



KLIMANORMALISERING AF KVÆLSTOFAFSTRØMNING

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 393

2020



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

[Tom side]

KLIMANORMALISERING AF KVÆLSTOFAFSTRØMNING

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 393

2020

Søren Erik Larsen
Hans Thodsen
Henrik Tornbjerg
Jørgen Windolf

Aarhus Universitet, Institut for Bioscience



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 393
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Klimanormalisering af kvælstofafstrømning
Forfattere:	Søren Erik Larsen, Hans Thodsen, Henrik Tornbjerg og Jørgen Windolf
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Bioscience
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	September 2020
Redaktion afsluttet:	September 2020
Faglig kommentering:	Jacob Carstensen
Kvalitetssikring, DCE:	Signe Jung-Madsen
Sproglig kvalitetssikring:	Charlotte Elisabeth Kler
Ekstern kommentering:	Miljøstyrelsen. Kommentarerne findes her: http://dce2.au.dk/pub/komm/SR393_komm.pdf
Finansiel støtte:	Miljøstyrelsen
Bedes citeret:	Larsen, S.E., Thodsen, H., Tornbjerg, H. & Windolf, J. 2020. Klimanormalisering af kvælstofafstrømning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 30 s. - Videnskabelig rapport nr. 393 http://dce2.au.dk/pub/SR393.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten gennemgår en række modeller til klimanormalisering af kvælstoftilførslen til havet og en ny metode til klimanormalisering anbefales.
Emneord:	Klimanormalisering, kvælstoftilførsel, normaliserings modeller
Layout:	Grafisk Værksted, AU Silkeborg
Foto forside:	Colourbox
ISBN:	978-87-7156-516-4
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	30
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR393.pdf

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Summary	8
1 Introduktion	10
1.1 Hvad er klimanormalisering	10
1.2 Hvorfor gennemføres klimanormalisering	10
2 Metode	11
2.1 Studie af eksisterende metoder	11
2.2 Testede metoder	11
3 Resultater	18
3.1 Testede inputparametre	18
3.2 Test af rummelig skala	19
3.3 Test af forskellige klimanormaliseringsmetoder	20
3.4 Valgte metode og beregningsvejledning	25
3.5 Konsekvens af anvendelsen af den nye metode.	26
4 Diskussion	28
5 Referencer	29

[Tom side]

Forord

Miljø- og Fødevareministeriet (MFVM) har ønsket en nærmere vurdering af de elementer, der kan indgå i klimanormaliseringen af kvælstoftilførslen til havet, da den eksisterende normaliseringsmetode (anvendt i NOVANA rapporten "Vandløb 2017" og de foregående år) ikke medregner effekten af alle klimaparametre (Thodsen m.fl. 2019a).

Rapporten er bestilt af MFVM, og der har i projektforløbet været afholdt statusmøder, hvor MFVM har haft mulighed for at stille opklarende spørgsmål og kommentere på projektet, ligesom de har haft mulighed for at indsende skriftlige kommentarer til rapportudkast.

Sammenfatning

Opgørelse af kvælstoftilførslen til havet rapporteres årligt i NOVANA vandløbsrapporten (Thodsen m.fl. 2019b) dels som aktuel årlig tilførsel af kvælstof og som en normaliseret tilførsel. Normalisering foretages for at fjerne den variation i tidsserien for kvælstoftilførslen til havet, som stammer fra år-til-år variationer i klima og vejr. Størrelsen af vandafstrømningen og den tilknyttede kvælstoftransport er koblete. I år med megen nedbør og stor vandafstrømning vil der normalt også være en større kvælstoftransport end i tørre år med lille nedbørsmængde og vandafstrømning. Variationer i afstrømningen fra år til år medfører således en betydelig variation i kvælstofafstrømningen mellem årene. Denne variation medfører, at opgørelse af tilførslen i det enkelte, aktuelle år kan være vanskelig at anvende administrativt og slører fx en vurdering af, hvorledes tiltag til begrænsning af kvælstoftilførslen er slået igennem. Den normaliserede kvælstoftilførsel beregnes således for at kunne se på udviklingen i den diffuse kvælstoftilførsel med en minimal påvirkning af klimaet det enkelte år. Der beregnes klimanormaliserede tilførsler for opgørelser dels på kalender år og dels på agrohydrologisk år (1. april til 31. marts).

I dette projekt evalueres en lang række statistiske metoder til klimanormalisering af TN tilførslen fra land. Der er analyseret dels forskellige tidslige opløsninger (år, måned) dels forskellige rumlige opløsninger (DK, kystafsnit, vandløb).

Evalueringerne har vist, at normalisering foretaget på årlige og månedlige data giver forskellige resultater. Månedstidsskridt anvendes, da det giver den bedste normalisering. Derimod giver normalisering for vandløb summeret op på landsskala og normalisering på kystafsnit summeret op på landsskala omtrent det samme resultat, som ved at behandle hele landet samlet. Derfor behandles tilførslen fra hele landet samlet. Metoderne virker også på vandløb- og kystafsnitsniveau, men man må forvente, at modellerne passer mindre godt, jo længere man går ned i rumlig og tidslig opløsning.

Der er kun evalueret metoder for total kvælstof (TN), men der er dog ikke rent fagligt nogen grund til, at metoderne ikke ligeledes vil kunne anvendes på andre stoffer (NO_3 , TP, osv.). Dette vil dog kræve en verifikation af, hvor godt ligningerne beskriver sådanne data, og om yderligere klimaparametre bør inddrages. I den seneste NOVANA rapport "Vandløb 2018" (Thodsen m.fl. 2019b) er metoden også anvendt for NO_3 tilførsler.

Baseret på evalueringen af de forskellige metoder vælges en metode, som er baseret på logaritme transformerede TN tilførsler og på lineær regressionsanalyse. Analyserne udføres med logaritmetransformerede vandafstrømninger som forklarende variabel med en tilhørende hældningskoefficient, som modelleres som en lineær funktion af året i tidsserieperioden. Ved logaritmen forstås her og i hele rapporten den naturlige logaritmefunktion. Det anbefales, at normaliseringen foregår på månedlige data, da normalisering på månedlige data giver mulighed for at summere op på andet end kalenderår, fx hydrologisk og agrohydrologisk år. Er det ikke muligt at fremskaffe månedlige data, foreslås samme metode på årlige data.

Klimanormalisering foretages bedst med anvendelse af vandafstrømningen som inputparameter. Nedbørsmængden kan anvendes på lige fod på årlige data, men er ikke lige så god for månedlige data. Årsagen til dette er, at nedbør, der især falder i sidste del af en kalendermåned, først strømmer i vandløbet i den næste måned afhængigt af årstiden og geologien i vandløbsområdet. Ingen yderligere klimavariabel, så som temperatur eller antal frostdøgn, har en signifikant effekt på normaliseringen.

Summary

Assessment of the annual total nitrogen load to the sea is reported in the annual NOVANA river report (Thodsen et al., 2019b), both as the actual annual load and as the normalized annual load. The normalization is done with the purpose of removing the variation of the time series caused by year-to-year variation in climate / weather.

The size of the annual runoff and the associated nitrogen load are coupled. Wet years with a relatively large runoff are usually associated with larger nitrogen loads than dryer years with less runoff. Thus, the year-to-year variation in runoff gives a substantial variation in the nitrogen load. This variation makes the single-year load difficult to use administratively and e.g. blurs the evaluation of effect of mitigation measures established to reduce nitrogen loads. The normalized nitrogen load is therefore calculated in order to be able to see the trend of the diffuse nitrogen load with a minimal influence of a given year's climate / weather. The normalized nitrogen load is calculated both for calendar- and agro-hydrological years (April 1st – March 31st). In this report, a number of statistical methods to climate normalization of annual total nitrogen loads to the sea are evaluated. Both different time steps (month, year) and different geographical resolutions (entire Denmark, coastal area, river) are evaluated.

The evaluation shows that assessments done on monthly or annual data yield different results, the monthly step yielding the best results. Therefore, a monthly time step is used. Climate normalization performed on aggregated single river data, aggregated single coastal areas or for the entire country yields virtually the same results. Therefore, the entire country approach is used. The method also works on the river or coastal area level, but must be expected not to perform as well with decreasing scale (time as well as space).

The method is evaluated for total nitrogen, but there is no theoretical reason for not applying it to other substances / nutrients, for example nitrate or total phosphorus. However, this requires verification of the equations' performance on such data and testing the need for the inclusion of climate / weather parameters other than runoff. In the latest NOVANA report (Thodsen et al., 2019b), the method was applied for nitrate loads.

Following the analysis of a range of methods, a method based on logarithmic transformed nitrogen loads and linear regression was chosen. The analysis is performed using logarithmically transformed runoff values as the explaining variable, with an associated slope coefficient modelled as a linear function of the year in the time series. Throughout this report, the term logarithm means the natural logarithm. It is recommended that normalization is performed on monthly data.

The normalization on monthly data makes it possible to sum up not only calendar years, but also e.g. different hydrological years. If only annual data are available, it is recommended to apply the same method for annual values.

Climate normalization is shown to perform best using runoff as the input parameter. Precipitation can be used with comparable success on annual data, but performs less well on monthly data. The main reason for this is that a large

part of the precipitation falling in the late part of a month enters the river during the next calendar month, depending on the season and the geology of the catchment. No other climate parameters, such as temperature or the number of frost-days, were found to have a significant effect on the normalization.

1 Introduktion

I denne rapport testes og evalueres en række forskellige beregningsmetoder og teknikker til klimanormalisering af den totale kvælstoftilførsel. Desuden testes indflydelsen af en række klimaparametre på kvælstoftilførslen for at afgøre, hvilke klimaparametre, der kan inkluderes i normaliseringsproceduren.

