

# Eutrofieringsindeks viser, om kvælstof eller fosfor begrænser algerne

Eutrofieringsindeks sætter tal på vandmiljøet, så man kan beregne, hvad tilførsel af næring betyder for tilstanden. Med indekset kan man bedømme, om det er kvælstof eller fosfor, der gør vandet grønnere.

BENJAMIN NIELSEN

Planter skal have kvælstof. Uden gødning vokser de ikke, og der bliver ingenting at høste. Det gælder også alger og vandplanter. Undtagen visse blågrønalger og vandplanter som azolla, der har symbiose med kvælstofbakterier. At kvælstof er nødvendig for plantevækst kan landbruget tale med om. Begrænsninger på gødningen har gjort det vanskeligt eller umuligt mange steder at dyrke maltbyg og brødhvede, som kan overholde kvalitetskrav om passende proteinindhold. Foderkorn har for lidt protein til at egne sig til foder. Markerne undergødes. Nye analyser af drænvandet viser rekordlave koncentrationer af nitrat.

Med optimeret gødningsplanlægning, bedre udnyttelse af husdyrgødningen og godt landmandskab har landbruget mindsket udvaskningen fra markerne, så der i dag udvaskes halvt så meget kvælstof som for tredive år siden. Men kan det nu også ses på vandmiljøet? Er der tegn på, at mindre kvælstof giver færre alger i søer og fjorde, så vandet bliver mindre grønt?

Det spørgsmål belyser jeg i denne artikel ved at anvende Carlsons eutrofieringsindeks (Trophic State Index, TSI) /1/. Fremgangsmåden er beskrevet i artiklen 'Determining the Trophic State of Your Lake' af Ted Brown og Jon Simpson /2/. Med indekset kan vandmiljøets tilstand bedømmes, og man kan vurdere, hvilket næringsstof - kvælstof eller fosfor - der har størst betydning for et givet vandområde.

## Carlsons eutrofieringsindeks

Søer inddeles almindeligvis efter næringsrigdom. Eutrofieringsgraden angiver, hvor "grøn" søen er, målt ved mængden af alger



Figur 1. Måling af sigtdybde. Skiven sænkes, til den forsvinder af syne, og hæves derefter, til den atter kan ses. Sigtdybden er gennemsnittet mellem de to dybder.

eller vandplanter. Oligotrofe søer er næringsfattige med få alger og planter. Mesotrofe, eutrofe og hypereutrofe er betegnelser for søer med stigende næringsrigdom og større produktion af alger. Betegnelsen eutrofiering

(næringsberigelse) anvendes til at beskrive udviklingen over tid fra næringsfattig mod mere næringsrig tilstand. Carlsons eutrofieringsindeks er en skala fra 0 til 100. Den er baseret på sigtdybde måling. Halvering af sigt-

Table 1. Eutrofieringsindeks (TSI) og målinger af vandmiljø. Tallene er kalibreret efter målinger i danske søer.

Tilstand	TSI	Sigt SD m	Klorofyl Chl mg/m <sup>3</sup>	Fosfor TP mg/m <sup>3</sup>	Kvælstof TN g/m <sup>3</sup>
Oligotrof	20	16	0,94	6	0,09
	30	8	2,6	12	0,18
Mesotrof	40	4	7,3	24	0,37
Eutrof	50	2	20	48	0,74
	60	1	56	96	1,47
Hypereutrof	70	0,5	154	192	2,94
	80	0,25	427	384	5,89

dybden øger TSI-tallet med 10 enheder. Jo "grønnere" sø, des mindre sigt, og des højere TSI-indeks.

TSI-indeks med tilhørende målinger er vist i Tabel 1. Regressionsformler til at beregne TSI-indeks fremgår af Tabel 2. Carlson har udviklet formlerne for sigt, klorofyl og fosfor. Kratzer og Brezonik har udviklet formelen for kvælstof /3/.

I teorien kan såvel klorofyl, sigt, fosfor og kvælstof anvendes til at bestemme TSI-indeks, da de alle er udtryk for søens biomasse af alger og planter. Måling af klorofyl betragter Carlson selv som bedst, fordi klorofyl i algeceller er det mest nøjagtige mål for biomassen af alger. Carlson fraråder at slå forskellige tal sammen til gennemsnit i den tro, at gennemsnittet er et bedre udtryk for den virkelige tilstand end tallene hver for sig. Det svarer til at antage, at gennemsnittet af en termometer-aflæsning og antallet af fårekyllepip pr minut er et bedre mål for temperaturen end termometeret alene.

