

Vurdering af vandindvindingernes effekt på smådyr og bundlevende alger i små vandløb

Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 6. februar 2020 | 16



AARHUS
UNIVERSITY

DCE – DANISH CENTRE FOR ENVIRONMENT AND ENERGY

Datablad

Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Titel: Vurdering af vandindvindernes effekt på smådyr og bundlevende alger i små vandløb

Forfattere: Anette Baisner Alnøe, Annette Baattrup-Pedersen og Jes Jessen Rasmussen
Institution: Institut for Bioscience

Faglig kommentering: Helena Kallestrup
Kvalitetssikring, DCE Signe Jung-Madsen

Rekvirent: Miljøstyrelsen

Bedes citeret: Alnøe, A.B., Baattrup-Pedersen, A. & Rasmussen, J.J. 2020. Vurdering af vandindvindernes effekt på smådyr og bundlevende alger i små vandløb. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 26 s. – Notat nr. 2020|16 https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notatet_2020/N2020_16.pdf

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Foto forside: Colorbox

Sideantal: 26

Indhold

1 Xxx

Error! Bookmark not defined.

Sammenfatning

I naturlige vandløb vil en reduktion i vandføring kunne give anledning til en øget sedimentation af fint partikulært organisk materiale. En sådan øget sedimentation vil både direkte forringe levestedskvaliteten for smådyr og bundlevende alger og indirekte kunne øge det mikrobielle iltforbrug, hvilket kan give anledning til forekomst af kritisk lave minimumskoncentrationer af ilt. Internationale undersøgelser viser, at sådanne afledte effekter af reduceret vandføring kan have om end meget større negativ betydning for vandløbenes smådyr og bundlevende alger end den reducerede vandføring i sig selv.

I et parallelt projekt verificeres og evt. videreudvikles empiriske ligninger for sammenhænge mellem vandføringsvariable og økologisk tilstand. Disse ligninger er tiltænkt anvendelse i administrationen af vandindvindingstilladelser. Netop varighed, frekvens og intensitet af episoder med stærkt reduceret vandføring indgår i disse ligninger som parametre med kritisk betydning for den økologiske tilstand. For anvendelsen af disse ligninger i administrationen af vandindvindingstilladelser er det således væsentligt at opnå viden om, i hvilket omfang de etablerede sammenhænge direkte kan skyldes ændringer i vandføring uden samtidigt forekommende øget sedimentation af fint partikulært materiale.

Nærværende projekt har til formål at forbedre det faglige grundlag for vurdering af vandindvindingens betydning for den økologiske tilstand i især små vandløb. Der er udført et kontrolleret forsøg i eksperimentelle strømrønder med det formål at undersøge om og i hvilken grad reduceret vandføring alene (sedimentation af fine partikler eksperimentelt udelukket) kan være afgørende for den økologiske tilstand vurderet på baggrund af smådyr og bundlevende alger. Således giver strømrøndeforsøget mulighed for direkte at undersøge betydningen af varighed og intensitet af reduceret vandføring for målopfyldelse for så vidt angår smådyr og bundlevende alger.

Forsøget blev udført med anvendelse af en vandføringsgradient fra 4,6 L/s til 2,0 L/s og med to niveauer af dybdeforhold, hvor den laveste vandføring gav ophav til meget langsomt flydende vand. Vi fandt imidlertid ingen signifikante effekter af vandføring eller strømforhold hverken på artssammensætning eller økologisk tilstand vurderet på baggrund af smådyr og bundlevende alger.

På baggrund af vores resultater er det således ikke muligt at opkvalificere det beslutningsstøttesystem som udvikles i det parallelle projekt, hvor de empiriske ligninger indgår. Det tyder således på, at afledte effekter af reduceret vandføring (især øget sedimentation af fint partikulært organisk materiale, hvilket direkte forringer levestedsvilkårene for makroinvertebrater og bentiske alger og derudover kan medføre kritisk lave minimumskoncentrationer af ilt) kan være væsentlig mere betydende end vandføringen i sig selv. Dette aspekt bør belyses i fremtiden for at kunne opkvalificere et beslutningsstøttesystem til forvaltningen af vandindvindingstilladelser i Danmark. Projektets resultater og konklusioner kan anvendes som støtte i udarbejdningen af de kommende vandområdeplaner.

Baggrund

I forbindelse med udarbejdelsen af vandområdeplanerne (2015-21) har Aarhus Universitet (DCE/AU) i 2014 på foranledning af Miljøstyrelsen tilvejebragt ny viden og nye modeller til brug for vurdering af vandindvindings påvirkning af den økologiske tilstand i vandløb. Disse modeller var baseret på data fra større vandløb (type 2 og 3) og beskrev sammenhænge mellem økologisk tilstand, målt ved DVFI, DVPI og DFFV, og en række hydrologiske variable. I et efterfølgende projekt udført i 2016 af Aarhus Universitet og GEUS, blev der identificeret yderligere data til udvikling af lignende modeller for små vandløb. Der blev endvidere udpeget et behov for at kvantificere de økologiske effekter af reduceret vandføring under kontrollerede forhold, fordi felt-baserede data uvilkarligt vil repræsentere flere samtidigt virkende stresspåvirkninger, som helt eller delvist vil være afledt af reduceret vandføring, fx øget sedimentation af fine organiske partikler og deraf øget mikrobielt iltforbrug. Sammenhænge mellem biologiske parametre og hydrologiske variable målt i felten vil derfor uomtvisteligt afspejle en gradient i direkte effekter af de hydrologiske variable og effekter af forandrede hydromorfologiske forhold (afledte stresspåvirkninger), der opstår som konsekvens af ændret hydrologi.

Der er i øjeblikket ikke tilstrækkelig med viden til at beskrive eller kvantificere betydningen af reduceret vandføring for sameksistensen af disse afledte stresspåvirkninger. Ligeledes er der i øjeblikket ikke tilstrækkelig med viden til at adskille og kvantificere betydningen af disse for biologiske kvalitetselementer ift. de direkte effekter af reduceret vandføring. Imidlertid peger ny forskning på, at betydningen af afledte stresspåvirkninger for makroinvertebrater kan være større end den direkte betydning af reduceret vandføring (Pardo & Garcia, 2016). Hvis betydningen af de afledte stresspåvirkninger kan overstige betydningen af reduceret vandføring, vil der derfor være en risiko for overimplementering af restriktioner for vandindvinding, hvis vandindvindingstilladelser udelukkende baseres på vandføringsdata. Der er således behov for at afdække disse problemstillinger for at sikre en tilstrækkelig nuanceret proces for administrationen af vandindvindingstilladelser. Konkret er der behov for at 1) udføre empirisk kontrollerede forsøg, hvor de direkte effekter af reduceret vandføring kan kvantificeres uden tilstedeværelse af øvrige afledte stresspåvirkninger og 2) udføre empiriske feltbaserede undersøgelser med henblik på at afdække og kvantificere gradienter af afledte stresspåvirkninger i vandindvindingsudsatte vandløb samt biologiske effekter af disse. Nærværende projektbeskrivelse adresserer det første af disse vidensbehov.

Miljøstyrelsen har igangsat et projekt baseret på eksisterende feltdata suppleret med modellerede vandføringsdata i perioden 2004-2017 med det delformål at etablere sammenhænge mellem biologiske kvalitetselementer og vandføring i små vandløb. Benthiske alger indgår her som supplerende biologisk kvalitetselement, dels fordi denne organismegruppe forventes at være følsom overfor reduceret vandføring, dels fordi dette kvalitetselement fremover skal indgå i overvågningen af danske vandløbs miljøtilstand. Parallelt med dette projekt har Miljøstyrelsen efterspurgt yderligere et projekt, der kan validere disse feltbaserede modeller på data fra kontrollerede forsøg, hvor de mulige afledte stresspåvirkninger fra reduceret vandføring eksperimentelt er udelukket. Med andre ord eftersøges grænseværdier for økologiske effekter af reduceret vandføring under forhold, hvor reduceret vandføring er den eneste stressfaktor. Som opfølgning på denne efterspørgsel er nærværende projekt igangsat.

Formål

Der er med dette projekt tale om et projekt, der bidrager til operationalisering af den nye viden til vurdering af vandindvindings betydning for den økologiske tilstand i vandløb.

Projektet har til formål at forbedre det faglige grundlag for vurdering af vandindvindings betydning for den økologiske tilstand i især små vandløb. Strømrundeforsøget skal undersøge om og i hvilken grad reduceret vandføring alene kan være afgørende for den økologiske tilstand. Således giver strømrundeforsøget mulighed for direkte at undersøge betydningen af varighed og intensitet af reduceret vandføring for målopfyldelse for så vidt angår makroinvertebrater og bundlevende alger. Derved bliver det på baggrund af resultater fra strømrundeforsøget muligt at validere, om det er vandindvinning alene, der er afgørende for en ændring i den økologiske tilstand. Såfremt dette er tilfældet er der ikke grund til at differentiere risikoanalysen i forhold til graden af de ovennævnte andre stresspåvirkninger, der typisk bliver berørt af ændret vandføring. Omvendt vil en differentieret risikoanalyse være nødvendig såfremt lav vandføring kun i begrænset omfang i sig selv påvirker den økologiske tilstand, idet risikoanalysen kan gøres mindre restriktiv for vandløb med gode fysiske forhold og lav sedimenttransport.

