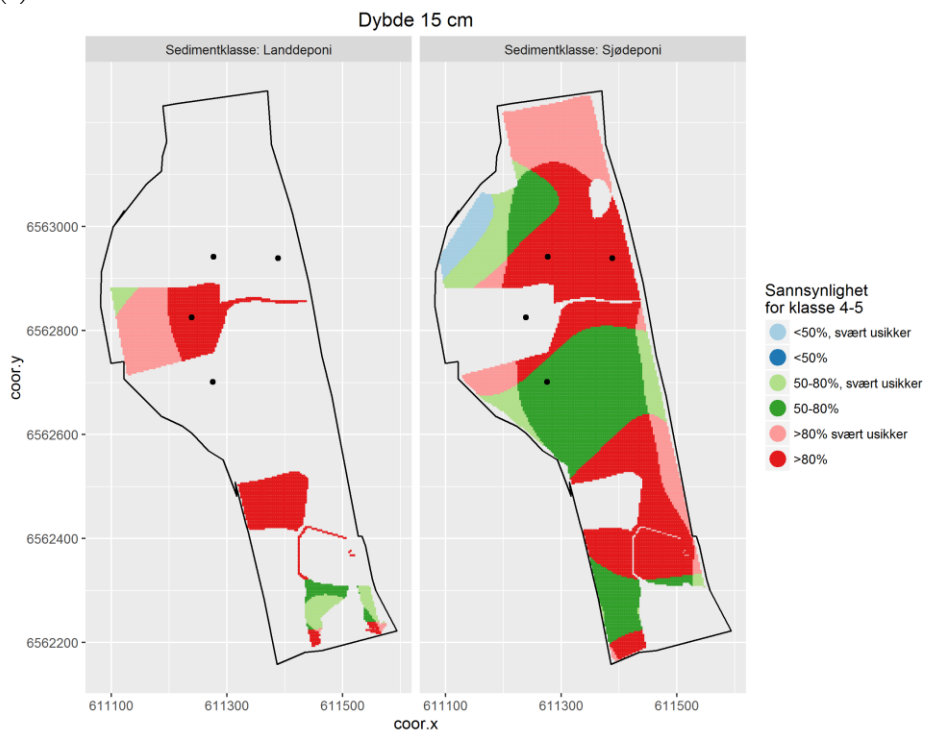
**Tabell 11,** men massevolumene (i 1000 m<sup>3</sup>) er oppdelt i forhold til dybde under sji forhold til modellert forekomst av sedimenter i klasse 4-5, deponikartlegging, og dybde (i forhold til eksisterende sjøbunn). Tallene må sees på som en indikasjon på fordelingen av forurensede masser, snarere enn en eksakt beregning.

	<50%	<50% Svært usikker	50-80%	50-80% Svært usikker	>80%	>80% Svært usikker
<b>Sjødeponi (1000 m<sup>3</sup>)</b>						
[0,10] cm	4	1	10	20	10	22
(10,30] cm	3	0	16	22	23	54
(30,50] cm	10	13	12	49	7	17
(50,100] cm	66	90	17	80	15	17
(100,200] cm	252	94	24	35	40	23
<b>Landdeponi (1000 m<sup>3</sup>)</b>						
[0,10] cm	0	0	1	2	1	2
(10,30] cm	1	0	3	3	5	14
(30,50] cm	4	2	4	10	1	11
(50,100] cm	5	3	3	17	3	16
(100,200] cm	1	0	0	3	0	12

(a)

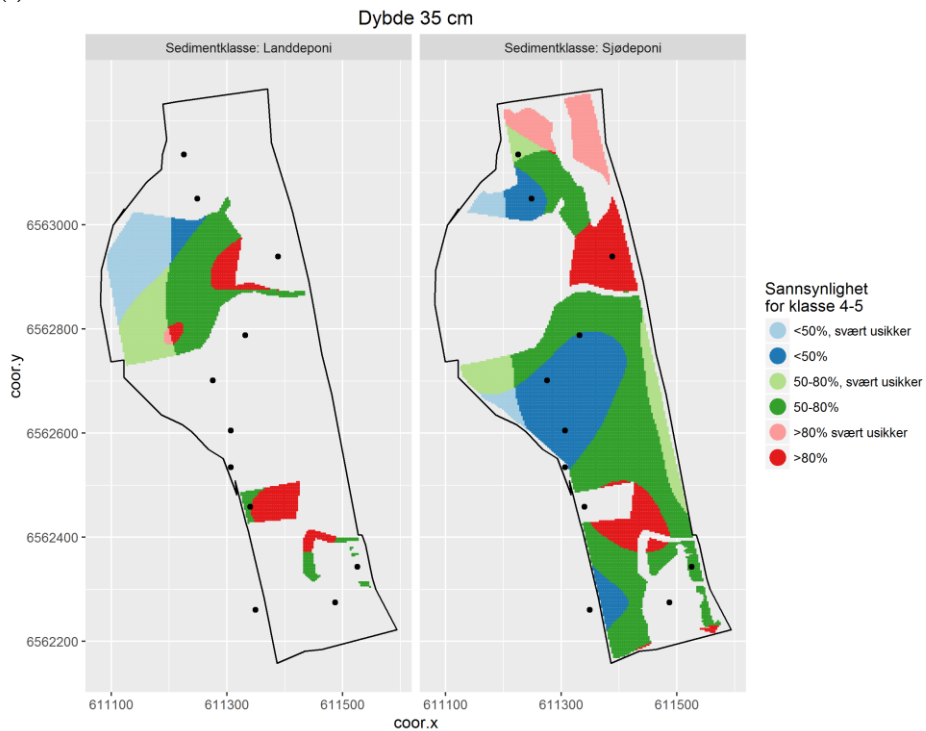


(b)

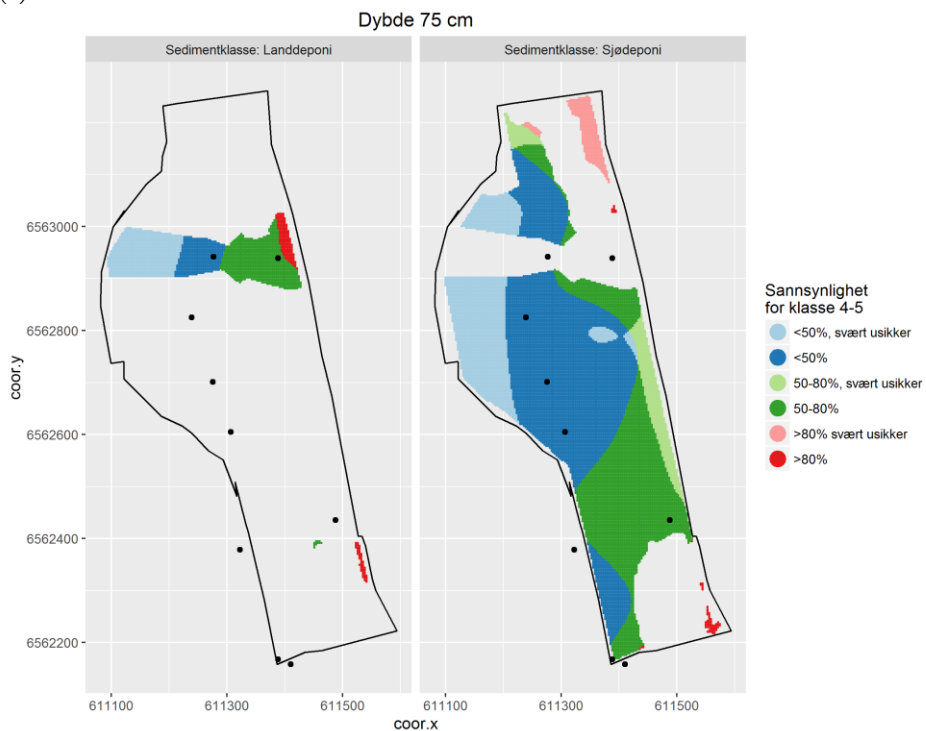


**Figur 15 a, b.** Predikert forekomst/sannsynlighet for å finne forurenset materiale i ulike deler av det sørlige delen av området (planlagt 11.3 m dybde). Hver dybde er vist med to kart som viser henholdsvis sedimenter kartlagt for landdeponi (venstre) og sjødeponi (høyre). Punktene viser alle prøver tatt et eller annet sted i det aktuelle dybdelaget (a: 0-10 cm, b: 10-30 cm; **Tabell 12**).

(c)

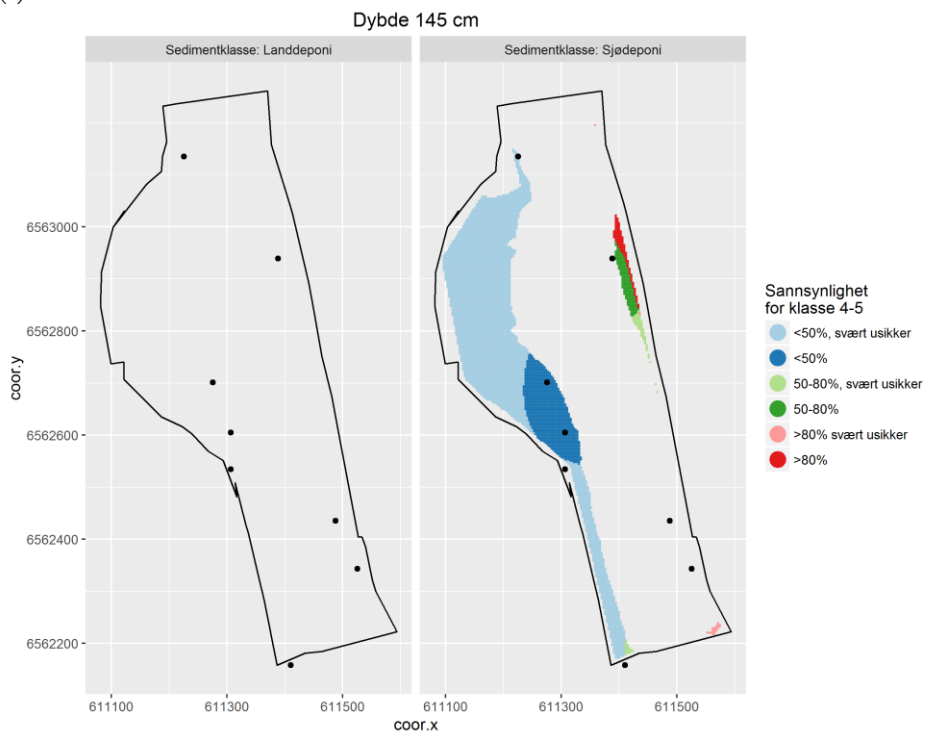


(d)



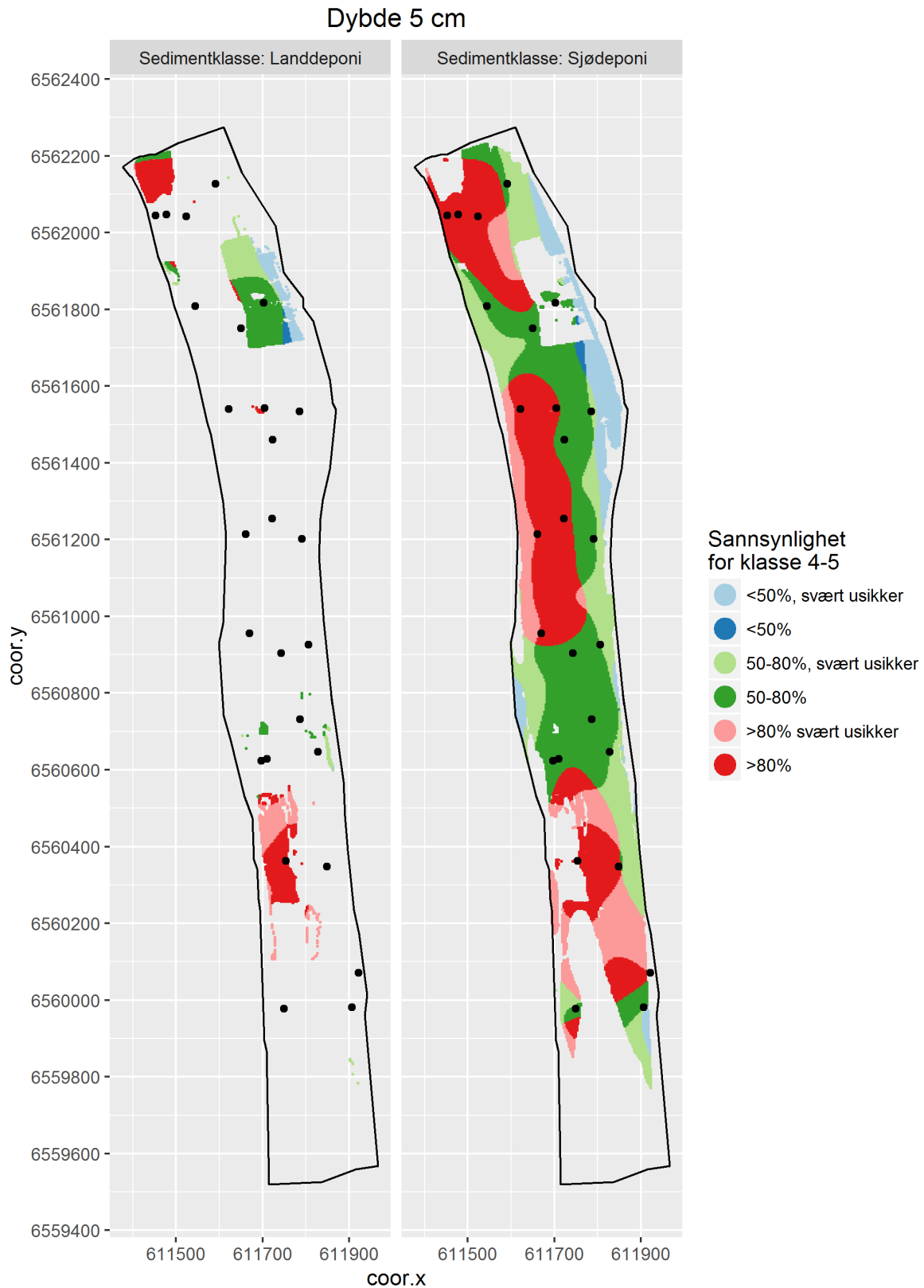
**Figur 15 c, d.** Predikert forekomst/sannsynlighet for å finne forurenset materiale i ulike deler av det sørlige delen av området (planlagt 11.3 m dybde). Hver dybde er vist med to kart som viser henholdsvis sedimenter kartlagt for landdeponi (venstre) og sjødeponi (høyre). Punktene viser alle prøver tatt et eller annet sted i det aktuelle dybdelaget (c: 30-50 cm, d: 50-100 cm; **Tabell 12**).

