

RAPPORT LNR 3604-97

TEOTIL

Vurdering av det
teoretiske grunnlaget for
retensjonsberegningene

Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00

Sørlandsavdelingen

Televeien 1
4890 Grimstad
Telefon (47) 37 04 30 33
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Rute 866
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Thormøhlensgt 55
5008 Bergen
Telefon (47) 55 32 56 40
Telefax (47) 55 32 88 33

Akvaplan-NIVA A/S

Søndre Tollbugate 3
9000 Tromsø
Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 77 68 05 09

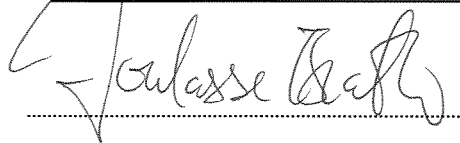
Tittel TEOTIL. Vurdering av det teoretiske grunnlaget for retensjonsberegningene.	Løpenr. (for bestilling) 3604-97	Dato Mars 1997
	Prosjektnr. Underrnr. O-96073 4	Sider Pris 30
Forfatter(e) Anja Skiple Jon Lasse Bratli	Fagområde VRF	Distribusjon
	Geografisk område	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Statens Forurensningstilsyn (SFT)	Oppdragsreferanse
---	-------------------

Sammendrag

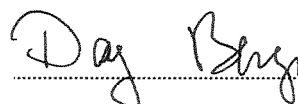
Grunnlaget for retensjonsberegningene i tilførselsmodellen TEOTIL er vannets teoretiske oppholdstid. For retensjon av nitrogen blir det i tillegg tatt hensyn til trofigraden. Målsettingen med denne rapporten er å undersøke om det er grunnlag for å inkludere andre parameter enn vannets oppholdstid i retensjonsbetraktningene. Det har også vært et mål å få oversikt over de beregningsmetodene som blir brukt i Norden samt i andre land som det har vært naturlig å sammenligne seg med. Det er benyttet ulike modeller for å predikerer P-retensjonen i norske innsjøer med kjent retensjon. Noen modeller viste seg å være bedre tilpasset de utvalgte norske innsjøene enn den metoden som benyttes i TEOTIL. Men siden datagrunnlaget er lite og ikke representativ for hele landet, foreslås det å beholde dagens retensjonsbetraktning. For nitrogen er det ikke utviklet noe annen modell for fastsettelse av retensjon enn det som allerede ligger inne i TEOTIL. Både for fosfor og nitrogen ble retensjonen overestimert i de næringsfattige innsjøene ved bruk av den formelen som ligger til grunn for retensjonsverdiene i TEOTIL. Det ble målt en betydelig retensjon også i mindre innsjøer, noe det ikke er tatt hensyn til i TEOTIL.

Fire norske emneord 1. Retensjon 2. TEOTIL 3. Fosfor 4. Nitrogen	Fire engelske emneord 1. Retention 2. TEOTIL 3. Phosphorus 4. Nitrogen
--	--



Prosjektleder

ISBN 82-577-3159-5



Forskningsjef

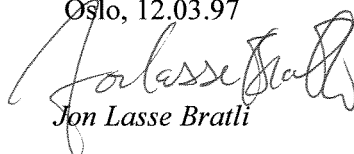
Forord

Norsk institutt for vannforskning (NIVA) har på oppdrag fra Statens forurensningstilsyn (SFT) utviklet en modell for beregning av tilførsler av fosfor- og nitrogentilførsler til norske havområder. Modellen blir bl.a. brukt som en del av resultatkontrollsystemet for tiltak gjennomført innen Nordsjøplanområdet, dvs. det som tilrenner kyststrekningen Svenskegrensa-Lindesnes. Modellen kan imidlertid også brukes for resten av landet.

Retensjon dvs. tilbakeholdelse av forfor og nitrogen i vassdragene blir i dag beregnet i modellen på en forholdsvis enkel måte, og herværende rapport gir en gjennomgang av forskjellige måter å beregne retensjon på, med konklusjon om hvordan dette bør gjøres i framtida.

Anja Skiple har foretatt nødvendige litteratursøk og sammenstilling av data, og har ført mesteparten av rapporten i pennen. SFTs saksbehandler har vært Dag S. Rosland

Oslo, 12.03.97



Jon Lasse Bratli

TEOTIL

Vurdering av det teoretiske grunnlaget for
retensjonsberegningene

Innhold

Sammendrag	5
1. Innledning	6
2. Grunnlaget for retensjonsberegningene i TEOTIL	7
2.1 Fosfor	7
2.2 Nitrogen	8
3. Forhold som kan påvirke retensjonen av næringsstoff i en innsjø	9
3.1 Vannets oppholdstid (innsjøens volum/årlig avrenning)	9
3.2 Tilførsler av næringsstoffer til innsjøen	9
3.3 Konsentrasjoner i selve innsjøen/trofegrad	9
3.4 Oksygenforhold	10
3.4.1 Oksyder og sulfider	10
3.4.2 Denitrifikasjon	10
3.5 Dybdeforhold-Vindpåvirkning	11
3.6 Hydraulisk belastning (qs) - vannføring/innsjøareal	11
3.7 Nitrogenfiksering (algebiomasse og artssammensetning)	11
3.8 Vannets kjemiske sammensetning	11
3.9 Høyere vegetasjon	12
3.10 Temperatur	12
3.11 Aktivitet i eller nær innsjøen	12
4. Retensjonsutregninger brukt i litteraturen	13
4.1 Utregninger for retensjon av fosfor	13
4.2 Utregninger for retensjon av N	17
5. Sammenstilling og vurdering	18
5.1 Observerte retensjonsverdier i utvalgte norske innsjøer	18
5.2 Sammenlikning av observerte og ulike modeller's predikerte retensjonsverdier	18
6. Konklusjon og tilrådinger	22
7. Litteratur	24
Vedlegg A. Lineær regresjon mellom observerte og ulike modellens predikerte P-retensjoner	29

Sammendrag

I tilførselsmodellen TEOTIL er det beregnet retensjonsverdier for ca. 1200 områder fordelt over hele Norge (statistikkområder). Disse verdiene viser hvor stor del av næringsstoffene fosfor og nitrogen som blir holdt tilbake i innsjøene innenfor hvert område. Grunnlaget for utregning av P-retensjonen er Larsen og Mercier's formel fra 1976. Retensjonen blir i denne formelen kun bestemt av teoretisk oppholdstid dvs. innsjøvolum dividert på årlig vannføring. Grunnlaget for utregning av N-retensjonen er, i tillegg til oppholdstiden, også bestemt ut i fra trofigraden til innsjøene (etter Holtan 1991).

Litteraturen peker på mange forhold som påvirker tilbakeholdelsen av næringsstoffer i innsjøer bl. a. tilførsler, vannets kjemiske sammensetning, algesammensetning, høyere vegetasjon og temperatur. Det har imidlertid vist seg å være vanskelig å inkludere disse parametrene i modellen for utregning av retensjon. For P-retensjon er det imidlertid blitt utviklet en rekke modeller basert på teoretiske eller empiriske betraktninger, men det er kun P-tilførsler, innsjøvolum, innsjøareal, vannføring og middeldyp som har latt seg inkludere i modeller.

For utregning av N-retensjon er det imidlertid gjort lite på modellsiden. I en tidligere undersøkelse (Holtan 1991) ble det, basert på et empirisk grunnlag, foreslått å sette N-retensjonen til 20 % av den predikerte P-retensjonen for oligotrofe innsjøer. For mer næringsrike vann ble det lagt til 10 og 20 % på N-retensjonen i hhv. mesotrofe og eutrofe innsjøer.

Observerte retensjoner for norske innsjøer (15 med kjent P-retensjon og 22 med kjent N-retensjon) blir sammenlignet med predikerte verdier etter ulike modeller. P-retensjonen blir, i tillegg til den utregningen som ligger til grunn for retensjonsverdiene i TEOTIL, sammenlignet med fire andre modeller. OECD-modellen for nordiske innsjøer viser en bedre sammenheng enn den som blir brukt i TEOTIL. I OECD-modellen blir det brukt både teoretisk oppholdstid og midlere P-konsentrasjon i innløpet. Det er sjelden man har mål på tilførslene av fosfor, så denne parameteren kan være vanskelig å fremskaffe. Det blir derfor ikke anbefalt å bruke OECD-modellen som utgangspunkt for retensjonsberegningene i TEOTIL.

Det gjennomsnittlige avviket mellom TEOTIL-modellen og målte P-retensjoner er forsøkt benyttet som tilleggskoeffisient i en ny formel. Denne nye modellen gir den beste tilnærmelsen for alle innsjøer sett under ett. Den er derimot basert på et relativt lite utvalg innsjøer, så det er usikkert hvorvidt det er riktig å bruke den i TEOTIL. I tillegg er de fleste innsjøene i denne sammenstillingen på Østlandet, og dermed ikke representativ for hele landet. Inntil vi får et bedre datagrunnlag, foreslås det å beholde dagens retensjonsbetraktning.

Det kommer fram av sammenstillingen at det er en betydelig retensjon av både fosfor og nitrogen også i små innsjøer. Dette er det ikke tatt hensyn til i TEOTIL, og retensjonsverdiene er trolig underestimert av den grunn.

1. Innledning

Retensjon i en innsjø defineres som varig borttagelse av tilførselene av et stoff dvs. antall kg inn minus antall kg ut av en innsjø. De viktigste retensjonsprosessene er sedimentasjon, biologisk omsetning og denitrifikasjon. Retensjonen vil vanligvis variere mye gjennom årstidene, og må derfor måles som et snitt over ett eller flere år.

