



RAPPORT LNR 5560-2008

Økotoksikologisk  
karakterisering av  
avløpsvann fra  
Hellefoss AS i Hokksund



**Hovedkontor**

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

**Sørlandsavdelingen**

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

**Østlandsavdelingen**

Sandvikaveien 41  
2312 Ottestad  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 62 57 66 53

**Vestlandsavdelingen**

Postboks 2026  
5817 Bergen  
Telefon (47) 2218 51 00  
Telefax (47) 55 23 24 95

**NIVA Midt-Norge**

Postboks 1266  
7462 Trondheim  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 73 54 63 87

Tittel Økotoksikologisk karakterisering av avløpsvann fra Hellefoss AS i Hokksund	Løpenr. (for bestilling) 5560-2008	Dato 15.02.2008
	Prosjektnr. Undernr. 27461	Sider Pris 29
Forfatter(e) Torsten Källqvist	Fagområde Økotoksikologi	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Buskerud	Trykket CopyCat

Oppdragsgiver(e) Hellefoss AS	Oppdragsreferanse Håkan Elfving
----------------------------------	------------------------------------

**Sammendrag**

Avløpsvann fra Hellefoss AS i Hokksund er blitt undersøkt ved kjemiske analyser og toksisitetstester for vurdering av miljøeffekter i resipienten, Drammenselva. Prosessavløpsvannet og avløpsvannet fra barkpressen, som er en delstrøm i prosessavløpsvannet hadde et høyt innhold av suspendert materiale og organisk stoff. Disse avløpsstrømmene hadde også et forholdsvis høyt innhold av sink. Det ble ikke påvist PAH eller AOX i prosessavløpsvannet. Avløpsvannet fra fyrhuset hadde høyt innhold av uorganisk salter dominert av natriumsulfat. Konsentrasjonen av nikkel var også høy. Toksisitetstester med *Daphnia magna* viste EC50 verdiene 5.9 % for avløpsvannet og 41 % for prosessavløpsvannet. Algen *Pseudokirchneriella subcapitata* var mindre følsom enn *D. magna*. Fortynningen av avløpsstrømmene i Drammenselva er betydelig høyere enn det beregnede fortynningsbehovet for å unngå toksiske effekter i resipienten. Risikoen for toksiske effekter i Drammenselva som følge av utslipp fra Hellefoss AS vurderes derfor som ubetydelig utenfor den umiddelbare blandsonen.

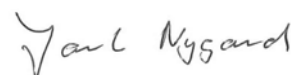
Fire norske emneord 1. Industriløpsvann 2. Treforedling 3. Toksisitet 4.	Fire engelske emneord 1. Industrial wastewater 2. Pulp and paper industry 3. Toxicity 4.
--	--



Torsten Källqvist  
Prosjektleder



Kevin Thomas  
Forskningsleder



Jarle Nygard  
Fag- og markedsdirektør



**Økotoksikologisk karakterisering av avløpsvann fra  
Hellefoss AS i Hokksund**



## Forord

Hellefoss AS henvendte seg i november 2007 til NIVA for å få gjennomført en økotoksiskologisk karakterisering av ulike avløpsstrømmer fra fabrikk i Hokksund. Prøvetaking ble utført av Eigil Iversen (NIVA) 11.12. 2007. Kjemiske analyser av vannprøver er blitt utført ved NIVAs kjemiske analyselaboratorium og av Analytica. Toksitetester er blitt utført ved NIVAs økotoksikologiske laboratorium av Randi Romstad og Torsten Källqvist

Oslo, 15.02. 2008

*Torsten Källqvist*

---



# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>5</b>
<b>Summary</b>	<b>6</b>
<b>1. Bakgrunn</b>	<b>7</b>
<b>2. Målsetning</b>	<b>7</b>
<b>3. Metodikk</b>	<b>7</b>
3.1 Prøvetaking	7
3.2 Kjemiske analyser	9
3.3 Økotoksikologisk karakterisering av utslippene	9
<b>4. Resultat</b>	<b>11</b>
4.1 Kjemisk karakterisering	11
4.2 Toksisitet	12
<b>5. Diskusjon</b>	<b>13</b>
<b>6. Referenser</b>	<b>15</b>

---





## Sammendrag

En kjemisk/økotoksikologisk karakterisering av avløpsvann fra treforedlingsbedriften Hellefoss AS i Høksund er gjennomført. Prøver av tre avløpsstrømmer og inntaksvannet fra Drammenselva ble tatt 11.12. 2007. Prøvene er undersøkt med kjemiske analyser og toksisitetstester. De kjemiske analysene viste høyt innhold av organisk stoff og suspendert materiale i prosessavløpsvannet og i avløpsvannet fra barkpresse som er en delstrøm i prosessavløpet. Konsentrasjonene av metallene jern og mangan var høyere enn 1 mg/l i prosessavløpet. Av tungmetallene var konsentrasjonen av sink høyest med 556 µg/l i prosessavløpet og 1410 µg/l i avløpet fra barkpresse. Ingen polysykliske hydrokarboner (PAH) ble påvist over deteksjonsgrensen (50 ng/l) i prosessavløpsvannet. Det ble heller ikke funnet AOX over deteksjonsgrensen 10 µg/l.

Avløpsvannet fra røykgassrensingen i fyrhuset hadde et høyt innhold av uorganiske salter, dominert av natriumsulfat. Av tungmetallene var konsentrasjonen av nikkel høy (827 µg/l). Det ble ikke påvist benzen, toluen, etylbenzen eller xyloler i avløpsvannet fra fyrhuset.

Toksisitetstester av prøvene fra prosessavløpet og avløpsvannet fra barkpresse ble foretatt med alger (*Pseudokirchneriella subcapitata*) og vannlopper (*Daphnia magna*). *D. magna* var mer følsom enn algene for begge prøvene. EC50 d.v.s. den konsentrasjon som gir 50 % immobilisering av *D. magna* etter 48 timers eksponering ble bestemt til 5.9 % for avløpsvannet fra barkpresse og 41 % for prosessavløpet. Det antas at toksisiteten hovedsakelig skyldes organiske stoffer med opprinnelse fra tømmer.

Beregningene av fortynningsbehov for å unngå toksiske effekter i resipienten viser at risikoen for toksiske effekter utenfor den umiddelbare blandsonen i Drammenselva er ubetydelig

## Summary

Title: Ecotoxicological characterisation of wastewater from Hellefoss AS, Hokksund

Year: 2008

Author: Torsten Källqvist

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 82-577-5295-8

A chemical/ecotoxicological characterization of wastewater from the wood pulping factory Hellefoss AS in Hokksund, S.E. Norway has been performed. Samples from three wastewater streams and from the intake water (River Drammenselva) were taken in 31.12. 2007. The samples were analysed for chemical constituents and by toxicity testing. The chemical analyses showed a high content of organic matter and suspended material in the process wastewater as well as in the wastewater from the bark press which is a substream of the process wastewater. The concentrations of iron and manganese were above 1 mg/l in the process waste water. Among the heavy metals zinc appeared in the highest concentrations with 556 µg/l in the process waste water and 1410 µg/l in the waste water from the bark press. PAH and AOX could not be detected in the process waste water.

