

Revideret juni 2015
Rettet november 2015

Fastsættelse af kvalitetskriterier for vandmiljøet

Strontium og strontiumforbindelser 7440-24-6

Sr

Vandkvalitetskriterium	VKK _{ferskvand}	2,1 mg Sr/L
Vandkvalitetskriterium	VKK _{saltvand}	2,1 mg Sr/L <i>tilføjet</i>
Korttidsvandkvalitetskriterium	KVKK _{ferskvand}	5,53 mg Sr/L
Korttidsvandkvalitetskriterium	KVKK _{saltvand}	5,53 mg Sr/L <i>tilføjet</i>
Kriterium for sediment	SKK _{ferskvand}	75 mg Sr/kg <i>tilføjet</i>
Kriterium for biota	BKK _{ferskvand}	63 mg Sr/kg
Kriterium for biota	BKK _{saltvand}	63 mg Sr/kg

Oktober 2009

Indhold

FORORD	3
ENGLISH SUMMARY AND CONCLUSIONS	4
1 INDLEDNING	6
2 FYSISK KEMISKE EGENSKABER	7
3 SKÆBNE I MILJØET	8
3.1 NEDBRYDELIGHED	8
3.2 BIOAKKUMULERING	8
3.3 NATURLIG FOREKOMST	8
4 GIFTIGHEDSDATA	9
4.1 GIFTIGHED OVER FOR VANDLEVENDE ORGANISMER	9
4.2 GIFTIGHED OVER FOR SEDIMENTLEVENDE ORGANISMER	11
4.3 GIFTIGHED OVER FOR PATTEDYR OG FUGLE	11
4.4 GIFTIGHED OVER FOR MENNESKER	11
5 UDLEDNING AF VANDKVALITETSKRITERIUM	12
5.1 VANDKVALITETSKRITERIUM (VKK)	12
5.2 KORTTIDSVANDKVALITETSKRITERIUM (KVKK)	12
5.3 KVALITETSKRITERIUM FOR SEDIMENT (SKK)	13
5.4 KVALITETSKRITERIUM FOR BIOTA (BKK)	14
5.5 KVALITETSKRITERIUM FOR HUMAN KONSUM AF VANDLEVENDE ORGANISMER (HKK)	14
6 KONKLUSION	16
7 REFERENCER	17

Bilag A: Test data for strontium

Forord

Et kvalitetskriterium i vandmiljøet er det højeste koncentrationsniveau, ved hvilket der skønnes, at der ikke vil forekomme uacceptable negative effekter på vandøkosystemer.

Miljøstyrelsen (MST) udarbejder på vegne af By- og Landskabsstyrelsen (BLST) kvalitetskriterier for kemikalier i vandsøjlen (vandkvalitetskriterium), i sediment og i dyr og planter (biota).

BLST bruger kvalitetskriterierne som det faglige grundlag til at kunne fastsætte miljøkvalitetskrav, hvorved der forstås den endelige koncentration af et bestemt forurenende stof i vand, sediment eller biota, som ikke må overskrides af hensyn til beskyttelsen af menneskers sundhed og miljøet.

Metodikken, der anvendes til udarbejdelse af miljøkvalitetskrav er harmoniseret i EU og baserer sig på vandrammedirektivet (EU 2000), EU's vejledning til risikovurdering ("TGD") (EU 2003), EU's vejledning til fastsættelse af kvalitetskriterier i vandmiljøet (EU 2009) og Miljøstyrelsens vejledning til fastsættelse af vandkvalitetskriterier (Miljøstyrelsen 2004).

Den sidste litteratursøgning er foretaget august 2009.

English Summary and conclusions

Environmental quality standards (EQS's) for strontium (CAS no. 7440-24-6) and water soluble inorganic strontium compounds were derived as described in the EU guidance document (EU, 2009) and in the report from the Danish EPA: "Principper for fastsættelse af vandkvalitetskriterier for stoffer i overfladevand" [Principles for establishment of Water Quality Standards for substances in surface waters] (MST, 2004).

Valid acute toxicity data were available from 16 different species covering the higher taxonomic groups' bacteria, algae, planarians, nematodes, annelids, crustaceans and fish. Valid chronic NOEC/EC₁₀ values were available for algae, crustaceans, and fish. All toxicity data can be seen in appendix A. The amount of data is too limited to compare toxicity for freshwater species to marine species. Data from freshwater and saltwater species are therefore pooled.

PNEC_{freshwater} and PNEC_{saltwater} were calculated from the NOEC value of 21 mg/L from a 21-day reproduction study with *Daphnia magna*. Since the natural background concentration in saltwater is higher than in freshwater and marine organisms therefore are presumed to be evolutionary adapted to this environment, and an assessment factor of 100 would lead to an EQS in saltwater 30 – 70 times lower than the natural background level, the assessment factor in saltwater was lowered from 100 to 10. Assessment factors of 10 were thus applied for both freshwater and saltwater. As the natural background concentrations are 50 – 500 µg/L in saltwater, the EQS_{saltwater} has been determined as an *added value*.

$$\text{EQS}_{\text{freshwater}} = 2.1 \text{ mg Sr/L}$$
$$\text{EQS}_{\text{saltwater}} = 2.1 \text{ mg Sr/L added}$$

A Maximum Acceptable Concentration (MAC) was derived on the basis of the lowest EC₅₀ value (55.3 mg/L for *Carcinus maenas*) and an assessment factor of 10 for freshwater and saltwater.