1.1 Hvad er klimanormalisering

For bedre at kunne analysere effekten af de miljøforbedrende tiltag, der siden sidst i 1980'erne er gennemført i landbruget, normaliserer man den diffuse næringsstoftilførsel til fjorde og marine kystafsnit for at søge at fjerne – i hvert fald en stor del af – betydningen af år-til-år variationer i vandafstrømningen / klimaet. Der korrigeres for en kombination af klimaændringer (ændringer, som sker over længere tid) samt for vejrmæssige variationer (som sker over langt kortere tid). Samlet set betragtes dette som klimanormalisering. Ved normaliseringen beregnes en diffus næringsstoftilførsel, som den kan antages at ville have været i det tidsrum (år / hydrologisk år / måned), såfremt vandafstrømningen / klimaet havde været lig den gennemsnitlige vandafstrømning / klima beregnet for en længere tidsperiode (på flere år).

Normalisering er en empirisk statistisk metode, hvis resultat er en ny tidsserie, hvor det meste af variationen, som skyldes variation i klimaet, er fjernet. Tidsserien af de normaliserede næringsstoftilførsler har derfor en reduceret år-til-år variation i forhold til variationen i de reelt opgjorte tilførsler. Hermed opnås en bedre mulighed for at påvise en eventuel udviklingstendens i den del af næringsstoftilførslen (den diffuse næringsstoftilførsel), der ikke forårsages af variationer i de årlige vandafstrømninger og mere generelt i det årlige klima.

1.2 Hvorfor gennemføres klimanormalisering

Argumentet for at normalisere er, at i et tørt nedbørsfattigt år vil der være en mindre del af markoverskuddet, der udvaskes til vandløbene. Omvendt vil der i et vådt år med stor vandafstrømning fra oplandene til vandløbene udvaskes mere. Sne og snesmeltning, fordampning og temperatur kan også have en indflydelse på hydrologien. Koldt vejr med frost og nedbør, der falder som sne, vil forskyde, hvornår den nedbør, der er faldet, vil påvirke tilførslen af næringsstoffer til vandmiljøet.

2 Metode

2.1 Studie af eksisterende metoder

Der er som en del af projektet gennemført et litteraturstudie med det formål at afdække, hvilke metoder, der eksisterer til normalisering af kvælstoftilførsler. Der er taget udgangspunkt i den del af litteraturen, der er baseret på områder med klima- og vandafstrømningsforhold sammenlignelige med danske forhold, fortrinsvis fra Nordeuropa.

Normalisering/standardisering er kendt i en række forskellige videnskaber, herunder

- Sundhedsvidenskab – sygdomsrater standardiseret til køn- og aldersfordelinger
- Økonomi (indeksering i økonomiske tidsserier)
- Luftkvalitet (især ozonmålinger repræsenteret i tidsserier)
- Vandmiljø (især stofmængder via vandløb).

Der er indsamlet artikler og rapporter vedr. de to sidste punkter og især fokuseret på vandmiljø. Neden for er listet de væsentligste artikler og rapporter, der er fundet relevante for denne rapport.

- Tekst fra EUROHARP projektet (OSPAR HARP guideline): Metoderne omtalt i denne rapport er hovedsageligt baseret på lineære regressionsmetoder. Både beskrevet med årlige og månedlige data se Silgram og Schoumans (ed., 2004).
- Flere artikler af Grimvall og Stålnacke: Semi-parametrisk metode, som er baseret på lineære statistiske metoder, men som indfører muligheden for tidslig udvikling i de statistiske parametre. Hovedsageligt beskrevet med månedlige data, se Stålnacke og Grimvall (2001). Artiklen fra 2001 er hovedartiklen i deres arbejde vedrørende normaliseringer.
- Rapporter til HELCOM: Ligeledes baseret på lineære sammenhænge før og efter transformation med den naturlige logaritme funktion. Hovedsageligt på årlige data, se Larsen og Svendsen (2019). Rapporten fra 2019 er den seneste og en opdatering af en tidligere rapport om samme emne.

2.2 Testede metoder

Analyser gennemført i denne rapport er for total kvælstof. Dels opgjort som transporter på målestationer og dels som diffuse tilførsler på kystafsnitskala og landsskala samt for målte og umålte arealer. Det kan ikke umiddelbart konkluderes, at klimanormaliseringen af transporten/tilførslen af andre stoffer, fx total fosfor, gennemføres optimalt med samme metode eller samme inputparametre, som fremkommer for klimanormaliseringen af TN.

I det efterfølgende beskrives en række forskellige metoder, som alle har været testet i dette projekt.

2.2.1 Metoder for normalisering af årlige data

Ifølge Silgram og Schoumans (ed., 2004) baseres den empiriske normaliseringsmetode på den lineære sammenhæng mellem årlig afstrømning (Q) og årlig næringsstoftilførsel (L)

$$L_i = \alpha + \beta \cdot Q_i + \varepsilon_i, \quad (1)$$

hvor α and β er parametre fra den lineære regressionsanalyse, i angiver år, ε_i står for residualfejlen i den lineære regression og ε_i antages at være uafhængige og identisk normalfordelte stokastiske variable. Den normaliserede stoftilførsel kan nu beregnes som

$$L_{iN} = L_i - (Q_i - \bar{Q}) \cdot \hat{\beta}, \quad (2)$$

hvor $\bar{Q}$ er den gennemsnitlige afstrømning for hele tidsserie perioden og $\hat{\beta}$ er hældningsestimatet i den lineære regression. Den generelle ide bag regressionsbaseret normalisering kan udtrykkes ved: er TN tilførslen c enheder højere/lavere end gennemsnitsresponsen på grund af klimavariationer eller andre naturlige variationer, så betyder normaliseringen, at der skal trække/lægge c fra/til de observerede TN tilførsler.

For at undgå mulige negative normaliserede stoftilførsler kan følgende formel anvendes i stedet for

$$L_{iN} = L_i \cdot \frac{\hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot \bar{Q}}{\hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot Q_i}. \quad (3)$$

I formel (3) drejer det sig altså om en relativ korrektion, hvorimod korrektionen er additiv i formel (2). Her angiver $\hat{\alpha}$ estimatet for afskæringen i den lineære regression. Formel (3) skal anvendes i de tilfælde, hvor formel (2) giver et negativt tal. Formel (3) skal altså kun anvendes i få tilfælde og kan især komme på tale i meget små vandløb.

Sammenhængen mellem afstrømning og stoftilførsler kan også modelleres efter log-log transformation, som normalt giver en anelse mindre residualfejl og dermed en bedre estimation, og hvor residualfejlene er tættere på at være normalfordelte. Normalfordelte residualer er en statistisk antagelse (forudsætning) ved regressionsanalyse, som her beskrevet. Normaliseringen kan altså også udføres på basis af en log-log regression mellem stoftilførsler og afstrømning:

$$\log L_i = \alpha + \beta \cdot \log Q_i + \varepsilon_i. \quad (4)$$

Dette giver følgende formel for de normaliserede tilførsler

$$L_{iN} = \exp(\log L_i - (\log Q_i - \log \bar{Q}) \cdot \hat{\beta}) \cdot \exp(0.5 \cdot \text{MSE}), \quad (5)$$

Eller for at undgå negative normaliserede tilførsler

$$L_{iN} = \exp\left(\log L_i \cdot \frac{\hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot \log \bar{Q}}{\hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot \log Q_i}\right) \cdot \exp(0.5 \cdot \text{MSE}). \quad (6)$$

I formlerne står $\log$ for den naturlige logaritme funktion, $\exp$ for den eksponentielle funktion og MSE står for Mean Squared Error og beregnes i regressionsanalysen (Snedecor & Cochran, 1989). MSE beregnes normalt i standard statistisk software og er defineret som

$$\text{MSE} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2, \quad (7)$$

hvor n er antallet af observationer i tidsserien, x_i er den observerede værdi og $\hat{x}_i$ er den modellerede værdi fra lineær regressionsanalyse.

Faktoren “ $\exp(0.5 \cdot \text{MSE})$ ” i formlerne er en bias korrektionsfaktor, som er udviklet og beskrevet i Ferguson (1986). Faktoren anvendes ved tilbagetransformering til en middelværdi i log-normalfordeling.

Den hidtidige metode, der i de senere år har været anvendt i NOVANA rapporteringen, er baseret på log-log regressionsanalyser som beskrevet oven for i formel (4) og (5).

Generelt har man i normaliseringsmetoderne anskuet residualerne for at være uafhængige og identisk fordelte (fra Normalfordelingen). Statistisk set er det muligt at estimere regressionsparametrene i en lineær model med autokorrelerede residualer. Analyser viser, at residualerne typisk følger en første ordens autoregressiv proces i tid.

Den lineære model kan udtrykkes som

$$L_i = \alpha + \beta \cdot Q_i + v_i, \quad (8)$$

hvor v_i , som nævnt, er en første ordens autoregressiv proces (AR(1)), defineret ved

$$v_i = \varepsilon_i - \varphi \cdot v_{i-1}.$$

Her er φ første ordens autokorrelationen (et tal mellem -1 og 1) og ε_i er som i en standard regressionsanalyse uafhængige fejllid med samme Normalfordeling. Det er også muligt at anvende denne metode til normalisering af TN stoftilførslen. Derved beregnes de normaliserede værdier som

$$L_{iN} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot \bar{Q} + \varepsilon_i - \hat{\varphi} \cdot v_{i-1}. \quad (9)$$

hvor modelfejlen er en sum af tidligere modelfejl samt første ordens autokorrelationen i stigende potens.

