



Syrgasförhållanden i kalkade sjöar inom IKEU

2008-07-21

Anders Wilander
Inst. för miljöanalys
SLU

Sammanfattning

En litteraturgenomgång av kalkningens effekt på sedimentens syretäring antyder att en kortvarig ökad syretäring kan finnas, men att den inte är långvarig. Det finns inga undersökningar av syretäringen i sjöar som kalkats under lång tid. Hypotesen för detta arbete var att kalkning inte långsiktigt påverkar syretäringen i sjöar. Denna är ju beroende av tillgången på nedbrytbart, organiskt material i sediment och vattenmassa. Mängder av detta material torde i stort vara opåverkat av kalkningen. Men en pH-höjning kan ändå medverka till en snabbare nedbrytning av organiskt material och därmed ökad syretäring.

De mätningar av syrgashalter som gjorts inom IKEU-programmet ger ett stort underlag för att bedöma långtidseffekter av kalkning. Låga syrgashalter förekommer i flera av IKEU-sjöarna. Alla de undersökta sjöarna har någon gång haft syrgashalter lägre än 4,0 mg/l. Enligt Naturvårdsverkets föreskrift om klassificering (Naturvårdsverket 2008) är ekologisk status otillfredsställande när syrgashalten är lägre än 4,0 mg/l eller 5,0 mg/l för varmvattensfiskar respektive salmonider. Är halten lägre än 3,0 mg/l klassas tillståndet som dålig status. Vid 10% av mättillfällena var status dålig i sex sjöar i hypolimnion under sommaren och i fyra sjöar under vintern vid isläggning. Orsaker till detta kan alltså vara naturliga eller påverkade av kalkning.

Syretäringen beror på nedbrytbart organiskt material i det fria vattnet och sedimentet. Det innebär att humösa sjöar naturligt har en relativt hög syretäring och att under vintern har sedimentets syretäring stor betydelse i grunda sjöar, liksom skiktningförhållanden under sommaren. Därför har modeller, som tar hänsyn till humusämnehalt (vattenfärg) och vattendjup använts. Dessa har baserats på förhållanden i neutrala sjöar, och kanske inte är helt relevanta för sura sjöar. Temperaturregistreringar har gjort det möjligt att göra beräkningarna av referensvärden för syretäring.

Data för alla sjöar och år som syrgasbestämningar gjorts användes vid arbetet.

Syrgas har bestämts på tagna prover enligt Winklermetoden. Antalet år för vilka prover finns, maximalt antal provtagningsdjup och totalt antal prover varierar. Minsta antal år är 3 och störst 14 och antalet prover varierar från 48 till ca 380. Antalet djup överskrider ofta det som är ”användbart”; t.ex. togs prover i djuphålan ibland på olika djup.

För sommarstagnationen är det stor variation i förhållandet mellan uppmätt och modellerad syretäring. Hypolimnions tjocklek påverkar den modellerade syretäringshastigheten. Den enkla ansatsen där språngskiktet beräknas med hjälp av siktdjupet är sannolikt inte tillräckligt precis. I många sjöar bestäms tyvärr inte syrgas på tillräckligt många djup i hypolimnion för att syretäringens värde skall vara god nog för detta ändamål.

Under vintern, dvs. under isläggning kan få provtagningsdjup räcka för beräkningar av syretäringshastigheter. Vad gäller syretäring under vintern antyder jämförelsen mellan uppmätt täring och modellerad att det inte finns någon systematisk skillnad mellan kalkade och okalkade sjöars syretäring under period med is.

Undersökningen antyder att hypotesen är korrekt dvs. att kalkningen inte väsentligt påverkar syrgasförhållandena i sjöarna.

Bakgrund

Förhöjd syretäring i sedimenten strax efter kalkning har påvisats i några sjöar, medan den i andra inte påverkats eller möjligen minskat. Syrgashalter i en sjö kan vara kritiskt låga vid två perioder under ett år; i slutet av isläggningen och i slutet av sommarstagnationen. Under den första perioden påverkas hela vattenmassan under isen medan under sommarstagnationen endast hypolimnion kan ha låga syrgashalter.

Hypotesen för detta arbete var att kalkning inte långsiktigt påverkar syretäringen i sjöar. Denna är ju beroende av tillgången på nedbrytbart, organiskt material i sediment och

vattenmassa. Mängder av detta material torde inte väsentligt ha påverkats av kalkningen. Men en pH-höjning kan ändå medverka till en snabbare nedbrytning av organiskt material och därmed ökad syretäring.

Låga syrgashalter påverkar biota negativt. Effekten beror i första hand på koncentrationen, men om en låg halt är temporär har även tidpunkten för när den inträffar och dess varaktighet betydelse. Eftersom vattentemperaturen påverkar organismernas aktivitet och därmed syretäring har även den betydelse för effekter på biota.

Effekter på biota finns redovisade i åtskilliga rapporter som sammanställts till ett förslag till bedömningsgrunder för syrgas (Wilander & Sonesten, 2006). Naturvårdsverket (2008) indelar ekologisk status enligt tabell 1. För god status bör syrgashalten vid 5° C vara större än 6 eller 7 mg/l för respektive varmvattensbiota och salmonider (laxartade fiskar).

Tabell 1. Ekologisk status för syrgas (Naturvårdsverket 2008).

Status	Temp (°C)	Varmvattensfiskar Syrgaskoncentration (mg/l)	Huvudsakligen salmonider Syrgaskoncentration (mg/l)
Hög	-	≥ 8	≥ 9
God	0 – 5	≥7 och < 8	≥8 och < 9
"	5 – 15	≥6 och < 7	≥7 och < 8
"	> 15	≥5 och < 6	≥6 och < 7
Måttlig	-	≥4 och < 5	≥5 och < 6
Otillfredsställande	-	≥3 och < 4	≥3 och < 5
Dålig	-	< 3	< 3

I denna rapport beskrivs syrgasförhållanden och syretäring i kalkade **och okalkade intensivt undersökta sjöar (neutrala och sura referenser)**. De två kritiska perioderna; senvinter vid is och sensommar i hypolimnion skall utvärderas. Vidare utreds om kalkning långsiktigt ger upphov till kraftigare syrgastäring på grund av att en pH-förhöjning kan ge en ökad nedbrytning av organiskt material.

Litteratur

Orsaker till låga syrgaskoncentrationer kan vara naturlig, men kalkning kan tänkas påverka syretäringen både i det fria vattnet och i sedimentet. För att försöka klarlägga detta gjordes en genomgång av litteraturdata för sedimentens syrgastäring i kalkade sjöar.

Sanni m.fl. (1983) undersökte syretäringen i sedimentproppar från fyra djup tagna före och efter sjökalkning vid 6-7 tillfällen vardera. Deras slutsats var att syretäringen var något lägre efter kalkning. Endast i sedimentet på 1 m djup syntes en förhöjd syretäring som de bedömde bero på nedbrytning av svamp, som inte tål högre pH-värden och av sedimentnerande alger. Författarnas slutsats av en jämförelse mellan tre kalkade och två okalkade sjöar är att kalkningen inte har någon omedelbar effekt på sedimentens syretäring.

De påpekar också att ändring i primärproduktion (eutrofiering/oligotrofiering) även påverkar sedimentens syretäring genom ändrad tillförsel av sedimentnerande, organiskt material. Gahnström (1988, 1995) undersökte på samma sätt syretäringen i tre sjöars sediment i laboratorium. I den kalkade Gårdsjön fann han en momentan minskning i SOU (Sediment Oxygen Uptake) under ett par månader efter kalkning. Han kunde visa att pH-värdet i sedimentet samtidigt minskade, vilket är den sannolika orsaken till denna momentana reaktion. Därefter tycks nedbrytning av *Sphagnum* bidra till en stegring i täringen. Den fortsatt högre syretäringen efter kalkningen underhålls sannolikt av en ökad planktonproduktion (biomassa). Men, efter normering av laboriemätningarnas resultat till vattentemperatur och bottenyta minskar skillnaden mellan sedimentens syretäring före och efter kalkningen.

Gahnström (1988) observerade ingen ökad syretäring under isläggning. Den förväntade ökningen, som leder till minskade syrgaskoncentrationer, kunde ha uteblivit på grund av kortare isläggningsperioder efter kalkningen.

