

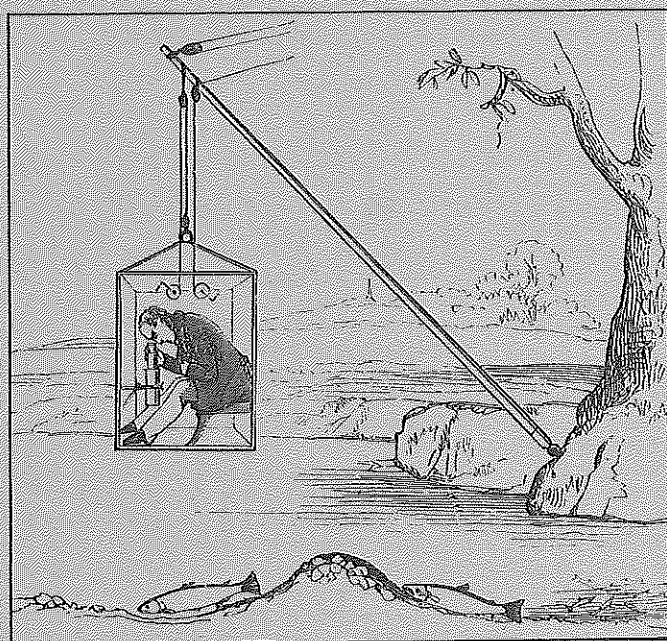


Nr 5 1987

Länsstyrelsen Jönköping	
1998-12-01	Avd
Dnr	

Information från

SÖTVATTENS- LABORATORIET Drottningholm



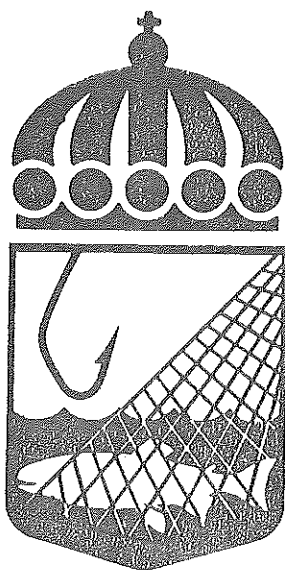
PETER RIDDERSTOLPE

**Kräftors syrgasbehov och
naturlig syresättning vid
extensiv odling i dammar**

Författare:

Peter Ridderstolpe

Inst. f. Kulturteknik
Kungl. Tekn. Högskolan
100 44 STOCKHOLM



FISKERIVERKET

ISSN 0346-7007

KRÄFTORS SYRGASBEHOV OCH NATURLIG SYRESÄTTNING VID EXTENSIV ODLING I DAMMAR

Peter Ridderstolpe

INLEDNING	1
KRÄFTORS SYRGASBEHOV	1
<u>Lägsta acceptabla syrgasnivåer vid odling är en fråga om biologi och ekonomi</u>	2
<u>Att bestämma toleransnivåer för syrgasbrist</u>	2
<u>Att andas i vatten</u>	3
<u>Den anpassningsbara kräftan</u>	5
<u>Toleransnivåer hos signalkräfta och kvalitetsnormer vid extensiv odling</u>	6
<u>Absoluta uttryck</u>	7
<u>Relativa uttryck</u>	10
<u>Skillnader mellan olika kräftarter och populationer</u>	11
<u>Krav på syrgashalter vid odling</u>	11
NATURLIG SYRESÄTTNING OCH FÖRSÖK MED GRAVITATIONS- LUFTARE	13
<u>Syresättning i extensiva kräftodlingsdammar</u>	13
<u>Tänkbara åtgärder för att förhindra syrebrist</u>	14
<u>Att syresätta vatten med gravitationsluftare</u>	15
<u>Verksamma processer</u>	15
<u>Utformning av en gravitationsluftare</u>	17
<u>Egna försök</u>	20
<u>Gravitationsluftarnas effektivitet</u>	22
SAMMANFATTNING	24
LITTERATUR	25
ENGLISH SUMMARY: THE OXYGEN REQUIREMENTS OF FRESHWATER CRAYFISH AND NATURAL OXYGENATION OF WATER USED IN EXTENSIV CULTURE	27

INLEDNING

Vattnets syrgashalt är en viktig och ofta reglerande faktor vid odling av vattenlevande djur. Till skillnad från de laxartade fiskarna som förekommer i svenskt vattenbruk är sötvattenskräftorna flod- och signalkräfta naturligt mycket väl anpassade för att motstå syrgasbrist. Därför är det möjligt att bedriva framgångsrik kräftodling i vatten med ganska låg syrgashalt. Det gäller dock för odlaren att veta när syrgashalterna är så låga att risk uppstår för att kräftbeståndet och odlingsresultatet tar skada. Den första delen av den här artikeln berör frågor om hur tåliga kräftor är mot syrgasbrist och hur låga syrgashalter som kan tillåtas vid extensiv kräftodling utan att man då riskerar produktionsresultatet.

Ibland, särskilt under vintern, är det nödvändigt att syresätta vattnet. När kräftodlingen bedrivs extensivt är det bra om detta kan klaras utan motordrivna pumpar eller andra apparater som kräver tillsyn och gör odlingen mer kostsam och kanske också mer riskfylld. Den andra delen av artikeln diskuterar möjligheter att underlätta naturliga processer för syresättning. Bland sådana naturliga syresättningsmetoder är luftning med hjälp av gravitationsluftare särskilt intressant vid kräftodling i utomhusdammar. De frågor som behandlas rör lämplig utformning av sådana luftare, med tanke på funktionssäkerhet och effektivitet under vinterförhållanden.

KRÄFTORS SYRGASBEHOV

Vid sjunkande syrgashalter påverkas kräftor liksom andra vattenlevande djur på en rad olika sätt utan att detta för den skull behöver leda till döden. Förutom syreupptag svarar de vattenlevande djurens andningsorgan för flera andra funktioner, för avgivande av koldioxid, vatten- och jonbalans, syra-basreglering och exkretion av kvävetmetaboliter. Det är lätt att inse att dessa funktioner kan påverkas negativt om syrgashalterna i vattnet blir alltför låga. Långvarig eller upprepade syrgasbrist leder också till fysiologisk stress, vilket kan innebära minskad tillväxt och även mindre motståndskraft mot sjukdomar.

Lägsta acceptabla syrgasnivåer vid odling är en fråga om biologi och ekonomi

Vid odling vore det naturligtvis bra om syrgashalterna alltid kunde hållas vid eller nära mättnad. Vid intensivare skötsel med utfodring särskilt vid höga temperaturer är detta säkert också nödvändigt för att erhålla optimal tillväxt. I extensivare odlingsformer är sådana höga syrgaskrav både tekniskt och ekonomiskt svåra att uppfylla. I extensiva system är inte heller kraven biologiskt motiverade, eftersom kräftan kan överleva och tillväxa även under betydligt lägre syrgashalter. När kraven på syrgashalt vid utomhusodling ställs, måste hänsyn också tas till att kräftornas behov av syrgas varierar mycket under året. För högt satta kvalitetskrav innebär att onödigt höga krav ställs på odlingens utformning och skötsel. Likaså kan för högt satta kvalitetskrav missleda oss i att inte utnyttja många i och för sig helt acceptabla vattentillgångar eller att investera i onödiga pumpar och syresättningsapparater. Vi skulle också undandra oss den ekonomiskt och ekologiskt intressanta möjligheten att utnyttja naturligt uppbyggda ekosystem för lågteknologisk kräftodling (Ridderstolpe 1985). Därför är det ur flera synpunkter angeläget att identifiera risknivåer för syrgasbrist och att fastställa syrgaskriterier vid olika former av odling. I denna uppsats är fokus ställd på extensiv odling av signalkräfta.

Att bestämma toleransnivåer för syrgasbrist

Underskott på syre uppträder regelmässigt i de flesta naturliga vatten. De flesta vattenlevande djur har därför möjligheter till en rad anpassningar för att tåla låga syrgashalter, naturligtvis inom vissa gränser. Olika arter eller populationer kan uppvisa stora variationer i detta avseende. Skillnaderna är genetiskt betingade och speglar ofta väl den syrgasmiljö där organismen naturligt lever och har utvecklats. Allmänt gäller att strand- och bottenlevande djur i varma, näringsrika vatten uppvisar hög grad av anpassning, medan djur i kalla, öppna eller rinnande vatten är betydligt sämre rustade för att möta sjunkande syrgashalter.

Mycket arbete har utförts för att bestämma olika vattenlevande djurs behov av syrgas och hur de reagerar vid syrgasbrist (syrgasbrist = hypoxia, dvs halter under syrgasmättnad). Sådana försök utförs i regel i laboratorium, så att faktorer som syrgashalt och temperatur noggrant kan bestämmas och regleras (Davis 1975). Försöken ger möjlighet att registrera fysiologiska reaktioner och anpassningsmekanismer vid olika grad av syrgasbrist och vid olika temperaturer, vilket ger värdefull ledning för att bestämma toleransnivåer och kvalitetsnormer.

