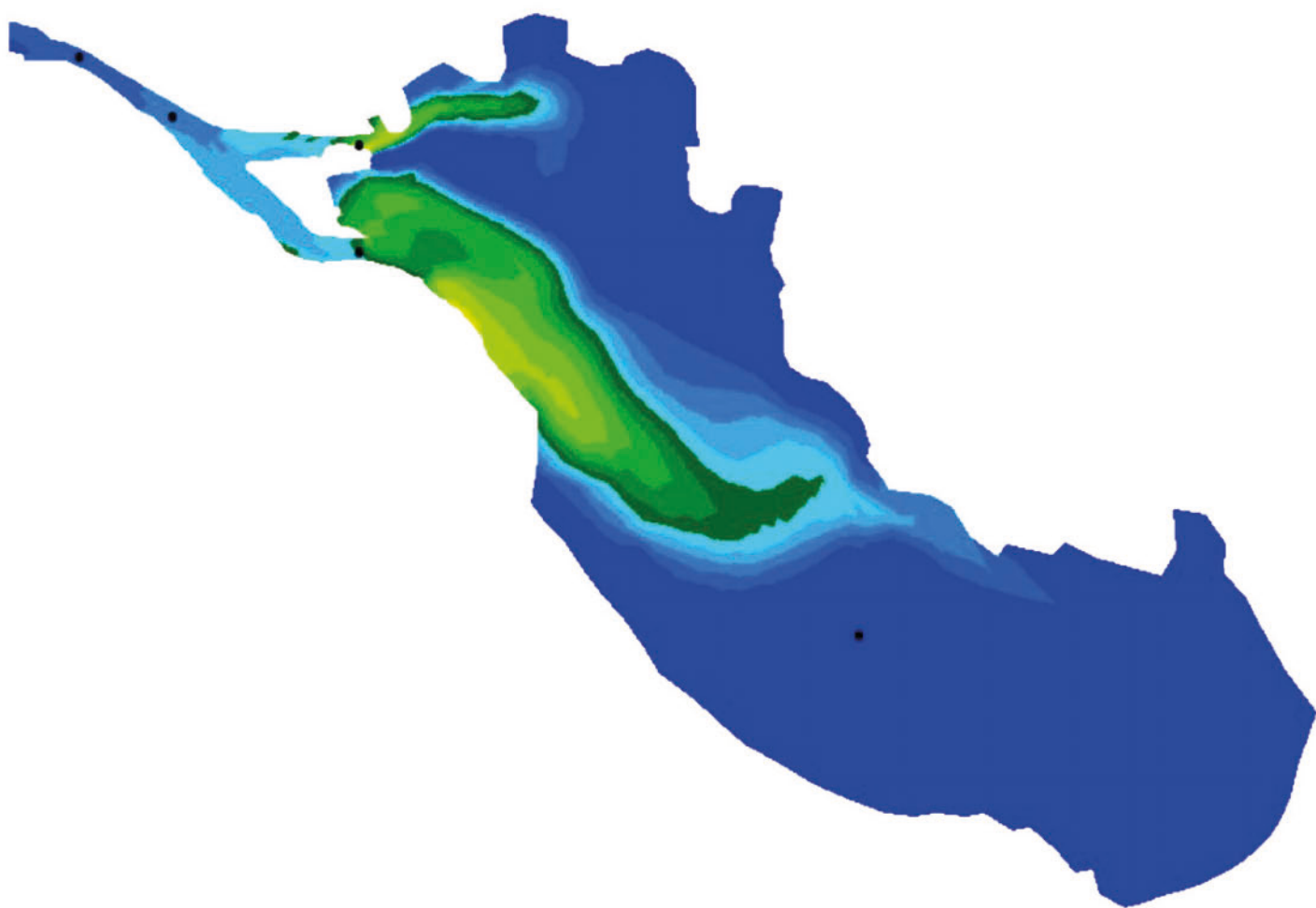


Modellering av kjemikalietilsetning i Drammenselva



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 Modellering av kjemikalietilsetning i Drammenselva	Løpenummer 7152-2017	Dato 22.5.2017
Forfatter(e) André Staalstrøm Magdalena Kempa	Fagområde Hydrologi og oseanografi	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Drammen	Utgitt av NIVA NIVAs prosjektnummer 16373

Oppdragsgiver(e) Miljødirektoratet	Oppdragsreferanse Anne Kristin Jøranlid/16070054
---------------------------------------	--

Sammendrag

Tilsetning av kjemikalier i Drammenselva for å utrydde lakseparasitten *G. salaris*, har blitt simulert med modellen GEMSS. Ved å slippe ut en mengde på omtrent 32000 L av en rotenonløsning med styrke 3,3 %, fordelt på tre utslippspunkter i elva fra Hellefoss til Drammen sentrum, er det mulig å oppnå høy nok konsentrasjon (over 0,7 mg/L) i nesten hele elva over en periode på 8 timer. Det vil være en utfordring å kontrollere konsentrasjonen i diverse små og store bakevjer i elva. Konsentrasjonen av rotenon i Drammensfjordens overflatelag vil da komme over PNEC verdien for sensitive arter i noen timer innerst i Drammensfjorden, langs fjordens vestre side og i sentrale deler av fjorden. For å oppnå en konsentrasjon av uorganisk monomert aluminium (Al₃) på over omtrent 30 µg/L i hele elva, må det tilsettes anslagsvis 0,4 L/s av en aluminium løsning med styrke på 4,3 %. Konsentrasjonene vil da tidvis være over 7 µg/L i store deler av fjorden helt ut til Steinsbråten fyr, og over 20 µg/L i områdene nærmest elveutløpet og langs kysten ned mot Solumstrand.

Fire emneord	Four keywords
1. Numerisk modellering	1. Numerical modeling
2. <i>Gyrodactylus salaris</i>	2. <i>Gyrodactylus salaris</i>
3. Rotenon	3. Rotenone
4. AIS	4. AIS



André Staalstrøm
Prosjektleder



Anders Gjørvad Hagen
Kvalitetssikrer



Kai Sørensen
Forskningsleder

Modellering av kjemikalietilsetning i Drammenselva

Forord

NIVA har blitt bedt av Miljødirektoratet om å gjøre en modellering av kjemikalietilsetning i Drammenselva. Miljødirektoratet har nedsatt en arbeidsgruppe for å bekjempe lakseparasitten *Gyrodactylus salaris* i Drammensregionen, og denne gruppen har identifisert kunnskapsbehov om hvordan en tenkt kjemikalietilsetning vil oppføre seg i Drammenselva og utover i Drammensfjorden.

Kontrakt for oppdraget ble underskrevet 1. desember 2016. André Staalstrøm har vært prosjektleder og Magdalena Kempa har vært ansvarlig for modelleringen i prosjektet. Anders Gjørwad Hagen har foretatt en faglig kvalitetssikring av arbeidet. Anne Kristin Jøranlid har vært kontaktperson hos Miljødirektoratet.

Oslo, 6.4.2017

André Staalstrøm

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	5
1 Innledning	7
1.1 Bakgrunn	7
1.2 Drammenselva	8
1.3 Drammensfjorden.....	10
1.4 Utslipp av kjemikalier	12
2 Numerisk modell	13
2.1 Beskrivelse av modellen GEMSS	13
2.2 Validering av modellen ved å sammenligne transporttid.....	14
3 Utslipp av rotenon	15
3.1 Konsentrasjon av rotenon i Drammenselva	15
3.2 Konsentrasjon av rotenon i Drammensfjorden.....	20
4 Utslipp av surt aluminium	25
5 Diskusjon og samlet vurdering.....	31
Referanser	32

Sammendrag

I en modellsimulering med den numeriske modellen GEMSS har tilsetning av kjemikalier i Drammenselva blitt simulert, hvor hensikten er å utrydde lakseparasitten *G. salaris*. Ved å slippe ut en mengde på 32000 L av en rotenonløsning med styrke 3,3 %, fordelt på tre utslippspunkter i elva fra Hellefoss til Drammen sentrum, er det mulig å oppnå høy nok konsentrasjon (over 0,7 mg/L) i nesten hele elva over en periode på 8 timer. Det vil være en utfordring å kontrollere konsentrasjonen i diverse små og store bakevjer i elva. I en arm av elva på innsiden av Fallagsøya (ved stasjon E36) hvor det er lite tilløp fra småelver, kommer økningen i konsentrasjonen noe senere enn i resten av elva, og det er også der konsentrasjonen holder seg lengst når utslippet er over. Dette området av elva bør undersøkes nærmere før et eventuelt tiltak mot *G. salaris* settes i gang.

Den konsentrasjonen som mest sannsynlig ikke vil ha noen effekt på dyrelivet i vannmiljøet (PNEC. Predicted No Effect Concentration), kan beregnes ut ifra eksperimenter hvor virvelløse dyr er utsatt for rotenon i typisk 24 til 48 timer. LC50 verdien er den konsentrasjonen hvor 50 % av testpopulasjonen dør, denne er omtrent 3 mg/L for de mest sensitive artene. PNEC verdien kan beregnes ved å benytte en sikkerhetsfaktor på 100, som gir en verdi på 0,03 mg/L.

Saltholdigheten i Drammensfjorden er kontinuerlig svært lav i de øverste 5 meter. I flomsituasjoner kan ferskvannslaget bli opp mot 10 m tykt. Saltholdigheten er lavere enn 5 psu i dette laget i mesteparten av fjorden.

Ved utslipp av 32000 L rotenonløsning totalt, vil konsentrasjonen i Drammensfjordens overflatelag komme over PNEC verdien i noen timer innerst i Drammensfjorden, langs fjordens vestre kyst og i sentrale deler av fjorden. De høyeste konsentrasjonene opptrer innerst i fjorden nærmest elveutløpet og på fjordens vestre kyst ned mot Solumstrand. Konsentrasjonen kommer ikke over 0,25 mg/L langs kysten sør for omtrent Solumstrand.

For å oppnå en konsentrasjon av løst aluminium (Al₃) på over omtrent 30 µg/L i hele Drammenselva, må det tilsettes anslagsvis 0,4 L/s av en aluminium løsning med styrke på 4,3 %. Konsentrasjonene vil da tidvis være over 7 µg/L i store deler av fjorden helt ut til Steinsbråten fyr, og over 20 µg/L i områdene nærmest elveutløpet og langs kysten ned mot Solumstrand. Det er da antatt at 37 % av Al₃ blir deaktivert umiddelbart.

Summary

Title: Modelling of discharge of chemicals in the Drammen River

Year: 2017

Author: André Staalstrøm and Magdalena Kempa

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN 978-82-577-6887-4

In a model simulation with the numerical model GEMSS, discharge of chemicals to the Drammen River has been simulated, where the aim is to exterminate fish infected with the salmon parasite *Gyrodactylus salaris*. By releasing an amount of 32000 L of a rotenone solution of strength of 3.3%, from three discharge points, from Hellefoss to Drammen center, it is possible to achieve a high enough concentration (above 0.7 mg/L) in nearly the entire river. There will be a challenge to control the concentration in various small and large back waters of the river. In one arm of the river inside the island Fallagsøya (near station E36), the increase in the concentration appears a little later than in the rest of the river. In this arm is also the location where the concentration remains high for the longest time after the discharge ends. This area of the river should be investigated close before any measures against *G. salaris* commences.

The predicted no effect concentration in the environment (PNEC) of the rotenone solution can be calculated from experiments where invertebrates are exposed to rotenone for a period typically for 24 to 48 hours. The LC50 value is the concentration at which 50 % of the test population die, which is about 3 mg/L for the most sensitive species. PNEC value can be calculated using a safety factor of 100, giving a value of 0.03 mg/L.

The salinity in the Drammen Fjord is continuously very low in the top 5 meters. During floods in the river the freshwater layer is up to 10 m thick. The salinity is lower than 5 psu in most of the fjord.

A discharge of 32000 L of rotenone solution, gives a concentration in the surface layer of the Drammen Fjord exceeding the PNEC value for some hours in the central parts and along the south-western coast of the inner fjord. The highest concentrations occur in the inner fjord nearest the river mouth and the fjord's western coast towards Solumstranda. The concentration does not exceed 0.25 mg/L south of Solumstranda.

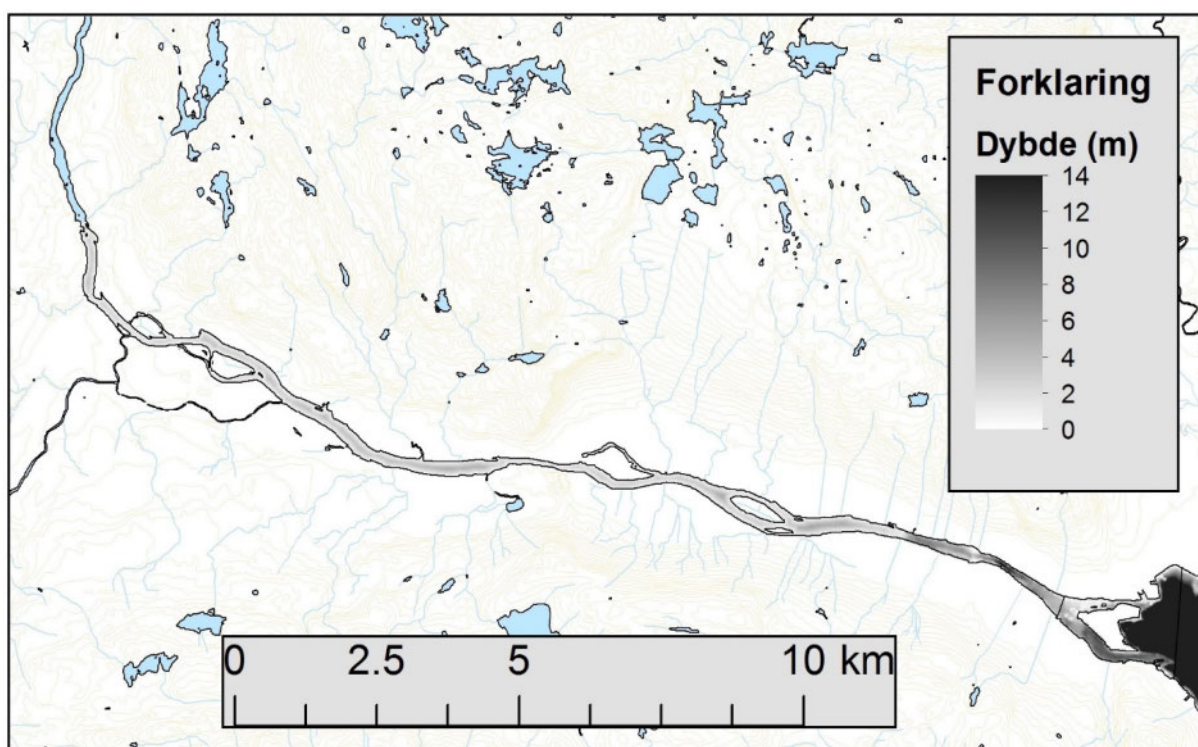
To achieve a concentration of dissolved aluminum (Al_i) of 30 µg/L throughout the Drammen River, it is necessary discharge approximately 0.4 L/s of an aluminum solution of strength of 4.3 %. Concentrations will exceed 7 µg/L in most of the inner parts of the fjord all the way to Steinsbråten Fyr, and exceed 20 µg/L in the areas closest to the river mouth and along the coast down to Solumstrand.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Lakseparasitten *Gyrodactylus salaris* (*G. salaris*) ble introdusert til Drammenselva og Lierelva i 1987. *G. salaris* er en ca. 0,5 mm stor parasitt som fester seg utvendig på laks når den befinner seg i ferskvann. Hvis *G. salaris* blir introdusert til et vassdrag som i utgangspunktet ikke har parasitten, vil dette føre til en reduksjon på opp mot 85 % av tettheten av lakseunger og av fangst av laks (Artsdatabanken, 2012). Lakseparasitten er en uønsket art i Norge og vurderes i dag som en av de største truslene for de atlantiske laksestammene (Solheim & Bjørnstad, 2015). *G. salaris* tåler ikke saltholdig vann og vil ha en overlevelsestid på 11-37 timer hvis saltholdigheten er 20 psu (Soleng & Bakke, 1997).

