

# Du kan regne med vandmiljøet

## Eutrofieringsindeks sætter tal på vandmiljøet, så man kan beregne, hvad spildevand og anden næring betyder for søen som levested for krebs

Benjamin Nielsen

---

**H**vad betyder spildevand for min krebsesø? Dette spørgsmål fik jeg fra en bekymret søejer i Nordsjælland. Kommunen har stillet krav om bedre rensning af spildevand. Husene ved søen skal have minirensanlæg med direkte udledning til søen. Ifølge kommunen en rigtig løsning, som er godt for vandmiljøet. Søejereren er urolig for sine krebs. Vil spildevandet ændre søens tilstand, så den bliver uegnet for krebs?

Spildevands betydning for vandmiljøets tilstand er relevant for enhver krebseavler, fordi krebs er iltkrævende, og kun kan leve i rene søer. Andre næringskilder som drænvand, overfladevand, tagvand og vand fra veje og parkeringspladser har ligeledes betydning, ligesom søens dybde og vandudskiftning spiller ind. Spørgsmålet vil jeg nu belyse ved at anvende Carlsons eutrofieringsindeks (Trophic State Index, TSI) og formler til at beregne tilstanden ud fra målinger og tal for næringstilførsel til søen. Fremgangsmåden er beskrevet i artiklen "Determining the Trophic State of Your Lake" af Ted Brown og Jon Simpson /1/.

**Artikel fra Flodkrebsen 1, januar 2016**

10



*Opalsøen ved Hammershus på Borholm er en af de reneste søer i landet. Tilstanden er mesotrof med fire meter sigtdybde. Tilførsel af næring er lille, fordi der ikke bor mennesker eller er landbrug omkring søen.*

## Carlsons eutrofieringsindeks

Søer inddeles almindeligvis efter næringsrigdom. Eutrofieringsgraden angiver, hvor "grøn" søen er, målt ved mængden af alger eller vandplanter. *Oligotrofe* søer er næringsfattige med få alger og planter. *Mesotrofe*, *eutrofe* og *hypereutrofe* er betegnelser for søer med stigende grad af næringsrigdom og deraf følgende større produktion af alger. Betegnelsen *eutrofiering* (næringsberigelse) anvendes til at beskrive udviklingen over tid fra næringsfattig mod mere næringsrig tilstand.

11

Det kan det være praktisk at udtrykke eutrofieringen som en talskala, fordi det giver mulighed for at udføre beregninger. Carlson (1977) har udviklet en talskala, kaldet Trofic State Index (TSI) /2/. Skalaen er baseret på sigtdybdemåling. Halvering af sigtdybden øger TSI-tallet med 10 enheder. Jo "grønnere" sø, des mindre sigt, og des højere TSI-tal.

Eutrofieringsindeks bestemmes på grundlag af målinger af vandmiljøet (Tabel 1). Måling af klorofyl betrager Carlson selv som bedst, fordi klorofyl i algeceller er det mest nøjagtige mål for søens biomasse af alger. I teorien kan såvel klorofyl, sigt, fosfor og selv kvælstof anvendes til at bestemme TSI-indeks, da de alle i en eller anden form afspejler søens biomasse af alger og planter. Følgende formler kan anvendes til at beregne TSI-indeks ud fra målinger af sigt, klorofyl, fosfor og kvælstof:

Formler til beregning af eutrofieringsindeks:

|             |   |
|-------------|---|
| Sigtmåling: | $TSI(\text{sigt}) = 60 - 14,41 \ln(\text{sigt})$            |
| Klorofyl a: | $TSI(\text{klorofyl}) = 9,81 \ln(\text{klorofyl}) + 20,6$   |
| Fosfor:     | $TSI(\text{fosfor}) = 14,42 \ln(\text{fosfor}) - 5,85$      |
| Kvælstof:   | $TSI(\text{kvælstof}) = 14,42 \ln(\text{kvælstof}) + 44,45$ |

$\ln$  = naturlige logaritme

Findes flere målinger for en sø, er det ikke altid, de forskellige målinger giver samme TSI-tal. I tilfælde af afvigelser kan fortolkning af afvigelse give yderligere viden om forholdene i søen (Tabel 2). Eksempelvis hvis sigtmåling giver større TSI-tal end klorofylmåling, kan det være fordi sigten begrænses af opløst farve eller opslæmmede partikler. På grundlag af sigtmåling virker søen mere næringsrig, end den i virkeligheden er.

