

# Opgørelse af eksporten/importen af danske og udenlandske N og P tilførsler til det marine miljø og atmosfæren

---

Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 29. oktober 2014

Marie Maar

Institut for Bioscience

Rekvirent:  
Naturstyrelsen  
Antal sider: 8

Faglig kommentering:  
Stiig Markager  
Kvalitetssikring, centret:  
Poul Nordemann Jensen



AARHUS  
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Tel.: +45 8715 0000  
E-mail: [dce@au.dk](mailto:dce@au.dk)  
<http://dce.au.dk>

# Indhold

Indledning	3
Datagrundlag	4
Resultater for N-budget	5
TN-eksport fra Danmark til Østersøen	6
TP-udledninger	7
Sammenfatning	7
Referencer	8

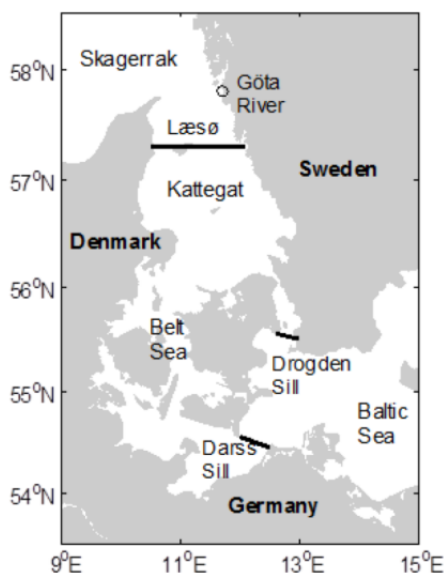
## Indledning

Naturstyrelsen har bedt DCE, Århus Universitet, om et notat, som opgør eksporten/importen af danske og udenlandske N- og P-udledninger til det marine miljø og atmosfæren. Det er i notatet delt op i to afsnit om N-budgetter for de indre danske farvande defineret som havområder fra Læsø til Darss- og Drogden tærsklerne (Figur 1), et afsnit om den danske N-eksport til Østersøen og et sidste afsnit om P-udledninger.

Eutrofiering er et problem i de indre danske farvande. Om sommeren kan der forekomme iltsvind, høje chl *a* koncentrationer og lav sigtdebyde med konsekvenser for udbredelsen og biodiversiteten af bundvegetationen og bundfaunasamfundet. Eutrofiering er forårsaget af en for høj tilførsel af næringssalte (Andersen et al. 2011, Hansen et al. 2013). De vigtigste N- og P-kilder er tilførsler fra land, atmosfæren og de tilstødende farvande. De indre danske farvande udveksler vand med Nordsøen igennem Skagerrak og med Østersøen over Darss- og Drogden tærsklerne (Figur 1). De danske N- og P-udledninger til det marine miljø og atmosfæren vil ligeledes give en eksport til de andre landes havområder i Østersøen. Der er i gangsat nationale vandplaner for de kystnære marine områder jævnfør Vandrammedirektivet og et Østersø-program (The HELCOM Baltic Sea Action Plan) for de åbne marine områder jævnfør det Marine Havstrategi Direktiv, hvor målene er at opnå en 'God Økologisk Status'. Derfor er det hensigtsmæssigt at undersøge, hvorvidt det er de danske kilder eller de eksterne kilder, som er mest betydende for den økologiske status i de indre danske farvande. Hvis de danske kilder er væsentlige, så kan en national indsats ud over indsatsen iht. Vandrammedirektivet være nødvendig, hvorimod det ellers også kan kræve et internationalt samarbejde. Det er endvidere vigtigt at opgøre biotilgængeligheden af de forskellige N-kilder, da en stor del af det organiske-N er svært-nedbrydeligt og dermed ikke kan bidrage til eutrofieringen indenfor opholdstiden på <6 måneder i området. Størstedelen af det svært-nedbrydelige N tilføres som opløst organisk materiale fra landbaserede kilder omkring Østersøen og Nordsøen. Biotilgængeligheden af organisk-P er >90% og der regnes derfor kun på TP.

Dette notat opstiller et budget for de vigtigste kilder af totalt-N (TN), biotilgængeligt-N ( $N_{\text{bio}}$  - for definition se senere) og totalt-P (TP) til de indre danske farvande. TN er ofte blevet brugt til at opgøre N-tilførsler, men er ikke økologisk relevant. Bio-tilgængeligt-N er derimod den aktive del af TN-puljen som bidrager til eutrofieringen. Opgørelsen deles op i de danske kilder, lokale kilder (Danmark+Sverige+Tyskland) og eksterne NP-kilder (fra Skagerrak og Østersøen). Budgetterne er i stor grad baseret på forskning udført i forbindelse med DSF-projektet IMAGE og på grundlag af NOVANA/HELCOM data. Desuden opgøres eksporten af danske TN- og TP-udledninger fra land og atmosfæren til andre lande baseret på NOVANA/HELCOM data.