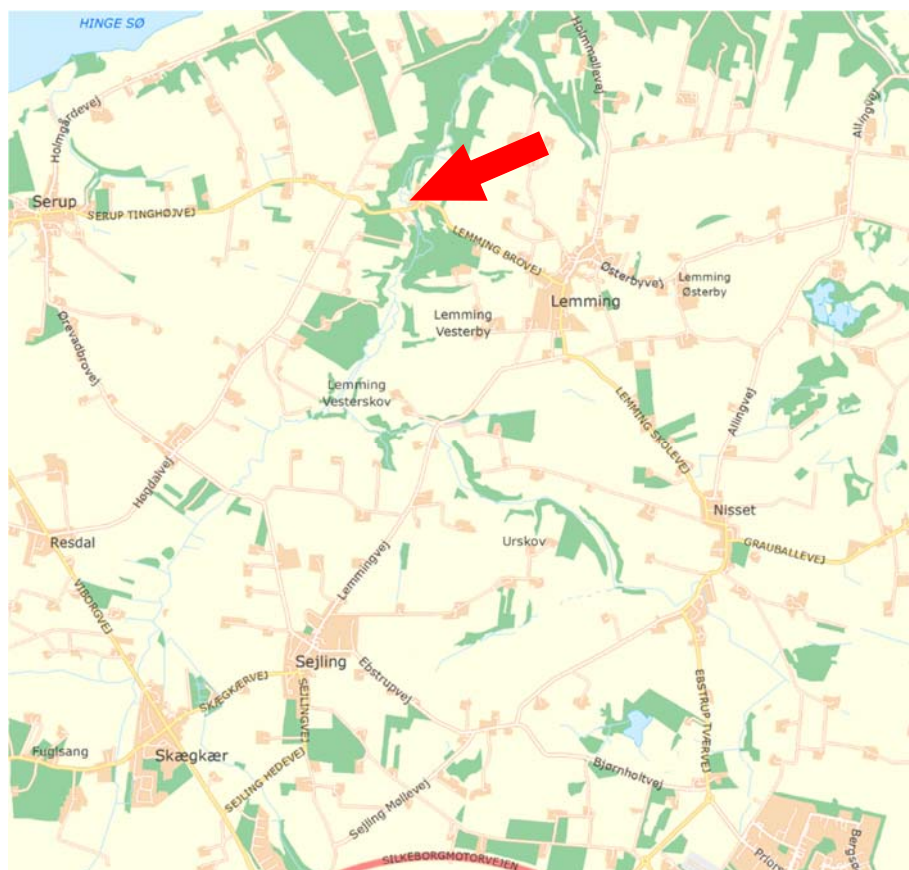
Helt konkret vil strømrundeforsøget på baggrund af makroinvertebrat- og bundlevende algesamfund anvendes til at i) identificere, hvordan lav vandføring i sig selv påvirker den økologiske tilstand vurderet med smådyr og bundlevende alger i små vandløb, og ii) bestemme kritiske værdier for graden og varigheden af lave vandføringer for strukturelle forandringer i samfund af smådyr og bundlevende alger, herunder forandringer hos indikatorarter.

Metoder

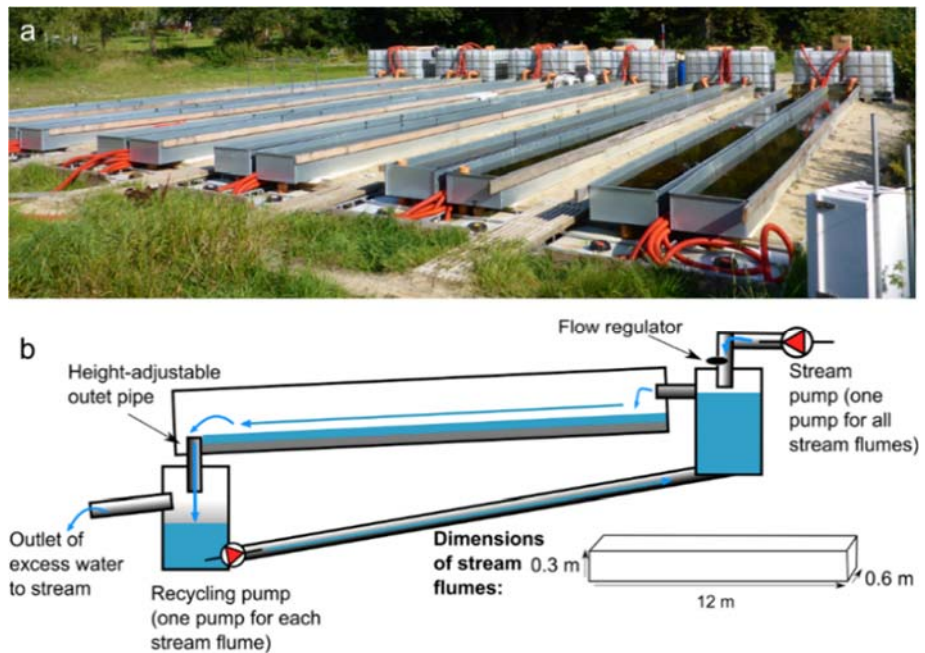
Feltstationen

Feltstationen ligger ved Lemming, nord for Silkeborg, ned til Lemming Å (Fig. 1). Stationen er udstyret med 12 identiske strømrender, som hver er 12 m lange, 0.6 m bredde og 0.3 m høje med et fald på 5‰ (Fig. 2a). De er konstrueret således for bedst muligt at simulere små lavlandsvandløb. Renderne er fyldt med fint sediment i bunden og mere groft substrat på overfladen bestående af sand, fint- og gyde grus samt større sten. Denne substratsammensætning afspejler forholdene i Lemming å. Renderne forsynes med vandløbsvand fra Lemming Å vha. en hovedpumpe, som pumper vandet op i én brønd. Herefter fordeles vandet ud i 12 opstrømstanke, som så forsyner de 12 render med vand (Fig. 2b). For enden af renderne opsamles vandet i 12 separate nedstrømstanke (Fig. 2b). Vandet kan herefter enten blive recirkuleret via en Pumpe, som pumper vandet tilbage til opstrømstanken, eller blive ledt tilbage til Lemming Å. Ved hver rende kan man justere vandføringen ved at recirkulere forskellige mængder af vand fra nedstrømstankene op til opstrømstankene. Derudover kan vanddybden justeres nederst i renderne vha. et rør, som hæves for høje vanddybder og sænkes for lave vanddybder (outlet pipe, Fig. 2b). En oversigtsfigur over fordelingen af behandlinger (hhv. vanddybde og forskelle i vandføring) mellem strømrenderne kan ses på Figur 3.

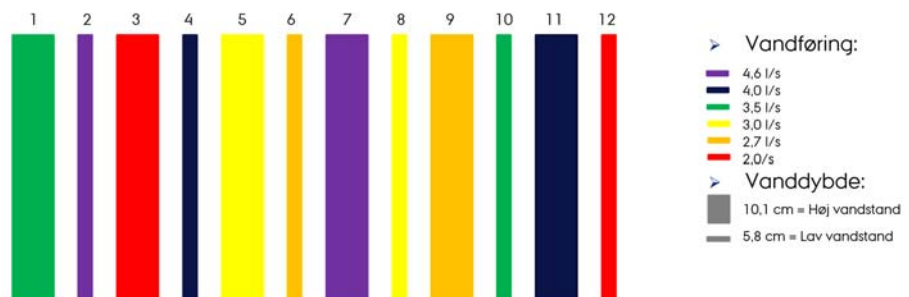
Figur 1. Kort over feltstationen ved Lemming.



Figur 2. Foto (a) og design (b) af renderne. Figur fra Neif et al. (2017).



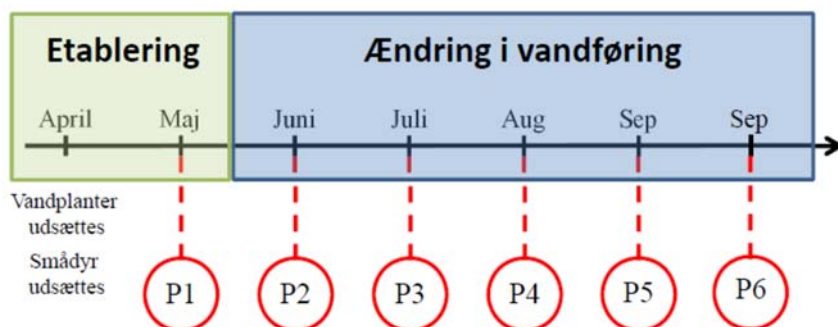
Figur 3. Oversigtsfigur over strømrenderne, hvor det er angivet, hvilke behandlinger de enkelte render var udsat for.



Projektforløb

Projektet bestod af en etableringsfase med ens vandføring og -dybde i alle renderne efterfulgt af en eksperimentel fase, hvor både vandføring og -dybde var forskellige (Fig. 4). Etableringsfasen var vigtig for at skabe ens udgangsforhold for de bentiske alger og makroinvertebrater, hvilket muliggjorde bedømmelsen af en eventuel effekt af ændringer i vandføring og dybde ud fra ændringer i samfundene.

Figur 4. Konceptuelt diagram for projektets eksperimentelle arbejdsfaser i 2018 og deres rækkefølge. De røde cirkler indikerer prøvetagninger af makroinvertebrater og bentiske alger.



Under etableringsfasen blev de 12 render forsynet med gennemsnitlig 3.3 l/s, hvoraf 2.0 l/s kom direkte fra Lemming Å og 1.3 l/s kom fra recirkulationspumperne fra nedstrømstanken. Denne vandføring giver strømforhold, der afspejler strømforholdene i Lemming å. Den gennemsnitlige vanddybde var 5.5 cm i alle renderne. Efter én måned med ens forhold blev makroinvertebrater og bentiske alger indsamlet til beskrivelse af det biologiske udgangspunkt samt validering af, at samfundene var ensartet ved forsøgsstart (P1, Fig. 3). Beskrivelse af indsamling og videre prøvebehandling ses i afsnittene nedenunder. Efterfølgende blev vandføring ændret, så det afspejlede en gradient med følgende seks vandføringer: 2.0 l/s, 2.7 l/s, 3.0 l/s, 3.5 l/s, 4.0 l/s og 4.6 l/s. Yderligere blev vanddybden i halvdelen af renderne ændret til i gennemsnit 10.1 cm, hvilket betød en kombination af seks forskellige vandføringer ved to forskellige vanddybder. Efterfølgende blev makroinvertebrater og bentiske alger indsamlet i de fem efterfølgende måneder (P2-P6, Fig. 3).