De fåtaliga undersökningarna visar således inte på någon entydig bild av effekter på syreförhållandena vid kalkning. Undersökningarna genomfördes dock strax efter en första kalkning.

Material

Data för alla sjöar och år som syrgasbestämningar gjorts användes vid arbetet.

Syrgas har bestämts på tagna prover, som konserverats enligt Winklermetoden. Proverna har efter ankomsten till laboratoriet lösts upp och titrerats. Antalet år för vilka prover finns, maximalt antal provtagningsdjup och totalt antal prover redovisas i tabell 2. Antalet djup överskrider ofta det som är ”användbart”; t.ex. togs prover i djuphålan ibland på olika djup.

Tabell 2. Syrgasprover tagna i de undersökta IKEU-sjöarna.

Sjö	X_SMHI	Y_SMHI	År	Totalt antal nivåer	Antal syrgasprover
Blanksjön	623175	146111	2	7	48
Bösjön	680235	141799	18	7	369
Ejgdesjön	653737	125017	18	12	368
Gyltigesjön	629489	133906	18	9	365
Gyslättsjön	633209	141991	18	7	375
Källsjön	683582	154935	18	7	289
Lien	663216	148449	18	11	371
N. Särnamannasjön	683421	133742	13	3	145
Nässjön	634180	133441	2	5	45
Stengårdshultasjön	638317	138010	18	14	386
Stensjön	656419	164404	18	8	345
Stora Härsjön	640364	129240	18	14	378
Tryssjön	670275	146052	18	9	370
V. Skälsjön	664620	148590	18	8	368

För sjöarna har data på djupförhållanden och även för skiktningförhållanden hämtats från IKEU's hemsida (Gunnar Persson).

Inom IKEU har temperaturen registrerats kontinuerligt på ett eller flera djup i totalt 33 sjöar. Dessa data har sammanställts av Björn Bergqvist (Fiskeriverket). Dygnsvärden har använts för att försöka beräkna tiden för vinterskiktningen, dvs. isläggning och islossning. Då mätningar skett på minst två djup har en skillnad i temperatur mellan djupen på större än 0,1° antagits indikera skiktning. Grafer för alla sjöar har dessutom undersökts för att se om skiktningen är stabil under en längre tid. Då mätningar endast skett på ett djup bedömdes att isläggning skett när temperaturfallet var mindre än 0,1°/dygn och dessutom stabil en längre period.

Temperaturmätningar på varje meter finns dessutom vid varje provtagningsstillfälle för 16 sjöar (tabell 3).

Tabell 3. Sammanställning av temperaturdata från de ordinarie provtagningarna i de undersökta IKEU-sjöarna.

Sjö	X-SMHI	Y-SMHI	Antal år med temperaturmätningar	Antal temperaturmätningar
Blanksjön	623175	146111	2	209
Bösjön	680235	141799	18	1204
Ejgdesjön	653737	125017	18	1857
Gyltigesjön	629489	133906	18	2016
Hagsjön	635072	137217	1	90

Sjö	X-SMHI	Y-SMHI	Antal år med temperaturmätningar	Antal temperaturmätningar
Källsjön	683582	154935	18	1291
Lien	663216	148449	18	1548
Lillasjön	623304	145888	1	42
Långsjön	652412	143738	18	1306
Mossjön	624052	148976	1	30
Nässjön	634180	133441	2	161
Stengårdshultasjön	638317	138010	18	1930
Stora Härsjön	640364	129240	18	2099
Tryssjön	670275	146052	18	1384
Upprämnen	669253	139468	7	403
V. Skälsjön	664620	148590	18	1433

Resultat och diskussion

Ett dåligt syrgastillstånd kan antingen vara naturligt eller bero på antropogen påverkan. Syrgasförhållandena i en sjö påverkas av flera faktorer; syretäringen i vattnet och i sedimentet, dessutom av sjödjup, skiktningförhållanden och naturligtvis av skiktningens varaktighet. Under sommaren ger temperaturskiktning en avskiljning av hypolimnionvattnet från luftens syre och under vintern avskiljs vid isläggning hela vattenmassan. Enligt Naturvårdsverkets föreskrift om klassificering (Naturvårdsverket 2008) är ekologisk status otillfredsställande när syrgashalten är lägre än 4,0 mg/l eller 5,0 mg/l för varmvattensfiskar respektive salmonider. Är halten lägre än 3,0 mg/l klassas tillståndet som dålig status. IKEU-sjöarnas syrgashalter i hypolimnion under sommaren redovisas som frekvensfördelning med markeringar för dålig status (tabell 4).

Tabell 4. Frekvensfördelning av syrgashalter i kalkade (blåmärkta) och okalkade (svarta) IKEU-sjöar under sommaren (månader 5–9, djup > 5 m). Värdet med dålig status (<3 mg/l) är markerade med rött. Alla bestämmningar.

Sjö	X_SMHI	Y_SMHI	Antal	Minimum	10 percentil	25 percentil	Median
Blanksjön	623175	146111	10	1,7	1,73	2,86	4,10
Bösjön	680235	141799	85	3,85	5,3	7,34	9
Ejgdesjön	653737	125017	84	1,2	5,82	7,10	9,52
Gyltigesjön	629489	133906	89	0,1	0,29	0,47	1,85
Gyslättsjön	633209	141991	85	0	0	0,04	0,3
Källsjön	683582	154935	88	0	3,03	4,3	5,8
Lien	663216	148449	90	3,14	4,75	6,03	7,67
Nässjön	634180	133441	10	0	0	0	0,2
Stengårdshultasjön	638317	138010	88	0	1,26	4,2	6,9
Stensjön	656419	164404	83	0,02	0,40	2,52	5,26
Stora Härsjön	640364	129240	88	0,3	7,07	8,9	10,1
Tryssjön	670275	146052	86	3,3	4,80	5,49	6,98
V. Skälsjön	664620	148590	88	3,19	4,43	6,23	8,17
Brunnsjön	627443	149526	168	0	0,2	2,9	5,4
Fiolen	633025	142267	173	0	1,8	6,68	8,8
Fräcksjön	645289	128665	198	0	0,6	3,6	7
Härsvatten	643914	127698	193	0,3	3,0	5,25	9
Lillesjö	623161	142148	20	0,1	0,1	0,45	7,25
Remmarsjön	708619	162132	140	1,3	4,37	7,42	8,86
Rotehogstjärnen	652902	125783	175	0	0,25	0,66	3,86
St Skärsjön	628606	133205	177	0	0,3	1,06	5,7
Stensjön	683673	154083	128	2,2	4,0	5,92	7,9
Stora Envättern	655587	158869	174	0	0,92	3,32	7,40
Älgsjön	655275	153234	49	0	0,12	0,19	0,26
Ö.	683337	133785	47	3,94	8,74	9,31	10,4

Sjö	X_SMHI	Y_SMHI	Antal	Minimum	10 percentil	25 percentil	Median
Särnamannasjön							
Örvattnet	662682	132860	19	0,18	0,27	0,6	8,2
Övre Skärsjön	663532	148571	218	0	6,73	8,31	9,30

Nedre Särnamannasjön var omblandad och redovisas därför inte. Under sommaren har i nio av de kalkade sjöarna syrgashalter lägre än 3,0 mg/l uppmätts åtminstone en gång i hypolimnionvattnet. I många fall kan detta vara extremsituationer som beror på att prover togs mycket nära sedimentbotten. Men i fem kalkade sjöar förekom en så låg syrgashalt vid minst 25 procent av mätstillfällena. I tre sjöar: Gyltigesjön, Gyslättsjön och Nässjön var halterna så låga vid hälften av alla provtagningstillfällena. Samtidigt var syrgashalten låg i sex referenssjöar.

På samma sätt redovisas vinterförhållandena, men med skillnaden att värden för hela vattenprofilen ingår (tabell 5).

Tabell 5. Frekvensfördelning av syrgashalter i kalkade (blåmärkta) och okalkade (svarta) IKEU-sjöar under vintern (månader 11–4). Värden med dålig status (<3 mg/l) är markerade med rött. Alla mätvärden.