$$\text{MAC}_{\text{freshwater}} = 5.53 \text{ mg Sr/L added}$$
$$\text{MAC}_{\text{saltwater}} = 5.53 \text{ mg Sr/L added}$$

A standard to protect benthic species was calculated from the equilibrium partitioning method (EqP) and a K_p of 36 L/kg.

$$\text{EQS}_{\text{sediment, freshwater}} = 75 \text{ mg Sr/kg added}$$

A standard to protect predators from secondary poisoning was calculated from a NOAEL of 190 mg Sr/kg bw/day for effects on the skeletal structure in juvenile rats. This was converted to a NOEC_{oral} of 1,900 mg/kg food. Using an assessment factor of 30, the biota standard was calculated to:

$$\text{EQS}_{\text{biota.sec.pois.}} = 63 \text{ mg Sr/kg for freshwater and saltwater.}$$

An upper limited for the EQS has not been established since $PNEC_{hhw}$ is below natural background concentrations.

1 Indledning

Identiteten af Strontium fremgår af tabel 1.1.

Tabel 1.1. Identitet af strontium

IUPAC navn	Strontium, Strontium(+2)cation
Strukturformel	Sr Sr ²⁺
CAS nr.	7440-24-6
EINECS nr.	231-133-4
Kemisk formel	Sr, Sr ²⁺
SMILES	Sr

Strontium er et alkalisk jordmetal, som er naturligt forekommende i jordskorpen, hvor det hovedsagelig forekommer i form af strontiumcarbonat (strontianit) eller strontiumsulfat (celestit). Strontium udvindes både direkte ved minedrift og indirekte som biprodukt af f.eks. kulminedrift, og anvendes hovedsaglig i billedrør til farve-TV (75%), samt i mindre målestok i magneter, fyrværkeri, zinkproduktion, og pigmenter mv. Den kommercielle værdi er dog begrænset, da andre, billigere metaller (f.eks. cadmium og barium) kan anvendes til flere af de samme formål (HSDB). Metallisk strontium forekommer ikke på fri form i naturen, men kan f.eks. produceres ved elektrolyse af strontiumchlorid eller ved reduktion af strontiumoxid med aluminium (www.britannica.com).

Dette datablad omhandler fastsættelsen af kvalitetskriterier for vandmiljøet for strontium og vandopløselige uorganiske salte af strontium. De mest almindelige salte er:

Strontium carbonat
CAS nr.: 1633-05-2
Kemisk formel: SrCO₃

Strontium chlorid
CAS nr.: 10476-85-4
Kemisk formel: SrCl₂

Strontium phosphat
CAS nr.: 7446-28-8
Kemisk formel: Sr₃(PO₄)₂

Strontium sulfat
CAS nr.: 7759-02-6
Kemisk formel: SrSO₄

Strontium nitrat
CAS nr.: 10042-76-9
Kemisk formel: SrNO₃

2 Fysisk kemiske egenskaber

De fysisk kemiske egenskaber for strontium fremgår af tabel 2.1.

Strontium forekommer udelukkende i oxidationstrin +2, og kan i vandmiljøet forekomme på ionform eller som forskellige salte og komplekser. De mest almindelige kationiske strontiumsalte er opløselige i vand (HSDB). Strontium er et aktivt reducerende stof og reagerer hurtigt ved kontakt med luft, halogener og svovl under dannelse af hhv. strontiumoxid, -halider og -sulfid (ref: www.britannica.com). Den væsentligste parameter, der bestemmer sorption af strontium til akvatiske sedimenter, er sedimentets kationbytningssevne (HSDB).

Tabel 2.1. Fysisk kemiske egenskaber for strontium

Parameter	Værdi	Reference
Molekylvægt, M_w ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	87,62 ¹	
Smeltepunkt, T_m ($^{\circ}\text{C}$)	752	HSDB
Kogepunkt, T_b ($^{\circ}\text{C}$)	1390	HSDB
Damptryk, P_v (Pa)	Ingen oplysninger	
Henry's konstant, H ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	Ingen oplysninger	
Vandopløselighed, S_w ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Sr (s): uopløselig i vand ² SrNO ₃ : 710 g/L SrCO ₃ : 11 mg/L	HSDB
Sediment/vand fordelingskoefficient, K_p ($\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$)	36 – 275 ³	Liszewski & Miller 1997

¹Fire naturligt forekommende isotoper, molvægt 84-88

²De almindelige strontiumsalte er generelt opløselige i vand

³Variation i K_p -værdier fra 20 forskellige sedimenttyper

3 Skæbne i miljøet

3.1 Nedbrydelighed

Strontium er et grundstof og således ikke nedbrydeligt.

3.2 Bioakkumulering

Strontium er til stede i alle levende organismer og optages hos hvirveldyr i knogler, hvorfra det udskilles langsomt. Biokoncentrationsfaktorer mellem 40 og 340 er målt i Bluegill sunfish (*Lepomis macrochirus*) indsamlet ved forskellige lokaliteter (HSDB). Da datamaterialet er sparsomt, vil en konservativ vurdering medføre, at strontium kan anses for at være bioakkumulerbart.