I äldre försök är toleransnivåerna för syrgasbrist definierade som den syrgasnivå då dödlighet inträffar hos försöksdjuren. Numera är det vanligare att fysiologer uttrycker ett djurs toleransnivå som "kritisk syrgasnivå", P-crit (critical pressure). P-crit definieras som det syrgastryck då djuret inte längre förmår behålla sin basala metabolism, dvs sin syrekonsumtion i vila. Eftersom djuret förmår upprätthålla sina naturliga kropps-funktioner ner till P-crit är detta ett bra uttryck för de minimikrav som bör ställas på syrgashalter i sjöar och vattendrag (Davis 1975). Det har visat sig att ett vattenlevande djurs förmåga att uthärda syrebrist varierar under olika miljöförhållanden och med olika årstider. Bästa indikationen på ett djurs toleransnivå bör därför erhållas om olika grupper av försöksdjur kan följas under en längre tid, i vattenmiljöer med olika syrgashalt och i samspel med naturliga omvärldsfaktorer.

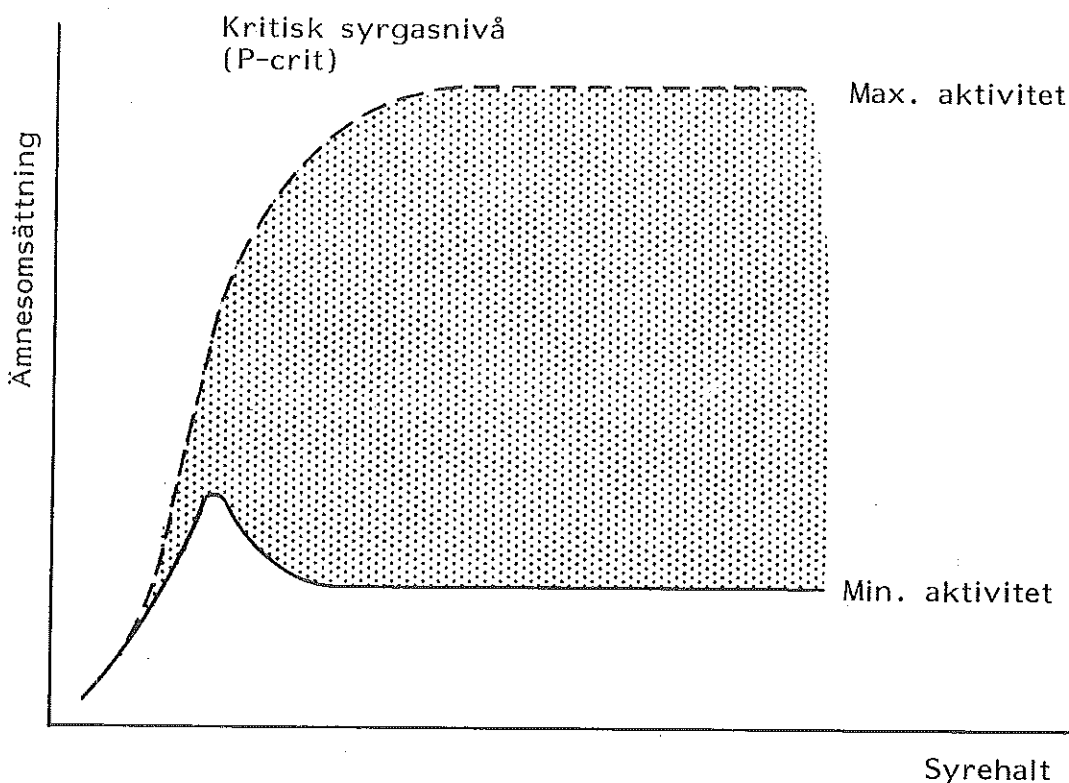
Att andas i vatten

Andning innebär att syrgas upptas samtidigt som koldioxid avges. Eftersom gasutbytet är en passiv process, som kommer till stånd genom diffusion, krävs för att det ska fungera en skillnad i gasernas partialtryck mellan djurets kroppsvävnad och omgivande vatten. I jämvikt med luft är vattnet mättat på syre, dvs dess syrgastryck är detsamma som luftens. Vid normalt lufttryck och temperaturer motsvarar syrets partialtryck 154-158 mm Hg (ca 20% av 760 mm Hg). De flesta vattenlevande organismer har ett inre partialtryck kring 50-100 mm Hg (Davis 1975) och kräver således minst en mättnadsgrad på mellan 30-60%.

Vissa djur lever i sin naturliga miljö ständigt eller tidvis under betydligt sämre syrgasförhållanden men kan ändå bibehålla normal andning. Sådana arter utmärker sig ofta av stora effektiva organ för gasutbyte. De kan också "sänka" sitt inre partialtryck genom att ha ett blodsystem där särskilt effektiva syrebärande blodämnen ingår. Till denna kategori vattenlevande djur hör sötvattenskräftorna.

Om en kräfta eller ett annat vattenlevande djur utsätts för vikande syrgashalter följer dess reaktionsmönster ett karaktäristiskt förlopp (Figur 1).

Inledningsvis, då syrgashalterna sjunker, påverkas inte syreupptaget eller metabolismen. Andningen under detta intervall kan sägas vara oberoende av syrgashalt, eftersom hastigheten med vilket blodet upptar syre ur vattnet och avger det till kroppens



Figur 1. Förhållande mellan ett vattenlevande djurs ämnesomsättning (syrgasbehov) och vattnets syrgashalt. Då syrgashalterna sjunker minskar möjligheten till bibehållen ämnesomsättning (rasterat område), för att slutligen upphöra helt. Vid denna punkt, den kritiska syrgasnivån (P-crit) (Hughes 1981), reagerar djuret med ökade andningsrörelser. Genom fysiologiska förändringar i blodet kan därefter ämnesomsättningen hos vissa djur återgå till normal, trots fortsatta låga syrgashalter.

vävnader hela tiden är tillräcklig för att kompensera det som förbrukas. Utrymmet för ökad metabolism är emellertid krympande för att slutligen upphöra helt, Vid denna nivå, P-crit, som är olika för olika arter reagerar djuret med ökade andningsrörelser. På detta vis kan mer syre transporteras via blodet. Andningsrörelserna är emellertid energikrävande och vid en viss syrgashalt överstiger dessa energikostnader det metaboliska värdet av det ur vattnet upptagna syret. När denna gräns är nådd krävs ytterligare anpassningsmekanismer för att djuret skall kunna fortleva.

Den anpassningsbara kraften

Sötvattenskräftornas fysiologiska reaktionsmönster vid syrebrist har ingående studerats av McMahon och hans medarbetare (McMahon 1985, McMahon et al. 1974, Wilkes & McMahon 1982, McMahon & Wilkes 1983). De studerade arterna är Orconectes rusticus, O. virilis och signalkräfta Pacifastacus leniusculus.

Kritiskt syrgastryck (P-crit) inträder hos dessa arter vid 20-30 mm Hg, vid +15°C. (Ungefär 16% mättnad eller uttryckt i syrgashalt 1.5 mg/l.) Kräftorna reagerar i detta skede med att pumpa mer vatten genom sina gälhålor över gälarna. Också blodflödet ökas genom att hjärtats slagfrekvens och slagvolym ökas. Efter 3-4 dygn i denna stressituation normaliseras andningen åter, dvs kraften erhåller åter tillräckligt med syre utan att ägna sig åt energikrävande pumpverksamhet.

Förklaringen är att en fysiologisk förändring i blodet har skett så att syrets bindningsbenägenhet (affinitet) till hemocyanin, som är kräftornas molekylära syretransportör i blodet, har ökat. Till en början ökar syrets bindningsbenägenhet till hemocyanin när blodets pH höjs, så kallad Bohr-effekt. pH-höjningen är en följd av att koldioxidtrycket (kolsyran) minskar i blodet under det effektivare gasutbytet. Bohr-effekten är alltså endast av tillfällig natur, sammankopplad med den ökade andningsverksamheten. Men eftersom andningsrörelserna hos kräftorna återgår till normal nivå, trots den oförändrat låga syrgasnivån (kurvan i Figur 1 har flyttats till vänster) måste ytterligare kompen-

rande mekanismer inträda. McMahon antar att lactat (mjölksyra) är en sådan varaktig modulator som förhöjer hemocyaninets syrgasaffinitet.

McMahon har också visat att vid ytterligare och långvarig syrebrist är kräftorna kapabla till ännu fler nivåer av acklimatisering. Tex inbegriper detta en övergång till nya enzymsystem som kan arbeta effektivt även vid mycket låga syrgastryck.

Inte ens total syrebrist behöver innebära döden för dessa hårdhudade djur. Uppstår en sådan situation övergår kräftorna till mjölksyraandning. Detta är emellertid en verksamhet som kostar mycket energi och kan därför bara vara en lösning på kortare sikt.

De flesta kräftarter, inklusive signalkräfta och flodkräfta, har förutom de här nämnda fysiologiska mekanismerna ett betydligt enklare sätt att möta syrgasbrist under P-crit. De övergår helt enkelt till luftandning genom att sätta sig i vattenbrynet för att omväxlande ventilerar sina gälar.