Det er viktig å ha et mål på hvor mye av næringsstoffene fosfor og nitrogen som blir holdt tilbake i innsjøer. Med et godt estimat på retensjonen kan man få et bedre mål på de aktuelle tilførselene til f. eks. Nordsjøen. For å kunne lage et P- eller N-budsjett for en innsjø, er det også viktig med kunnskap om retensjonen. Å måle den aktuelle retensjonen i en innsjø er både kostbart og tidkrevende. Det er derfor utviklet ulike modeller/formler for å gi estimat på hvor mye av næringsstoffene som blir holdt tilbake i innsjøer.

Retensjon av fosfor og nitrogen i en innsjø blir i tilførselsmodellen TEOTIL (Tjomsland og Bratli 1996) regnet ut på grunnlag av vannets teoretiske oppholdstid i innsjøen. Den teoretiske oppholdstiden er definert som innsjøens volum dividert på årlig vanntilførsel. Lang oppholdstid gir en stor tilbakeholdelse av næringsstoffene.

Inngangsverdiene i TEOTIL (vannføring, avløp, landbruk, industri, befolkning) er fordelt på statistikkområder. For hvert statistikkområde er det regnet ut retensjonskoeffisienter for fosfor og nitrogen. For nitrogen blir det i TEOTIL, i tillegg til oppholdstid, også tatt hensyn til trofigrad (oligotrof, mesotrof og eutrof). Eutrofe innsjøer gir den største N-retensjonen.

Tilbakeholdelse av næringsstoffene i en innsjø vil i tillegg til gjennomstrømningen, også være påvirket av innsjøens biologiske, kjemiske, morfologiske og fysiske karakter. Det har derfor vært et behov for å se på hvordan retensjonen blir fastlagt i andre modeller, og om det lar deg gjøre å implementere andre parametre som har betydning for retensjonen enn vannets oppholdstid.

Det er søkt etter aktuell litteratur i databasene ASFA, POLTOX, Water Resorces Abs., WATERLIT, IVL, Statens Naturvårdsverk samt i NIVA's egen base.

Først vil grunnlaget for de nåværende retensjonsberegningene i TEOTIL bli gjennomgått. Dernest vil det bli pekt på andre forhold enn vannets oppholdstid som påvirker retensjonen i en innsjø. Det blir gitt en oversikt over de beregningsmetodene som blir brukt i Norden og i andre land som har noenlunde samme klima som Norge. I tillegg vil det bli sammenlignet målte retensjonsverdier fra norske innsjøer med verdier basert på ulike modeller. Og til slutt hvilke konklusjoner og konsekvenser denne sammenstillingen har for retensjonsberegningene i TEOTIL.

Retensjon i elver er tidligere ansett som ubetydelig i Norge (Holtan et al. 1990), og blir ikke diskutert videre i denne rapporten. De fleste elver i Norge er strømmende med god oksygenblanding. Det er først i stilleflytende, eutrofe elver at netto retensjonen vil bli påvirket gjennom året. Sedimentasjonen i norske elver er oftest midlertidig, med resuspensjon og utvasking i perioder med høy vannføring.

2. Grunnlaget for retensjonsberegningene i TEOTIL

2.1 Fosfor

Det var Vollenweider (1976) som ut i fra statistiske betraktninger oppdaget en sammenheng mellom den spesifikke sedimentasjonskoeffisienten til P og den hydrauliske oppholdstiden. Larsen og Mercier (1976) undersøkte P-retensjonen basert på input-output studier i 37 innsjøer fra Nord-Amerika og Europa med ulik trofigrad og dybdeforhold. Det ble vist at P-retensjonen hovedsakelig var bestemt av vannets oppholdstid i innsjøen. På bakgrunn av dette studiet ble det laget en formel som blir brukt for å fastlegge P-retensjonen i TEOTIL.

$$R_p = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1}{T_w}}}$$

R_p = retensjonskoeffisient for P i en innsjø
 T_w = vannets teoretiske oppholdstid

I TEOTIL er det beregnet en retensjonskoeffisient for hvert statistikkområde som det finnes ca. 1200 av for hele Norge. Inndelingen av statistikkområder er nedbørfeltorientert. I tillegg til Larsen og Mercier's formel er koeffisienten bestemt med skjønn ut i fra de lokale forhold (Holtan et al. 1990). I områder uten store innsjøer er retensjonen satt til 0-10 % av tilførselene.

Andre undersøkelser har vist gode sammenhenger ved bruk av denne formelen. I Norge er den tidligere blitt modifisert for grunne (Berge 1987) og dype innsjøer (Rognerud et al. 1979). Se kap. 4.

I forbindelse med utredningen av det faglige grunnlaget for arbeidet med Nordsjøplanen, ble de vassdragene som renner til kyststrekningen fra svenskegrensen til Lindesens, delt inn i 34 resipientområder. Det ble beregnet gjennomsnittlig retensjon av næringsstoffer for hvert resipientområde på grunnlag av Larsen og Mercier's formel brukt på flere innsjøer i den aktuelle delen av vassdraget. Retensjonen ble uttrykt som effektkoeffisienter dvs. gjennomstrømningen av næringsstoffer (Ibrekk et al. 1991). Retensjonen for de 34 resipientområdene ble siden fordelt på hvert statistikkområde innenfor Nordsjøplanens geografiske virkeområde.

2.2 Nitrogen

Retensjonen av nitrogen i innsjøer er generelt lite undersøkt. Siden det ikke var utviklet noen modell for N-retensjonen i Norge, sammenlignet Holtan (1991) N- og P-retensjonen i en del innsjøer på Østlandet (Tyrifjorden, Mjøsa, Storsjøen i Rendalen, Femunden, Ossjøen, Aursunden og Øyern). Gjennomsnittlig andel av nitrogen som ble holdt tilbake i innsjøene var ca. 20 % av den P-retensjonen som ble utregnet etter Larsen og Mercier's formel.

Alle innsjøene i den ovenfornevnte undersøkelsen var dype og lite produktive. I produktive innsjøer med oksygenmangel på bunn, vil denitrifikasjonen (fra nitrat til nitrogen-gass) gjøre seg gjeldende, og dermed øke retensjonen. Det ble derfor foreslått å øke retensjonskoeffisienten for mesotrofe og eutrofe innsjøer med hhv. 10 og 20 % (Holtan 1991). Det er dette som er utgangspunktet for beregning av N-retensjonen i TEOTIL.

I kystsoner er N-retensjonen utelatt. I statistikkområder uten store innsjøer er N-retensjonen satt mellom 0 til 10 % av tilførslene. N-retensjonen i de øvrige områder ligger som oftest mellom 0 og 30 % avhengig av teoretisk oppholdstid og trofegrad.

$$R_N = \frac{0,2}{1 + \sqrt{\frac{1}{T_w}}} + k$$

R_N = retensjonskoeffisient for N i innsjøen

T_w = teoretisk oppholdstid

$k = 0,0$ for oligotrofe innsjøer (Tot P < 7 µg/l, klorofyll a < 2 µg/l)

$k = 0,1$ for mesotrofe innsjøer (Tot P 7-15 µg/l, klorofyll a 2-4 µg/l)

$k = 0,2$ for eutrofe innsjøer (Tot P > 15 µg/l, klorofyll a > 4 µg/l)

3. Forhold som kan påvirke retensjonen av næringsstoff i en innsjø

3.1 Vannets oppholdstid (innsjøens volum/årlig avrenning)

Det er kun teoretisk oppholdstid som blir brukt som variabel for å bestemme retensjonen av P i TEOTIL. Ved beregning av N-retensjonen blir det i tillegg benyttet trofigrad. Vannets oppholdstid kan likevel ikke forklare all variasjon i tilbakeholdelsen av fosfor i en innsjø.

Teoretisk oppholdstid (T_w) ble i en dansk undersøkelse (Jensen et al. 1990) funnet å ha mindre betydning på N-konsentrasjonen i innsjøen i motsetning til det som vanligvis blir funnet for fosfor.

3.2 Tilførsler av næringsstoffer til innsjøen

Fosfor

Tidlige forsøk av Piontelli og Tonolli (1964) beskriver netto P-sedimentasjon som funksjon av tilførslene av fosfor. Denne teorien er senere støttet av bl. a. Canfield og Bachman (1981) og Frisk et al. (1981) som også kom fram til at P-retensjonen er avhengig av både P-konsentrasjonen i innløpet og vannets oppholdstid. Men dette betyr ikke nødvendigvis at P-retensjonen er høyere i næringsrike innsjøer sammenlignet med næringsfattige.

Nitrogen

I en dansk undersøkelse av 69 grunne og eutrofe innsjøer, var det innløpskonsentrasjonen av N som var den viktigste faktoren for å bestemme N-konsentrasjonen i innsjøen dvs hvor mye som ble igjen i vannmassene etter retensjonen. N-retensjonen var gjennomsnittlig 43 %. Til tross for stor variasjon i tilførslene av nitrogen, var retensjonen omtrent den samme i alle innsjøene. Selv små vann hadde et stort tap av nitrogen (Jensen et al. 1990).

3.3 Konsentrasjoner i selve innsjøen/trofigrad

Fosfor

Selv om Vollenweider er kjent for sin modell som viser at det er oppholdstiden som avgjør retensjonen av fosfor i en innsjø, kom han i sin kinetiske tilnærming fram til at P-konsentrasjonen i innsjøen også kan ha betydning for retensjonen. Canfield og Bachman (1981) konkluderte derimot med at innsjøens P-konsentrasjon ikke var ansvarlig for den økte P-retensjonen i perioder med stor vannføring. Berge (1987) kom til at retensjonen av fosfor var lite påvirket av trofigraden i grunne, norske innsjøer.

Nitrogen

Flere undersøkelser viser høye N-retensjoner opp mot 50-60 % i svært eutrofe innsjøer (Tirén 1983, Faafeng 1989, Fleicher et al. 1989).