(e)

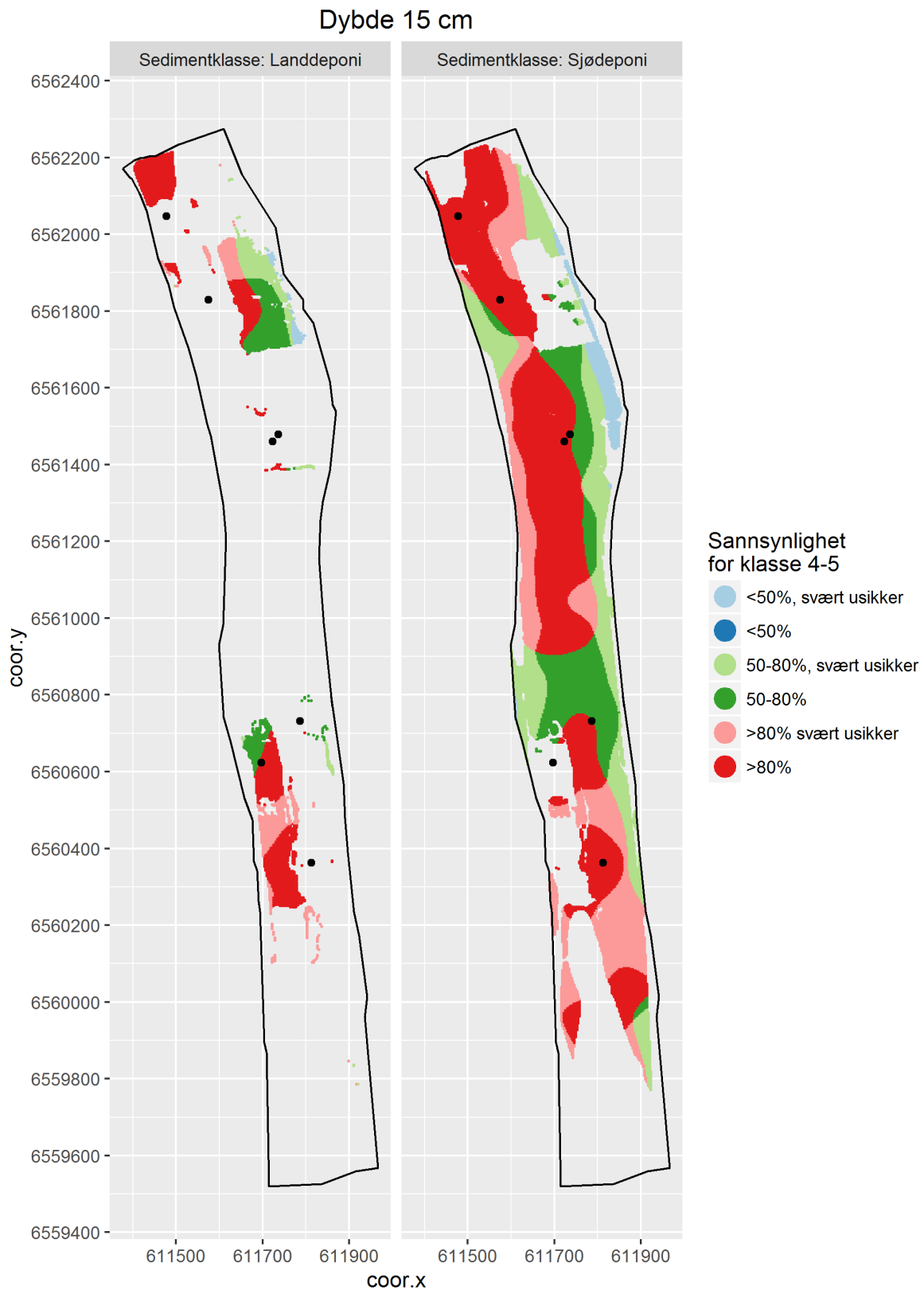


**Figur 15 e.** Predikert forekomst/sannsynlighet for å finne forurenset materiale i ulike deler av det sørlige delen av området (planlagt 11.3 m dybde). Hver dybde er vist med to kart som viser henholdsvis sedimenter kartlagt for landdeponi (venstre) og sjødeponi (høyre). Punktene viser alle prøver tatt et eller annet sted i det aktuelle dybdelaget (100-200 cm; **Tabell 12**).

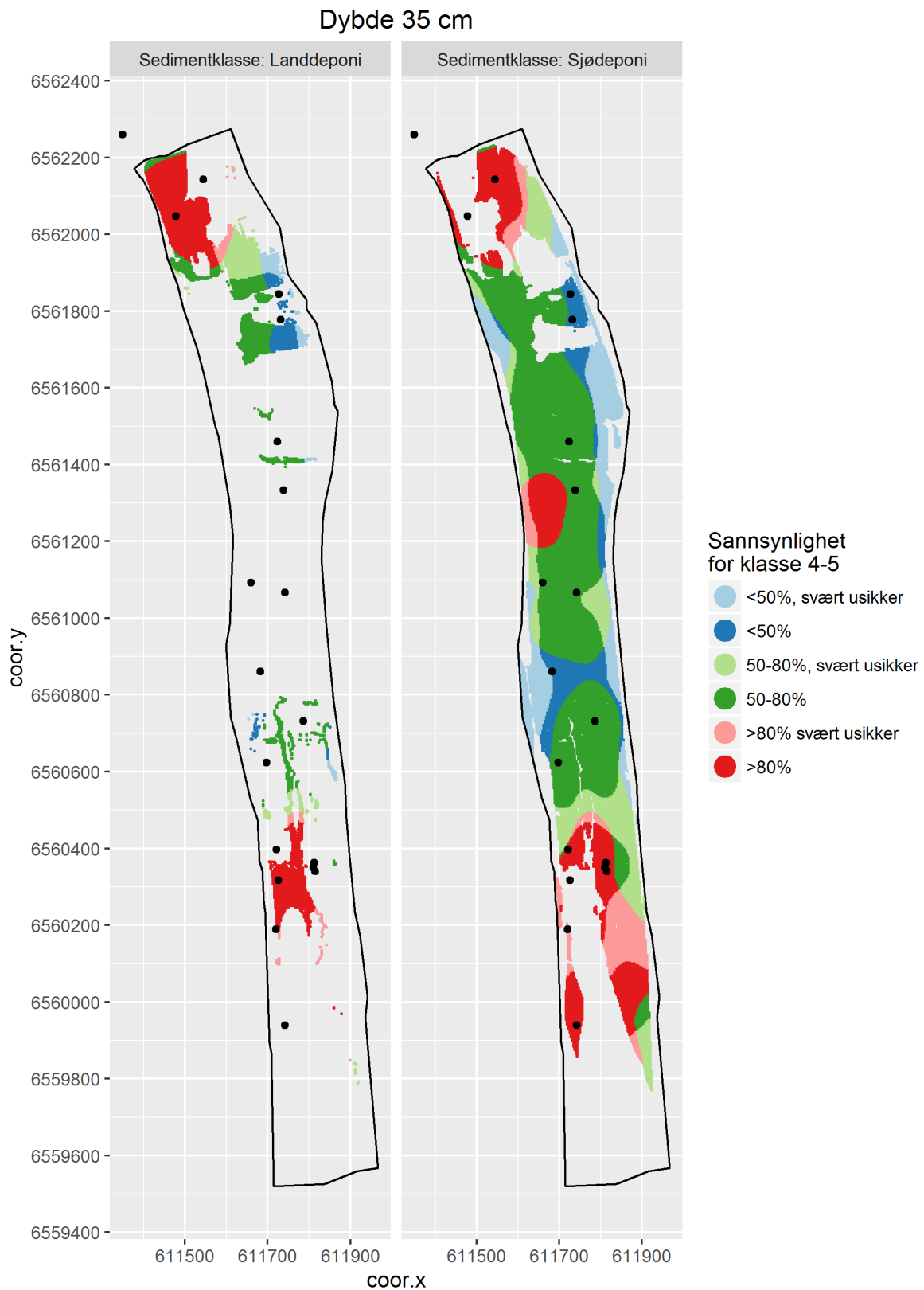




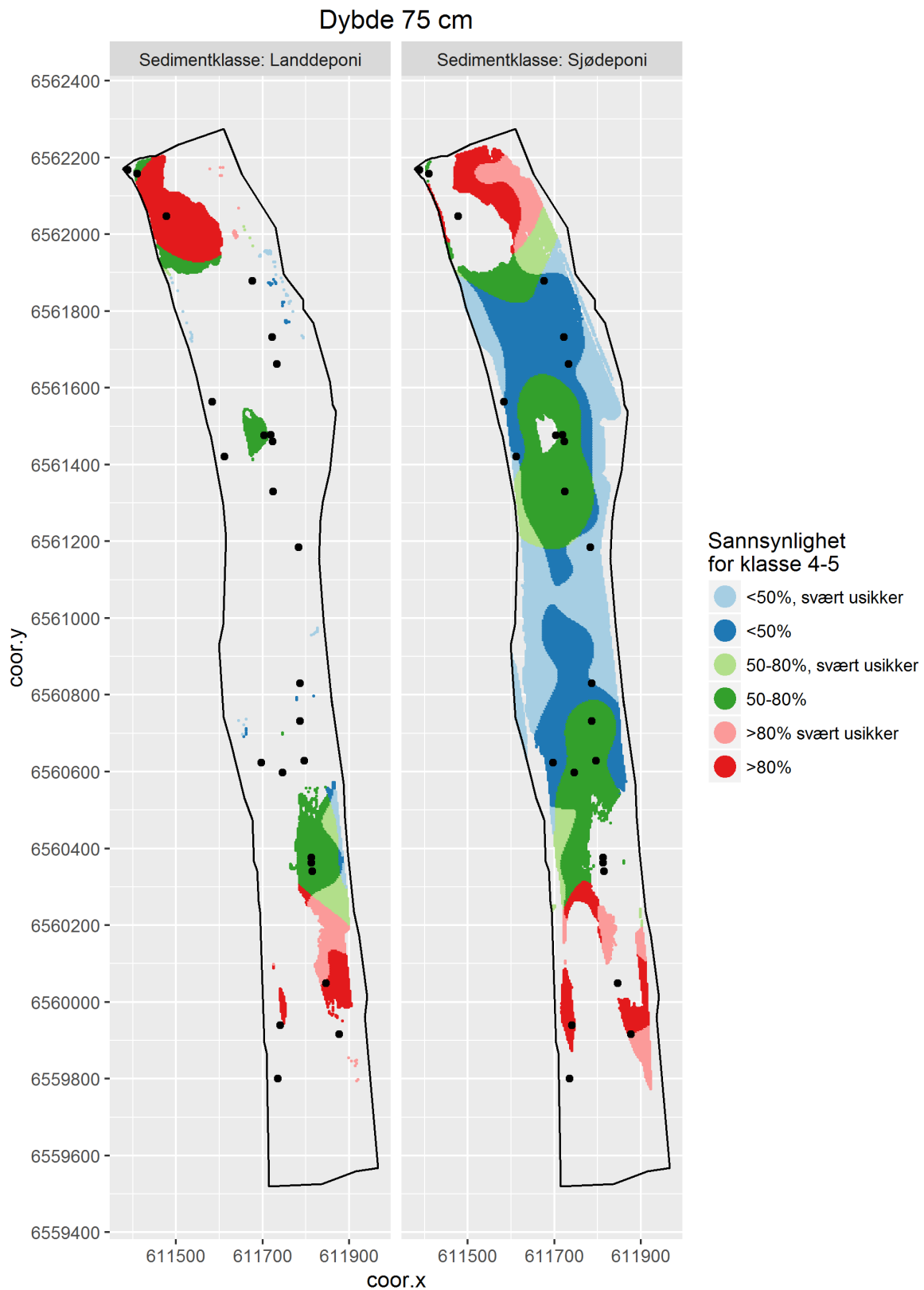
**Figur 16 a.** Predikert forekomst/sannsynlighet for å finne forurenset materiale i ulike deler av det sørlige delen av området (planlagt 13.3 m dybde), fordelt på sedimenter kartlagt for landdeponi/sjødeponi. Kartet representerer dybdelaget 0-10 cm (**Tabell 12**); punktene viser alle prøver tatt et eller annet sted i dette dybdelaget.