Kräftans förmåga till mjölksyraandning och luftandning är ytterlighetsexempel på en utomordentligt långt driven anpassning. Även om de är att betrakta som nödlösningar är de belysande för kräftans "strategi" att kunna utnyttja näringsresurser i syrgasfattiga miljöer och att kunna överleva tillfälliga kritiska situationer.

Toleransnivåer hos signalkräfta och kvalitetsnormer vid extensiv odling

Kräftans behov av syrgas varierar med dess aktivitet. Aktiviteten i sin tur bestäms huvudsakligen av vattnets temperatur. Aktiviteten, dvs behovet av syre är med stor sannolikhet också hormonstyrd och avhängig årstiden. Ett illustrerande exempel på temperaturens och årstidens betydelse ger en studie utförd av Blazka (1958). Han visade att ruda (Carassius carassius) kan överleva syrefritt vatten i minst två månader vid +5°C. Men vid en vattentemperatur på +15 till +20°C klarade den sig

inte längre än 3-33 timmar. Variationen i överlevnad vid den högre temperaturen var beroende av vid vilken årstid försöken utfördes (Hargeby 1985).

Det är möjligt att låga syrgashalter kan vara särskilt kritiska för kräftorna under den tidiga våren. Furst (muntl.medd.) hänför dödlighet hos signalkräftor, som observerats efter ovanligt sen islossning i en Uppländsk sjö, till den ökade aktivitet som be-tingades av det förändrade ljusklimatet.

Absoluta uttryck

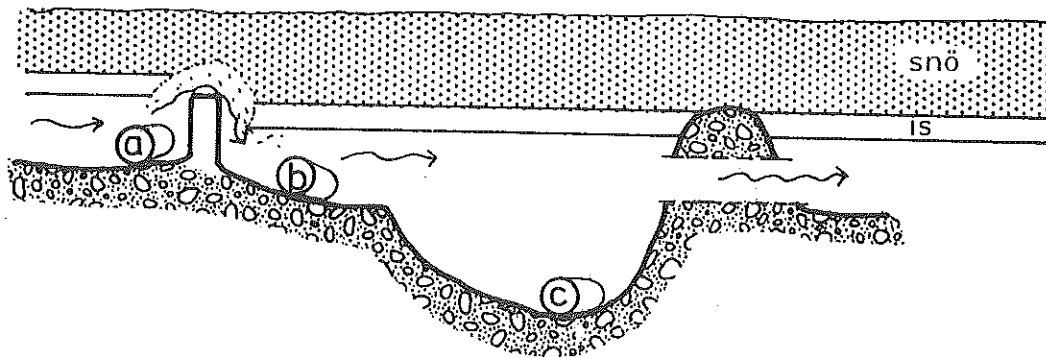
Lindroth (1950) konstaterar att vid +15°C har flodkräftan (Astacus astacus) svårighet att bibehålla optimalt syreupptag då syrgashalterna sjunker under 5 mg/l, men att de överlever längre tid utan skador i syrgashalter ned till 2 mg/l. (Ca 50% mättnad, 80 mm Hg resp 20% mättnad och 32 mm Hg.) Davis (1975) anser att 40 mm Hg skall betraktas som den lägsta gräns över vilken långsiktig överlevnad och reproduktion hos sötvattenskräftor i allmänhet kan garanteras i naturliga vatten ("no effect level"). McMahon (1985) fastställer från laboratorieför-sök utförda vid +15°C det kritiska syrgstrycket till 20-30 mm Hg för bl a signalkräfta (Pacifastacus leniusculus). (Detta motsvarar ca 1.3-1.8 mg/l eller 13-19% mättnad.) Hogger (muntl. medd.) uppmätte i en odlingsdamm med signalkräfta i södra Eng-land regelmässiga syrgashalter under 20% mättnad under september och oktober månad, då vattentemperaturerna var mellan +14 och +16°C. Vid ett tillfälle i början av oktober uppmättes så låg syrgashalt som 1.2 mg/l (11.8% mättnad) i odlingens ytvat-ten. Hamilton (muntl.medd.) anger liksom Karlsson (muntl.medd.) 2 mg/l som kritisk gräns för signalkräfta.

I den ovan nämnda sjön, som hyser en god kräftproduktion av sig-nalkräfta, kan syrgashalterna understiga 3 mg/l under vintern (Furst muntl.medd.). En noggrann kartläggning av syrgashalterna av denna sjö gjordes under 1963 under vårvintern i samband med att luftningsstudier skulle utföras. Vid undersökningstillfället i mitten av mars hade vinterstagnationen framkallat en kraftig, från botten utgående syrebrist. De bottenära skiktens syrgas-

mättnad understeg överlag 10%. Vatten med mycket låga halter (mindre än 2 mg/l) följde bottenprofilen nästan ända upp till isen. Syrerikt vatten fanns endast en bra bit från botten och stränder i sjöns centralare och ytnära delar (Karlgrén & Lindgrén 1963). När undersökningen genomfördes var kräftbeståndet redan etablerat i sjön.

I mitt eget projekt "Kombinerat vattenbruk, jordbruk och faunavård på försumpad åkermark", kunde likaså framgångsrik övervintring vid låga syrgashalter konstateras hos signalkräfta då några rombärande honor hölls i sump i ett avvattningsdike i projektområdet. Under en tvåveckorsperiod i februari sjönk syrgashalterna under 2 mg/l, vid ett tillfälle så lågt som 1.5 mg/l.

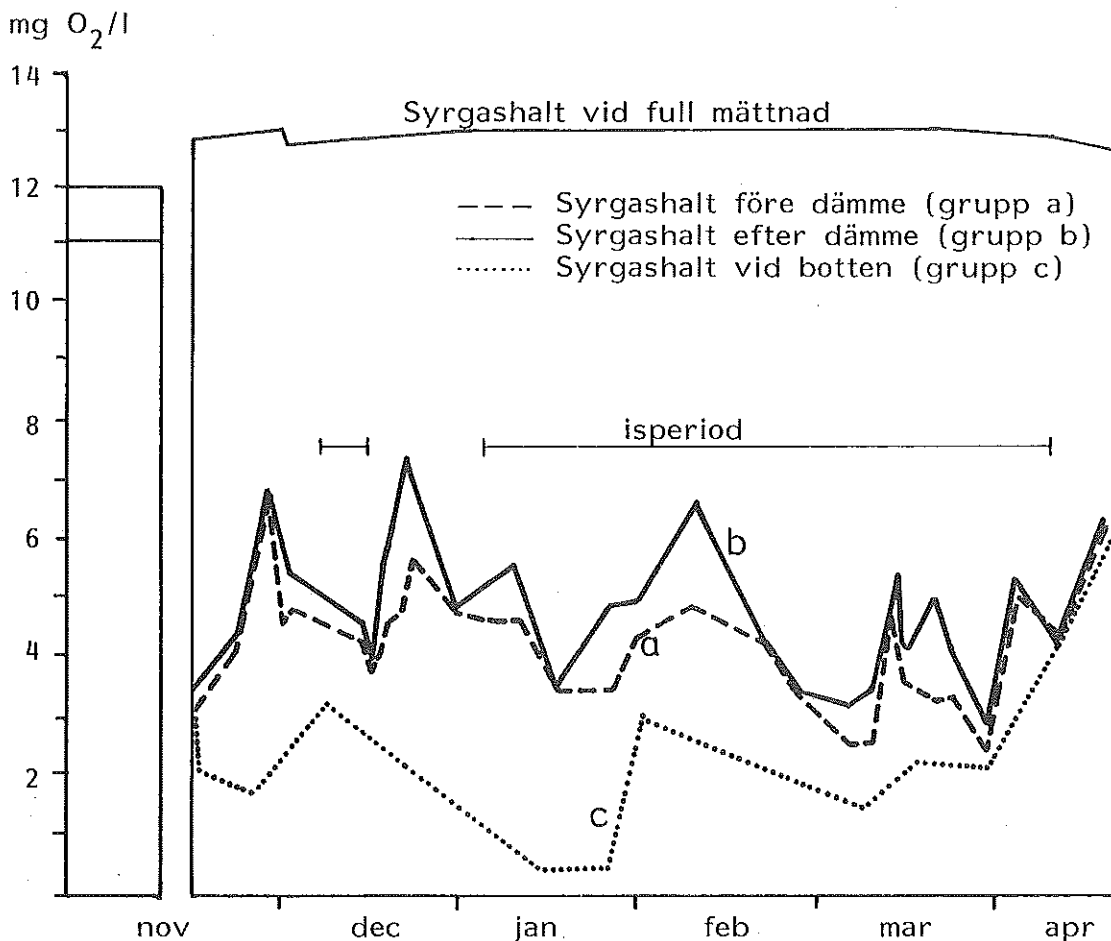
I ett utvidgat övervintringstest på samma lokal studerades överlevnad och romkläckning hos signalkräfter utsatta för låga syrgashalter. Försöket utfördes i en mindre grävd damm i vilken sammanlagt 15 könsmogna djur, inklusive rombärande honor, hölls i burar (40x7.5 cm pvc-rör). Rören fördelades på tre olika platser där syrgashalterna förväntades vara olika under vintern (Figur 2).