The wastewater from the exhaust scrubber had a high content of inorganic salts, dominated by sodium and sulphate. Among the heavy metals, the concentration of nickel was high (827 µg/l). No BETX (benzene, toluene, ethylbenzene and xyloles) was detected in the wastewater.

Toxicity tests of the process wastewater and the wastewater from the bark press were performed with algae (*Pseudokirchneriella subcapitata* and *Daphnia (Daphnia magna)*). *D. magna* was more sensitive than the algae for both wastewater samples. The EC50 for immobilization of *D. magna* after 48 hours exposure was 5.9 % in the wastewater from the bark press and 41 % in the process wastewater. It is assumed that the toxicity mainly is caused by organic substances originating from the timber.

The calculated dilution demand in order to avoid toxic effects in the receiving water is much lower than the actual dilution obtained in the River Drammenselva. The risk for toxic effects in the receiving water due to wastewater discharge from the factory is therefore insignificant beyond the immediate mixing zone.

# 1. Bakgrunn

Hellefoss AS i Høksund bruker driftsvann fra Drammenselva og har utslipp av avløpsvann til elven. I 2006 ble det foretatt en kartlegging av bunndyr i resipienten nedstrøms papirfabrikken. Undersøkelsen viste klare tegn på organisk forurensning av trefiber (Halvorsen 2006). I november 2007 varslet Statens Forurensningstilsyn om pålegg om gjennomføring av økotoksikologisk testing og analyse av tungmetaller i utslipp til Drammenselva. Hellefoss AS henvendte seg til NIVA som utarbeidet et forslag til undersøkelse på grunnlag av pålegget fra SFT.

## 2. Målsetning

Målsettingen for undersøkelsen var:

- Avklare eventuell giftighet av utslippene slik at risiko for effekter i Drammenselva kan vurderes
- Kartlegge innhold av aktuelle forurensningskomponenter i de enkelte utslippene

### Beskrivelse av utslipp til vann

Hellefoss papirfabrikk ligger på vestsiden av Drammenelva i tilslutning til kraftstasjonen. Prosessavløpet fra sliperi og massefabrikk slippes etter sedimentering ut i vannstrømmen fra kraftstasjon Vest. Vann fra Barkpressen blandes med øvrig avløpsvann før sedimentering.

Avgassene fra fyrhuset renses i en scrubber. Etter separering av slam slippes vann fra scrubber til elva sør for hovedavløpet som vist i på kartet (Figur 1).

## 3. Metodikk

### 3.1 Prøvetaking

Uttak av prøver fra prosessavløpsvann fra Blekeri-+PM, avløpsvann fra barkpresse og fra sedimenteringsbasseng i fyrhuset ble foretatt av NIVA ved Eigil Iversen 11.12.2007. Det ble også tatt en prøve av Drammenselva i strandkanten oppstrøms utslippene fra fabrikk. Prøvene ble tatt som øyeblikksprøver. Vannføringen i inntaket fra Drammenselva i det aktuelle tidsrommet og i avløpsstrømmene er sammenstilt i tabell 1. En ny prøve av avløpsvann fra fyrhus ble tatt 31.01. 2008 for analyse av BTEX.

**Tabell 1.** Vannføring i Drammenselva og avløpsvannstrømmer fra Hellefoss.

Vannstrømmer	Vannføring (m <sup>3</sup> /døgn)
Friskvann fra Drammenselva	21 600 000
Prosessavløp	2760 (målt 11.12. 2007)
Barkpressvann	10.8
Avløp fyrhus	12



**Figur 1.** Flyfoto av Drammenselva ved Hellefoss. (Kilde: Statens Kartverk)

### 3.2 Kjemiske analyser

Prøvene ble analysert for metallene Mn, Fe, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Hg og Zn samt totalt organisk karbon (TOC), pH, konduktivitet og suspendert materiale. Adsorberbart organisk halogen (AOX) ble målt i prosessavløpet og avløpet fra fyrhus og polysykliske aromatiske hydrokraboner (PAH) i prosessavløpet. I avløpsvannet fra fyrhuset ble analysene utvidet med dominerende anioner og kationer for beregning av ionebalanse. Analyse av BTEX (benzen, toluen etylbenzen og xyloler) ble gjort på en prøve av avløpsvann fra fyrhuset tatt 31.01. 2008.

#### Oversikt over program for kjemiske analyser

Parameter	Lab/Analysemetode
TOC	NIVA/ Katalytisk oksidasjon 680 °C. Tekmar Dohrmann Apollo 9000 HS TOC-analysator
pH	NIVA/ pH elektrode (NS 4720)
Konduktivitet	NIVA/ WTW inoLab Conductivity Meter (NS-ISO 7888)
KOF	NIVA/ Oksidasjon med kalium dikromat, Dr. Lange (NS 4748)
Suspendert materiale	NIVA/ Filtrering med GF/C glassfiberfilter og veiing etter tørking ved 105 °C (NS 4733)
Alkalinitet	NIVA/ Potensiometrisk titrering (NS EN-ISO 9963-1)
Klorid, sulfat	NIVA/ Ionekromatografi (EN-ISO 10304-01)
Nitrat	NIVA/ Autoanalysator (NS 4745)
Ca, K, Mg	Ionekromatografi (EN-ISO 10304-01)
Hg	NIVA/ Amalgmeringsteknikk, FIMS-400 (Norsk Standard NS 4768)
Øvrige metaller	NIVA / Ionekromatografi-AES (ISO/DIS 11885)
PAH	NIVA/ Gasskromatografi (GC/MSD)
AOX	Analytica / Coulometri. Tørking, stabilisering, fjerning av uorganisk klor, adsorbsjon på aktivt kull, forbrenning av aktivt kull med adsorbent organisk bundet halogen, oppfanget halogen i forbrenningsgassen titreres og konsentrasjonen i prøven bestemmes.
BTEX (benzen, toluen, etylbenzen og xyloler)	NIVA/Gasskromatografi (GC/MS)

### 3.3 Økotoksikologisk karakterisering av utslippene

Prøver av de ulike utslippene er undersøkt for gifteffekter på organismegruppene alger og krepsdyr. Testene er utført på ferskvannsorganismer i henhold til internasjonale standardmetoder (ISO).

Undersøkelse av veksthemming av alger ble gjort i henhold til ISO 8692 med grønnalgen *Pseudokirchneriella subcapitata* (Tidligere benevnt *Selenastrum capricornutum*) Ved testen eksponeres alger i en konsentrasjonsserie av avløpsvannet, fortynt i et definert vekstmedium.

Algenes vekst registreres ved telling hvert døgn i 72 timer. Veksthastigheten beregnes fra økningen i celletetthet i kulturene. Fra resultatene kan veksthemmingen som funksjon av konsentrasjon av avløpsvann beskrives og  $EC_{50}$ -verdien, d.v.s. den konsentrasjon som gir 50 % reduksjon av veksthastigheten i forhold til kontrollkulturer beregnes.

Akutt toksisitet på krepsdyr ble undersøkt i henhold til ISO 6341 med vannloppen *Daphnia magna* som testorganisme. Antallet overlevende og døde (immobiliserte) forsøksdyr registreres i løpet av 48 timers eksponering i en konsentrasjonsserie av avløpsvannet. Fra responskurven som viser prosent mobile forsøksdyr som funksjon av konsentrasjon av avløpsvann kan  $EC_{50}$  for immobilisering av *D. magna* beregnes.