Sjö	X_SMHI	Y_SMHI	Antal	Minimum	10 percentil	25 percentil	Median
Blanksjön	623175	146111	17	7,55	7,78	9	10,8
Bösjön	680235	141799	80	0,2	1,1	4,23	9,4
Ejgdesjön	653737	125017	96	0,69	8,11	11,4	12,3
Gyltigesjön	629489	133906	90	0,44	1,62	8,45	11,3
Gyslättsjön	633209	141991	98	0,1	3,88	7,3	10,1
Källsjön	683582	154935	77	0	1,25	2,9	10,5
Lien	663216	148449	82	2,12	5,20	7,96	10,8
N. Särnamannasjön	683421	133742	44	4,04	5,06	9,07	11,6
Nässjön	634180	133441	14	1,8	3,21	7,45	9,85
Stengårdshultasjön	638317	138010	89	6,1	9,12	11	12,2
Stensjön	656419	164404	88	0,3	5,38	9,48	10,7
Stora Härsjön	640364	129240	96	3,6	10,1	11,8	12,5
Tryssjön	670275	146052	78	0	1,41	4,32	10,2
V. Skälsjön	664620	148590	74	0,33	3,86	8,55	11,8
Brunnsjön	627443	149526	168	0	0,2	2,9	5,4
Fiolen	633025	142267	173	0	1,8	6,68	8,8
Fräcksjön	645289	128665	198	0	0,6	3,6	7,0
Härsvatten	643914	127698	193	0,3	3,0	5,25	9,0
Lillesjö	623161	142148	20	0,1	0,1	0,45	7,25
Remmarsjön	708619	162132	140	1,32	4,37	7,42	8,86
Rotehogstjärnen	652902	125783	175	0	0,24	0,66	3,86
St Skärsjön	628606	133205	177	0	0,3	1,06	5,7
Stensjön	683673	154083	128	2,2	4,0	5,92	7,9
Stora Envättern	655587	158869	174	0	0,92	3,32	7,41
Älgsjön	655275	153234	49	0	0,12	0,19	0,26
Ö. Särnamannasjön	683337	133785	47	3,94	8,74	9,31	10,4
Örvattnet	662682	132860	19	0,18	0,27	0,6	8,2
Övre Skärsjön	663532	148571	218	0	6,73	8,31	9,31

Tio kalkade sjöar hade någon gång under mätperioden minimumhalter lägre än 3,0 mg/l. Fyra kalkade sjöar hade så låga halter vid minst 10 % av provtagningstillfällena och en (Källsjön) vid 25 % av tillfällena. Motsvarande antal bland referenssjöarna var åtta respektive sex.

En enkel jämförelse ger alltså ingen entydig bild av sämre syrgasförhållanden i kalkade sjöar. Orsaker till dålig status är olika för sommar och vinter (tabell 6). Således har Blanksjön dålig status under sommaren i hypolimnion medan isläggningen tydligen är kortvarig så att

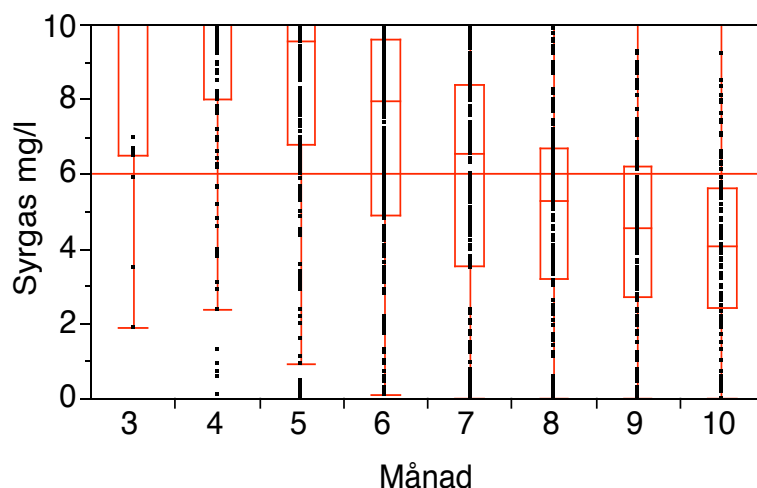
syrgashalten förblir god. Källsjön visar ett motsatt mönster med dålig syrgasstatus under sommaren och otillfredsställande under vintern.

Tabell XX. Frekvensfördelning av syrgashalter i kalkade IKEU-sjöar under vinter och sommar. Värden med dålig status (<3 mg/l) är markerade med rött.

Sjö	X_SMHI	Y_SMHI	Sommar 10 perc.	Sommar 25 perc.	Vinter 10 perc.	Vinter 25 perc.
Blanksjön	623175	146111	1,73	2,86	7,78	9
Bösjön	680235	141799	5,3	7,34	1,1	4,23
Ejgdesjön	653737	125017	5,82	7,10	8,11	11,4
Gyltigesjön	629489	133906	0,29	0,47	1,62	8,45
Gyslättasjön	633209	141991	0	0,04	3,88	7,3
Källsjön	683582	154935	3,03	4,3	1,25	2,9
Lien	663216	148449	4,75	6,03	5,20	7,96
Nässjön	634180	133441	0	0	3,21	7,45
Stengårdshultasjön	638317	138010	1,26	4,2	9,12	11
Stensjön	656419	164404	0,40	2,52	5,38	9,48
Stora Härsjön	640364	129240	7,07	8,9	10,1	11,8
Tryssjön	670275	146052	4,80	5,49	1,41	4,32
V. Skälsjön	664620	148590	4,43	6,23	3,86	8,55

De kalkade sjöarna (djup >5m) visar på en minskning av mediankoncentrationerna från sommarens början i maj då sjövattnet normalt cirkulerar till september/oktober då höst-cirkulationen kan inträffa (figur 1). Men åtskilliga sjöar cirkulerar först efter höstens sista provtagning. Isläggningens längd varierar mycket både mellan sjöar och år, men kan sluta redan i april och räcka till maj i högre och nordligare belägna sjöar.

Eftersom syrgashalten under skiktningssperioderna - vinterns isläggning och sommarens stagnation (hypolimnion) - sjunker med längre skiktningssperiod är täringshastigheten det lämpligaste måttet för jämförelser mellan sjöar och år.



Figur 1. Syrgashalter i kalkade IKEU-sjöarna (djup >5 m). Boxplottar som visar 25, 50 och 75 percentiler.

Variationen mellan de olika IKEU-sjöarna, såväl kalkade som okalkade är stor (tabell 6); från sjöar som inte i djupare vatten uppnår god status ens som mediankoncentration (t.ex. Stora Vrångtjärnet som är överkalkad) till sådana som oftast >90 % av provtagningstillfällena håller god status (t.ex. Stora Härsjön).

Tabell 6. Syrgasförhållandena (mg/l) i samtliga IKEU-sjöarna (märkta blå kalkad, röd överkalkade och svart kalkavslutningssjöar). Minimum, 10 och 25 percentiler samt medianvärden. Röda tal anger dålig status.

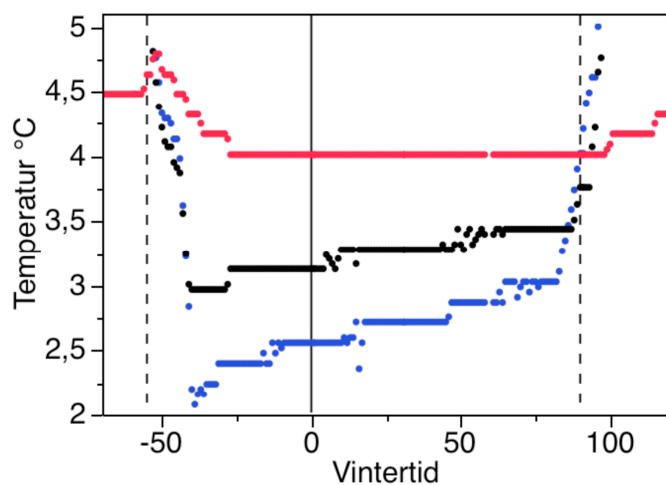
Namn	X-SMHI	Y-SMHI	Minimum	10 percentil	25 percentil	Median
Årsjön (referenssjö)	656612	164132	0	0,20	1,5	4,3
Bösjön	680235	141799	3,85	4,8	6,7	8,6
Ejgdesjön	653737	125017	1,2	4,2	6,1	8,9
Gyltigesjön	629489	133906	0,1	0,32	0,67	3,4
Gyslättsjön	633209	141991	0	0,04	0,75	4,0
Källsjön	683582	154935	0	3,0	4,3	6,0
Långsjön	652412	143738	0,44	0,98	2,6	5,4
Långsjön, Åva	656590	164240	0	0,06	0,17	2,8
Lien	663216	148449	2,19	4,6	5,6	7,1
Mossjön	624052	148976	0,42	0,42	0,42	3,3
N. Särnamannasjön	683421	133742	4,04	9,13	9,935	10,76
Nässjön	634180	133441	0,2	0,20	0,40	6,3
Rödingträsket	711924	163150	7,05	7,1	7,1	9,2
St Vrångstjärnet	654508	127219	0,22	0,22	0,22	0,35
Stengårdshultasjön	638317	138010	0	1,5	4,4	7,2
Stensjön	656419	164404	0,02	1,4	2,7	5,4
Stensjön, Åva	683673	154083	0	0,40	4,5	6,3
Stora Härsjön	640364	129240	0,3	7,0	8,3	10,
Stora Silevatten	644964	128088	0,5	0,5	0,55	0,70
Tryssjön	670275	146052	2,95	4,3	5,2	6,9
Upprämnen	669253	139468	6,5	6,9	7,5	9,9
V. Skälsjön	664620	148590	2,1	3,9	5,6	8,0