Strontium og calcium er kemisk beslægtede. Derfor optages strontium og indbygges i knoglerne på hvirveldyr. På baggrund af BCF-værdier i tabel 3.1 vurderes strontium at være bioakkumulerbart. Der er dog stor forskel i de målte BCF-værdier. Dette skyldes bl.a. at BCF-værdien for fisk er omvendt korreleret med calciumkoncentrationen i vandet (ATDSR 2004) og at BCF for metaller ofte er afhængig af metalkoncentrationen i vandet således at de højeste BCF-værdier måles ved lave koncentrationer af metallet. Der er ikke fundet informationer om strontiumkoncentrationer i de udførte forsøg. Det er derfor ikke muligt at kvantificere BCF ved relevante strontiumkoncentrationer i miljøet.

Tabel 3.1. BCF værdier for strontium

Organisme	BCF	Kilde
Alge	600	ATDSR 2004
Dyreplankton	3.900	ATDSR 2004
Musling	1.300	ATDSR 2004
Fisk (hel)	40 - 340	HSDB
Fisk (muskler)	48 – 3.400	ATDSR 2004
Fisk (ben)	1.700 – 63.000	ATDSR 2004
Karplante	9.400	ATDSR 2004

3.3 Naturlig forekomst

Strontium er den femte hyppigst forekommende metalion i havvand med koncentrationer omkring 8-14 mg/L (HSDB). Koncentrationer målt i ferskvand er væsentligt lavere og ligger generelt inden for 50 - 500 µg/L, dog er der i enkelte tilfælde målt koncentrationer, der overstiger 5 mg/L. Koncentrationer målt i akvatiske sedimenter ligger i intervallet 15-1340 mg/kg (HSDB). Ifølge FOREGS (2009) ligger koncentrationerne i Danmark på omkring 100 µg/L i overflade ferskvand og mellem 50 – 200 mg/kg i sediment med de højeste koncentrationer målt på sjælland.

4 Giftighedsdata

4.1 Giftighed over for vandlevende organismer

Der er kun få tilgængelige data for giftigheden af strontium og strontiumsalte over for vandlevende organismer. Biotilgængeligheden af strontium vil påvirkes af miljømæssige forhold som bl.a. eventuelt sediments kationbytningssevne, indhold af organisk stof mv. Som anført ovenfor, er strontium en af de hyppigst forekommende metalioner i havvand, med baggrundskoncentrationer op til ca. 14 mg/L, og det vil altid være til stede i det akvatiske miljø. Udvalgte effektkoncentrationer over for vandlevende organismer er sammenstillet i tabel 4.1. En fuld oversigt over de testede arter, effektkoncentrationer og referencer til videnskabelige publikationer findes i bilag A.

Tabel 4.1. Opsummering af giftighed over for vandlevende organismer. Informationerne er udvalgt fra bilag A.

Systematisk gruppe	Antal testede arter (antal studier)	Effektmål	Giftighedsinterval (mg·L ⁻¹) fra udvalgte studier
Bakterier	1 (1)	E _b C ₅₀	620
Alger	1 (1)	NOEC, vækstrate	≥43
Fladorme	1 (1)	LC ₅₀	3.500
Rundorme	1 (1)	LC ₅₀	465
Ledorme	1 (1)	LC ₅₀	240
Krebsdyr	8 (16)	L(E)C ₅₀	5,5 ¹ - 910
Krebsdyr	1 (1)	NOEC, 21 d	21
Fisk	5 (5)	LC ₅₀	0,2 ¹ - 2.765
	1(1)	NOEC	≥41
Padder, larver	1 (1)	LC ₅₀	0,16

¹ De laveste værdier er målt på æg/larver mens L(E)C₅₀ værdier for voksne individer er betydeligt højere

Hovedparten af de identificerede giftighedsdata stammer fra korttidstudier og forlængede akutte studier mens der er tre kroniske studier for alger, krebsdyr og fisk. Det fremgår af bilag A, at langt størsteparten af studierne er af ældre dato. Det spinkle datagrundlag tillader ikke en nærmere vurdering af hvilken form af strontium der er den mest giftige, og det kan på ovenstående grundlag ikke vurderes, om der generelt er forskel på følsomheden for hhv. ferskvandsorganismer og saltvandsorganismer. Der er i den følgende tekst gengivet et kort resumé af udslagsgivende studier.

Birge 1978, Birge *et al.* 1979

De laveste effektkoncentrationer er fundet i test med æg af fisk (ørred) og frøer (Birge 1978 og Birge *et al.* 1979). Med både frø- og fiskeæg blev eksponeringen gennemført fra tidspunktet for befrugtning til 4 dage efter klækning. For ørredens vedkommende gav dette 28 dages eksponeringstid og testen svarer til OECD Test Guideline 210, der anses for at være en længerevarende test. Da eksponeringen af frøæggen dækkede de samme følsomme livsstadier som for fisken, betragtes testen med frøer også som en længerevarende test, selvom eksponeringstiden

kun var 7 dage. For begge test er resultatet i databasen opgivet som LC₅₀ (henholdsvis 0,2 mg/L og 0,16 mg/L). Derfor anses testen som et forlænget akut studium og ikke en egentlig kronisk test. Testene er gennemført som semi-statistiske test med målte eksponeringskoncentrationer, der er anvendt 10-14 eksponeringskoncentrationer med hvert stof og probitanalyse til estimering af effektkoncentrationer. Resultaterne af test med frø- og fiskeæg opgives med 95 % konfidensintervaller (i parentes) som følger: Frø LC₁ = 0,0024 (0,001-0,0046) mg/L og ørred LC₁ = 0,006 (0,003-0,0199) mg/L.