Renderne blev i løbet af forsøget besøgt mindst to gange om ugen. Ved hvert besøg blev vandføring målt, renderne blev rensed for evt. trådalger, og iltloggerne blev rensed for biofilm og andre organiske partikler. I et tidligere projekt (Graeber et al., 2017) blev det undersøgt, i hvilken grad faunasammensætningen i strømrenderne afspejler faunasammensætningen i Lemming å, når den benyttede metode anvendes. Derfor er dette aspekt ikke gentaget i nærværende projekt (se også diskussionen for nærmere detaljer)

Bentiske alger

Bentiske alger blev indsamlet på fliser som alle var lagt ud i starten af etableringsfasen. Fliserne ($L*B*H = 9*9*4$ cm) var lavet af granit med ru overflade. I alt blev 192 fliser lagt ud i renderne med 16 fliser i hver rende ved forsøgsstarten og efterfølgende indsamlet i løbet af den eksperimentelle fase (P1-P6, Fig. 3). De 16 fliser var fordelt på to områder, et opstrøms og et nedstrøms for at beskrive evt. variation inden for renderne og for at gøre plads til prøveindsamlingen for makroinvertebrater. Ved første prøvetagning (P1) blev der indsamlet 3 fliser opstrøms og 3 fliser nedstrøms for at få en grundig beskrivelse af det biologiske udgangspunkt for algesamfundene. I de resterende prøvetagninger blev der indsamlet én flise opstrøms og én nedstrøms. Ved hver indsamling blev vanddybde og strømhastighed ved hver flise registreret, inden den forsigtigt blev taget op ad vandet. Kun algerne på oversiden af fliserne blev skånsomt vasket af med en lille børste, flisen blev skyllet efter og børsten rensed. Prøven blev opbevaret i kølebokse indtil hjemkomst, hvor den indenfor 24 timer blev tilsat lugol til konservering og frosset til senere oparbejdning. Rensning og oparbejdning af prøver foregik som beskrevet i den tekniske anvisning TA V21. For at sikre, at resultaterne var sammenlignelige med resultaterne for det danske overvågningsprogram (NOVANA), blev prøverne sendt til bestemmelse ved Gina Henderson (Henderson Ecology), som artsbestemte algesamfundene i samtlige NOVANA prøver.

Makroinvertebrater

Fra Lemming å blev der indsamlet makroinvertebrater ved brug af sparkeprøver, og makroinvertebraterne blev udsat i strømrenderne. I alt blev hver strømrende forsynet med makroinvertebrater fra 5 sparkeprøver. Det er tidligere vist, at denne fremgangsmåde sikrer en statistisk sammenlignelig samfundssammensætning mellem Lemming å og strømrenderne (Graeber et al., 2017). Makroinvertebraterne blev udsat 2 uger før første prøveindsamling (P1, Fig. 3).

Under selve forsøgsfasen blev tre makroinvertebratprøver indsamlet i hver rende ved hver prøvetagning (P1-P6, Fig. 3) vha. en surber sampler (areal = 0.06 m², maskestørrelse = 500 µm). Prøverne blev fordelt ned gennem renderne for at beskrive evt. variation inden for renderne. Prøverne blev konserveret med 90% ethanol og senere identificeret i laboratoriet. Alle makroinvertebraterne blev identificeret til art eller slægt, på nær for Ceratopogonidae, Chironomidae, Dytiscidae, Empididae, Hexatominæ, Hydracarina, Limnephilidae, Orthocladinae, Ostracoda, Polycentropodidae, Psychodidae, Simuliidae og Tubificidae som blev bestemt til familie.

Beskrivende parametre

For at beskrive de fysiske forhold i hver af renderne blev der foretaget transektundersøgelser én gang i etableringsfasen (før ændring i vandføring og vanddybde) og én gang i forsøgsperioden (efter ændring i vandføring og vanddybde). Ved transektundersøgelserne blev der i hver rende registreret substratforhold og vanddybde i tre punkter i 10 transekter fordelt med ens afstand i strømrenderne.

Forholdene i renderne blev yderligere beskrevet vha. vandkemi, iltkoncentration og vandtemperatur. Der blev indsamlet vandprøver til bestemmelse af ammonium (NH₄⁺), nitrat (NO₃⁻) og orthofosfat (PO₄³⁻) én gang i etableringsfasen og to gange i forsøgsfasen i hver rende. Alle prøver blev frosset og senere analyseret vha. flowinjektion.

Opløst ilt og temperatur blev målt kontinuerligt hvert minut under hele forsøget (både etableringsfase og forsøgsfase) vha. miniDOT (Precision Measurement Engineering (PME), Californien, USA) nedstrøms i hver rende. Hver iltlogger var forsynet med kobbernet for at forhindre opblomstring af biofilm på membranen. Derudover blev iltloggerne rensset ved hvert besøg for at fjerne organiske partikler fra kobbernettet.

Dataanalyse

For at undersøge, om der skete en udvikling i artssammensætningen for makroinvertebrater og bentiske kiselalger som respons på ændret vandføring i forsøgsfasen samt for at sammenligne artssammensætningen for de to behandlinger (lav og høj vandstand), blev Non-metric MultiDimensional Scaling (NMDS) brugt. NMDS analysen har således til sigte at lave en kvalitativ beskrivelse af samfundsstruktur af bentiske alger og makroinvertebrater og derved danne grundlag for en vurdering af, hvorvidt ændret vandføring gav anledning til ændringer i samfundsstrukturen.

Vi anvendte en nyligt beskrevet metode inden for multivariat statistik (Threshold Indicator Taxa ANalysis (TITAN)), der har til sigte at identificere tærskelværdier for miljøvariable, der beskriver signifikante forandringer i biologiske samfund. TITAN er baseret på en udpegning af indikatorarter og integrerer både forekomst, abundans og retning af artsspecifikke responser på en målt stressgradient. Idet hver art tilskrives en indikatorværdi, som normaliseres i forhold til middelværdi og standardafvigelse for selvsamme art (ved brug af permutationer), er analysen også følsom over for mere sjældent forekommende arter med en høj iboende følsomhed over for den givne stresspåvirkning. TITAN identificerer tærskelværdier for signifikante forandringer på samfundsniveau såvel som på artsniveau og beregner ved bootstrapping også

en sandsynlighedsbaseret sikkerhed på de identificerede tærskelværdier. TITAN bibringer derfor en oplagt mulighed for at imødekomme den del af projektets formål, der adresserer identifikation af tærskelværdier.

Vi brugte TITAN til at eftersøge mulige tærskelværdier for ændringer i artsammensætningen i makroinvertebrater og bentiske alger langs en vandføringsgradient for de to behandlinger. Yderligere blev TITAN udført med de målte strømhastigheder som alternativt mål for vandføringsforhold (mikroskala).

For at undersøge den direkte effekt af ændret vandføring på den økologiske tilstand i renderne blev den økologiske tilstand beregnet for både makroinvertebrater og bentiske alger med hhv. Dansk Vandløbs Fauna Indeks (DVFI) og Dansk Vandløbs Alge Indeks (DVAI). Den økologiske tilstand blev beskrevet ved brug af Ecological Quality Ratio (EQR) som kan antage værdier mellem 0 og 1, hvor 1 karakteriserer upåvirkede forhold (referencetilstand) og 0 karakteriserer den maksimale afvigelse fra referencetilstanden. Indledningsvist blev lineære regressioner udført for EQR som funktion af vandføring og strømhastighed. I tilfælde af signifikante lineære modeller (med regressionskoefficient $> 0,25$) blev der lavet en sandsynlighedsberegning for opnåelse af mindst god økologisk tilstand. Disse selektionskriterier for de lineære modeller blev anvendt, idet selvsamme selektionskriterier anvendes ved interkalibreringer af nye økologiske indikatorer i EU. Indekset for alger er pt. ikke interkalibreret, men medtages i sin nuværende form (jf. Andersen et al., 2018).

Alle statistiske analyser blev foretaget i RStudio (V 3.5.0, 2018).

Resultater

Fysiske forhold i renderne

For både etableringsfasen og forsøgsfasen var substratforholdene sammenlignelige mellem de to behandlinger (lav og høj vandstand) (Tabel 1). Dette med undtagelse af mudder som steg fra 0% i etableringsfasen til 15,2% i forsøgsfasen i renderne med høj vandstand, hvorimod andelen af mudder i renderne med lav vandstand kun steg til 2,8%. Forskellen i andelen af mudder mellem de to behandlinger skyldes, at strømhastigheden generelt var langsommere i render med høj vandstand sammenlignet med render med lav vandstand ved samme vandføring. Derfor var sedimentationen af fint organisk materiale lidt højere i render med høj vandstand. Vanddybden i renderne var sammenlignelig mellem de to behandlinger i etableringsfasen med 5,6 og 5,4 cm i render med hhv. lav og høj vandstand (Tabel 1). I forsøgsfasen blev vandstanden ændret og var i gennemsnit 5,8 og 10,1 cm for hhv. lav og høj vandstand. Der var ikke signifikant forskel i NH_4^+ , NO_3^- og PO_4^{3-} (mg/L) mellem de to behandlinger i de to faser, men der var et fald i koncentrationen af NH_4^+ og NO_3^- fra etableringsfasen til forsøgsfasen. Faldet i koncentrationen af NH_4^+ og NO_3^- skyldes formentlig naturlige sæsonvariationer, og da koncentrationen af NH_4^+ og NO_3^- generelt var meget lave i Lemming Å, blev de ikke anset som en betydende stressfaktor for makroinvertebrat- og algesamfundene.