Der findes endvidere en simpel metode, som ikke anvender den statistiske information, der er til stede i koncentrations- og afstrømningsdata, og dermed ikke drager nytte af den statistiske sammenhæng mellem koncentrationer og afstrømninger. Metoden er givet ved formel 10:

$$L_{iN} = L_i \frac{\bar{Q}}{Q_i}. \quad (10)$$

Ved denne metode multipliceres den årlige næringsstoftilførsel med forholdet mellem den gennemsnitlige vandafstrømning i tidsperioden og den specifikke vandafstrømning. Det anbefales kun at anvende denne metode, såfremt man finder, at de førstnævnte metoder er utilstrækkelige, fordi model-estimerne er for svage statistisk set. Metoden omtales som ratio-metoden.

Det er endvidere forsøgt at supplere eller erstatte vandafstrømningen med andre forklarende variable: Nedbør, temperatur (max-, min og middeltemperatur) og antallet af frostdøgn. Man kan fx erstatte vandafstrømningen med nedbørsmængden, og man kan supplere den lineære sammenhæng med andre forklarende variable, altså temperatur og antallet af frostdøgn. Argumentet er, at temperatur og især frostdøgn kan betyde noget for mineraliseringen af kvælstoffet i jorden samt forsinke udvaskningen af kvælstoffet til et senere tøjbrud. Resultaterne af disse analyser er gengivet i afsnit 3.1.

2.2.2 Månedssdata

I dette afsnit beskrives empiriske normaliseringsmetoder, som søger at tage højde for hydrologien og klimaet fordelt på måneder – fremfor alene på år.

Disse metoder svarer til metoderne for årlige data bare med den forskel, at de empiriske normaliseringer udføres på månedlige data, som derefter kan aggregeres til en årlig stoftilførsel. De matematiske formler ser ud som følgende:

$$L_{ij} = \alpha_j + \beta_j \cdot Q_{ij} + \varepsilon_{ij}, \quad (11)$$

$$L_{ijN} = L_{ij} - (Q_{ij} - \bar{Q}_j) \cdot \hat{\beta}_j, \quad (12)$$

hvor indeks j står for måneder, og indeks i står for år.

Det antages således med metoden, at der er et lineært forhold mellem månedlige værdier for vandafstrømning og kvælstoftransport.

På tilsvarende vis kan man anvende log-log regression på de månedlige data (med reference til ovenstående formel (4) og (5)), og ligeledes kan de andre metoder beskrevet under årlige data overføres til månedlige data.

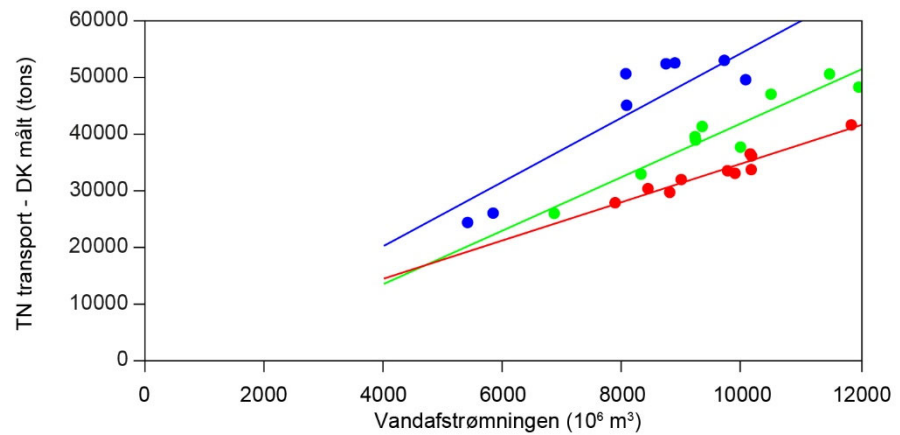
2.2.3 Tidsperioder

Der har været en udvikling i både afstrømningen og kvælstoftilførslen til havet siden 1990 og frem til 2018. Afstrømningen er stigende, mens man ser en faldende udviklingstendens i kvælstoftilførslen. Faldet i kvælstoftilførslen er glidende igennem perioden uden store bratte fald. Det fremgår af tidsserierne, at faldet stopper omkring 2011 med en tendens til en svag stigning derefter (Thodsen m.fl. 2019b). Det skal dog nævnes, at trenden efter 2007 er usikker pga. anvendelse af en forkert analysemetode til TN-analyser (Larsen m.fl. 2018; Thodsen m.fl. 2019b). Inkluderes punktkilder i data, forstærkes udviklingstendensen herunder - særligt faldet i tilførsler i starten af tidsserien 1990-2018 bliver mere tydeligt (Thodsen m.fl. 2019b). Vandafstrømningen er i samme periode steget svagt, men stigningen er ikke statistisk signifikant.

Derfor er det vigtigt, at en klimanormaliseringsmetode tager højde for den ændrede kvælstoftilførsel ved et normalt klima.

Det betyder også, at relationen mellem vandafstrømningen og TN-tilførslen løbende ændrer sig. Det er illustreret i Figur 1, hvor perioden 1990-2018 er delt op i 3 delperioder, som beskrevet i figurteksten. Figur 1 viser, at sammenhængen mellem de to variable ændrer sig, og især hældningskoefficienten aftager i størrelse. Det er nødvendigt at tage højde for dette i en klimanormalisering (Stålnacke og Grimvall, 2001).

Figur 1. Årlig diffuse TN transport fra det målte opland i Danmark som funktion af vandafstrømningen. Periode 1: 1990-1999 (blå), periode 2: 2000-2008 (grøn), periode 3: 2009-2018 (rød).



Det er således oplagt at håndtere dette problem ved at gennemføre en normalisering for hver periode for sig og sidenhen stykke den fulde tidsserie sammen fra de 3 normaliseringer. Man skal dog være opmærksom på, at delperioder som en tommelfingerregel bør have en længde, der er på mindst 8 år, da dette anses som et minimum for at kunne estimere parametrene solidt i regressionsanalyser.

Formler for den lineære normaliseringsmetode med perioder er generelt lig

$$L_{ijk} = \alpha_{jk} + \beta_{jk} \cdot Q_{ijk} + \varepsilon_{ijk}, \quad (13)$$

$$L_{ijkN} = L_{ijk} - (Q_{ijk} - \bar{Q}_j) \cdot \hat{\beta}_{jk}, \quad (14)$$

hvor indeks j står for måneder og k for periode. Andre normaliseringsmetoder kan justeres om til at indeholde perioder. Bemærk at gennemsnittet af Q skal beregnes over hele periodens længde og ikke i hver periode for sig.

I stedet for at betragte tidsperioder kunne man antage, at både afskæringen (α) og hældningen (β) har en glidende udvikling, fx lineær, over hele perioden fra 1990-2018. En statistisk model med lineært glidende udvikling i α og β kan defineres for årlige data ved

$$L_i = \alpha_1 + \beta_1 \cdot i + (\alpha_2 + \beta_2 \cdot i) \cdot Q_i + \varepsilon_i, \quad (15)$$

og normaliseringsformlen vil så have udseendet

$$L_{iN} = L_i - (Q_i - \bar{Q}) \cdot (\hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \cdot i). \quad (16)$$

Det er selvfølgelig muligt med forskellige variationer af modellen skrevet op i formel (15). Fx kunne parametrene (α_1, β_1) sættes lig nul, eller man kunne tænke sig, at udtrykket, som beskriver udviklingen i hældningen, indeholdt flere forskellige linjestykker. Ligeledes kan modeltypen anvendes for månedsdata og på logaritme transformerede data. Da vi udelukkende har at gøre med kvælstof fra de diffuse kilder, benyttes modellen i formel (15), men med de to parametre α_1 og β_1 lig nul, eller hvor kun β_1 er lig 0.

En ændring i afskæringsparameteren vil normalt stå for en ændring i punktkilder. Hvis en punktkilde skæres fra, vil det betyde et fald i kvælstofafstrømningen. Ændringer i de diffuse kilder vil vise sig i en ændring af hældningen i sammenhængen mellem kvælstof og vandafstrømning. Eftersom kun den

diffuse tilførsel normaliseres, forventes hovedsageligt en ændring over tid i hældningsparameteren.

En mere avanceret statistisk metode til at tage højde for ændrede sammenhænge er den semi-parametriske metode præsenteret i artiklen af Stålnacke og Grimvall (2001). For den matematiske beskrivelse af metoden henvises til artiklen. Metoden er implementeret i Visual Basic programmet i Excel "FLOWNORM 2.1" fra 2005. Dog viser brugervejledningen for softwaren, at der kun er mulighed for varierende afskæringer (generelle niveauer), hvorimod forskellige hældninger over tid ikke er mulige. Excel-programmet indeholder således ikke alt fra metoderne beskrevet i artiklen fra 2001. Der er en risiko for at overparametrisere modellerne beskrevet i formel 15, hvis man lader regressionsparametrene variere for frit. Derfor er der valgt en lineær tilgang, men man kan også anvende ikke-lineære tilgange, så længe antallet af parametre forbliver lavt.

En anden måde at beskrive hukommelse i tidsserien på og ligeledes tage højde for udviklingen i sammenhængen mellem TN og vandafstrømningen er at estimere en "Random walk" med drift, som matematisk kan beskrives på følgende måde

$$\begin{aligned}\log L_i &= \beta_1 \cdot \log Q_i + \beta_2 \cdot i + \frac{1}{(1-B)} \varepsilon_i \Rightarrow \\ \log L_i - \log L_{i-1} &= \beta_1 \cdot (\log Q_i - \log Q_{i-1}) + \beta_2 + \varepsilon_i\end{aligned}\quad (17)$$

I formel (17) indgår den såkaldte B-operator, som er defineret i formel (19) lidt længere nede. Med andre ord estimerer man en lineær model på differenserne mellem TN tilførsler i nuværende og foregående år med tilsvarende differens på vandafstrømninger som forklarende variable.