Namn	X-SMHI	Y-SMHI	Minimum	10 percentil	25 percentil	Median
------	--------	--------	---------	--------------	--------------	--------

Syrgasförhållanden under vintern (isläggning)

Vanligen finns data på syrgashalter endast för ett tillfälle under vintern och därför måste en skattning av isläggningens start och vattentemperaturen då användas för att beräkna en "startkoncentration". Genomgångar av resultat från trendsjöarna antyder att vattnet under höst-cirkulationen före isläggning ofta inte hinner bli syremättat, utan uppnår ca 90 % mättnad vid isläggningen (Wilander & Sonesten, 2006).

Temperaturmätningarna (dygnvis) för varje sjö och år har granskats. Totalt har grafer för 121 sjöar studerats. Då ytvattnets temperatur slutar falla och blir konstant antas att isläggning skett. I de fall då mätningar gjorts på flera djup har dessutom en stabil eller svagt stigande temperatur tagits som tecken på att isläggning skett (figur 2).



Figur 2. Exempel på temperaturförhållanden under vintern. Vintertid anger antal dygn före respektive efter nyår. Allgjuttern vintern 1999. Temperatur på 0,5 i blått, 5 m i svart och 15 i rött. Lodräta, streckade linjer antyder bedömd start och slut av isläggning.

Variationen för isläggningstidpunkt mellan sjöar och undersökningsår framgår av tabell 7.

Tabell 7. Sammanställning av uppskattad isläggningstidpunkt baserat på dagliga temperaturmätningar i IKEU-sjöar. Min och max dag ger isläggning som antal dagar före/efter nyår.

Sjö	X	Y	Antal år	Min. datum	Max. datum	Min dag	Max dag
Allgjuttern	642489	151724	7	11-08-1998	12-17-2005	-52	-4
Blanksjön	623175	146111	1	12-17-2005	12-17-2005	-13	-13
Bornsjön	657245	160890	2	11-18-2004	12-29-2005	-42	-1
Brunnsjön	627443	149526	5	12-26-2000	12-20-2005	-40	14

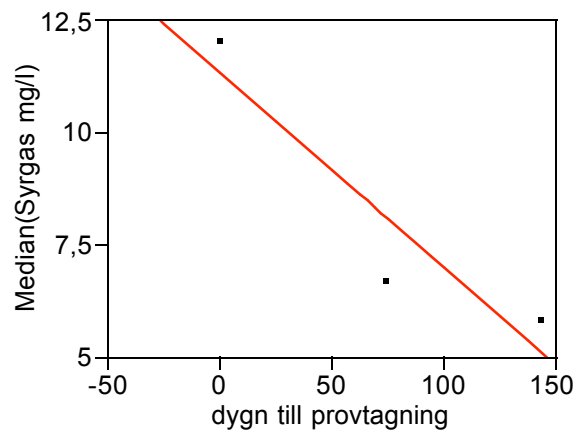
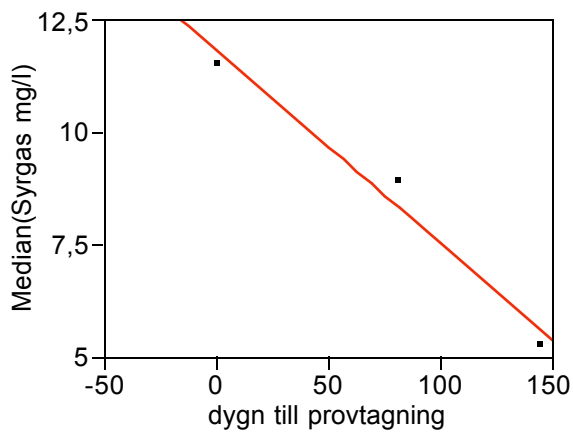
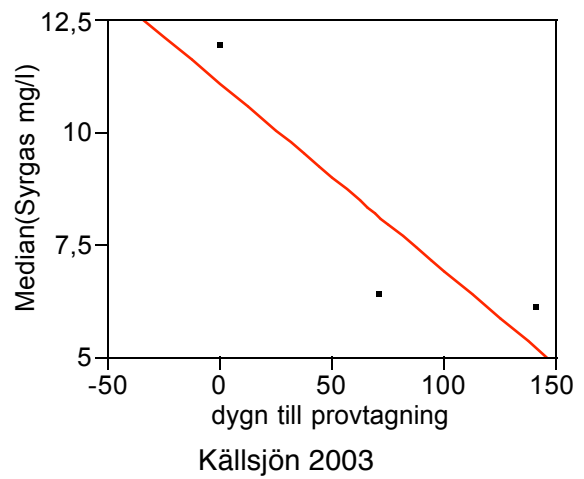
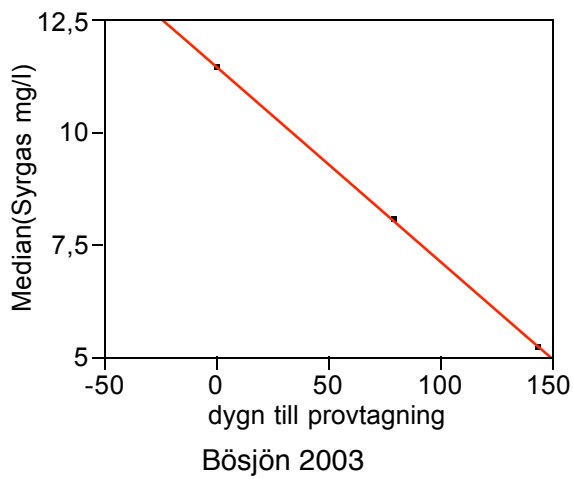
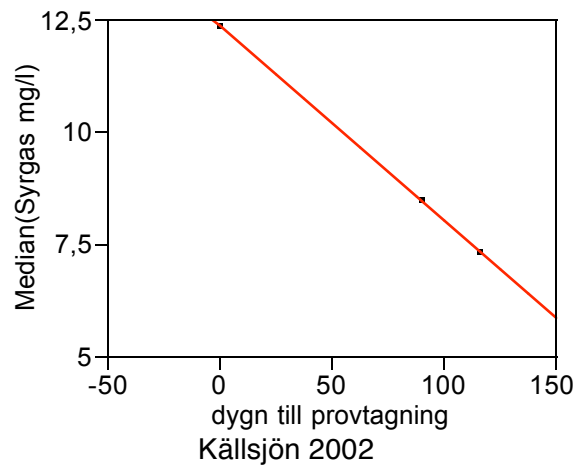
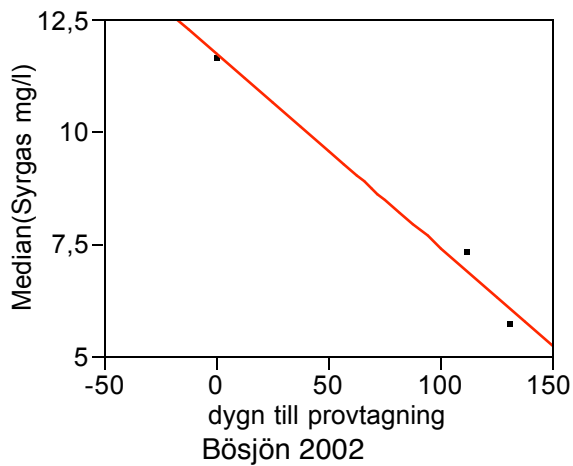
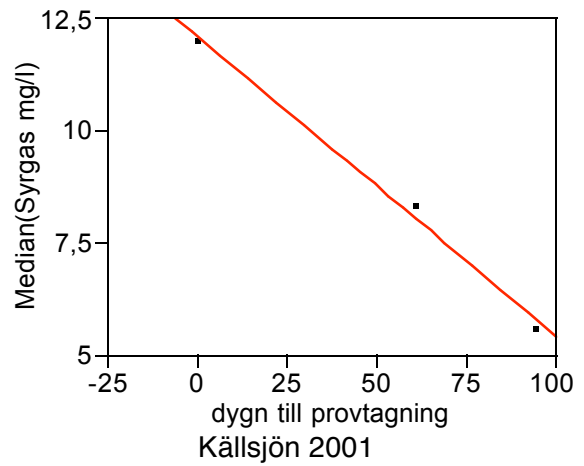
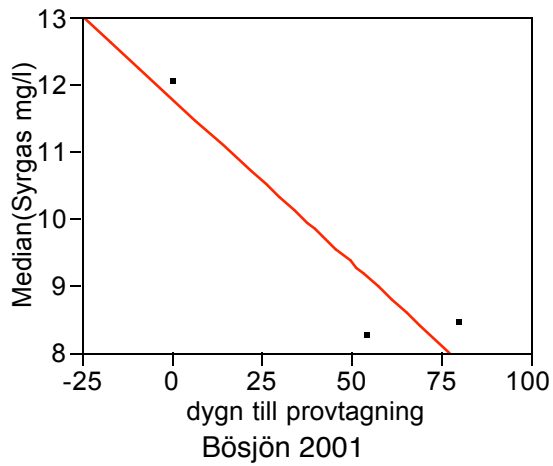
Sjö	X	Y	Antal år	Min. datum	Max. datum	Min dag	Max dag
Bösjön	680235	141799	4	12-18-2000	10-22-2003	-73	-12
Ejgdesjön	653737	125017	4	12-24-2000	01-05-2004	-25	5
Fiolen	633025	142267	2	11-28-2001	01-01-2004	-32	1
Fräcksjön	645289	128665	5	12-16-2001	12-14-2005	-42	-9
Gyltigesjön	629489	133906	2	12-25-2000	12-09-2002	-21	-5
Gyslättsjön	633209	141991	6	12-21-2000	11-26-2005	-51	-9
Härsvatten	643914	127698	3	12-23-2000	11-15-2002	-45	-7
Jutsajaure	744629	167999	7	10-19-1998	11-25-2004	-89	-35
Källsjön	683582	154935	4	12-19-2000	10-26-2003	-64	-11
Lien	663216	148449	1	12-24-2000	12-24-2000	-6	-6
Långsjön, Åva	656590	164240	4	12-20-2000	12-16-2003	-37	-10
Långsjön, Örebro	652412	143738	5	12-24-2000	12-20-2005	-57	-6
N. Särnmanssjön	683421	133742	4	10-29-2000	10-14-2003	-80	-53
Nässjön	634180	133441	1	12-26-2005	12-26-2005	-4	-4
Remmarsjön	708619	162132	3	12-08-2000	10-19-2002	-71	-22
Rotehogstjärnen	652902	125783	6	11-05-1998	12-06-2003	-55	-7
Stengårdshultasjön	638317	138010	5	12-14-1999	01-02-2004	-26	7
Stensjön, Järvsö	683673	154083	4	12-17-2000	11-07-2003	-69	-13
Stensjön, Åva	656419	164404	3	01-11-2001	12-08-2002	-22	11
Stora Envättern	655587	158869	4	12-25-2000	12-13-2003	-24	-5
Stora Härsjön	640364	129240	4	12-26-2000	01-03-2004	-21	3
Stora Skärsjön	628606	133205	2	12-09-2002	01-04-2004	-21	4
Tryssjön	670275	146052	4	12-22-2000	11-06-2003	-59	-8
Västra Skälsjön	664620	148590	6	11-10-1998	12-12-2003	-57	-7
Ålgsjön	655275	153234	6	12-23-2000	12-02-2005	-33	-7
Övre Skärsjön	663532	148571	4	12-25-2000	12-13-2003	-52	-5
Övre Särnmanssjön	683337	133785	3	11-01-2000	10-12-2003	-78	-54