Flere vassdrag har blitt behandlet med kjemikalier for å utrydde *G. salaris*. Kjemikaliene rotenon og surt aluminium har blitt brukt, eller en kombinasjon av disse. Tidligere har blant annet Lærdalsvassdraget blitt behandlet (Pettersen et al., 2007, Hindar et al., 2015). Denne elva har en midlere vannføring på 36 m³/s. Det største vassdraget som til nå er blitt behandlet er Vefsnavassdraget med en vannføring på 150-200 m³/s. Miljødirektoratet har bedt NIVA om å modellere kjemikalietilsetning i Drammenselva, hvor vannføringen er betraktelig høyere. Denne rapporten presenterer dette arbeidet.

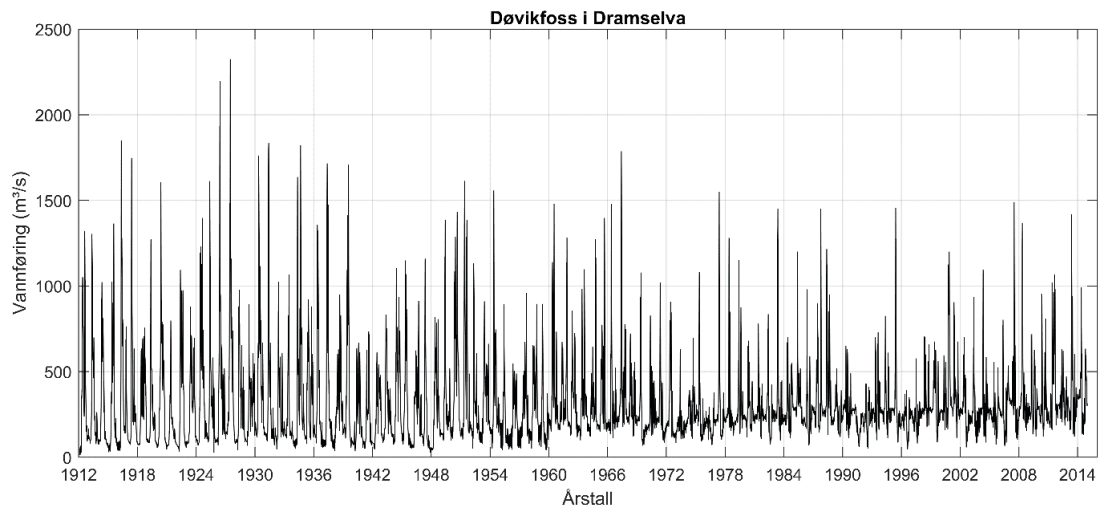


Figur 1. Drammenselva starter ved Vikersund hvor Tyrifjorden har sitt utløp. Her vises elveløpet fra et punkt omtrent 11 km nedenfor Døviksfoss og ned til utløpet til Drammensfjorden. Fargeskalaen fra hvitt til svart viser vanndybden fra Hellefoss og ut til Drammensfjorden. Dybder over 14 m er vist som svart.

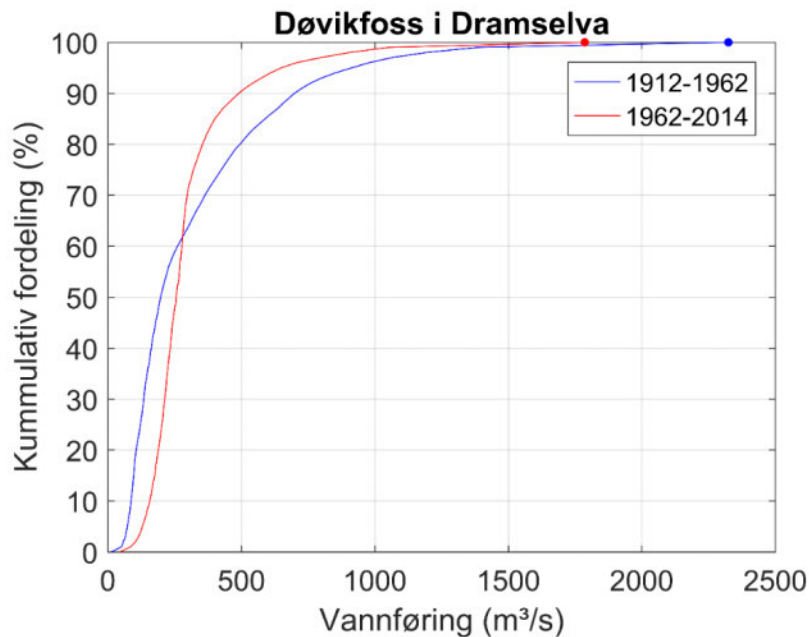
1.2 Drammenselva

Drammenselva, hvor nedre del er vist i Figur 1, er Norges nest største elv med en gjennomsnittlig vannføring for perioden 1962-2014 på $298 \text{ m}^3/\text{s}$ målt ved Døvikfoss. Maksimal vannføring for den samme perioden var $1786 \text{ m}^3/\text{s}$. I 90 % av tiden ligger vannføringen mellom 129 og $650 \text{ m}^3/\text{s}$ (mellom 5 og 95 persentil verdien).

Målt vannføring ved Døvikfoss er vist i Figur 2. Vannføringsregimet har endret seg fra tidligere tider med mindre regulering. I figuren ser det ut til å ha vært en endring i variabiliteten i vannføringen rundt 1960. I perioden 1912-1962 var middel vannføring noe høyere ($316 \text{ m}^3/\text{s}$) og maksimal vannføring var også høyere ($2324 \text{ m}^3/\text{s}$). I 90 % av tiden lå vannføringen mellom 72 og $914 \text{ m}^3/\text{s}$, så ekstremverdiene har blitt betydelig mindre. Dette er illustrert med den kumulative fordelingen av vannføringen i de to periodene (Figur 3).



Figur 2. Målt vannføring ved Døvikfoss i Drammenselva for perioden 1912 til 2014.



Figur 3. Den kumulative fordelingen av vannføring i Drammenselva målt ved Døvikfoss. Figuren viser hvor mange prosent, som leses av på y-aksen, av målingene som ligger under en viss verdi av vannføring, som leses av på x-aksen. Måleserien er delt inn i to perioder, fra 1912 til 1962 og fra 1962 til 2014.

Vannkvaliteten i Drammenselva er fra 1990 overvåket månedlig i elveovervåkningsprogrammet. Målestasjonen er ved Mjøndalen Bru. Statistikk for konsentrasjon av organisk stoff, partikler og løste næringsalter er vist i Tabell 1.

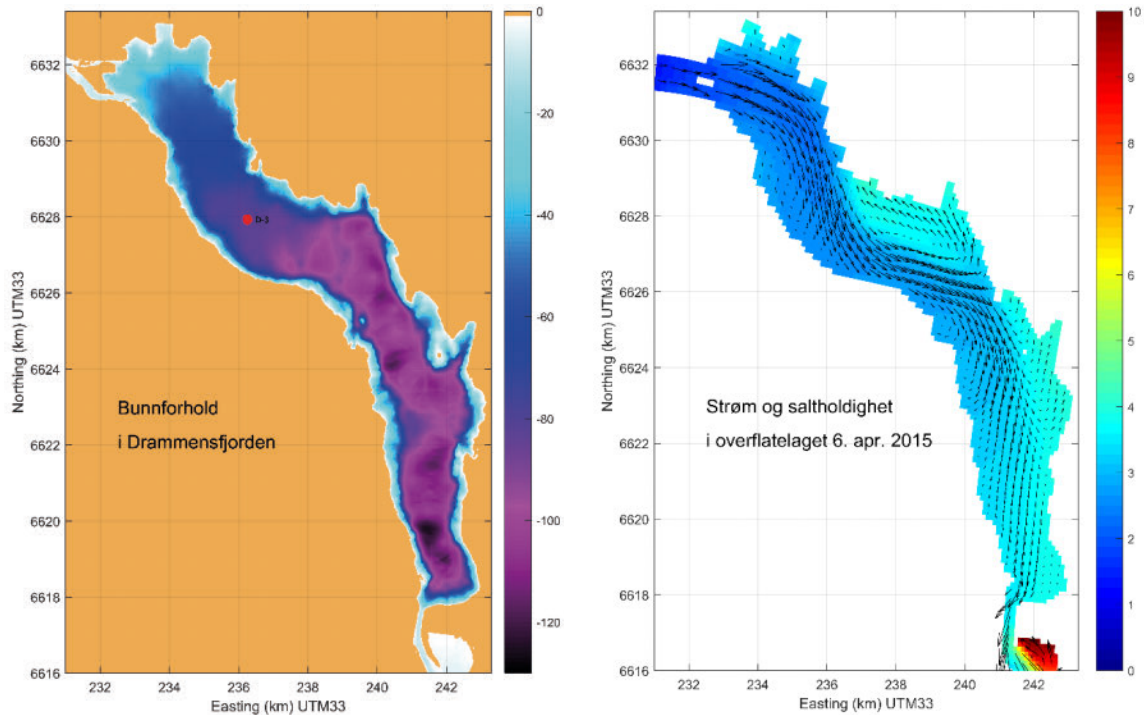
Tabell 1. Middelverdi, 90 persentil verdi og maksverdi for stasjon Mjøndalen bru for perioden 1990-2017.

Parameter	Antall målepunkt (maks. 453)	Middelverdi	90 persentil verdi	Maksverdi
Totalt organisk karbon, TOC	379	3,46 mg C/L	4,20 mg C/L	10,6 mg C/L
Totalt suspendert materiale, TSM	451	3,17 mg/L	4,60 mg/L	230 mg/L
Totalt nitrogen, TotN	451	436 µg N/L	557 µg N/L	1180 µg N/L
Nitrat, NO ₃	451	261 µg N/L	363 µg N/L	925 µg N/L
Ammonium, NH ₄	404	15,7 µg N/L	29,1 µg N/L	73,0 µg N/L
Totalt fosfor, TotP	360	7,55 µg P/L	10,0 µg P/L	308 µg P/L
Fosfat, PO ₄	450	2,95 µg P/L	4,35 µg P/L	226 µg P/L
Silikat, SiO ₂	372	2,77 mg SiO ₂ /L	3,32 mg SiO ₂ /L	6,16 mg SiO ₂ /L

Makrovegetasjonen i Drammenselva, nedstrøms Langesøya, ble kartlagt i 2003 (Mjelde, 2004). Makrovegetasjonen på elvestrekningen var artsrik, totalt 12 arter av vannplanter ble registrert. Vannvegetasjonen var dominert av tusenblad og flotgras, som stedvis dannet frodige bestander i dybdeområdet ca. 1-3 m, med de største forekomstene i bukter o.l. Store bestander av vannplanter i eller nær overflata ser først og fremst ut til å forekomme rundt og nedstrøms Sølvfastøya, ved Hambordstrøm-Sundhaugen og i Bragernesløpet (nord for Holmen), samt noen små forekomster utenfor Gulskogen.

1.3 Drammensfjorden

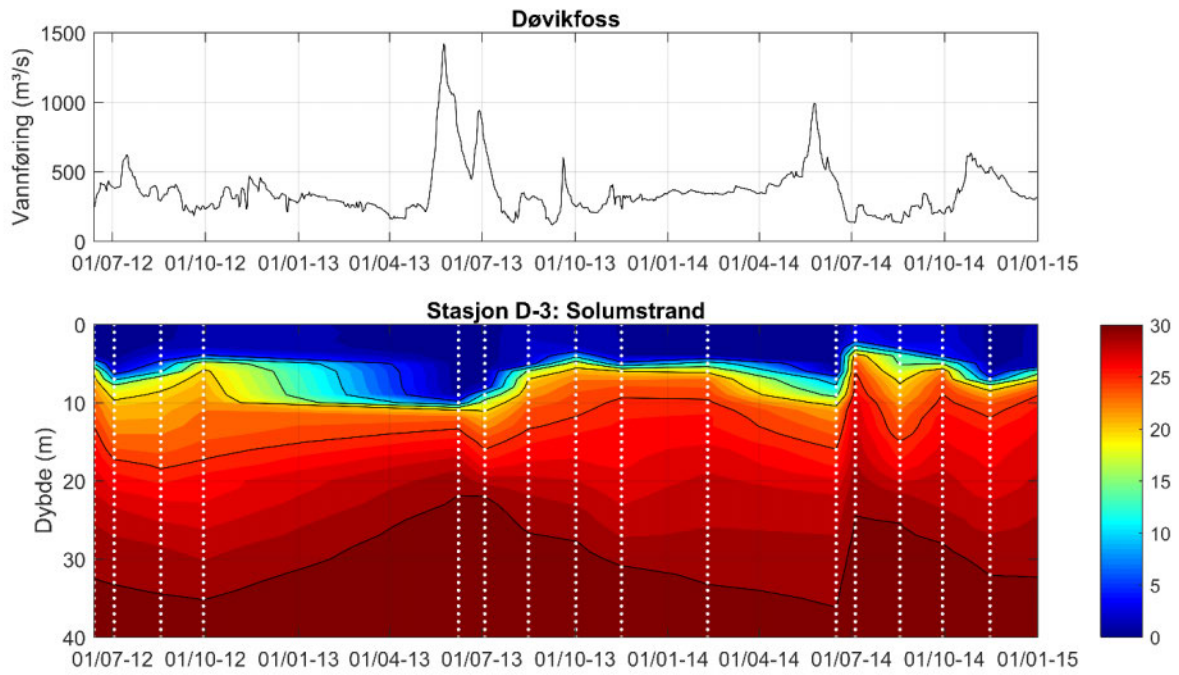
Drammenselva renner ut i Drammensfjorden. Hovedbassenget i Drammensfjorden er skilt fra resten av Oslofjorden med det trange sundet som kalles Svelvikstrømmen, hvor bredden bare er 180 m. Her er det også en terskel hvor største vanddyp er 11-13 m. Bassenget innenfor Svelvikterskelen er formet omtrent som et badekar, hvor vanddybden langs kysten brått øker og hvor de sentrale delene av fjorden er relativt flate. Midt i fjorden blir det gradvis dypere til det største dypet på ca. 125 m nåes omtrent 2 km nord for Svelvikterskelen (venstre side av Figur 4). I det høyre plottet i Figur 4 vises modellresultater fra FjordOs modellen (Røed et al, 2016).