Den normaliserede TN tilførsel beregnes som:

$$L_{iN} = \hat{\beta}_1 \cdot \log \bar{Q} + \hat{\beta}_2 \cdot i + \frac{1}{(1-B)} \varepsilon_i, \quad (18)$$

hvor

$$\frac{1}{(1-B)} \varepsilon_i = \varepsilon_i + \varepsilon_{i-1} + \dots \quad (19)$$

I formlerne (17-19) udgør ε_i en såkaldt hvid støj, dvs. uafhængige fejld med samme Normalfordeling.

2.2.4 Metodeevaluering

I dette projekt evalueres en række forskellige metoder til klimanormalisering. Metoderne er evalueret med forskellige tidsopdelinger (år kontra - måned) og med forskellige antal perioder (1 (dvs. ingen), 2 og 3 perioder). Metoderne evalueres på grundlag af følgende to beregninger:

$$1) \text{ Størrelsesbevarende: } \frac{1}{n} \sum L_{iN} = \frac{1}{n} \sum L_i.$$

Dette omtales som evaluering 1 i det efterfølgende. Her kontrolleres, om de normaliserede værdier samlet set i gennemsnit har samme niveau som de ikke-normaliserede værdier. En procentafvigelse fra de ikke-normaliserede data beregnes endvidere i evalueringen. Den procentuelle afvigelse er defineret som

$$100 \cdot \left(\frac{\frac{1}{n} \sum L_{iN} - \frac{1}{n} \sum L_i}{\frac{1}{n} \sum L_i} \right).$$

For en normaliseringsmetode som i gennemsnit ikke helt rammer niveauet for de ikke-normaliserede værdier, er det altid muligt at korrigere biasen væk.

- 2) R^2 -værdien for den statistiske model, som anvendes til selve normaliseringen.

Dette omtales som evaluering 2 i det efterfølgende. Jo større R^2 -værdi, des mere af år-til-år variationen kan modelleres, hvilket betyder, at det er muligt at fjerne mere af den variation, der skyldes klimaet. Der ses desuden på modelfejls størrelse og forløb over tid.

Hvis man kun er interesseret i at teste for udviklingstendenser i den normaliserede tidsserie, så vil evaluering af R^2 værdien være tilstrækkelig, og man vil ikke have fokus på, om metoden er størrelsesbevarende.

Eftersom der er stort fokus på størrelsen af den årlige tilførsel af kvælstof fra hele Danmark samt separat til/fra diverse kystoplande og vandløb, er det vigtigt, at normaliseringen bevarer den gennemsnitlige størrelse af tilførslen set over hele tidsperioden. Så hvis der anvendes en metode, som giver normaliserede værdier, der i gennemsnit enten er mindre eller større end de ikke-normaliserede værdier, så skal værdierne korrigeres for bias.

Alle metoder, som anvender simpel lineær regression (uden foregående transformationer såsom logaritmen) og med uafhængige residualer (altså ingen autokorrelation), vil være størrelsesbevarende uden at gøre brug af en korrektion for bias. Metoder som ikke er størrelsesbevarende, biaskorrigeres ved anvendelse af følgende formel

$$L_{iNB} = L_{iN} + (\bar{L}_i - \bar{L}_{iN}).$$

Her er

$$\bar{L}_i = \frac{1}{n} \sum L_i$$

og

$$\bar{L}_{iN} = \frac{1}{n} \sum L_{iN}.$$

3 Resultater

I det følgende er resultater fra tests af inputparametre og klimanormaliseringsmetoder gennemgået og en kort diskussion af de fundne resultater givet. Beregningerne er som udgangspunkt gennemført på det danske målte areal (1990 – 2018), som udgør omtrent 50 % af det samlede areal. Alle punktkilder er fratrasket, så det, der regnes på, er det diffuse bidrag. Beregningerne er dels regnet for DK samlet, for 3. ordens kystafsnit enkeltvis og summeret op til landsskala samt for alle målte havstationer enkeltvis og summeret op til landsskala. Derudover er beregningerne foretaget for årlige data og for månedlige data summeret op til årligt niveau for kalenderår.

3.1 Testede inputparametre

Som nævnt tidligere er det blevet undersøgt, om en række variable tættere knyttet til klimaet end vandafstrømningen kan erstatte afstrømningen eller bidrage yderligere til en mere præcis klimanormalisering. Vandafstrømning og nedbørsmængden er stærkt korrelerede størrelser især på årsniveau og for større oplande. Dog skal man være opmærksom på, at for månedsdata kan sammenhængen være mindre tydelig alt efter, hvornår nedbøren falder i den pågældende kalendermåned og årstiden. Desuden er der en geografisk varierende forsinkelse, før nedbøren viser sig som vandafstrømning i vandløb. I Østdanmark er responsen hurtigere end i Vestdanmark. En test af inputparametrenes forklaringsstyrke viser, at nedbøren på årsniveau og for den samlede tilførsel fra Danmark er en lige så god variabel at bygge sin normalisering på som vandafstrømningen (se Tabel 1). Analyserne viser også, at for månedsdata forbliver vandafstrømningen klart den bedste prædiktør, så derfor er der arbejdet videre med den og set bort fra den samlede nedbør (se Tabel 1).

Med hensyn til temperaturdata så viser analyserne, at hverken min-, max eller middeltemperatur bidrager på en statistisk signifikant måde til at forklare variation i TN afstrømningen fra land. Det samme gælder for antallet af frostdage (se Tabel 1). En forklaring på dette kunne være, at temperatur / frostdage er indeholdt i vandafstrømningens størrelse, idet mange frostdage medfører lavere afstrømning i vandløbene, ved at nedbøren falder som sne samt ved, at der i koldere perioder heller ikke er så meget nedbør. Dermed repræsenterer perioder med mange frostdage tørre perioder. Mineraliseringen af kvælstof i jorden vil afhænge af temperaturen i jorden, således at den er større i vinterperioden, hvis jorden er varm. Til gengæld vil varme vinter måneder også betyde væsentlig mere nedbør og dermed en højere vandføring i vandløbene, som højst sandsynligt vil maskere betydningen af en øget mineralisering.

I Tabel 1 ses inputparametre, samt om parametrene på baggrund af multipel lineær regressionsanalyse er inkluderet / ekskluderet.

Autokorrelerede residualer er nævnt ovenfor (afsnit 2.2.1 og 2.2.3) som en mulighed i modellen for sammenhængen mellem TN stoftilførsel og vandafstrømningen (se ligning 9 og 18). Matematisk set er det sammenligneligt med at inkludere vandafstrømningen / nedbøren året eller måneden før det aktuelle år / måned, som man forsøger at modellere. Det har så at sige samme statistiske effekt i modellen. "Random walk" modellen med drift er en anden måde at håndtere autokorrelerede residualer på i en proces, hvor tidsrækkerne

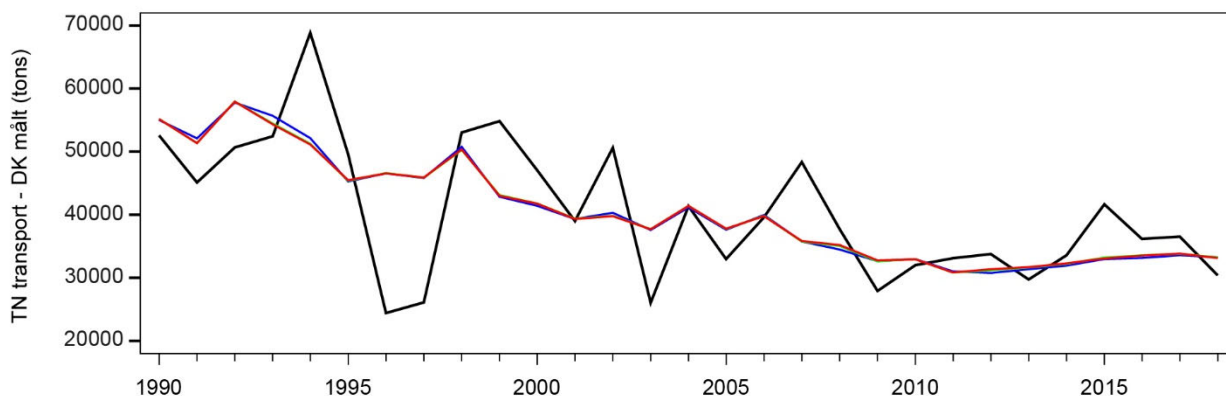
med TN tilførsler og vandafstrømningerne begge ikke er stationære, dvs. tids-serierne udvikler sig over tid.

Tabel 1. Testede inputparametre. Parametrenes forklaringsstyrke er testet ved standard multipel lineær regressionsanalyse. For temperaturvariablene er testen foretaget i en multipel regression sammen med afstrømningsvariablen, hvorimod afstrømning og nedbør er testet som eneste variable i regressionen.