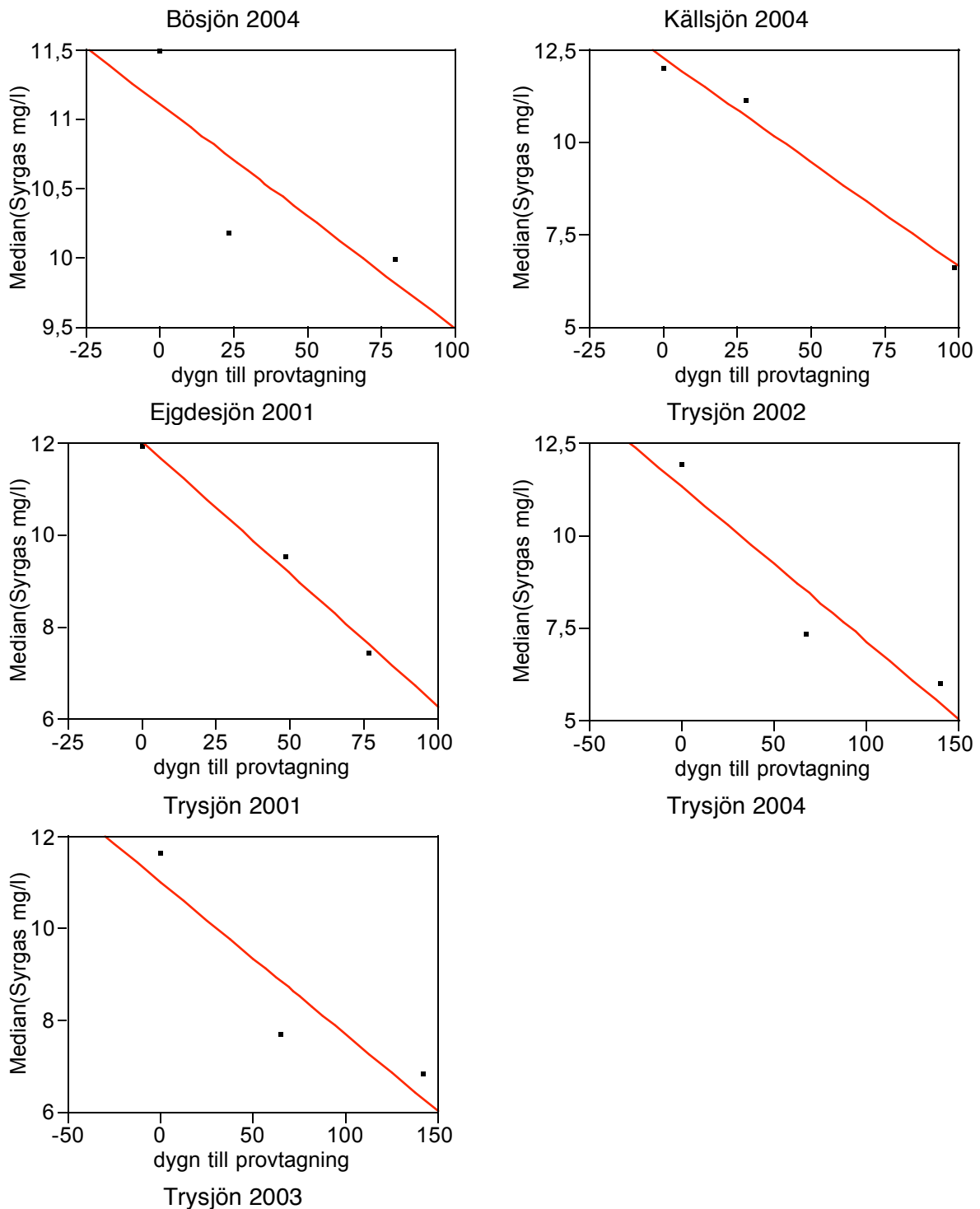
Tidigast skedde isläggnen i Övre Särnmanssjön och Nedre Särnmanssjön. Bägge ligger relativt nordligt och förhållandevis högt och är dessutom ganska grunda. Isläggnen varierar mycket i några sjöar, som t.ex. Allgjuttern och Brunnsjön. Relativt liten variation förekom i t.ex. Stora Envättern och Övre Särnmanssjön. Beräkningar av syretäring kunde endast göras för 11 sjöar som hade tillräckligt säkra data och lång isläggningsperiod (tabell 8).