I tilfælde af afvigelser i TSI-indeks beregnet ved forskellige målinger kan fortolkning af afvigelserne give yderligere information om forholdene i søen (Tabel 3). Giver sigtmåling større TSI-indeks end klorofylmåling, kan det skyldes, at sigten begrænses af opløst farve eller opslæmmede partikler. På grundlag af sigt-

Tabel 2. Formler til beregning af eutrofieringsindeks.

<b>Sigtmåling:</b>	$TSI(SD) = 60 - 14,42 \ln(SD)$
<b>Klorofyl a:</b>	$TSI(Chl) = 9,81 \ln(Chl) + 20,6$
<b>Fosfor:</b>	$TSI(TP) = 14,42 \ln(TP) - 5,85$
<b>Kvælstof:</b>	$TSI(TN) = 14,42 \ln(TN) + 54,45$

ln = naturlige logaritme. Klorofyl og fosfor er i mg/m<sup>3</sup>. Kvælstof i g/m<sup>3</sup>.

måling virker søen mere næringsrig, end den i virkeligheden er. Er der væsentlig forskel på TSI-indeks for kvælstof og fosfor (mere end 5 enheders forskel), viser det mindste indeks, hvilket næringsstof der begrænser algevæksten.

Eutrofieringsindeks er en nyttig oplysning om søen, fordi det afspejler leveforholdene for dyrelivet, og nytteværdien for mennesker (Tabel 4). Indsølags og andre laksefisk findes i oligotrofe søer med koldt og iltrigt bundvand, som de store svenske søer, Vänarn og Vättern med TSI-indeks 20-30. Mesotrofe og eutrofe søer med TSI-indeks 40-60 er velegnede til fiskeri og badning. Velkendte problemer i hypereutrofe søer med TSI-indeks 70 eller mere er uklart vand, masseforekomst af blågrøn-alger eller andemad, iltsvind, ophobning af sort mudder med rådden lugt af svovlbrinte. Det gør søerne uegnede til fiskeri og badning.

## Måling af sigtdybde

Analysen er nødvendige til at beregne TSI-indeks. Der findes normalt ikke analyser for 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 (Figur 1). Sigtskiven kaldes 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 i Middelhavet fra et af pavens flådeskibe.

Sigtdybden ændrer sig med årstiden (Figur 2). Vinter og forår er sigten størst. I løbet af sommeren aftager den i takt med, at der kommer flere alger. Tilvæksten af alger skyldes mineralisering af næringsstoffer fra sedimentet. På samme måde som på landjorden, hvor planterne vokser i løbet af sommeren på grund af mineralisering af planterester og humus i muldlaget.

Gennemsnittet af sigtmålinger i sommerhalvåret fra april til september lægger man til grund for en søs eutrofieringsgrad. Virket Sø år 2005 med gennemsnits sommersigtdybde 2 meter kan således betegnes svagt eutrof. Om foråret fremtræder søen mesotrof (sigt 4 meter), forsommer er den svagt eutrof (sigt 2 meter) og resten af sommeren eutrof (sigt 1 meter).

Miljøstyrelsen sørger for analyser for større søer. Analyserne er offentlig tilgængelige på miljøportalen.dk.

## 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. Søfosfor kan beregnes med formelen i Boks 1.

Massebalanceformlen 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, fugle eller fodring af fisk (Tabel 5). Bortførsel af fosfor

### Boks 1: Formel til beregning af søfosfor

#### Massebalance formel

søfosfor + tilført - afstrømning - sedimentation

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

$$\text{år 0 } 100 + 100 - 100 * 1/4 - 100 * 1/4 = 150$$

$$\text{år 1 } 150 + 100 - 150 * 1/4 - 150 * 1/4 = 175$$

$$\text{år 2 } 175 + 100 - 175 * 1/4 - 175 * 1/4 = 188$$

$$\text{år 3 } 188 + 100 - 188 * 1/4 - 188 * 1/4 = 194$$

$$\text{år 4 } 194 + 100 - 194 * 1/4 - 194 * 1/4 = 197$$

$$\text{år 5 } 197 + 100 - 197 * 1/4 - 197 * 1/4 = 198$$

$$\text{år 6 } 198 + 100 - 198 * 1/4 - 198 * 1/4 = 199$$

$$\text{år 7 } 199 + 100 - 199 * 1/4 - 199 * 1/4 = 200$$

$$\text{år 8 } 200 + 100 - 200 * 1/4 - 200 * 1/4 = 200$$

#### Ligevægtsformel

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

$$P_{\text{ligevægt}} = 100/1 * 1/(1/4 + 1/4) = 200$$

hvor

P = fosforkoncentration (mg/m<sup>3</sup>)