**Figur 1.** Kort over de indre danske farvande fra Læsø til Darss og Drogden tærsklerne.



### Datagrundlag

De opstillede budgetter for TN,  $N_{\text{bio}}$  og TP for de indre danske farvande indeholder de vigtigste kilder såsom tilførsler fra land og atmosfæren samt udveksling med de omkringliggende farvande. TN-budgettet er baseret på monitoringsdata og modeldata fra NOVANA/HELCOM for årene 2000-2009 (Jørgensen et al. 2014). De landbaserede kilder tilføres området vandbårent via vandløb, fjorde mm. Limfjorden har en lille vandudveksling med Kattegat og N-tilførslen til Kattegat antages at indeholde 40% af tilførslen til den østlige del af Limfjorden, dvs. den resterende del tilbageholdes i Limfjorden. De svenske tilførsler til de indre danske farvande inkluderer ikke Göta elven, som udmunder i en nordgående strøm nord for Læsø. De resterende landbaserede lokale kilder fra Danmark, Sverige og Tyskland medtages 100% i N-budgettet dvs. uden en tilbageholdelse i de kystnære områder. Budgettet for  $N_{\text{bio}}$  bygger videre på TN budgettet ved at antage en biotilgængelighed på de forskellige kilder. Biotilgængeligheden antages at være 100% for opløst uorganisk nitrogen ( $\text{DIN}=\text{NH}_4, \text{NO}_2, \text{NO}_3$ ) og partikulært organisk nitrogen (PON). Derimod har den opløste organiske N-pulje (DON) forskellig biotilgængelighed for tilførsler fra land (35%), atmosfæren (47%) og de tilstødende farvande (19%) (Tabel 1). Andelen af TN som er biotilgængeligt for hver kilde kan således estimeres ud fra:

$$f_{N_{\text{bio}}} = \frac{N_{\text{bio}}}{\text{TN}} = \frac{\text{DIN} + \text{PON} + \alpha \text{DON}}{\text{TN}}, \quad (1)$$

hvor  $\alpha$  er biotilgængeligheden af DON. Eksporten af N fra danske udledninger til de andre bassiner i Østersøen er opgjort ved hjælp af HELCOM data (HELCOM 2013). TP-budgettet er baseret på monitoringsdata og modeldata fra NOVANA/HELCOM for årene 2000-2009. P-tilførslen til Kattegat antages at indeholde 40% af tilførslen til den østlige del af Limfjorden, mens den resterende udledning antages at tilbageholdes i fjorden. Biotilgængeligheden antages at være 100% både for opløst uorganisk og organisk fosfor.

**Tabel 1.** Biotilgængeligheden af de forskellige DON-kilder til indre danske farvande. De fremhævede tal er gennemsnit og parenteser angiver intervallet.

DON-kilde	Bio-tilgængelighed (%)	Reference
<i>Fra land</i>	<b>35</b> (0-73)	Jørgensen et al. (2014)
<i>Fra atmosfæren</i>	<b>47</b> (20-75)	Jørgensen et al. (2014)
<i>Fra de tilstødende farvande</i>		
Arkona	12	Kaas et al. (1994)
Skagerrak	23	Kaas et al. (1994)
Østersøen, åbent vand	13	Markager et al. (2007)
Arkona	20	Markager et al. (2007)
Darss	28	Lønborg & Søndergaard (2009)
Gennemsnit	<b>19</b>	

## Resultater for N-budget

### TN budget for indre danske farvande

Den atmosfæriske deposition udgør 40 kt-N år<sup>-1</sup> til de indre danske farvande, hvoraf de danske tilførsler udgør 25% (Tabel 2). De samlede tilførsler fra Danmark, Sverige og Tyskland udgør 55% af total atmosfærisk input. De indre danske farvande modtager 62 kt-N år<sup>-1</sup> fra land, hvoraf halvdelen stammer fra Danmark (Tabel 2). Ved den sydlige rand er der en nettotransport ind i området på 178 kt-N år<sup>-1</sup> fra Østersøen. Ved den nordlige rand, er der en nettotransport på 147 kt-N år<sup>-1</sup> som kommer ind med bundvandet fra Skagerrak. Samlet giver det en ekstern tilførsel på 348 kt-N år<sup>-1</sup> til de indre danske farvande (Tabel 2). Det samlede (atmosfære+land) danske bidrag udgør 42 kt-N år<sup>-1</sup> svarende til 9% af de totale TN-kilder (Tabel 2). De samlede lokale TN-tilførsler udgør 19%. Usikkerheden på estimaterne var størst for advektion ved randen ( $\pm 50\%$ ) (Petersen and Hjorth 2011) og N-depositionen (30%) (Ellermann et al. 2012) og mindst for land tilførsler ( $\pm 3\%$ ) (Pers. komm. S.E. Larsen).