Tabell 8. Sjöar och antal år som kan användas för beräkning av syrgästärning under vintern (isläggnen).

Namn	X-SMHI	Y-SMHI	Antal år
Blanksjön	623175	146111	6
Bösjön	680235	141799	27
Ejgdesjön	653737	125017	15
Gyltigesjön	629489	133906	8
Gyslättsjön	633209	141991	18
Källsjön	683582	154935	28
Lien	663216	148449	7
Nässjön	634180	133441	6
Stengårdshultasjön	638317	138010	7
Stora Härsjön	640364	129240	7
Tryssjön	670275	146052	28

För alla beräkningar av syretärningen under vintern har en beräknad ”startkoncentration” för syrgas använts. De fall då både ”startkoncentration” och syrgashalter för två provtagnings-tillfällen har kunnat användas visas i figur 3.





Figur 3. Trender i syrgaskoncentration under vintern i de sjöar där två provtagningar gjorts. "Startkoncentration" och tid för isläggning (0 dygn) har beräknats. Linjär regression.

I övriga fall har beräkningen av syretäringshastigheten endast baserats på en skattning av syrekoncentrationen vid isläggning och uppmätt syrgashalt vid ett provtagningstillfälle under is. Resultaten av alla beräkningar av täringshastigheter redovisas i tabell 9.

Tabell 9. Syretäring (mg/l,dygn) under islagd vinter beräknad från två mättillfällen och uppskattad tidpunkt för isläggning och syrgaskoncentration. Linjär regression.

Sjö, år	Antal värden	Täring mg/l,dygn	Std. fel	P-värde	r^2
---------	--------------	---------------------	----------	---------	-------

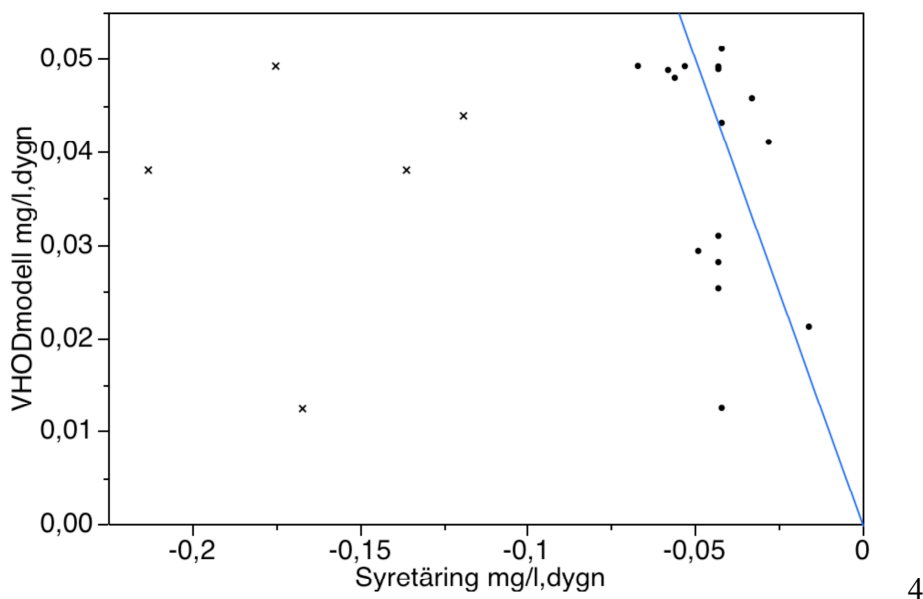
Blanksjön, 2006	2	-0,086	.	.	
Bösjön, 2001	3	-0,094	0,025	0,16	0,93
Bösjön, 2002	3	-0,056	0,002	0,02	0,99
Bösjön, 2003	3	-0,048	0,019	0,24	0,86
Bösjön, 2004	3	-0,049	0,018	0,22	0,88
Ejgdesjön, 2001	3	-0,0004	0,015	0,98	0,001
Ejgdesjön, 2004	2	-0,16	.	.	
Gylltigesjön, 2003	2	-0,032	.	.	
Gyslättsjön, 2001	2	-0,13	.	.	
Gyslättsjön, 2003	2	-0,11	.	.	
Gyslättsjön, 2004	2	-0,085	.	.	
Gyslättsjön, 2006	2	-0,14	.	.	
Källsjön, 2001	3	-0,072	0,021	0,18	0,91
Källsjön, 2002	3	-0,059	0,015	0,16	0,94
Källsjön, 2003	3	-0,048	0,028	0,32	0,75
Källsjön, 2004	3	-0,05	0,024	0,28	0,81
Lien, 2001	3	-0,047	0,065	0,60	0,34
Nässjön, 2006	2	-0,597	.	.	1
Stengårdshultasjön, 2003	3	-0,05	0,031	0,35	0,72
Stora Härsjön, 2004	3	-0,034	0,056	0,64	0,27
Tryssjön, 2001	3	-0,095	0,032	0,21	0,89
Tryssjön, 2002	3	-0,057	0,05	0,46	0,56
Tryssjön, 2003	3	-0,046	0,029	0,35	0,72
Tryssjön, 2004	3	-0,048	0,028	0,34	0,74

Som modell för syretäringshastigheten (mg/l,dygn) under vintern finns följande förslag enligt Wilander & Sonesten (2006).

$$\frac{300}{\text{medeldjup} \cdot 1000} \cdot 1,11^{(\text{temp}-20)} + 0,01 \cdot 1,11^{(\text{temp}-20)} \cdot \left(\frac{\text{abs420}}{6,3} \cdot 500 \right) \quad (1)$$

Den baseras på syretäring i sediment ; här 300 mg/m²,dygn och det fria vattnets syretäring: vattnets syretäring sätts i relation till halten organiskt material; här som absorberas (vattenfärg). Hastigheten för bägge processerna är temperaturkompenserad.

För alla sjöar kunde modellberäkningar av syretäringen göras enligt ekvation 1. De erhållna resultaten jämförs med uppmätt syretäring i figur 4.

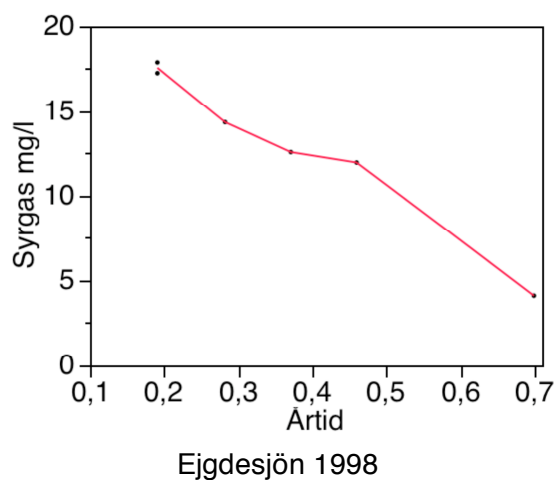
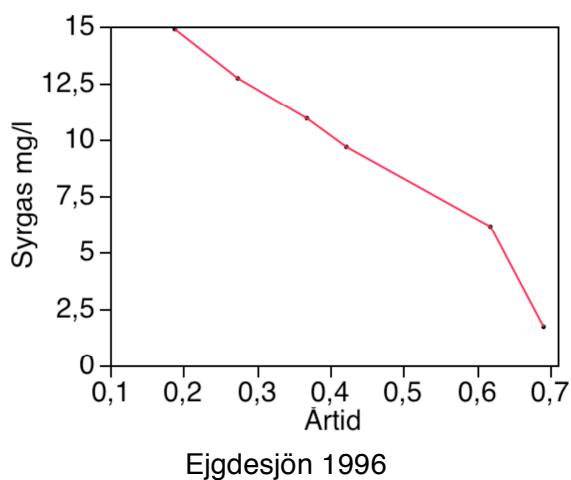