Figur 4. Bunntopografien i Drammensfjorden (til venstre). Saltholdighet og strøm i overflatelaget (til høyre). Stasjonen D-3 er vist på kartet til venstre.

Det trange sundet ved Svelvik gjør at Drammensfjorden kan betraktes både som en fjord som står i utveksling med havet og som en innsjø i Drammensvassdraget, med innløp ved Drammen og utløp ved Svelvik. Saltholdigheten i de øverste 5 meterne er svært lav (< 5 psu), og som vist i figuren er strømforholdene i dette laget hovedsakelig styrt av tilførselen av ferskvann fra elva. De øverste 5 meterne i Drammensfjorden har kontinuerlig lav saltholdighet. I flomsituasjoner øker ferskvannslaget tykkelse til opp mot 10 m (se Figur 5). Svelvikstrømmen kan derfor betraktes som en kombinasjon av et elveutløp med utpreget estuarin sirkulasjon og en sterk tidevannstrøm (Staalstrøm & Hjelmervik, 2017). Dette aspektet med at Drammensfjorden delvis kan betraktes som en innsjø er viktig med tanke på lakseparsitten *G. salaris* som ved en saltholdighet på 5 psu trives godt (Soleng & Bakke, 1997).

Vannvegetasjonen i Drammensfjorden ble undersøkt i august 2008 og det ble funnet 29 arter av vannplanter, som er tilsvarende antall som finnes i innsjøer av samme størrelse. I tidligere undersøkelser ble det funnet flere sjeldne arter av vannplanter ved Lierelv-øset innerst i fjorden, øst for Drammenselvas to utløp (Mjelde & Hvoslef, 1985). Med sjeldne arter menes her arter som er sjeldne på landsbasis. I 2008 ble det funnet en rekke sårbare arter og arter som er nært eller sterkt truet. Blant annet ble eloiden *Potamogeton pusillus* (Granntjønnaks) som er sterkt truet funnet på flere lokaliteter i Drammensfjorden. De spesielle forholdene med svært lav saltholdighet gjør Drammensfjorden til en spesiell vannforekomst i marin sammenheng.



Figur 5. Vannføringen i Drammenselva (øverst) påvirker saltholdigheten i Drammensfjorden (nederst). Plassering av stasjonene D-3 er vist i Figur 4.

1.4 Utslipp av kjemikalier

Når kjemikalier skal doseres i en elv så er det viktig at stoffet blir jevnt fordelt både horisontalt og vertikalt i elveprofilen på tvers av elvas bredde. Hvis det slippes ut kjemikalier fra elvebredden i en elv som er såpass bred som Drammenselva, vil konsentrasjonen være lav på motsatt side langt nedover i elva. Derfor er det gunstig å slippe ut kjemikalier fra bruer som krysser elva. I Tabell 2 er en liste over fem utslippspunkter i den delen av elva som er lakseførende, som egner seg for utslipp av kjemikalier. De to øverste utslippspunktene ligger over Hellefoss, og vil ikke bli modellert i dette prosjektet.

Tabell 2. Liste over utslippspunkter. Modellområdet starter ved stasjon U3, Hellefoss.

Stasjon-kode	Navn	Breddegrad	Lengdegrad	Easting (m) UTM33	Northing (m) UTM33
U1	Embretsfoss	N 59.900658°	E 9.927141°	216384	6651221
U2	Skotselv	N 59.843103°	E 9.897942°	214260	6644949
U3	Hellefoss	N 59.786922°	E 9.899566°	213869	6638698
U4	Mjøndalen bru	N 59.753481°	E 10.007354°	219628	6634520
U5	Bru ved Fyrhuset	N 59.744322°	E 10.195195°	203090	6632722

Kjemikaliene som kan benyttes i behandling av elva for å ta livet av *G. salaris*, og eventuelt vertsfisken kan være en rotenonløsning, eller en aluminiumløsning kombinert med syre.

Ved bruk av rotenon, så anvendes det vanligvis en rotenonløsning som kalles CFT-Legumine, som har inneholder 3,3 % rotenon. Det vil si at en liter av løsningen inneholder 33 g rotenon. For å drepe laks i en elv doseres det vanligvis til det er en konsentrasjon av CFT-Legumine på 1 mg/L i elva. Dette vil si en konsentrasjon på 33 µg/L av ren rotenon.

Giftighet kan uttrykkes med LC50 verdien, som er den konsentrasjonen som dreper 50 % av testpopulasjonen. Giftighet for vannlevende virvelløse dyr ligger i området hvor konsentrasjonen av ren rotenon er 100 til 10000 µg/L (Ling, 2003). Testpopulasjonene er da typisk utsatt for rotenon i ett til to døgn. Dette vil si en konsentrasjon av CFT-Legumin på 3 til 300 mg/L. Ved å benytte en sikkerhetsfaktor på 100, så kan konsentrasjonen i miljøet som ikke vil ha noen effekt beregnes (PNEC). PNEC verdien for CTF-Legumin kan derfor anslås til 0,03 mg/L.

Behandlingstiden ved bruk av rotenon er typisk 8 timer, og det er tatt utgangspunkt i at konsentrasjonen i elva skal være over 0,7 mg/L (CFT-Legumine) i omtrent 8 timer når kjemikalietilsetningen modelleres. Ved behandling med surt aluminium så skal konsentrasjonen holdes på et visst nivå (25-40 µg/L) i minst 14 dager.

Det er viktig å ta hensyn til nedbrytningstiden til det aktuelle kjemikalie. I modelleringen har det blitt benyttet en nedbrytningskoeffisient på 0,023 d⁻¹ for rotenon. Dette er samme verdi som har blitt brukt i tidligere kjøring med GEMSS hvor rotenon har blitt modellert. I modellen har det blitt lagt inn en «synkehastighet» på kjemikaliene som slippes ut. Dette er gjort for å simulere vertikal blanding i vannmassene, og at konsentrasjonen fordeler seg fra overflate til bunn. For surt aluminium ble det brukt en høyere nedbrytningskoeffisient (0,4 d⁻¹).

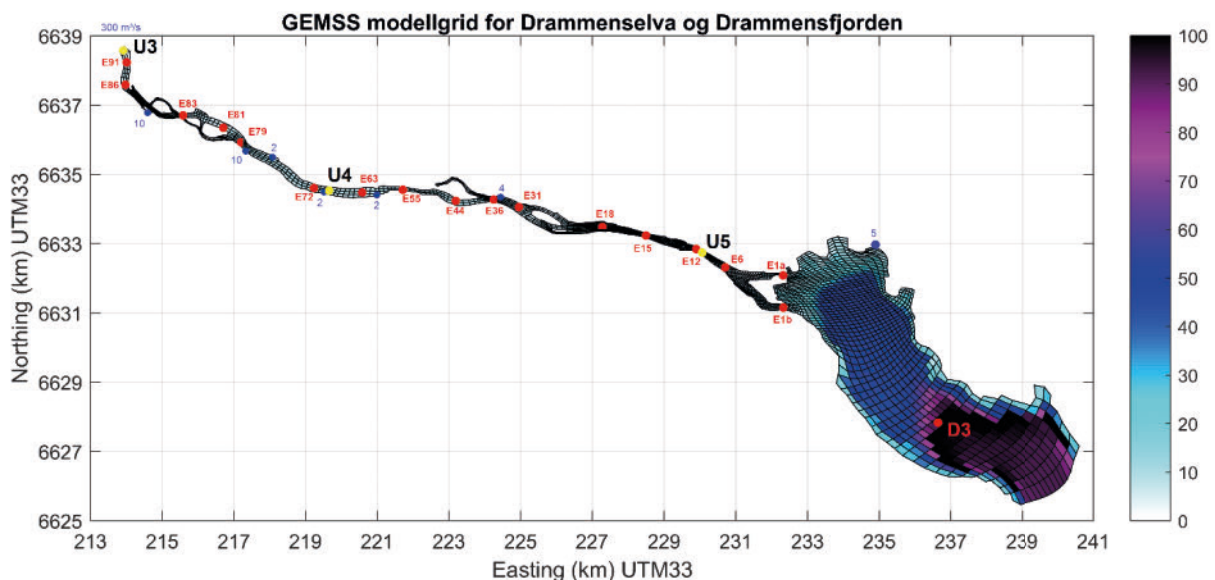
2 Numerisk modell

2.1 Beskrivelse av modellen GEMSS

Den 3-dimensjonale modellen GEMSS er benyttet i dette prosjektet. Modellen beregner strøm, temperatur, konsentrasjon av stoffer med ulike egenskaper, inkludert kjemikalier med en nedbrytningshastighet. Modellen beregner hva som skjer i elva og fjorden ut fra kjent klima, vannføring, vann temperatur og stoffkonsentrasjon i utslippspunkter samt vannstand i de åpne endene av modellområdet. Modellområdet blir delt inn i beregningsceller. For hver celle ble resultatene beregnet skrittvis fremover i tid. Modellen/modellpakken er utviklet av ERM's Surfacewater Modeling Group i Exton, Pennsylvania, USA. Modellen og eksempler på bruk av modellen kan studeres nærmere på hjemmesiden <http://gemss.com/index.html>.

For å modellere sirkulasjonsmønsteret i modellområdet har vi benyttet GEMSS modulen HDM som er en modell som løser de endelig-differanse ligningene Navier-Stokes, som med andre ord betyr at man benytter Newtons andre lov sammen med ligninger for å bevare volum. De vertikale lagene i modellen er enten horisontale (z-lag). Modellgriddet er kurvelineært slik at den horisontale oppløsningen kan varieres. I modellkjøringen har det blitt brukt et modellgrid som starter ved Hellefoss og går ut til omtrent midt i Drammensfjorden (se Figur 6). Områder ute i fjorden har en grov horisontal oppløsning, mens oppløsningen er finere (det vil si mindre ruter) i selve Drammenselva.

I modellen er det lagt inn en vannføring på 300 m³/s ved Hellefoss. I tillegg er det lagt inn seks tilløpselver, som samlet har en vannføring på 10 m³/s. I punktene hvor det slippes ut kjemikalier er det lagt inn et utslipp på 1 m³/s. det vil si at det til sammen renner 333 m³/s ut i Drammensfjorden. I tillegg er Lierelva lagt inn med en vannføring på 5 m³/s.



Figur 6. Modellens rutenett hvor fargeskalaen angir vanddybden i meter. Ved Hellefoss er det lagt inn en vannføring på 300 m³/s. De blå punktene med et blått tall, angir tilløp til Drammenselva hvor tallet angir vannføring i m³/s. De tre utslippspunktene U3 til U5 er markert med gule punkter. De røde punktene er stasjoner hvor det er tatt ut data fra modellen.

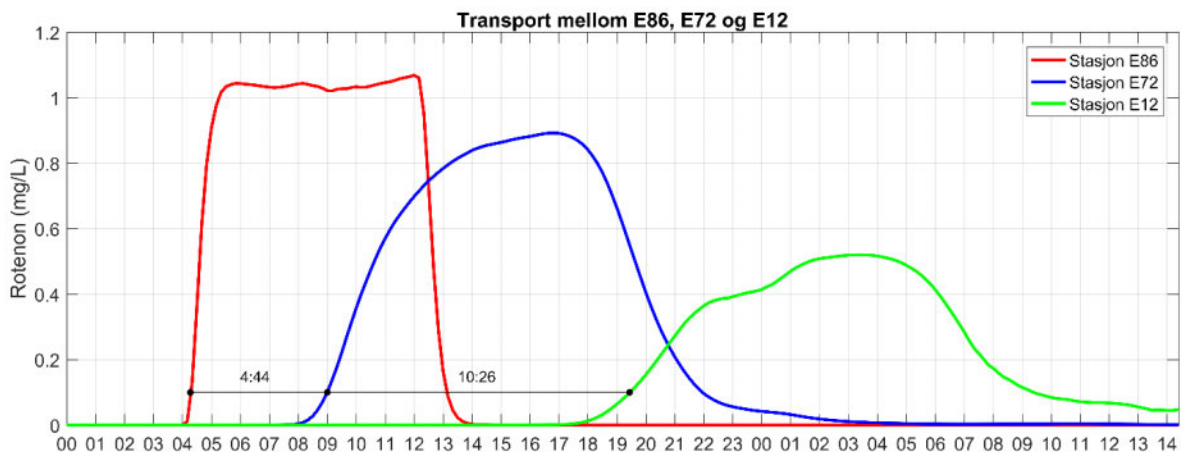
2.2 Validering av modellen ved å sammenligne transporttid

Transporttiden mellom forskjellige punkt nedover i elva er nøkkelparametere når kjemikaliebehandling skal planlegges. I Figur 6 er tre av utslippspunktene fra Tabell 2 markert med gule punkter. Dette er stasjon U3 ved Hellefoss, U4 ved Mjøndalen bru og U5 ved brua i nærheten av Fyrhuset i Drammen. NVE har lagd en hydrologisk modell for vassdraget hvor strømhastigheten nedover i elva er beregnet (Aamodt, pers. komm.). Modellen HecRas er benyttet (Brunner, 2016).

Vi lar v_i være strømhastighet i posisjon x_i . Videre lar vi $\Delta x_{i-1..i+1}$ være avstanden mellom posisjon x_{i-1} og x_{i+1} . Da kan vi beregne $\Delta t_{1..l}$, som er transporttiden mellom posisjon x_1 og x_l . Vi benytter prinsippet om at tiden er lik avstanden delt på hastigheten.

$$\Delta t_{1..l} = \frac{\Delta x_{1..2}}{2v_1} + \sum_{i=2}^{l-1} \frac{\Delta x_{i-1..i+1}}{2v_i} + \frac{\Delta x_{l-1..l}}{2v_l}$$

Transporttiden kan også beregnes ved å slippe ut et sporstoff i modellen som flyter med vannmassene i elva. Hvis sporstoffet slippes ut ved stasjon U3, kan det undersøkes hvor lang tid sporstoffet bruker mellom tre stasjoner i elva. Her ser vi på stasjon E86 rett nedenfor utslippspunkt U3, stasjon E72 rett ovenfor utslippspunkt U4 og stasjon E12 rett ovenfor utslippspunkt U5. I Figur 7 er konsentrasjonen av et sporstoff som er sluppet ut ved U3 vist ved de tre stasjonene E86, E72 og E12. Transporttiden kan leses ut av figuren.



Figur 7. Konsentrasjon av kjemikalie som er sluppet rett nedenfor Hellefoss (U3).

Resultatene for beregnet transporttid ved bruk av de to forskjellige metodene er gjengitt i Tabell 3. Transporttiden mellom stasjon E86 og E72 er meget lik, og dette viser at vannhastigheten i modellen GEMSS er av riktig størrelsesorden. Beregnet transporttiden ned til stasjon E12 ved bruk av resultater fra GEMSS er to timer lenger enn ved bruk av resultater fra HecRas. Dette kan forklares med at fronten til kjemikalieskyen ikke lenger er så skarp når den når ned til denne stasjonen (se grønn kurve i Figur 7).