L = tilførsel af fosfor (mg/m<sup>2</sup>/år)

z = middeldybde (m)

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

T = 1/f = opholdstid (år)

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

s = sedimentation af fosfor (brøk)

Tabel 3. Fortolkning af afvigelser i eutrofieringsindeks beregnet ved forskellige målinger.

$TSI(SD) = TSI(ChI)$	Sigt dybden er bestemt af alger
$TSI(SD) < TSI(ChI)$	Store alger bestemmer sigten
$TSI(SD) > TSI(ChI)$	Farve eller opslæmmede partikler bestemmer sigten
$TSI(SD) > TSI(TP)$	Alger begrænses af mangel på fosfor
$TSI(SD) < TSI(TP)$	Alger begrænses af mangel på kvælstof, græsning af dyreplankton eller andre faktorer
$TSI(TP) < TSI(TN)$	Alger begrænses af fosformangel
$TSI(TP) > TSI(TN)$	Alger begrænses af kvælstofmangel

sker via afstrømning fra søen eller ved sedimentation.

Som eksempel er regnet på en sø med midelvanddybde

$z = 1$  m, startbeholdning  $100 \text{ mg/m}^3$ , årlig tilførsel  $100 \text{ mg/m}^3$ , afstrømning  $1/4$  m og årlig sedimentation  $1/4$  af søfosfor. Beregningen viser, at hvis der udledes næring, eksempelvis fra et renseanlæg, vil søen hurtigt blive mere næringsrig. I eksemplet nås 95 procent af ligevægten inden for fire år, som svarer til opholdstiden for søens vand ( $T = 1/f$ ). Samme beregning viser også, at hvis næringskilden fjernes, bliver søen lige så hurtigt renere igen. Har forureningen stået på i mange år, vil søen dog forblive næringsrig. Det skyldes, at der opbygges et lager af sedimenteret fosfor, som frigiver fosfor ved mineralisering hver som-



mer. Det kaldes søens interne fosforlager. Situationen beskrives matematisk, ved at sedimentation af fosfor i sådanne meget næringsrige søer er nul eller negativ.

Ligevægtsformlen giver samme resultat som massebalancen. Ligevægten kendetegnes ved, at den årlige tilførsel er lig med den årlige bortførsel ved afstrømning og sedimentation.

Samme formel kan anvendes til at beregne søkvælstof. Dog skal der foruden sedimentation af kvælstof også regnes med tab ved denitrifikation. Sedimentation og denitrifikation af kvælstof kan sættes til  $s(\text{kvælstof}) = 1$ , hvor sedimentation af fosfor tilsvarende sættes til  $s(\text{fosfor}) = 1/4$ , eller 0 hvis søen er meget næringsrig med stort internt lager.

### TSI-beregning for Virket Sø

Jeg har udført TSI-beregning for Virket Sø på Falster. Søen er 8,2 hektar med gennemsnitsdybde 4,1 meter og maksimal dybde 7,3 meter. Den har tilløb fra den mindre Hul sø mod nord og afløb til Tingsted Å mod syd. Der kommer drænvand fra markerne øst for søen. Tidligere blev spildevandet fra landsbyen Virket ført til søen. 1985 etablerede man

Tabel 4. Symptomer på hypereutrof tilstand.

- Alger gør vandet uklart
- Tæpper af trådalger i vandet og på overfladen
- Bundplanter forsvinder
- Andemad kan dække overfladen
- Algeblomst af giftige blågrøn alger om sommeren
- Iltmangel ved bunden
- Fiskedød i perioder med iltsvind
- Krebs kan ikke leve i søen
- Lugt af svovlbrinte i bundvandet
- Ophobning af sort mudder giver mindre vanddybde
- Søen uegnet til fiskeri og badning
- Mindre ejendomsværdi for huse ved søbredden

et renseanlæg neden for søen, og spildevandet blev ført til anlægget og herfra videre til Tingsted Å. Sommersigt dybden var omkring 1 meter i 1980'erne. I dag er den mellem 1 og 2 meter.