Resultaterne fra dette laboratorium i denne periode er dog blevet problematiseret af EU's risikovurderingseksperter. Således vurderes resultater fra en tilsvarende undersøgelse af toluens giftighed i European Risk Assessment Report (EU RAR, EU 2003) om toluen som følger: ” *Black et al. (1982) found in an early-life-stage test with rainbow trout an LC₅₀ of 20 µg/l and a 27-day LC₁₀ of 2.9 µg/l. In this study, the eggs were exposed in a flow-through system to the test substance within 30 minutes of fertilisation. The concentration was measured daily. A study attempting to reproduce the results by Black et al. conducted by WRC (1991) in the UK reports NOEC values in two independent studies of 1.4 and 4.7 mg/l, respectively. Experts have examined both studies. Reasons for the large discrepancy between the original and new studies were not found and both studies are regarded as valid. Even though an evaluation of the original study by Black et al. (1982) did not reveal any obvious invalidating factors, this study seems not reasonable to include for consideration of the long-term NOEC for fish, because four other independently conducted long-term valid fish studies (including one with the same fish species) report NOECs within the same range but several magnitudes higher than the NOEC reported by Black et al. Thus a chronic fish NOEC of 1.4 mg/l is concluded based on the available valid experimental data.*”

Endelig skal det bemærkes, at de højeste effektkoncentrationer (LC₅₀-værdierne på 0,16-0,20 mg/L) ligger inden for området for de almindeligt fundne baggrundskoncentrationer i ferskvand (0,05-0,5 mg/L) og en faktor 40-70 *under* baggrundskoncentrationer i saltvand.

På den baggrund vil der blive set bort fra resultaterne med ørreder og frøer fra Birge (1978) og Birge *et al.* (1979).

Rahimian 1972

Herefter er den lavest fundne effektkoncentration i tabel 4.1 en NOEC-værdi på 0,337 mg/L fra en væksttest med alger. Det har ikke været muligt at fremskaffe originalbeskrivelsen (Rahimian 1972), da der er tale om en Ph.D.-afhandling fra 1972. Pålideligheden af resultater af væksttest med alger er betinget af, at der har været eksponentiel vækst i hele eksponeringsperioden. Der kan i dette tilfælde drages tvivl om, hvorvidt dette har været tilfældet da forsøgsperioden er 7 dage (standard testperiode er 72 eller 96 timer). Derfor anses resultatet ikke for at være pålideligt (Klimisch code 3) og kan ikke lægges til grund for vandkvalitetskriteriet.

Amiard 1976

Tilbage bliver EC₅₀ værdier i intervallerne 60-3.500 mg/L (ferskvand, bilag A) og 5,5-2765 mg/L (saltvand, bilag A). Den laveste af disse er fundet af Amiard (1976) i en akut test med strandkrabber (*Carcinus maenas*).

Amiard's (1976) undersøgelser er ret detaljeret beskrevet og omhyggeligt udført: For hver koncentration er der anvendt 50 voksne eller 100 larver fordelt på 10-20 replikater. Det fremgår ikke, hvor mange koncentrationer, der er anvendt i forsøg med strontium, men i forsøg med kobolt

er der anvendt 5-8 koncentrationer. Dødeligheden i kontroller er højst 10 % i forsøg med voksne ved 4 dages eksponering, men larvedødeligheden er højere, hvilket ifølge forfatteren selv begrænser testens validitet. Data for larvedødelighed er ikke oplyst for de her citerede forsøg, men i (kobolt)forsøg med hummerlarver (*Homarus vulgaris*) oplyses den at være næsten 50 % efter 4 dage. Endvidere opgives LC₅₀-værdierne fra larveforsøgene ikke som en værdi, men som et interval. Dette tyder også på et spinkelt datagrundlag. Ses der bort fra resultaterne med larver, ligger resultaterne af Amiard's (1976) undersøgelser over 500 mg/L.

Biesinger & Christensen 1972

Den lavest fundne effektkoncentration er herefter fra en længerevarende reproduktionstest med *Daphnia magna* (Biesinger & Christensen 1972), hvor der er fundet en EC₁₆ på 42 mg/L. I en korttidstest fandt de samme forfattere EC₅₀ = 125 mg/L for immobilitet af dafnier. De to test er standardtest, korttidstesten med EC₅₀ som effektparameter og langtidstesten med EC₁₆. Ifølge TGD'en (EU 2003) kan en målt effekt på mellem 10 % og 20 % omregnes til NOEC ved at dividere med 2. Derfor er 21 dages NOEC for reproduktion hos *D. magna* = 21 mg/L. Forsøgene er gennemført som semistatiske test med 5 til 12 koncentrationer, hver test er gentaget 3 til 7 gange og resultater opgivet med 95% konfidensintervaller. Der er derfor ingen grund til at tvivle på kvaliteten af resultaterne der anvendes som grundlag for vandkvalitetskriteriet.

4.2 Giftighed over for sedimentlevende organismer

Der er ikke fundet giftighedsdata for sedimentlevende organismer.

4.3 Giftighed over for pattedyr og fugle

Der er udført adskillige længerevarende studier med forsøgsdyr (primært rotter men også mus) med oral indgift af strontium i form af opløselige salte via foderet eller drikkevand. Varigheden af studierne varierede fra 6 dage op til 3 år. Den kritiske effekt er påvirkning af knoglestrukturen, som sås i rotter ved doser fra 500 mg Sr/kg lgv/dag og i mus ved doser fra 350 mg Sr/kg lgv/dag. Effekterne var mere alvorlige hos ungerne end hos voksne dyr. Fra disse studier er der udtaget en NOAEL-værdi på 190 mg Sr/kg lgv/dag for påvirkning af knoglerne hos unge rotter ved 20 dages eksponering (Greve *et al.* 2008; Miljøstyrelsen 2007).