### N<sub>bio</sub> budget for indre danske farvande

Det efterfølgende budget for N<sub>bio</sub> (biotilgængeligt-N) er vist i Tabel 3. For de atmosfæriske tilførsler er ca. 10% af TN på organisk form (DON) med en biotilgængelighed på 47% (Jørgensen et al. 2014). Dette giver en total biotilgængelighed på 95%, dvs i alt 38 kt-N<sub>bio</sub> år<sup>-1</sup>, hvoraf de danske tilførsler udgør 25%. Omkring 80% af TN fra de landbaserede kilder er DIN, mens de resterende 20% DON antages at have en biotilgængelighed på 35% (Jørgensen et al. 2014). Dette giver en total biotilgængelighed på 87% og et input på 54 kt-N<sub>bio</sub> år<sup>-1</sup> fra land, hvor de danske tilførsler udgør halvdelen af de lokale kilder. For de tilstødende farvande, kan DON-puljen beregnes ud fra TN fratrukket DIN og PON (baseret på Chl a koncentrationer og en sæsonafhængig C:Chl a-ratio). Andelen af DON varierer fra 59% i bundvandet fra Skagerrak til 80% i Østersøvandet (Jørgensen et al. 2014). Med en biotilgængelighed på 19% giver det en nettotransport på 63 kt-N<sub>bio</sub> år<sup>-1</sup> ind i området fra Østersøen og 78 kt-N<sub>bio</sub> år<sup>-1</sup> ind i området fra bundvandet i Skagerrak. Samlet giver det

en ekstern tilførsel på 141 kt-N<sub>bio</sub> år<sup>-1</sup> til de indre danske farvande (Tabel 3). Det samlede (atmosfære+land) danske bidrag udgør dermed 37 kt-N<sub>bio</sub> år<sup>-1</sup> svarende til 16% af de totale N<sub>bio</sub>-kilder (Tabel 3). De samlede lokale tilførsler udgør 32%. Der er noget usikkerhed omkring estimerne af biotilgængeligheden for de tilstødende farvande, der er baseret på ganske få studier. Den beregnede usikkerhed er <19% hvis man beregner tilførslen indenfor et realistisk interval af  $\alpha$  fra 12% til 28% (Tabel 4).

**Tabel 2.** TN-tilførsler til de indre danske farvande fra atmosfærisk TN-deposition (kt-N år<sup>-1</sup>) og vandbårent (kt-N år<sup>-1</sup>) fra lokale landbaserede kilder eller ved vandudveksling med de tilstødende farvande og deres procentvise andel af total. Kilde: Jørgensen et al. (2014).

Kilde	Danske kilder	Lokale kilder (DK+SE+D)	Eksterne kilder	Total for lokale og eksterne kilder
Atmosfæren	10 (25%)	22 (55%)	18 (45%)	40
Vandbårent fra land eller tilstødende farvande	32 (8%)	62 (15%)	348 (85%)	410
Alle kilder	42 (9%)	84 (19%)	366 (81%)	450

**Tabel 3.** N<sub>bio</sub>-tilførsler til de indre danske farvande fra atmosfærisk N<sub>bio</sub>-deposition (kt-N år<sup>-1</sup>) og vandbårent (kt-N år<sup>-1</sup>) fra lokale landbaserede kilder eller ved vandudveksling med de tilstødende farvande og deres procentvise andel af total. Kilde: Jørgensen et al. (2014).

Kilde	Danske kilder	Lokale kilder (DK+SE+D)	Eksterne kilder	Total for lokale og eksterne kilder
Atmosfæren	9 (25%)	21 (55%)	17 (45%)	38
Vandbårent fra land eller tilstødende farvande	28 (14%)	54 (28%)	141 (72%)	195
Alle kilder	37 (16%)	75 (32%)	158 (68%)	233

**Tabel 4.** Transporten af N<sub>bio</sub> (kt-N år<sup>-1</sup>) fra Østersøen og bundvand fra Skagerrak ved forskellige biotilgængeligheder ( $\alpha$ ) af DON. Parenteser angiver den procentvise afvigelse fra transporten ved  $\alpha=19\%$ . Kilde: Jørgensen et al. 2014.