## 4. Resultat

### 4.1 Kjemisk karakterisering

Resultatene av de kjemiske analysene er sammenstilt i tabell 2.

**Tabell 2.** pH, elektrolyttisk ledningsevne, totalt organisk karbon og metaller i avløpsvann.

Parameter	Drammenselva	Prosessavløp	Barkpress	Fyrhus
pH	6.44	5.70	4.85	8.19
Konduktivitet mS/m	3.48	194	140	289
TOC (mg/l)	3.4	845	2330	11
Suspendert materiale (mg/l)	-	216	2400	24.4
Alkalinitet (mmol/l)	-	-	-	36.4
Cl (mg/l)	-	-	-	7.38
SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	-	17300
NO <sub>3</sub> (mg/l)	-	-	-	12.81
Ca (mg/l)	-	-	-	9.89
K (mg/l)	-	-	-	8.60
Mg (mg/l)	-	-	-	0.35
Na (mg/l)	-	-	-	9140
AOX (mg/l)	-	<10	-	70
Cd (µg/l)	<2	2	4	<2
Cr (µg/l)	<3	4	25	6
Cr(VI) (µg/l)	<1	<1	<1	7.7
Cu (µg/l)	<3	35	94	12
Fe (µg/l)	54	3830	9120	496
Hg (µg/l)	0.55	<0.1	0.79	<0.1
Mn (µg/l)	3.6	2460	1810	56
Ni (µg/l)	<5	10	36	827
Pb (µg/l)	<2	<20	<20	<20
Zn (µg/l)	3	556	1410	18
PAH16 (ng/l)	-	<50 <sup>1</sup>	-	-
AOX (µg/l)	-	<10	-	70
BTEX (µg/l)	-	-	-	<1 <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingen PAH-forbindelser ble påvist over deteksjonsgrensen 50 ng/l.



<sup>2</sup> Ingen av komponentene benzen, toluen, etylbenzen og xylol ble påvist over deteksjonsgrensen 1 µg/l.

### Drammenselva

Vannet i Drammenselva hadde en pH-verdi noe under nøytralpunktet. Lav konduktivitet viser at vannet har et lavt innhold av løste ioner. Også innholdet av totalt organisk karbon er lavt. I naturlig overflatevann utgjøres løst organisk karbon hovedsakelig av humusstoffer.

### Prosessavløp

Prøven fra prosessavløpet var noe sur (pH 5.70) Konduktiviteten var ca. 50 ganger høyere enn i Drammenselva. Verdien tilsvarer et innhold av ca. 1.2 g mineralsalter/l. Konsentrasjonen av totalt organisk karbon var 845 mg/l. Avløpsvannet var brunt – også etter filtrering, og fargen skyldes ekstraktivstoffer fra tømmer som trolig også utgjør mesteparten av det organiske materialet i avløpsvannet. Det ble ikke påvist AOX i prosessavløpsvannet. Det høye innholdet av ekstraktivstoffer førte til interferens i bestemmelsen av PAH og deteksjonsgrensen for de enkelte PAH-forbindelsene var 50 ng/l. Ingen PAH-forbindelser ble påvist over deteksjonsgrensen 50 ng/l. Innholdet av jern og mangan var høyt (hhv. 3.8 og 2.5 mg/l). Konsentrasjonen av sink var 556 µg/l. For de øvrige tungmetallene var konsentrasjonene relativt lave.

### Barkpress

Avløpsvannet fra barkpressen var surt med pH 4.85. Konduktiviteten var noe lavere enn i prosessavløpet, men innholdet av organisk karbon var meget høyt (2 300 mg/l). Vannet var mørkt brunt og hadde et høyt innhold av suspendert materiale. Den mørke fargen skyldes ligniner og andre ekstraktivstoffer fra barken. Innholdet av jern var høyt (9.1 mg/l) og også mangan og sink ble påvist i konsentrasjoner over 1 mg/l. For de øvrige tungmetallene var konsentrasjonene relativt lave.

### Fyrhus

Avløpsvannet fra scrubberen i fyrhuset var alkalisk med pH 8.19. Innholdet av organisk karbon og suspendert materiale var relativt lavt. Det ble påvist 70 µg/l av AOX. Konsentrasjonen av Cr(VI) var 7.7 µg/l. En jonebalanse viser 397 milliekvivalenter anioner og 398 milliekvivalenter kationer med natrium og sulfat som de dominerende ionene (95 % av ionestyrken). Det ble ikke påvist benzen, toluen, etylbenzen eller xyloler over deteksjonsgrensen (1 µg/l) i prøven tatt 31.01. 2008.

## 4.2 Toksisitet

Resultatene av toksisitetstestene er rapportert i vedlegg 1 (alger) og vedlegg 2 (*Daphnia*). Beregnede effektkonsentrasjoner er sammenstilt i tabell 3.

**Tabell 3.** Effektkonsentrasjoner av avløpsvannprøver på alger og, *Daphnia*.

Prøve	Alger ( <i>P. subcapitata</i> )		<i>Daphnia magna</i>	
	EC <sub>10</sub>	EC <sub>50</sub>	EC <sub>10</sub>	EC <sub>50</sub>
Prosessavløp	21	>100	30	41
Barkpresse	11	37	3.3	5.9

### Prosessavløp

Veksthemmingen av alger øket svakt med med konsentrasjonen av avløpsvann i intervallet 10-100 %. I uforynnet avløpsvann (100 %) var veksthemmingen ca. 30 %. Effekten var altså ikke høy nok til at en EC50-verdi kan beregnes, men EC10 var ved konsentrasjonen 11 %.

I testen med dafnier ble det registrert immobilisering av forsøksdyr ved konsentrasjoner over 18 %. I ufortynnet prøve var alle forsøksdyr immobilisert etter 24 timer. EC50 for immobilisering etter 48 timer var 41 % og EC10 30 %

### Barkpresse

Avløpsvannet fra barkpressen var mer giftig enn prosessavløpsvannet for både alger og dafnier. I algetesten øket veksthemmingen med konsentrasjonen av avløpsvann i intervallet 5.6-56 %. Ved konsentrasjonen 56 % var veksthemmingen ca. 70 %. EC50-verdien ble beregnet til 37 % og EC10 til 11 %.

Immobilisering av dafnia var fullsendig allerede ved konsentrasjonen 18 % etter 24 timer. EC50-verdien etter 48 timer var 5.9 % og EC10 3.3 %.

## 5. Diskusjon

Begge de testede avløpsvannene hadde toksisk virkning på alger og Daphnia. Det er trolig at gifteffekten skyldes de høye konsentrasjonene av lignin og organiske ekstraktstoffer, men innholdet av metallene sink og kobber er også høye nok til å gi effekter. For *Daphnia magna* som var den mest følsomme organismen er EC50-verdien for sink rapportert å være 70 µg/l (EU 2006). Konsentrasjonen av sink ved EC50-verdien for avløpsvann fra barkpresse (5.9 %) var 83 µg/l og dermed høy nok til alene å forklare gifteffekten. Tilsvarende var konsentrasjonen av sink ved EC50-verdien for prosessavløpet (41 %) 228 µg/l som altså er mer enn tre ganger høyere enn EC50-verdien for sink alene. At de forholdsvis høye konsentrasjonene av sink ikke gis større gifteffekter skyldes trolig at sink og andre metaller til en stor del er bundet til organisk materiale i avløpsvannet. Kompleksbinding av metallene til organisk materiale er kjent for å redusere biologisk tilgjengelighet og toksisitet av metaller.