Figur 2. Övervintringsdamm, som används för att studera överlevnad och romkläckning hos signalkräfter utsatta för olika grad av syrgasbrist. Grupper av kräftor hölls i gallerförsedda rör på tre olika platser (a, b och c) med olika syrgasmiljö.

Under försöket som påbörjades i mitten av november 1984 mättes syrgashalt och temperatur regelbundet eller minst två gånger per vecka. Då det avslutades i början av april hade samtliga kräftor överlevt utom de som placerats vid botten (grupp c). Här sjönk syrgashalterna tidigt till mycket låga värden, ner till

eller strax ovan 0 mg/l, på grund av skiktning av vattnet. På de andra platserna var syrgashalterna fluktuerande med medelvärde på 4.0 mg/l före dämnet (grupp a) och 4.6 mg/l efter dämnet (grupp b) då en viss syresättning av vattnet hade uppkommit. Lägsta syrgashalt före dämnet uppmättes till 2.3 mg/l (19% mättnad eller ca 30 mm Hg) i mitten av november, och 2.7 mg/l (22% eller ca 34 mm Hg) i början av mars. Efter dämnet var syrgashalterna som lägst strax över 3.0 mg/l. Syrgasförhållanden och överlevnad framgår av Figur 3. Som framgår av Tabell 1 är vattnet där djuren hölls mycket "jonstarkt". Hög alkalinitet och hårdhet och en hög halt av närings- och humusämnen är utmärkande för vattnet.



Figur 3. Försöksdjuren utplacerades i mitten av november på försöksplatsen efter att ha tillbringat hösten i ett varmare och nära syremättat vatten (stapeln till vänster i diagrammet). Av figuren framgår hur syrgasförhållandet var vid de tre övervintringsplatserna. Försöksdjuren vid botten (c) omkom under senvintern medan samtliga övriga försöksdjur överlevde. Honornas rom utvecklades och kläcktes normalt. De två staplarnas övre begränsningslinjer markerar syrgasnivåer vid mättnad.

Tabell 1. Vattnets kemiska sammansättning illustrerad med ett vattenprov taget i mitten av februari då syrgashalterna var särskilt låga. Som synes är alkalinitet och hårdhet mycket hög. Vattnet är också rikt på närings- och humusämnen.

COD _{Cr}	mg/l	34	NH ₄ ⁺	mg/l	0.55
PO ₄ -P	ug/l	190	NO ₃ ⁻	mg/l	1.3
Tot-P	ug/l	210	SO ₄ ²⁻	mg/l	81
Kjeldal-N	mg/l	1.59	Cl ⁻	mg/l	17.3
Färgtal	mg Pt/l	100	Mg ²⁺	mg/l	9.3
Kondukt	mS/m	71.2	Ca ²⁺	mg/l	130
pH		7.45	Na ⁺	mg/l	21.8
Alk	mekv/l	5.54	K ⁺	mg/l	5.8

Flera av försöksdjuren hölls under påföljande vår och eftersommar isolerade i större burar. En normal romutveckling och yngelkläckning kunde därvid konstateras. Det kunde också konstateras att tillväxten var god, både hos yngel och vuxna individer senare under sommaren och hösten.

Relativa uttryck

En bra indikation på kräftans härdighet mot syrgasbrist är att jämföra den med andra arter vars överlevnad och reaktionsmönster vid syrgasbrist är mer kända. Sålunda brukar kräftan placeras in mellan mört och ruda i toleranshänseende. I ett större tråg i en fiskodling i Småland, där olika fiskarter hölls tillsammans med flodkräftor, frös tilloppet och allvarlig syrebrist uppträdde. Vid upptäckten var samtliga individer av gädda, abborre, ål och mört döda. Samtliga spegelkarpar var svårt medtagna och dog senare. De enda som överlevde krisen var sutare och kräftorna (Hargeby muntl.medd.).

Ett försök att placera in kräftan efter olika arters relativa tolerans mot syrgasbrist görs i Figur 4.

låg tolerans

hög tolerans

laxfiskar < lake < gös < gädda < abborre < mört < braxen < ål < kräfta < sutare < ruda

Figur 4. Signalkräftans tolerans mot syrgasbrist i relation till olika svenska fiskarter. (Omarbetat efter Hargeby (1985).)

Skillnader mellan olika kräftarter och populationer

Skillnader mellan signalkräftans och flodkräftans syrgasbehov eller tolerans mot syrgasbrist finns ej belagda. Arterna tycks vad gäller födoval, uppehållsmiljö och övriga levnadssätt vara varandra mycket lika, varför autekologiska anpassningar till omgivningsfaktorerna också bör vara likartade. Den hitförda signalkräftan hör ursprungligen hemma i ett varmare klimat än vårt (medelhavsklimat) och har följaktligen ett högre värmeoptimum för tillväxt än vår inhemska flodkräfta (FRN 1982). Därför är det sannolikt att genetiska skillnader utvecklats till förmån för en bättre syrgasupptagande förmåga hos signalkräftan jämfört med flodkräftan.

Det är möjligt att inomartsvariationerna i syrgastolerans hos flod- och signalkräfta är mer påtaglig än skillnaderna mellan arterna. Morrissy et al. (1984) jämförde toleransen för syrgasbrist hos två australiska sötvattenskräftor, Cherax tenuimanus och C. albidus. Dessa två arters naturliga levnadssätt och livsmiljöer är något skilda, på så vis att C. albidus lever i tillfälliga ofta mycket näringsrika miljöer medan C. tenuimanus lever under mer stabila förhållanden i näringsfattiga floder. Laboratorieförsök visade att C. albidus var kapabel att tillfredsställa sitt syrgasbehov vid lägre syrgasnivå än C. tenuimanus. Det visade sig också att mindre exemplar kunde utstå lägre syrgashalter än större. I själva verket var skillnaderna i tolerans mer kopplad till storlek än till art.

Krav på syrgashalter vid odling

Några viktiga slutsatser som kan dras av det som behandlats ovan är att sötvattenskräftorna naturligt är mycket väl anpassade till att leva under låga syrgasförhållanden. De är kapabla till mycket långt driven fysiologisk anpassning som svar på såväl kortvariga och plötsliga syrgasfall som längre perioder med svår syrgasbrist, särskilt vintertid. Signalkräftan är i toleranshänseende närmast att jämföras med ål och ruda, arter som är kända för att vara mycket tåliga för syrgasbrist.

Under vintern, då vattentemperaturen ligger runt +1 till +3°C, är födointag och metabolism hos kräftorna mycket låg. Mycket låga syrgashalter är då tillräckligt för att tillfredsställa djurens behov. Sommartid däremot, då vattentemperatur och kräftans aktivitet ökar, måste kvalitetskraven ställas högre. Under tillväxtsäsongen kan naturligtvis fysiologisk stress till följd av syrebrist vara förödande för produktionsresultatet.

Vid extensiv odling av signalkräfta bör man under vintern utan att riskera produktionsresultatet kunna acceptera syrgasnivåer ner till 15% syrgasmättnad (2 mg/l eller 25 mm Hg). Detta kvalitetskrav "no effect level" för signalkräfta gäller vid 0 till +3°C och under förutsättning att vattnet i övrigt är av god kvalitet.

Som motsvarande riktvärde för lägsta syrgasnivå sommartid, bör 50% mättnad (80 mm Hg) kunna gälla. Detta motsvarar överfört till normala sommartemperaturer syrgashalter omkring 4-5 mg/l.

NATURLIG SYRESÄTTNING OCH FÖRSÖK MED GRAVITATIONS LUFTARE

I vattnekosystemet är tillgången på syre mindre än i luften. Även vid syremättnad kan vatten endast lösa en tjugondel av vad luften innehåller. Av stor betydelse för vattenlevande djur och växter är att syrgaskoncentrationerna kan variera kraftigt eftersom de processer som verkar koncentrationsutjämnande, t ex för att tillföra nytt syre som förbrukats vid mikrobiell nedbrytning av växtsubstans, är mycket ineffektiva i vatten. Diffusion, som är en sådan viktig process, är t ex omkring en miljon gånger långsammare i vatten än i luft. Syrgasbrist uppstår lätt. Särskilt känsliga är mindre vattenmagasin med näringsrikt vatten och lång omsättningstid.

Syresättning i extensiva kräftodlingsdammar

Genom att se till att biomassa inte ansamlas i odlingen kan syrgasbrist motverkas. Positivt, ibland nödvändigt, är att syresätta vattnet. I det lågteknologiska vattenbruket är det angeläget att detta klaras utan motordrivna pumpar och syresättningsapparater. I stället för att utnyttja elström eller andra drivmedel (artificiell syresättning) finns möjligheter att utnyttja den energi och de processer som i naturen tillför syre till vattnet (naturlig syresättning).