$\alpha$ -værdi	12%	19%	28%
Fra Østersøen	51 (-16%)	63	72 (+19%)
Fra Nordsøen	71 (-9%)	78	85 (+9%)

### TN-eksport fra Danmark til Østersøen

Den totale atmosfæriske tilførsel fra Danmark til hele Østersøen udgør 18,5 kt-TN år<sup>-1</sup> for perioden 2000-2009 (Tabel 5). Den danske andel af totale tilførsler udgør 25% i de indre danske farvande og <3% i de andre bassiner i Østersøen (Tabel 5). Den danske atmosfæriske TN-udledning har derfor den største betydning i de indre danske farvande og kun en lille del når resten af Østersøen.

Desuden eksporterer Danmark land-baseret TN via vandudveksling med de tilstødende bassiner i Østersøen. Modelberegninger fra the Baltic Nest Institut viser dog at betydningen udelukkende er lokal, dvs. i de indre danske farvande, da <1% påvirker den centrale Østersø (HELCOM 2013). Der kan

dog være en eksport til Skagerrak/Nordsøen med overfladevandet, men det er uvist hvor stor en del af denne transport som er af dansk oprindelse.

**Tabel 5.** Atmosfærisk TN-deposition (kt-N år<sup>-1</sup>) og den procentvise andel fra Danmark til de forskellige bassiner i Østersøen for årene 2000-2009. Kilde: HELCOM (2013).

Basin	Atmosfærisk deposition	% af total
Indre danske farvande	9,9	25
Centrale Østersø	7,1	3
Rigabugten	0,3	3
Den Finske Bugt	0,3	2
Botniske Hav	0,7	3
Botniske Bugt	0,2	3
Total	18,5	3

### TP-udledninger

Den totale atmosfæriske deposition udgør 0,2 kt-P år<sup>-1</sup> (Tabel 6), men er ikke fordelt på lande da de forskellige emissionskilder ikke er kvantificeret (HELCOM 2013). De danske og lokale tilførsler fra land udgør hhv. 4% og 8% af de totale vandbårne kilder (Tabel 6). Ved den sydlige rand er der en nettotransport ind i området på 14,5 kt-P år<sup>-1</sup> fra Østersøen. Ved den nordlige rand, er der en nettotransport ind i området på 12,0 kt-P år<sup>-1</sup> som kommer ind med bundvandet fra Skagerrak. Det betyder at den største tilførsel (88%) til de indre danske farvande kommer fra de tilstødende farvande (26,5 kt-P år<sup>-1</sup>). Usikkerhed for vandbårne TP-transporter er den samme som for TN-budgettet (50%). Usikkerheden for land-baserede tilførsler er 3% (Pers. komm. S.E. Larsen).

Den danske atmosfæriske eksport af TP til de tilstødende farvande er ikke kvantificeret (HELCOM 2013). Desuden eksporterer Danmark land-baseret TP via vandudveksling med de tilstødende bassiner i Østersøen. Modelberegninger fra the Baltic Nest Institut viser dog at betydningen udelukkende er lokal, dvs. i de indre danske farvande, da <1% påvirker den centrale Østersø (HELCOM 2013). Der kan dog være en eksport til Skagerrak/Nordsøen med overfladevandet, men det er uvist hvor stor en del af denne transport som er af dansk oprindelse.

**Tabel 6.** TP-tilførsler til de indre danske farvande fra atmosfærisk TP-deposition (kt-P år<sup>-1</sup>) og vandbårent (kt-P år<sup>-1</sup>) fra lokale landbaserede kilder eller ved vandudveksling med de tilstødende farvande og deres procentvise andel af total. Atmosfæriske TP-kilder er ikke opgjort for de enkelte lande (HELCOM 2013).

Kilde	Danske kilder	Lokale kilder (DK+SE+D)	Eksterne kilder	Total for lokale og eksterne kilder
Atmosfæren	-	-	-	0,2
Vandbårent fra land eller tilstødende farvande	1,3 (4%)	2,5 (8%)	26,5 (88%)	30,3
Alle kilder				30,5