3.4 Oksygenforhold

3.4.1 Oksyder og sulfider

Fosfater i innsjøer adsorberes gjerne til jernoksyder som jernfosfathydroksyd i innsjøer med rik tilgang på oksygen og pH under 8,0. I oksygenfattige miljøer vil disse fosfatkompleksene gå i oppløsning, fordi treverdige jern (Fe^{3+}) reduseres til toverdige (Fe^{2+}). Nürnberg (1984) viste at P-retensjonen var betydelig lavere i innsjøer med anoksisk hypolimnion (bunnvann). Fosfater som har gått i oppløsning under reduserende forhold i hypolimnion, bringes opp mot overflatelagene under sirkulasjonsperiodene vår og høst.

Reduserende forhold kan sammen med visse mengder sulfat, også føre til dannelse av hydrogensulfid (H_2S), som igjen kan felle jern som FeS . Dette gjør jern mindre tilgjengelig for å binde fosfater, og dermed mindre P-retensjon.

3.4.2 Denitrifikasjon

Under oksygenfattige forhold blir også en del nitrat redusert til nitrogengass som slippes ut i atmosfæren. I en dansk undersøkelse fra en rekke grunne innsjøer sto denitrifikasjonen for hele 77 % av den totale fjerning av nitrogen fra vannmassene (Jensen et al. 1990). En sammenstilling av svenske innsjøer viste at denitrifikasjon vanligvis sto for en større del av N-fjerning sammenlignet med sedimentasjon (Pettersen og Boström 1990). Denitrifikasjonen utgjorde 0-54 % av N-tilførslene i denne svenske undersøkelsen. Andre svenske og danske undersøkelser viser at eutrofe innsjøer har en tap av nitrogen via denitrifikasjon som tilsvarer 40-60 % av tilførslene (Ahl 1973, Ahlgren 1973, Andersen 1974, Larsen 1975).

Målinger med ^{15}N har vist at denitrifikasjon også finner sted i mesotrofe og oligotrofe innsjøer (Tirén 1983). Det må være mindre enn 0,2-0,3 mg O_2/l i vannet for at denitrifikasjon skal finne sted i selve vannmassen (Chan og Campbell 1980, Rönner og Sörensson 1985). I sedimentene kan derimot denitrifikasjonsprosessen foregå selv om det er et stort O_2 -innhold i det ovenforliggende vannet (Andersen 1974, Van Kessel 1976). Denitrifikasjon oppstår særlig der mye organisk materiale er akkumulert.

Det kan være store variasjoner i denitrifikasjonen gjennom året. Om sommeren er det størst denitrifikasjon grunnet lav vannføring, mye organisk materiale, høy temperatur og høy pH. Dersom det kun er tatt vannprøver av en innsjø om sommeren, kan N-fjerningen overestimeres dersom man skal ha et mål på retensjonen for et helt år.

3.5 Dybdeforhold-Vindpåvirkning

Den tidligere nevnte danske undersøkelsen viste at nitrogen i innsjøen avtok signifikant (dvs. retensjonen økte) med minkende middeldyp. Dette blir forklart med at grunne innsjøer har stor sedimentoverflate i forhold til vannvolumet. Grunne innsjøer er også mer utsatt for vindpåvirket resuspensjon, og dermed blir sedimentene eksponert for nitratholdig vann. Dette vil igjen føre til denitrifikasjon i sedimentene (Jensen et al. 1990).

Det er i flere sammenhenger benyttet middeldyp som variabel i retensjonsberegninger (Canfield og Bachmann 1981).

3.6 Hydraulisk belastning (qs) - vannføring/innsjøareal

Noen arbeider bruker vannføring dividert på innsjøareal med benevning m/år som parameter i retensjonsberegninger for fosfor. I en kanadisk undersøkelse hadde P-retensjonen en nærmere sammenheng med hydraulisk belastning (qs) enn med vannets oppholdstid (T_w). Det var usikkert hvorfor hydraulisk belastning var bedre tilpasset, men på empirisk grunnlag ble det valgt å benytte denne parameteren (Kirchner og Dillon 1975). Senere ble den samme formelen justert for innsjøer med lav hydraulisk belastning (Ostrowsky 1978).

3.7 Nitrogenfiksering (algebiomasse og artssammensetning)

Dersom en innsjø har nitrogenfikserende blågrønnbakterier, vil tilførslene av nitrogen være større enn det innløpsbekkene viser. Dette vil føre til en underestimert retensjon. Undersøkelser viser at 5-20 % av N-tilførslene kan skyldes nitrogenfiksering (Howarth et al. 1988).

Jensen og hans medarbeidere (1990) tok ikke hensyn til nitrogenfiksering ved blågrønnbakterier i deres undersøkelse av 69 danske innsjøer, siden det tidligere var vist at nitrogenfiksering spilte en liten rolle i eutrofe, danske innsjøer i forhold til tilførslene av nitrogen (Kristensen et al. 1988).

I oligotrofe og mesotrofe innsjøer bidrar nitrogenfikseringen vanligvis med mindre enn 1 % av den eksterne N-tilførselen. I eutrofe system kan derimot nitrogenfiksering være betydningsfull (6-82 % i en rekke svenske innsjøer), selv om denitrifikasjonen ofte er dobbelt så høy eller mer (Pettersen og Boström 1990). Fosfor kan stimulere nitrogenfikseringen (Flett et al. 1980). Dette kan forklare hvorfor N-fikseringen er så lav i oligotrofe systemer. Det er kun i innsjøer med N-underskudd (anslagsvis $N/P < 7$) at N-fikseringen kan ha kvantitativ betydning for retensjonen (Holtan og Åstebøl 1990). Dette forutsetter at det er nitrogenfikserende blågrønnalger til stede.

3.8 Vannets kjemiske sammensetning

Canfield og Bachman (1981) kunne ikke finne noen korrelasjon mellom sedimentasjon og alkalitet i sitt materiale. Det motsatte ble framsatt av Stauffer (1985); kalkrike innsjøer hadde en lavere P-retensjon sammenlignet med sure innsjøer. Kalkrike sedimenter har mindre evne til å binde fosfor. Dette kan også ha sammenheng med utlekking av sediment-bundet P ved høy pH. Det er påvist frigjøring av P fra dypvannssedimenter i Steinsfjorden fra pH 8,4-8,6 (Erlandsen et al. 1980).

Lav pH (omkring 4) hemmer denitrifikasjonen som har et optimum rundt pH 7-8 (Dodd og Bone 1975, Van Cleemput et al. 1975). Fri sulfid hemmer også denitrifikasjonen.

Reckhow (1979) undersøkte sammenhengen mellom retensjonen av fosfor og kjemiske parameter som alkalitet, pH, kalsium, jern, aluminium, oppløste humøse substanser, men kunne ikke finne noen gode samvariasjoner.

Mangel på organisk materiale kan også begrense både denitrifikasjonen dvs. N-fjerningen (Thyssen et al. 1986) og nitrogenfiksering. Nitrogenfiksering er bl. a. avhengig av jern (Fe) som det er generelt mye av i sediment og våtmark, og av molybden (Mo) eller vanadin (Va).

3.9 Høyere vegetasjon

I innsjøer med stor strandsone og mye høyere vegetasjon, kan røttene til makrovegetasjonen ta opp fosfat fra sedimentene. Under gitte forhold kan vegetasjonen redusere den totale retensjonen av fosfor, ved å avgi fosfat fra bladene til vannet (fra Økland 1983). Vasspest er et eksempel på en vannplante som tar nær 100% av fosforet direkte opp fra sedimentet, og under aktiv vekst kan noe av dette fosforet lekke ut i vannmassene. I årene 1978-1983 ble økningen av fosfor i Steinsfjorden tilskrevet økende utbredelse av vasspest (Rørslett et al. 1984).

Vegetasjonen og annen biologisk aktivitet vil også påvirke variasjonen av retensjonen over året. Andel N som blir holdt tilbake i innsjøer, har vist seg å være noe høyere i vegetasjonsperioden sammenlignet med resten av året. Men siden vannføringen i sommerhalvåret generelt er lav, vil antall kg retendert N være lavere enn på årsbasis (Kaste et al. 1995).

3.10 Temperatur

En rekke omsetningsprosesser av nitrogen og fosfor har bestemte temperaturoptimum f. eks. nitrifikasjon og nitrogenfiksering. Lav temperatur reduserer generelt mikrobiologisk aktivitet. Forsøk viser imidlertid at selv ved temperatur rundt 3-4 °C kan denitrifikasjonsraten være høy (Tirén 1983).

3.11 Aktivitet i eller nær innsjøen

Senking av vannstanden (f. eks. i Grennesvannet) kan føre til dekomponering av organisk materiale og oksydasjon av reduserte N-forbindelser (særlig i våtmarker), og dermed en utlekking av nitrogenforbindelser til innsjøen (Berge og Fjeld 1995).

Negativ retensjon er observert i flere danske vassdrag (Svendsen 1992). Dette har som oftest hatt sammenheng med at systemene har vært belastet i mange år med kommunalt avløpsvann, og at denne belastningen plutselig har opphørt ved bygging av avskjærende avløpsledninger og/eller renseanlegg. Mange av disse innsjøene fortsetter imidlertid med selvgjødsling fra eget sediment, og man kan derfor oppleve negativ retensjon i mange år etter avlastningen. Dette er det samme fenomenet som også ble observert i den svenske innsjøen Trummen, som til slutt måtte slamsuges for å få en akseptabel vannkvalitet (Pettersen og Wallsten 1990).

4. Retensjonsutregninger brukt i litteraturen

4.1 Utregninger for retensjon av fosfor

Larsen og Mercier 1976

Det ble prøvd ut mange gode sammenhenger med både vannets oppholdstid (T_w) og hydraulisk belastning (qs) som parameter. Nedenfor vises 4 ulike ligninger som ga svært god korrelasjon brukt på det kanadiske materialet.

$$Rp = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1}{T_w}}} \quad r = 0,94$$

$$Rp = 0,482 - 0,112 \ln \frac{1}{T_w} \quad r = 0,93$$

$$Rp = \frac{11,73}{11,73 + qs} \quad r = 0,93$$

$$Rp = 0,854 - 0,142 \ln qs \quad r = 0,94$$

Rp = retensjonskoeffisient for fosfor

T_w = vannets teoretiske oppholdstid

qs = hydraulisk belastning, årlig vannføring / innsjøareal (m/år)

Fordelen med den første ligningen, er at retensjonskoeffisienten uansett ikke kan bli større enn 1 (dvs 100 % retensjon) eller mindre enn 0 (negativ retensjon).