Tabel 1: Eutrofieringsindeks (TSI) og målinger af vandmiljø

| Tilstand    | TSI | Sigt m | Fosfor mg/m <sup>3</sup> | Klorofyl a mg/m <sup>3</sup> |
|-------------|-----|--------|--------------------------|------------------------------|
| Oligotrof   | 20  | 16     | 6                        | 0,9                          |
|             | 30  | 8      | 12                       | 2,6                          |
| Mesotrof    | 40  | 4      | 24                       | 6,4                          |
| Eutrof      | 50  | 2      | 48                       | 20                           |
|             | 60  | 1      | 96                       | 56                           |
| Hypereutrof | 70  | 0,5    | 192                      | 154                          |
|             | 80  | 0,25   | 384                      | 427                          |

Tallene er kalibreret efter målinger af danske søer.

Kilde: Carlson, R. E. 1977. /2/.

Tabel 2: Fortolkning af afvigelser i eutrofieringsindeks beregnet ved forskellige målinger

|   |  |
|---|--|
| $TSI(\text{sigt}) = TSI(\text{klorofyl})$ | Sigtdybden er bestemt af alger   |
| $TSI(\text{sigt}) < TSI(\text{klorofyl})$ | Store alger bestemmer sigten   |
| $TSI(\text{sigt}) > TSI(\text{klorofyl})$ | Farve eller opslæmmede partikler bestemmer sigten                                    |
| $TSI(\text{sigt}) > TSI(\text{fosfor})$   | Alger begrænses af mangel på fosfor (N/P-forhold større end 33/1)                    |
| $TSI(\text{sigt}) < TSI(\text{fosfor})$   | Alger begrænses af mangel på kvælstof, græsning af dyreplankton eller andre faktorer |

Eutrofieringsindeks er en vigtig oplysning om søen eller dammen, fordi det afspejler levestandarden for dyrelivet, og brugsværdien for mennesker (Tabel 3). Indsø laks og andre laksefisk findes i oligotrofe søer med koldt og iltrigt bundvand, som de store svenske søer, Vänarn og Vättern med TSI-tal 20-30. Mesotrofe og eutrofe søer med TSI-tal 40-50 er som regel velegnede til fiskeri og badning. Velkendte problemer i hypereutrofe søer med TSI-tal 70 eller derover er uklar vand, masseforekomst af blågrønalg eller andemad, iltsvind, ophobning af tykt sort mudder med rådden lugt af svovlbrinte. Det gør disse søer uegnede til fiskeri, badning og krebsehold.

#### Tabel 3: Eutrofieringens virkning på vandmiljøet

---

Alger gør vandet uklart  
Bundplanter forsvinder  
Masseforekomst af giftige blågrønalg om sommeren (algeblomst)  
Andemad breder sig  
Iltmangel på bunden af søen  
Fiskedød i perioder med iltsvind  
Krebs kan ikke leve i søen  
Rådden lugt af svovlbrinte i bundvandet  
Ophobning af sort mudder giver mindre vanddybde  
Søen blive uegnet til fiskeri og badning  
Mindre ejendomsværdi for huse ved søbredden

---



*Helsingør Gadekær i Nordsjælland er en typisk næringsrig lille sø. Tilstanden er hypereutrof med en halv meter sigtdybde. Næring til søen kommer fra vejvand og fodring af ænder. Sandsynligvis har der også tidligere været udledt spildevand.*



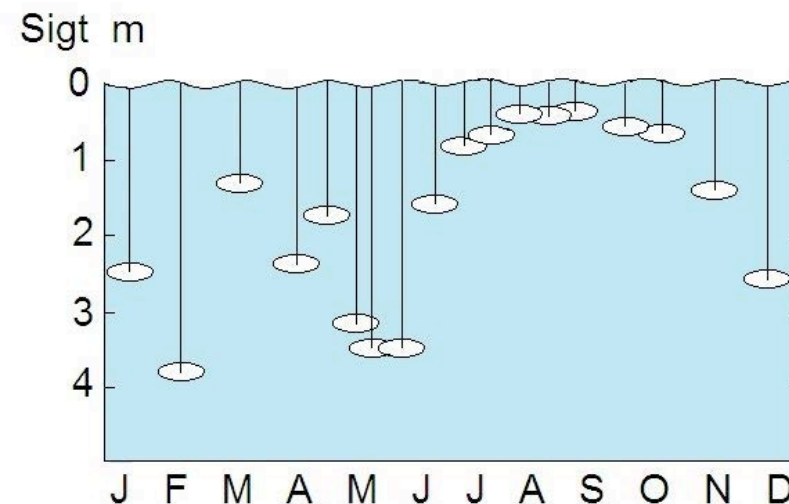
*Når andemad dækker overfladen helt, er søen hypereutrof. Der er ingen ilt under andemaden, så krebs kan ikke leve i søen. Næringen kommer som regel fra spildevand.*