Avløpsvannets potensial for å gi gifteffekter i en resipient er avhengig av giftigheten og utslippsmengden. Dette kan uttrykkes i form av "Toxicity Emission Factor", TEF. Ved beregning av TEF konverteres først EC<sub>50</sub> eller LC<sub>50</sub>-verdien fra toksisitetstester til "Toxic Units", TU slik at man får en parameter som er proporsjonal mot toksisiteten:

$$TU = \frac{100}{L(E)C_{50}};$$

hvor L(E)C<sub>50</sub> er den laveste EC<sub>50</sub> eller LC<sub>50</sub>-verdien angitt som volum % avløpsvann.

Deretter multipliseres TU med vannføringen i avløpsstrømmen.

$$TEF = TU \times Q;$$

Hvor Q er vannføringen (m<sup>3</sup>/d) (Se tabell 1).

De beregnede TEF-verdiene for de undersøkte avløpsvannene er vist i tabell 4.

**Tabell 4.** De ulike avløpsvannets bidrag til samlet potensiell toksisitet uttrykket som "Toxicity Emission Factor" (TEF).

Avløpsvann	Laveste L(E)C <sub>50</sub> (%)	Organisme	TU	TEF
Prosessavløp	41	<i>Daphnia</i>	2.43	6707
Barkpresse	5.9	<i>Daphnia</i>	16.95	183

Beregning av TEF er egnet for sammenlikning av ulike utslipp (f. eks. innenfor en bransje) men gir ikke uttrykk for den faktiske risikoen for at utslippet gir toksiske effekter i den aktuelle resipienten. Utslippene fra Hellefoss går til Drammenselva, som har en middelvannføring på ca. 300 m<sup>3</sup>/s og en normal minstevannføring på ca. 120 m<sup>3</sup>/s. Dette gir en meget høy fortynningseffekt på utslippene i resipienten. For eksempel vil fortynningsgraden for det største utslippet (prosessavløpsvannet) når det er utblandet i hele elveprofilen være nær 3 800 ganger ved lav vannføring i Drammenselva (120 m<sup>3</sup>/s). I tabell 5 er fortynningsbehovet for å unngå mer enn 10 % effekt på den mest følsomme av de undersøkte organismene (dvs. fortynningen som tilsvarer EC<sub>10</sub>) sammenliknet med fortynningspotensialet for de ulike avløpsstrømmene ved full utblanding i Drammenselva ved lav vannføring fremstilt.

**Tabell 5.** Fortynningsbehov for å redusere målt toksisk effekt for mest følsomme organisme til 10 % sammenliknet med den reelle fortynningen av avløpsvannene når de er fullt utblandet i Drammenselva ved minstevannføring (120 m<sup>3</sup>/s)

Avløpsvann	Laveste L(E)C <sub>10</sub> (%)	Organisme	Fortynningsbehov ved L(E)C <sub>10</sub>	Fortynning ved lav vannføring
Prosessavløp	21	Alger	4.76	3 757
Barkpresse	3.3	<i>Daphnia</i>	30.3	960 000

Det fremgår av tabell 5 at den reelle fortynningen (når avløpsstrømmene er helt utblandet i Drammenselva) er fra ca. 790 til ca. 32 000 ganger høyere enn behovet for å unngå mer enn 10 % veksthemming av alger og immobilisering av *Daphnia*. På grunn av at andre arter enn de som er testet kan være mer følsomme og at effekter ved langtidseksponering (kronisk toksisitet) kan oppstå ved lavere konsentrasjoner enn de som gir akutt toksisitet (for eksempel immobilisering av *D. magna* etter 48 timer) må man regne med at fortynningsbehovet for unngå alle typer av effekter i resipienten er noe høyere enn hva som er angitt i tabell 5. I følge veileder for Økotoksikologisk undersøkelse av industriavløp (SFT 2000) kan fortynningsbehovet for å unngå langtidseffekter (kroniske gifteffekter) av avløpsvann beregnes ut fra resultat av toksisitetstester ved hjelp av applikasjonsfaktorer. Når det fins data for akutt toksisitet for minst tre organismegrupper (alger, krepsdyr og fisk) antas det ikke være fare for kroniske gifteffekter ved konsentrasjoner av avløpsvann 20 ganger lavere enn laveste EC<sub>50</sub> eller LC<sub>50</sub>-verdi. I denne undersøkelsen er ikke akutt toksisitet for fisk undersøkt, men det er ikke vanlig at fisk er mer følsomme enn de undersøkte algene og vannloppene. Likevel kan det være grunn til å øke applikasjonsfaktoren for beregning av akseptabel konsentrasjon i resipienten fra 20 til 50. I tabell 6 er fortynningsbehovet for å unngå kroniske effekter ved langtidseksponering i resipienten beregnet for de to testede avløpsvannene. Beregningene viser at marginen mellom den reelle fortynningen og det beregnede fortynningsbehovet så stor at risikoen for toksiske effekter utenfor den umiddelbare blandsonen i resipienten må regnes som ubetydelig.

**Tabell 6.** Beregnet fortynningsbehov for å beskytte mot kroniske effekter ved langtidseksposering av avløpsvann fra Hellefoss fabrikker sammenliknet med den reelle fortynningen av avløpsvannene når de er fullt utblandet i Drammenselva ved lav vannføring ( $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Avløpsvann	Laveste EC <sub>50</sub> (%)	Organisme	Fortynningsbehov	Fortynning ved lav vannføring
Prosessavløp	41	<i>Daphnia</i>	122	3757
Barkpresse	5.9	<i>Daphnia</i>	847	960 000

Toksisitetstester ble ikke utført på avløpsvannet fra fyrhuset. Risikoen for toksiske effekter i resipienten kan derfor bare vurderes på grunnlag av de kjemiske analysene. Det lave innholdet av organisk karbon indikerer at risikoen for forekomsten av toksiske organiske forbindelser er lav. Påvisning av AOX i forholdsvis lav konsentrasjon viser imidlertid at avløpsvannet inneholder halogenerte organiske forbindelser men. Innholdet av uorganiske komponenter er godt kartlagt og viser at særlig nikkel peker seg ut som et potensielt toksisk stoff. Konsentrasjonen av nikkel var  $827 \mu\text{g/l}$ . I EUs forslag til kvalitetsstandarder for prioriterte stoffer i Vannrammedirektivet er kvalitetsstandarden for nikkel satt til  $1.7 \mu\text{g/l}$  over bakgrunnskonsentrasjonen (EU 2005). Bakgrunnskonsentrasjonen i Drammenselva ble ikke fastlagt ved analysen av inntaksvann p.g.a. for høy deteksjonsgrense men analyser av vann fra Drammenselva i 2005 viser en årsmiddelverdi på  $0.9 \mu\text{g/l}$  (Borgvang et al. 2007). Fortynningsbehovet for å redusere konsentrasjonen av nikkel i avløpsvannet til  $1.7 \mu\text{g/l}$  er 490 ganger. Til sammenligning er fortynningen av avløpsvannet fra fyrhuset ( $12 \text{ m}^3/\text{døgn}$ )  $864\,000$  ganger ved lav vannføring i Drammenselva. Dersom bakgrunnskonsentrasjonen i Drammenselva er  $0.9 \mu\text{g/l}$  vil utslippet av avløpsvann fra fyrhuset føre til en økning i konsentrasjonen på  $0.1 \%$ . Utslippet av nikkel fra fyrhuset vil derfor ikke ha noen betydning for forholdene i resipienten.