Temperatur og iltkoncentrationer i renderne var sammenlignelige mellem de to behandlinger ved lav og høj vandstand i forsøgsfasen (Tabel 1). Dog var amplituden af iltkoncentrationer større i renderne med høj vandstand (max var højere og min lavere). Dette skyldes den ovenfor nævnte lavere strømhastighed i renderne med høj vandstand, som betyder, at der er større opholdstid og mindre bevægelse i vandet i render med høj vandstand, hvilket gør betydningen af iltforbrugende og -producerende processer større og iltudvekslingen med atmosfæren mindre.

Tabel 1. Gennemsnitsværdier for fysiske og kemiske parametre i renderne i etableringsfasen (n=12) og forsøgsfasen (n=6) for de to behandlinger, lav og høj vandstand.

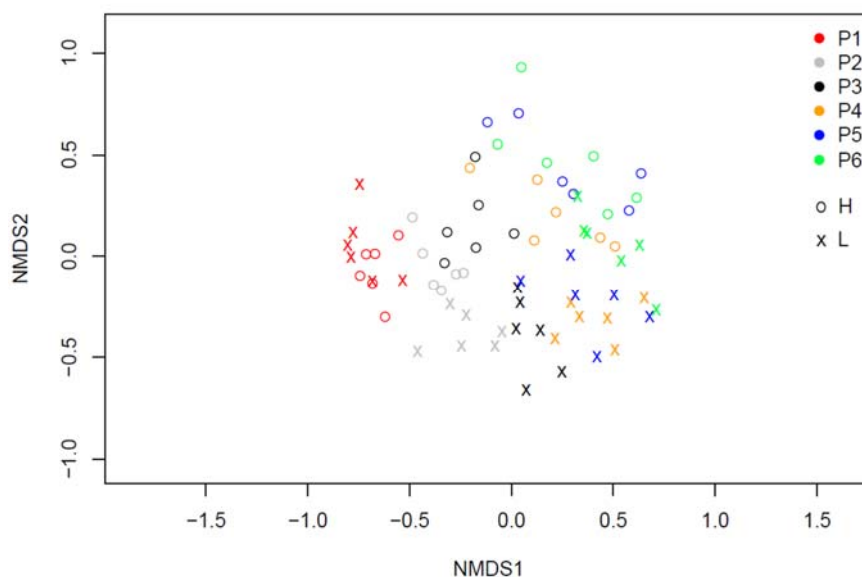
	Etableringsfasen		Forsøgsfasen	
	Lav	Høj	Lav	Høj
Sten (%)	20,6	26,1	20,6	20,5
Gydegrus (%)	43,6	47,5	40,1	36,6
Fint grus (%)	31,1	24,3	34,7	25,7
Sand (%)	4,8	2,1	1,8	2,0
Mudder (%)	0	0	2,8	15,2
Vanddybde (cm)	5,6	5,4	5,8	10,1
NH_4^+ (mg/L)	0,044	0,045	0,021	0,022
NO_3^- (mg/L)	1,5	1,47	1,13	1,15
PO_4^{3-} (mg/L)	0,011	0,010	0,007	0,007
Temperatur, Gennemsnit (°C)	-	-	12,6 ±1,5	12,6 ±1,4
Temperatur, Max (°C)	-	-	17,1 ±0,3	17,3 ±0,5
Temperatur, Min (°C)	-	-	8,0 ±0,04	8,1 ±0,03
Opløst ilt, Gennemsnit (mg/L)	-	-	9,7 ±0,6	9,9 ±1,2
Opløst ilt, Max (mg/L)	-	-	13,3 ±1,8	17,4 ±2,2
Opløst ilt, Min (mg/L)	-	-	8,2 ±0,5	7,2 ±0,6

Makroinvertebrater

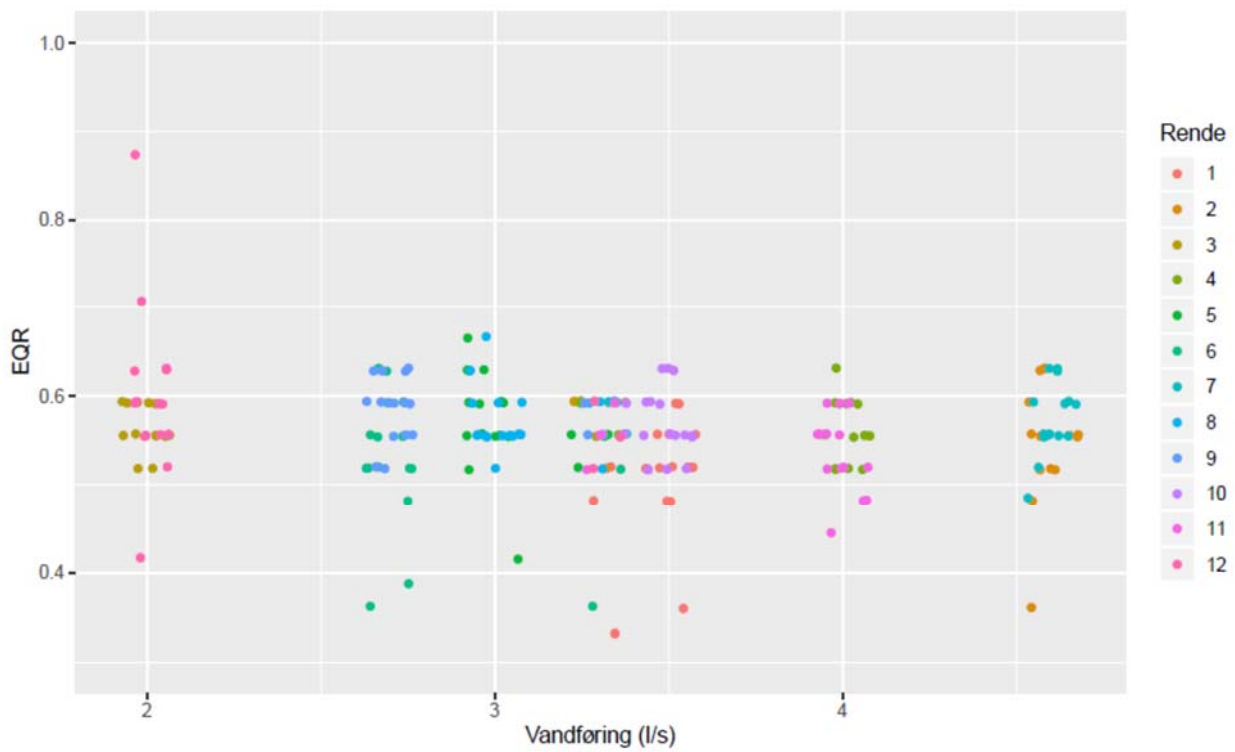
Artssammensætningen af makroinvertebrater var sammenlignelig i etableringsfasen mellem renderne, idet de røde punkter lå meget tæt på hinanden i ordinationsrummet (NMDS, Fig. 5). Under forsøgsfasen adskilte artssammensætningen af makroinvertebrater sig mellem render med hhv. høj og lav vandstand, hvor punkterne for render med høj vandstand generelt lå øverst i ordinationsrummet, og punkter for render med lav vandstand i bunden af ordinationsrummet. På baggrund af dette, blev alle efterfølgende analyser af effekter af vandføring foretaget individuelt for de to behandlinger (dvs. separat for behandlinger med hhv. høj og lav vandstand). Der var ingen synlig effekt af ændret vandføring på den overordnede artssammensætning for makroinvertebrater (data ikke vist).

Threshold Indicator Taxa Analysis (TITAN) blev brugt til beskrivelse af eventuelle ændringer i makroinvertebratsamfundene langs en gradient i vandføring for behandlinger med hhv. høj og lav vandstand. Dog kunne TITAN ikke gennemføres for hverken behandlinger med høj eller lav vandstand, fordi der generelt var for få arter med unik og konsistent (med lav standardafvigelse) respons på gradienten i vandføring.