Måling af sigtddybde. Skiven sænkes ned, til den forsvinder af syne, og hæves derefter langsomt, til den atter kan ses. Sigtdybden er da gennemsnittet mellem de to dybder.

## Måling af sigtddybde

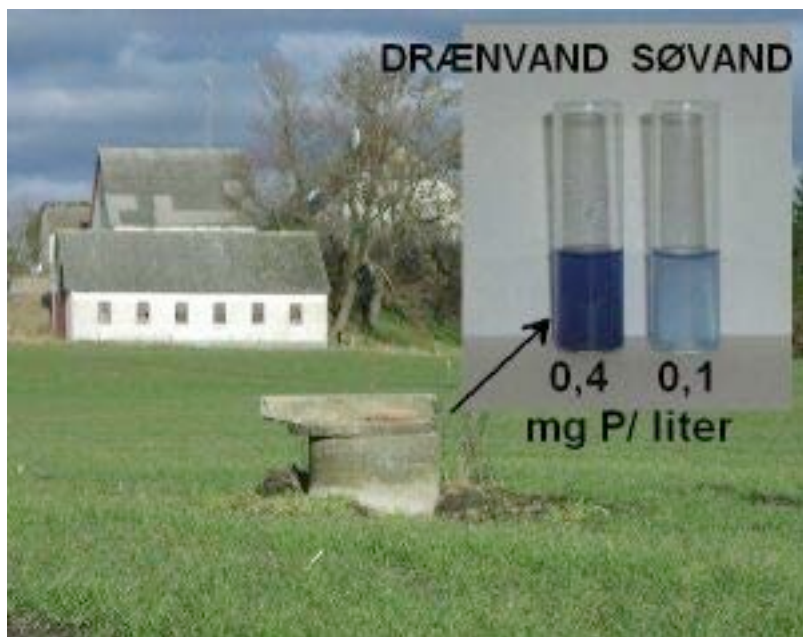
Miljøcentre sørg for analyser for større søer her i landet. Analyserne er offentlig tilgængelige, og ligger på [www.miljoportal.dk](http://www.miljoportal.dk). Der findes ikke analyser for mindre og private søer og damme. Her må man selv måle. Det kan man gøre med en sigtskive, en hvid skive med diameter 20-30 centimeter, som sænkes ned i vandet, til den ikke længere er synlig oppefra. Sigtskiven kaldes også Secchi disk efter sin opfinder, italieneren Angelo Secchi (1818-1878), som var videnskabsmand og rådgiver for paven. Første gang metoden blev anvendt var 1865 til måling af gennemsigtighed af vandet i Middelhavet fra et af pavens flådeskibe.



Sigtddybden ændrer sig med årstiden. Sigtmålinger fra Arreskov Sø 2014. Kilde: Miljøportalen.dk.

Sigtddybden ændrer sig med årstiden. Om vinteren og i en periode først på sommeren er sigten størst. I løbet af sommeren aftager sigten i takt med, at der kommer flere alger i vandet. Tilvæksten af alger skyldes frigørelse af næringsstoffer fra sedimentet. Noget lignende sker på land, hvor planterne vokser sig større i løbet af sommeren på grund af frigørelse af næring fra planterester og humus i muldlaget.

Sensommeren er den årstid, hvor algebiomassen er på sit højeste, og er derfor det bedste tidspunkt at bedømme eutrofieringstilstand ud fra sigtmålinger. Arreskov Sø med sensommersigt 0,5 meter må således betegnes hypereutrof.