Tabell 3. Transporttid mellom tre stasjoner i Drammenselva.

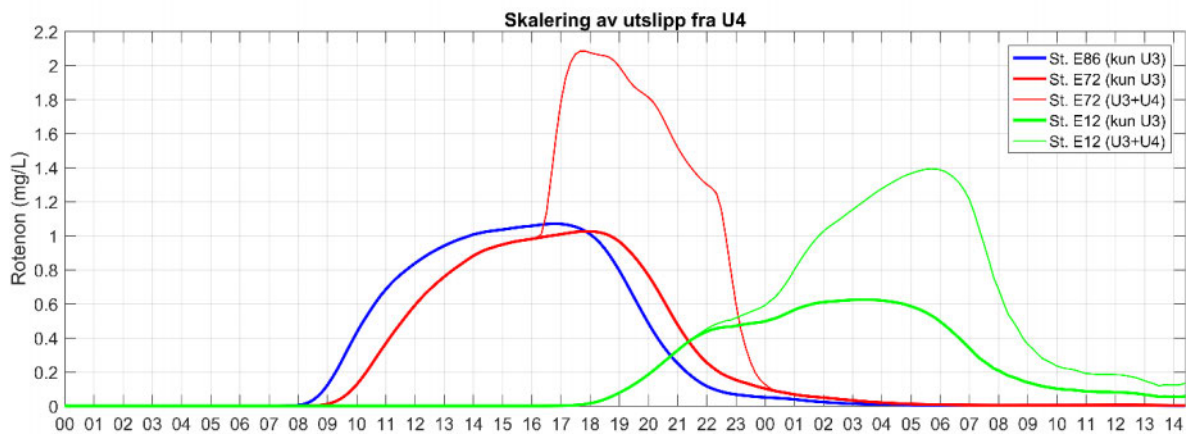
Distanse	Basert på Hec-Ras beregninger	Basert på sporstoff i GEMSS modellen
Fra E86 til E72	4,64 timer	4,73 timer
Fra E86 til E12	13,28 timer	15,17 timer

3 Utslipp av rotenon

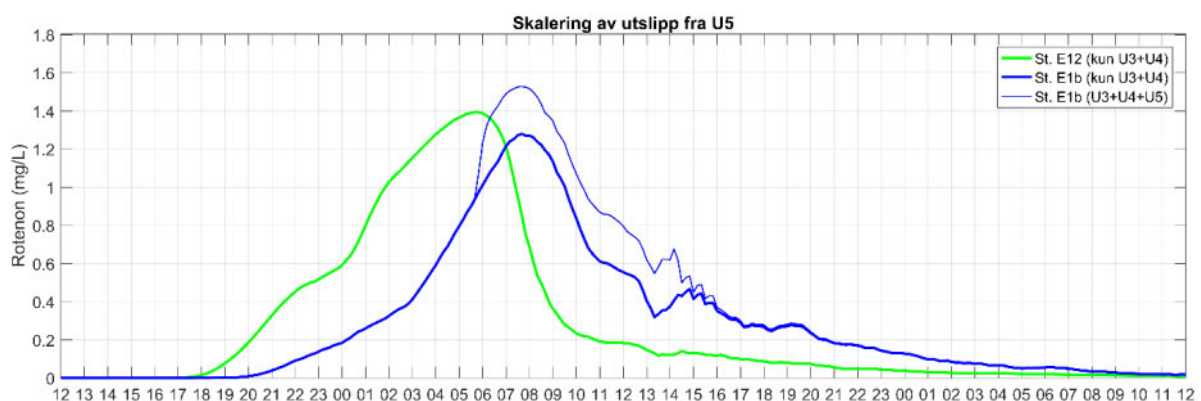
3.1 Konsentrasjon av rotenon i Drammenselva

Her beskrives modellering av tilsetning av en rotenonløsning fra tre punkter i Drammenselva (se Tabell 2 og Figur 6). I alle utslippene ble det sluppet ut 1 L/s med en konsentrasjon på 210 g/L, noe som tilsvarer 756 L med 3,3 % rotenonløsning per time. Det ble benyttet en multiplikasjonsfaktor, for å få konsentrasjonen tilstrekkelig høy i elvevannet. For utslippspunkt U3 var faktoren 2, for U4 var faktoren 3 og for U5 var faktoren 1.

For å skalere utslippsmengden fra punkt U4 ved Mjøndalen Bru, ble konsentrasjonen fra stasjon E72 rett oppstrøms for punkt U4 og stasjon E12 rett oppstrøms for punkt U5 benyttet. Utslipet ved U4 ble økt til konsentrasjonen nedover i elva var høye nok (se tynn grønn kurve i Figur 8). Varigheten til utslippet fra punkt U4 var seks timer i modellen. Den tilsvarende metodikken ble benyttet for å skalere utslippsmengden fra punkt U5. Virkningen av utslippet fra U5 er illustrert i Figur 9. Det er sannsynlig at den totale rotenonmengden kunne vært redusert ved å endre på varigheten til dette utslippet og også utslippet ved punkt U3 (Hellefoss). Dette er ikke undersøkt i dette modellarbeidet.



Figur 8. Konsentrasjon av rotenonløsning ved stasjon E86 rett oppstrøms for punkt U3, stasjon E72 rett nedstrøms for U3 og stasjon E12 rett oppstrøms for punkt U5.



Figur 9. Konsentrasjon av rotenonløsning ved stasjon E12 rett oppstrøms for punkt U5 og for stasjon E1b som ligger i Drammenselvas søndre utløpspunkt.

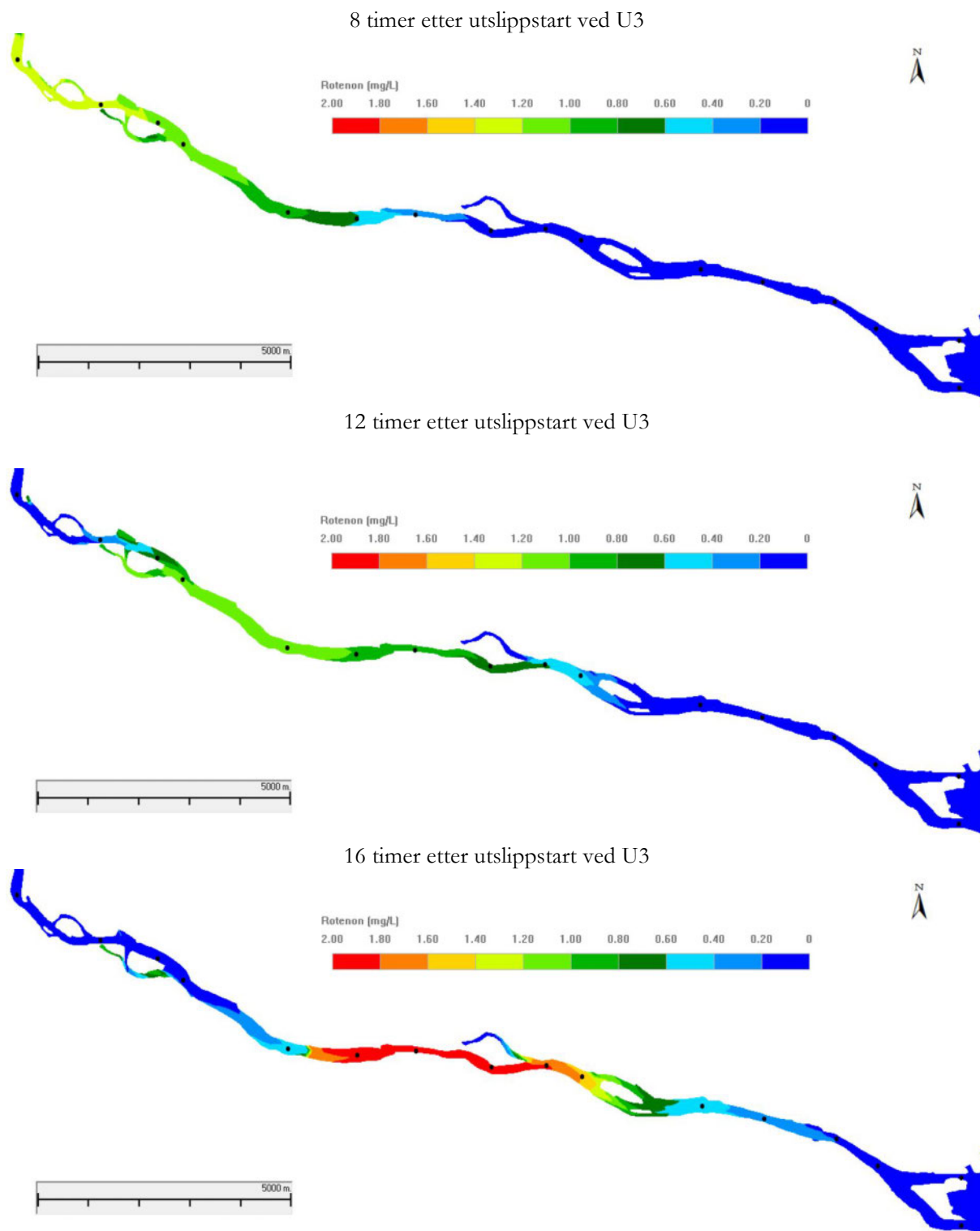
Total mengde med rotenonløsning som er bruk er oppsummert i Tabell 4. I modellsimuleringen er det sluppet ut til sammen 32000 L rotenonløsning. For å kvalitetssikre dette tallet så kan vi ta utgangspunkt i en vannføring i elva på 330 m³/s. Hvis konsentrasjonen skal være 1 mg/L i 24 timer, så tilsvarer dette en total mengde tilsatt rotenonløsning på 28500 L, som er av samme størrelsesorden som er sluppet ut i modellsimuleringen.

Tabell 4. Oppsummering av mengde kjemikalier brukt i modellsimuleringen.

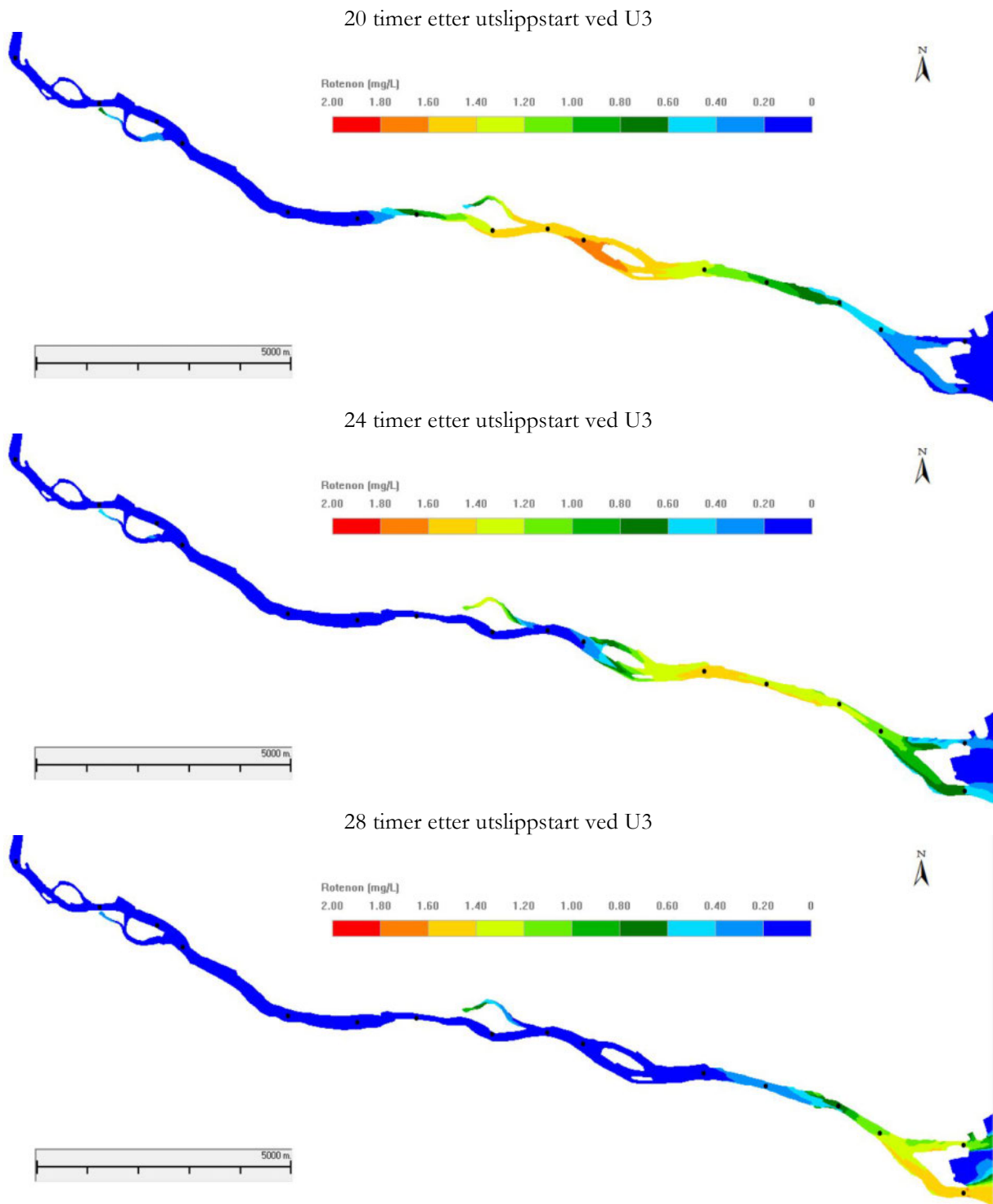
Utslippspunkt	Fluks av CFT-Ligumin (L/time)	Varighet (timer)	Totalt volum (L)
U3	1512	8	12096
U4	2265	6	13590
U5	756	8	6048
Totalt			31734

Modellresultatene viser at rotenonløsningen fordeler seg nedover i dypet. Når maksverdiene på stasjonene vist i Figur 6 betraktes, ser man at de laveste verdiene finnes rett oppstrøms for utslippspunktene. Rett ovenfor Mjøndalen Bru, i 4-5 m dyp kommer ikke konsentrasjonen over 0,7 mg/L i modellsimuleringen.