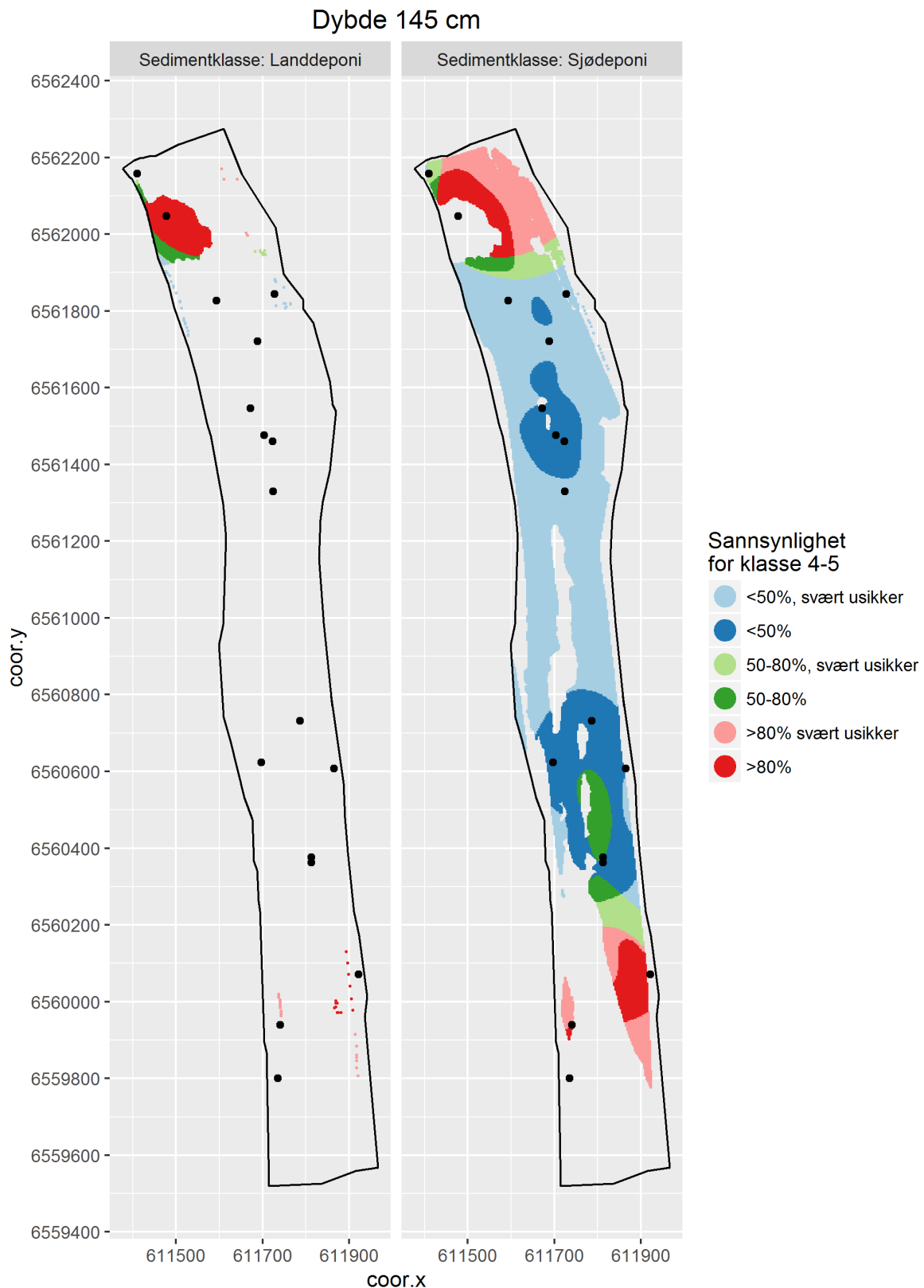
**Figur 16 b.** Predikert forekomst/sannsynlighet for å finne forurenset materiale i ulike deler av det sørlige delen av området (planlagt 13.3 m dybde), fordelt på sedimenter kartlagt for landdeponi/sjødeponi. Kartet representerer dybdelaget 10-30 cm (**Tabell 12**); punktene viser alle prøver tatt et eller annet sted i dette dybdelaget.



**Figur 16 c.** Predikert forekomst/sannsynlighet for å finne forurenset materiale i ulike deler av det sørlige delen av området (planlagt 13.3 m dybde), fordelt på sedimenter kartlagt for landdeponi/sjødeponi. Kartet representerer dybdelaget 30-50 cm (**Tabell 12**); punktene viser alle prøver tatt et eller annet sted i dette dybdelaget.



**Figur 16 d.** Predikert forekomst/sannsynlighet for å finne forurenset materiale i ulike deler av det sørlige delen av området (planlagt 13.3 m dybde), fordelt på sedimenter kartlagt for landdeponi/sjødeponi. Kartet representerer dybdelaget 50-100 cm (Tabell 12); punktene viser alle prøver tatt et eller annet sted i dette dybdelaget.



**Figur 16 e.** Predikert forekomst/sannsynlighet for å finne forurenset materiale i ulike deler av det sørlige delen av området (planlagt 13.3 m dybde), fordelt på sedimenter kartlagt for landdeponi/sjødeponi. Kartet representerer dybdelaget 100-200 cm (**Tabell 12**); punktene viser alle prøver tatt et eller annet sted i dette dybdelaget.

## 4. Diskusjon og konklusjon

Når man leser resultatene i denne rapporten, dvs. beregninger og kart av massevolumer med ulike grader av sannsynlighet for klasse 4-5, er det viktig å være klar over at beregningene bygger på én bestemt type statistisk modell, GAM. Det finnes flere alternative statistiske modeller som kunne brukes, eksempelvis random forest-metoder, som alle vil gi noe ulike resultater. Tabellene og figurene for masseberegninger må derfor ikke tas altfor bokstavelig, men mer som en indikasjon på usikkerheten i mengdene av forurensing mellom prøvene. Når det er sagt, er klassifiseringsevnen til GAM-modellen ganske god (se eks. **Figur 13**). Modellen er i stand til, kun ut fra opplysning om posisjon, å dele prøvene i to grupper med henholdsvis 10% og 81% forurenset sediment (**Tabell 10**). Det er trolig ikke lett å oppnå vesentlig høyere klassifisering med en annen metode, og de endelige konklusjonene vil derfor sannsynligvis ikke være vesensforskjellige.

Vi fant at det er en klar grad av korrelasjon i forureningsgrad både mellom prøver i horisontalplanet og mellom påfølgende 10 cm-lag vertikalt. Selv om tradisjonelle geostatistiske modeller (variogrammene i f. eks. **Figur 12**) ikke fanger opp korrelasjonen i horisontalplanet godt, den romlige korrelasjonen altså stor nok til å gi en vesentlig korrelasjon mellom predikerte og observerte verdier med GAM ved kryssvalidering. Forutsetningene for en 3D-kartlegging av sediment er derfor i prinsippet til stede.

Selv om GAM-modellen er ganske god til å klassifisere prøvene, viser kryssvalideringen at klassifikasjonsevnen synker drastisk ved kryssvalidering (**Figur 14**). Det vil si, om man fjerner en enkelt prøve fra datasettet, estimerer modellen på nytt og så forsøker å klassifisere det prøven man kastet ut, er suksessen ganske lav. Dette tyder på at vi sannsynligvis vil ha ganske liten suksess i å predikere forureningsgraden i nye prøver (mellom de eksisterende prøvene). Dette vises også av at modellen har store "gap" mellom målepunktene der man ikke har statistisk grunnlag for å si noe særlig om forureningsklassen for et gitt stoff eller generelt. I disse "gapene" viser den statistiske modellen meget høy usikkerhet (tilsvarende standardavviket for hele datasettet). Til sist viser også variogrammene at den romlige korrelasjonen i forureningsgrad ganske liten i forhold til avstanden mellom målepunktene.

Også den vertikale fordelingen av forurensing byr på utfordringer. I et fysisk uforstyrret sediment skulle forvente en "en-topp" fordeling av forurensing, at de største konsentrasjonene av forurensing er forholdsvis høyt oppe i sedimentet, men under sedimentoverflaten (i lag som ble dannet i perioden med mest forurensing, typisk 1950-1990). Dette støttes i og for seg av dataene her; dybdelaget 10-30 cm hadde størst andel prøver i klasse 4-5 (67%), noe som er statistisk signifikant mer forurensing enn både sedimentlaget over (0-10 cm) og under (30-50 cm). De lange kjernene som er analysert i hele lengden viser imidlertid at det både finnes områder med to lag med forurensing (RRK-62) og med mest forurensing i dype lag under 1 m (RRK-4). Det er trolig at dette er tilfellet i flere områder enn de som er påvist.

Det er generelt relativt mye forurensing i dype lag, fra 1 til 2 meter dybde: 28.1% av prøvene i denne dybden var i forureningsklasse 4-5, noe som er kun litt lavere enn gjennomsnittet på 32.1% (**Tabell 15**). Denne dybdesonen har forholdsvis lav dekning av prøver i dette dybdelaget (24 kjerner, **Figur 4**). I det sørlige delområdet er det eksempelvis en strekning på over 500 m uten prøver i dette dybdelaget, og det mangler også prøver fra snuplassen i den vestlige delen av 11,3 området. Det er også for lite korrelasjon vertikalt til at man kan forutsi forurensing i dype lag basert på prøver fra lag lenger oppe. I størrelsesorden 3% av massene i dette dybdelaget er kartlagt som masser for landdeponi (**Tabell 12, Figur 16**), mens 32% av prøvene i dette dybdelaget er i klasse 4-5 (**Tabell 13**). Av de 9 mer eller mindre fullstendig kartlagte kjernene, viser nesten halvparten (fire kjerner) mye forurensing i disse dype lagene (**Figur 11**). Dette misforholdet påvirker det statistiske resultatet. Siden dette dybdelaget utgjør et stor volum, er dette styrende for statistikken for kartleggingen totalt (**Tabell 11**).

Vi fant at for 33% av mudringsvolumet som er kartlagt for deponering i sjø er det betydelig usikkerhet i forureningsstilstand. Dersom disse sedimentene har omtrent samme volumandelen av forureningsklasse som de analyserte prøvene (32%), betyr dette at et realistisk worst-case-scenario er at ca. 10% av det totale mudringsvolumet kan være "feilklassifisert" for sjødeponi.