Berge 1987 - tilpasset norske, grunne innsjøer (etter Larsen og Mercier 1976)

$$Rp = 1 - 0,436 T_w^{-0,16}$$

Rp = retensjonskoeffisient for fosfor

T_w = vannets teoretiske oppholdstid

Berge (1987) benyttet Larsen og Mercier's formel på en rekke grunne og middels grunne norske innsjøer med kjent P-retensjon. Konklusjonen fra dette arbeidet er at P-retensjonen i det vesentlige ble bestemt av vannets oppholdstid, og var relativt uavhengig av produksjonen i innsjøen.

I den samme undersøkelsen ble det også indikert at det var kun svært eutrofe innsjøer som gjorde retensjonen mindre effektiv som følge av indre gjødsling dvs. frigjøring av P fra sedimentene. Det ble på forhånd forventet at innsjøer som Årungen (Skogheim 1981) og Gjersjøen (Faafeng og Løvik 1986) som hadde en dokumentert indre gjødsling, skulle ha en lavere P-retensjon enn det modellen tilsa. Lav vannføring på den tiden av året som den indre gjødslingen oppstår (midtsommers og midtvinters) kunne forklare hvorfor lekkasje av fosfor fra sedimentene likevel hadde liten betydning for retensjonen.

Rognerud et al. 1979 - tilpasset norske, dype innsjøer (etter Larsen og Mercier 1976)

Et utvalg norske innsjøer med kjente P-retensjoner (Heddalsvatn, Norsjø, Tyrifjord, Mjøsa og Eikern) ble sammenlignet med estimerte verdier etter Vollenweider's modell. Det ble estimert høyere fosfosedimentasjon enn måleresultatene tilsa. Det viste seg at dersom man plottet måleresultatene fra de norske innsjøene i et semilogaritmisk diagram, ble de liggende tilnærmet på en rett linje. Den matematiske formelen for linjen var som følger;

$$R_p = 1 - 0,63e^{-0,067T_w}$$

R_p = retensjonskoeffisient for fosfor

T_w = vannets teoretiske oppholdstid

Alle innsjøene som lå til grunn for denne formelen er sjiktede med oppholdstid mellom 0,1 år (Heddalsvatn) og 11 år (Eikern).

Kirchner og Dillon 1975

I en kanadisk undersøkelse ble det ikke funnet noen god sammenheng mellom retensjon av P og vannets teoretiske oppholdstid. De undersøkte derfor andre forhold som har innvirkning på retensjonen, og kom fram til en svært god sammenheng mellom retensjon og hydraulisk belastning (qs) brukt på sitt materiale.

$$R_p = 0,426^{-0,271 \times qs} + 0,574^{-0,00949 \times qs} \quad r = 0,94$$

R_p = retensjonskoeffisient for fosfor

qs = hydraulisk belastning, årlig vannføring / innsjøareal (m/år)

Måleresultatene fra de 15 kanadiske innsjøene viste en god sammenheng med de estimerte verdiene etter denne modellen ($r = 0,94$). Årsaken til at retensjonen viste en nærmere sammenheng med hydraulisk belastning (qs) enn med vannets oppholdstid blir det ikke gitt noen forklaring på (Kirchner og Dillon 1975).

Ostrofsky 1978

$$R_p = 0,201^{-0,0425 \times q_s} + 0,574^{-0,00949 \times q_s}$$

R_p = retensjonskoeffisient for fosfor

q_s = hydraulisk belastning, årlig vannføring / innsjøareal (m/år)

Det var denne modellen som passet best for å predikere retensjon av P i innsjøene ved Schefferville i Quebec (Smith et al. 1984). Ostrofsky benyttet omtrent samme formel som Kirchner og Dillon (1975), men med noe endret konstanter.

Datsenko 1994

$$R_p = \frac{K_c}{K_c + K_b}$$

R_p = retensjonskoeffisienten for fosfor

K_c = sedimentasjonkoeffisient fosfor

K_b = faktor for vannutskifting

I Uchinsk Reservoar i Russland ble retensjonskoeffisienten for fosfor (R_p) etter denne ligningen regnet ut til å være 11 %, middelveidien fra de aktuelle målingene var 15 % (Datsenko 1994).

Canfield og Bachman (1981)

Gjennom sitt arbeid med å studere sammenhengen mellom sedimentasjon og vannføring, ble det oppdaget en god korrelasjon mellom sedimentasjonskoeffisienten (σ) og tilførslene av fosfor i $\text{mg/m}^2/\text{år}$ (L_p) dividert på middeldypet (z).

$$\sigma = 0,129(L_p / z)^{0,549}$$

σ = sedimentasjonkoeffisient

L_p = tilførsler av fosfor ($\text{mg/m}^2/\text{år}$)

z = middeldypet

Ved å kombinere denne sammenhengen med Vollenweiders modell, får vi et uttrykk for P-retensjonen som i tillegg til vannets teoretiske oppholdstid, også er avhengig av tilførslene av P.

$$R_p = \frac{0,129 T_w^{0,451} P_i^{0,549}}{(1 + 0,129 T_w^{0,451} P_i^{0,549})}$$

R_p = retensjonskoeffisient for fosfor

T_w = vannets teoretiske oppholdstid

P_i = fosforkonsentrasjonen i innløpet (mg/m^3)

Canfield og Bachman's tilnærming viser at P-retensjonen øker med økende fosfortilførsler.

OECD 1982

Ved hjelp av regresjonsanalyser på resultatene fra OECD-undersøkelsen angående eutrofiering, ble retensjonen av P funnet å være en funksjon av både teoretisk oppholdstid (T_w) og tilførselen av fosfor (P_i). Det ble funnet en formel på grunnlag av hele datamaterialet (Final) og en på grunnlag av de nordiske innsjøene (Nordic). Det ble framhevet at OECD-modellen er utviklet for innsjøer med "normal" sediment P-retensjon, og bør ikke brukes i innsjøer med intern gjødsling (OECD 1982).

Final:

$$R_p = \frac{1 - 1,55 P_i^{-0,18}}{(1 + \sqrt{T_w})^{0,82}}$$

Nordic:

$$R_p = \frac{1 - 1,12 P_i^{-0,08}}{(1 + \sqrt{T_w})^{0,82}}$$

R_p = retensjonskoeffisient for fosfor

T_w = vannets teoretiske oppholdstid

P_i = middelkonsentrasjonen av fosfor i tilførselen

Lijklema et al. 1989

Retensjon av fosfor viste en svak sammenheng med hydraulisk belastning (qs) brukt på 121 nederlandske innsjøer i perioden 1983-1985.

$$R_p = -0,161 \log(qs) + 0,655 \quad r = 0,38$$

R_p = retensjonskoeffisient for fosfor

qs = hydraulisk belastning, årlig vannføring / innsjøareal (m/år)

Uchmanski, J. og Szeligiewicz, W. 1988

I en undersøkelse av en rekke innsjøer nord i Polen, ble det brukt en modifisert Larsen og Mercier's formel fra 1976 for å estimere retensjonskoeffisienten for fosfor. Retensjonen er en funksjon av oppholdstiden, og gir noe høyere retensjonsverdier enn etter Larsen og Mercier's formel.

$$R_p = \frac{1}{(1 + 0,866 \sqrt{\frac{1}{T_w}})}$$

R_p = retensjonskoeffisient for fosfor

T_w = vannets teoretiske oppholdstid

4.2 Utrekninger for retensjon av N

Jensen og hans medarb. sine modeller for utrekning av innsjø-konsentrasjonen av N (1990)

Den predikerte verdien av nitrogenkonsentrasjonen i innsjøen ble sammenlignet med den observerte. Regresjonskoeffisienter (r) viser sammenhengen mellom predikerte og observerte verdier for de tre foreslåtte modellene for eutrofe, grunne danske innsjøer. Modellen som tar hensyn til N-tilførsler (N_i), teoretisk oppholdstid (T_w) og middeldyp (Z) viste den beste sammenhengen, men ingen av modellene ga signifikante verdier i parvis t-test.

A. $N_l = 0,45 \times N_i$ $r = 0,71$

B. $N_l = 0,42 \times N_i \times T_w^{-0,11}$ $r = 0,78$

C. $N_l = 0,34 \times N_i \times T_w^{-0,16} \times Z^{0,17}$ $r = 0,79$

N_l = nitrogenkonsentrasjon i innsjøen

N_i = nitrogenkonsentrasjon i innløpet

T_w = vannets teoretiske oppholdstid

Z = middeldyp

Disse modellene er samtidig et uttrykk for hvor mye av tilført nitrogen som retenderer i innsjøen. I denne danske undersøkelsen sto tilførslene av nitrogen for 50 % av variasjonen i innsjøen. Den nest viktigste faktoren var innsjøens teoretisk oppholdstid (T_w) som kunne forklare 11 % av variasjonen. Variabelen med minst innflytelse var middeldypet (Z). Retensjonen av N økte med økende oppholdstid og minkende middeldyp.