## 6. Referenser

Borgvang, S.A., Stålnacke, P., Johansen, S.W., Skarbøvik, E., Beldring, S., Selvik, J.R., Tjomsland, T. and Harsten, S. 2007: Riverine inputs and direct discharges to Norwegian coastal waters – 2005. OSPAR Commission. Niva rapport 5380.

Halvorsen, G. 2006: kartlegging av bunndyr ved Hellefoss i Drammenselva . Norsk Institutt for naturforskning-Notat

EU 2005: Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive. Environmental Quality Standards Substance Information Sheet. Priority Substance 23: Nickel and its Compounds: Final Draft, Brussels 31. July 2005.

EU 2006: European Union Risk Assessment Report: Zinc metal – final draft. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM) the Netherland, September 2006.

SFT 2000. Økotoksikologisk risikovurdering, Del I: Økotoksikologisk undersøkelse av industriavløp, SFT-rapport 1750/2000

Vedlegg 1.

Toksisitetstester med alger



Norsk Institutt  
for Vannforskning  
Gaustadallen 21  
0349 Oslo  
Tel: 22 18 51 00  
Fax: 22 18 52 00

# TESTRAPPORT

## Alger, veksthemmingstest

### *Pseudokirchneriella* *subcapitata*



NIVA metode K4

**Teststoff:** Avløpsvann, Prosessavløp  
**Kunde:** Hellefoss  
**Lab. kode:** B538  
**Prøve mottatt:**

**Testmetode:** ISO 8692: Alga growth inhibition test  
**Organisme:** *Pseudokirchneriella subcapitata* NIVA CHL1  
**Testparameter:** Veksthastighet fra start til 73 timer  
**Stamkultur:** Semi-kontinuerlig i 10% Z8 vekstmedium (Staub 1961)  
**Start dato:** 12.12.2007  
**Forbehandling av prøve:** Prøven ble oppbevart ved +5 °C til teststart og filtrert gjennom GF/F glassfiberfilter. 0  
**Konsentrasjoner:** 10, 18, 32, 56 og 100 %  
**Test medium:** ISO 8692  
**Inkuberingsutstyr:** Gyngebord  
**Dyrkingsflasker:** 30 ml glass med 12 ml medium  
**Lys:** Ca. 65 mE m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, kontinuerlig fra dagslys-type lysstoffrør  
**Temperatur:** 19.7 – 20.0 °C  
**pH i kontroll** Start : 8.0 Slutt: 7.5  
**pH i høyeste konsentrasjon** Start : 7.7 Slutt: 7.8  
**Vekstmåling:** Partikkeltelling med Coulter Multisizer og Fluorescens med Cytofluor 2300  
**Beregning av EC<sub>50</sub> \*** Ikke-lineær regresjon (Hill)  
**Beregning av NOEC \*\*** Dunnett's test (p<0.05)

**Resultater:** Celletetthet på hvert målepunkt, det beregnede areal under vekstkurve og veksthastighet i hver kolbe er vist på vedlagt skjema. Middelerverdier for kontroller og ulike konsentrasjoner av testprøven er listet lengst ned på skjemaet. Vekstkurver for hver konsentrasjon av testprøven er vist i figur 1.

Veksthemmingen øket svakt med med konsentrasjonen av avløpsvann i intervallet 10-100 %. I uforynnnet avløpsvann (100 %) var veksthemmingen ca. 30 %

Parameter	Enhet	EC <sub>50</sub>	95% konf. int.	EC <sub>20</sub>	95% konf. int.	EC <sub>10</sub>	95% konf. int.
Veksthastighet	%	>100	-	47	43 - 50	21	18 - 24

\*EC<sub>50</sub> = Den konsentrasjon som gir 50 % reduksjon av veksthastighet i forhold til kontrollkulturer

\*\* NOEC = Høyeste testede konsentrasjon uten signifikant veksthemmende effekt

Oslo 20.12.2007

Test utført av  
Randi Romstad

Testansvarlig  
Torsten Källqvist

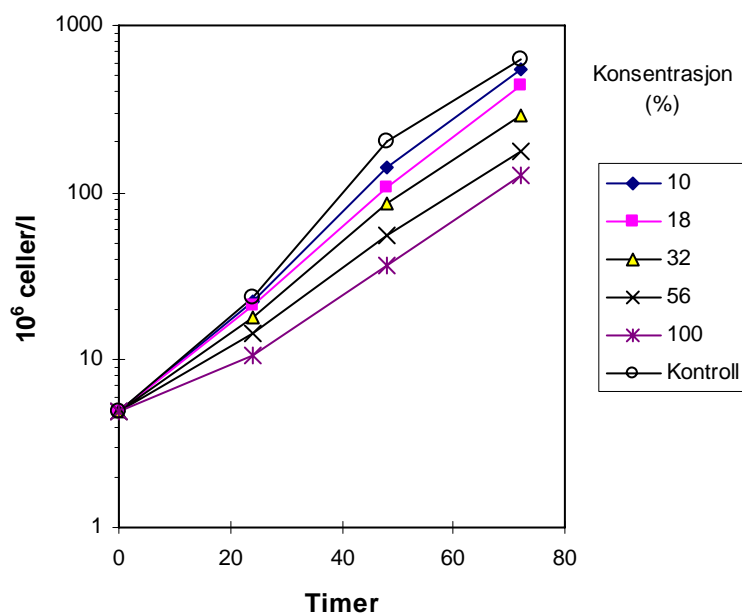


Fig. 1. Vekstkurver for *Pseudokirchneriella subcapitata* i ulike konsentrasjoner av avløpsvann

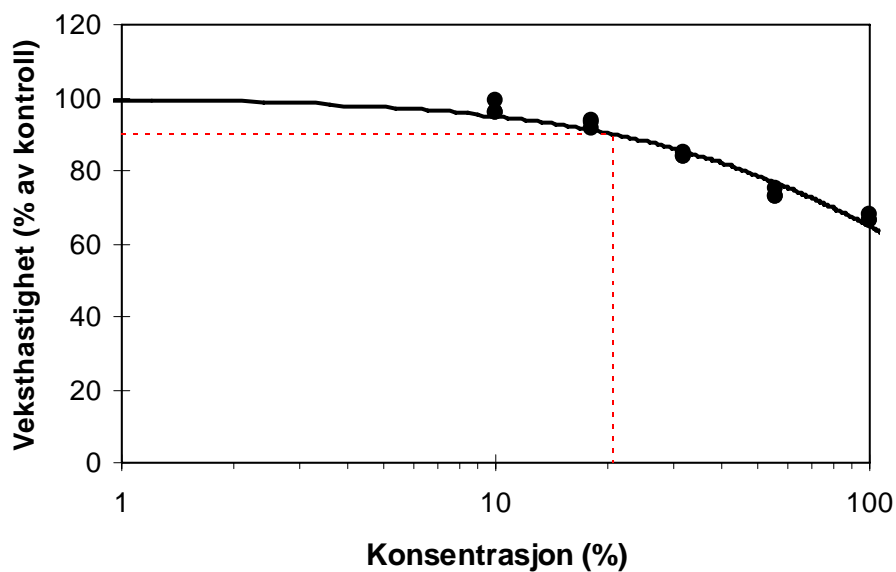


Fig.:2 Effekt av avløpsvann på veksthastigheten til *Pseudokirchneriella subcapitata*. Stiplet linjer viser EC<sub>10</sub>.