4.4 Giftighed over for mennesker

En enkelt strontiumforbindelse, strontiumchromat, er klassificeret som kræftfremkaldende (Carc2; R45) og farlig ved indtagelse (Xn; R22), men det er indholdet af chromat, der er udslagsgivende for klassificeringen. Ingen af de øvrige strontiumforbindelser er klassificeret som sundhedsskadelige (N-Class, 2005).

En tolerabel daglig indtagelse (TDI) er beregnet til 0,76 mg Sr/kg lgv/dag med udgangspunkt i en observeret NOAEL på 190 mg Sr/kg lgv/dag (Greve *et al.* 2008; Miljøstyrelsen 2007).

Der er beregnet et sundhedsmæssigt baseret kvalitetskriterium i drikkevand på 10 mg Sr/L (Greve *et al.* 2008; Miljøstyrelsen 2007).

5 Udledning af vandkvalitetskriterium

5.1 Vandkvalitetskriterium (VKK)

Ferskvand

Som grundlag for vandkvalitetskriteriet beregnes først en PNEC-værdi som beskrevet i Miljøstyrelsen (2004) og EU (2009). Datagrundlaget herfor er EC_{50} -værdier fra korttidsstudier med en række forskellige organismegrupper, en enkelt 21 dages EC_{16} -værdi fra en kronisk test med *D. magna* (reproduktion), der er omregnet til en NOEC-værdi på 21 mg/L en alge NOEC ≥ 43 mg/l og en fiske NOEC ≥ 41 mg/l. Da krebsdyr samtidig er den mest følsomme højere systematiske gruppe i korttidstest kan der ifølge EU (2009) anvendes en usikkerhedsfaktor på 10 for ferskvand.

Dette giver et $VKK_{\text{ferskvand}} = 2,1$ mg Sr/l

De baggrundskoncentrationer af strontium, der er rapporteret for ferskvand, ligger i intervallet 50-500 $\mu\text{g/L}$ (ca. 100 $\mu\text{g/L}$ i Danmark). Den ovenfor udledte PNEC-værdi er således generelt mere end 10 gange højere end baggrundsniveauet og VKK bruges derfor ikke som en ”tilføjet værdi” hvor den fastsatte værdi skal føjes til baggrundsniveauet.

Saltvand

Datasættets størrelse og antallet af undersøgelser af marine organismer taget i betragtning, vil der normalt skulle anvendes en højere usikkerhedsfaktor for saltvand (100). I havvand er baggrundskoncentrationerne af strontium dog højere end i ferskvand, idet de ligger omkring 8-14 mg/L. En PNEC-værdi udregnet med en usikkerhedsfaktor på 100 er altså ca. 30-70 gange lavere end baggrundskoncentrationer i saltvand. Det må formodes at saltvandsorganismer er evolutionært tilpasset den højere baggrundskoncentration af strontium. Desuden er giftigheden for visse metaller højere i ferskvand end i saltvand pga. disse metallers evne til at danne mindre giftige komplekser med eksempelvis chlorid. I disse tilfælde kan der argumenteres for, at der ikke skal anvendes en højere usikkerhedsfaktor for saltvand i forhold til ferskvand. Der er dog ikke identificeret studier over sammenhængen mellem vandets hårdhed og giftigheden af opløst strontium. Den samlede konklusion er, at der i dette tilfælde kan anvendes den samme usikkerhedsfaktor som for ferskvand (10). Kriteriet fastsættes som en *tilføjet værdi* da værdien er lavere end baggrundsniveauet.

Dermed er $VKK_{\text{saltvand}} = 2,1$ mg Sr/l-tilføjet.

Der er ikke fastsat en øvre grænse for VKK da $PNEC_{\text{hhw}}$ er lavere end den naturlige baggrundskoncentration (udregnet med en TDI på 0,76 mg/kg lgv/d og en BCF på 1.300 for muslinger).

5.2 Korttidsvandkvalitetskriterium (KVKK)

De laveste troværdige $L(E)C_{50}$ værdi fra korttidstests er en 96 t LC_{50} værdi på 55,3 mg/l for *Carcinus maenas*.

Ifølge EU (2009) kan der anvendes en usikkerhedsfaktor på henholdsvis 10 for ferskvand, hvis standardafvigelsen på log-transformeret L(E)C₅₀ data er < 0,5, eller hvis stoffets virkningsmekaniske er kendt og repræsentative arter fra de mest følsomme systematiske grupper indgår i datasættet. I dette tilfælde er standardafvigelsen på log-transformeret data 0,53. Dette er jo lige akkurat over værdien 0,5, men en UF på 100 ville give en KVKK lavere end VKK. 0,53 er trods alt meget tæt på 0,5 og derfor anvendes en usikkerhedsfaktor på 10 for ferskvand og saltvand.

Dette giver KVKK_{ferskvand} på 5,53 mg Sr/l og KVKK_{saltvand} på 5,53 mg Sr/l, hvor saltvandsværdien er fastsat som *tilføjet værdi*.