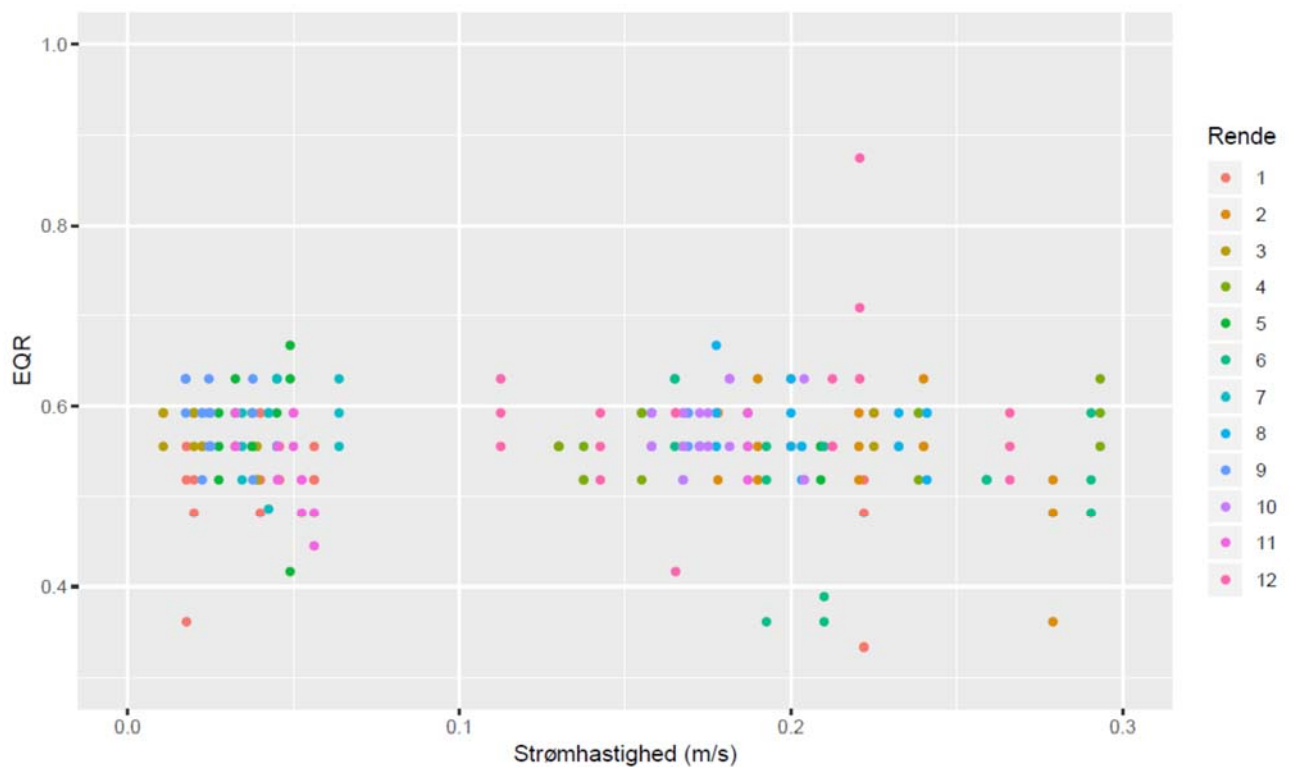
Figur 5. Fordelingen af renderne baseret på makroinvertebraternes artssammensætning og abundans ved brug af Non-metric multidimensional scaling (NMDS). Farverne indikerer de 6 prøvetagninger fra 1 til 6, hvor 1 er etableringsfasen (se Fig.4), og symbolerne indikerer de to behandlinger lav (x) og høj (o) vandstand.



Der blev for hver prøve lavet en tilstandsvurdering ved brug af DVFI omregnet til EQR, som viste, at 59 prøver ud af de 216 havde moderat eller ringe økologisk tilstand, mens resten havde god eller høj tilstand. Der var ingen signifikant sammenhæng mellem EQR og vandføring ($p = 0,40$, $R^2 = 0,02$) eller strømhastighed ($p = 0,79$, $R^2 = 0,0003$) (hhv. Fig. 6 og 7). Dette var også tilfældet, hvis data blev delt op i de to behandlinger (data ikke vist). Lemming å er desuden karakteriseret ved god til høj tilstand (varierer mellem år). For hver af strømrrenderne var mindst to ud af tre faunaprøver i mindst god tilstand inden vandføringen blev ændret.



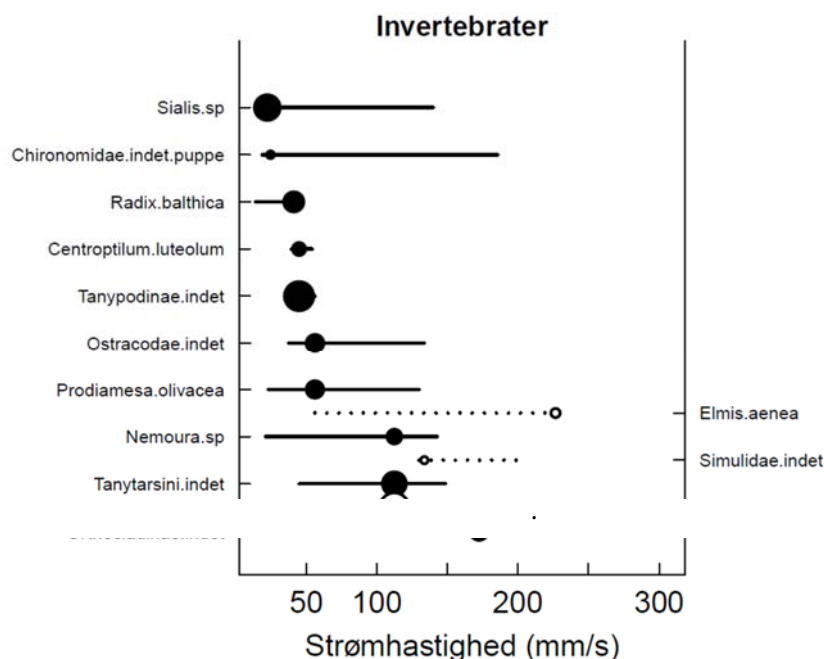
Figur 6. Fordelingen af tilstandsvurderingerne baseret på makroinvertebrater i de 12 rende for alle perioder langs en vandføringsgradient. Punkterne er forskudte for at alle kan ses. Grænsen mellem høj/god og god/moderat tilstand er hhv. EQR=0,85 og EQR=0,52.



Figur 7. Fordelingen af tilstandsvurderingerne baseret på makroinvertebrater i de 12 rende for alle perioder langs en strømhastighedsgradient. Punkterne er forskudte for at alle kan ses. Grænsen mellem høj/god og god/moderat tilstand er hhv. EQR=0,85 og EQR=0,52.

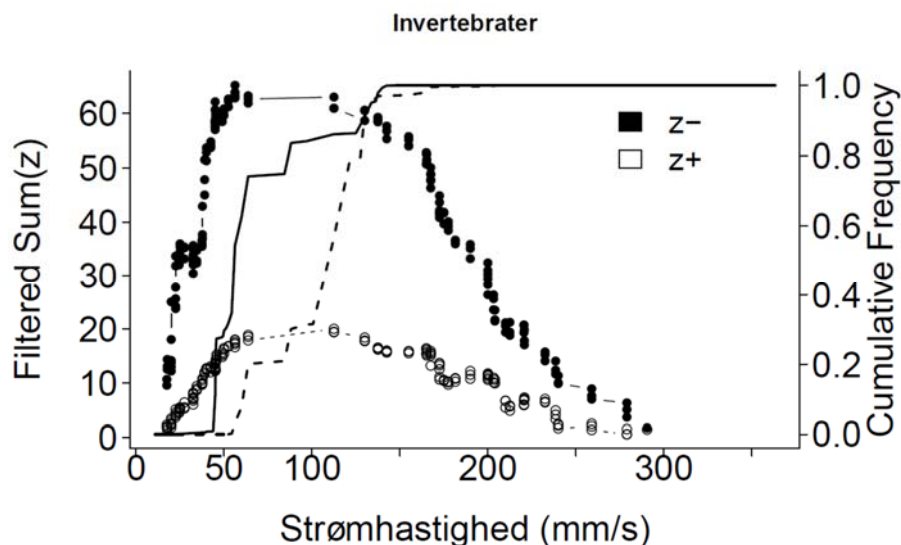
Hver faunaprøve er koblet med en unik måling af strømhastighed, og derfor kan TITAN analysen udføres på et samlet datasæt på tværs af behandlingerne. Resultaterne af analysen kan ses på Figur 8 og 9. Generelt var der tilstrækkeligt med arter med unik og konsistent respons på gradienten i strømhastighed til at TITAN kunne udføres.

Figur 8. Resultater fra TITAN-analysen. Forekomsten af de individuelle arter i forhold til strømhastigheden i målt ved prøvetagningsstedet (fuldtoptrukne og stiplede, vandrette linjer) og deres identificerede change points. De fyldte cirkler markerer change points for arter, der responderer negativt på øget strømhastighed; åbne cirkler markerer change points for arter, der responderer positivt på øget strømhastighed.



Generelt var de arter, der udviste en negativ respons på øget strømhastighed, karakteriseret ved også at kunne forekomme i stillestående vand, dog med undtagelse af *Nemoura sp.*, der blandt gruppen af slørvinger må tolkes som den mest robuste i forhold til negative ændringer i miljøforhold (Fig. 8). Omvendt var de arter, der udviste en positiv respons på øget strømhastighed alle egentlige vandløbsarter med krav til strømmende vand. Det bemærkes endvidere, at to af tre arter med positiv respons (*B. rhodani* og *E. aenea*) er positive indikatorer i DVFI mens to af ti arter med negativ respons (*C. luteolum* og *Nemoura sp.*) er positive indikatorer i DVFI mens tilsvarende to af ti arter (*R. balthica* og *Sialis sp.*) er negative indikatorer i DVFI (Fig. 8).

Figur 9. Resultat af change point analysen for alle faunaprøver. De fyldte cirkler repræsenterer arter, der responderer negativt på øget strømhastighed, den fuldt optrukne linje den kumulerede frekvens af change points hos disse arter; de åbne cirkler repræsenterer arter, der responderer positivt på øget strømhastighed, den stiplede linje viser den kumulerede frekvens af change points hos disse arter.