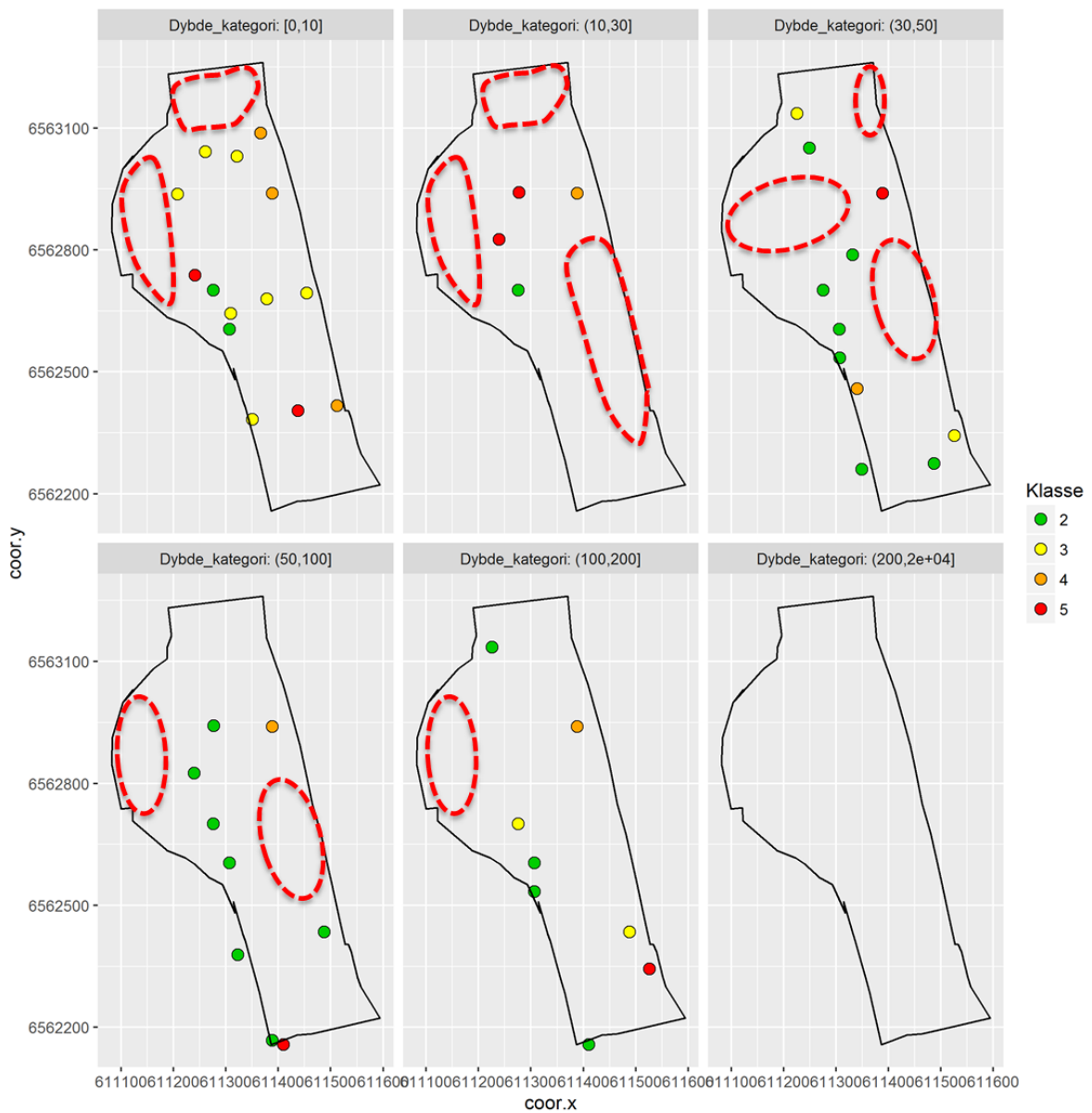
Generelt er andelen sediment som er kartlagt for landdeponi mye lavere enn andelen av sedimentprøvene som faktisk er i forurensingsklasse 4 og 5 (Tabell 14). Sedimentprøvene er ikke valgt ut helt tilfeldig (innen hver kjerne ble det forsøkt å ta prøver fra ulike lag bestemt visuelt), så det derfor ikke definitivt grunnlag for å slå fast at andelen forurenset sediment i prøvene er representativt for sedimentet i hvert dybdelag. Med dette forbeholdet, slår vi fast at forskjellen i prosentandel er likevel meget stor.

Det er forholdsvis lite sammenheng mellom ulike typer forurensing, og målinger av metallkonsentrasjoner i felt (dvs. på lekter, før deponering) gir en ganske dårlig pekepinn på sedimentets forurensingsklasse. Metoden kan imidlertid være et nyttig supplement til kjemiske analyser.

I konklusjon vil vi anbefale et større antall prøver for analyse. Spesielt gjelder dette de dypere delene av sedimentet mellom 1 og 2 meter, samt i sjiktet 10-30 cm for å slå fast hvorvidt dette laget er spesielt forurenset eller ikke. Områder der ytterligere prøver for analyse kunne trenge er skissert i **Figur 17** og **Figur 18**. Med 2-3 prøver fra hver av disse 23 skisserte områdene får man rundt 50-70 ekstra prøver (delvis fra kjerner som allerede er samlet i felt, og delvis fra nye kjerner). Dette vil trolig gi en ganske betydelig reduksjon av usikkerheten i identifiseringen av forurensete sedimenter. For en meget sikker avgrensing – eksempelvis der man med rimelig sikkerhet kan si at "rene sedimenter" har maks. 10% kategori 4-5 og "forurenset sediment" har minst 80% kategori 4-5 – må man trolig opp i mye høyere tetthet av kjerner, i størrelsesorden dobbelt så mange kjerner som er hentet inn nå.

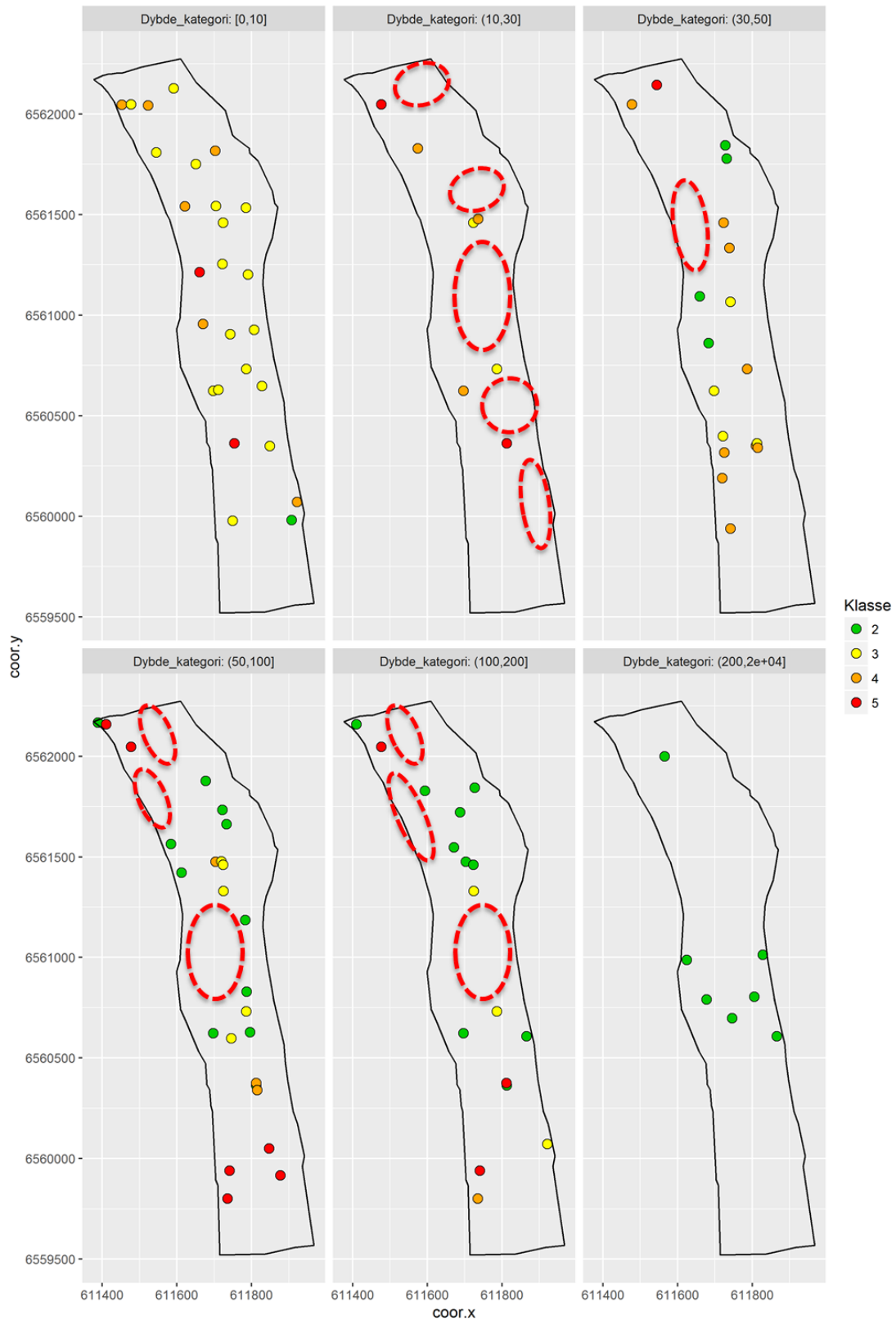
**Tabell 15.** Sammenligning mellom prosent av volum kartlagt som landdeponi og prosentvis volum av sediment i klasse 4-5 for hver dybdekategori.

Dybde	Prosent kartlagt som landdeponi	Prosent av prøvene som har forurensingsklasse 4-5
0 - 10 cm	8.2	32.5
10 - 30 cm	18.1	66.6
30 - 50 cm	22.9	37.2
50 - 100 cm	14.2	27.9
100 - 200 cm	3.3	28.1



**Figur 17.** Mulige områder for ytterligere kjemiske analyser (i noen tilfeller også sampling av kjerner, der prøver ikke er hentet inn). Nordlig delområde (mudringsdybde 11,3 m).





**Figur 18.** Mulige områder for ytterligere kjemiske analyser (i noen tilfeller også sampling av kjerner, der prøver ikke er hentet inn). Sørlig delområde (mudringsdybde 13,3 m).

## 5. Referanser

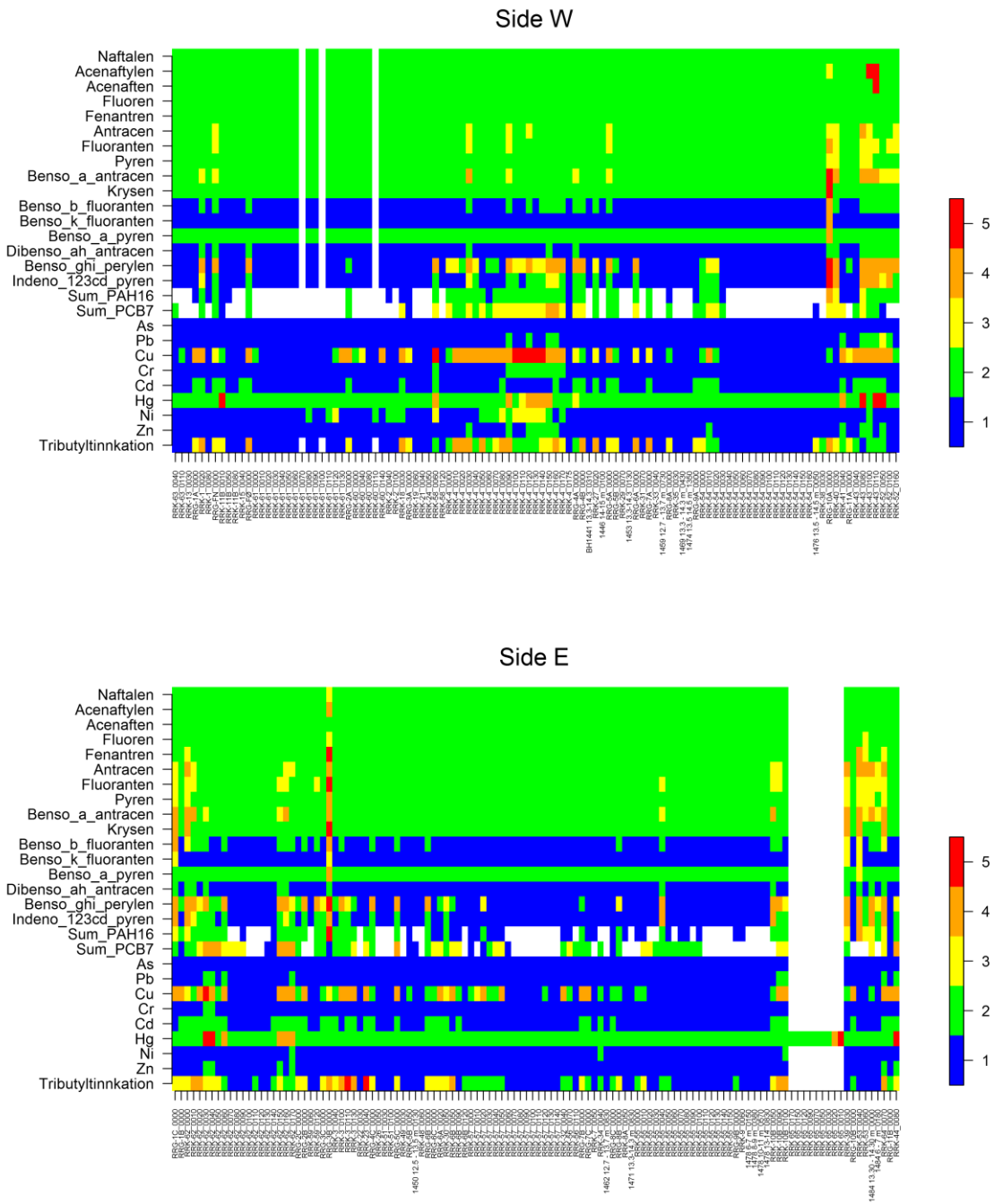
Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 19: 716–723.

Hastie, T. J.; Tibshirani, R. J. (1990). *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall/CRC

Hastie, T.J., Tibshirani, R. and J. Friedman 2009. *The Elements of Statistical Learning: Prediction, Inference and Data Mining*, Second Edition, Springer Verlag.