Behovet av syresättning varierar med naturförutsättningar, odlingens inriktning och odlingsintensitet, men också med årstiden. Vintern brukar vara den mest kritiska perioden. Då ligger is och snö som ett lock på vattnet och förhindrar både gasutjämnande processer och de vattenlevande växternas fotosyntes. Är tillförseln av nytt vatten till odlingsdammen liten eller är det tillrinnande vattnets syrgashalter låga blir ofta syresättning nödvändigt under denna tid.

Under vår, sommar och höst, då isfria förhållanden råder, är vägverkan och syretillförseln genom växternas fotosyntes i regel tillräckliga för att garantera överlevnad och tillväxt hos kräftorna. Men problem med syrgasbrist kan uppkomma även under sommaren. Med stigande temperaturer ökar ju kräftornas syrgasbe-

hov, varför de blir känsligare för syrgasbrist. Samtidigt tenderar vattnet med stigande temperatur att skiktas, vilket försvårar nedblandningen av syrerikt ytvatten till de syrefattigare bottarna. Under längre stagnationsperioder med varmt och stilla väder riskeras produktionen av kräftor på djupare bottnar att minska eller upphöra helt.

Akut syrgasbrist kan möjligen uppkomma i samband med kraftig utfodring och höga vattentemperaturer. Under svenska klimatförhållanden krävs en ansevärd odlingsintensitet eller belastning av syretärande ämnen för att reducera syrgashalterna i vattenmassan till kritiska nivåer. I varmare klimatområden är däremot skadliga dygnsfluktuationer i syrgashalt ett vanligt och välkänt förhållande inom vattenbruket. Boyd (1982), som i delstaten Alabama i USA studerat problemet ingående nämner t ex att där kan kritiska syrgasnivåer (<2 mg/l) uppkomma nattetid i högproducerande catfish-dammar. Det inträffar i dammar med en produktion över 4 000 kg/ha/år och då sommarnatten är längst, samtidigt som vattentemperaturerna är så hög som +25 till +30°C.

Tänkbara åtgärder för att förhindra syrebrist

Syret i vattnet konsumeras vid nedbrytningen av död växt- och djursubstans och genom de levande organismernas andningsprocesser. Förbrukningen av löst syrgas kan kompenseras via i princip två skilda vägar. Dels från luften genom gasutjämnande processer och dels genom planktons och andra vattenväxters fotosyntes. Flera möjligheter för att förebygga syrgasbrist i en odlingsdam är därför tänkbara:

- 1) Odlingens form och bottentopografi kan utformas så att förutsättningarna för våg- och vindverkan underlättas under den icke isbelagda delen av året. Raka smala diken eller kanaler ger dåliga förutsättningar för god vattenomblandning. Bättre är rundade ovala former, där de längsta sammanhängande vattenytorna återfinns i den vindriktning som är förhärskande under sommarens högtrycksperioder. De djupare bottarna bör göras sammanhängande. Träd och buskage är vinddämpande och bör undvikas i alltför hög utsträckning runt odlingsdammen.

- 2) Vattenmagasinets volym/ytaförhållande kan ökas genom utgrävning eller muddring. Detta innebär att odlingen har möjlighet att magasinera mer syre då vintern börjar. Positivt är också att syretärande växtlighet och sediment avlägsnas. Metoden är tillämplig vid restaurering av småvatten, typ mägergravar, och har betydelse främst då vattenomsättningen är liten.
- 3) Syrekonsumtionen i vattnet kan minskas genom att man förhindrar att syretärande biomassa ansamlas. Detta är särskilt viktigt där vattenomsättningen är låg.
- 4) Fotosyntesen kan stimuleras genom att förutsättningarna för solinstrålning och algproduktion förbättras. Metoden att ploga bort snö från isen är gammal inom dammbruket men har inte studerats tillräckligt för att tillåta bedömning om åtgärdernas betydelse och effekter.
- 5) Förutsättningarna för gasutjämning mellan luft och vatten kan förbättras. En inom dammbruket särskilt intressant sådan syresättningsmetod är att lufta vatten med hjälp av gravitationsluftare. Metoden kräver rinnande vatten, där en nivåskillnad kan skapas med hjälp av ett dämme. Lägesenergin som frigörs i potentialsprånget utgör drivkraften för den mekaniska omblandning av vattnet som är nödvändigt för att göra gasutjämningen effektiv. Syresättning med gravitationsluftare kan som redovisas nedan göras relativt effektiv även vid små fallhöjder. Värdefullt är också att nödvändiga installations- och underhållskostnader kan hållas mycket låga.

Att syresätta vatten med gravitationsluftare

Verksamma processer

Diffusion och dispersion är de två processer som verkar gasutjämnande mellan luften och vattnet. Dessa processer kan sägas motsvara de två steg som förenklat beskriver syrets överföring från luft till vatten. Det första steget inbegriper syrets diffusion från luft till vatten medan det andra steget innebär syrets omblandning (dispersion) därifrån vidare in i vattenmas-

san (Weber 1972). Möjligheterna att genom gasutjämning syresätta vatten ligger i att underlätta dessa processer.

Diffusion är den molekylära rörelse av ett ämne som uppstår till följd av en gradientskillnad i ämnets kemiska potential. För gaser, som i detta fall syrgas, uppstår diffusion om skillnader i gasens partialtryck föreligger.

Dispersion är den sammanlagde effekten av diffusion och andra omblandande krafter. Dispersionen verkar i samma riktning som diffusionen och kallas ibland för Eddy diffusion (Drever 1982).

Varje steg i gasutjämningen kan vara begränsande för förloppets hastighet. I ett fullständigt stillastående vatten bestäms hastigheten enbart av diffusion. Mängden syrgas som kan överföras på detta vis till ett vatten beror förutom på det aktuella syrgasunderskottet och vattentemperaturen av vattenytans (kontakt-ytans) storlek. Eftersom diffusion i vatten är en mycket långsam process, krävs i alla praktiska sammanhang att den fortsatta transporten av syre från vattenfilmen och ned i vattenmassan ombesörjs av fysikalisk omblandning. Graden av fysikalisk omblandning är också reglerande för syreöverföringen i naturliga vatten (Welch 1968).

Mängden syre som kan lösa sig i vatten (C_s) bestäms av syrets partialtryck i luften (P) (del av det totala trycket) och av syrets löslighetskonstant (absorptionskoefficient) i vatten, K_h . Sambandet kan uttryckas med ekvationen $C_s = K_h \times P$ (Henrys lag). Löslighetskonstanten, K_h , varierar med vattnets salthalt och andra lösta ämnen. Ett förorenat vatten löser t ex något mindre än ett rent. Temperaturen har mycket stor betydelse. Ett vatten löser sålunda vid fryspunkten nära dubbelt så mycket som vid $+30^\circ\text{C}$ (Tabell 2).

Eftersom temperaturen påverkar syrets löslighet i vatten så mycket, är det egentligen ofta mer relevant att uttrycka syrgasnivåer i partialtryck eller mättnadsgrad snarare än i halter och mängder. Det gäller t ex vid uttryck och jämförelse mellan olika syresättningsmetoders effektivitet men också i fråga om vat-

tenkvalitetsbedömning. Från tidigare avsnitt om kräftors syrgasbehov kan slutas att det är tryck och tryckskillnader, som avgör om det vattenlevande djuret kan och hur effektivt de kan tillgodogöra sig syret i vattnet, medan temperaturen framförallt bestämmer hur mycket syre de behöver.

Tabell 2. Den lösta syrgasens jämviktskoncentration (C_S) vid olika temperaturer och höjd över havet (Truesdale et. al 1955).

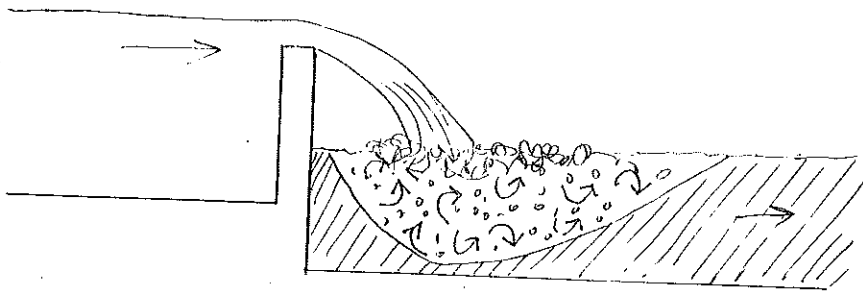
Temperatur °C	C_S (mg/l) vid höjd över havet på:		
	0 m	500 m	1000 m
0	14.16	13.29	12.51
2	13.40	12.58	11.84
4	12.70	11.92	11.23
6	12.05	11.31	10.66
8	11.47	10.76	10.13
10	10.92	10.25	9.65
12	10.43	9.78	9.22
14	9.98	9.36	8.82
16	9.56	8.97	8.45
18	9.19	8.62	8.12
20	8.84	8.30	7.82
22	8.53	8.00	7.54
24	8.25	7.74	7.29
26	7.99	7.50	7.06
28	7.75	7.27	6.85
30	7.53	7.07	6.65

Utformning av en gravitationsluftare

Gravitationsluftare kan utformas på många sätt. Principen för dem alla är att de ökar kontaktytan (kontakttiden) mellan luft och vatten och att de tillför vattnet rörelseenergi för att tvinga vattnet i turbulens. På detta vis underlättas både diffusion och dispersion av luftens syre in i vattenmassan. Ett rinnande eller fallande vattens rörelser är mycket komplicerade och svåra att i detalj förutsäga. Temperatur och hastighet som i ett naturligt vatten varierar kraftigt, är bara två faktorer som påverkar dess rörelsebeteenden och därmed de gasutjämnande processerna. Det är svårt, kanske omöjligt, att beräkna hur gravitationsluftaren skall utformas för att fallhöjden i ett vattendrag maximalt skall utnyttjas för syresättning. I praktiska och ekonomiska sammanhang får empiriska försök med luftare av olika utföranden vara vägledande för vilken utformning som skall väljas i olika situationer.