#### Referanser:

ISO/DIS 8692 : Water quality - Algal growth inhibition test

OECD 1984: Guidelines for testing of chemicals, no. 201; Alga, growth inhibition test. OECD, Paris

Staub. R. (1961): Ernährungsphysiologische Untersuchungen an der planktischen Blaualge *Oscillatoria rubescens* D.C. Schweiz. Z. Hydrol. 23: 82-198.

**Celletetthet målt i kulturer**

	<b>Dag 0</b>	<b>Dag 1</b>	<b>Dag 2</b>	<b>Dag 3</b>	<b>V-hast</b>	<b>V-hast %</b>
<b>Timer:</b>	0	24	48	72	$d^{-1}$	<b>av kontroll</b>
<b>Kons. (%)</b>	mill/l	mill/l	mill/l	mill/l		
10	5	22	146	603	1.60	99
10	5	24	140	517	1.55	96
10	5	21	139	507	1.54	96
18	5	20	122	462	1.51	94
18	5	21	104	414	1.47	91
18	5	23	93	451	1.50	93
32	5	19	90	290	1.35	84
32	5	18	85	300	1.36	85
32	5	17	84	284	1.35	84
56	5	15	60	168	1.17	73
56	5	14	54	187	1.21	75
56	5	14	55	171	1.18	73
100	5	12	36	123	1.07	66
100	5	11	38	132	1.09	68
100	5	9	35	122	1.06	66
Kontroll	5	24	198	618	1.61	100
	5	23	208	632	1.61	100
	5	20	193	587	1.59	99
	5	26	199	610	1.60	99
	5	23	207	645	1.62	101
	5	25	210	670	1.63	101

**MIDDELVERDIER**

%

10	Mv.	22	142	542	1.56	97
	St. d.	1.53	3.79	52.78	0.03	1.97
18	Mv.	21	106	442	1.49	93
	St. d.	1.53	14.64	25.15	0.02	1.19
32	Mv.	18	86	291	1.35	84
	St. d.	1.00	3.21	8.08	0.01	0.57
56	Mv.	14	56	175	1.19	74
	St. d.	0.58	3.21	10.21	0.02	1.19
100	Mv.	11	36	126	1.07	67
	St. d.	1.53	1.53	5.51	0.01	0.90
Kontroll	Mv.	24	203	627	1.61	100
	St. d.	2.07	6.77	28.87	0.02	0.95
	Variasjonskoeffisient i kontroller (%)				1.0	

**pH-verdier**

<b>Konsentrasjon.</b>	<b>Start</b>	<b>73 timer</b>
Kontroll	8.01	7.50
10 %		7.51
18 %		7.60
32 %		7.76
56 %		7.78
100 %	7.67	7.81





Norsk Institutt  
for Vannforskning  
Gaustadallen 21  
0349 Oslo  
Tel: 22 18 51 00  
Fax: 22 18 52 00

# TESTRAPPORT

## Alger, veksthemmingstest

### *Pseudokirchneriella*

### *subcapitata*

NIVA metode K4



**Teststoff:** Avløpsvann, Barkpress  
**Kunde:** Hellefoss

**Lab. kode:** B539  
**Prøve mottatt:**

**Testmetode:** ISO 8692: Alga growth inhibition test  
**Organisme:** *Pseudokirchneriella subcapitata* NIVA CHL1  
**Testparameter:** Veksthastighet fra start til 73 timer  
**Stamkultur:** Semi-kontinuerlig i 10% Z8 vekstmedium (Staub 1961)  
**Start dato:** 12.12.2007  
**Forbehandling av prøve:** Prøven ble oppbevart ved +5 °C til teststart og filtrert gjennom GF/F glassfiberfilter. 0  
**Konsentrasjoner:** 5.6, 10, 18, 32 og 56 %  
**Test medium:** ISO 8692  
**Inkuberingsutstyr:** Gyngebord  
**Dyrkingsflasker:** 30 ml glass med 12 ml medium  
**Lys:** Ca. 65 mE m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, kontinuerlig fra dagslys-type lysstoffrør  
**Temperatur:** 19.7 – 20.0 °C  
**pH i kontroll** Start : 8.0 Slutt: 7.5  
**pH i høyeste konsentrasjon** Start : 5.7 Slutt: 7.7  
**Vekstmåling:** Partikkeltelling med Coulter Multisizer og Fluorescens med Cytofluor 2300  
**Beregning av EC<sub>50</sub> \*** Ikke-lineær regresjon (Hill)  
**Beregning av NOEC \*\*** Dunnett's test (p<0.05)

**Resultater:** Celletetthet på hvert målepunkt, det beregnede areal under vekstkurve og veksthastighet i hver kolbe er vist på vedlagt skjema. Middelerverdi for kontroller og ulike konsentrasjoner av testprøven er listet lengst ned på skjemaet. Vekstkurver for hver konsentrasjon av testprøven er vist i figur 1.

Veksthemmingen øket med med konsentrasjonen av avløpsvann i intervallet 5.6-56 %. Ved konsentrasjonen 56 % var veksthemmingen ca. 70 %

Parameter	Enhet	EC <sub>50</sub>	95% konf. int.	EC <sub>20</sub>	95% konf. int.	EC <sub>10</sub>	95% konf. int.
Veksthastighet	%	37	34 – 40	17	15.5 – 19.8	11	9.4 – 13.6

\*EC<sub>50</sub> = Den konsentrasjon som gir 50 % reduksjon av veksthastighet i forhold til kontrollkulturer

\*\* NOEC = Høyeste testede konsentrasjon uten signifikant veksthemmende effekt

Oslo 20.12.2007

Test utført av  
Randi Romstad

Testansvarlig  
Torsten Källqvist

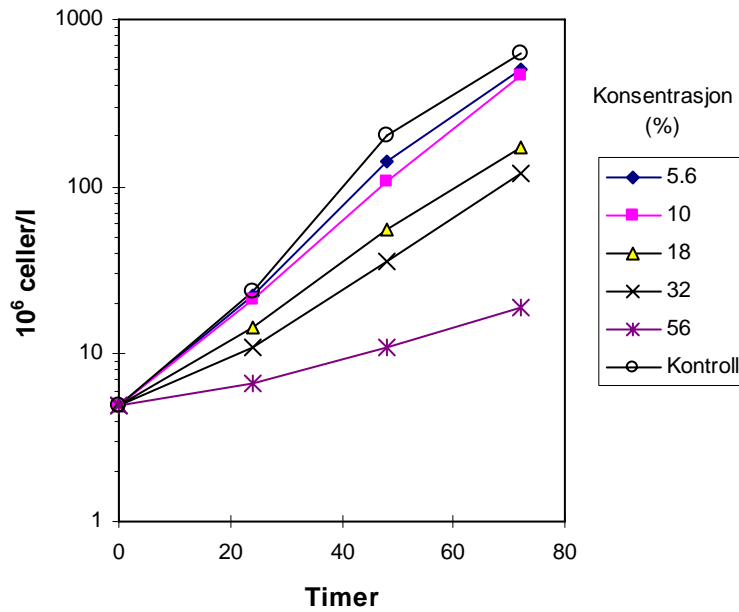


Fig. 1. Vekstkurver for *Pseudokirchneriella subcapitata* i ulike konsentrasjoner av avløpsvann