Wood, S.N. (2004) Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models. *Journal of the American Statistical Association*. 99:673-686

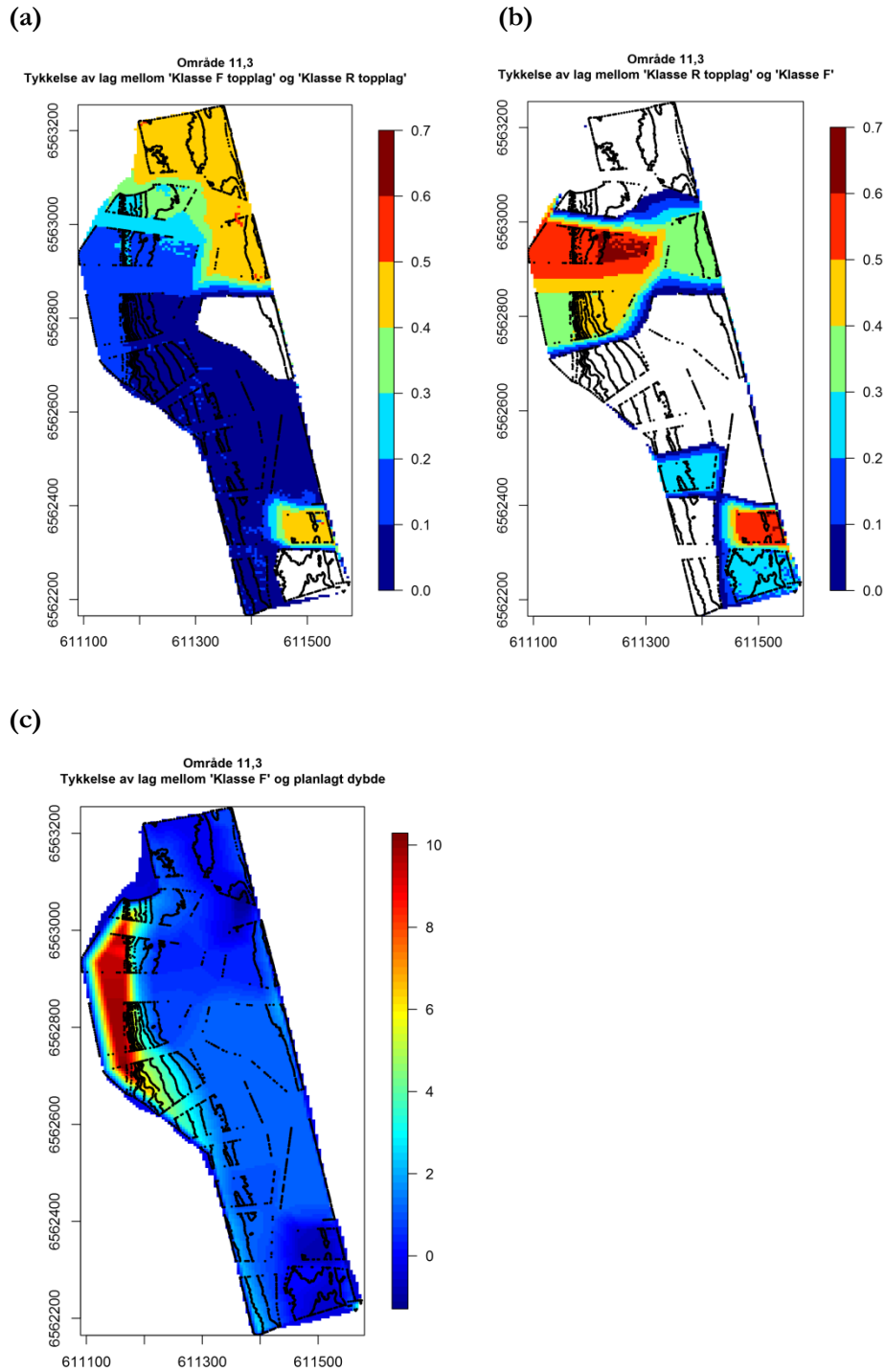
## 6. Appendix



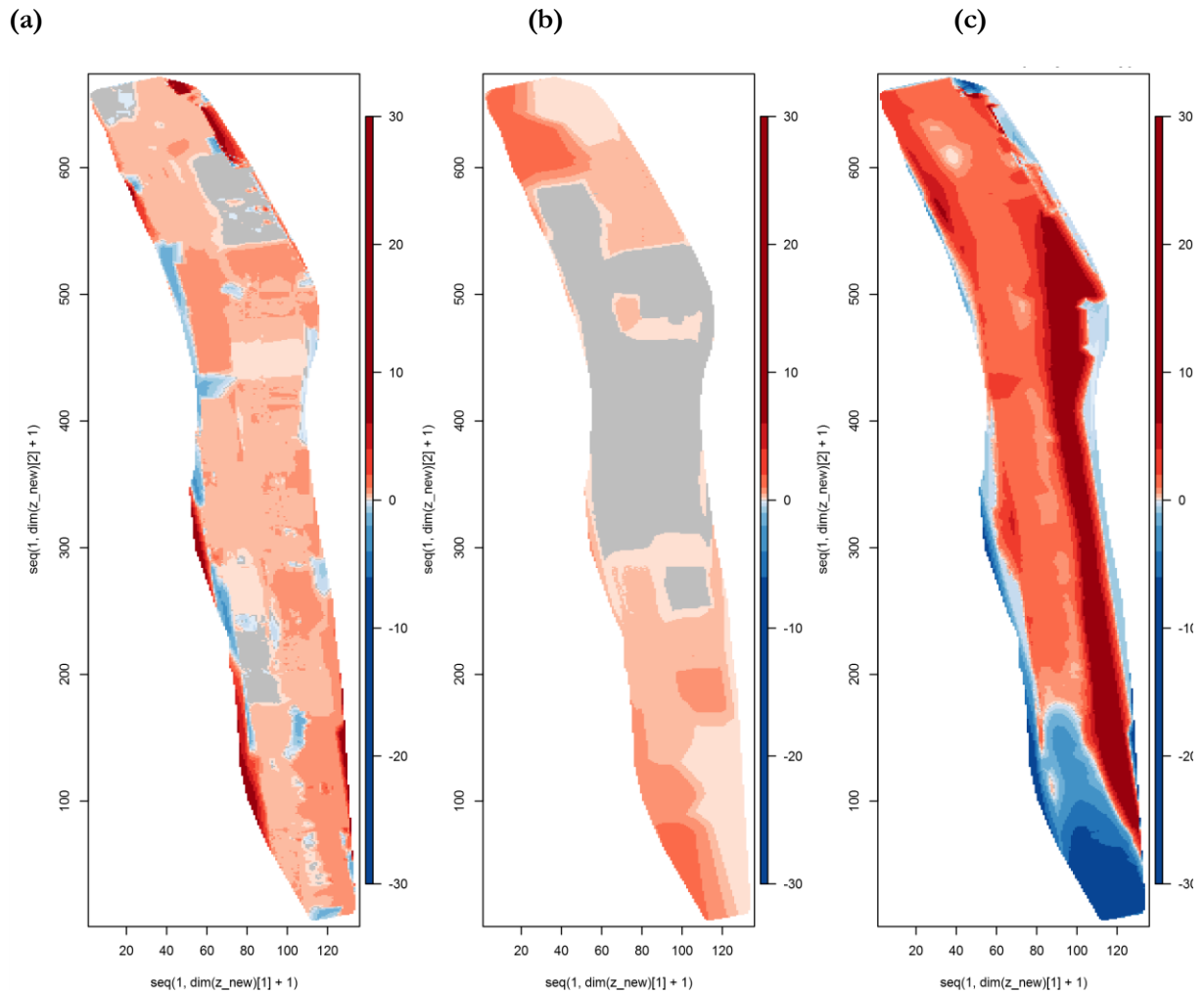
**Figur 19.** Klasseverdier for samtlige stoffer og samtlige prøver. Prøvene er sortert i vest- og østside og i en omtrentlig rekkefølge fra nord mot sør.

**Tabell 16.** Filer og kartlag brukt for eksisterende og prosjektert sjøbunn samt lag som skiller forurensete fra rene sedimenter. dxf-filene er eksportert fra AutoCAD.

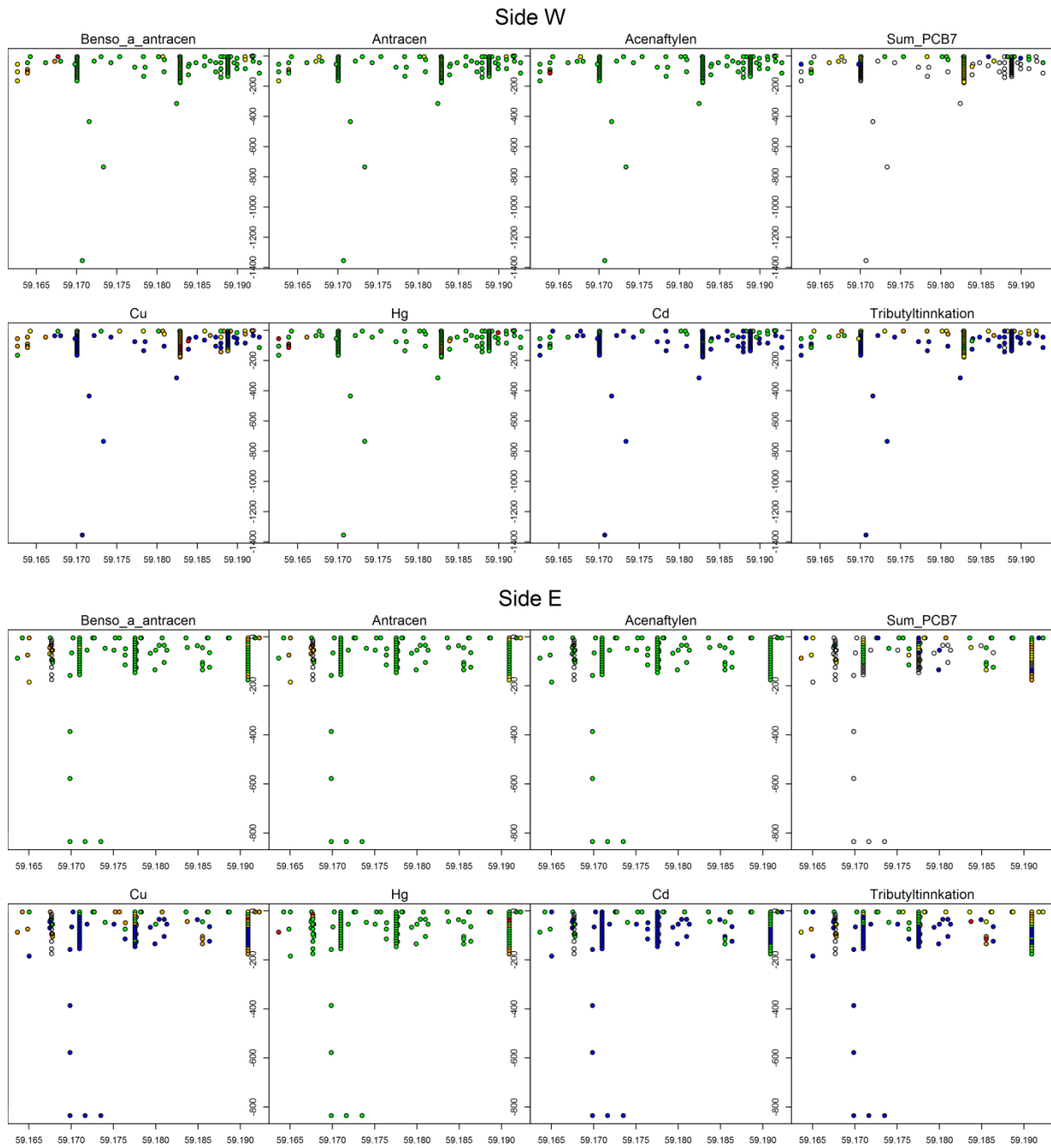
	<b>Kartlag</b>	<b>Område 11,3 m dyp</b>		<b>Område 13,3 m dyp</b>	
		<b>Fil</b>	<b>Navn på lag</b>	<b>Fil</b>	<b>Navn på lag</b>
1	Eksisterende sjøbunn	11,3 Klasse F topplag.dxf	Klasse F	total 13,3.dxf	Sjøbunn
2	Øvre grense for forurenset sediment	11,3 Klasse R topplag.dxf	Klasse R topplag	Topplag F_13,3.dxf	Forurenset
3	Nedre grense for forurenset sediment	11,3 Klasse F.dxf	Klasse F	Bunn R_13,3-Mudringsdyp-150.dxf	Bunnrent
4	Prosjektert sjøbunn	11,3 KlasseF-Mudringsdyp.dxf	Røsvikrenna	13,3 KlasseR-Topplag-Mudringsdyp.dxf	All objects