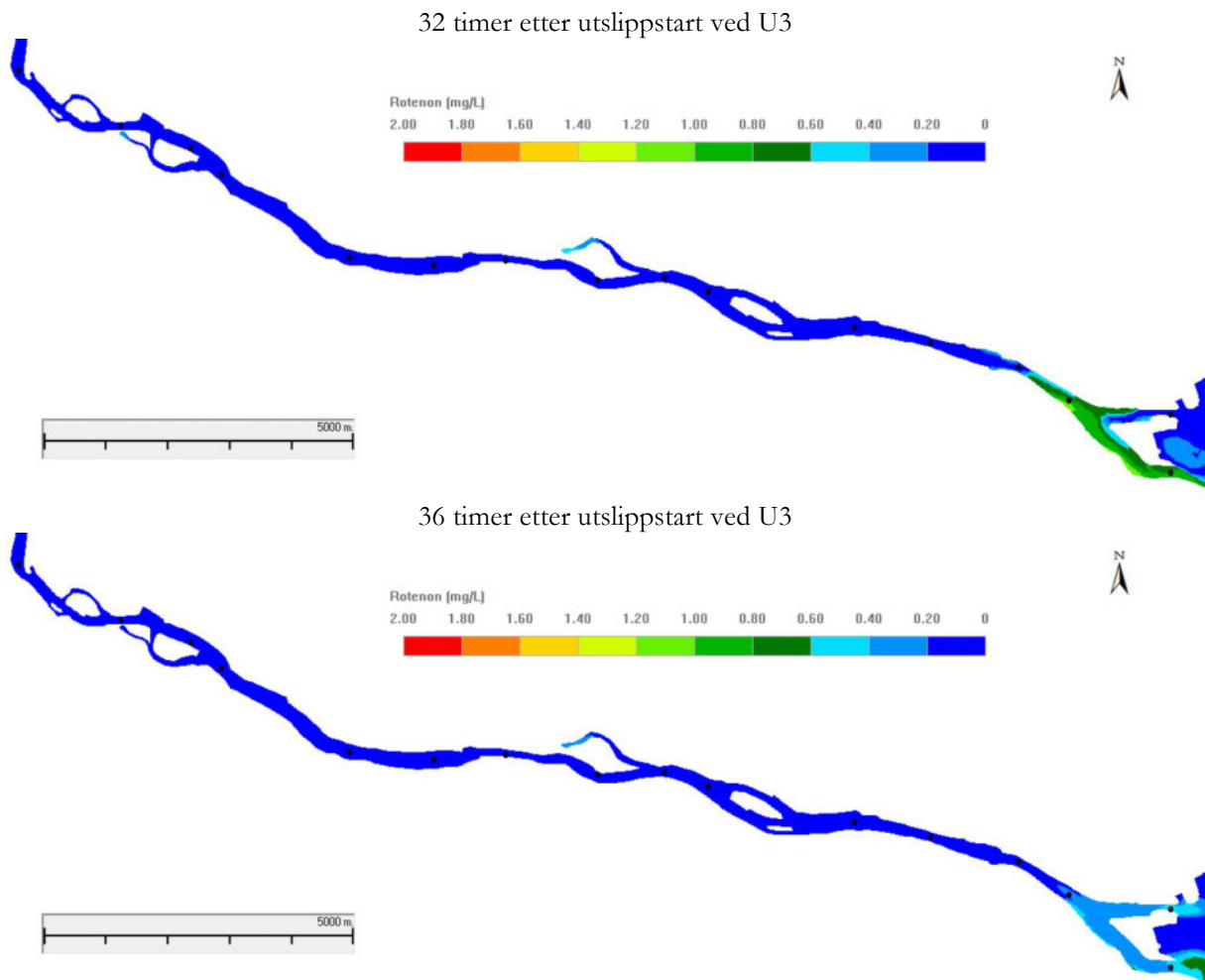
I Figur 10 til Figur 12 følges rotenonskya nedover i elva, fra 8 timer etter at utslippet starter ved punkt U3 til 36 timer etter utslippstart. Ved det tidspunktet er konsentrasjonen lavere enn 0,2 mg/L i hele elva oppstrøms for stasjon E6, bortsett fra i bakevjer i elva. Noter spesielt at konsentrasjonen holder seg høy lengst i sidearmen ved stasjon E36.



Figur 10. Konsentrasjon av rotenonløsning (mg/L) i Drammenselvas overflatelag ved tre tidspunkter.



Figur 11. Konsentrasjon av rotenonløsning (mg/L) i Drammenselvas overflatelag ved tre tidspunkter.

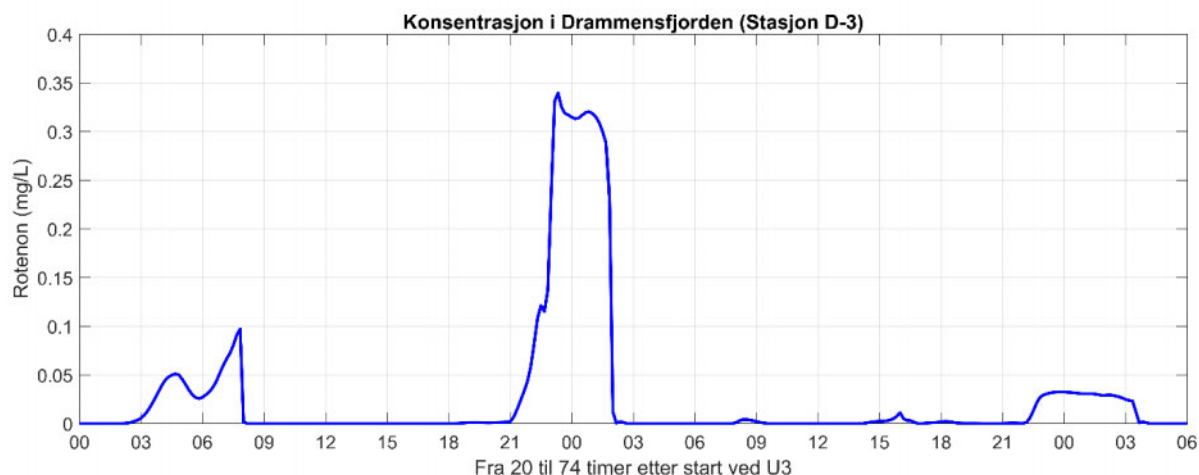


Figur 12. Konsentrasjon av rotenonløsning (mg/L) i Drømmenselvas overflatelag ved to tidspunkter.

3.2 Konsentrasjon av rotenon i Drammensfjorden

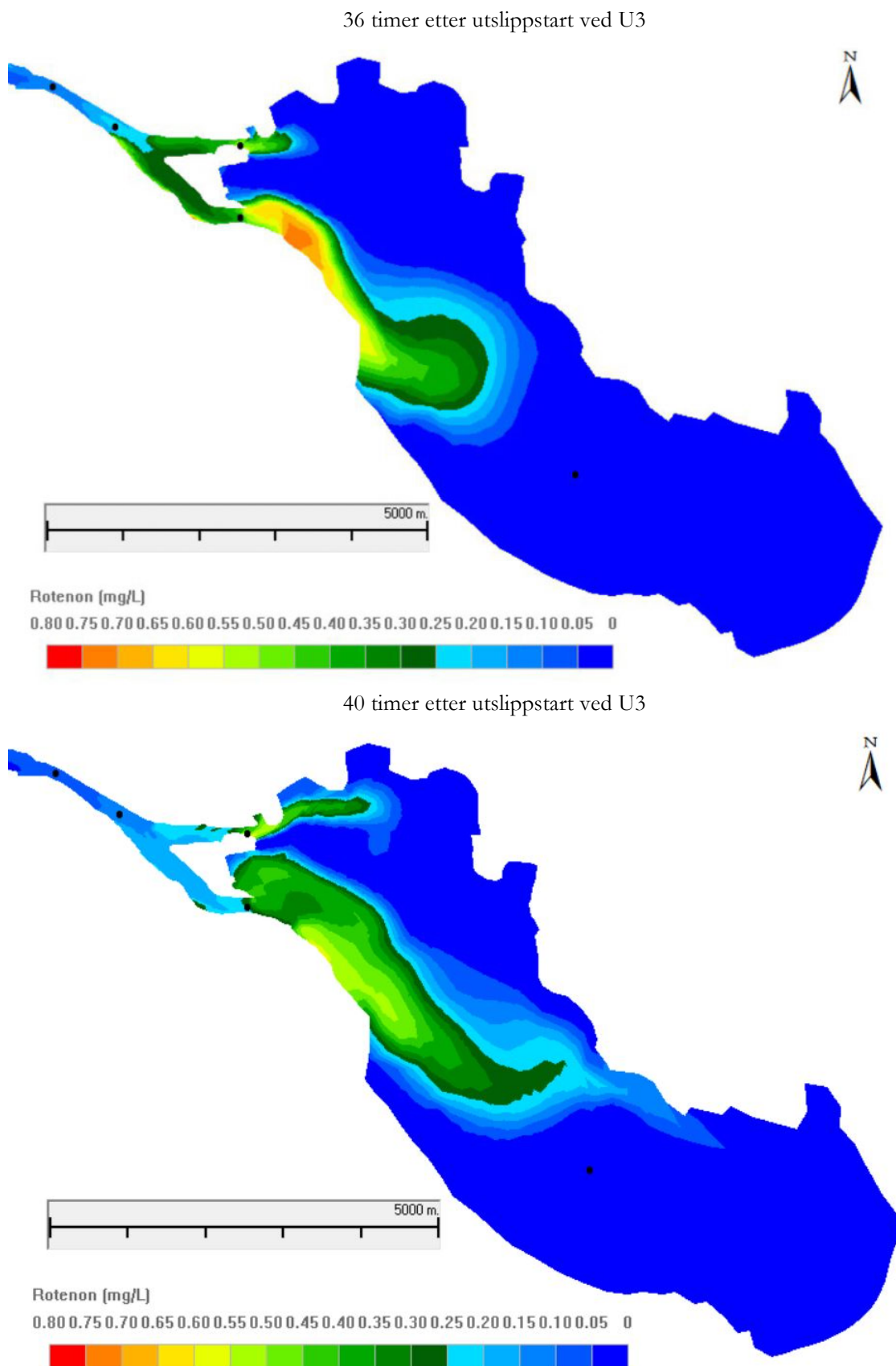
For at konsentrasjonen i elva skal bli tilstrekkelig høy ble det funnet at det var nødvendig å slippe ut en total mengde rotenonløsning på 32000 L. I dette delkapittelet vises hvilken konsentrasjon av rotenon et utslipp av denne størrelsen vil føre til i Drammensfjorden. I Figur 13 er konsentrasjonen ved stasjon D-3 utenfor Solumstrand vist. Den maksimale konsentrasjonen blir 0,34 mg/L i overflatelaget.

Konsentrasjonen er over PNEC verdien (0,03 mg/L) i en periode på 4,5 timer.



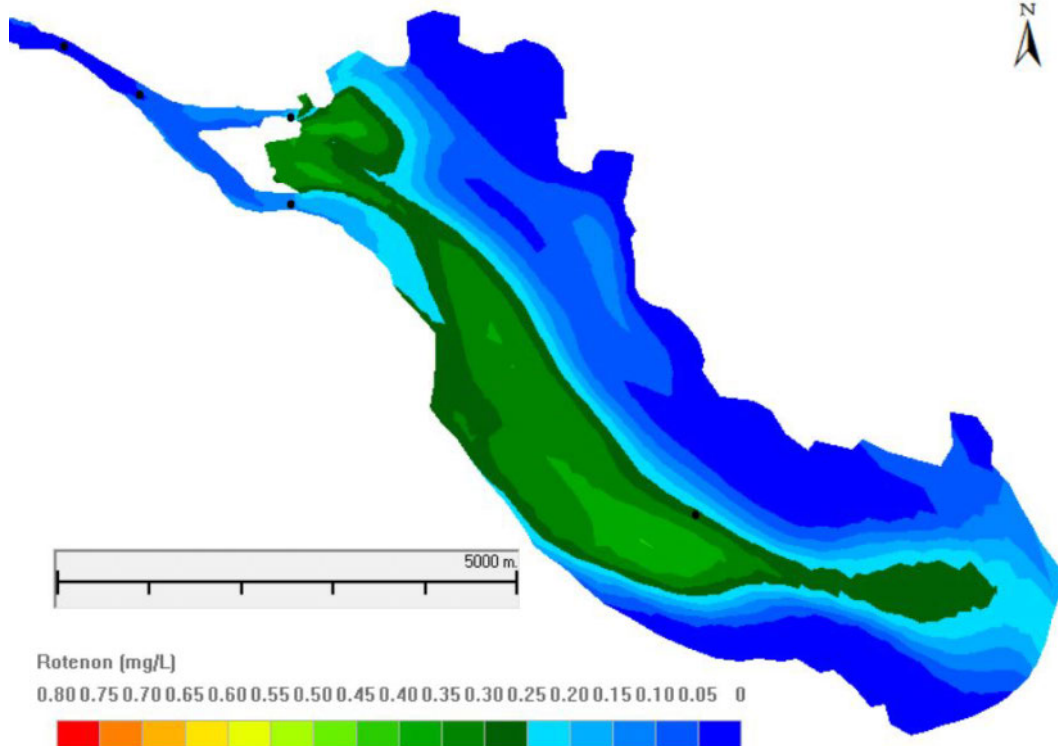
Figur 13. Konsentrasjonen av rotenonløsning (3%) er over verdien 0,03 mg/L (PNEC) på stasjon D-3 i 4,5 timer.

I Figur 14 til Figur 17 er konsentrasjonene av rotenonløsning i Drammensfjordens overflatelag vist, fra utslippsskya har forlatt Drammenselva 36 timer etter utslippsstart ved U3, og til konsentrasjonen er lav i hele fjorden 16 timer seinere. Utslippsskya følger et tilsvarende strømningsmønster som er vist i Figur 4. De høyeste konsentrasjonene opptrer innerst i fjorden nærmest elveutløpet og på fjordens vestre kyst ned mot Solumstrand. I alle plottene viser den mørkeblå fargen konsentrasjoner lavere enn 0,05 mg/L. Denne konsentrasjonen er nær PNEC verdien (0,03 mg/L), og de delene av fjorden hvor fargen er mørkeblå har ikke rotenonutslippet noen virkning i det øyeblikket plottet viser. Konsentrasjonen kommer ikke over 0,25 mg/L langs kysten sør for omtrent Solumstrand.

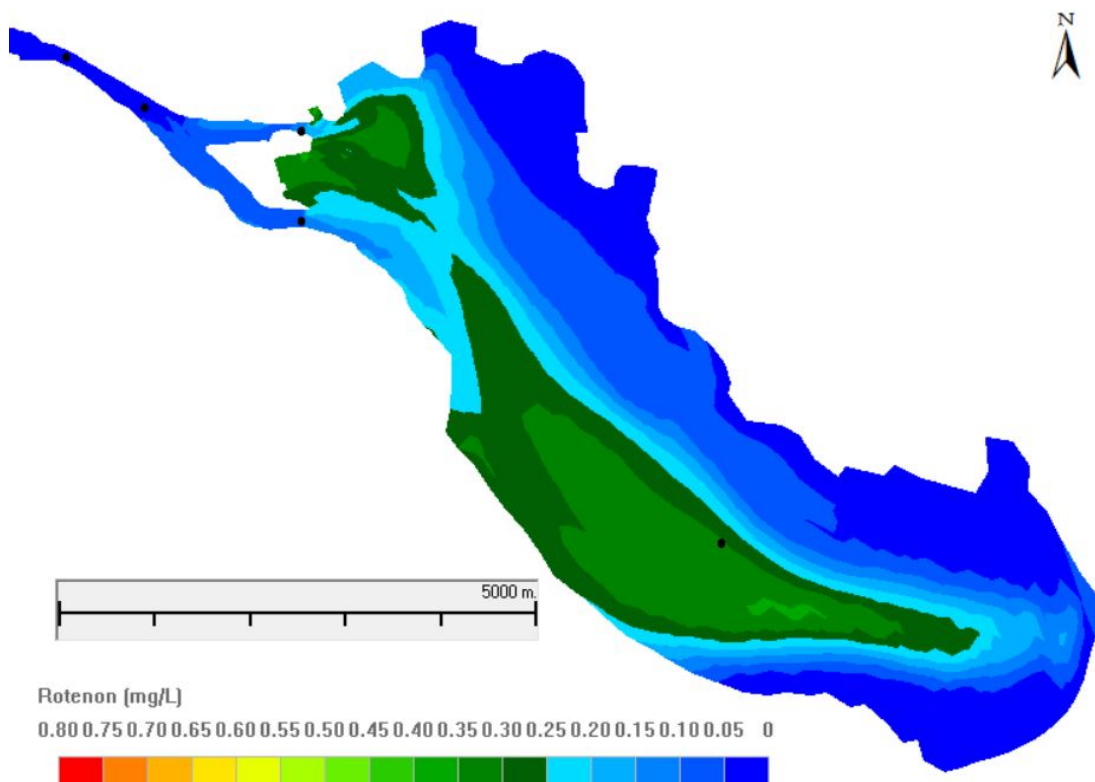


Figur 14. Konsentrasjon av rotenonløsning i Drammensfjorden overflatelag ved 36 og 40 timer etter utslippstart ved utslippspunkt U3.