Lijklema et al. 1989

En undersøkelse av en rekke innsjøer i Nederland, ga en signifikant sammenheng for N i innsjøen (N_l) som funksjon av tilførslene av N (N_{in}) og vannets oppholdstid (T_w).

$$N_l = 2,06 \left\{ N_i / (1 + \sqrt{T_w}) \right\}^{0,42}$$

N_l = Nitrogenkonsentrasjon i innsjøen

N_i = Nitrogenkonsentrasjon i innløpet

T_w = vannets teoretiske oppholdstid

Retensjonen ut i fra denne ligningen blir en stor del større enn det som f. eks. er funnet i OECD-undersøkelsen fra 1982. Forklaringen på dette er mer nitrifikasjon og denitrifikasjon i Nederlandske innsjøer sammenlignet med de nordamerikanske og europeiske (Lijklema et al. 1989).

5. Sammenstilling og vurdering

5.1 Observerte retensjonsverdier i utvalgte norske innsjøer

Retensjonskoeffisienter for både fosfor og nitrogen viser stor variasjon mellom innsjøene og fra år til år. P-retensjonen er i snitt 34 og 49 % for hhv. oligotrofe og eutrofe innsjøer. N-retensjonen viser mye lavere verdier; gjennomsnittlig 6 % for oligotrofe og 31 % for eutrofe innsjøer. Tilbakeholdelse av begge næringsstoffene er generelt høyere i næringsrike innsjøer.

Målinger av to eutrofe innsjøer i midt-Sverige viser en N-retensjon på 15-40 % (Ahlgren et al. 1994), og et studie fra Danmark viser en tilsvarende retensjon på 40 % som gjennomsnitt for 69 grunne, eutrofe innsjøer (Jensen et al. 1990). De danske innsjøene, som i det all vesentlige er små og grunne, kan ikke uten videre sammenlignes med de norske innsjøene.

I perioden 1961-1976 ble det målt P- og N-retensjon i den svært eutrofe innsjøen Norrviken i Sverige. Retensjonen varierte mye fra år til år (-95% til 49% for fosfor og -46% til 61% for nitrogen). Middelretensjonen for fosfor og nitrogen i denne perioden var hhv. 10 og 20 %. Retensjonen viste seg også å være svært årstidsavhengig; om sommeren var sedimentene den viktigste kilden til både P og N (Ahlgren 1978). I den svenske, oligotrofe innsjøen Gårdsjön ble også en stor andel av nitrogenet fjernet (42 % via denitrifikasjon og sedimentasjon). Til sammenligning var P-retensjonen 30 % (Pettersson og Boström 1990).

For å få gode tall på retensjonen av P og N i en innsjø, må det ligge til grunn et omfattende måleprogram gjerne over flere år. Vannkjemien og vannføringen bør måles i alle innløps- og utløpsbakkene. Nedbørfeltet bør kartlegges med hensyn på arealfordeling av skog, jordbruk, fjell og utmark. Avsetninger direkte på innsjøen bør også måles. Det er svært få innsjøer man har alle nødvendige data tilgjengelig, derfor vil observerte verdier i tabell 1 og 2 inneholde tildels stor usikkerhet.

5.2 Sammenlikning av observerte og ulike modeller's predikerte retensjonsverdier

For P-retensjon er det utviklet flere modeller som kan være aktuelle for norske innsjøer. I det følgende blir det benyttet modellen som ligger til grunn for retensjonsverdiene i TEOTIL (Larsen og Mercier), to modeller som er tilpasset norske forhold (Berge for grunne innsjøer og Rognerud for dype innsjøer) og en formel utledet fra nordiske innsjøer under OECD-undersøkelsen fra 1982 (tabell 1). Ut i fra det gjennomsnittlige avviket mellom den ekisterende formelen i TEOTIL og målte retensjoner, er det utprøvet en ny formel på datamaterialet (tabell 4).

Observerte verdier for N-retensjoner blir sammenlignet med verdiene som ligger til grunn for beregningene i TEOTIL. Utgangspunktet for disse verdiene er Larsen og Mercier's formel for P-retensjonen. Holtan (1991) justerte formelen etter trofigrad, og benyttet den for beregning av N-retensjonen (tabell 2).

Tabell 1. Sammenligning av observerte retensjonskoeffisienter for total fosfor (tot P) og predikerte koeffisienter ut i fra ulike modeller (Larsen og Mercier 1976 (TEOTIL), Berge 1987, Rognerud et al. 1979 og OECD 1982). Trofigraden er oppgitt som O=oligotrof, M=mesotrof, E=eutrof og SE=sterkt eutroft. Oppholdstiden er oppgitt som teoretisk eller aktuell (med *).

Innsjø	År	Trofi-grad	Oppholdstid	Tot P-retensjon					Referanse, observerte verdier
				observert	TEOTIL	Berge 1987	Rognerud et al. 1979	OECD Nordic 1982	
Røynealandsvatn	1992	O	0,17*	0,22	0,29	0,42	0,38	0,30	Denne rapport
Røynealandsvatn	1993	O	0,24*	0,03	0,33	0,45	0,38	0,30	Denne rapport
Røynealandsvatn	1994	O	0,12*	0,18	0,26	0,39	0,38	0,24	Denne rapport
Røynealandsvatn	1995	O	0,15*	-0,04	0,28	0,41	0,38	0,24	Denne rapport
Ørsdalsvatn	1993	O	3,80*	0,47	0,66	0,65	0,51	0,62	Berge et al. (in prep)
Ørsdalsvatn	1994	O	2,83*	0,17	0,63	0,63	0,48	0,59	Berge et al. (in prep)
Ørsdalsvatn	1995	O	2,86*	0,15	0,63	0,63	0,48	0,59	Berge et al. (in prep)
Randsfjorden	78-80	O	3,30	0,58	0,64	0,64	0,49		Faafeng et al. 1981
Tyrifjorden	1978	O	2,70	0,56	0,62	0,63	0,47	0,63	Berge 1983
Tyrifjorden	1979	O	2,70	0,47	0,62	0,63	0,47	0,63	Berge 1983
Mjøsa	71-76	O	5,60	0,72	0,70	0,67	0,57		Holtan et al. 1979
Snåsavatn	1987	O	3,30	0,62	0,64	0,64	0,49	0,65	Lien et al. 1988
Gjersjøen	1993	E	1,50	0,86	0,55	0,59	0,43	0,61	Faafeng 1994
Gjersjøen	1994	E	1,50	0,67	0,55	0,59	0,43	0,60	Faafeng 1996
Gjersjøen	1995	E	1,50	0,73	0,55	0,59	0,43	0,60	Oredalen pers. medd.
Østensjøvannet	1994	E	0,12	0,57	0,25	0,39	0,38	0,38	Solheim 1995
Børsesjø	1990	E	0,052	0,23	0,19	0,30	0,37	0,32	Faafeng 1991
Horpestadvannet	1982	E	0,041	0,06	0,17	0,27	0,37	0,36	Faafeng et al. 1985
Frøylandsvatn	81-83	E	1,20	0,37	0,52	0,58	0,42	0,65	Faafeng et al. 1985
Jarenvannet	1980	E	0,50	0,37	0,41	0,51	0,39	0,50	Faafeng et al. 1982
Langvatnet	1992	E	0,33	0,64	0,36	0,48	0,38	0,47	Faafeng et al. 1993a
Isesjø	91-92	E	1,00	0,45	0,50	0,56	0,41	0,54	Faafeng et al. 1993b
Årungen	1977	SE	1,50	0,69	0,55	0,59	0,43	0,68	Grøterud og Rosland 1981
Årungen	1978	SE	1,50	0,37	0,55	0,59	0,43	0,66	Grøterud og Rosland 1981
Årungen	1979	SE	1,50	0,30	0,55	0,59	0,43	0,66	Grøterud og Rosland 1981

Tabell 2. Sammenligning av observerte retensjonskoeffisienter for total nitrogen (tot N) og predikerte koeffisienter ut i fra modellen som blir benyttet i TEOTIL (Holtan 1991). Oppholdstiden er oppgitt som teoretisk eller aktuell (med *).

Innsjø	År	Trofigrad	Oppholds- tid	N-retensjon		Referanse, observerte verdier
				observert	predikert TEOTIL	
Røyneilandsvatn	1992	Oligotrof	0,17*	0,05	0,06	Denne rapport
Røyneilandsvatn	1993	Oligotrof	0,24*	0,004	0,07	Denne rapport
Røyneilandsvatn	1994	Oligotrof	0,12*	-0,08	0,05	Denne rapport
Røyneilandsvatn	1995	Oligotrof	0,15*	0,02	0,06	Denne rapport
Ørsdalsvatn	1993	Oligotrof	3,80*	0,01	0,13	Berge et al. (in prep)
Ørsdalsvatn	1994	Oligotrof	2,83*	-0,04	0,13	Berge et al. (in prep)
Ørsdalsvatn	1995	Oligotrof	2,86*	0,13	0,13	Berge et al. (in prep)
Tyrifjorden	1981	Oligotrof	2,70	0,09	0,12	Berge 1983
Mjøsa	1976	Oligotrof	5,60	0,08	0,14	Holtan 1991
Mjøsa	71-76	Oligotrof	5,60	0,30	0,14	Holtan et al. 1979
Storsjøen	flere år	Oligotrof	2,60	0,09	0,12	Holtan 1991
Femunden	flere år	Oligotrof	7,50	0,03	0,15	Holtan 1991
Ossjøen	flere år	Oligotrof	2,70	0,04	0,12	Holtan 1991
Aursunden	flere år	Oligotrof	0,90	0,05	0,10	Holtan 1991
Øyern	flere år	Oligotrof	0,05	0,04	0,04	Holtan 1991
Snåsavatn	84-87	Oligotrof	3,30	0,20	0,13	Lien et al. 1988
Bergsvannet	92-95	Mesotrof	0,117	0,11	0,15	Fjeld pers. med.
Gjersjøen	1992	Eutrof	1,50	0,73	0,40	Faafeng 1994
Gjersjøen	1994	Eutrof	1,50	0,30	0,40	Faafeng 1996
Gjersjøen	1995	Eutrof	1,50	0,22	0,40	Oredalen pers. med.
Eikenesvannet	92-95	Eutrof	0,012	0,24	0,22	Fjeld pers med.
Østensjøvannet	1994	Eutrof	0,12	0,80	0,25	Solheim 1995
Børsesjø	1990	Eutrof	0,052	0,46	0,24	Faafeng 1991
Horpestadvannet	1982	Eutrof	0,041	0,21	0,23	Faafeng et al. 1985
Frøylandsvatn	79-83	Eutrof	1,20	0,38	0,30	Faafeng et al. 1985
Jarenvannet	1980	Eutrof	0,5	0,49	0,28	Faafeng et al. 1982
Langvatnet	1992	Eutrof	0,33	0,38	0,27	Faafeng et al. 1993a
Isesjø	91-92	Eutrof	1,00	0,19	0,30	Faafeng et al. 1993b
Haugestadvannet	92-95	Sterkt eutrof	0,012	0,02	0,22	Fjeld pers med.
Årungen	1977	Sterkt eutrof	1,50	0,50	0,31	Grøterud og Rosland 1981
Årungen	1978	Sterkt eutrof	1,50	0,20	0,31	Grøterud og Rosland 1981

TEOTIL's modell ser ut til å overestimere både P- og N-retensjon for oligotrofe innsjøer. Når det gjelder eutrofe innsjøer ligger de observerte verdiene for både fosfor og nitrogen så vidt over det TEOTIL tilsier (tabell 3).