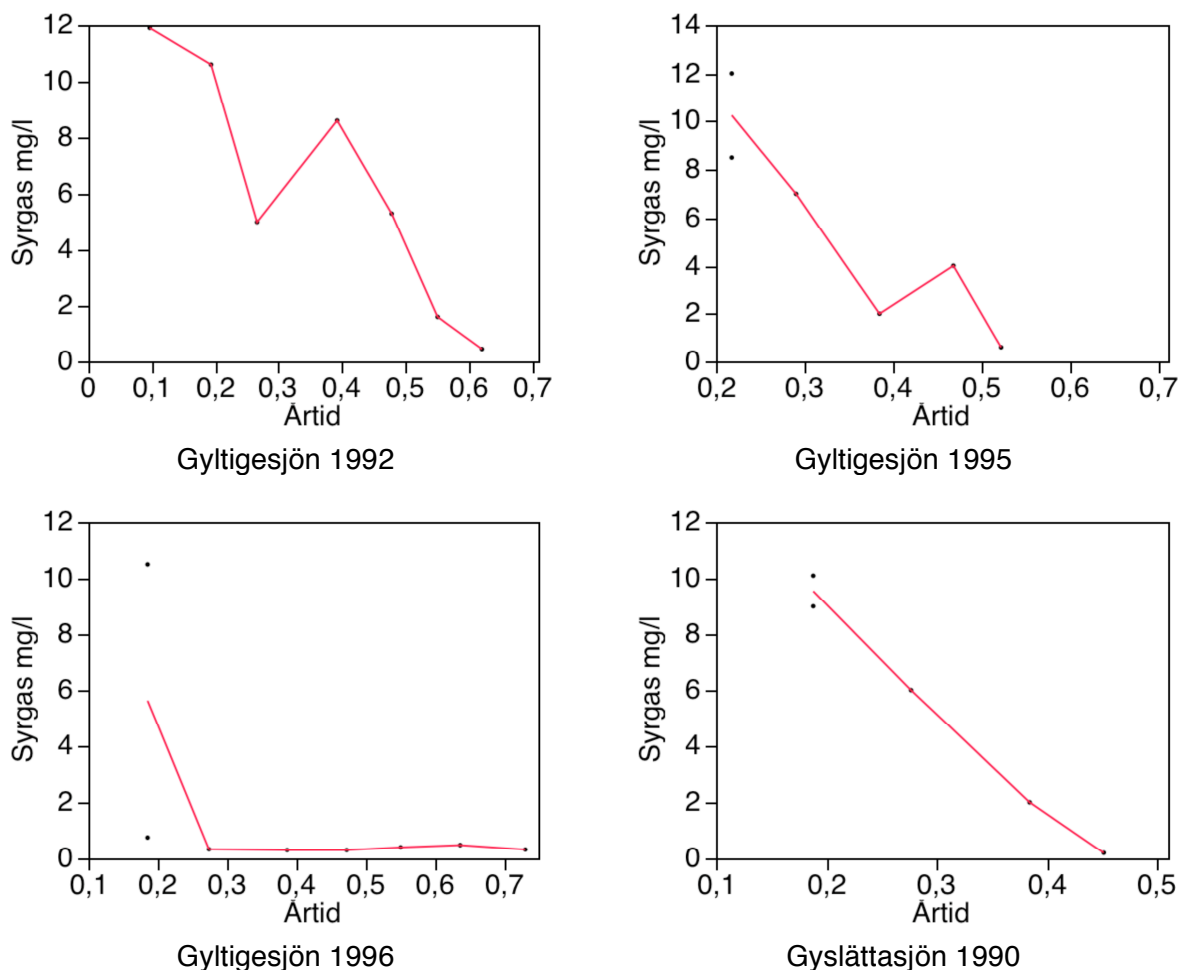
Figur 4. Jämförelse mellan uppmätt syretäring och beräknad syretäring VHOD (volumetric oxygen demand) för vinter. Jfr tabell 9. De kryssmärkta dataparen har uteslutits från beräkningar. Den blå linjen anger 1:1 förhållandet.

Modellen ger en relativt god överensstämmelse med de uppmätta värdena. Undantagen gäller Ejgdesjön och Gyltigesjön, som har en uppmätt syretäring som är betydligt större än modellens värden. Medelvärdet för de övriga 16 dataparen (sjöåren) är 0,93 med en standardavvikelse $\pm 0,32$. Någon tendens till avvikelse från modellens värden för de utvärderade kalkade sjöarna kan alltså knappast iakttas. Det skulle alltså innebära att kalkningen inte påverkar syretäringen under vintern (isläggning).

Syretäring under sommaren (hypolimnion)

Syretäringshastigheten har beräknats utifrån mediankoncentrationer för hypolimnion vid varje provtagningstillfälle under skiktningssperioden. I de fall då syrgashalten nått 0 mg/l har alla provtagningstillfällen efter det första tillfället tagits bort. Exempel på syrgastäringsens förlopp i några sjöar ges i figur 5.





Figur 5. Exempel på syrgastärning under sommaren i några IKEU-sjöars hypolimnion.

Som regel minskar syrgashalten relativt linjärt i hypolimnion. Undantag finns och exemplifieras i figuren av Gyltigesjön 1996. Sådana "sjöår" har uteslutits från följande beräkningar. Lutningen har beräknats med den icke-parametriska Theil's slope (lutning). En sammanställning av resultaten visas i tabell 10.

Tabell 10. Sammanställning av uppmätt syretäringshastighet (lutning; mg/l,dygn) under sommaren.

Sjö	Antal år	10 percentil	Median (50 percentil)	90 percentil
Årsjön	10	-0,00252	-0,00076	-0,00048
Långsjön, Åva	10	-0,00817	-0,00131	0,00000
Trehörningen	5	-0,00307	-0,00002	0,00000
Bösjön	16	-0,00193	-0,00072	-0,00030
Ejgdesjön	17	-0,00139	-0,00062	-0,00024
Gyltigesjön	17	-0,00550	-0,00078	-0,00003
Gyslättsjön	17	-0,00385	-0,00163	-0,00075
Källsjön	14	-0,00699	-0,00069	-0,00029
Långsjön	17	-0,00138	-0,00076	-0,00045
Lien	17	-0,00077	-0,00041	-0,00024
Mossjön	1	-0,00099	-0,00099	-0,00099
Nässjön	2	-0,00189	-0,00153	-0,00118
Rödingträsket	3	-0,00144	-0,00094	-0,00042
St Vrångstjärnet	1	0,00004	0,00004	0,00004
Stengårdshultasjön	17	-0,00159	-0,00085	-0,00059
Stensjön	17	-0,00287	-0,00064	-0,00040

Stensjön, Åva	2	-0,00149	-0,00124	-0,00100
Stora Härsjön	17	-0,00048	-0,00034	-0,00017
Stora Silevatten	1	0,00004	0,00004	0,00004
Tryssjön	16	-0,00067	-0,00050	-0,00028
Upprämnen	5	-0,00056	-0,00040	-0,00006
V. Skålsjön	17	-0,00104	-0,00068	-0,00040

Beräkningar av syretäringshastighet i hypolimnion (mg/l,dygn) har gjorts enligt följande ekvation (Wilander & Sonesten, 2006).