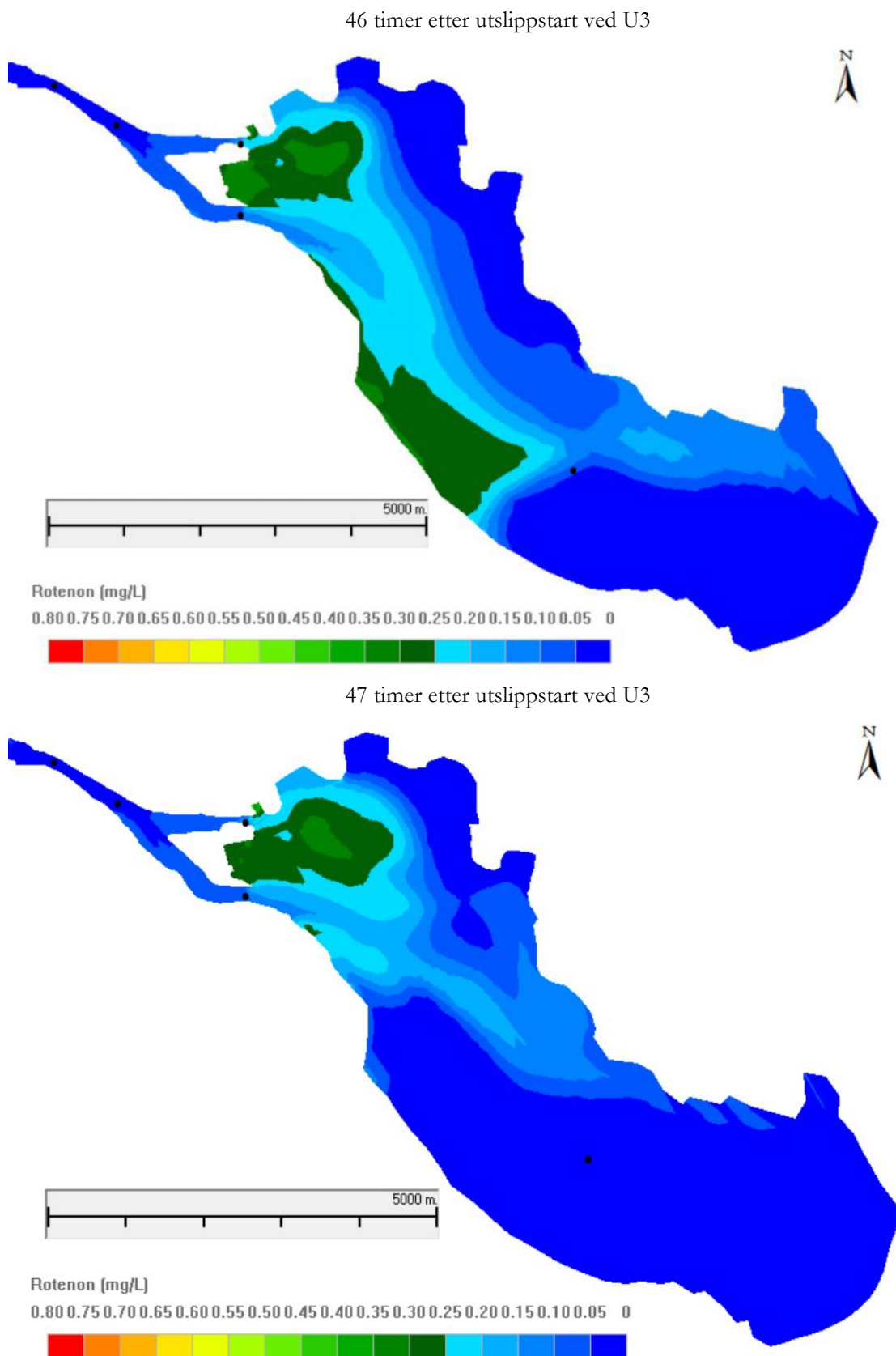
44 timer etter utslippstart ved U3



45 timer etter utslippstart ved U3

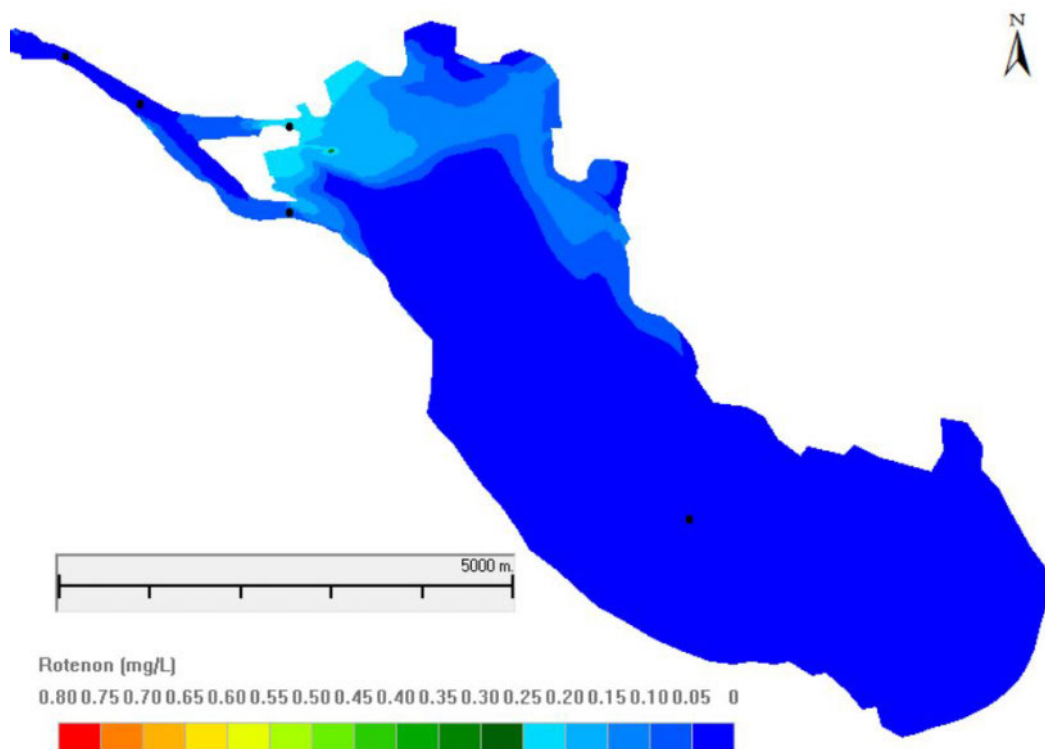


Figur 15. Konsentrasjon av rotenonløsning i Drammensfjorden overflatelag ved 44 og 45 timer etter utslippstart ved utslippspunkt U3.

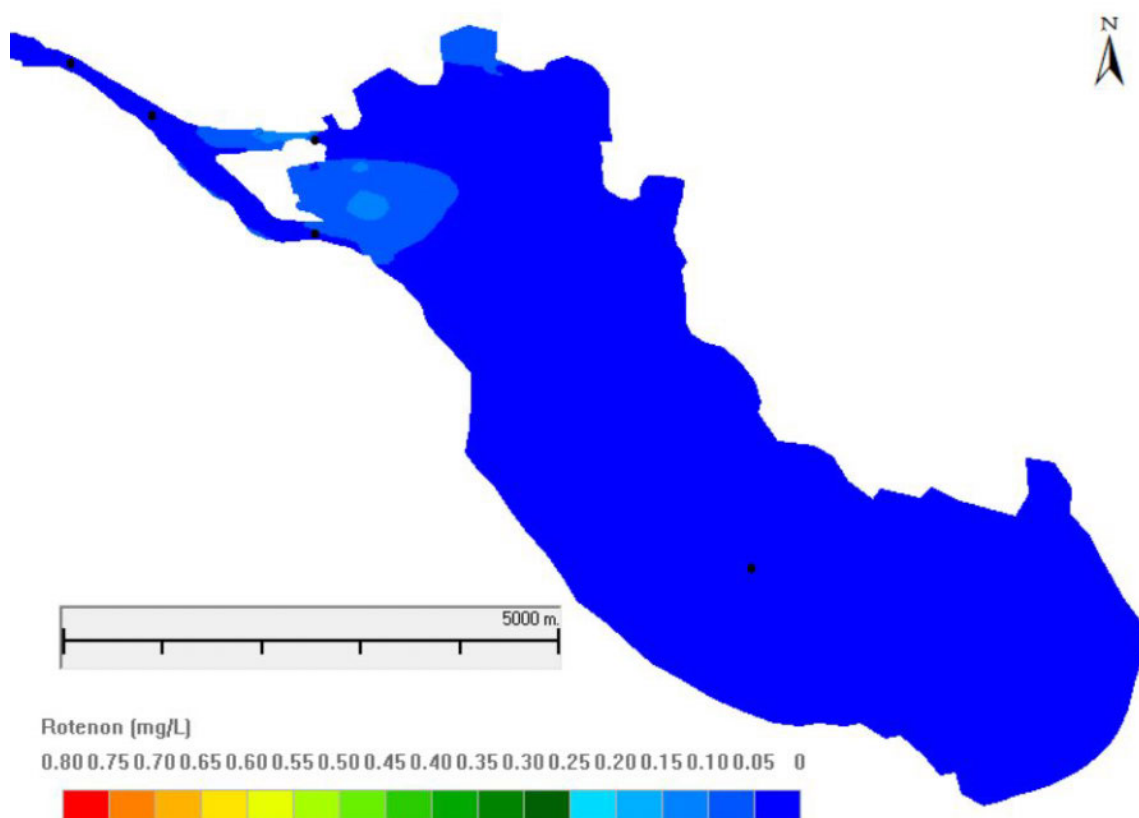


Figur 16. Konsentrasjon av rotenonløsning i Drammensfjorden overflatelag ved 46 og 47 timer etter utslippstart ved utslippspunkt U3.

48 timer etter utslippstart ved U3



52 timer etter utslippstart ved U3



Figur 17. Konsentrasjon av rotenonløsning i Drammensfjorden overflatelag ved 48 og 52 timer etter utslippstart ved utslippspunkt U3.

4 Utslipp av surt aluminium

Metoden med bruk av aluminiumsulfat i kombinasjon med syre er beskrevet av Hindar *et al.* (2013, 2014). Svovelsyre (H₂SO₄) tilsettes for å regulere pH slik at den er 5,8 i vassdraget. Konsentrasjon av den giftige delen av aluminium (uorganisk monomert aluminium) som her betegnes Al_i, skal ligge i intervallet 25-40 µg/L for at behandlingen skal være effektiv (Hindar *et al.*, 2014). Ved tilsetning av aluminiumsulfat, vil konsentrasjonen av uorganisk monomert aluminium i startfasen reduseres raskt, hvor konsentrasjonen typisk vil halveres i løpet av mindre enn en time. Dette skyldes blant annet at aluminium bindes til organisk stoff i elvevannet, og hvor mye konsentrasjonen reduseres vil derfor avhenge blant annet av mengden løst organisk stoff. Det er ikke tatt hensyn til dette når mengde med kjemikalier er tilsatt i modellen. Etter denne startfasen reduseres aluminiumkonsentrasjonen betydelig tregere.

I modellering med GEMSS fra Lærdalsvassdraget (Hindar *et al.*, 2013), ble det antatt at 37 % av dosert aluminiumsulfat (AIS) umiddelbart ble deaktivert, og slik ikke lenger var aktivt mot *G. salaris*, og følgende formel ble brukt for å beregne sammenhengen mellom mengde per sekund tilsatt Al_i i forhold til volum per time av tilsatt AIS-løsning (4,3 %), hvor tettheten til AIS var 1,3 kg/L.