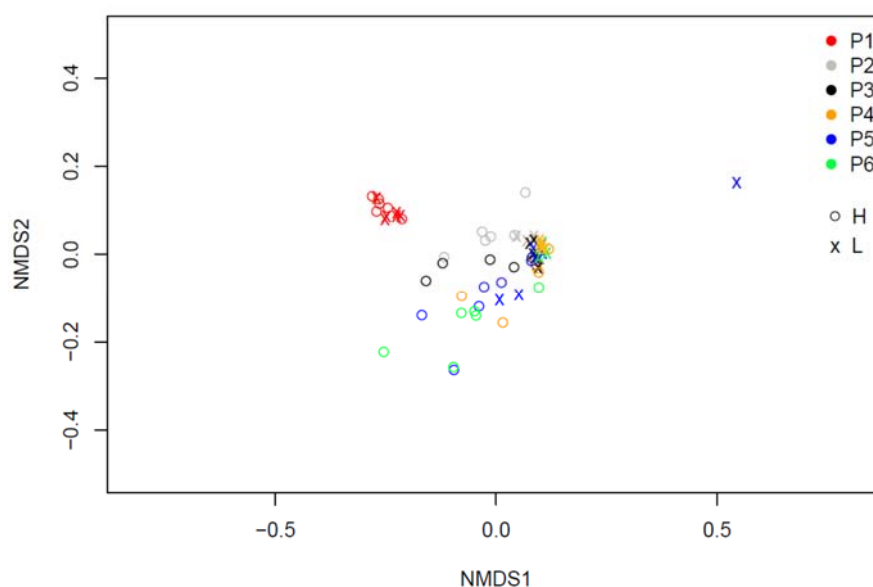


Change point analysen i TITAN (Fig. 9) viste, at arter med negativ respons på øget strømhastighed havde en meget tydelig tærskelværdi (konsistent respons på tværs af mange arter) identificeret ved en strømhastighed på 45 mm/s. Arter med positiv respons på øget strømhastighed havde en lidt mindre ensartet respons med en tærskelværdi identificeret ved 121 mm/s. Det vil sige, at der for makroinvertebrater skete et signifikant tab af strømkrævende arter ved strømhastigheder omkring 121 mm/s mens der var en signifikant stigning i antal arter med præference for stille vand ved strømhastigheder omkring 45 mm/s.

Bentiske alger

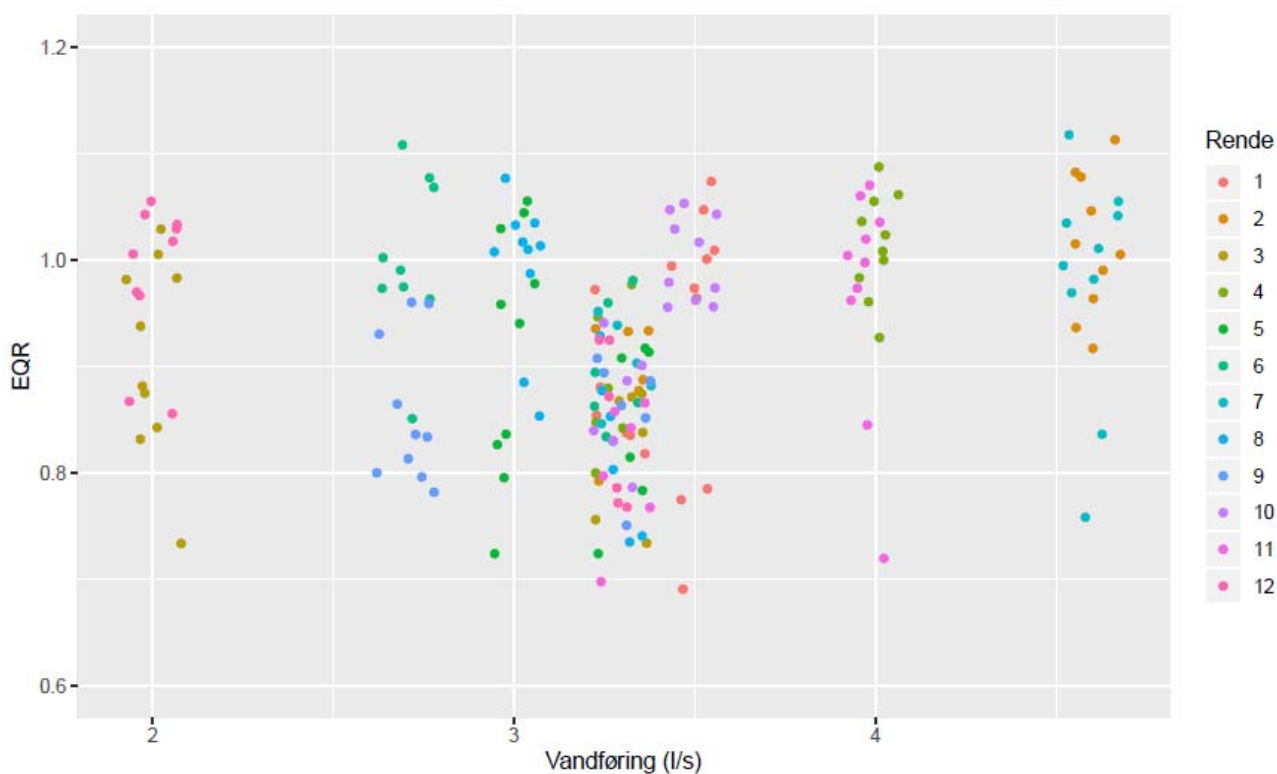
Artssammensætningen af bentiske alger var sammenlignelig mellem renderne under etableringsfasen, idet alle røde punkter lå meget tæt på hinanden (Fig. 10). Under forsøgsfasen var algesamfundene mere forskellige mellem behandlinger med lav og høj vandstand. Her lå punkter for lav vandstand generelt meget tæt på hinanden i midten af ordinationsrummet, mens der var en vis spredning på punkterne for høj vandstand. På baggrund af dette, blev alle efterfølgende analyser af effekter af reduceret vandføring foretaget individuelt for de to behandlinger (dvs. render med hhv. høj og lav vandstand blev analyseret separat). Der var ingen tydelig adskillelse af algesamfund som funktion af vandføringsgradienten (data ikke vist).

Figur 10. Fordelingen af renderne baseret på de bentiske algers artssammensætning og abundans ved brug af Non-metric multidimensional scaling (NMDS). Farverne indikerer de 6 prøvetagninger fra 1 til 6, hvor 1 er etableringsfasen (se Fig.3), og symbolerne indikerer de to behandlinger lav (x) og høj (o) vandstand.

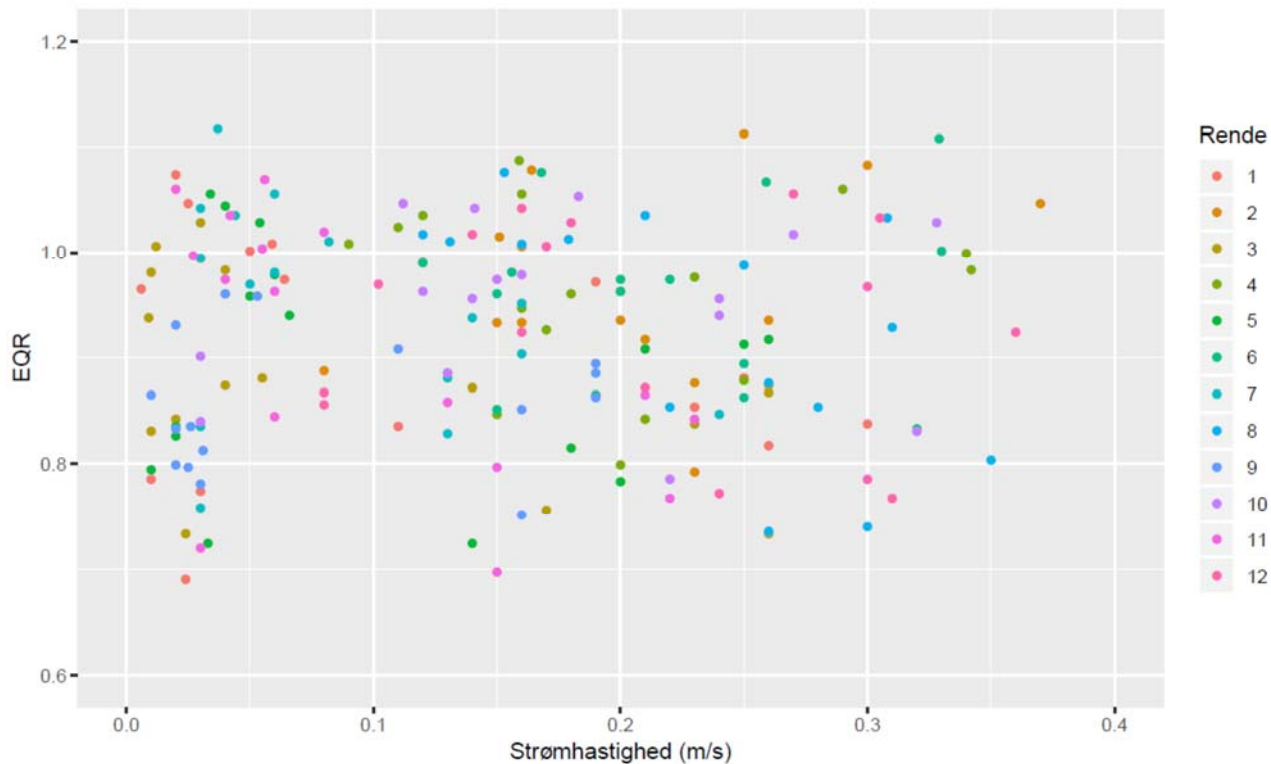


Threshold Indicator Taxa Analysis (TITAN) blev brugt til at identificere eventuelle ændringer i algesamfundene langs en gradient i vandføring for de to behandlinger. TITAN var, ligesom for makroinvertebraterne, ikke robust nok hverken for behandlinger med lav eller høj vandstand, fordi der var få arter, som havde unik og konsistent respons på gradienten i vandføring.

Der blev for hver prøve lavet en tilstandsvurdering ved brug af DVAI, som viste, at 3 prøver ud af de i alt 191 prøver ikke opnåede en god eller høj økologisk tilstand, mens resten havde god og høj tilstand. Der blev ikke fundet nogen signifikant sammenhæng mellem den økologiske tilstand i renderne og vandføring ($p = 0,02$, $R^2 = 0,03$) eller strømhastighed ($p = 0,92$, $R^2 = 5,3 \cdot 10^{-5}$) (hhv. Fig. 11 og 12). Dette var også tilfældet da data blev delt op i de to behandlinger (data ikke vist).