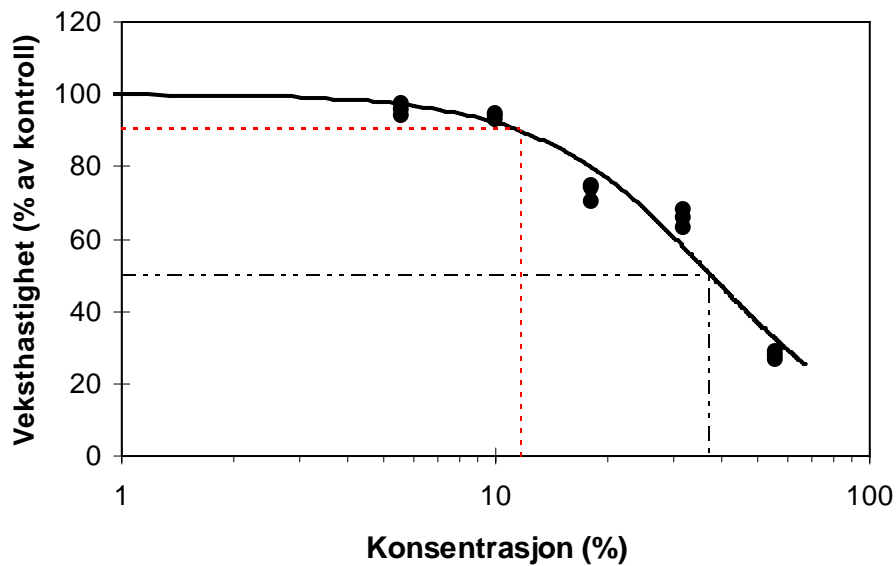


Fig.:2 Effekt av avløpsvann på veksthastigheten til *Pseudokirchneriella subcapitata*. Stiplet linjer viser EC<sub>10</sub>.

#### Referanser:

ISO/DIS 8692 : Water quality - Algal growth inhibition test

OECD 1984: Guidelines for testing of chemicals, no. 201; Alga, growth inhibition test. OECD, Paris

Staub. R. (1961): Ernährungsphysiologische Untersuchungen an der planktischen Blaualge *Oscillatoria rubescens* D.C. Schweiz. Z. Hydrol. 23: 82-198.

**Celletetthet målt i kulturer**

	<b>Dag 0</b>	<b>Dag 1</b>	<b>Dag 2</b>	<b>Dag 3</b>	<b>V-hast</b>	<b>V-hast %</b>
<b>Timer:</b>	0	24	48	72	$d^{-1}$	<b>av kontroll</b>
<b>Kons. (%)</b>	mill/l	mill/l	mill/l	mill/l		
5.6	5	22	146	545	1.56	97
5.6	5	24	140	503	1.54	95
5.6	5	21	139	468	1.51	94
10	5	20	122	468	1.51	94
10	5	21	104	483	1.52	95
10	5	23	93	446	1.50	93
18	5	15	60	184	1.20	75
18	5	15	54	180	1.19	74
18	5	13	55	147	1.13	70
32	5	11	38	121	1.06	66
32	5	10	35	135	1.10	68
32	5	12	34	105	1.01	63
56	5	6	11	19	0.45	28
56	5	7	12	18	0.43	27
56	5	7	10	20	0.46	29
Kontroll	5	24	198	618	1.61	100
	5	23	208	632	1.61	100
	5	20	193	587	1.59	99
	5	26	199	610	1.60	99
	5	23	207	645	1.62	101
	5	25	210	670	1.63	101

**MIDDELVERDIER**

%

5.6	Mv.	22	142	505	1.54	96
	St. d.	1.53	3.79	38.55	0.03	1.58
10	Mv.	21	106	466	1.51	94
	St. d.	1.53	14.64	18.61	0.01	0.83
18	Mv.	14	56	170	1.17	73
	St. d.	1.15	3.21	20.31	0.04	2.56
32	Mv.	11	36	120	1.06	66
	St. d.	1.00	2.08	15.01	0.04	2.61
56	Mv.	7	11	19	0.44	28
	St. d.	0.58	1.00	1.00	0.02	1.09
Kontroll	Mv.	24	203	627	1.61	100
	St. d.	2.07	6.77	28.87	0.02	0.95
	Variasjonskoeffisient i kontroller (%)				1.0	

**pH-verdier**

<b>Konsentrasjon.</b>	<b>Start</b>	<b>73 timer</b>
Kontroll	8.01	7.50
5.6 %		7.47
10 %	6.71	7.42
18 %		7.47
32 %		7.54
56 %	5.66	7.64

## Bilag 2.

### Toksisitetstester med *Daphnia magna*



Norsk institutt  
for vannforskning  
Gaustadallen 21  
0349 Oslo  
Tel: 22 18 51 00  
Fax: 22 18 52 00

# TESTRAPPORT

**Akutt toksisitet**  
*Daphnia magna*  
NIVA metode K9



**Teststoff:** Prosessavløp  
**Kunde:** Hellefoss AS

**Lab. kode:** B538  
**Prøve mottatt:** 12.12.07

**Testmetode** ISO 6341, "Water Quality - Determination of the inhibition of the motility of *Daphnia magna*" Metoden er i samsvar med OECD Guideline 202; "Daphnia sp. acute immobilization test"

**Testorganisme** *Daphnia magna*, stamme A. Vedlikeholdt i ElenDt M7 og foret med *Pseudokirchneriella subcapitata* som er dyrket i 10% Z8 næringssaltløsning. Alder ved teststart < 24 timer.

**Testperiode** 12.12-14.12.07

**Forbehandling av prøve** GF/C filtrert tilsatt ISO 6341 løsninger. pH justert til 7.7

**Fortynningsmedium** ISO 6341

**Testkonsentrasjoner** 5,6,10, 18, 32, 56, 100%

**Antall enheter** 4 kar for hver konsentrasjon, med 5-7 dyr pr. kar.

**Testbeholdere** 50 ml polystyren begere med ca. 40 ml medium

**Temperatur** 20,1 – 20,3°C

**pH i kontroll** Start: 7,8 Slutt: 7,8

**pH i høyeste kons.** Start: 7,7 Slutt: 7,1

**Oksygenmetning, 48 t** Kontroll: 8.2 mg/l Høyeste konsentrasjon 100%: 2,5 mg/l

**Beregning av EC<sub>50</sub> \*** Probit.exe

## Resultater:

Parameter	Enhet	24 timer			48 timer		
		EC <sub>50</sub>	95% konf. int.	EC <sub>10</sub>	EC <sub>50</sub>	95% konf. int.	EC <sub>10</sub>
Immobilisering	%	56	49 - 66	38	41	37 - 47	30

\*EC<sub>50</sub> = Den konsentrasjon som gir 50% immobilisering av forsøksdyrene.