### Sammenfatning

I forhold til forvaltningen af de indre danske farvande er det vigtigt at kende størrelsen og oprindelsen af den samlede tilførsel, dvs. hvor stor en del er danske og dermed mulige at påvirke med nationale tiltag. Den relative betydning af de danske, lokale og eksterne N-kilder i de indre danske farvande

afhænger af om man estimerer TN eller den biotilgængelige del af TN, dvs.  $N_{\text{bio}}$  (Tabeller 2 & 3). I TN budgettet udgør det danske bidrag kun 9% af de totale tilførsler (atmosfære + vandbårent), mens det er 16% i  $N_{\text{bio}}$ -budgettet. Tilsvarende er betydningen af de lokale kilder (dvs. Danmark, Sverige og Tyskland) 19% og 32% i hhv. TN og  $N_{\text{bio}}$ -budgettet. Denne forskel skyldes især den lave biotilgængelighed af TN fra Skagerrak og Østersøen. Den nye form for budget baseret på biotilgængeligt-N må anses for at være mere økologisk relevant for forvaltningen af områder med eutrofieringsproblemer og som modtager forskellige typer af tilførsler. Det skal dog understreges, at den danske andel af  $N_{\text{bio}}$ -tilførsler på 16% er et gennemsnit for de indre danske farvande, hvor der i virkeligheden er en rummelig fordeling af betydningen af de danske kilder. Den vestlige del af Bælthavet og Kattegat med en mindre vandudveksling med de tilstødende farvande samt de kystnære områder tæt på de vandbårne og luftbårne kilder vil således være relativt mere påvirkede af danske tilførsler end de beregnede 16%. Omvendt vil Øresund, Storebælt og den østlige del af Kattegat med en stor vandudveksling med Skagerrak og Østersøen, være relativt mindre påvirkede af de danske tilførsler (Carstensen et al. 2006). Den danske tilførsel af TP fra land udgør 4% af de vandbårne kilder (Tabel 6). Den atmosfæriske tilførsel til området er meget lille (<1%). Den største TP-tilførsel kommer fra de tilstødende farvande (88%). Den danske TN- og TP-eksport til de andre Østersø-bassiner er uden større betydning for det samlede budget.

## Referencer

- Andersen, J. H., Axe, P., Backer, H., Carstensen, J., Claussen, U., Fleming-Lehtinen, V., Jarvinen, M., Kaartokallio, H., Knuuttila, S., Korpinen, S., Kubiute, A., Laamanen, M., Lysiak-Pastuszak, E., Martin, G., Murray, C., Mohlenberg, F., Nausch, G., Norkko, A., and Villnas, A., 2011. Getting the measure of eutrophication in the Baltic Sea: towards improved assessment principles and methods. *Biogeochemistry* 106, 137-156.
- Carstensen, J., Conley, D. J., Andersen, J. H., and Ærtebjerg, G., 2006. Coastal eutrophication and trend reversal: A Danish case study. *Limnol Oceanogr* 51, 398-408.
- Ellermann, T., Andersen, H. V., Bossi, R., Christensen, J., Løfstrøm, P., Monies, C., Grundahl, L., Geels, C., 2013. Atmosfærisk deposition 2012. Videnskabelig rapport fra DCE-Nationalt Center for Miljø og Energi No. 73, Aarhus Universitet, DCE-Nationalt Center for Miljø og Energi., pp. 85.
- Hansen, J. W. (2013). Marine områder 2012. NOVANA.; Videnskabelig rapport fra DCE-Nationalt Center for Miljø og Energi No. 77, Aarhus Universitet, DCE-Nationalt Center for Miljø og Energi., pp. 162.
- HELCOM (2013). Review of the 5th Baltic Sea Pollution load compilation for the 2013 HELCOM ministerial meeting. *Baltic Sea Environments Proceedings* No. 141.
- Jørgensen L., Markager, S.S., Maar, M. (2014). Bioavailability and cycling of nitrogen in the transition zone between the Baltic Sea and the North Sea. *Biogeochemistry* 117:455-472.
- Kaas, H., Møhlenberg, F., Forbes, V., Pedersen, B., 1994. Biotilgængelighed af kvælstof og fosfor. *Havforskning fra Miljøstyrelsen* 40.



Lønborg, C., Søndergaard, M., 2009. Microbial availability and degradation of dissolved organic carbon and nitrogen in two coastal areas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 81, 513-520.

Maar, M., Møller, E.F., Larsen, J., Madsen, K.S., Wan, Z., She, J., Jonasson, L., Neumann, T., 2011. Ecosystem modelling across a salinity gradient from the North Sea to the Baltic Sea. *Ecological Modelling* 222, 1696-1711.

Markager, S., Stedmon, C.A., Tranvik, L.J., Kronberg, L., Kulovaara, M., 2007. Final report for DONKEY - dissolved organic nitrogen as a key nutrient in the Baltic Sea.

Petersen, D.L.J., Hjorth, M., 2010. Marine områder 2009. NOVANA.