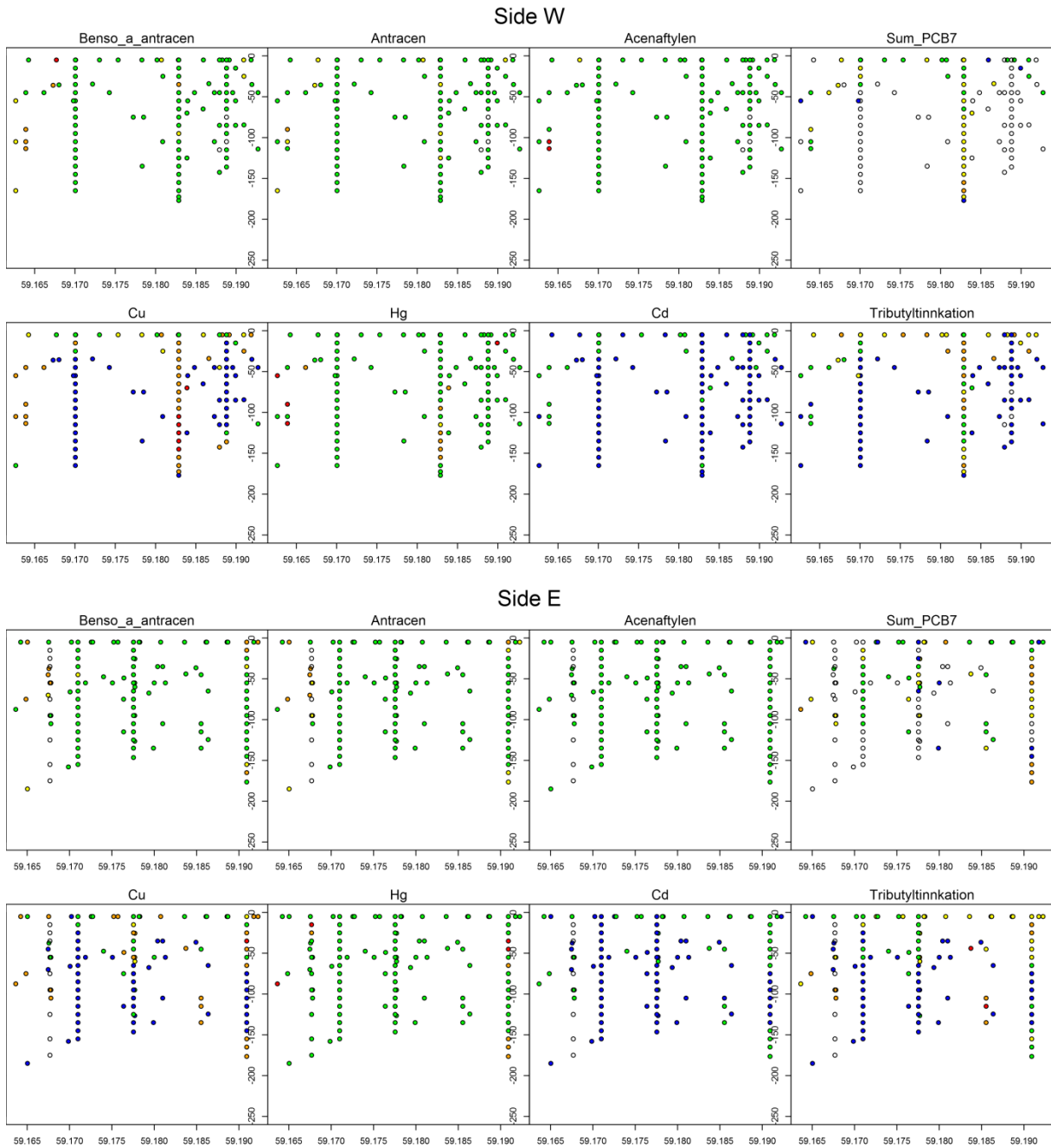
**Figur 20.** Kartlagte lag i det nordlige delområdet (11,3 m-området): (a) Øverste masser for sjødeponi, (b) Masser for landdeponi, og (c) nederste masser for sjødeponi. Skalaen viser lagdykkelse i meter.



**Figur 21.** Kartlagte lag i det sørlige delområdet (13,3 m-området): (a) Øverste masser for sjødeponi, (b) Masser for landdeponi, og (c) nederste masser for sjødeponi. Dypere rødsjatteringer viser større tykkelse av lag; grå områder er områder der det ikke er noen masser av den aktuelle typen. Skalaen viser lagdykkelse i meter. Det blå området i (c) viser områder der det ikke skal mudres da ønsket dybde allerede er oppnådd (dette ble tatt hensyn til i den endelige analysen).

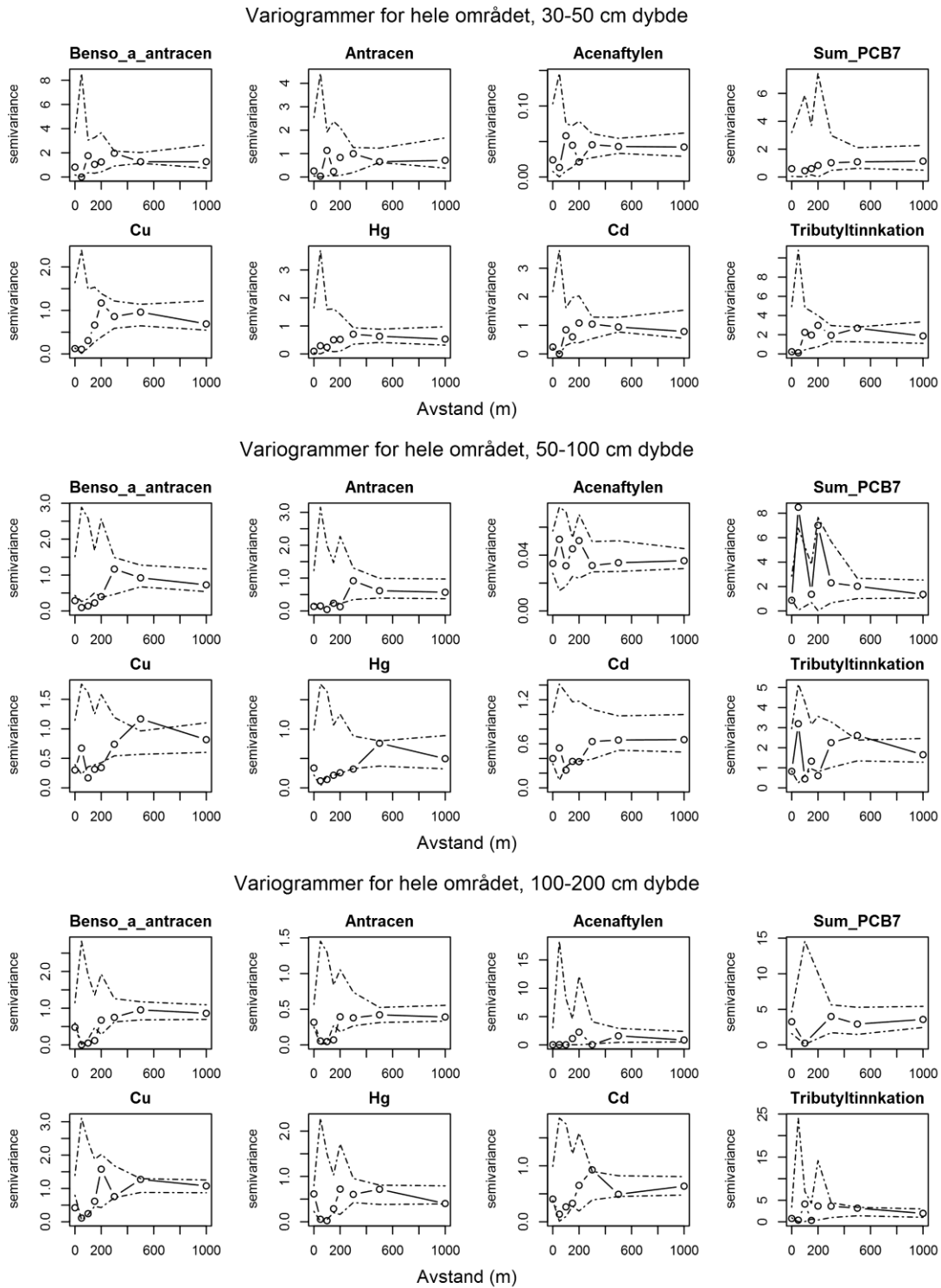


Figur 22. Klasseverdier for utvalgte stoffer i forhold til dybde.



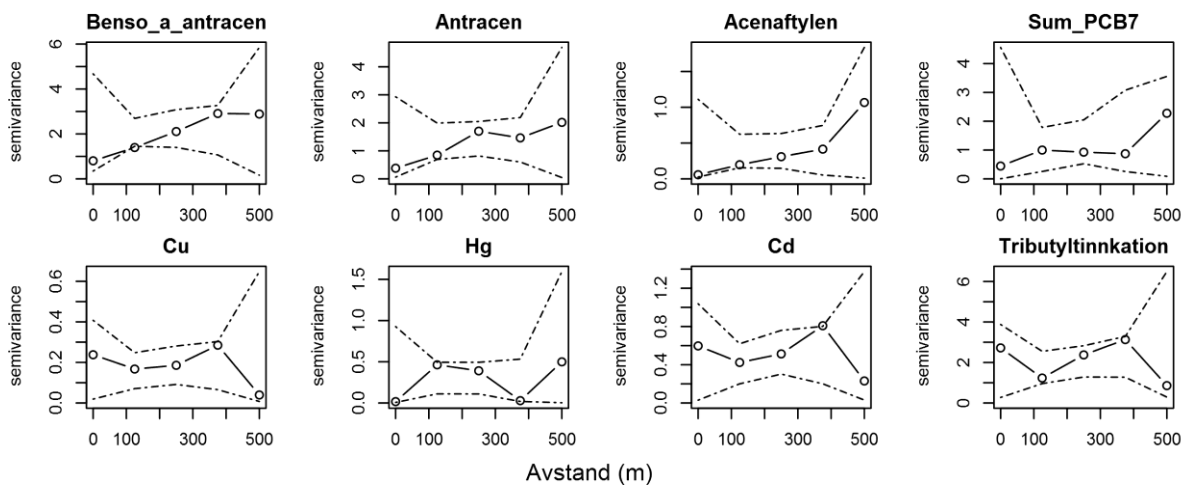
**Figur 23.** Klasseverdier for utvalgte stoffer i forhold til dybde, kun 0-2 m dyp.



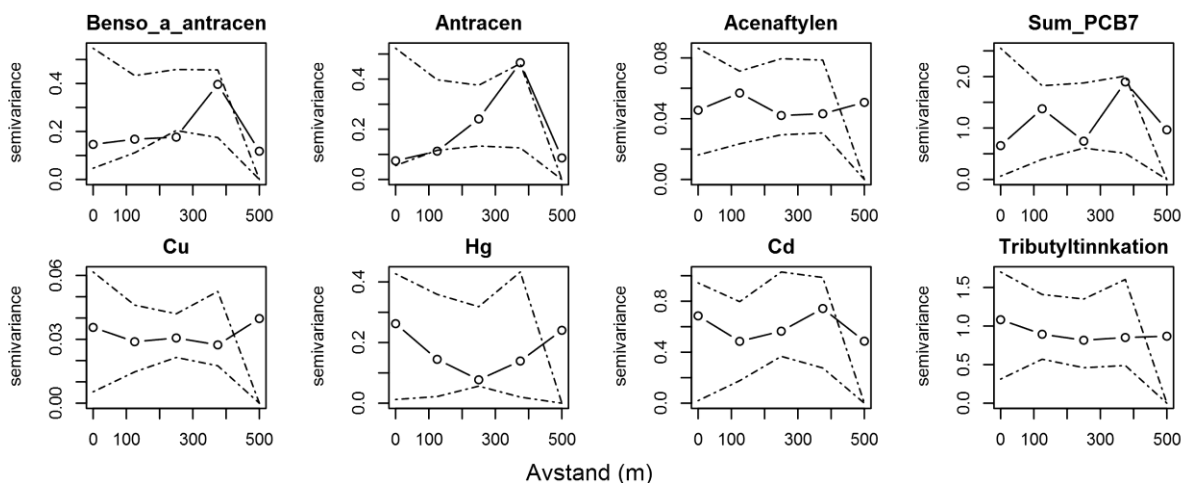


**Figur 24.** Variogrammer for dybdelag under 10 cm (variogram for 0-10 cm er vist i **Figur 12**). Det er ikke vist variogrammer for 10-30 cm dyp eller dyp > 200 cm pga. lite data.