*Fosforanalyse fra en drænbrønd viser, at drænvandet er en mulig forureningskilde, hvis det føres ud i en sø.*

## Fosforanalyse til at undersøge eutrofiering

Fosforanalyse er et vigtigt værktøj til at undersøge eutrofiering og finde frem til mulige nærings- eller forureningskilder. Der er god sammenhæng mellem søvandets koncentration af total-fosfor og algebiomassen målt ved klorofyl eller sigtdybde. Dertil kommer, at fosforanalysen kan vise, om søen har tilløb af vand med særlig højt indhold af fosfor, så det udgør en forureningskilde. Vil man forbedre tilstanden af en næringsrig sø, skal man starte med at finde forureningskilden, og fjerne den eller afskære den fra søen. Gør man ikke det, er alle forsøg på at rense vandet dømt til at mislykkes.

Der findes testset til at måle opløst fosfat, som kan anvendes i felten, og som ikke kræver særligt udstyr. Vandprøven tilsættes en fremkalder, som farves blå af fosfor. Koncentrationen aflæses derefter ud fra farvestyrken.

Vil man måle på søvand, skal man være opmærksom på, at det er total-fosfor, man anvender til at undersøge eutrofiering i vandmiljøet. Total-fosfor er summen af opløst fosfor plus uopløseligt, partikulært fosfor. Analysen af total-fosfor indebærer, at prøven skal forbehandles med syre eller varme for at opløse det partikulære fosfor. Desuden skal man udtage flere prøver fra søen fordelt over et år for at få en repræsentativ måling, der afspejler søens tilstand.

Måling af opløst fosfor er dog alligevel god til at give information om næringstilstanden i en mindre sø. Man skal udtage prøven af bundvandet. Giver prøven som resultat  $0,2 \text{ g/l} = 200 \text{ mg/m}_3$  opløst fosfor viser det, at total-fosfor er mindst denne værdi, og at søen ifølge Tabel 1 er hypereutrof.



## Formel til beregning af søfosfor

Koncentrationen af total-fosfor i søvandet er den mest almindelige indikator for eutrofieringstilstanden, fordi den kan måles direkte på vandprøver eller beregnes ud fra oplysninger om tilførsel og bortførsel af næring til søen.

Til beregning kan man anvende to formler, en massebalanceformel og en ligevægtsformel.

Massebalance formelen er principielt samme system som kassebogholderi for en bankbog, hvor indestående beregnes ved at lægge indbetalinger til og trække udbetalinger fra. Beholdningen af fosfor i søvandet opgøres i milligram fosfor pr. kvadratmeter sø ( $= P * z$ ). Tilførsel af fosfor kan være fra grundvand, drænvand, overfladevand, spildevand, ænder eller fodring af fisk og krebs (Tabel 4). Bortførsel af fosfor sker via afløb fra søen eller ved sedimentation.

## Massebalance formel

søfosfor + tilført - bortført - sedimentation

$$P_0 * z + L - P_0 * h - P_0 * z * s = P_1 * z$$

|      |   |
|------|---|
| år 0 | $100 + 100 - 100 * 1/4 - 100 * 1/2 = 125$ |
| år 1 | $125 + 100 - 125 * 1/4 - 125 * 1/2 = 131$ |
| år 2 | $131 + 100 - 131 * 1/4 - 131 * 1/2 = 133$ |
| år 3 | $133 + 100 - 133 * 1/4 - 133 * 1/2 = 133$ |

## Ligevægtsformel

$$P = L/z * 1/(f + s)$$

$$P_{\text{ligevægt}} = 100/1 * 1/(1/4 + 1/2) = 133$$

hvor

P = fosforkoncentration ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

L = tilførsel af fosfor ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{år}$ )

z = middeldybde (m)

f =  $h/z$  = vandskifte eller flow (pr. år)

h = afstømning = hydraulisk belastning (m pr. år)

s = sedimentation af fosfor (brøk)

Som eksempel er regnet på en sø med middelvanddybde  $z = 1$  m, startbeholdning  $100 \text{ mg}/\text{m}^2$ , årlig tilførsel  $100 \text{ mg}/\text{m}^2$ , afstrømning  $1/4$  m og årlig sedimentation  $1/2$  af søfosfor. Beregningen viser, at søfosfor stiger fra 100 ved start til 125 efter et år, 131 efter to år, 133 efter tre år, hvorefter ligevægt er nået, og beholdningen er konstant i årene fremover.

Ligevægtsformlen giver samme resultat som massebalancen, hvilket den jo også gerne skulle, når matematikken er rigtig. Ligevægten kendetegnes ved, at den årlige tilførsel er lig med den årlige bortførsel af fosfor fra søvandet ved afstrømning og sedimentation. Det tager altså kun tre år for ligevægten at indstille sig, og ikke som mange tror, uendelig mange år.