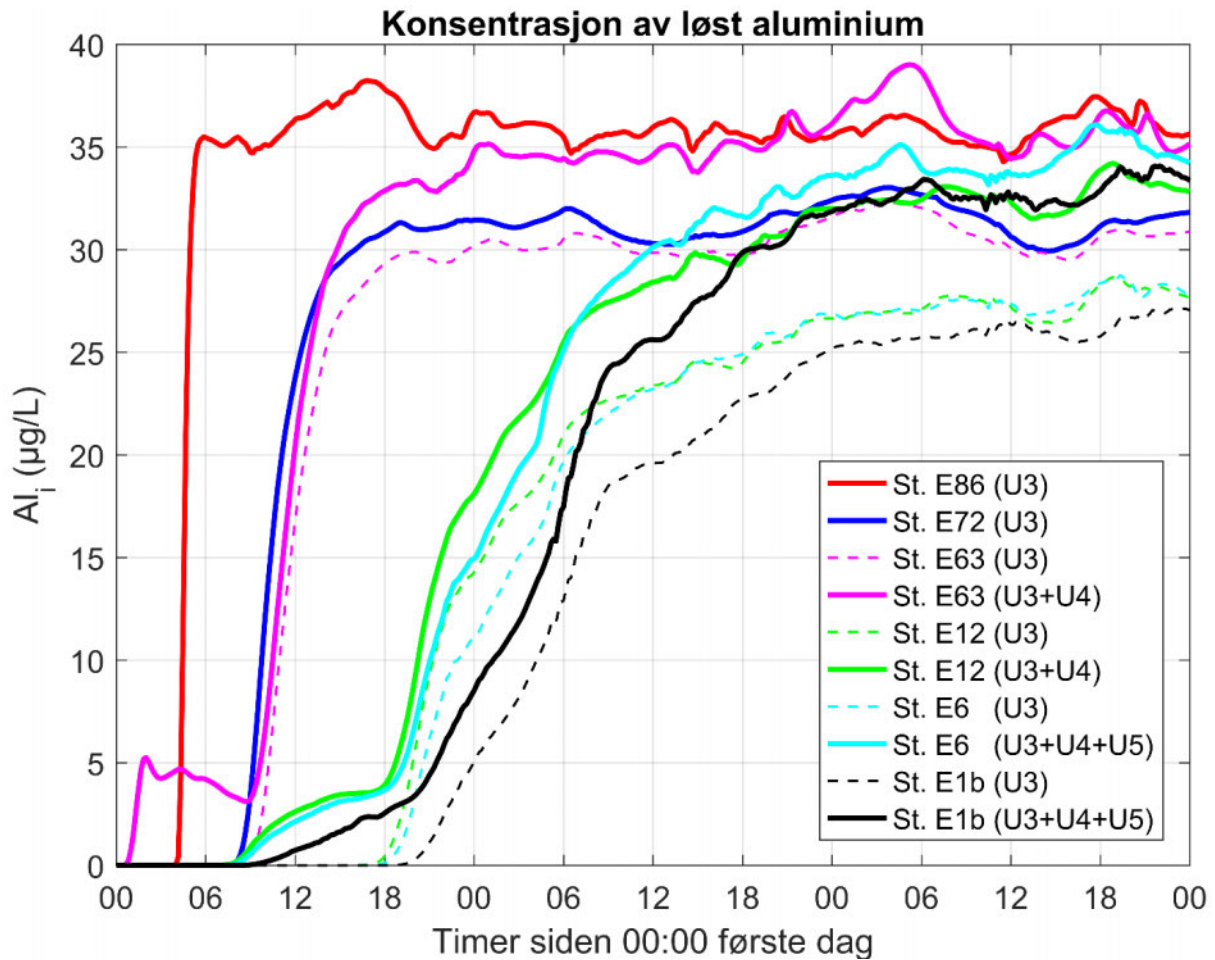
$$Al_i \text{ (mg/s)} = 9,7825 \cdot AIS \text{ (L/time)}$$

Mengde tilsatt kjemikalie i modellen er oppsummert i Tabell 5 hvor formelen over er benyttet for å anslå mengde tilsatt aluminiumløsning. I modellen blir det til sammen tilsatt 14700 mg/s med Al_i, som tilsvarer omtrent 0,4 L/s av AIS hvis formelen over benyttes (se også Tabell 5). For å kvalitetssikre dette tallet så måtte det med en vannføring på 330 m³/s blitt tilsatt 13200 mg/s for å oppnå en konsentrasjon på 40 µg/L.

Tabell 5. Oppsummering av mengde kjemikalier brukt i modellsimuleringen.

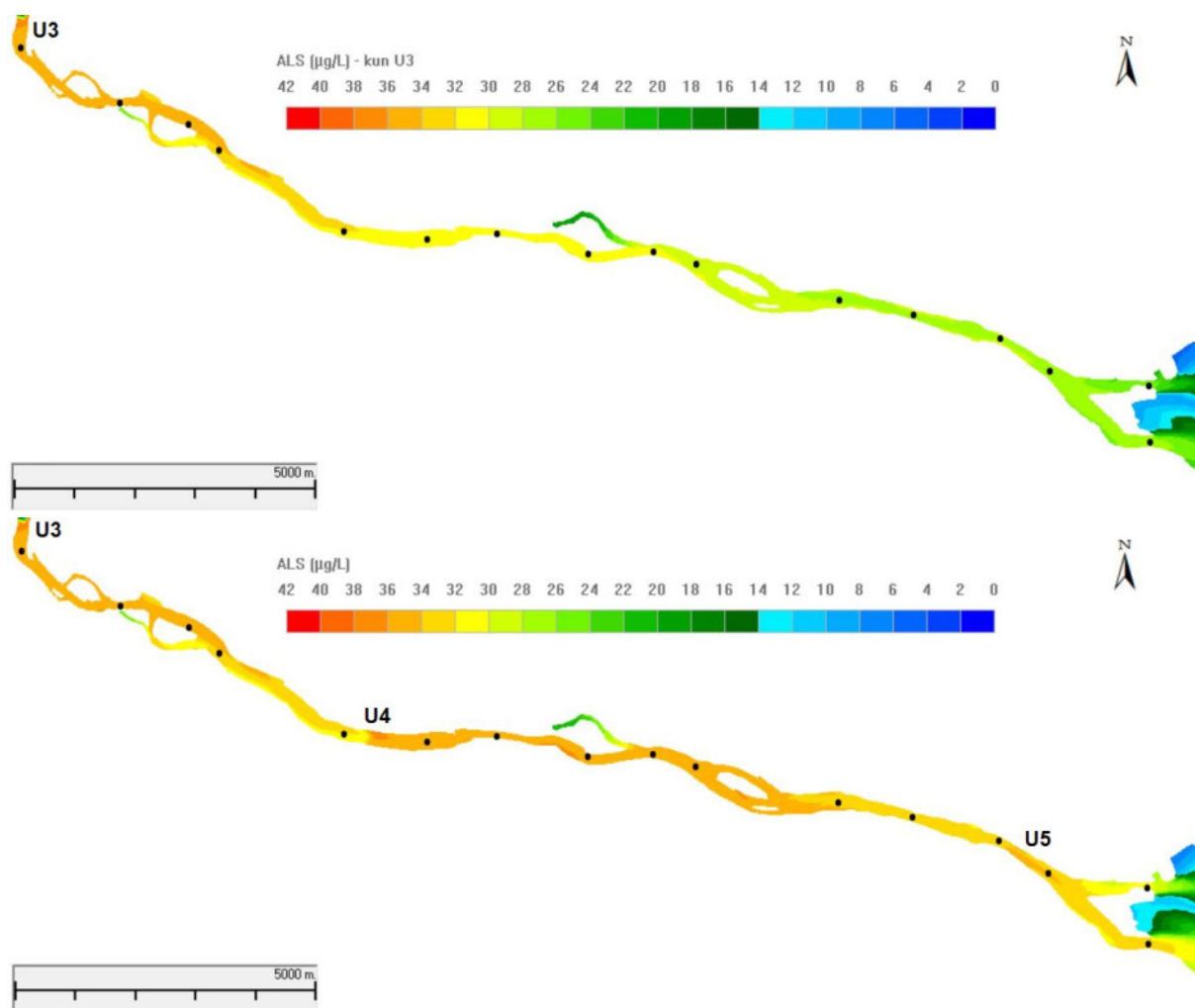
Utslippspunkt	Fluks av Al _i (mg/s)	Fluks av AIS (L/time)
U3	11900	1216
U4	2100	215
U5	700	72
Totalt	14700 mg/s	1500 L/time ~ 0,4 L/s

I Figur 18 er det vist hvordan konsentrasjonen av aluminium vil variere nedover i elva. Den røde kurven viser konsentrasjonene ved stasjon E86 rett nedstrøms utslippspunkt U3, som holder seg over 35 µg/L. Ved stasjon E72 rett oppstrøms neste utslippspunkt ligger konsentrasjonene på rundt 30 µg/L. Ved å tilsette mer kjemikalier ved utslippspunkt U4 økes konsentrasjonen ved stasjon E63 fra litt over 30 til rundt 35 µg/L (sammenlign tynn og tykk rosa kurve). Utslipet fra de to punktene U3 og U4 gjør at konsentrasjonen på stasjon E12 rett oppstrøms for det siste utslippspunktet, holder seg på rundt 33 µg/L (tykk grønn kurve). På stasjon E6 rett nedstrøms for utslippspunktet og på stasjon E1b i elvas utløp til Drammensfjorden ligger konsentrasjonene på hhv. ca. 34 og 33 µg/L.

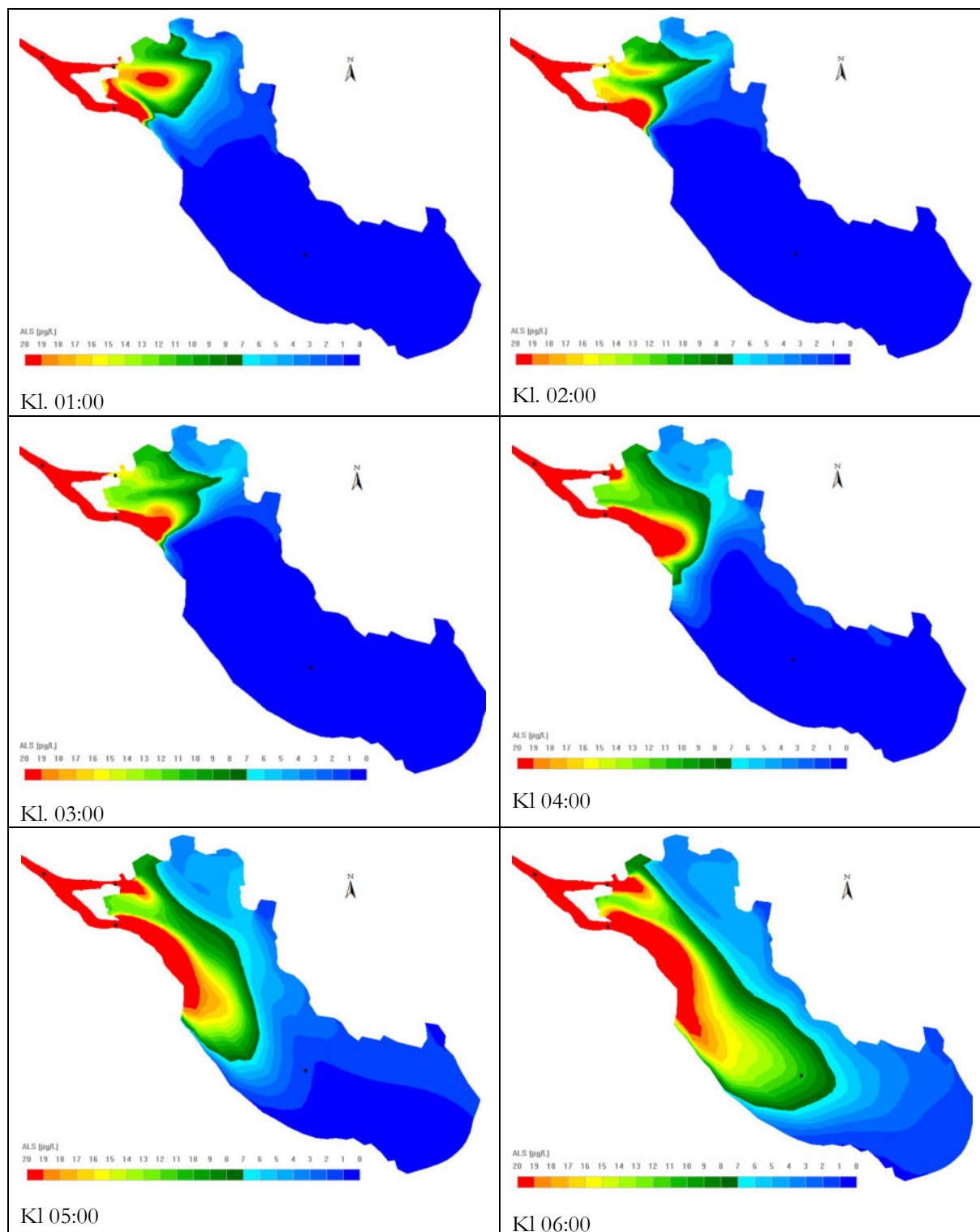


Figur 18. Konsentrasjon av aluminiumsulfat (ALS) i overflatelaget på seks stasjoner nedover i Drammenselva. Stasjon E63 er plassert rett nedstrøms for påfyllingspunkt U4. Stasjon E6 er plassert rett nedstrøms for påfyllingspunkt U5.

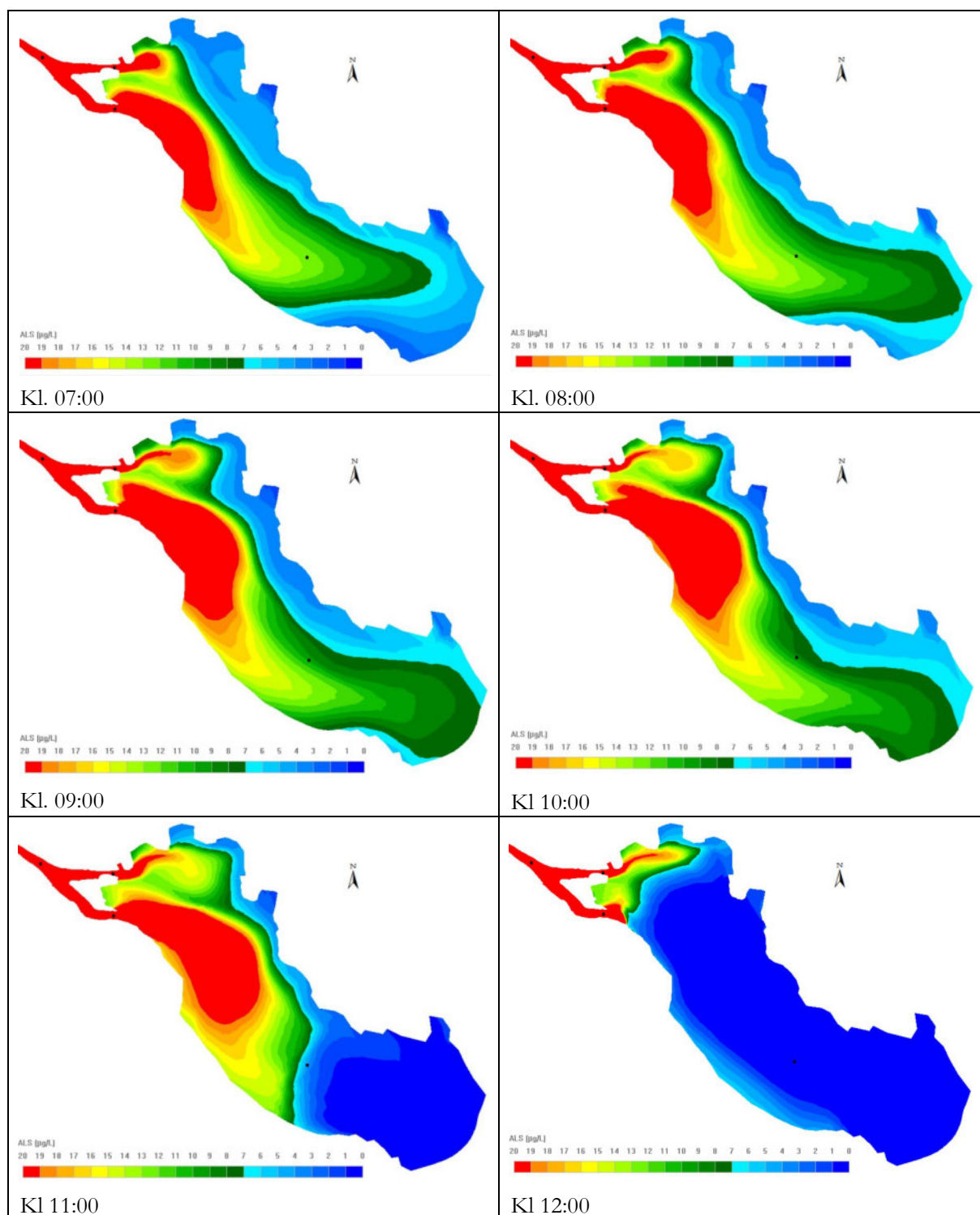
I Figur 19 vises konsentrasjonen i Drammenselva 92 timer etter at utslippet startet. Konsentrasjonene blir lavest rett oppstrøms for påfriskningspunktene U4 og U5. Konsentrasjonen blir også lav i sidearmene til elva.