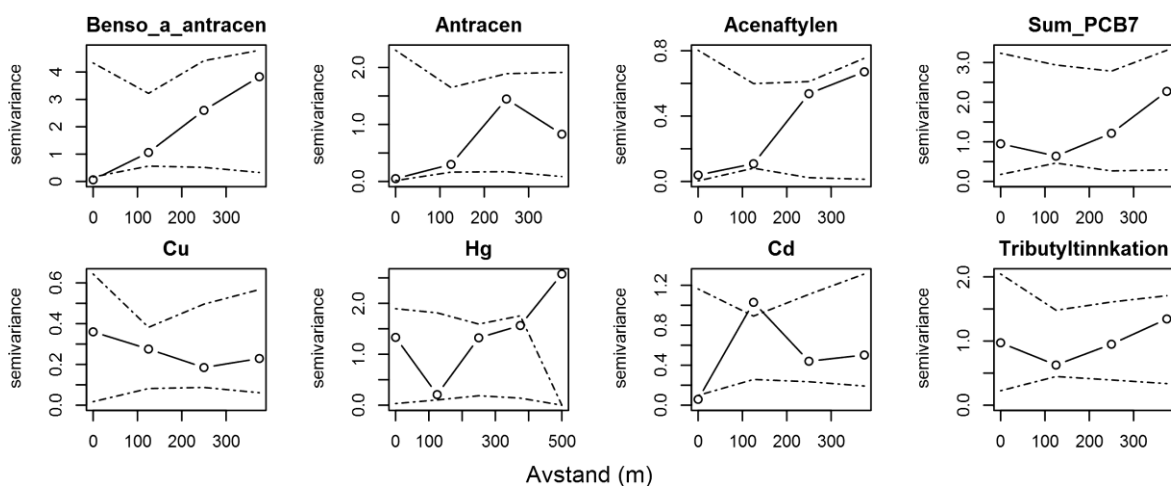
Variogrammer for den nordlige del av området (11.3 m mudredyp)



Variogrammer for den midtre del av området (13.3 m mudredyp)

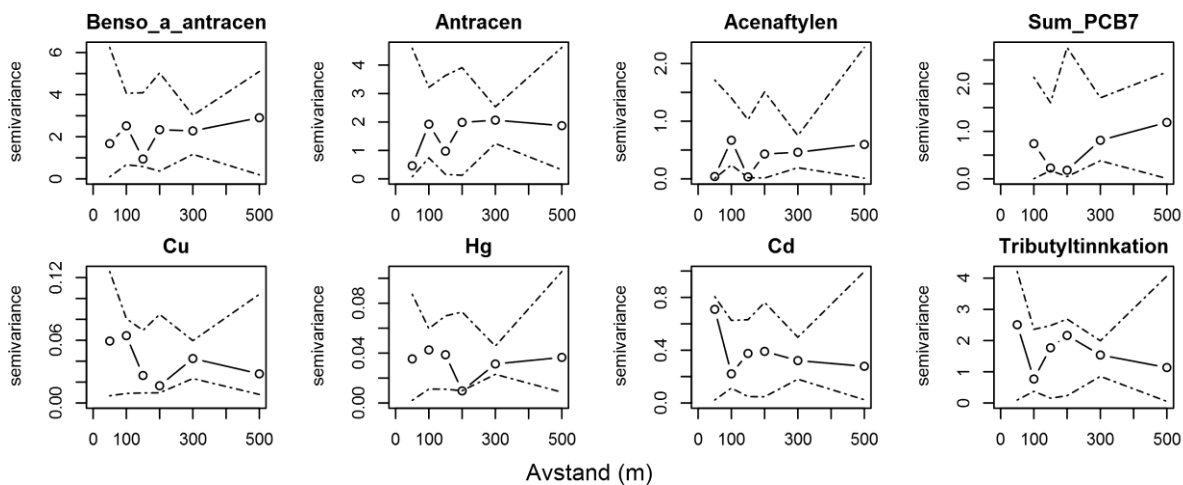


Variogrammer for den søndre del av området (13.3 m mudredyp)

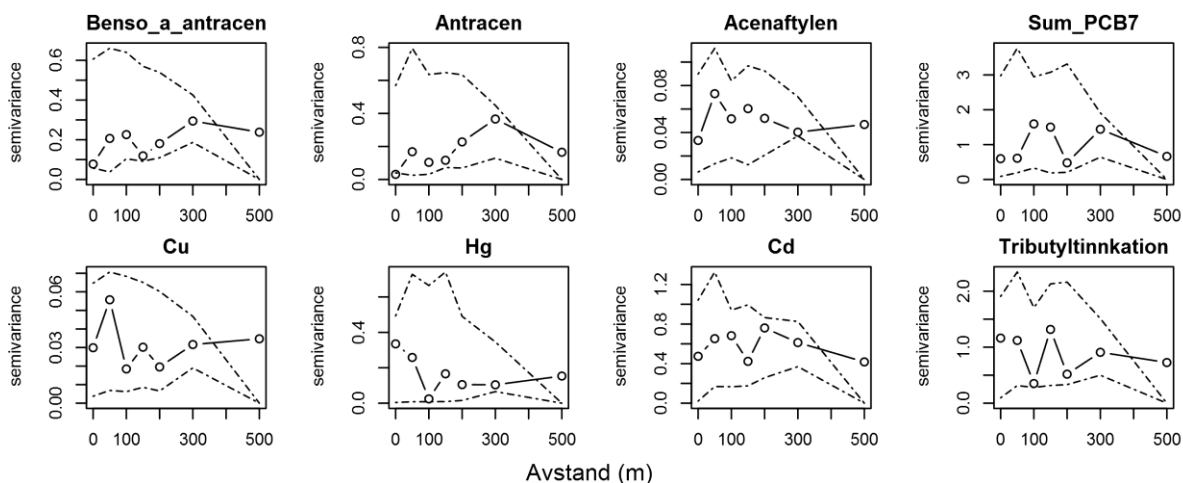


Figur 25. Variogrammer for området delt i tre deler (nord, midten, sør). Alle dybder.

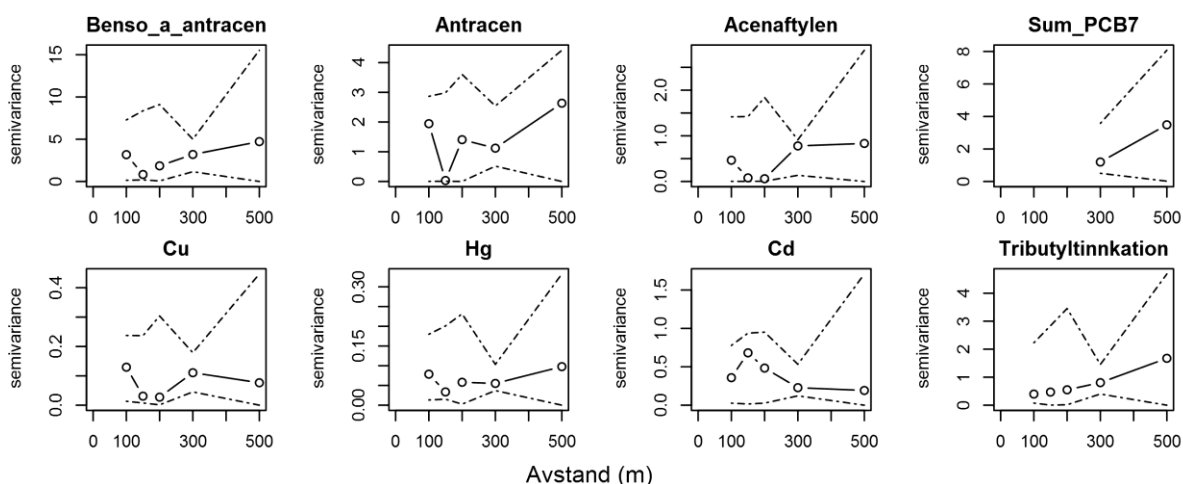
Variogrammer for den nordlige del av området (11.3 m mudredyp, 0-10 cm dybde)



Variogrammer for den midtre del av området (13.3 m mudredyp, 0-10 cm dybde)

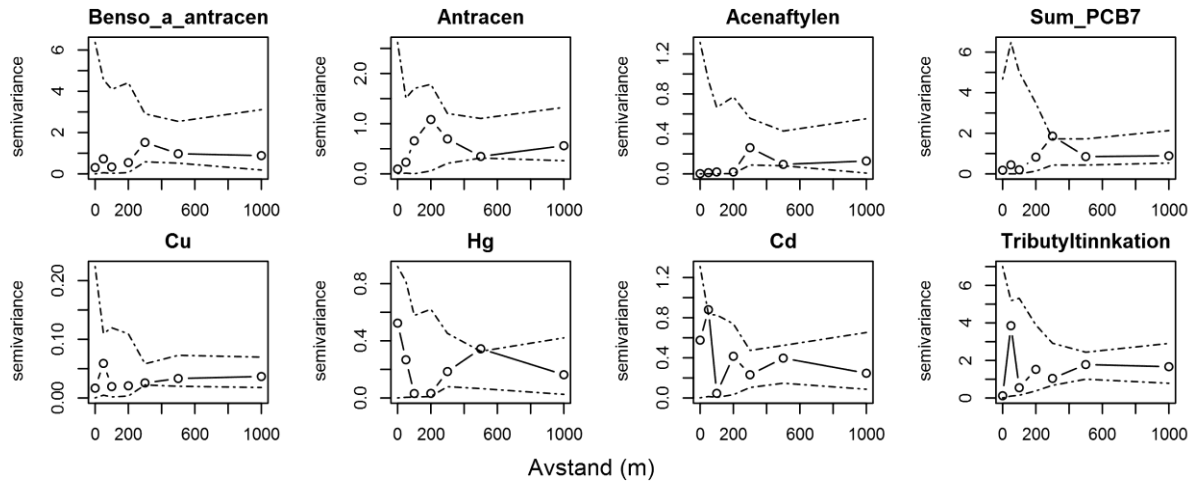


Variogrammer for den søndre del av området (13.3 m mudredyp, 0-10 cm dybde)

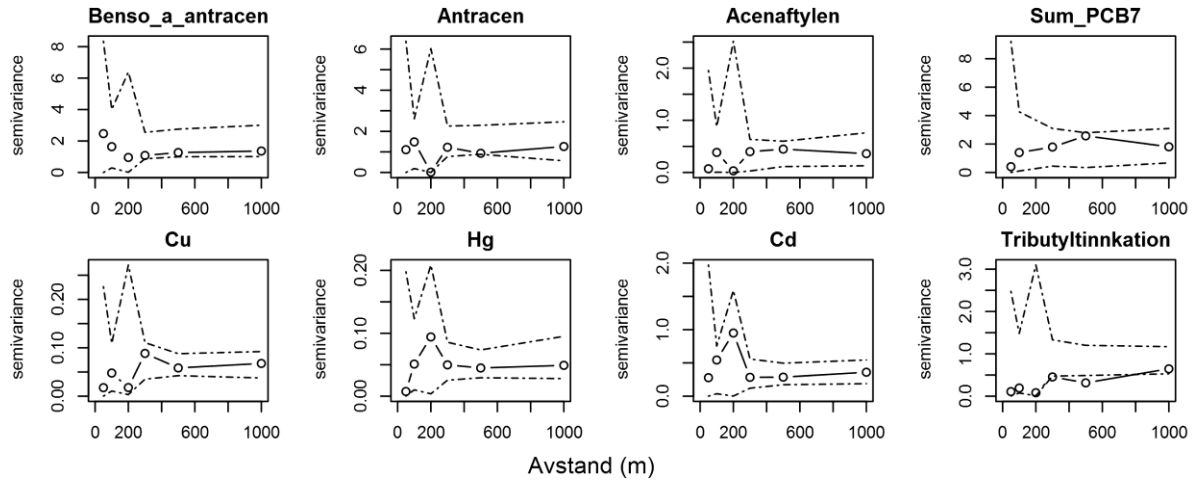


**Figur 26.** Variogrammer for området delt i tre deler (nord, midten, sør), men kun for sedimentoverflaten (0-10 cm dybde)

Variogrammer for den vestre del av området (0-10 cm dybde)

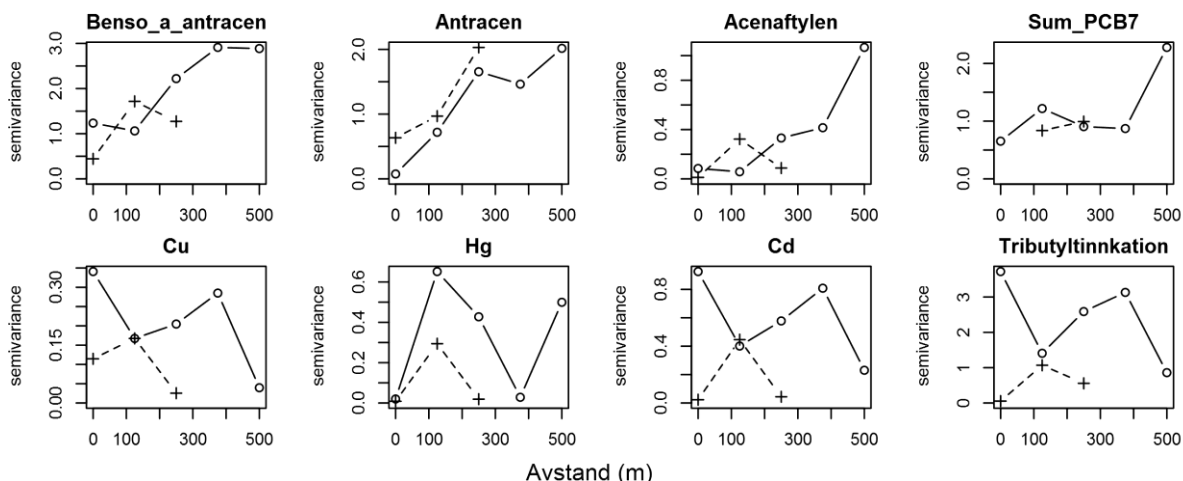


Variogrammer for den østre del av området (0-10 cm dybde)

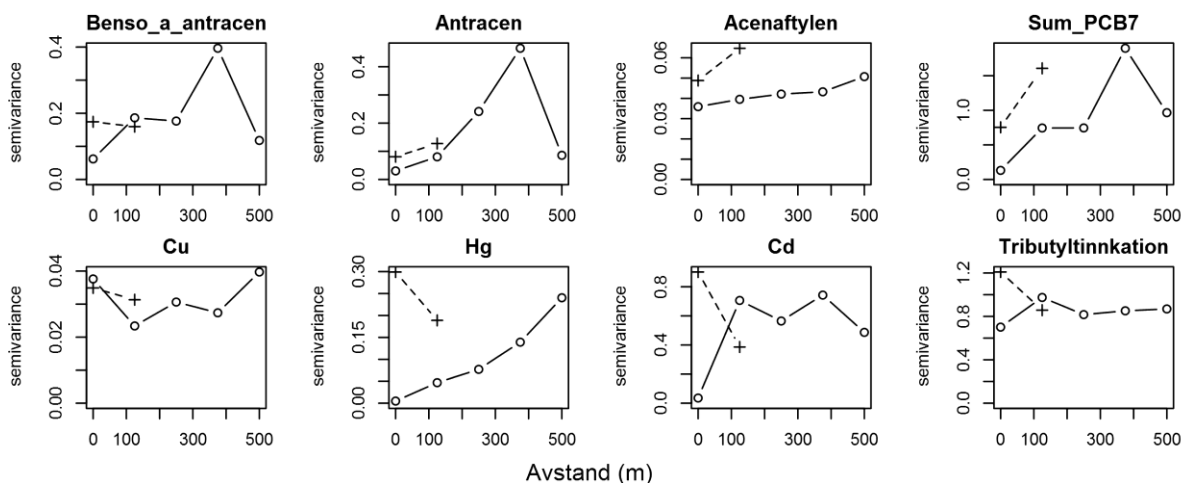


Figur 27. Variogrammer for området delt på langs langs skipsleia (vest og øst). Alle dybder.