5.3 Kvalitetskriterium for sediment (SKK)

Ifølge EU (2009) skal der udledes et SKK, hvis $\log K_{oc} \geq 3$.

Fordelingskoefficienten mellem octanol og sediment (K_{oc}) kan udregnes fra K_p ved følgende ligning (EU, 2009):

$$K_{oc} = \frac{K_{p.susp.materiale}}{Foc_{susp,TGD}}$$

Foc sættes til 0,1 (EU standard). Tyve eksperimentelt målte K_p værdier for strontium varierer mellem 36 og 275 L/kg for forskellige sedimenttyper i ferskvand (Liszewski & Miller 1997). Herved er $\log K_{oc}$ mellem 2,5 og 3,5. Derved ligger K_{oc} for strontium lige på grænsen med hensyn til, om der skal fastsættes et kvalitetskriterium for sediment.

Der foreligger ikke tilstrækkelige mængder af data for sedimentlevende organismer til at fastsætte et brugbart SKK. Derfor anvendes ligevægtfordelingsmetoden (EqP, equilibrium partitioning method).

$$SKK = VKK \cdot K_{p.sediment}$$

Dette giver et SKK_{ferskvand} på mellem 75 og 580 mg Sr/kg. Der fastsættes ikke et SKK for saltvand, da der ikke er fundet K_p værdier for marine sedimenter.

Graden af adsorption af metaller til sediment eller partikulært materiale afhænger af mange variable såsom indholdet af organisk materiale, pH, redoxpotentiale og kationadsorptionskapacitet. Derfor er der oftest stor variation i målte K_p værdier fra forskellige sedimenttyper og områder. Ved fastsættelse af SKK for et metal ud fra ligevægtfordelingsmetoden, bør der vælges en K_p værdi, der er repræsentativ for det område, der skal beskyttes. Dette er ikke muligt, da der ikke er fundet K_p værdier for sediment fra danske vandområder og da studiet af Liszewski & Miller (1997) ikke udleder, hvilke af de forskellige karakteristika af sedimentet, der kan forklare forskellen i de målte K_p værdier.

Der vælges derfor den mest konservative tilgang, hvor SKK fastsættes til 75 mg Sr/kg. Dette er en værdi, der kan raffineres, såfremt sammenhængen mellem K_p og sedimentets karakteristika bliver bedre belyst.

Baggrundskoncentrationen af strontium i ferskvandssedimenter i Danmark er målt til mellem 50 og 200 mg Sr/kg (FOREGS 2009). Derfor fastsættes SKK som en *tilføjet værdi*.

Det er vigtigt at tilføje, at EqP tager højde for eksponering via vandfasen (porevand). Andre vigtige eksponeringsveje for sedimentlevende organismer via sediment-fouragering og direkte kontakt med sedimentet er dermed ikke direkte vurderet. Dette medfører, at det totale optag af strontium muligvis undervurderes ved anvendelse af EqP. Udregningerne er desuden baseret på en eksperimentelt fastsat K_p . Denne værdi kan variere på grund af forskelle i det testede medium, hvor adsorptionen af strontium til sediment eller partikulært materiale afhænger af mange parametre såsom indholdet af organisk materiale, pH, redoxpotentiale og kationadsorptionskapacitet. Resultatet betragtes derfor som usikkert, men er samtidigt det bedste der kan udregnes uden tilstrækkelige mængder af data for sedimentlevende organismer.

5.4 Kvalitetskriterium for biota (BKK)

Med målte BCF værdier mellem 40 og 63.000 for akvatiske organismer (tabel 3.1) er strontium potentielt bioakkumulerbart. For mange metaller er der dog en omvendt sammenhæng mellem BCF og vandkoncentrationen af metallet, hvilket i dette tilfælde gør det umuligt at fastsætte en repræsentativ BCF for et givent vandområde, da der ikke foreligger oplysninger om koncentrationer i vandet i de anførte studier. Strontium betragtes ikke som et essentielt næringsstof.

Kriteriet for fastsættelse af BKK er en $BCF > 100$.

Som udgangspunkt for beregningerne anvendes NOAEL værdien fra et 20 dages forsøg med rotteunger 190 mg Sr/kg lsv./dag. Ifølge EU (2003) kan der anvendes en konverteringsfaktor på 10 ved omregning af NOAEL til NOEC. Dette giver en $NOEC_{oral}$ på 1.900 mg/kg. BKK kan herefter udregnes fra nedenstående formel.

$$BKK = \frac{NOEC_{oral}}{UF}$$

Usikkerhedsfaktoren (UF) sættes normalt til 300 for en test af ca. 28 dages varighed (EU 2003). I dette tilfælde er der dog adskillige studier på mus og rotter af op til 3 års varighed, der giver højere NOAEL-værdier end 190 mg Sr/kg lsv/dag. Derfor anvendes en UF for ekstrapolering af kroniske forsøg på 30.

Dette giver et BKK på 63 mg Sr/kg.

5.5 Kvalitetskriterium for human konsum af vandlevende organismer (HKK)

Kriterierne for fastsættelse af HKK er ikke opfyldt da strontium ikke er klassificeret med R-sætningerne R40, R45, R46, R48, R60, R61, R62, R63, R64 eller R68 (EU, 2009).