Parameter	Inkluderet/Ekskluderet	Test værdier (årlig)	Test værdier (månedlig)
Afstrømning (mm)	Inkluderet	$T=4,72$; $P < 0,0001$	$T \in [6,5;23,2]$ Alle måneder signifikante med $P < 0,0001$
Nedbør (mm)	Ekskluderet	$T=4,94$; $P < 0,0001$	$T \in [0,1;8,1]$ Ikke alle måneder signifikante, Maj og August ikke signifikante
Middel temperatur (°C)	Ekskluderet	$T=-0,99$; $P = 0,33$	En måned (November) med signifikant effekt, $P \in [0,04;0,99]$
Minimums temperatur (°C)	Ekskluderet	$T=-1,17$; $P = 0,25$	Ingen måneder med signifikante effekter, $P \in [0,08;0,97]$
Maximums temperatur (°C)	Ekskluderet	$T=-1,16$; $P = 0,26$	Ingen måneder med signifikante effekter
Antal frostdøgn	Ekskluderet	$T=-0,82$; $P < 0,42$	Ingen måneder med signifikante effekter, $P \in [0,16;0,77]$
Forsinkelse afstrømning	Inkluderet		
Forsinkelse nedbør	Ekskluderet, da afstrømning er en bedre variabel at inddrage		

3.2 Test af rummelig skala

Det er blevet testet, om anvendelse af en finere rumlig skala end landsskala har indvirkning på klimanormaliseringen af kvælstoftilførslen fra hele landet. Det vil sige, at der er blevet testet for, om gennemførslen af en separat normalisering på fx hver målestation eller på hvert 3. ordens målt kystafsnit efterfølgende summeret til landsskala har en betydelig effekt på normaliseringsresultatet.



Figur 2. Betydning af rumlig skala for normaliseringen af TN ved lineær regression med 3 perioder med årlige målte data (metode E, Tabel 2). Vist er oprindelige unormaliserede TN transporter (sort), Metoden anvendt på landsskala (blå), metoden anvendt på 3. ordens farvande og efterfølgende summeret op på landsskala (grøn), metoden anvendt på havstationer (vandløb), og efterfølgende summeret op på landsskala (rød).

Testen viser, at der i praksis ikke er nogen forskel på de 3 niveauer, da de 3 kurver (blå, rød og grøn) i praksis ligger oven i hinanden, så man kan altså trygt foretage normalisering på landsskala, hvis det er DK-tal, man skal op-gøre (se Figur 2).

3.3 Test af forskellige klimanormaliseringsmetoder

Tabel 2 indeholder en liste med de metoder, der er evalueret i denne rapport. Metoderne er angivet med en tekstbeskrivelse, en henvisning til den matematiske formel, der definerer metoden (se kapitel 2), samt om evalueringen er foretaget på årlige og /eller månedlige data.

Tabel 2. Følgende metoder er blevet testet og anvendt til normalisering.

Metode	Beskrivelse	Formel nummer	Årligt/månedligt
A	Ratio	10	+/+
B	Lineær regression	2	+/+
C	Log-log lineær regression	5	+/+
D	Lineær regression opdelt i 2 perioder	14	+/+
E	Lineær regression opdelt i 3 perioder	14	+/+
F	Log-log lineær regression opdelt i 2 perioder	14 (med transformeret data)	+/+
G	Log-log lineær regression opdelt i 3 perioder	14 (med transformeret data)	+/+
H	Lineær regression med lineære hældninger og afskæring fast lig nul	16 (i en variant)	+/+
I	Log-log lineær regression med lineære hældninger og afskæring fast lig nul	16 (i en variant)	+/+
J	Lineær regression med 1. ordens autokorrelation	9	+/-
K	"Random walk" med drift	17	+/-
L	Semi-parametrisk	Se Stålnacke og Grimvall (2001)	-/+

I Tabel 3 er vist evalueringer for en række af disse metoder anvendt på årlige værdier. Evalueringerne viser, at R^2 -værdien stiger væsentligt, så snart man anvender modeller med flere forskellige hældningskoefficienter. Lineære modeller anvendt på logaritme transformerede data har en smule højere R^2 -værdier, men til gengæld er afvigelsen fra det ikke-normaliserede niveau større. I Figur 3 og 4 er vist tidsserierne for nogle af disse normaliseringsmetoder sammen med de ikke-normaliserede værdier.

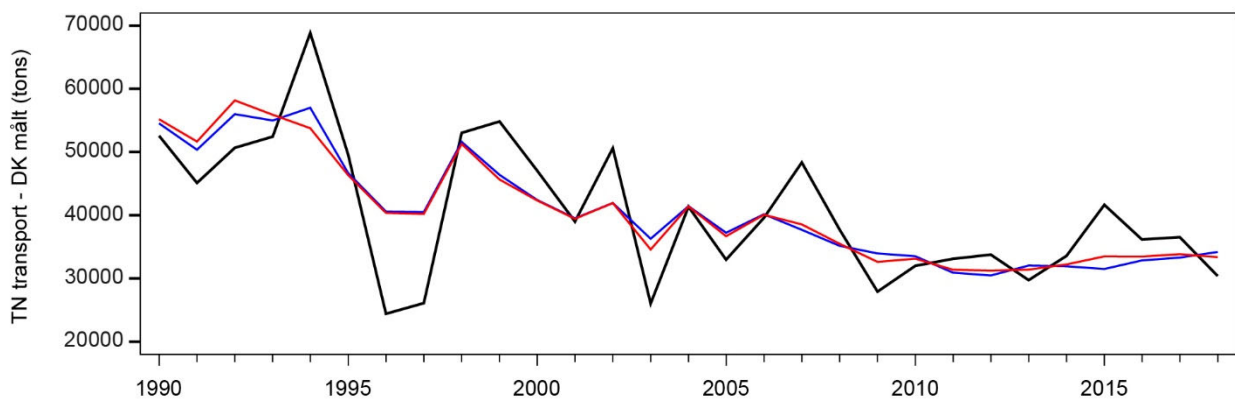
En vurdering af det tidlige forløb af residualerne (modelfejlene) viser, at modeller, hvor hældningskoefficienten tillades at afhænge af tiden, har en mere tilfældig fordeling af residualerne over tid end modellerne med fast og konstant hældning.

I Figur 3 ses, at begge metoder viser, at faldet i normaliserede TN transporter flader ud efter 2010. Tidsserierne for de to metoder er sammenlignelige med undtagelse af starten af perioden og 2015. En forklaring på dette er forskellen mellem en model med en ret linje gennem data og så en krum (log-log) kurve igennem data. En model med fast afskæring og hældningskoefficient viser en tidslig udvikling i residualerne fra positive mod negative, så disse modeller er ikke særligt anvendelige til normaliseringen.

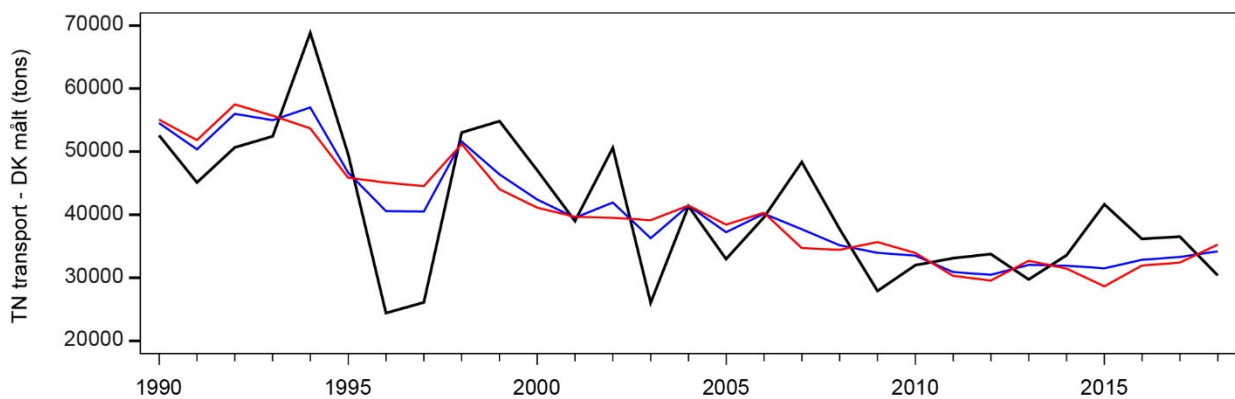
Tabel 3. DK årlige opgørelser (målt areal): Resultater af en række normaliseringsmetoder beregnet for årlige opgørelser for det målte område af DK. Gennemsnittet af de ikke-normaliserede data er 40519,0.

Metode	Gennemsnit af normaliserede værdier før korrektion for bias	Procent afvigelse	R ² -værdier
A	40619,8	0,25	0,40*
B	40519,0	0	0,40
C	40738,0	0,54	0,45
D	40763,9	0,60	0,78
E	40801,8	0,70	0,91
F	40400,8	-0,29	0,80
G	40209,7	-0,76	0,92
H	41046,3	1,30	0,91
I	40084,4	-1,1	0,92
J	40519,0	~0	0,90
K	40087,8	-1,1	0,95

*Beregnet som $\frac{\sigma^2 - \sigma_N^2}{\sigma^2} \in (0,1)$. Her står σ^2 for år-til-år variation i de oprindelige og ikke normaliserede værdier og tilsvarende er σ_N^2 år-til-år variationen for de normaliserede værdier. Ellers svarer evaluering 2 til R²-værdien.