I praktiskt bruk och beskrivna i litteraturen finns gravitationsluftare som är utformade på en mängd olika sätt. Två huvudtyper av gravitationsluftare kan emellertid urskiljas, även om ingen strikt gräns mellan dem kan sättas. I den första huvudtypen, här kallad "enskiktad luftning", sker syresättningen väsentligen i vattenvolymen under fallet (Figur 5). Potentialsprånget utnyttjas för att ge det fallande vattnet så stor rörelseenergi som möjligt. Gasutjämnningen sker framförallt inom en begränsad zon, "beluftningsvolymen" (Kayser & Stegman 1975), till vilken det fallande vattnet drar ner luft och inom vilken vattnet sätts i kraftig turbulent rörelse, "hydraulic jump" (Khudenko 1979).

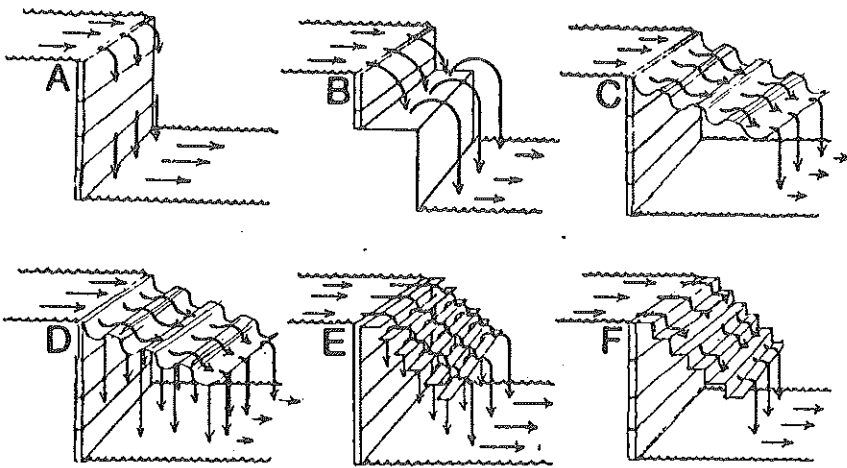
Faktorer som i den enskiktade luftaren väsentligen påverkar luftningsprocessen av ett vatten är: flödet, fallhöjden, vattendjup under fallet samt överfallets (forsnackens) utseende.



Figur 5. Enkelt överfall (Kayser & Stegman 1975). Vattnet syresätts framförallt under fallet "enskiktad luftning".

Det senare kan t ex utformas skarpt, flackt, sågtandat eller dubbelt sågtandat. Studier av denna typ av gravitationsluftare har ägnats åt att finna fördelaktigaste utseende på forsnacken och optimalt vattendjup för olika flöden och fallhöjder (Barret et al. 1960, Albrecht & Imhoff 1973, Kayser & Stegman 1975, Khudenko 1979).

I den andra huvudtypen av gravitationsluftare, här kallad "flerskiktad", sker syresättningen framförallt i luftrummet mellan de båda vattnytorna i potentialsprånget. Vattnet sprids ut på plattor, raster, trappsteg eller liknande anordningar (Figur 6). Av betydelse för hur dessa anordningar bäst utformas är flöde och fallhöjd. Temperaturen är också av betydelse genom att



Figur 6. Exempel på enskiktad och flerskiktade gravitationsluftare. A = enkelt överfall (simple weir), B = stänkskiva (splash-board), C = lutande korrugerad plåt (inclined corrugated sceet), D = lutande korrugerad plåt med hål (inclined corrugated sceet, E = gallerverk (lattice), F = kaskadluftare (cascad aerator) (Söderberg 1982).

kallt vatten är mer trögflytande än varmt. I modellförsök påvisade Chesness & Stephens (1971) ett linjärt samband mellan ökad temperatur och ökad syresättningseffekt. Effektiviteten hos de undersökta luftarna ökade med en faktor 0.323 per °C. Mer kraft erfordras således för att åstadkomma en viss syresättning under vintern jämfört med sommaren.

Svårigheten i att maximalt utnyttja luftrum och potentialfall i den flerskiktade luftaren är att finna den bästa avvägningen mellan stor ytkontakt mellan luft och vatten och utnyttjande av vattnets rörelseenergi. Större yta innebär effektivare gasutjämnning genom diffusion mellan luft och vatten men samtidigt minskad möjlighet att utnyttja rörelseenergi till mekanisk vattenomblandning i gasutjämningsdispersionssteg. Av denna anledning kan den flerskiktade gravitationsluftaren inte göras extremt ytförstorad.

Den flerskiktade gravitationsluftaren kan med anordningar som ökar yta och turbulens göras betydligt effektivare än den enskiktade. Fördelen med den senare är att den är enkel, billig och driftsäker. Den enskiktade luftaren används därför vid höga flöden (>50 l/s), t ex vid återluftning av renat avloppsvatten, förorenade åar och andra större vattendrag.

En flerskiktad luftare kan användas då vattenflödena är mindre (<50 l/s). Den bör väljas om kraven på syresättningen är hög och utnyttjbar fallhöjd är liten.

Egna försök

De försök som jag har utfört har belyst möjligheterna att syresätta vatten vintertid och vid små fallhöjder (<0.5 m). Frågor har gällt val av luftningsprincip, lämpligt utförande, erhållna effekter och i vilken mån snö och is medför störningar i luftarens funktion.

Försöken har utförts i ett mindre avvattningsdike i norra Uppland. Vattenflödet varierade under den tid försöken pågick, december t o m mars, mellan 0.7 och 4 l/s. Vattenkemiska data framgår av Tabell 1. Fyra olika utföranden har prövats a) enkelt överfall (enskiktad luftare), b) enkelt splashboard, c) och d) rastersystem av flyttbara plattor (Figur 7).

För att förhindra snö, isbildning och onödig nedkylning av vattnet placerades de olika luftarna i en enkel inbyggnad av trä med avtagbart isolerat tak. Syrgasbestämning gjordes av vatten ovanför och nedanför luftaren enligt Winklermetoden. Samtidigt mättes vattentemperatur och aktuell fallhöjd. Flödena kunde med upprättad pegelrelaterad avrinningskurva uppskattas med några deciliter per sekunds noggrannhet vid varje måttillfälle.

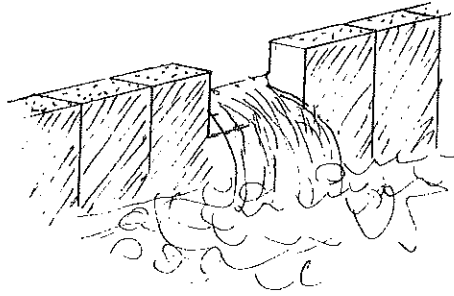
Den uppkomna ökningen av syrgas i relation till den möjliga ökningen används som ett mått på syresättningens effektivitet.

$$E = \frac{100(C_b - C_a)}{C_s - C_a} \%$$

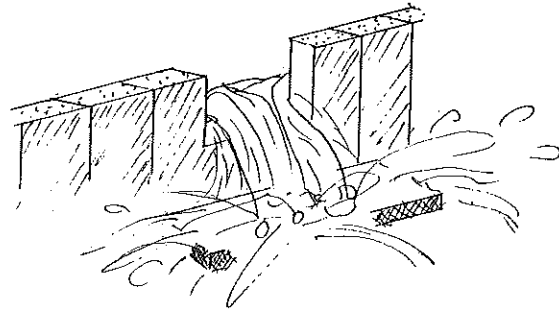
E = effekt
Ca = syrgashalt före (mg/l)
Cb = " efter "
Cs = " vid mättnad (mg/l)

Eftersom skillnaden i lägesenergi är direkt proportionell med fallhöjden har också antagits att direkt samband råder mellan effekt (E) och höjd (h) för en viss typ av luftare och ett bestämt flöde. Därför har effekten hos de olika luftarna också uttryckts som en effektkonstant (e) = E/h.