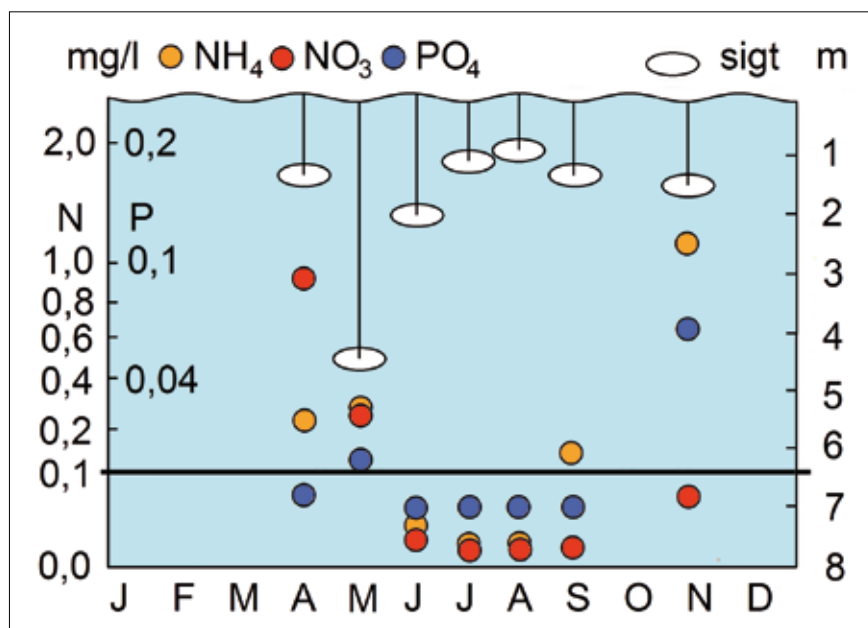
Tilførsel af vand til søen, beregnes ud fra opland og nedbørstal. Oplandet findes fra højdekurverne på et topografisk kort. Oplandet er arealet inden for de højeste punkter i landskabet omkring søen (Figur 3). Vandskiftet, eller flowet beregnes som  $f = \text{opland} * \text{afstrømning/søareal/middeldybde}$ . Tal for tilførsel af næring kommer fra Tabel 5. Tal for nedbør og afstrømning kommer fra Tabel 6.

Spildevand fra mennesker anslås ud fra antallet af huse i oplandet. Jeg regner med 2 personer pr. hus.

Mængden af drænvand beregnes som  $\text{afstrømning} * \text{landbrugsareal} * \text{drænprocent} * \text{drænfaktor}$ . Drænfaktoren er den del af afstrømningen fra marken, der løber gennem drænene. Resten går uden om drænene og til grundvandet. På lerjord regner jeg med drænpct. 80 og drænfaktor  $2/3$ . Sandjord og kuperet terræn er uden dræn.

Spildevand er søens største fosforkilde, og markdrænene største kvælstofkilde (Tabel 7). Ved at føre spildevandet uden om søen bliver tilførslen af fosfor mere end halveret, og sigt dybden øges fra 1 til 1,5 meter. Blev markdrænene ført uden om søen, ville sigt dybden stige yderligere til 2 meter. Ifølge TSI-analysen var søen kvælstofbegrænset, da den fik spildevand i 1980'erne.  $TSI(TN)$  er 5 enheder mindre end  $TSI(TP)$ . I dag hvor søen er uden spildevand, har kvælstof og fosfor lige stor betydning.  $TSI(TN)$  og  $TSI(TP)$  er omtrent lige store.

Målinger fra søen bekræfter, at sigt dybden har ændret sig ifølge TSI-beregningen. Nemlig fra 1 meter til 1,4 meter i gennemsnit over de seneste 10 år. Analyser af opløst kvælstof- og fosfor i søvandet bekræfter, at søen er både kvælstof- og fosforbegrænset i dag. Der er små koncentrationer af næringssalte i overflade-



Figur 2. Analyser fra Virket Sø 2005



Figur 3. Topografisk kort over Virket Sø med opland

vandet det meste af sommeren, mindre end 0,1 mg N/l og mindre end 0,01 mg P/l (Figur 2).