Figur 19. Konsentrasjon av aluminium (Al) i Drammenselva kl 00:00 dag 5. Utslippet startet ved punkt U3 kl. 04:00 dag 1. Øverst vises konsentrasjonene i elvas overflatelag når det kun slippes ut kjemikalier ved utslippspunkt U3. Nederst vises konsentrasjonene når det slippes ut ved alle tre utslippspunktene.



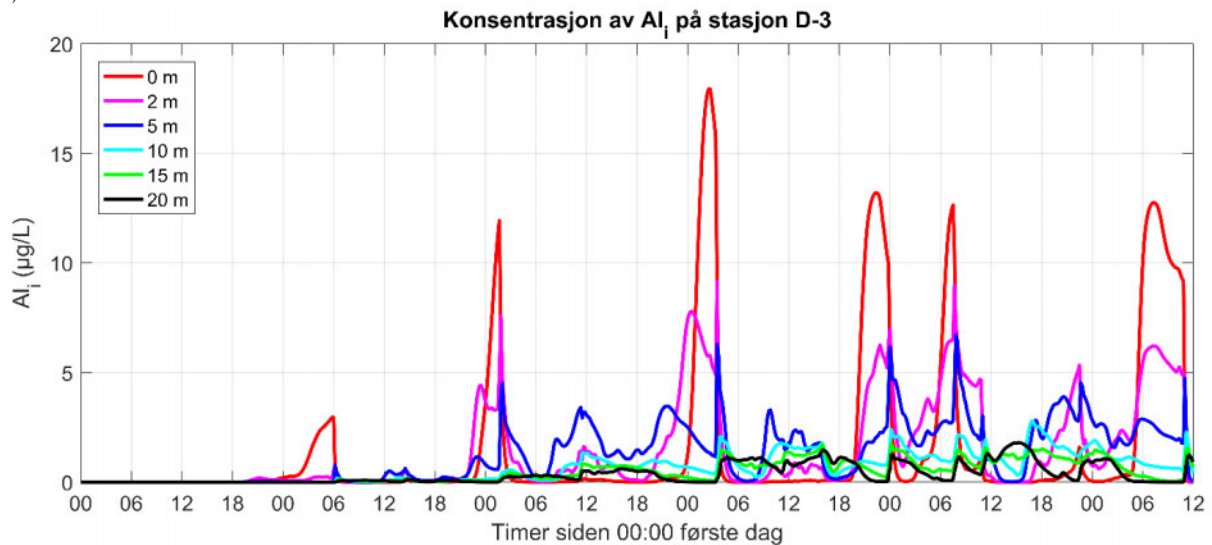
Figur 20. Konsentrasjon av aluminium (Al) i Drammensfjorden sitt overflatelag, fra 01:00 til 06:00 dag 6. Den svarte prikken midt i fjorden angir posisjonen for stasjon D-3 utenfor Solumstrand. Utslippsskyens utbredelse varierer med både tidevannsvariasjon og er påvirket av vind. Merk at fargeskalaen bare går opp til 20 µg/L i denne figuren.



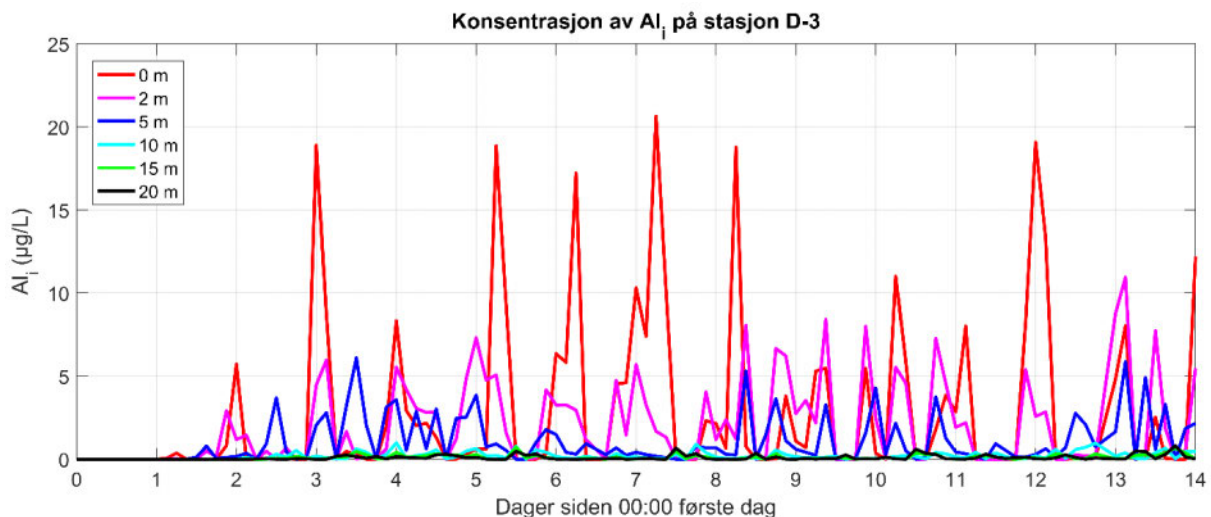
Figur 21. Konsentrasjon av aluminium (Al_i) i Drammensfjorden sitt overflatelag, fra 07:00 til 12:00 dag 6. Den svarte prikken midt i fjorden angir posisjonen for stasjon D-3 utenfor Solumstrand. Utslippsskyens utbredelse varierer med både tidevannsvariasjon og er påvirket av vind. Merk at fargeskalaen bare går opp til 20 $\mu\text{g/L}$ i denne figuren.

I Figur 20 og Figur 21 vises konsentrasjonen av Al_i i Drammensfjorden i løpet av en tidevannssyklus, dag 6 av modellsimuleringen. Konsentrasjonen er lavest på fjordens nord-østlige side, og konsentrasjonene er størst langs kysten på sør-vestsiden. På det høyeste er konsentrasjonene av Al_i over $7 \mu\text{g/L}$ ved Steinsbråten fyr, som ligger ved modellområdet åpne rand mot sør. Utslippsskyens utbredelse varierer med både tidevannsvariasjon og er påvirket av vind. Det er store mengder vann i fjorden, og når vind og tidevann presser dette vannet opp mot elvemunningen blir konsentrasjonen av Al_i i fjorden brått lav igjen, slik som vist nederst til høyre i Figur 21.

I Figur 22 er konsentrasjonene av Al_i på stasjon D-3 midt i fjorden vist. Konsentrasjonen er høyest i overflatelaget. Spesielt helt nær overflaten vil konsentrasjonen ha høye konsentrasjoner med noen timers varighet. Ser vi på variasjonen i konsentrasjonen på stasjon D-3 over 14 dager, ser vi at konsentrasjonen beholder det samme variasjonsmønsteret over tid, og at konsentrasjonen ikke bygger seg opp over tid på denne stasjonen midt i fjorden. Dette kan forklares med at vannet fra elva passerer relativt raskt gjennom fjorden.



Figur 22. Konsentrasjon av aluminium på forskjellige dyp fra 0 til 20 m på stasjon D-3 utenfor Solumstrand.



Figur 23. Konsentrasjon av aluminium på forskjellige dyp fra 0 til 20 m på stasjon D-3 utenfor Solumstrand. Figuren viser en tilsvarende modellkjøring som vist i figuren over, men over en lengre tidsperiode.

5 Diskusjon og samlet vurdering

I en modellsimulering med den numeriske modellen GEMSS har tilsetning av kjemikalier i Drammenselva blitt simulert, hvor hensikten er å utrydde lakseparasitten *G. salaris*. Ved å slippe ut en mengde på 32000 L av en rotenonløsning med styrke 3,3 %, fordelt på tre utslippspunkter i elva fra Hellefoss til Drammen sentrum, er det mulig å oppnå høy nok konsentrasjon (over 0,7 mg/L) i nesten hele elva. Det vil være en utfordring å kontrollere konsentrasjonen i diverse små og store bakevjer i elva. I en arm av elva på innsiden av Fallagsøya (ved stasjon E36) hvor det er lite tilløp fra småelver, kommer økningen i konsentrasjonen noe senere enn i resten av elva, og det er også konsentrasjonen holder seg lengst når utslippet er over. Dette området av elva bør undersøkes nærmere for et eventuelt tiltak mot *G. salaris* settes i gang. Det er i dette modellarbeidet ikke tatt hensyn til den mengden rotenon som er nødvendig for å behandle sidevassdrag og ekstradoseringer fra båter.

I modellen har kjemikallet en synkehastighet, som er lagt inn for å sikre at kjemikallet fordeler seg jevnt fra overflate til bunn. Dette gjør at rett nedstrøms for utslippspunktene blir konsentrasjonen i modellen nær bunn noe høyere enn det en kan forvente i en virkelig dosering, siden noe av kjemikaliene havner på bunn. Dette kan gjøre at anslaget på den totale mengden kjemikalier som må tilsettes kan være noe for høyt.

Det vil være mest utfordrende å få høye nok konsentrasjoner rett oppstrøms for doseringspunktene. I modellen finnes de laveste maksimale konsentrasjonene rett oppstrøms for utslippspunktet U4 hvor den maksimale konsentrasjonen ikke kommer over 0,7 mg/L

Den konsentrasjonen av rotenon som mest sannsynlig ikke vil ha noen effekt på dyrelivet i vannmiljøet (PNEC), kan beregnes ut ifra eksperimenter hvor virvelløse dyr er utsatt for rotenon i typisk 24 til 48 timer. LC50 verdien er den konsentrasjonen hvor 50 % av testpopulasjonen dør, denne er omtrent 3 mg/L for de mest sensitive artene. PNEC verdien kan beregnes ved å benytte en sikkerhetsfaktor på 100, som gir en verdi på 0,03 mg/L.

Ved utslipp av 32000 L rotenonløsning totalt, vil konsentrasjonen i Drammensfjordens overflatelag komme over PNEC verdien i noen timer innerst i Drammensfjorden, langs fjordens vestre kyst og i sentrale deler av fjorden. De høyeste konsentrasjonene opptrer innerst i fjorden nærmest elveutløpet og på fjordens vestre kyst ned mot Solumstrand. Konsentrasjonen kommer ikke over 0,25 mg/L langs kysten sør for omtrent Solumstrand.

For å oppnå en konsentrasjon av uorganisk monomert aluminium (Al_i) på over omtrent 30 $\mu\text{g/L}$ i hele Drammenselva, må det tilsettes anslagsvis 0,4 L/s av en aluminiumløsning med konsentrasjon 4,3 %. Basert på en modellkjøring over 14 dager kan det vises at konsentrasjonene i elvevannet vil da tidvis være over 7 $\mu\text{g/L}$ i store deler av fjorden helt ut til Steinsbråten fyr, og over 20 $\mu\text{g/L}$ i områdene nærmest elveutløpet og langs kysten ned mot Solumstrand. Det må påpekes at det ikke er vurdert hvor godt modellen gjenskaper blandingsprosessen mellom overflatevannet ute i fjorden og fjordens dypere vannmasser. Dette kan ha betydning for konsentrasjonen i overflatelaget. I modeller av denne typen er ofte blandingen for kraftig, som gjør at modellen muligens overestimerer konsentrasjonen i overflatelaget. Det må også påpekes at senere beregninger kan gi behov for å justere den faktiske valgte konsentrasjonen av aluminium under et tiltak i Drammenselva, og at kjemikalieforbruk da også vil bli justert.

Det er ikke vurdert i denne rapporten hvordan surt aluminium kan påvirke sensitive arter i elva og i fjorden.

Saltholdigheten i Drammensfjorden er kontinuerlig svært lav i de øverste 5 meterne. I flomsituasjoner kan ferskvannslaget bli opp mot 10 m tykt. Saltholdigheten er lavere enn 5 psu i mesteparten av fjordens overflatelag, og det betyr at lakseparasitten trives godt.

Referanser

- Artsdatabanken (2012) Faktaark *Gyrodactylus salaris*, Artsdatabanken faktaark ISSN 1504-9140 nr. 217, 3 sider.
- Brunner, G. W. (2016) HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, Version 5.0, February 2016, US Army Corps of Engineers, 547 sider.
- Hindar, A. et al. (2013) Resultater fra videreutvikling av AIS-metoden for utryddelse av lakseparasitten *Gyrodactylus salaris*, NIVA-rapport 6531-2013, 111 sider.
- Hindar, A., Garmo, Ø., Hagen, A. G., Hytterød, S., Høgberget, R. & Olstad, K. (2014) Manual for AIS-metoden for bekjempelse av lakseparasitten *Gyrodactylus salaris*, NIVA-rapport 6699-2014, 88 sider.
- Hindar, A. R., Garmo, Ø., Hagen, A. G., Hytterød, S., Høgberget, R., Moen, A. & Olstad, K. (2015) Tiltak med AIS for utryddelse av lakseparasitten *Gyrodactylus salaris* i Lærdalselva i 2011 og 2012, NIVA-rapport 6701-2014, 75 sider.
- Ling, N. (2003) Rotenone – a review of its toxicity and use for fisheries management, Science for Conservation 211, Department of Conservation, Wellington, New Zealand, 40 sider.
- Mjelde, M. & Hvoslef, S. (1985) Undersøkelser i Drammensfjorden 1982-84, Delrapport: Høyere vegetasjon, Overvåkningsrapport 208/86, NIVA rapport 1818-1985, 91 sider.
- Mjelde, M. (2004) Drammenselva, Drammen kommune, Makrovegetasjon 2003, NIVA-rapport 4814-2004, 14 sider.
- Pettersen, A. R. et al (2007) Kjemisk behandling mot *Gyrodactylus salaris* i Lærdalsvassdraget 2005/2006 – Sluttrapport, NIVA-rapport 5349-2007, 27 sider.
- Røed, L. P., Kristensen, N. M., Hjelmervik, K. B. & Staalstrøm, A. (2016) A high-resolution, curvilinear ROMS model for the Oslofjord, MET report no. 4/2016, 54 sider.
- Solheim, W. S. & Bjørnstad, A. B. (2015) Risiko for spredning av *Gyrodactylus salaris* i Oslofjorden, Vestfold fylkeskommune, 12. januar 2015, 33 sider.
- Soleng, A. & Bakke T. A. (1997) Salinity tolerance of *Gyrodactylus salaris* (Platyhelminthes, Monogenea): laboratory studies, Can. J. Fish. Aquat. Sci., 54, 1837-1845.
- Staalstrøm, A. & Hjelmervik, K. B. (2017) Strømf forholdene i innløpet til Drammensfjorden, VANN, nr. 1 2007, 52, 104-115.

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 samfunnsniv.



Norsk institutt for vannforskning

Gaustadalléen 21 • 0349 Oslo
Telefon: 02348 • Faks: 22 18 52 00
www.niva.no • post@niva.no