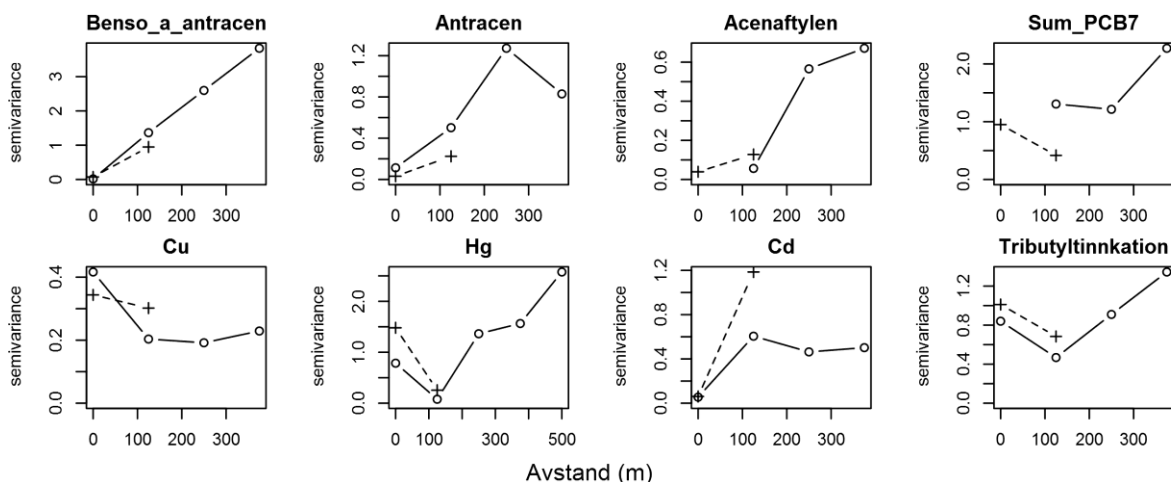
Variogrammer for N-S og Ø-V-retning for den nordlige del av området (11.3 m mudredyp)



Variogrammer for N-S og Ø-V-retning for den midtre del av området (13.3 m mudredyp)



Variogrammer for N-S og Ø-V-retning for den sørlige del av området (13.3 m mudredyp)



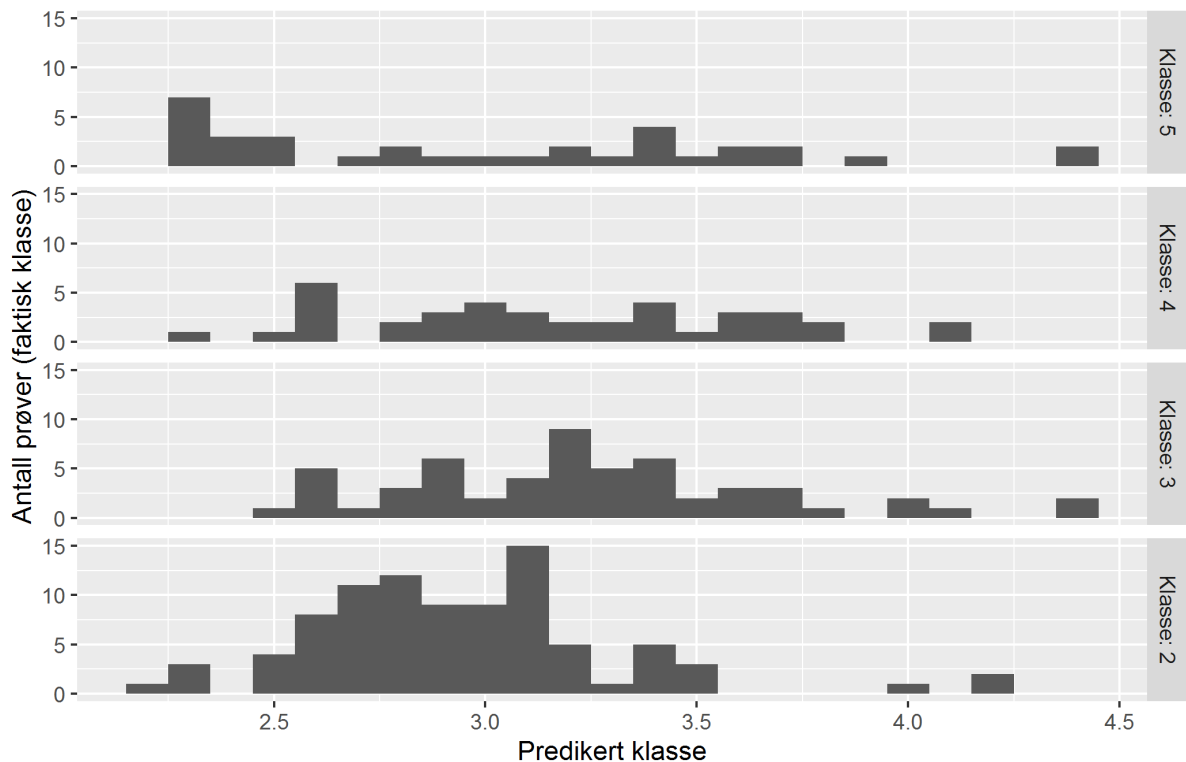
**Figur 28.** Variogrammer for samvariasjon langs retning tiltaksområdet (omtrentlig nord-sør retning) og på tvers (omtrentlig øst-vest retning) for hver av de tre delområdene (nord, midten, sør).

**Tabell 17.** Kriging-modeller, valg av optimal modell. Den beste modellen (med best balanse mellom antall parametre og prediksjonsverdi) er modellen med lavest AIC-verdi (markert i gult). Df = frihetsgrader i modellen (tilnærmet lik antall parametre), AIC = Akaikes informasjonskriterium.

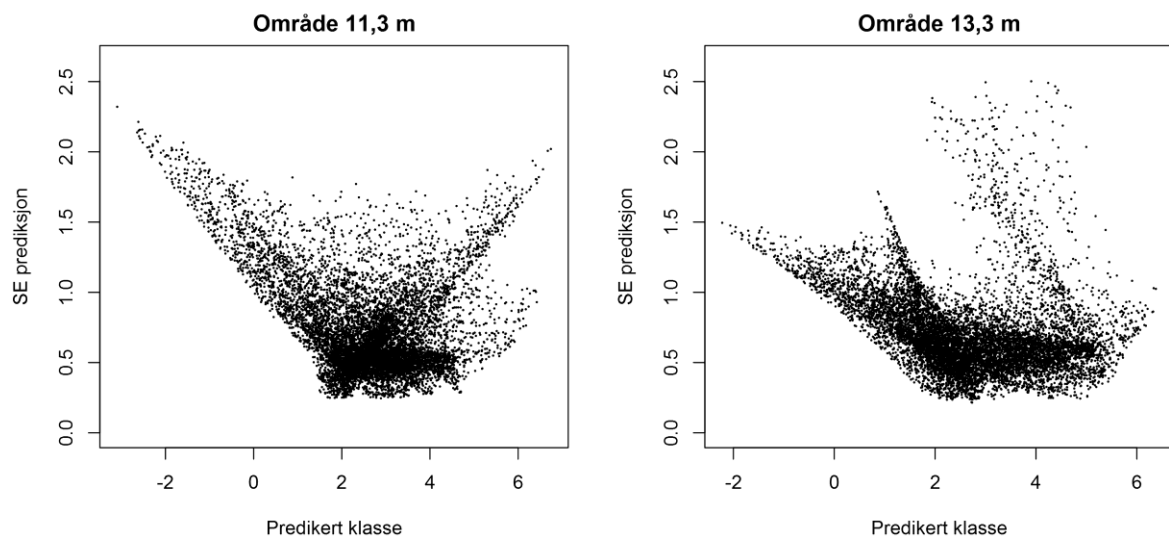
<i>Modell</i>	<i>df</i>	<i>AIC</i>
Dybde_kategori + Side + x_coor	10	583.42
Dybde_kategori + Side + y_coor	10	580.67
Dybde_kategori + Side + x_coor + y_coor	11	576.96
Dybde_kategori + x_coor + y_coor	10	578.09
Side + x_coor + y_coor	7	610.00
x_coor + y_coor	6	610.20

**Tabell 18.** GAM-modeller, valg av optimal modell. x.rot og y.rot er x- og y-koordinat etter noe rotering (8 grader) for å få skipsleia mest mulig i N-S-retning. "s(x.rot, y.rot)" indikerer en spline-modell i to dimensjoner (felles for alle dybdelag, "s(x.rot, y.rot, by = Dybde.kategori)" indikerer en separat spline-modell for hvert dybdelag, og "s(x.rot, y.rot, Dybde)" indikerer en tredimensjonal spline-modell. Denne modellen Den beste modellen (med best balanse mellom antall parametre og prediksjonsverdi) er modellen med lavest AIC-verdi (markert i gult). Df = frihetsgrader i modellen (tilnærmet lik antall parametre), AIC = Akaikes informasjonskriterium, men "% Forklart" er lik prosent av deviansen som forklares av modellen (analogt med R<sup>2</sup>).

<i>Modell</i>	<i>df</i>	<i>AIC</i>	<i>% Forklart</i>
s(x.rot, y.rot)	16.25	593.73	36.2
s(x.rot, y.rot) + Dybde_kategori	20.83	565.84	46.2
s(x.rot, y.rot) + Side	16.95	595.33	36.1
s(x.rot, y.rot) + Dybde_kategori + Side	21.47	567.19	46.1
s(x.rot, y.rot, by = Dybde_kategori)	60.97	530.28	68.4
s(x.rot, y.rot, by = Dybde_kategori) + Side	62.12	531.3	68.5
s(x.rot, y.rot, by = Dybde_kategori) + Dybde_kategori	55.31	534.36	66
s(x.rot, y.rot, by = Dybde_kategori) + Dybde_kategori + Side	56.15	536.18	66
s(x.rot, y.rot, Dybde)	75.5	518.34	73.8
s(x.rot, y.rot, Dybde) + Side	76.58	519.16	73.9
s(x.rot, y.rot, Dybde) + Dybde_kategori	81.77	507.94	76.4
s(x.rot, y.rot, Dybde) + Dybde_kategori + Side	82.82	508.66	76.5



**Figur 29.** Kriging, evne til prediksjon av klasseverdi. Figuren viser prediksjon basert på kryssvalidering på kjernenivå. Hver av de fire grafene viser fordelingen av predikert klasseverdi (x-akse) for prøver med en gitt faktisk klasseverdi. Se også **Error! Reference source not found.** i hovedteksten.



**Figur 30.** Sammenheng mellom predikert klasse (x-akse) og standardfeil for predikert klasse (y-akse) for prediksjoner i de to delområdene. Figuren viser et tilfeldig utvalg av 10000 prediksjoner for hvert delområde.

NIVA: Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

NIVA gir offentlig vannforvaltning, næringsliv og allmennheten grunnlag for god vannforvaltning gjennom oppdragsbasert forsknings-, utrednings- og utviklingsarbeid. NIVA kjennetegnes ved stor faglig bredde og godt kontaktnett til fagmiljøer i inn- og utland. Faglig tyngde, tverrfaglig arbeidsform og en helhetlig tilnæringsmåte er vårt grunnlag for å være en god rådgiver for forvaltning og samfunnsliv.



Norsk institutt for vannforskning

Gaustadalléen 21 • 0349 Oslo  
Telefon: 02348 • Faks: 22 18 52 00  
[www.niva.no](http://www.niva.no) • [post@niva.no](mailto:post@niva.no)