6 Konklusion

Følgende kriterier er udregnet for opløst strontium:

Vandkvalitetskriterium	VKK _{ferskvand}	2,1 mg Sr/L
Vandkvalitetskriterium	VKK _{saltvand}	2,1 mg Sr/L <i>tilføjet</i>
Korttidsvandkvalitetskriterium	KVKK _{ferskvand}	5,5 mg Sr/L
Korttidsvandkvalitetskriterium	KVKK _{saltvand}	5,5 mg Sr/L <i>tilføjet</i>
Kriterium for sediment	SKK _{ferskvand}	75 mg Sr/kg <i>tilføjet</i>
Kriterium for biota	BKK _{ferskvand}	63 mg Sr/kg
Kriterium for biota	BKK _{saltvand}	63 mg Sr/kg

7 Referencer

Amiard, J.C. 1976. Étude expérimentale de la toxicité aigue de sels de cobalt, d'antimoine, de strontium et d'argent chez quelques crustacés et leurs larves et chez quelques téléostéens. [Experimental Study on the Acute Toxicity of Cobalt Antimony, Strontium and Silver Salts in Some Crustacea and Their Larvae and Some Teleostei]. Rev.Int.Oceanogr.Med. 43:79-95.

ASTDR 2004. Toxicological profile for strontium. U.S. Department of Health & Human Services. Atlanta, Georgia, 387 pp.

Black, J.A., Birge, W.J., McDonnell, W.E., Westerman, A.G., Ramey, B.A. & D.M. Bruser 1982. The Aquatic Toxicity of Organic Compounds to Embryo-larval Stages of Fish and Amphibians. Water Resources Research Institute, University of Kentucky. Research Report No. 133. PB82-224601, NTIS, US Department of Commerce

Biesinger, K.E. & G.M. Christensen 1972. Effects of Various Metals on Survival, Growth, Reproduction and Metabolism of *Daphnia magna*. J.Fish Res.Board Can. 29:1691-1700.
<http://www.garfield.library.upenn.edu/classics1992/A1992JJ54600001.pdf>

Birge, W.J.: 1978. Aquatic Toxicology of Trace Elements of Coal and Fly Ash. In: J.H.Thorp and J.W.Gibbons (Eds.), Dep.Energy Symp.Ser., Energy and Environmental Stress in Aquatic Systems, Augusta, GA 48:219-240.

Birge, W.J., J.A. Black, & A.G. Westerman 1979. Evaluation of Aquatic Pollutants Using Fish and Amphibian Eggs as Bioassay Organisms. In: S.W.Nielsen, G.Migaki, and D.G.Scarpelli (Eds.), Symp.Animals Monitors Environ.Pollut., 1977, Storrs, CT 12:108-118

Borgmann, U., Couillard, Y., Doyle, P. & D.G. Dixon 2005. Toxicity of sixty-three metals and metalloids to *Hyalella azteca* at two levels of water hardness. Environmental Toxicology and Chemistry 24(3): 641-652.

ECOTOX 2009. Online database, US EPA: <http://cfpub.epa.gov/ecotox/>

Encyclopaedia Britannica Online, <http://www.britannica.com/>

EU 2000. Europa-Parlamentets og Rådets Direktiv 2000/60/EF om fastsættelse af en ramme for fællesskabets vandpolitiske foranstaltninger af 23. oktober 2000.

EU 2003a. Technical Guidance Document on Risk Assessment in support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for new notified substances, Commission Regulation (EC) No 1488/94 on Risk Assessment for existing substances, and Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market.

EU 2003b. European Union Risk Assessment Report. Toluene, CAS No: 108-88-3, EINECS No: 203-625-9, risk assessment, Final Report, 2003, Denmark.

EU 2009. Chemicals and the Water Framework Directive: Technical Guidance for Deriving Environmental Quality Standards. Unpublished draft.

Foregs Geochemical Atlas of Europe 2009. <http://www.gsf.fi/foregs/geochem/>

Greve, K., Nielsen, E. & O. Ladefoged 2008. Evaluation of health hazards by exposure to strontium, inorganic and soluble salts. Department of Toxicology and Risk Assessment, National Food Institute, Technical University of Denmark, 37 pp.

Hazardous Substances Data Bank (HSDB). U.S. National Library of Medicine, 8600 Rockville Pike, Bethesda, MD 20894, <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>

Khalil, Z 1997. Tolerance of a cyanobacterium *Phormidium fragile*, to strontium in presence or absence of other heavy metals. Turkish Journal of Marine Sciences 3(2): 65-81.

Liszewski, M.J. & K.E. Miller 1997. Strontium distribution coefficients of surficial sediment samples from the Idaho National Engineering Laboratory, Idaho.

Miljøstyrelsen 2004. Principper for fastsættelse af vandkvalitetskriterier for stoffer i overfladevand. Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 4, 2004.

Miljøstyrelsen 2007. Strontium, uorganiske og opløselige salte. Dataark med udledning af sundhedsmæssigt baseret kvalitetskriterium i drikkevand.

Rahimian, H. 1972. The Effect of Calcium on Growth and Morphogenesis of *Chlorella*, *Golenkinia*, and *Scenedesmus*. Ph.D.Thesis, Washington State University, Pullman, WA :78

Bilag A

Giftighed overfor vandorganismer (EC₅₀, NOEC, EC_x, PNEC osv.)