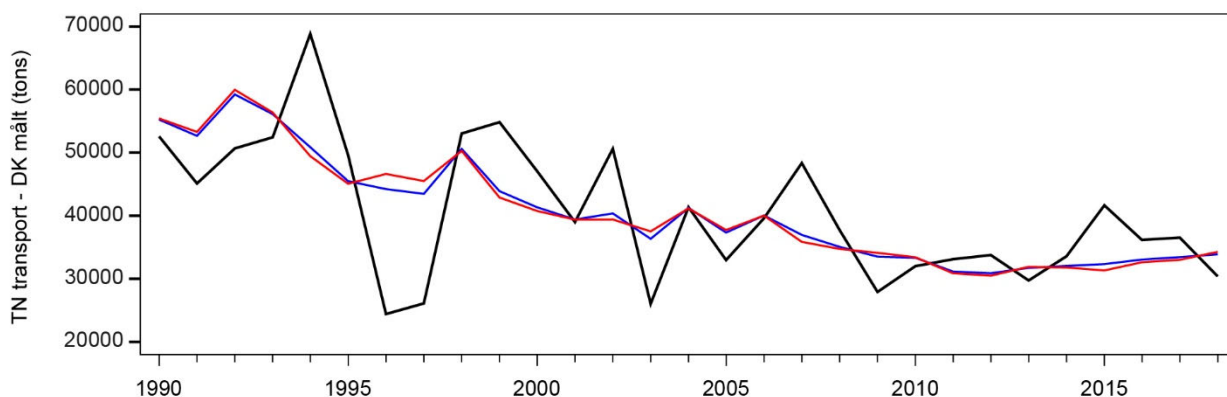


Figur 3. Normalisering foretaget på årlige målte data for DK. Vist er oprindelige unormaliserede TN tilførsler (sort), simpel lineær regression med fast afskærings- og hældningsparameter (blå, metode B) og log-log lineær regression med fast afskærings- og hældningsparameter (rød, metode C).



Figur 4. Normalisering foretaget på årlige målte data for DK. Vist er oprindelige unormaliserede TN tilførsler (sort), simpel lineær regression med fast afskærings- og hældningsparameter (blå, metode B) og lineær regression med første ordens autoregressiv proces for residualer (rød, metode J).

Figur 4 viser, at når man medtager en autokorrelation i modellen, så har den normaliserede tidsserie et noget andersledes forløb end den normaliserede tidsserie, hvor residualfejl antages at være uafhængige. Det har altså stor betydning for størrelsen af de normaliserede værdier, at residualfejl bagud i tid inkluderes i beregningen. Hvordan de tidligere residualfejl er inkluderet i beregningen er defineret i formel (9), som viser, at tidligere residualfejl summeres, og residualfejlen multipliceres med første ordens autokorrelationen, som opløftes i antallet af de år, som residualfejlen ligger tilbage i tiden.



Figur 5. Normalisering foretaget på årlige målte data for DK. Vist er oprindelige unormaliserede TN tilførsler (sort), Log-log lineær regression med glidende (lineære) hældningsestimater (fast afskæring=0) (blå, metode I) og "Random walk" med drift på log-log data (rød, metode K).

Figur 5 viser en sammenligning mellem en metode med glidende hældningsestimater og "Random walk" metoden. De to metoder giver sammenlignelige resultater, og især til sidst i perioden er der ikke den store forskel. Forskellen mellem de to metoder er især tydelig i de år, hvor de unormaliserede TN transporter er lave (1996, 2003 og 2009). Så et stort fald i TN transporten fra et år til et andet håndteres forskelligt i de to metoder.

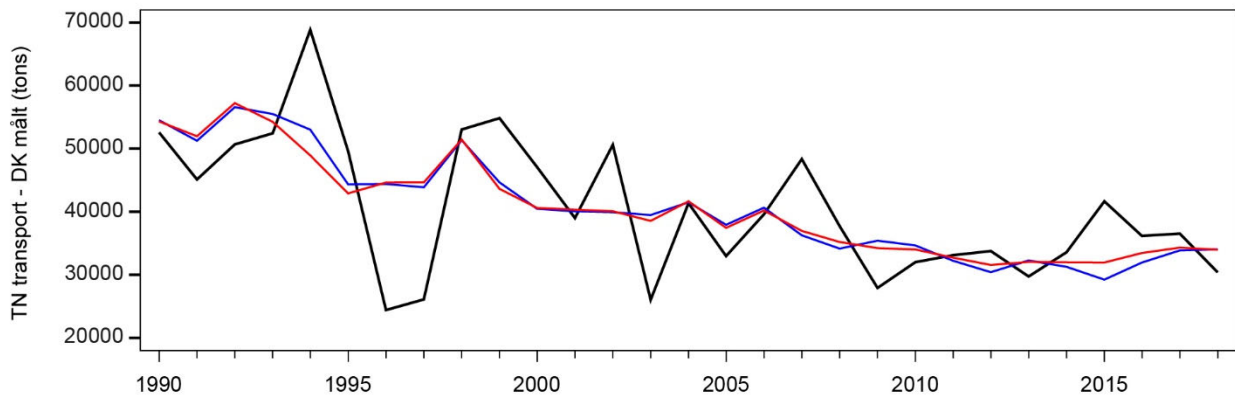
I Tabel 4 vises evalueringer for en række metoder anvendt på månedlige data. Igen ses, at R^2 -værdier er størst for lineære modeller på logaritmetransformerede data. Men forbedringen er mindre for månedlige data sammenlignet med årlige data (Tabel 3). Regressionsmodeller med glidende hældningsestimater er marginalt bedre med hensyn til R^2 -værdien. For alle modeller med glidende hældningsestimater viser residualfejlene en mere tilfældig og ikke systematisk udvikling over tid. Figurerne 6-8 viser de normaliserede tidsserier for en række af disse metoder.

Man kan se af Figur 6, at normaliseringen baseret på transformeret data er højere de sidste år og lavere de første år i perioden. Det betyder, at de to metoder estimerer sammenhængen anderledes, og det skyldes, at modellen på de transformeret data reelt er en krum kurve efter en tilbagetransformering.

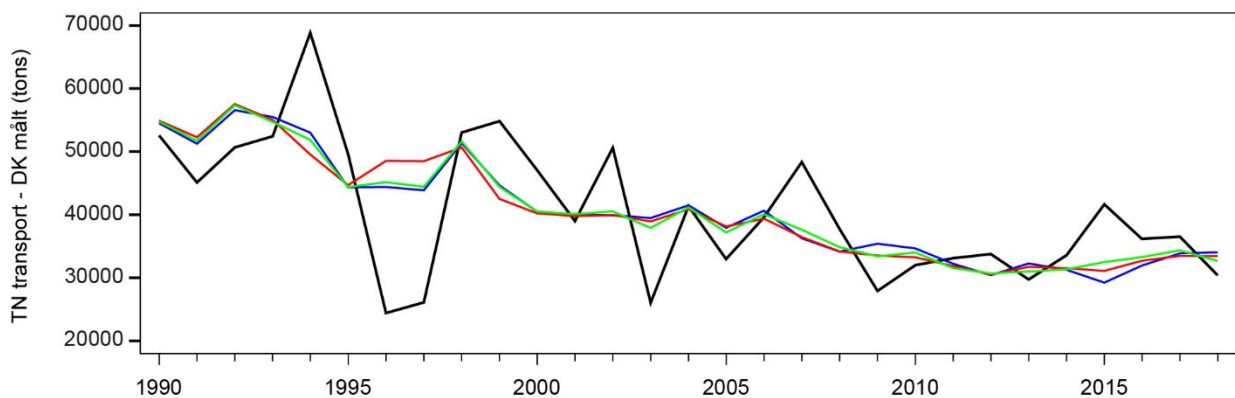
Tabel 4. DK månedlige opgørelser summeret op til kalenderår (målt areal): Resultater af en række normaliseringsmetoder beregnet for månedlige opgørelser for det målte område af DK. Gennemsnittet af de ikke-normaliserede data er 40519,0.

Metode	Gennemsnit af normaliserede værdier før korrektion for bias	Procent afvigelse	R ² -værdier
A	39976,5	-1,3	0,55*
B	40519,0	0	0,86
C	38738,6	-4,4	0,93
D	40853,0	0,8	0,95
E	40858,6	0,8	0,97
F	38534,2	-4,9	0,98
G	38434,0	-5,1	0,99
H	40799,0	0,7	0,96
I	38240,5	-5,6	0,98
L	40519,0 (bias-korrigeret i softwaren)	0	0,96

*Beregnet som $\frac{\sigma^2 - \sigma_N^2}{\sigma^2} \in (0,1)$. Her står σ^2 for år-til-år variation i de oprindelige og ikke normaliserede værdier, og tilsvarende er σ_N^2 år-til-år variationen for de normaliserede værdier. Ellers svarer evaluering 2 til R²-værdien.

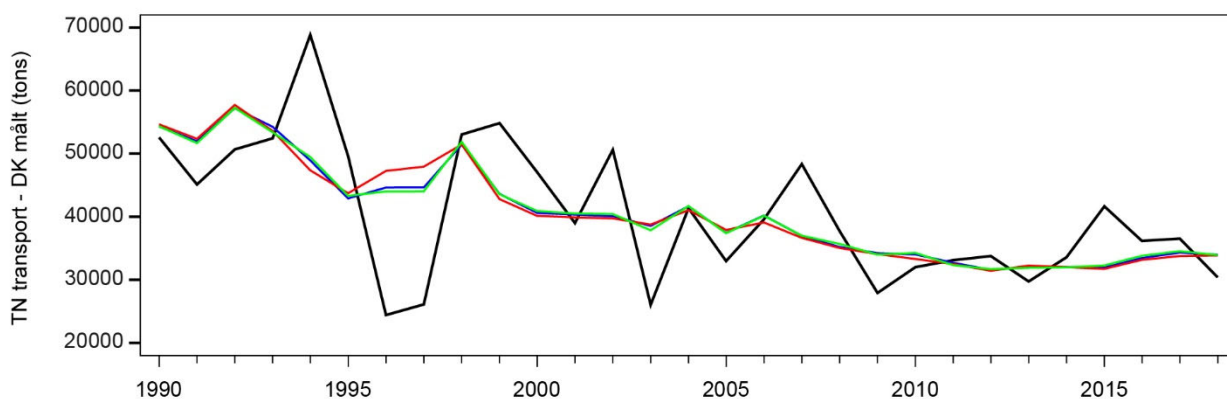


Figur 6. Normalisering foretaget på månedlige målte data for DK. Vist er oprindelige unormaliserede TN tilførsler (sort), simpel lineær regression med fast afskærings- og hældningsparameter (blå, metode B) og log-log lineær regression med fast afskærings- og hældningsparameter (rød, metode C).