Tabel 4: Kilder til fosfor i vandmiljøet

|                                    | Total fosfor, g/m <sup>3</sup> |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Grundvand                          | 0,02                           |
| Drænvand                           | 0,1                            |
| Overfladevand fra jord, tage, veje | 0,2                            |
| <hr/>                              |                                |
| Spildevand fra mennesker           | kg fosfor/person/år            |
| Urenset og direkte udledt          | 1                              |
| Septiktank med tømning             | 0,5                            |
| Minirenselanlæg uden P-rensning    | 0,5                            |
| Minirenselanlæg med P-rensning     | 0,1                            |
| Kloakering eller pilerenselanlæg   | 0                              |
| <hr/>                              |                                |
| Gødning fra fugle                  | g fosfor/fugl/dag              |
| Skarv                              | 1                              |
| Ænder og gæs                       | 0,2                            |
| Blishøns og svaner                 | 0                              |

Tallene er udledt af tilstand og næringskoncentration i søer med tilførsel af forskellige typer vand samt renseseffekten for forskellige renselanlæg.

Tal for fuglegødning kommer fra rapporten "Fugle og karpers påvirkning af søer /3/.

Tabel 5: Nedbør og afstrømning i Danmark

|                   | nedbør, mm/år | afstrømning, mm/år |
|-------------------|---------------|--------------------|
| Vestjylland       | 800           | 400                |
| Østjylland og Fyn | 700           | 300                |
| Sjælland          | 600           | 200                |



*Krebsesøen viser tegn på at være hypereutrof. Der er andemad en halv meter ud fra bredden. Sort mudder der afgiver sumpgas. Sigtdybde omkring en meter. Krebsene er døde. Foto: Kay Geels.*

## Hvad betyder spildevand for min krebsesø?

Vi har nu oplysninger, tal og formler til at regne på spørgsmålet om spildevandets betydning for krebsesøen, og om udledning af rensed spildevand fra minirenselanlæg vil gøre søen uegnet for krebs fremover.

Søejeren oplyser følgende:

Søen er 6000 kvadratmeter med middeldybde 2 meter. Der er ingen tilløb i form af dræn eller grøfter, men der er et afløb i den østlige ende, som fører vand ud af søen i den våde årstid. Mit eget hus udleder ikke spildevand, men der er to andre huse, som sikkert tidligere har haft afløb af spildevand fra sivedræn til søen. Husene har nu fået påbud fra kommunen om at etablere minirenselanlæg

med udledning til søen. Siden august har en snes gråænder holdt til i søen. Af vandplanter er der vandpest i en stor del af søen. Et enkelt år har andemad dækket overfladen helt, men ellers er der kun andemad et par meter ud fra bredden i den nordlige ende. Der er blød bund med 1/4 til 1/2 meter sort mudder med svag lugt, og masser af sumpgas, der giver kraftige bobler. Sigtdybden målt med en hvid skive er 1 meter. For nogle år siden var der krebs, men ikke nu. Andemad, sort mudder, lille sigtdybde og fravær af krebs tyder på en sø med hypereutrof tilstand og TSI-tal 70 (Tabel 1).

For at kunne beregne tilførslen af grundvand og vandskiftet i søen skal man kende oplandet. Oplandet findes ud fra højdekurverne på et topografisk kort. Oplandet er arealet inden for højdekurven, hvor terrænet skræner ned mod søen.

Vandskiftet for søen, eller flowet, beregnes fra klimatal (afstømning i mm) og oplandsarealet i hektar:

$$f = \text{opland} * \text{afstrømning} / \text{søareal} / \text{middeldybde}$$

Tal for tilførsel af næring med forskellig slags vand kommer fra Tabel 4. Tal for nedbør og afstrømning fra Tabel 5.

Den samlede tilførsel af næring med forskellig slags vand, der strømmer til søen, beregnes (Tabel 6). Derefter benyttes ligevægtsformlen til at beregne fosforkoncentration i søvandet. Til slut findes søens eutrofieringsindeks (TSI-tal) og tilstanden ved at aflæse fra Tabel 1.



*Topografisk kort over søen. Oplandet hvorfra søen modtager grundvand er arealet inden for højdekurven, hvor terrænet går ned mod søen. Fra det prikkede areal kommer overfladevand.*

Med Excel regneark er det nemt at udføre den slags beregninger. Det ville være en uoverkommelig opgave at gøre det med blyant og ternet papir.