Tabell 3. Gjennomsnittlige verdier ut i fra tabell 1 og 2.

	P-retensjon (%)				N-retensjon (%)			
	oligotrofe innsjøer		eutrofe innsjøer		oligotrofe innsjøer		eutrofe innsjøer	
	observert	TEOTIL	observert	TEOTIL	observert	TEOTIL	observert	TEOTIL
middel	34	53	49	48	6	10	31	30
min	-4	26	6	17	-8	4	2	22
max	72	70	86	55	30	15	73	40
N	12	12	11	11	16	16	11	11

Tabell 4. Sammenhengen mellom observerte og predikerte P-retensjonsverdier ut i fra ulike modeller. Lineær regresjon, R^2 er regresjonskoeffisienter.

Modeller	R^2	Regresjonsligning
Larsen og Mercier 1976 - alle innsjøer	0,33	$y = 0,3561x + 0,3528$
Larsen og Mercier 1976 - grunne innsjøer	0,56	$y = 0,3875x + 0,2804$
Larsen og Mercier 1976 - dype innsjøer	0,12	$y = 0,0268x + 0,6241$
Berge 1987 - grunne innsjøer	0,54	$y = 0,2820x + 0,4004$
Rognerud et al. 1979 - dype innsjøer	0,12	$y = 0,0252x + 0,4761$
OECD 1982, Nordic - alle innsjøer	0,47	$y = 0,4349x + 0,3626$
Ny justert Larsen og Mercier - alle innsjøer	0,50	$y = 0,4623x + 0,2555$
Ny justert Larsen og Mercier - grunne innsjøer	0,62	$y = 0,5434x + 0,1961$

Det er de dype innsjøene som ser ut til å være dårligst tilpasset P-retensjonsberegningene i TEOTIL. Datamaterialet er imidlertid lite på dype innsjøer, og kan forklare den dårlige sammenhengen med målte verdier og predikerte verdier etter Rognerud og medarbeidere sin modell ($R^2 = 0,12$) og etter Larsen og Mercier sin modell ($R^2 = 0,12$).

Modellen til Berge, som er tilpasset grunne innsjøer, stemmer bra overens med det foreliggende datamaterialet for grunne innsjøer ($R^2 = 0,54$). Modellen som er utgangspunktet for retensjonsberegningene i TEOTIL er imidlertid like godt tilpasset grunne innsjøer ($R^2 = 0,56$) på dette materialet.

Gjennomsnittlig ligger TEOTIL's P-retensjon 12 % høyere enn de observerte verdier for oligotrofe innsjøer og 1 % under for eutrofe innsjøer (tabell 3). Ut i fra det foreliggende tallmaterialet kan det se ut som om den observerte retensjonen er høyere i eutrofe innsjøer sammenlignet med oligotrofe innsjøer. Det kan derfor tyde på at det er riktig å differensiere etter trofigrad også når det gjelder fosfor. Dette er imidlertid noe usikkert, siden det er relativt få observerte innsjøer og det er vanskelig å forklare dette teoretisk. De mest næringsrike innsjøene er som oftest grunne, så det kan også være dybdeforhold som bidrar til forskjellene mellom oligotrofe og eutrofe innsjøer. Det ble forsøkt å justere Larsen og Mercier's formel for P-retensjon etter trofinivået. Disse justerte formlene gir en bedre tilnærming enn den eksisterende modellen som ligger til grunn for retensjonsberegningene i TEOTIL.

Ny modell for oligotrofe innsjøer:

$$R_p = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1}{T_w}}} - 0,12$$

Ny modell for eutrofe innsjøer:

$$R_p = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1}{T_w}}} + 0,01$$

R_p = retensjonskoeffisient for fosfor
 T_w = vannets teoretiske oppholdstid

Det er de oligotrofe innsjøene som har størst avvik mellom målt og beregnet retensjon. De innsjøene i Norge som har O₂-mangel i hypolimnion i stagnasjonsperioder, er som oftest grunne innsjøer i landbruksområder eller nær tettbebyggelse. De fleste norske innsjøer er næringsfattige og lite produktive dvs retensjonsberegningene passer dårlig i store deler av Norge.

Siden det kan se ut som om P-retensjonen i eutrofe innsjøer er noe underestimert, kan det tyde på at frigjøring av fosfater fra sedimentene i O₂-fattige miljøer ikke i vesentlig grad reduserer retensjonen av fosfor i norske innsjøer. For enkelte ekstreme sjøer som Østensjøvannet ser en likevel klart denne effekten. Når det gjelder N-retensjonen i næringsrike innsjøer, kan det derimot tenkes at denitrifikasjon er med på å øke retensjonen i forhold til det som modellen predikerer for enkelte innsjøer.

Blågrønne bakterier vil ofte gjøre seg gjeldene i innsjøer med store tilførsler med fosfor. I perioder med nitrogen som det begrensende næringsstoffet, har nitrogenfikserende blågrønne bakterier en konkurransefordel. En amerikansk undersøkelse viser nitrogenfiksering på under 1 % av tilførslene i oligotrofe og mesotrofe innsjøer, men opp til 22 % i eutrofe innsjøer (Howarth et al. 1988).

Det er framlagt hypoteser om at sedimentasjonskoeffisienten (dvs. retensjonen) er avhengig av følgende faktorer; vannets oppholdstid, P-tilførsler, P-innhold i innsjøen, innsjøareal, alkalitet, pH, kalsium, jern, aluminium, oppløste humøse substanser, algebiomasse og artssammensetningen, næringskjeden, stabiliteten av stratifisering, oksygenforholdene i bunnforholdene, vindindusert turbulens, innsjøareal, middeldyp (Reckhow 1979). Det er gjort mange mer eller mindre vellykkede forsøk på å se noen samvariasjon mellom retensjonen av P og de ovenfornevnte faktorer, men den eneste gode sammenhengen har vist seg å være med vannets oppholdstid (Ahlgren et al. 1988).

Larsen og Mercier (1976) pekte også på andre faktorer som kan påvirke P-retensjonen som innsjøens morfologi, klima og vannets kjemiske sammensetning. Men det er vanskelig å vite hvordan disse faktorene virker inn uten en nærmere undersøkelse av effektene.

6. Konklusjon og tilrådinger

De beregningene som ligger til grunn for retensjonskoeffisientene i TEOTIL stemmer noenlunde med de observerte verdiene for enkelte innsjøer i Norge (tabell 1 og 2). Retensjonen varierer mye fra år til år i noen av eksemplene. Dette viser at retensjonen er svært avhengig av vannføringen, noe det ikke blir tatt hensyn til ved bruk av teoretisk oppholdstid.

I TEOTIL er det ikke beregnet noen retensjon for små innsjøer. Denne undersøkelsen viser derimot at også små innsjøer som Røynelandsvatn, Årungen og Gjersjøen har en betydelig retensjon. Det antas derfor at retensjonen i en del av områdene er underestimert i TEOTIL.

Sammenligningen mellom observert og predikert retensjon viste en viss overestimerting av retensjonen av både fosfor og nitrogen for oligotrofe vann og en svak underestimerting for eutrofe vann. Differensierte koeffisienter etter trofigrad ga en bedre tilpasset modell for retensjonen av fosfor (tabell 4).

Grunnlaget for retensjonsberegningene inkluderer imidlertid et relativt lite antall innsjøer i Norge. De fleste innsjøene i vårt materiale er fra Østlandet, og er ikke nødvendigvis representativt for hele landet. Det er derfor usikkert om den nye modellen bør erstatte det eksisterende grunnlaget for retensjonsberegningen i TEOTIL. Inntil vi har et bedre og bredere datagrunnlag, foreslås det å beholde dagens retensjonsbetrakning i TEOTIL.

Litteraturen framhever både kjemiske og biologiske faktorer som påvirker retensjonen, og som dermed burde vært lagt til grunn for beregningene, men så langt er det ingen som har lyktes med å bruke andre parametre enn teoretisk oppholdstid, middeldyp, trofigrad, næringstilførsler, vannføring, volum og innsjøareal.

En retensjonsbetrakning i TEOTIL må være operativ, på den måten at retensjonen må kunne fastslås med tilgang på parametre som ikke krever for mye innsats å skaffe til veie. Innsjøkonsentrasjonen, innløpsmengde og utløpsmengde er eksempler på parametre som kan gi en god tilpassing i en modell, men som krever for mye innsats å fremskaffe.