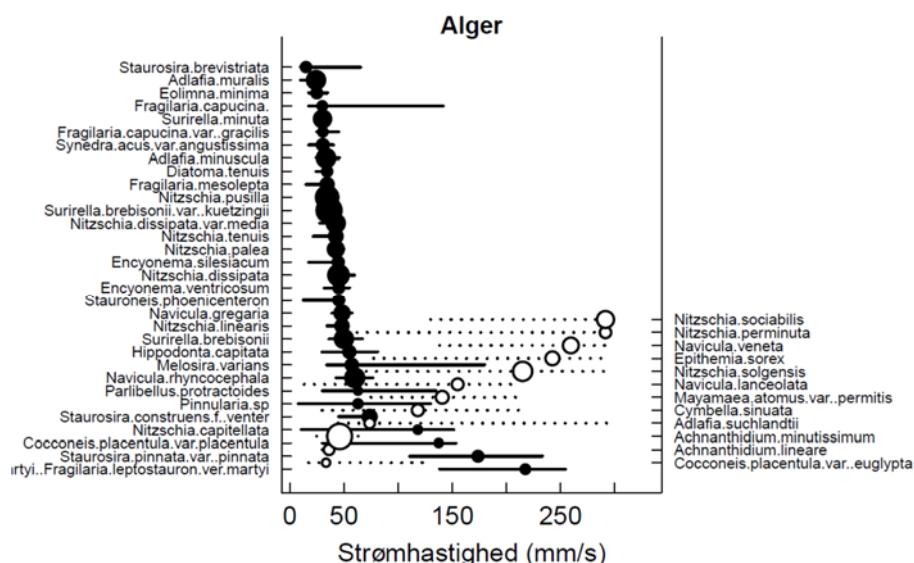
Figur 11. Fordelingen af tilstandsvurderingerne baseret på bentske alger i de 12 rende for alle perioder langs en vandføringsgradient. Grænsen mellem høj/god og god/moderat tilstand er hhv. EQR=0,88 og EQR=0,73.



Figur 12. Fordelingen af tilstandsvurderingerne baseret på bentske alger i de 12 rende for alle perioder langs en strømhastighedsgradient. Grænsen mellem høj/god og god/moderat tilstand er hhv. EQR=0,88 og EQR=0,73.

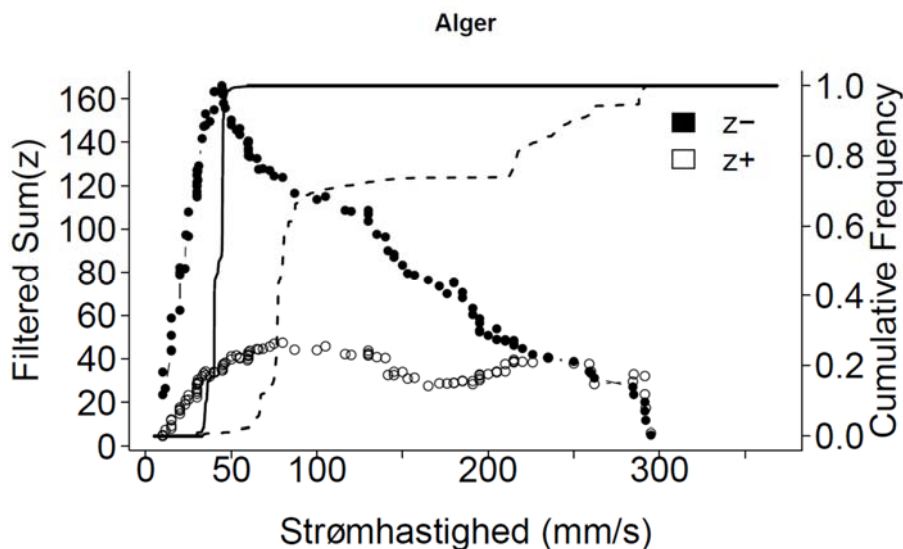
Hver bentisk algeprøve er koblet med en unik måling af strømhastighed, og derfor kan TITAN analysen udføres på et samlet datasæt på tværs af behandlingerne. Resultaterne af analysen kan ses på Figur 13 og 14. Generelt var der tilstrækkeligt med arter med unik og konsistent respons på gradienten i strømhastighed til at TITAN kunne udføres.

Figur 13. Resultater fra TITAN-analysen. Forekomsten af de individuelle arter i forhold til strømhastigheden i målt ved prøvetagningsstedet (fuldtoptrukne og stiplede, vandrette linjer) og deres identificerede change points. De fyldte cirkler markerer change points for arter, der responderer negativt på øget strømhastighed; åbne cirkler markerer change points for arter, der responderer positivt på øget strømhastighed.



Generelt var der mange arter af bentiske alger for hvilke der kunne identificeres et change-point langs gradienten i strømhastighed. De fleste arter med tydelig indikatorværdi havde præference for lave strømhastigheder (negative indikatorarter), og de fleste af disse arters change points lå indenfor et relativt snævert interval af strømhastigheder. For de positive indikatorarter var der generelt en større spredning på de respektive arters change points (Fig. 13). I DVAI er der ikke udpeget egentlige positive og negative indikatorarter som er tilfældet i DVFI. Derimod har de forskellige arter alle en indikatorværdi som afspejler deres følsomhed overfor organisk forurening og eutrofiering (Andersen et al., 2018). Derfor kan det ikke evalueres, hvorvidt de arter af bentiske alger, der har et identificeret change point for strømhastighed, er sammenfaldende med arternes indikatorværdi i DVAI.

Figur 14. Resultat af change point analysen for alle bentiske algeprøver. De fyldte cirkler repræsenterer arter, der responderer negativt på øget strømhastighed, den fuldt optrukne linje den kumulerede frekvens af change points hos disse arter; de åbne cirkler repræsenterer arter, der responderer positivt på øget strømhastighed, den stiplede linje viser den kumulerede frekvens af change points hos disse arter.



Change point analysen i TITAN (Fig. 14) viste, at arter med negativ respons på øget strømhastighed havde en meget tydelig tærskelværdi (konsistent respons på tværs af mange arter) identificeret ved en strømhastighed på 45 mm/s. Arter med positiv respons på øget strømhastighed havde en lidt mindre ensartet respons med en tærskelværdi identificeret ved 223 mm/s. Det vil sige, at der for bentiske algearter skete et signifikant tab af strømkrævende arter ved strømhastigheder omkring 223 mm/s mens der var en signifikant stigning i antal arter med præference for stille vand ved strømhastigheder omkring 45 mm/s.

Diskussion

Fysiske og kemiske forhold under forsøget

Generelt var de fysiske og kemiske parametre stabile og sammenlignelige under både etableringsfasen og forsøgsfasen. Der sås dog en mindre stigning i dækningsgraden af mudder især i strømrrender med høj vandstand (10 cm) og reduceret vandføring. Navnlige i strømrrender med høj vandstand blev der også observeret større døgnamplitude i iltkoncentrationer med både højere maksimum og lavere minimumskoncentrationer. De lavere minimumskoncentrationer af ilt i strømrrender med høj vandstand skyldes formentlig den marginale højere dækningsgrad af fint sediment, der blev aflejret i disse rrender som følge af generelt lavere strømhastigheder, der katalyserede et større mikrobielt iltforbrug. Minimumskoncentrationerne af ilt var dog ikke af en størrelsesorden, hvor det forventes at have haft signifikant indflydelse på de bentiske alger og makroinvertebraterne (Pardo & Garcia, 2016). Det understreges dog, at når der foregår en øget sedimentation af fint partikulært materiale og deraf følgende øget mikrobielt iltforbrug i strømrrender med høj vandstand og reduceret vandføring under kontrollerede forhold, hvor netop en sådan sedimentation søges udelukket, må det forventes at samme processer foregår i større omfang i vandindvindingspåvirkede vandløb. Dette understreger vigtigheden af, at få kvantificeret størrelsesordenen af sådanne hydromorfologiske forandringer som følge af reduceret vandføring i vandindvindingspåvirkede vandløb.

Biologiske effekter af reduceret vandføring

For både makroinvertebrat- og algesamfundene var der en tydelig effekt af vandstanden, hvor samfundene var sammenlignelige i etableringsfasen men udviklede sig forskelligt afhængig af behandling med hhv. høj eller lav vandstand. Dette afspejler formentlig forskelle i strømhastighed på mikroskala, hvor variationen i strømhastighed var større ved lav vandstand, hvilket skabte flere egnede levesteder for en bredere vifte af arter. Derfor blev den efterfølgende statistiske analyse af effekter af reduceret vandføring udført separat for behandlinger med hhv. høj og lav vandstand.

Vi fandt signifikante tærskelværdier for strømhastighed for både makroinvertebrater og bentiske alger på tværs af behandlinger med hhv. høj og lav vandstand. For begge organismegrupper var der flest negative indikatorarter, og for begge organismegrupper var der et relativt synkront respons på tværs af indikatorarterne med tærskelværdier omkring strømhastigheder på 4,5 cm/s. Med andre ord, så skete der et signifikant skift i samfundsstrukturen for både makroinvertebrater og bentiske alger på prøvetagningssteder med lave strømhastigheder med klar dominans af arter med præference for stillestående vand. Lignende resultater er også fundet i andre studier for makroinvertebrater, hvor samfundsstrukturen ændres signifikant, når strømhastighederne bliver tilstrækkeligt lave (<5 cm/s) (Miller et al., 2007). Tilsvarende blev der fundet signifikante tærskelværdier for indikatorarter, der responderer positivt på stigende strømhastighed, men her var responsen mindre konsistent, hvilket forklares ved, at de forskellige strømskende arter typisk er tilpasset et særligt spektrum af strømhastigheder afhængig af deres morfologi, adfærd og fødebiologi (Allan & Castillo, 2007). Således responderede arter fra disse organismegrupper altså først og fremmest på miljøforholdene på mikroskala,

hvorfor hydrologiske parametre, der repræsenterer strækings- eller systemniveau (som fx gns. vandføring) i mindre omfang kan forventes at korrelere med samfund på mikroskala. Dog kan strækingsbaserede hydrologiske parametre blive så ekstreme, at de påvirker de lokale miljøforhold (fx strømhastighed, sedimentaflejring og iltkoncentrationer) tilstrækkeligt til at frembringe en effekt på samfundsstrukturen.