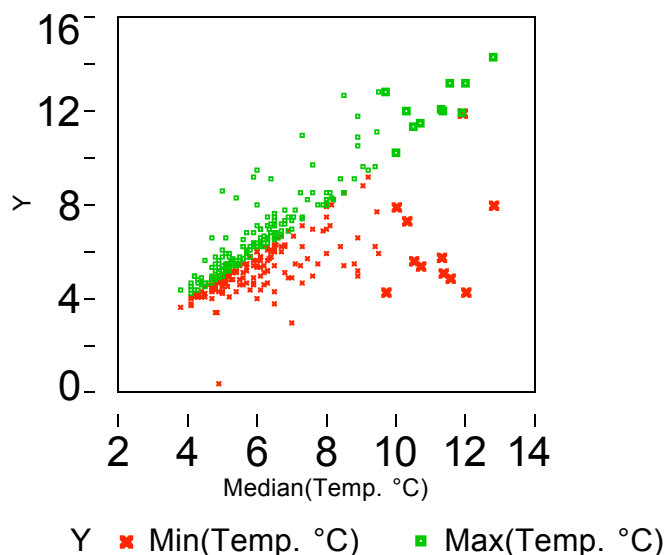
$$\frac{300}{(\text{Maxdjup} - \text{siktdjup}) \cdot 1000} \cdot 1,047^{(\text{Temp}-20)} + 0,01 \cdot 1,047^{(\text{Temp}-20)} \cdot \left(\frac{\text{Abs420}}{6,3} \cdot 500 \right) \quad (2)$$

I förslaget till bedömningsgrunder (Wilander & Sonesten, 2006) har siktdjupet använt för att uppskatta språngskiktet; alltså för att beräkna hypolimnions mäktighet.

Beräkning av hypolimnions vattentemperatur för bestämning av ett referensvärde för modellering

Bestämningar av vattentemperaturen sker dels metervis vid varje provtagningstillfälle, dels på provtagningsdjupen. Underlaget för beräkning av referensvärden för syrgastäring togs fram enbart med hjälp av mätningarna på provtagningsdjupen (Wilander & Sonesten, 2006). Därför används samma sätt här för att bestämma ett medianvärde för vattentemperaturen i hypolimnion under sommaren.

Även i hypolimnion kan vattentemperaturen variera med tiden. Men modellen tillåter bara användning av ett värde. Därför undersöktes hur mediantemperatur kan användas (figur YY).



Figur YY. Jämförelse mellan mediantemperatur och maxtemperatur i hypolimnion för IKEU-sjöarna. Årsvisa data för perioden maj-september. De kraftigt markerade dataparen gäller Bösjön, som inte har stabil skiktning.

Med undantag för de sjöar och år då skiktningen inte är stabil så är variationen i hypolimnions vattentemperatur relativt liten. I de fall då skillnaden är stor har naturligtvis hypolimnion inte identifierats bra.

Syretäringshastigheten har beräknats utifrån mediankoncentrationer för hypolimnion vid varje provtagningstillfälle under skiktningens period. I de fall då syrgashalten nått 0 mg/l har alla

senare provtagningstillfällen uteslutits från beräkningen. Lutningen har beräknats med den icke-parametriska Theil's slope (lutning) för att minimera effekter av extremvärden. En sammanställning av resultaten visas i tabell 11.

Tabell 11. Sammanställning av uppmätt syretäringshastighet (lutning mg/l,dygn) under sommaren.

Sjö	Antal år	10 percentil	Median (50 percentil)	90 percentil
Årsjön	10	-0,00252	-0,00076	-0,00048
Långsjön, Åva	10	-0,00817	-0,00131	0,00000
Trehörningen	5	-0,00307	-0,00002	0,00000
Bösjön	16	-0,00193	-0,00072	-0,00030
Ejgdesjön	17	-0,00139	-0,00062	-0,00024
Gyltigesjön	17	-0,00550	-0,00078	-0,00003
Gyslättsjön	17	-0,00385	-0,00163	-0,00075
Källsjön	14	-0,00699	-0,00069	-0,00029
Långsjön	17	-0,00138	-0,00076	-0,00045
Lien	17	-0,00077	-0,00041	-0,00024
Mossjön	1	-0,00099	-0,00099	-0,00099
Nässjön	2	-0,00189	-0,00153	-0,00118
Rödingträsket	3	-0,00144	-0,00094	-0,00042
St Vrångstjärnet	1	0,00004	0,00004	0,00004
Stengårdshultasjön	17	-0,00159	-0,00085	-0,00059
Stensjön	17	-0,00287	-0,00064	-0,00040
Stensjön, Åva	2	-0,00149	-0,00124	-0,00100
Stora Härsjön	17	-0,00048	-0,00034	-0,00017
Stora Silevatten	1	0,00004	0,00004	0,00004
Tryssjön	16	-0,00067	-0,00050	-0,00028
Upprämnen	5	-0,00056	-0,00040	-0,00006
V. Skälsjön	17	-0,00104	-0,00068	-0,00040

En jämförelse mellan årliga syretäringshastigheter och modellerade värden enligt ekvation 2 visar på stora skillnader. Detta verkar främst bero på att skattningen av hypolimnions mäktighet i sjöarna är mycket grov och det påverkar kraftigt modellens resultat. Därför kan eventuella effekter av kalkning på syretäring i hypolimnion inte klarläggas. Eventuellt kan för varje sjö mer realistiska data vad gäller hypolimnions mäktighet och en förfining av modellen ge bättre referensvärden.

Slutsatser

Litteraturgenomgången av kalkningens effekt på sedimentens syretäring antyder att en kortvarig positiv effekt (dvs. ökad syretäring) kan finnas, men att den inte är långvarig. Hypotesen för detta arbete var att kalkning inte långsiktigt påverkar syretäringen i sjöar. Denna är ju beroende av tillgången på nedbrytbart, organiskt material i sediment och vattenmassa. Mängder av detta material torde inte väsentligt ha påverkats av kalkningen. Men en pH-höjning kan ändå medverka till en snabbare nedbrytning av organiskt material och därmed ökad syretäring.

De mätningar av syrgashalter som gjorts inom IKEU-programmet ger ett stort underlag för att bedöma långtidseffekter av kalkning. Låga syrgashalter förekommer i flera av IKEU-sjöarna. Med hjälp av de enkla modeller som ingår i bedömningsgrunder (Wilander & Sonesten 2006) har syretäringen i ”opåverkade” sjöar har använts att bedöma om kalkningen påverkat syrgasförhållandena. Dessa har baserats på förhållanden i neutrala sjöar, och kanske inte är helt relevanta för sura sjöar. Det finns inte tillräckligt material för att göra modeller för sura sjöar. Under sommaren påverkar hypolimnions tjocklek den beräknade syretäringshastigheten. Den enkla ansatsen där språngskiktet beräknas med hjälp av siktdjupet är inte tillräckligt precis. I

många sjöar bestäms tyvärr inte syrgas på tillräckligt många djup i hypolimnion för att syretäringens värde skall vara god nog för detta ändamål.

Under vintern, dvs. under isläggning kan få provtagningsdjup räcka för beräkningar av syretäringshastigheter. Provtagningar sker inte i början av isläggning. Tidpunkten för isläggning (om den sker) har för alla sjöar skattats med hjälp av temperaturloggar. Den då uppmätta temperaturen användas för att beräkna en ”startkoncentration” för syrgashalten som tillsammans med mätningar under senvinter används för beräkning av syretäring. Vad gäller syretäring under vintern antyder jämförelsen mellan uppmätt täring och modellerad att det inte finns någon systematisk skillnad mellan kalkade och okalkade sjöars syretäring under period med is.

Undersökningen antyder att hypotesen är korrekt dvs. att kalkningen inte väsentligt påverkar syrgasförhållandena i sjöarna.

Referenser

- Gahnström, G. 1988. The effects of liming on sediment oxygen uptake in Lake Gårdsjön, Sweden. I Liming of Lake Gårdsjön. An acidified lake in SW Sweden. National Swedish Environmental Protection Board. Report 3426, p. 207–243
- Gahnström, G. 1995. The effects of liming on microbial activity and the decomposition of organic material. In Henriksson, L. & Brodin, Y.W. Liming of acidified surface waters. A Swedish synthesis. Springer. p. 179-191
- Naturvårdsverket 2008. Naturvårdsverkets föreskrifter och allmänna råd om klassificering och miljö kvalitetsnormer avseende ytvatten; NFS 2008:1
- Sanni, S., Skogheim, O.K. & Hongve, D. 1983. Sediment – vann undersökelse i förbindelse med kalking av 3 vann i Gjestad, Aust-Agder. Miljöverndepartementet. Direktoratet for vild og ferskvannsfisk. Kalkingsprosjektet Rapport 5.83
- Wilander, A. & Sonesten, L. 2006. Underlag och förslag till reviderade bedömningsgrunder för syrgas. Inst. f. miljöanalys, SLU Rapport 2006:7