7. Litteratur

- Ahl, T. 1973. Mälarens belastning och vattenkvalitet - Scr. Limnol. Upsal. Coll. 9, No 332.
- Ahlgren, I. 1973. Limnologiska studier av sjön Norrviken. III. Avlastningens effekter. Scr. Limnol. Upsal. Coll. 9. No 333.
- Ahlgren, I. 1978. Response of Lake Norviken to reduced nutrient loading. Verh. Internat. Verein. Limnol. 20. pp. 846-850.
- Ahlgren, I., Sörensen, F., Waara, T. and Vrede, K. 1994. Nitrogen Budgets in relation to microbial transformations in lakes. Ambio. 23: 267-377.
- Andersen, J. M. 1974. Nitrogen and phosphorus budgets and the role of sediments in six shallow Danish lakes - Arch. Hydrobiol. 74, pp. 528-550.
- Berge, D. 1983. Tyrifjordundersøkelsen 1978-1981. Sammenfattende sluttrapport. Tyrifjordutvalget 1983. 156 s.
- Berge, D. 1987. Fosforbelastning og respons i grunne og middels grunne innsjøer. Hvordan man besetmmer akseptabelt trofinivå og akseptabel forforbelastning i sjøer med middeldyp 1,5-15 m. NIVA-rapport O-85110, L.2201, 44s
- Berge, D. og Fjeld, E. 1995. Mobilization of nitrogen from drained wetlands. In: Newsletter 3/95, Nitrogen from mountains to fjords. pp. 7-8.
- Berge, D., Fjeld, E., Hindar, A. og Kaste, Ø. (in prep). Nitrogen retention in two Norwegian Watercourses of different Trophic Status. Ambio Vol. 26.
- Canfield, D. E. and Bachman, R.W. 1981. Prediction of total phosphorus concentrations, chlorophyll a and Secchi depths in natural and artificial lakes, Can. J. Fish. Aquat. Sci. 38, pp. 414-423.
- Chan, Y.K. and Campell, N.E.R. 1980. Denitrification in Lake 227 during summer stratification . Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37, pp. 506-512.
- Datsenko, Yu.S. 1994. Concentration and Balance of Phosphorus in Uchinsk Reservoir. Hydrobiological Journal, 30 (3), p. 89-98.
- Dodd, D.J.R. and Bone, D.H. 1975. Nitrate reduction by denitrifying bacteria in single and two stage continuous reactors. Water Research 9, pp. 323-328.
- Erlandsen, A.H., Grøterud, O. og Skogheim, O.K. 1980. Intern tilførsel av fosfor i innsjøer ved høy pH. Stensiltrykk nr.7/1980. Inst. for hydrotekn. NLH.
- Faafeng, B. 1989. Omsetning av nitrogen i vassdrag - Naturlige prosesser fjerner også nitrogen. VANN nr. 2-1989. s. 258-269.

- Faafeng, B. 1991. Børsesjø - Sedimentanalyser og rapportering av overvåkningsresultater 1990. NIVA-rapport L. 2617, 28 s.
- Faafeng, B. 1994. Gjersjøens utvikling 1972 - 93 og resultater fra sesongen 1993. NIVA-rapport. L.3111, 56 s.
- Faafeng, B. 1996. Overvåkning av Kolbotnvannet 1994 samt av Gjersjøens tilløpsbekker. NIVA-rapport. L.3397, 46 s.
- Faafeng, B., Brabrand, Å., Brettum, P., Gulbrandsen, T., Løvik, J.E., Rørslett, B., Saltveit, S.J. og Tjomsland, T. 1985. Overvåking av Orrevassdraget. Hovedrapport 1979-83. NIVA-rapport 191A/85, L. 1755, 128 s.
- Faafeng, B., Braband, Å., Brettum, P. og Hessen, D.O. 1993b. Isesjø i Østfold- tiltak for bedring av vannkvaliteten. NIVA-rapport, L.2929, 66 s
- Faafeng, B., Braband, Å., Gulbrandsen, T., Lind, O., Løvik, J.E., Løvstad, Ø. og Rørslett, B. 1982. Jarevatnet. NIVA O-78014, rapp. nr. 1411, 62 s.
- Faafeng, B., Brettum, P., Gulbrandsen, T., Løvik, J-E., Rørslett, B. og Sahlqvist, E.Ø. 1981. Randsfjorden. Vurdering av innsjøens status 1978-80 og betydningen av planlagte reguleringer i Etna og Dokka. Hovedrapport. NIVA-rapport nr. O-78014, 138 s.
- Faafeng, B., Brettum, P., Hessen, D.O. og Holtan, G. 1993a. Straumevassdraget i Bø kommune. Karakterisering av vannkvaliteten og tiltaksplan mot forurensninger. NIVA-rapport, L. 2912, 94 s.
- Faafeng, B. og Løvik, J.E. 1986. Overvåkning av Gjersjøen - Akershus, Rutineundersøkelser 1985. NIVA-rapport O-70006, 49 s.
- Fjeld, Eirik. Personlig meddelelse.
- Fleischer, S., Andreasson, I.M., Holmgren, G., Joelson, A., Kindt, T., Rydberg, L. and Stibe, L. 1989. Land use - Water quality. A study in the catchment of the Laholm Bay, 236 p.
- Flett, R.J., Schindler, D.W., Hamilton, R.D. and Campbell, E.R. 1980. Nitrogen fixation in Canadian Precambrium Shield lakes. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37, pp. 494-505.
- Frisk, T., Niemi, J.S. and Kinnunen, K.A.I. 1981. Comparison of statistical phosphorus-retention models. Ecol. modelling 12, pp. 11-17.
- Grøterud, O. og Rosland, F. 1981. Vannbalanse og stofftransport i Årungens nedbørfelt 1977-79. Inst. for Hydroteknikk, NLH, Stensiltrykk nr. 4/1981, 54 s.
- Holtan, H. 1991. Forurensningene i Glomma 1989-1990. Forurensningsbudsjett, forurensningsgrad, vurderinger og prognoser. NIVA-rapport, L. 2546, 65 s.
- Holtan, H., Kjellberg, G., Brettum, P., Tjomsland, T. og Knoph, T. 1979. Mjøsprosjektet. Hovedrapport for 1971-76. NIVA-rapport O-69091, nr. 1117.
- Holtan, H., Berge, D. og Molvær, J. 1990. Retention of nutrients in lakes and rivers with comments on retention in fjords. Paper prepared for "The Convention for The Prevention og Marine

- pollution from land-based sources - ad hoc working group on methods of calculation of nutrient inputs", 11p.
- Holtan, H. og Åstebøl, S.O. 1990. Håndbok i innsamling av data om forurensningstilførsler til vassdrag og fjorder. Revidert utgave. NIVA-rapport, L. 2510, 53 s.
- Howarth, R.W., Marino, R., Lane, J. and Cole, J.J. 1988. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine and marine ecosystems. 1. Rates and importance. *Limnol. Oceanogr.* 33: 669-687.
- Ibrekk, H.O., Berge, D., Holtan, H., Gulbrandsen, R. og Øren, K. 1991. Nordsjøplanen. Vassdrag - Inndeling i resipientområder, tilførsler, retensjon. Mål for vannkvalitet og behov for reduksjon av tilførsler. NIVA-rapport, L.2628, 92 s.
- Jensen, J.P., Kristensen, P. og Jeppesen, E. 1990. Relationship between nitrogen loading and in-lake nitrogen concentrations in shallow Danish lakes. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 24: 201-204.
- Kaste, Ø., Høyås, T.R., Berge D., Fjeld E., Johansen, S.W., Lindstrøm, E.-A., Nilsen, P. og Tørseth, K. 1995. Nitrogen fra fjell til fjord. Årsrapport 1994. 77 s.
- Kirchner, W.B. and Dillon P.J. 1975. An empirical method of estimating the retention of phosphorus in lakes. *Wat. Resour. Res.* Vol. 11, No.1, pp. 182-183.
- Kristensen, P., Jensen, J.P. og Jeppesen, E. 1988. Re-evaluation og simple lake models. NPO-project No 4.5. Midterm status 1988.- Freshwater Laboratory, Silkeborg, Denmark, 15p.
- Larsen, V. 1975. Nitrogen transformation in lakes. In Conference on Nitrogen as a Water Pollutant. Proceedings. Vol. 2. IAWPR Specialized Conference, Copenhagen.
- Larsen, D. P. and Mercier, H.T. 1976. Phosphorus Retention Capacity of Lakes. *J. Fish. Res. Board Ca.* 33. pp. 1742-1750.
- Lien, L., Arnekleiv, J.V., Brettum, P., Koksvik, J.I. 1988. Tiltaksorientert overvåking av Snåsavatn 1984-1987. SFT rapport 322/88, L.nr. 2132, 109 s.
- Lijklema, L., Jansen, J.H. and Roijackers, R.M.M. 1989. Eutrophication in the Netherlands. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 21, Brighton, pp. 1899-1902.
- Nürnberg, G. K. 1984. The prediction of internal phosphorus loading in lakes with anoxic hypolimnia. *Limnol. Oceanogr.* 29. pp. 111-124.
- OECD, 1982. Eutrophication of waters. Monitoring, Assessment and Control. Paris. 154 p.
- Oredalen, Tone Jøran. Personlig meddelelse.
- Ostrofsky, M.L. 1978. Modification og phosphorus retention models for use with lakes with low areal water loading. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 35. pp. 1532-1536.
- Petterson, K. og Boström, B. 1990. Kväveomsättning i limniska ekosystem. En litteraturöversikt. Naturvårdsverket. Rapport 3822. 67 s.
- Petterson, K og Wallsten, M. 1990. Sjörestaurering i Sverige, metoder och resultat. Naturvårdsverket rapport 3817. 57 s.