Observerte immobiliserte *Daphnia magna* etter 24 og 48 timer i kontroller og ulike konsentrasjoner av totalavløp

Kons. (%)	Antall Daphnia	Immobilisert 24 tim.	Immobilisert 48 tim.	pH start	pH 48 tim.	O <sub>2</sub> 48 tim (mg/l)
5,6	20	0	0	7,8	7,6	7,4
10	20	0	0	7,8	7,5	7,4
18	22	0	0	7,8	7,5	7,1
32	20	1	3	7,8	7,3	5,1
56	20	10	19	7,8	7,1	3,2
100	20	20	20	7,7	7,1	2,5
Kontroll	22	0	0	7,8	7,8	8,2

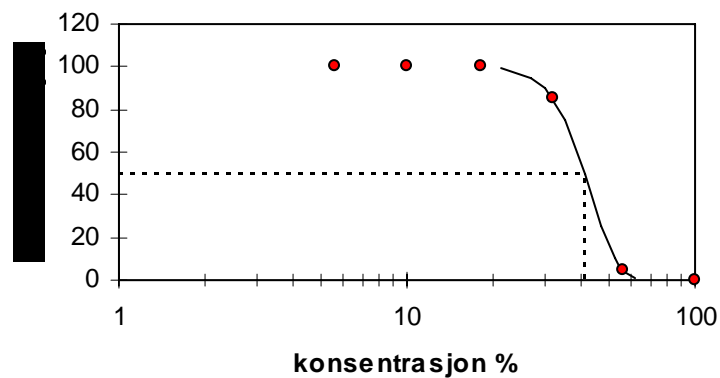


Fig. 1. Totalavløp på overlevelse av *Daphnia magna* etter 48 timer.

Oslo, 17.12.07

Utført av: Randi Romstad

Baird, D. J. et al, 1991, *A Comparative Study of Genotype Sensitivity to Acute Toxic Stress Using Clones of Daphnia magna Strauss*, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 21, 257 - 265.

Staub, R., 1961, *Ernährungsphysiologische Untersuchungen an der planktischen Blaualge Oscillatoria rubescens*, D. C., Schweiz, Z., *Hydrol*, 23, 82-198.

Elendt, B.-P. 1990, *Selenium deficiency in Crustacea; An ultrastructural approach to antennal damage in Daphnia magna Strauss*. *Protoplasma*, 154, 25-33.



Norsk institutt  
for vannforskning  
Gaustadallen 21  
0349 Oslo  
Tel: 22 18 51 00  
Fax: 22 18 52 00

# TESTRAPPORT

**Akutt toksisitet**  
*Daphnia magna*  
NIVA metode K9



**Teststoff:** Barkpress  
**Kunde:** Hellefoss AS

**Lab. kode:** B539  
**Prøve mottatt:** 12.12.07

**Testmetode** ISO 6341, "Water Quality - Determination of the inhibition of the motility of *Daphnia magna*" Metoden er i samsvar med OECD Guideline 202; "Daphnia sp. acute immobilization test"

**Testorganisme** *Daphnia magna*, stamme A. Vedlikeholdt i ElenDt M7 og foret med *Pseudokirchneriella subcapitata* som er dyrket i 10% Z8 næringssaltløsning. Alder ved teststart < 24 timer.

**Testperiode** 12.12-14.12.07

**Forbehandling av prøve** GF/C filtrert tilsatt ISO 6341 løsninger. pH justert til 7.7

**Fortynningsmedium** ISO 6341

**Testkonsentrasjoner** 3.2, 5.6, 10, 18, 32, 56, 100%

**Antall enheter** 4 kar for hver konsentrasjon, med 5-7 dyr pr. kar.

**Testbeholdere** 50 ml polystyren begere med ca. 40 ml medium

**Temperatur** 20,1 – 20,3°C

**pH i kontroll** Start: 7,8 Slutt: 7,8

**pH i høyeste kons.** Start: 7,7 Slutt: 6,7

**Oksygenmetning, 48 t** Kontroll: 8.2 mg/l Høyeste konsentrasjon 100%: 0,79 mg/l

**Beregning av EC<sub>50</sub> \*** Probit.exe 24 timer, manuell 48 timer

## Resultater:

Parameter	Enhet	24 timer			48 timer		
		EC <sub>50</sub>	95% konf. int.	EC <sub>10</sub>	EC <sub>50</sub>	95% konf. int.	EC <sub>10</sub>
Immobilisering	%	9,8	8,7 - 11	6,7	5,9	-	3,3

\*EC<sub>50</sub> = Den konsentrasjon som gir 50% immobilisering av forsøksdyrene.

Observerte immobiliserte *Daphnia magna* etter 24 og 48 timer i kontroller og ulike konsentrasjoner av barkpress

Kons. (%)	Antall Daphnia	Immobilisert 24 tim.	Immobilisert 48 tim.	pH start	pH 48 tim.	O <sub>2</sub> 48 tim (mg/l)
3,2	20	0	0	7,8	7,7	7,8
5,6	20	1	9	7,8	7,7	7,6
10	21	11	21	7,8	7,4	6,9
18	20	20	20	7,8	7,1	4,6
32	20	20	20	7,7	7,0	2,5
56	21	21	21	7,6	6,8	1,5
100	21	21	21	7,7	6,7	0,79
Kontroll	22	0	0	7,8	7,8	8,2

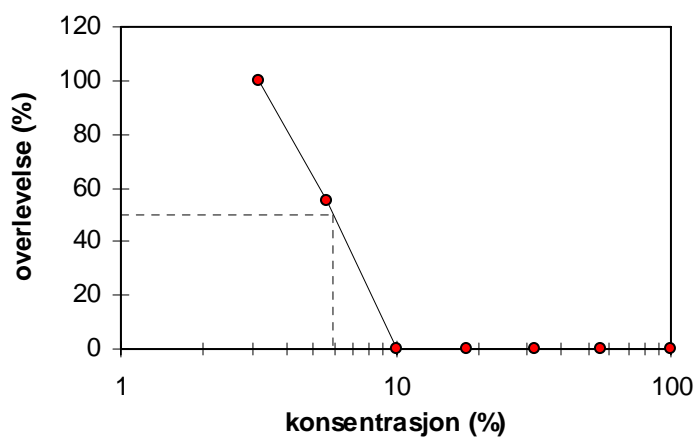


Fig. 1. Barkpress på overlevelse av *Daphnia magna* etter 48 timer.

Oslo, 17.12.07

Utført av: Randi Romstad

Baird, D. J. et al, 1991, *A Comparative Study of Genotype Sensitivity to Acute Toxic Stress Using Clones of Daphnia magna Strauss*, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 21, 257 - 265.  
 Staub, R., 1961, *Ernährungsphysiologische Untersuchungen an der planktischen Blaualge Oscillatoria rubescens*, D. C., Schweiz, Z., *Hydrol*, 23, 82-198.  
 Elendt, B.-P. 1990, *Selenium deficiency in Crustacea; An ultrastructural approach to antennal damage in Daphnia magna Strauss*. *Protoplasma*, 154, 25-33.