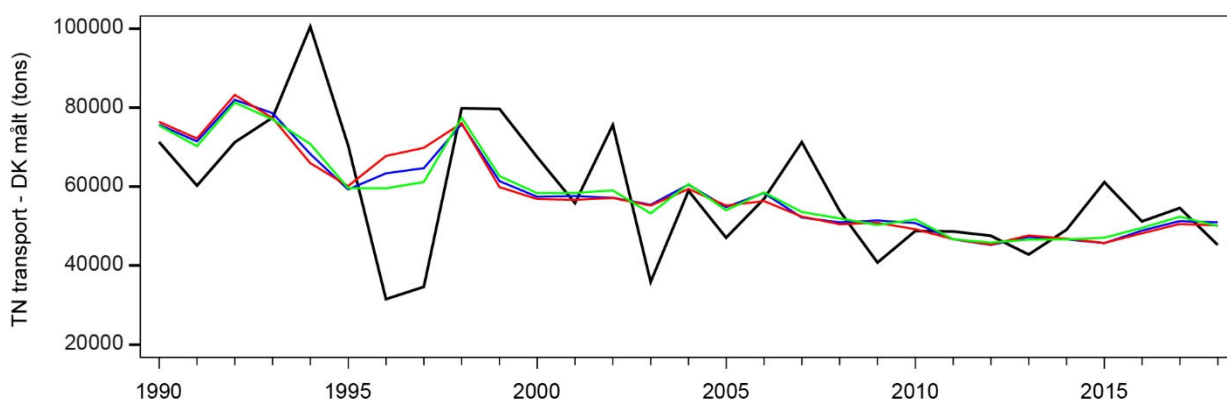
Figur 7. Normalisering foretaget på månedlige målte data for DK. Vist er oprindelige unormaliserede TN tilførsler (sort), simpel lineær regression med fast afskærings- og hældningsparameter (blå, metode B), lineær regression med 3 perioder (rød, metode E) og lineær regression med glidende (lineære) hældningsestimater (fast afskæring=0) (grøn, metode H).

Figur 7 viser for metoderne B, E og H for månedlig data forholdsvis store forskelle. Det har altså en væsentlig betydning at tage højde for den tidlige udvikling i sammenhængen mellem TN tilførsel og vandafstrømningen. Man kan hæfte sig ved forskellen mellem metode B og H, hvor værdierne fra B er større de første få år og lavere de seneste få år i perioden.



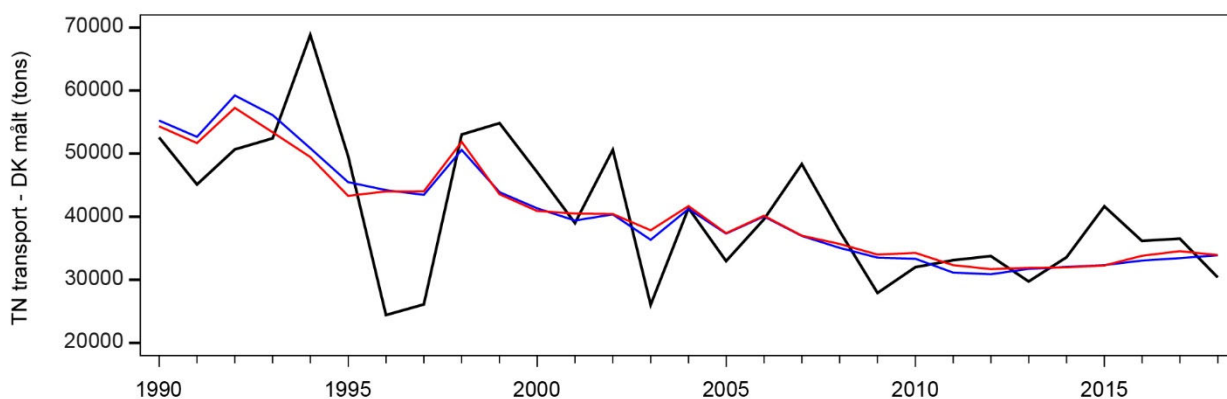
Figur 8. Normalisering foretaget på månedlige målte data for DK. Vist er oprindelige unormaliserede TN tilførsler (sort), log-log lineær regression med fast afskærings- og hældningsparameter (blå, metode C), log-log lineær regression med 3 perioder (rød, metode G) og log-log lineær regression med glidende (lineære) hældningsestimater (fast afskæring=0) (grøn, metode I).

Figur 8 viser, at for månedlige data er forskellen mindre mellem normaliseringsmetoderne foretaget på logaritme transformerede data end for de ikke-transformerede data (Figur 7), idet de farvede kurver ligger meget tæt på hinanden sammenlignet med kurverne i Figur 7. Det betyder altså mindre for de logaritme transformerede data at anvende forskellige hældningsestimater igennem tidsserieperioden. Konklusionen er, at for de transformerede data ændrer regressionsmodellerne sig ikke så meget over tid som for de modeller, der estimeres på utransformerede data. Dog er årene 1996-1997 stadigvæk en del forskellige for de 3 metoder.



Figur 9. Normalisering foretaget på månedlige målte og umålte data for DK. Vist er oprindelige unormaliserede TN tilførsler (sort), log-log lineær regression med fast afskærings- og hældningsparameter (blå, metode C), log-log lineær regression med 3 perioder (rød, metode E) og log-log lineær regression med glidende (lineære) hældningsestimater (fast afskæring=0) (grøn, metode I). Målte og umålte data er adderet før normaliseringen.

I Figur 9 har vi sammenlignet de samme metoder som i Figur 8 bare på summen af tilførsler fra det målte og umålte opland for DK. Igen er den væsentligste forskel mellem de 3 metoder synlig i årene 1996 og 1997. Disse to år var præget af udsædvanligt lave nedbørsmængder med lave TN tilførsler som en konsekvens.



Figur 10. Sammenligning mellem normalisering foretaget på årlige data og månedlige data. Data er for det målte område af DK. Normaliseringsmetoden er log-log lineær regression med glidende (lineære) hældningsestimater (fast afskæring=0), altså metode I. Årlige data (blå), månedlig data (rød).

I Figur 10 er plottet de normaliserede tidsserier for dels årlige og dels månedlige data for det målte område for DK og normaliseringen er beregnet på basis af metoden med glidende hældningsestimater. Så den tidslige opløsning giver anledning til forskellige normaliserede tidsserier. I starten af perioden er tidsserien med normaliserede tal baseret på årlige data (blå kurve) større end tidsserien med normaliserede tal baseret på månedlige data (rød kurve), og omvendt til sidst i perioden. Analyseres den sæsonmæssige fordeling af afstrømningen igennem perioden 1990-2018, ses et skift i fordelingen (Thodsen m.fl. 2019b). Udviklingen i TN tilførslen og vandafstrømning er forskellig for de enkelte måneder. For vandafstrømning ses det, at det er anden halvdel af kalenderåret, der har den største positive udviklingstendens (juni-december) (Thodsen m.fl. 2019b). Resultater af statistiske analyser, som ikke præsenteres her, viser, at både august og december har signifikant stigende vandafstrømning (Larsen, upubliceret data). For TN tilførslen ses det, at der i første halvdel af kalenderåret (januar-maj) er et kraftigt fald i TN tilførslen. Faldet er mindre i anden halvdel af kalenderåret (Thodsen m.fl. 2019b).

Det sæsonmæssige skift i TN tilførsel og vandafstrømning afspejler sig i forskellen på forløbet af den blå og røde kurve, som man ser i Figur 10.

Det bemærkes, at de testede normaliseringsmetoder ikke fuldt ud kan tage højde for alle effekter af vejret/klimaet på dyrkningen og den heraf afledte effekt på kvælstoftilførslen til havet. Der kan fx ikke normaliseres for effekten af dårlig høst som følge af tørke eller for effekten af manglende såning af- eller misvækst af- efterafgrøder pga. en våd periode efter høst.

3.4 Valgte metode og beregningsvejledning

Baseret på de gennemførte analyser vil den bedste metode til at klimanormalisere være den med glidende hældningskoefficient (Metode I i Tabel 2 samt evaluering i Tabel 3 og 4. Række 9 i begge tabeller). Denne metode er ikke

lineær i sin natur og kan omskrives til regressionsanalyse med de forklarende variable: afstrømning og afstrømning multipliceret med år. Parameterværdierne til metoden estimeres derfor heller ikke ud fra simpel lineær regressionsanalyse, men ud fra standard optimeringsalgoritmer ("ordinary least squares") for ikke-lineær regression. Parameterværdierne er estimeret ved anvendelse af data fra hele perioden 1990-2018.

Det anbefales, at normaliseringen af kvælstoftransporter beregnes ved anvendelse af månedsdata, og at man anvender logaritme transformerede data. Det svarer til metode I i Tabel 2. Derfor vil det være den metode, AU fremadrettet benytter i forbindelse med afrapportering af kvælstoftilførsler til havet i de årlige NOVANA rapporter.