### TSI-beregning for Stege Nor

Stege Nor på Møn er en lavvandet kystlagune. Vandarealet er 570 hektar med gennemsnitsdybde 1,5 meter og maksimal dybde 3,7 meter. Noret er forbundet til Stege Bugt gennem kanalen ved Stege Havn. Vandets opholdstid skønnes til 2 måneder, svarende til et flow på 9 gange norets vandmængde. Der er 1800 hektar opland med overvejende landbrugsarealer. Noret får spildevand fra huse og landsbyer i oplandet. Sommersigttybden er omkring 2 meter.

Største kilde til næringsstoffer er havvand fra Stege Bugt, der strømmer ind med tidevandet (Tabel 8). Havvandet bestemmer, hvilken tilstand noret kan opnå. Næmlig højst samme tilstand som vandet i bugten med næringskoncentration 30 mg TP/m<sup>3</sup> og 300 mg TN/m<sup>3</sup>. Spildevand tegner sig for 1/5 af fosfortilførslen og 1/8 af kvælstoftilførslen. Landsbyerne er nu kloakerede, men der udledes spildevand fra 150 huse i oplandet. Ifølge TSI-beregningen øges sigtstybden fra 2,4 meter (med spildevand fra 500 huse) til 2,9 meter (med spildevand fra 150 huse). Ifølge TSI-beregningen er noret både kvælstof- og fosforbegrænset.

### TSI-beregning for 10 vandområder

For at finde ud af, hvilket næringsstof, der har størst betydning, har jeg beregnet TSI-indeks for 10 vandområder (Tabel 9). Analyserne kommer fra Miljøportalen. Jeg har brugt sommergennemsnit af TN og TP i overfladevandet, og beregnet TSI-indeks for hvert næringsstof.

Beregningen viser, at kvælstof har betyd-



Tabel 5. Kilder til næring.

	Fosfor	Kvælstof
<b>Atmosfære</b>	<b>kg/ha/år</b>	<b>kg/ha/år</b>
	0,1	15
<b>Vand</b>	<b>g/m<sup>3</sup></b>	<b>g/m<sup>3</sup></b>
Grundvand	0,02	1
Markdræn	0,1	5
Overfladevand fra jord, tage, veje	0,2	2
<b>Spildevand fra mennesker</b>	<b>kg/person/år</b>	
Urenset og direkte udledt	1	4,4
Septiktank med tømning	0,5	4,4
Minirenselanlæg uden P-rensning	0,5	3,0
Minirenselanlæg med P-rensning	0,1	3,0
Kloakering eller pilerenselanlæg	0	0
<b>Gødning fra fugle</b>	<b>g/fugl/dag</b>	
Skarv	1	7,5
Ænder og gæs	0,2	1,6
Blishøns og svaner	0	0

Tallene er udledt af tilstand og næringskoncentration i søer med tilførsel af forskellige slags vand samt renseseffekten for forskellige renselanlæg. Tal for fuglegødning kommer fra rapporten "Fugle og karpers påvirkning af søer"/4/.

Tabel 6. Nedbør og afstrømning i Danmark

Landsdel	Nedbør mm/år	Afstrømning mm/år
Vestjylland	800	400
Østjylland og Fyn	700	300
Sjælland	600	200

ning for tilstanden lige så ofte som fosfor. Kvælstofbegrænsning ser ud til at være mere almindelig i søer, end vi hidtil har regnet med ud fra den traditionelle antagelse, at ferskvand er fosforbegrænset og saltvand kvælstofbegrænset. To af vore største og mest kendte søer, Esrum Sø og Furesøen, er således kvælstofbegrænsede. Jeg har taget Gjorslev Møllesø fra Stevns med i analysen, fordi den

er eksempel på en sø, der enkelte år optræder klarvandet (år 2015), mens den de fleste år er uklar (år 2008). Ifølge TSI-beregningen hænger det sammen med, at søen er kvælstofbegrænset. Den bliver klarvandet i år med særlig lille kvælstofudvaskning. Hvis Gjorslev Møllesø var fosforbegrænset, ville den være uklar hvert år.