Under hele forsøget blev renderne forsynet med nyt vandløbsvand og dertilhørende makroinvertebrater og bentiske alger. Dette betyder, at der, som i naturlige vandløb, har været en vis kolonisering af nye individer fra opstrøms populationer. Denne tilførsel kan have haft en effekt på resultatet, men den er samtidig vigtig at have med, fordi dette netop også forekommer i "naturlige" vandløb. I andre forsøg med selvsamme strømrender har gradienter i aflejring af fint sediment samt næringsstofkoncentrationer påvirket makroinvertebrat- og bentiske algesamfund signifikant inden for en tilsvarende tidsperiode, hvilket underbygger, at det eksperimentelle set-up kan anvendes til afprøvning af effekter af kontrollerede stresspåvirkninger (Neif et al., 2017; Graeber et al., 2017). Ligeledes har tidligere undersøgelser bekræftet, at de etablerede smådyrssamfund er statistisk sammenlignelig med smådyrssamfundene i Lemming å forud for igangsætning af stressorpåvirkninger (Graeber et al., 2017), hvilket underbygger, at det samfundsmæssige udgangspunkt i vores forsøg er acceptabelt til afprøvning af hypoteser.

I danske vandindvindingspåvirkede vandløb er det dog sandsynligt, at især sommervandføringen kan påvirkes mere end afspejlet ved vandføringsgradienten i nærværende forsøg. Det kan derfor ikke udelukkes, at der forekommer et signifikant skifte i artssammensætning, abundansforhold samt økologisk tilstand, hvis vandføringen påvirkes relativt mere, end de anvendte gradienter i nærværende forsøg. I det anvendte forsøgs set-up resulterede minimumvandføringerne i praksis i stillestående vand i strømrenderne for at opnå en gradient i vandføring, der repræsenterede netop disse forhold. Eksisterende viden omkring effekter af fuldstændig udtørring i små vandløb viser kraftige og langvarige (2-6 måneder) forandringer i makroinvertebratsamfundene med stærkt forringede økologiske tilstandsvurderinger til følge (fx Miller et al., 2007; Hille et al., 2014). Da disse mest ekstreme tilfælde af hydrologisk påvirkning af vandindvinding er relativt veldokumenteret ift. økologiske effekter på makroinvertebrater, var det formålstjenligt, at vores anvendte set-up dækkede en vandføringsgradient ned til nær-stillestående vand (set i lyset af et begrænset antal strømrender). Det er dog væsentlig at notere, at andre forhold, som påvirkes af lav vandføring (ned til stillestående hydrologiske forhold), især minimumskoncentrationer af ilt og sedimentation af fine organiske partikler, vil kunne påvirke både artssammensætning, abundansforhold og økologisk tilstand i betydelig grad (Fx Pardo & Garcia, 2016; Rosenfeld, 2017).

Perspektivering

På baggrund af resultaterne i nærværende forsøg anses det for sandsynligt, at eventuelle økologiske tilstandsændringer i vandindvindingspåvirkede vandløb (hvor vandføringen er påvirket i sammenlignelig grad med dette projekt) i højere grad kan skyldes ændringer i fx ilt- og sedimentationsforhold end direkte effekter af ændringer i vandføringen. Da nærværende forsøg viste begrænsede økologiske effekter af reduceret vandføring, hvor sedimentationsforhold og iltkoncentrationer eksperimentelt blev kontrolleret på niveau med normale vandføringsforhold, og da de eksisterende empiriske ligninger (Graeber et al., 2014) netop viser, at den økologiske tilstand påvirkes negativt af især grad og varighed af lave vandføringer, må det antages, at disse sammenhænge i de empiriske ligninger kan være drevet af faktorer, der opstår som følge af reduceret vandføring – men ikke optræder med ens intensitet mellem vandløb med forskellige geologiske og oplandskarakteristika. Netop derfor er det oplagt fremover at rette opmærksomhed mod ændrede sedimentationsforhold og iltkoncentrationer. Generelt er den eksisterende viden meget mangelfuld ift. beskrivelse af gradienter for sedimentation af fine partikler og døgnminimumskoncentrationer af ilt som opstår som følge af reduceret vandføring, men de få undersøgelser, der har fokuseret på dette aspekt har netop fundet, at iltkoncentrationer og sedimentationsforhold kan nå så kritiske niveauer for makroinvertebratsamfundene, at der sker en signifikant forandring i disse. Derfor anser vi det for væsentligt at undersøge empirisk og kvantificere sedimentationsforhold og amplituden i iltkoncentrationer i vandindvindingspåvirkede vandløb med forskellige hydromorfologiske og oplandsmæssige karakteristika. En sådan undersøgelse ville være et vigtigt skridt i retning af at vurdere, i hvilket omfang det vil være relevant at foretage en risikovurdering for vandindvindingsaktiviteter, der differentierer imellem faktorer (fx geologiske forhold og oplandskarakteristika), der har betydning for, i hvilket omfang en reduceret vandføring vil kunne medføre kritisk øgede sedimentationsforhold og reducerede iltkoncentrationer.

I renderne var bredden, både før og efter vandføringsændringerne blev igangsat, konstant 0,6 m for at holde forholdene sammenlignelige. I "naturlige" vandløb kan små vandføringsændringer føre til betydeligt mindre tilgængeligt habitat i form af mindre vandløbsareal, og samtidig vil interaktionerne med de omkringliggende arealer være relativt større. Det mindre areal vil derudover også have nogle indirekte effekter på andre parametre, så som ilt og sedimentation af fint organisk materiale, hvor man må antage, at amplituden for ilt vil være større i vandløb med mindre vand, fordi temperaturen, lystilgængeligheden til bunden, genluftningen, forholdet mellem vandmængde og heterotrofe organismer, som udelukkende respirer, osv. ændres.

Konklusion

På baggrund af vores resultater er det således ikke muligt at opkvalificere det beslutningsstøttesystem som udvikles i det parallelle projekt, hvor de empiriske ligninger indgår. Det tyder således på, at afledte effekter af reduceret vandføring (især øget sedimentation af fint partikulært organisk materiale, hvilket direkte forringer levestedsvilkårene for makroinvertebrater og bentske alger og derudover kan medføre kritisk lave minimumskoncentrationer af ilt) indenfor den anvendte gradient i vandføringsreduktion kan være væsentlig mere betydende end vandføringen i sig selv. Dette aspekt bør belyses i fremtiden for at kunne opkvalificere et beslutningsstøttesystem til forvaltningen af vandindvindingstilladelser i Danmark og dermed forståelsen af, hvorledes grundvandsforekomsternes kvantitative tilstand kan påvirke den økologiske tilstand i vandløb.

Referencer

Allan, J.D. & Castillo, M.M. 2007. Stream ecology: Structure and function of running waters. 2nd edition. Springer, Doordrecht, the Netherlands.

Andersen, D.K., Larsen, S.E., Johansson, L.S., Alnøe, A.B. & Baattrup-Pedersen, A. 2018. Udvikling af biologisk indeks for bentiske alger (fytobenthos) i danske vandløb. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 42 s. - Videnskabelig rapport nr. 296

Calapez, A.R., Serra, S.R.Q., Santos, J.M., Branco, P., Ferreira, T., Hein, T., Brito, A.G., Feio, M.J. 2018. The effect of hypoxia and flow decrease in macroinvertebrate functional responses: A trait-based approach to multiple stressors in mesocosms. *Science of the Total Environment* 637-638: 647-656.

Dewson, Z., James, A., B., W., Death, R., G. 2007. A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* 26: 401-415.

Graeber D., Wiberg-Larsen P., Bøgestrand J. & Baattrup-Pedersen A. 2014. Vurdering af effekten af vandindvinding på vandløbs økologiske tilstand. Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 29pp.

Graeber, D., Jensen, T.,M., Rasmussen, J., J., Riis, T., Wiberg-Larsen, P., Baattrup-Pedersen, A. 2017. Multiple stress response of lowland stream benthic macroinvertebrates depends on habitat type. *Science of the Total Environment* 599-600: 1517-1523.

Hille, S., Kristensen, E.,A., Graeber, D., Riis, T., Jørgensen, N., K., Baattrup-Pedersen, A. 2014. Fast reaction of macroinvertebrate communities to stagnation and drought in streams with contrasting nutrient availability. *Freshwater Science* 33: 847-859.

Miller, S.W., Wooster, D., Li, J. 2007. Resistance and resilience of macroinvertebrates to irrigation water withdrawals. *Freshwater Biology* 52: 2494-2510.

Neif, E. M., D. Graeber, L. Rodrigues, S. Rosenhøj-Leth, T. M. Jensen, P. Wiberg-Larsen, F. Landkildehus, T. Riis, og A. Baattrup-Pedersen. 2017. Responses of benthic algal communities and their traits to experimental changes in fine sediments, nutrients and flow. *Freshwater Biology* 62:1539-1550. doi: 10.1111/fwb.12965.

Pardo, I. & Garcia, L. 2016. Water abstraction in small lowland streams: Unforeseen hypoxia and anoxia effects. *Science of the Total Environment* 568: 226-235.

Rosenfeld, J.S. 2017. Developing flow-ecology relationships: Implications of non-linear biological responses for water management. *Freshwater Biology* 62: 1305-1324.