Er man i en situation, hvor det kun er muligt at sammenstille årlige data, vælges metoden tilegnet årlige data. Summeres de normaliserede månedsværdier op til kalender år, så kan man ikke forvente at få præcist de samme værdier, som en normalisering på årsværdier giver, se Figur 10.

Metoden kan beskrives med følgende formler baseret på månedlige data:

Først estimeres modellen, som beskriver sammenhængen mellem logaritme transformerede kvælstoftilførsler og logaritme transformerede vandafstrømninger

$$\log L_{ij} = (\alpha_j + \beta_j \cdot i) \cdot \log Q_{ij} + \varepsilon_{ij}, \quad (20)$$

hvor indeks j står for måneder, og indeks i står for år. Dernæst beregnes de normaliserede værdier (kvælstoftilførsler) ved formlen

$$L_{ijN} = \exp \left(\log L_{ij} - (\log Q_{ij} - \log \bar{Q}_j) \cdot (\hat{\alpha}_j + \hat{\beta}_j \cdot i) \right) \cdot \exp(0.5 \cdot \text{MSE}). \quad (21)$$

Her er $\hat{\alpha}_j$ og $\hat{\beta}_j$ de estimerede parameterværdier fra modelestimeringen. Efter normaliseringen er det nødvendigt at korrigere bias i den normaliserede tidsserie ved anvendelse af følgende formel (efter man har summeret op til årsniveau eller hydrologisk / agrohydrologisk år).

$$L_{iNB} = L_{iN} + (\bar{L}_i - \overline{L_{iN}}). \quad (22)$$

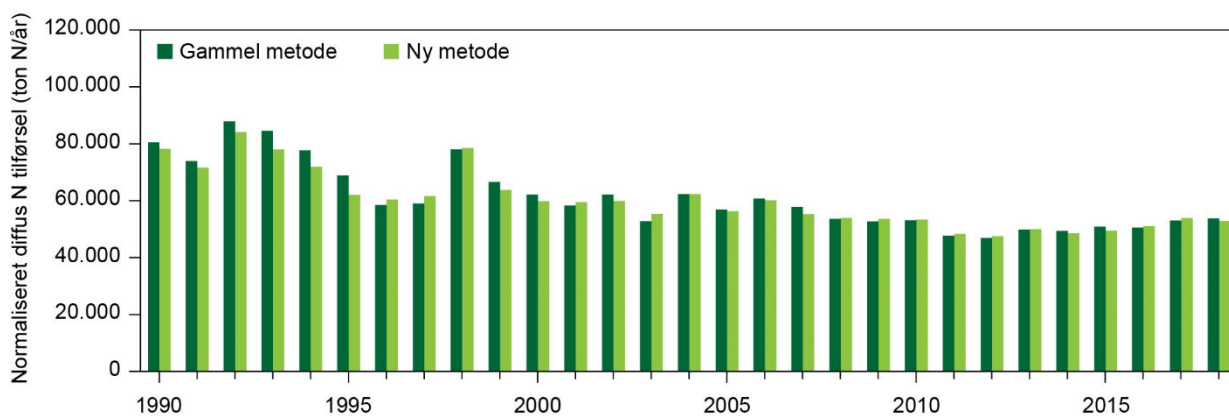
For årlige data er formlerne (20-22) de samme, bortset fra at indeks j ikke skal være med.

Modellen burde kunne estimeres i et vilkårligt statistisk software program. Metodetestene i denne rapport er estimeret og beregnet i SAS software (SAS, 2013). SAS-koden kan rekvireres ved henvendelse til Søren E. Larsen, sel@bios.au.dk.

3.5 Konsekvens af anvendelsen af den nye metode.

I den seneste NOVANA rapport "Vandløb 2018" (Thodsen m.fl. 2019b) er den anbefalede metode sammenlignet i en figur med den oprindelige metode, som er den beskrevet i formel (5). Figuren er gengivet som Figur 11, og det skal nævnes, at man ikke i tidligere NOVANA rapporter har biaskorrigeret de normaliserede værdier. Figuren indeholder ligeledes de normaliserede værdier for det umålte opland. Figuren viser, at den nye metode giver lavere værdier sammenlignet med den gamle metode i starten af tidsserien (1990-1995). Fra

2010 og frem ligger de to metoder tæt op af hinanden. Ændringen fra den nye metode (ny klimanormaliseret og biaskorrigeret) til den gamle (klimanormalisering) er en forskel på +0,08% i TN tilførsel).



Figur 11. Sammenligning mellem ny og gammel normaliseringsmetode, fra Thodsen m.fl. (2019b).

4 Diskussion

Klimanormalisering er vigtig for at fjerne den variation i tidsserien for kvælstoftilførslen til havet, som stammer fra år-til-år variationer i klima og vejr. Især nedbør, og dermed vandafstrømning i vandløbene, kan have betydelig år-til-år variation. Formålet med normalisering er at fjerne så meget som muligt af denne år-til-år variation, således at man har et udtryk for, hvad kvælstoftilførselen ville have været ved et gennemsnitlig klima. Normaliseringen betyder også, at en statistisk analyse af potentielle udviklingstendenser har en større styrke. Klimanormaliseringsmetoder har en dyb forankring i statistiske metoder baseret på den lineære regressionsanalyse, altså de såkaldte lineære modeller. Regressionsmodellerne har været anvendt på de direkte observerede data eller på logaritmetransformerede data. Hovedparten af modellerne har anvendt en konstant afskæring og hældningskoefficient for alle værdier i tidsserien. Den diffuse tilførsel af kvælstof er faldet betydeligt i perioden 1990-2018, og det er man nødt til at tage højde for i normaliseringen. Derfor er de lineære modeller modificeret til at kunne beskrive udviklinger i afskæringsparameteren og i hældningsparameteren. En semi-parametrisk metode udviklet af Stålnacke og Grimvall (2001) har flydende parameterværdier, dog med loft over antallet af frie parametre for at undgå en overparametrisering. For danske tilførsler af kvælstof fra diffuse kilder fra land har vi fundet, at en model med lineær udvikling i hældningskoefficienten, hvor afskæring konstant er lig nul, beskriver data godt. Det harmonerer også med, at det udelukkende er diffust kvælstof, der normaliseres. Havde punktkilder været inkluderet, ville der være behov for en udvikling i afskæringen, da ændringer i punktkilderne viser sig som et niveauskifte og ikke som en glidende ændring i hældningskoefficienten, hvilket er mere typisk for ændringer i de diffuse kilder. Det kan være nødvendigt at bestemme en ikke-lineær model til udviklingen i hældningskoefficienten eller stykke den sammen af flere lineære modeller.

For de fleste metoder, der er undersøgt i dette projekt, har det været nødvendigt med en efterfølgende korrektion for bias, da de fleste af metoderne ikke er direkte størrelsesbevarende. Afgørende for en god normalisering er, hvor godt den opstillede model beskriver observerede data.

At have en glidende udvikling i hældningskoefficienten svarer på sin vis til at medtage en variabel for udviklingen i landbrugspraksis, så som markbalancen, dvs. kvælstofoverskuddet. Men løsningen med en matematisk beskrivelse af hældningskoefficienten fremstår som en bedre løsning, da det ikke er muligt at fremskaffe pålidelige data vedrørende landbrugspraksis (især markbalancen), hvis man beregner normaliseringen for et mindre opland til et kystafsnit eller for et mindre opland i forbindelse med udarbejdelsen af en lokal vandplan.

5 Referencer

Ferguson, R. L. (1986) River Loads Underestimated by Rating Curves. Water Resources Research, Vol. 22, 74-76.

Larsen, S. E. upublicerede data. Aarhus Universitet

Larsen, S. E. & Svendsen, L. M. (2019) Statistical aspects in relation to Baltic Sea Pollution Load Compilation. Task under HELCOM PLC-7 project. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 42 pp. Technical Report No. 137.

Larsen, S.E., Windolf, J., Tornbjerg, H., Hoffmann, C.C., Søndergaard, M. & Blicher-Mathiesen. (2018) Genopretning af fejlbehæftede kvælstof- og fosforanalyser. Ferskvand. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 72 s. - Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 110.

SAS 9.4 (2013) SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

Silgram, M. & Schoumans, O. F. editors (2004) Modeling approaches Model parameterization, calibration and performance assessment methods in the EUROHARP project. EUROHARP 8-2004.

Snedecor, G. W. & Cochran, W. G. (1989) Statistical Methods. Iowa State University Press

Stålnacke, P. & Grimvall, A. (2001) Semiparametric approaches to flow normalization and source apportionment of substance transport in rivers. Environmetrics, Vol. 12, 233-250.

Thodsen, H., Tornbjerg, H., Rasmussen, J.J., Bøgestrand, J., Blicher-Mathiesen, G., Larsen, S.E., Ovesen, N.B., Windolf, J. & Kjeldgaard, A. (2019a) Vandløb 2017. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 74 s. - Videnskabelig rapport nr. 306
<http://dce2.au.dk/pub/SR306.pdf>

Thodsen, H., Tornbjerg, H., Rasmussen, J.J., Bøgestrand, J., Larsen, S.E., Ovesen, N.B., Blicher-Mathiesen, G., Kjeldgaard, A. & Windolf, J. (2019b) Vandløb 2018. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 72 s. - Videnskabelig rapport nr. 353
<http://dce2.au.dk/pub/SR353.pdf>

[Tom side]

KLIMANORMALISERING AF KVÆLSTOFAFSTRØMNING

Rapporten gennemgår en række modeller til klimanormalisering af kvælstoftilførslen til havet og en ny metode til klimanormalisering anbefales.