Tabel 7. TSI-beregning for Virket Sø

Kilder til næring	Fosfor	Kvælstof
Atmosfære	1	123
Indløb fra Hulso	8	154
Grundvand	3	162
Markdræn	6	280
Overfladevand	1	12
Spildevand (30 huse)	30	185
50 ænder	4	29
Tilført ialt kg	53	944
<b>(1) Med spildevand (før)</b>		
Søkoncentration mg/m <sup>3</sup>	145	1532
TSI-indeks (sigtdybde)	66 (0,7)	61 (1)
<b>(2) Uden spildevand (nu)</b>	<b>62</b>	<b>1232</b>
TSI-indeks (sigtdybde)	54 (1,5)	57 (1,2)
<b>(3) Uden markdræn</b>	<b>47</b>	<b>778</b>
TSI-indeks (sigtdybde)	50 (2)	51 (1,9)

Tabel 8. TSI-beregning for Stege Nor

Kilder til næring	Fosfor	Kvælstof
Atmosfære	57	8550
Havvand fra Stege Bugt	1539	15390
Grundvand	72	3600
Markdræn	155	7750
Overfladevand	18	180
Spildevand (500 huse)	500	3080
Tilført ialt kg	2341	38550
<b>(1) Spildevand fra 500 huse (før)</b>		
Søkoncentration mg/m <sup>3</sup>	40	608
TSI-indeks (sigtdybde)	47 (2,4)	47 (2,4)
<b>(2) Spildevand fra 150 huse (nu)</b>	<b>34</b>	<b>574</b>
TSI-indeks (sigtdybde)	45 (2,9)	46 (2,6)
<b>(3) Uden markdræn</b>	<b>31</b>	<b>451</b>
TSI-indeks (sigtdybde)	44 (3,1)	43 (3,3)



Tabel 9. TSI-beregning for 10 vandområder.

	Tilstand	SD m	CHL mg/m <sup>3</sup>	TP mg/m <sup>3</sup>	TSI	TN mg/m <sup>3</sup>	TSI	Be-græn-set
Kattegat 2014	O	8	1,5	20	37	250	34	NP
Roskilde Indrefjord 2015	M	4,2	3,9	132	65	577	47	N
Stege Nor 2015	E	1,9	3,6	36	46	418	42	NP
Esrum Sø 2013	M	5,7	4,9	104	61	520	45	N
Karlstrup Kalkgrav 2008	M	4	9,9	10	27	1840	63	P
Hammersø 2015	M	5,3	4,3	25	41	593	47	P
Furesø 2015	E	3,1	22	69	55	722	50	N
Virket Sø 2012	E	1,3	35	65	54	1068	55	PN
Vesterborg Sø 2015	H	0,7	42	134	65	2623	68	PN
Gjorslev Mølle-sø 2008	E	1,4	44	256	74	1823	63	N
Gjorslev Mølle-sø 2015	E	2,7	26	276	75	1300	58	N

### Konklusion

Carlson's TSI-indeks er et godt værktøj til at vurdere vandmiljøet. Det kan beregnes på grundlag af topografiske kort, klima, landbrugsareal og oplysninger om spildevand og kloakering i området. Beregningen giver overblik over hvilken tilstand, man kan opnå med forskellige tiltag. Beregningen er velegnet til at vurdere effekten af målrettet regulering af udledninger fra mennesker og landbrug til særlig følsomme vandområder.

Beregning af TSI-indeks for udvalgte vandområder viser, at både kvælstof og fosfor bidrager til eutrofiering. Derfor er landbrugets indsats for at mindske kvælstofudvaskning lige så nyttig som kommunernes arbejde med at rense spildevandet i det åbne land.

### Litteratur

- 1/ A Trophic State Index for Lakes. 1977. Carlson, R. E. Limnol Oceanography 22: 361-369.
- 2/ Determining the Trophic State of Your Lake. 2001. Ted Brown og Jon Simpson. Watershed Protection Techniques, Urban Lake Management, Vol. 3, No. 4.
- 3/ A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. 1981. C. R. Kratzer og P. L. Brezonik. Water Res. Bull. 17: 713-715.
- 4/ Fugle og karpers påvirkning af søer. 2014. Martin Søndergaard, Torben L. Lauridsen. DCE rapport nr. 84. <http://dce2.au.dk/pub/SR84.pdf>

BENJAMIN NIELSEN er konsulent. [bn@soedoktoren.dk](mailto:bn@soedoktoren.dk)