Ferskvandsorganismer

Akut giftighed

	Form/salt	Målt	Varighed	Effekt	Værdi µg/l	Reference	Troværdighed (1-4)
Blågrønalger <i>Phormidium fragile</i>	SrCl ₂	Nej	7 d	E _b C ₅₀ , biomassevækst	620.000	Khalil 1997	2
Alger <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	SrN ₂ O ₆	Ja	72 t	EC ₅₀ Vækstrate	>43.300	REACH registrering	1-2
Fladorme <i>Polycelis nigra</i>	SrNO ₃	Nej	48 t	LC ₅₀ , dødelighed	3.500.000	Jones 1940*	
Rundorme <i>Caenorhabditis elegans</i>	SrNO ₃	Nej	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	465.000	Williams & Dusenbery 1990*	
Ledorme <i>Tubifex tubifex</i>	SrCl ₂	Nej	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	240.800	Khangarot 1991*	
Krebsdyr <i>Austropotamobius pallipes</i>	SrCl ₂	Ja	30 d	LC ₅₀ , dødelighed	320.000	Boutet & Chaisemartin 1973*	
<i>Austropotamobius pallipes</i>	SrCl ₂	Ja	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	440.000	Boutet & Chaisemartin 1973*	
<i>Cyclops abyssorum</i>	SrCl ₂	Nej	48 t	EC ₅₀ , ubevægelighed	300.000	Baudouin & Scoppa 1974*	
<i>Daphnia hyalina</i>	SrCl ₂	Nej	48 t	EC ₅₀ , ubevægelighed	75.000	Baudouin & Scoppa 1974*	
<i>Daphnia magna</i>	SrCl ₂	Nej	48 t	EC ₅₀ , ubevægelighed	162.300	Khangarot & Ray 1989*	
<i>Daphnia magna</i>	SrCl ₂	Nej	48 t	EC ₅₀ , ubevægelighed	94.000	Khangarot & Ray 1989*	
<i>Daphnia magna</i>	SrCl ₂	Nej	64 t	EC ₅₀ , ubevægelighed	63.500	Anderson 1948*	
<i>Daphnia magna</i>	SrCl ₂	Nej	48 t	EC ₅₀ , ubevægelighed	125.000	Biesinger & Christensen 1972	2
<i>Eudiaptomus padanus</i>	SrCl ₂	Nej	48 t	EC ₅₀ , ubevægelighed	180.000	Baudouin & Scoppa 1974*	
<i>Hyalella azteca</i>	Sr	Nej	7 d	LC ₅₀ , dødelighed	>3150	Borgmann <i>et al.</i> 2005	2
<i>Oronectes limosus</i>	SrCl ₂	Ja	30 d	LC ₅₀ , dødelighed	720.000	Boutet & Chaisemartin 1973*	
<i>Oronectes limosus</i>	SrCl ₂	Ja	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	910.000	Boutet & Chaisemartin 1973*	

Fisk							
<i>Cyprinus carpio</i>	SrN ₂ O ₆	Ja	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	>40.300	REACH registrering	1-2
<i>Carassius auratus</i>	SrCl ₂	Ja	7 d	LC ₅₀ , dødelighed	8.580	Birge 1978	3
<i>Oncorhynchus mykiss</i> , æg	SrCl ₂	Ja	28 d	LC ₅₀ , dødelighed	200	Birge 1978	3

Ferskvandsorganismer

Akut giftighed (fortsat)

	Form/salt	Målt	Varighed	Effekt	Værdi µg/l	Reference	Troværdighed (1-4)
Padder							
<i>Gastrophryne carolinensis</i>	SrCl ₂	Nej	7 d	LC ₅₀ , dødelighed	160	Birge <i>et al.</i> 1979	3

Ferskvandsorganismer

Kronisk giftighed

	Form/salt	Målt	Varighed	Effekt	Værdi µg/l	Reference	Troværdighed (1-4)
Alger							
<i>Scenedesmus acutus</i>	SrCl ₂	Nej	7 d	NOEC, vækst	337	Rahimian 1972	3
<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	SrN ₂ O ₆	Ja	3 d	NOEC, vækstrate	≥43300	REACH-registrering	1
Krebsdyr							
<i>Daphnia magna</i>	SrCl ₂	Nej	21 d	EC ₁₆ , reproduktion NOEC= EC ₁₆ /2	42.000 21.000	Biesinger & Christensen 1972	2
Fisk							
Danio rerio	SrN ₂ O ₆	Nej	34 d	NOEC, klækning, overlevelse, længde, vægt	≥41.000	REACH registrering	1

Saltvandsorganismer

Akut giftighed

	Form/salt	Målt	Varighed	Effekt	Værdi µg/l	Reference	Troværdighed (1-4)
--	-----------	------	----------	--------	------------	-----------	--------------------

Krebsdyr							
<i>Carcinus maenas</i> , larver	SrCL ₂	Ja	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	5.530-55.300	Amiard 1976	3
<i>Carcinus maenas</i> , voksne	SrCL ₂	Ja	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	55.300	Amiard 1976	2
<i>Palaemon serratus</i> , larver	SrCL ₂	Ja	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	277.000	Amiard 1976	3
<i>Palaemon serratus</i> , voksne	SrCL ₂	Ja	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	553.000	Amiard 1976	2
Fisk							
<i>Blennius pholis</i>	SrCl ₂	Nej	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	2.765.000	Amiard 1976	2
<i>Morone saxatilis</i>	SrCl ₂	Ja	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	92.800	Dwyer <i>et al.</i> 1992* og REACH registrering	1-2
<i>Pleuronectes platessa</i>	SrCl ₂	Nej	96 t	LC ₅₀ , dødelighed	2.765.000	Amiard 1976	2

* Citeret fra ECOTOX 2009