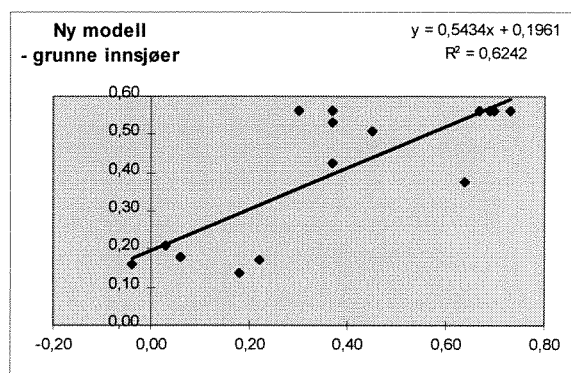
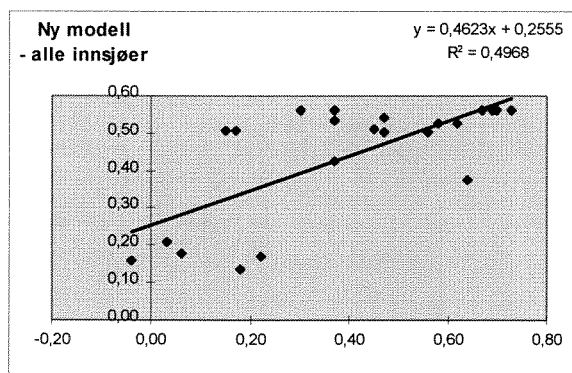
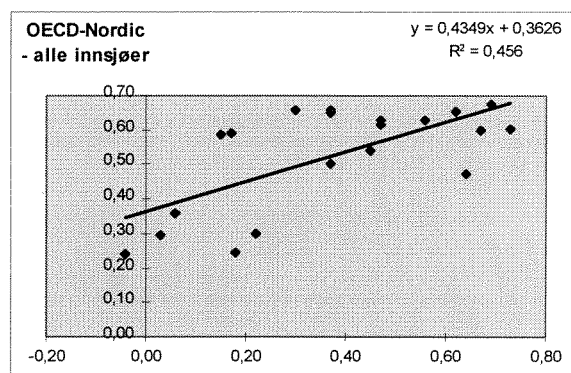
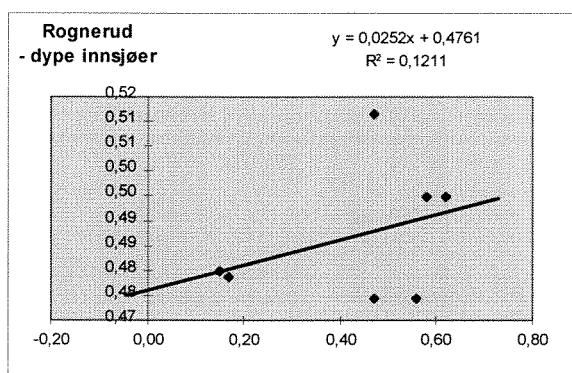
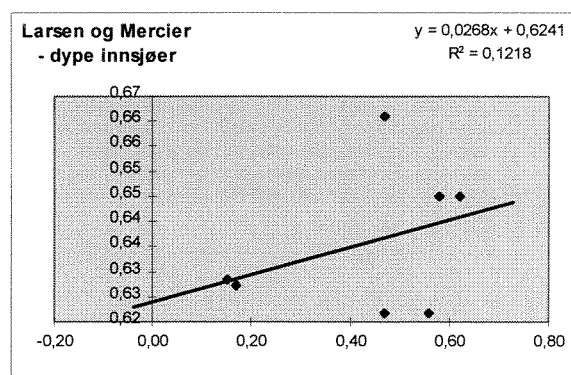
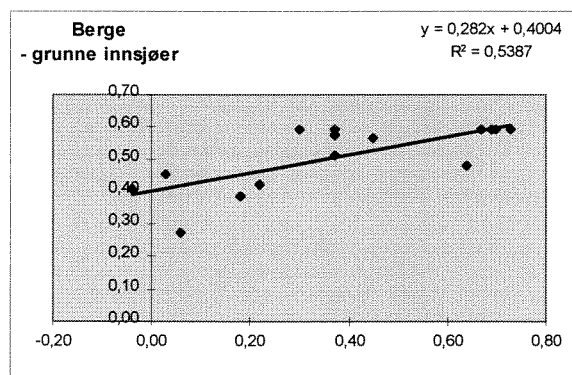
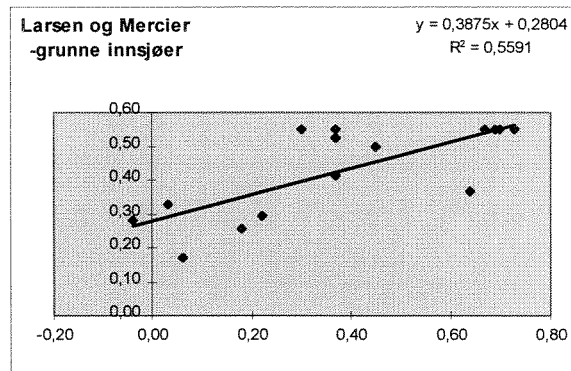
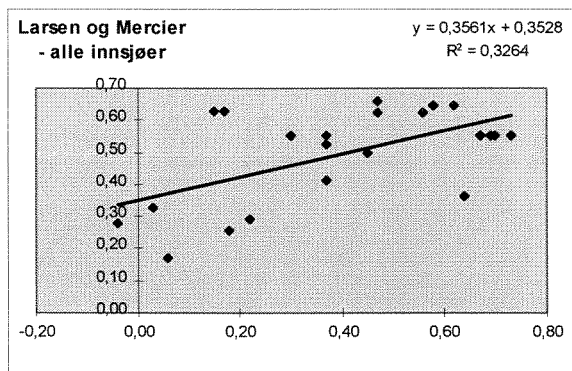
- Piontelli, R. og Tonolli, V. 1964. Il tempo di residenza della acque lacustri in relatione ai fenomeni di arricchimento in sostanze immesse, con particolare riguardo al Lago Maggiore. Mem. Ist ital. Idrobiol. 17, pp. 247-266.
- Reckhow, K.H. 1979. Empirical lake models for phosphorus: development, applications, limitations and uncertainty. In D. Scavia and A. Robertson (eds) Perspectives on lake ecosystem modeling. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor., pp. 193-221.
- Rognerud, S., Berge, D. og Johannessen, M. 1979. Telemarksvassdraget - hovedrapport fra undersøkelsen i perioden 1975-79. NIVA-rapport O-70112.
- Rönner, U. and Sörensson, F. 1985. Denitrification rates in in the low-oxygen waters of the stratified Baltic proper. Appl. Environ. Microbiol. 50, pp. 801-806.
- Rørslett, B., Berge, D., Erlandsen, A.H., Johansen, S.W. og Brettum, P. 1984. Vasspest i Steinsfjorden, Ringerike. Innvirkning på vannkvaliteten 1978-83 og behov på tiltak. NIVA-rapport, L.1582, 52 s.
- Skogheim, O.K. 1981. Sedimentenes egenskaper og rolle ved sanering/restaurering av Årungen. VANN nr. 4, 1981, s. 423-432.
- Solheim, G. 1995. Østensjøvann med tilløpsbekker. Årsrapport 1994. Oslo vann- og avløpsverk, miljølitsyn, 18 s.
- Stauffer, R.E. 1985. Relationships between phosphorus loading and trophic state in calcareous lakes of southeast Wisconsin. Limnol. Oceanogr. 30, pp. 123-145.
- Smith, V.H., Rigler, F.H., Choulik, O., Diamond, M., Griesbach, S. and Skraba, D. 1984. Effects of phosphorus retention in subarctic Québec lakes. Verh. Internat. Verein. Limnolo. 22, pp. 379-382.
- Svendsen, L. M. 1992. Retention af nitrogen, fosfor og organisk stof i et dansk vandløpsystem. Jordforskseminar i Økologisk renseteknologi 1993.
- Thyssen, N., Sørensen, J. and Nilonen, T. 1986. Denitrifikation i vanløb. Variation og regulering i sediment og biofilm (Gelbaek og Rabis baek, 1985). Institut for genetik og Ökologi, Aarhus Universitet, 51 s.
- Tirén, 1983. On denitrification in lakes, Acta Univ. Upsal. 673, 23 s.
- Tjomsland, T. og Bratli, J.L. 1996. Brukerveiledning for TEOTIL. Modell for teoretisk beregning av fosfor- og nitrogenførsler i Norge. NIVA-rapport. L. 3426-96. 84 s.
- Uchmanski, J. and Szeligiewicz, W. 1988. Empirical models for predicting water quality as applied to data on lakes of Poland. Ekol. pol. 36, 3-4, pp.285-316.
- Van Cleemput, O., Patrick, J.W.H. and McIlhenny, R.C. 1975. Formation of chemical and biological denitrification products in flooded soil at controlled pH and redox potential. Soil. Biol. Biochem. 7, pp. 329-332.

Van Kessel, J.F. 1976. Influence of denitrifications in aquatic sediments on the nitrogen content of natural waters. Agricultural Research Report 858.

Vollenweider, R.A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Mem. Ist. Ital. Idrobiol.33: 53-58.

Økland, J. 1983. Ferskvannets verden 1. Miljø og prosesser i innsjø og elv. Universitetsforlaget, 202 s.

Vedlegg A. Lineær regresjon mellom observerte og ulike modellens predikerte P-retensjoner



Lineær regresjon mellom observerte (x-akse) og predikerte vedier (y-akse) for P-retensjon i innsjøer. Det er benyttet ulike modeller (Larsen og Mercier/TEOTIL, Berge, Rognerud et al. , OECD-Nordic og en ny modell som er utviklet på bakgrunn av avviket mellom observerte og predikerte verdier fra Larsen og Mercier/TEOTIL).

Norsk institutt for vannforskning

Postboks 173 Kjelsås
0411 Oslo

Telefon: 22 18 51 00
Telefax: 22 18 52 00

Ved bestilling av rapporten,
oppgi løpenummer 3604-97.

ISBN 82-577-3159-5