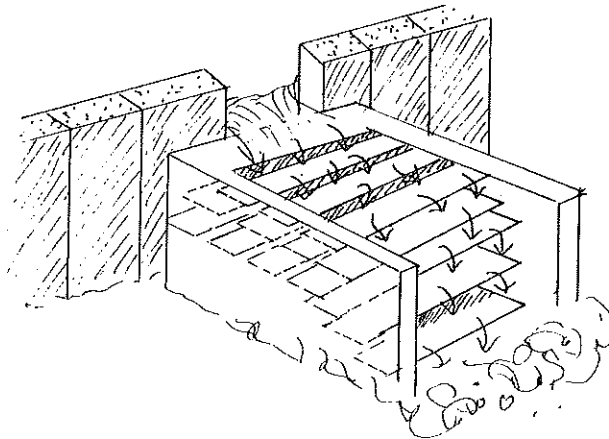
a) Enkelt överfall



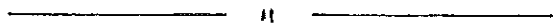
b) Stänkskiva



c) Flerdubbelt gallerverk med flyttbara plattor 35 x 40 cm. Vertikalt avstånd mellan plattorna är 4 cm.

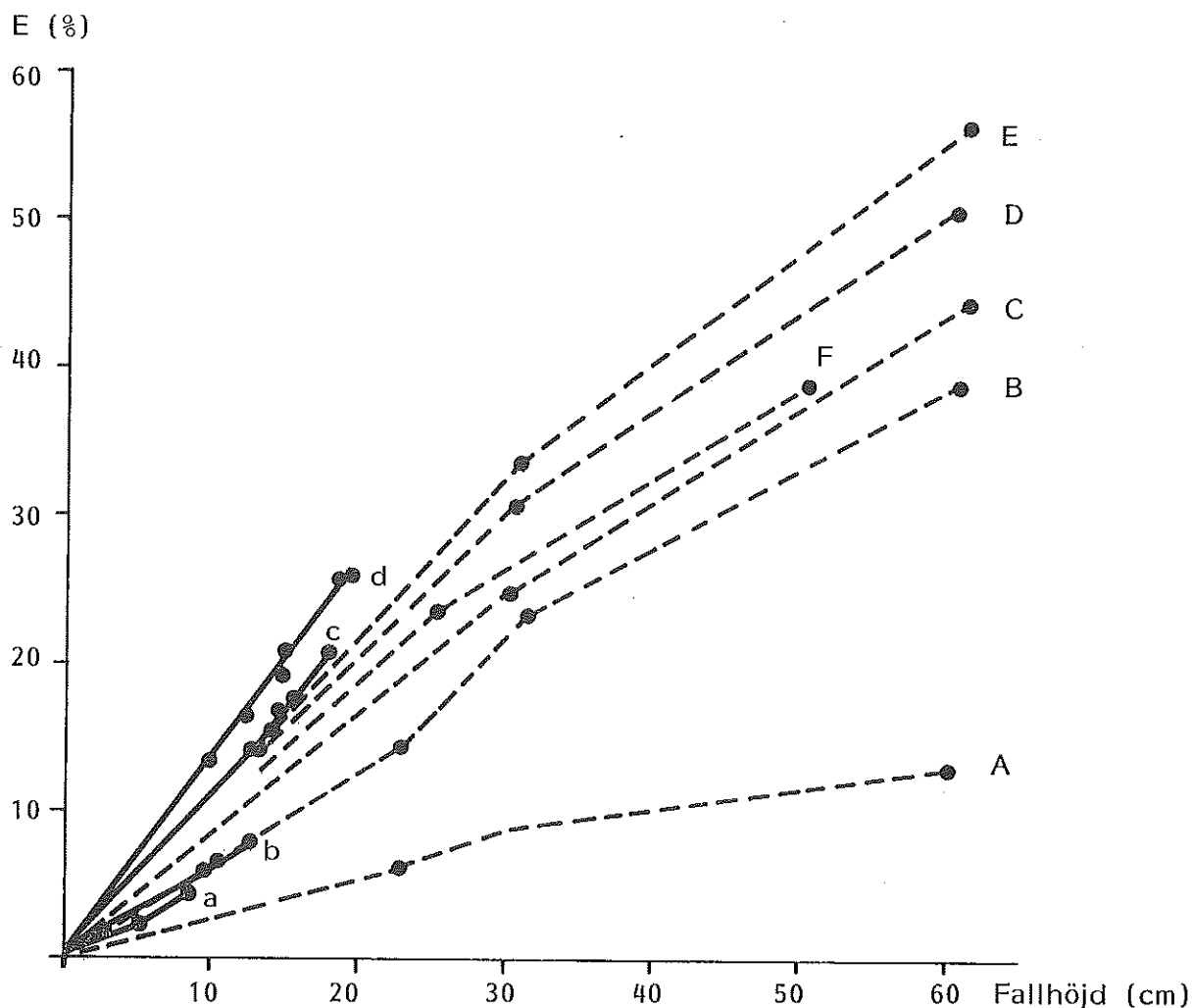


d) Som ovan men större, 45 x 60 cm. Vertikalt avstånd mellan plattorna är 2.5 cm.



Figur 7. Olika utföranden av gravitationsluftare prövades vintertid vid små flöden (0.5-4 l/s) och vid begränsade fallhöjder (<0.5 m).

Resultaten framgår av Figur 8. Som jämförelse har redovisade resultat från andra liknande försök med gravitationsluftare inritats i figuren.



Figur 8. Sammanställning av de prövade gravitationsluftarnas effektivitet vid olika fallhöjder (heldragna linjer). a = enkelt överfall, b = stänkskiva, c och d = flerdubbelt gallerverk med flyttbara plattor av olika storlek och vertikalt avstånd mellan plattorna (jmf Figur 7.). Streckade linjer markerar redovisade effekter från andra liknande försök med gravitationsluftare. A; simple weir (Haskell et al. 1960, Chesness & Stephens 1971), B; splashboard (Haskell et al. 1960, Chesness & Stephens 1971), C; inclined corrugated sheet (Chesness & Stephens 1971), D; inclined corrugated sheet with holes (Chesness & Stephens 1971), E; lattice aerator (Chesness & Stephens 1971) och F; cascade aerator (Tebutt 1972) (jmf Figur 6).

Gravitationsluftarnas effektivitet

Av kurvornas lutningar i Figur 8 illustreras de olika luftarnas skilda effektivitet. Effektiviteten (e) för de olika luftarna som prövades (a, b, c och d) var 0.6, 0.7, 1.1 resp 1.4% per cm. Dessa siffror är framräknade ur ett 40-tal mätningar som utförts vid olika flöden och fallhöjder.

Den flerdubbla rastermodellen enligt d, som gav det bästa resultatet var något bättre än den liknande och bästa luftaren (lattice) prövad och Chesness & Stephens (1971).

Ett senare försök (här inte redovisat pga otillräckliga mätdata) med en ytterligare ytförstorande luftare (1.0 x 0.5 m och 2.5 cm mellan "trappstegen") uppvisade ingen ökad syresättningseffekt. Preliminära mätresultat visade tvärtom på sämre syresättande egenskaper än både c och d i Figur 8. Med den kraftigt ytförstorande utformningen frigjordes uppenbarligen för lite kraft för att göra syrets nedblandning i vattnet tillräckligt effektiv.

De här redovisade resultaten av syresättningseffekter av de luftare som prövades gäller för flödesintervallet 0.7-4.0 l/s. Är vattenmängderna större måste de flerskiktade luftarna ges större yta för att effektiviteten skall bibehållas. En utformning av luftaren enligt c och d, kan göras effektiv vid varierande flöden. Vid små flöden utnyttjas då främre delen av luftaren; vid högre flöden kommer vattnet att bräddas ut över en större yta. Plattorna som är flyttbara och rörliga i sidled ger möjlighet till justering för att finna bästa spaltmellanrum för syresättning vid ett visst flöde.

Genom den enkla inbyggnaden av luftningsanordningen som snart översnöades uppträdde inga problem med isbildning. Ingen mätbar temperatursänkning observerades. Trots ett periodvis mycket tjockt och kompakt snötäcke kunde inga försämringar i syresättning uppmätas.

De resultat som framkommit från undersökningen kan användas för att t ex beräkna erforderlig dämningnivå (fallhöjd) för att erhålla en viss syrgasnivå i ett vatten som är tänkt att användas till odling. Som räkneexempel antas att önskemålet är att det vatten som rinner till odlingen aldrig får understiga 40% mättnad, men att nuvarande situation är sådan att syrgashalten i detta vatten periodvis närmar sig 0 mg/l. "Normalt" lufttryck och vattenkvalitet råder. Frågan är hur stor fallhöjd som krävs om det bästa utförandet av luftare väljs (d).

- Full mättnad vid temperaturen +2°C motsvarar 13.4 mg/l enligt Tabell 2. 40% mättnad motsvarar 5.3 mg/l.
- Gravitationsluftaren enligt (d) har en effektivitet på 1.4% cm, - eftersom $e = E/h$ erhålls ur ekvation (1) att:
$$h = 100(Cb-Ca)/e(Cs-Ca).$$
- Med insatta värden erhålls att en fallhöjd (h) krävs på knappt 30 cm för att kvalitetskravet 40% eller mer skall kunna uppfyllas i det aktuella vattnet.