Tabel 6 viser resultatet af beregning for tre situationer: (a) Før-situationen med udledning af spildevand, (b) Efter-situationen med udledning af spildevand fra minirensesanlæg, (c) 0-effekt scenariet, hvor der beregnes, hvad tilstanden ville være, såfremt søen havde været fri for udledning af spildevand.



Tabel 6: Beregning af næringstilførsel og eutrofieringstilstand for søen

|                            | før         | efter  | uden spildevand |
|----------------------------|-------------|--------|-----------------|
| Grundvand                  | 0,32        | 0,32   | 0,32            |
| Landbrugsdræn              | 0           | 0      | 0               |
| Overfladevand              | 0,3         | 0,3    | 0,3             |
| Spildevand                 | 3           | 0,6    | 0               |
| Ænder                      | 0,36        | 0,36   | 0,36            |
| Tilført ialt kg fosfor     | 3,98        | 1,58   | 0,98            |
| Søfosfor mg/m <sup>3</sup> | 181         | 72     | 45              |
| TSI-tal                    | 69          | 56     | 49              |
| Sigtdybde m                | 0,5         | 1      | 2               |
| Betegnelse                 | hypereutrof | eutrof | svag eutrof     |

Forudsætninger for beregningen:

Oplandsareal 8 ha, Søareal 6000 m<sup>2</sup>, Middeldybde 2 m.

Flow 1,3 gange søens vandmængde om året.

Årlig sedimentation 1/2 af søfosfor.

Overfladevand fra 1 ha skrånende areal vest for søen med afstrømningsfaktor 0,25, dvs. kun en fjerdedel af regnvandet løber af på overfladen, fordi det er sandet jord med god gennemtrængning. Der tilføres ikke tagvand eller vejvand.

Spildevand fra 6 beboere i to huse ved søen, som har septiktank med tømning (før). Der etableres minirensesanlæg med P-fjernelse (efter).

10 ænder i 180 dage om året.

#### (a) Før-situation med spildevand

Spildevand ligger klart på førstepladsen som næringskilde. Det gør søen hypereutrof. Iltforholdene bliver for ringe, til at krebs kan klare sig. En helt almindelig situation i et tæt befolket land. Hvis et kig på landkortet viser, at der er huse i området, kan man rolig gå ud fra, at der bliver udledt spildevand. Ofte er det kommunen, der stiller krav om septiktank med udledning til vandmiljøet.

#### (b) Efter-situation med spildevand fra minirensesanlæg

P-rensning får udledningen til at falde med 90 procent. I dette tilfælde falder den samlede tilførsel af næring til det halve, og vandmiljøets tilstand bliver en grad bedre. Kommunen har ret i, at minirensesanlæg med P-rensning er godt for vandmiljøet, når det medfører mindre næring til søen. Om krebs kan klare sig er usikkert. Det er jo stadig en næringsrig sø med et højt iltforbrug ved bunden. En vinter med to måneders is kan krebsene nok ikke overleve. Det problem kan nu nemt løses. Et iltanlæg med luftpumpe og diffusor i søen kan sikre gode iltforhold året rundt, selv om søen er næringsrig. Et rensesanlæg udgør i sig selv en risiko. Ved driftsstop, eller hvis der ikke bliver fyldt fældningskemikalium på anlægget, løber der jo urensset spildevand ud. Vandmiljøet bliver ødelagt, og man må starte forfra med at rense søen og udsætte nye krebs.

#### (c) 0-effekt scenarie uden spildevand

Bedst er helt at undgå spildevand. Det fremgår af 0-effekt scenariet, hvor der er beregnet, hvad tilstanden ville være, hvis søen altid havde været fri for spildevand. Her ville den være svag eutrof, en tilstand hvor krebs kan klare sig uden kunstig hjælp fra iltning.

#### Kilder

/1/ Determining the Trophic State of Your Lake. 2001.

Ted Brown og Jon Simpson. Watershed Protection Techniques, Urban Lake Management, Vol. 3, No. 4.

/2/ A Trophic State Index for Lakes. 1977. Carlson, R. E. Limnol Oceanography 22: 361-369.

/3/ Fugle og karpers påvirkning af søer. 2014. Martin Søndergaard, Torben L. Lauridsen. DCE rapport nr. 84.

<http://dce2.au.dk/pub/SR84.pdf>