SAMMANFATTNING

För att väl kunna utnyttja kräftodlingens ekonomiska och ekologiska möjligheter är det viktigt att identifiera kräftans toleransgränser för låga syrgashalter. Det är också viktigt att finna enkla metoder för att förebygga att skadlig syrebrist uppkommer vid odling.

Den första delen av denna artikel behandlar hur sötvattenskräftor reagerar då de utsätts för syrgasbrist och under vilken nivå, "no effect level", syrgasbristen kan medföra att kräftor och produktionsresultat tar skada. Den andra delen av artikeln behandlar några möjligheter att förebygga skadlig syrgasbrist vid extensiv odling samt en enkel men effektiv metod att förbättra ett rinnande vattens självluftande processer genom s k gravitationsluftning.

Sötvattenskräftor är naturligt mycket väl anpassade för att tåla låga syrgashalter. De är i toleranshänseende närmast att jämföra med ål och ruda. Med stöd av bl a utförda överlevnads- och reproduktionstest på signalkräfta (Pacifastacus leniusculus) dras slutsatsen att "no effect level" för denna art är 15% syrgasmättnad (2 mg/l) under vintern då vattentemperaturen är mellan +1 och +3°C.

En inom damnbruket särskilt användbar syresättningsmetod är att underlätta gasutjämnningen mellan luft och ett rinnande vatten med hjälp av gravitationsluftare. Metoden är billig och tillför-

litlig och kräver inte tillgång på motordriven apparatur. Olika utföranden av gravitationsluftare har prövats med avseende på syresättningseffekt och funktionssäkerhet under vinterförhållanden. Syresättningens effekt är den uppkomna ökningen jämfört med den möjliga, $E=(C_b-C_a)/(C_s-C_a)$, där C_b är syrgashalt efter fallet, C_a är syrgashalt före fallet och C_s är syrgashalt vid jämvikt med luftens. Ökningen av syrgashalt uppvisar ett nära nog linjärt samband med fallhöjden (h) vid konstant flöde varför effektiviteten har uttryckts som en effekt konstant $e=E/h$.

Bästa effekt och god tillförlitlighet samt flexibel för olika flöden var en luftare av flerdubbel rastertyp. Hos denna luftare var effektkonstanten (e), 1.4% per cm fallhöjd, vilket t ex innebär att syrefritt vatten kan luftas till 5 mg/l vid en fallhöjd av knappt 30 cm när vattentemperaturen är strax över 0°C.

LITTERATUR

- Albrecht, D. & K. Imhoff. 1973. Erfahrungen mit der kunstlichen Ruhrbelüftung. Gwf-Wasser/Abwasser 114:131-137.
- Barret, M.J., A.L.H. Gameson & C.G. Ogden. 1960. Aeration studies of four weir systems. Waste Water Eng. 64:407-413.
- Blazka, P. 1958. The anaerobic metabolism in fish. Fysiol.Zool. 31:117-128.
- Boyd, C.E. 1982. Water quality management for pond fish culture, development in aquaculture and fisheries science 9. Elsevier Science Publication Company, Amsterdam. 312 p.
- Chesness, J.L. & J.L. Stephens. 1971. A model study of gravity flow aerator for catfish raceway systems. Trans.Amer.Soc. Agric.Eng. Power and Machinery Division. p. 1167-1174.
- Davis, J.C. 1975. Minimal dissolved oxygen requirement of aquatic life with emphasis on Canadian species: a review. J. Fish.Res.Board Can. 32:2295-2340.
- Drever, J. 1982. The geochemistry of natural waters. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. 388 p.
- Forskningsrådsnämnden (FRN). 1982. Fiskodling och teknik. Rapport 82:12.
- Hargeby, A. 1985. Fiskens överlevnad vid syrebrist vintertid - en fråga om att fly eller fäkta. Fauna och flora 80:81-92.
- Haskell, D.C., R.O. Davies & J. Reckahn. 1960. Factors in hatchery pond design. N.Y.Fish Game J. 7:112-129.

- Hogger, J.B. 1986. Aspects of the introduction of "signal crayfish", Pacifastacus leniusculus (Dana), into the southern United Kingdom. 1. Growth and survival. *Aquaculture* 58:27-44.
- Karlgren, L. & Ö. Lindgren. 1963. Luftningsstudier i Träsksjön. *Vattenhygien* 3:67-78.
- Kayser, R. & R. Stegmann. 1975. Saurstoffeintrag an wehren mit geringen Beaufschlagungen. *Wass.u.Boden* 2:21-24.
- Khudenko, B. 1979. Postaeration of wastewater. *J.Environmental Eng. Div.* April:297-307.
- Lindroth, A. 1950. Reaction of crayfish on low oxygen pressure. *Rep.Inst.Freshw.Res., Drottningholm* 31:110-112.
- McMahon, B.R. 1985. The adaptable crayfish: mechanisms of physiological adaptation. Preprint 6th Int.Symp.Astacology, Lund. 28 p.
- McMahon, B.R., W.W. Burggren & J.C. Wilkens. 1974. Respiratory responses to long-term hypoxic stress in the crayfish Orconectes viriliis. *J.exp.Biol.* 60:195-206.
- McMahon, B.R. & P.R.H. Wilkes. 1983. Emergence responses and aerial ventilation in normoxic and hypoxic crayfish Orconectes rusticus. *Physiol.Zoöl.* 56:133-141.
- Morrissy, N.M., N. Caputin & R.R. House. 1984. Tolerance of mar-
ron (Cherax tenuimanis) to hypoxia in relation to aquaculture. *Aquaculture* 41:61-74.
- Ridderstolpe, P. 1985. Kombinerat vatten och jordbruk - ett naturanpassat nyttjande av försumpad åkermark. *Vattenbruk* 3:5-9.
- Söderberg, R.W. 1982. Aeration of water supplies for fish culture in flowing water. *Progr.Fish.Cult.* 44:89-93.
- Tebbutt, T.H.Y. 1972. Some studies on reaeration in cascades. *Wat.Res.* 6:297-304.
- Truesdale, G.A., A.L. Downing & G.F. Lowden. 1955. The solubility of oxygen in pure water and sea-water. *J.appl.Chem.* 5:53-62.
- Weber, W.J., Jr. 1972. Physicochemical processes for water quality control. John Wiley & Sons, Chichester. 640 p.
- Welch, H.E. 1968. Use of modified diurnal curves for measurements of metabolisms in standing water. *Limnol.& Oceanogr.* 13:679-687.
- Wilkes, P.R.H. & B.R. McMahon. 1982. Effect of maintained hypoxic exposure on the crayfish (Orconectes rusticus). Parts 1-2. *J.exp.Biol.* 98:119-137, 139-149.

Muntl. medd.

Fürst, Magnus. Sötvattenslaboratoriet, Drottningholm
Hamilton, Carl-Johan. Saltvikens fiskodling, Barsebäck
Hargeby, Anders. Limnologiska inst. Lunds Universitet
Hogger, John. Thames Water, London
Karlsson, Stellan. Simontorps Akvatiska Avelslaboratorium, Lund

ENGLISH SUMMARY: THE OXYGEN REQUIREMENTS OF FRESHWATER
CRAYFISH AND NATURAL OXYGENATION OF WATER
USED IN EXTENSIVE CULTURE

In order to effectively exploit the economical and ecological potential of crayfish farming, it is important to identify the tolerance limits of the crayfish to low levels of oxygen. It is also important to develop simple methods for avoiding dangerous hypoxia during the culture process.

The first part of this paper deals with the effect of hypoxia on crayfish behaviour, and investigates the "no effect level" below which hypoxia is detrimental to the crayfish and to production. The second part of the paper suggests methods for avoiding hypoxia in extensive culture, and describes a simple but effective gravity aerator for improving the gas transfer processes of running water.

Freshwater crayfish are naturally well-adapted to low levels of oxygen. Their tolerance to hypoxia can be compared to that of eel (Anguilla anguilla) and crucian carp (Carassius carassius). Tests on the survival and reproduction of the signal crayfish (Pacifastacus leniusculus) show that the "no effect level" for this species is an oxygen saturation of 15% (2 mg O₂/l) during winter at temperatures of +1 to +3 °C.

Gravity aerators provide an ideal method of oxygenating the running water used in pond culture by improving gas transfer between air and the water. This method is cheap and reliable and does not require motorized equipment. Different kinds of gravity aerators have been tested for aeration effectiveness and reliability

during winter conditions. Aeration effectiveness is the observed increase compared with the theoretical increase, $E = (C_b - C_a) / (C_s - C_a)$, where C_b is the oxygen content after the fall, C_a is the oxygen content before the fall and C_s is the oxygen content at equilibrium with that of the air. The increase in the oxygen content shows a nearly linear relationship to the total height of fall (h) at a constant flow rate, whereby the effectivity has been expressed as a constant of efficiency $e = E/h$.

The best effect, reliability and flexibility for different flow rates were provided by an aerator with a multi-layer lattice. The constant of efficiency (e) for this aerator was 1.4% per cm height of fall, which means that anoxic water can be oxygenated to 5 mg O_2/l for a total height of fall of about 30 cm at a water temperature slightly above $0^\circ C$.