

Træflisfiltre

En simpel og stabil metode til at fjerne nitrat fra afløbsvand



Udarbejdet oktober 2020 af:

Mathis von Ahnen, Adjunkt, DTU Aqua

Per Bovbjerg Pedersen, Sektionschef, DTU Aqua

Dette faktaark beskriver anvendelsen af træflis til fjernelse af nitrat i afløbsvand, herunder nogle centrale spørgsmål om virkemåde og effekt af træflisfiltre baseret på DTU Aqua's undersøgelser på dambrug i Danmark samt internationale videnskabelige publikationer.

Baggrund

Produktionen på mange dambrug er begrænset af udledningsrammen for kvælstof. En ny, innovativ metode til lavteknologisk "end-of-pipe" fjernelse (slutrensning) af kvælstof er brug af træflisfiltre. Træflisfiltre ("woodchip bioreactors") er typisk filtre/kanaler med et større træflisvolumen, hvor nitratholdigt vand med lavt organisk indhold ledes gennem. Træflis fungerer her som kulstofkilde, der giver energi til naturlige, denitrificerende bakteriers omsætning af nitrat til luftformig, frit kvælstof. Denne omsætning, kaldet denitrifikationsprocessen, er en naturlig del af kvælstofkredsløbet. Træflisfiltre på dambrug er typisk store (flere hundrede til tusinde kubikmeter træflis) for at sikre en lang opholdstid og dermed de anoxiske (iltfrie) forhold, der kræves for at omdanne nitrat til frit kvælstof. På grund af den store træflis-volumen kræves ikke tilførsel af yderligere kulstof. Den forventede flere-/mangeårige levetid betyder, at træflisfiltre er en omkostningseffektiv og praktisk gennemførlig løsning til fjernelse af nitratkvælstof.

Hvad er typiske nitratfjernelsesrater for træflisfiltre installeret på dambrug?

En undersøgelse af tre fuldskala træflisfiltre på kommercielle recirkulerede dambrug i Danmark har vist gennemsnitlige kvælstoffjernelsesrater på 6.9 (5.3–8.5) g N/m³ træflis/d ved gennemsnitlige vandtemperaturer på 10 °C (minimum og maksimum temperaturer på 4.5 og 15.6 °C). På basis af ovenstående resultater, som var rimeligt konsistente over de tre anlæg, kan det konkluderes, at der med et træflisfilter årligt kan fjernes 2 til 3 kg kvælstof per m³ træflis. Disse fjernelsesrater for træflisfiltre, der behandler afløbsvand fra akvakulturanlæg, passer fint inden for intervallet for fjernelsesrater, der er dokumenteret for fuldskala træflisfiltre anvendt til rensning af drænvand (2 - 22 g N/m³/d; Schipper et al., 2010b; Christianson et al., 2012).

Hvad påvirker hvor meget nitrat et træflisfilter kan fjerne?

Mængden af nitrat som fjernes fra vandet (fjernelsesraten, g/m³/dag) kan betragtes som konstant inden for hydrauliske opholdstider på 5-12 timer, så længe processen ikke begrænses af lav nitratkoncentration (< 1 mg NO₃-N/l). Fjernelseeffektiviteten udtrykt i % (koncentration ud/ind) afhænger således af, hvor længe vandet forbliver i filtret. Laboratorieundersøgelser på DTU Aqua har påvist, at der er en lineær sammenhæng mellem opholdstiden i træflisfiltret og kvælstoffjernelses-effektiviteten, så jo længere opholdstid, desto lavere kvælstofkoncentration i afløbsvandet. Den hydrauliske opholdstid afhænger af flowraten og størrelsen på træflisfiltret. Den hydrauliske opholdstid og nitratbelastningen er derfor vigtige designparametre for et træflisfilter (Lepine et al., 2016; von Ahnen et al., 2016 a,b; Christianson and Schipper, 2016).

Laboratorieforsøg har vist, at øgede nitratindløbskoncentrationer fra 3,1 til 49,0 mg NO₃-N/l ikke påvirker nitratfjernelsen i træflisfiltre, og der er således tale om en 0'-ordens proces indenfor dette interval (Robertson, 2010). Med hensyn til opholdstiden, er det dog vigtigt at vide hvor høj nitratkoncentrationen er i indløbet, da denitrifikationsprocessen kan blive nitrat-begrænset (1'-ordens proces) såfremt NO₃-N koncentrationen bliver mindre end ca. 3 mg/l. Opholdstiden i et træflisfilter bør derfor tilpasses, så udløbskoncentrationen er min. 2-3 mg NO₃-N/l for maksimal omsætning og undgå at denitrifikationsprocessen bliver nitrat-begrænset. Hvis filtret, eller dele af filtret, mod udløbet er stærkt nitratbegrænset, vil udløbet af filtret typisk lugte af svovlbrinte.

Porøsitetstværdier for træflis varierer typisk fra 0,6-0,86 hvilket betyder, at vandet typisk udgør 60-86% af det totale træflisfiltervolumen (Christianson et al., 2012). En porøsitetstværdi på 0,7 bliver tit brugt ved konvertering af fjernelsesrater eller opholdstider (van Driel et al., 2006).

N fjernelsesrater i træflisfiltre stiger med temperaturen, og Q₁₀-værdier (dvs. den faktor, hvormed fjernelsesgraden stiger for hver 10 °C stigning) fra 0,8 til 2,3 ved temperaturer i området 5 - 24 °C er rapporteret (Robertson et al., 2008; Cameron og Schipper, 2010; Warneke et al., 2011). En generel

antagelse vil være, at omsætningsraten fordobles ved en 10°C-stigning svarende til at raten stiger med en faktor 1,072 for hver grad.

Denitrifikation i træflisfiltre kan forløbe ved temperaturer så lave som 1 - 5 °C, omend ved reducerede hastigheder som beskrevet (Robertson og Merkley, 2009; Robertson et al., 2009; Elgood et al., 2010).

For meget ilt i indløbsvandet kan reducere nitratfjernelsen (Healy et al., 2006), idet processen er anaerob. En undersøgelse på et 2 år gammelt træflisfilter har vist, at det kan kræve op til 1 times opholdstid i filtret før ilt-mættet vand er ilt-frit/anoxisk (Robertson, 2010), mindre ved højt indhold af organisk stof.

Hvilken slags flis er bedst?

Det har vist sig, at der ikke er nogen signifikant forskel i nitratfjernelsen mellem flis fra løvtræer og nåletræer, men der kan være signifikante forskelle mellem forskellige træarter (Gibert et al., 2008; Cameron and Schipper, 2010; Addy et al., 2016). Længerevarende undersøgelser udestår før man kan lave detaljerede konklusioner. Der kan derfor vælges den mest økonomiske og bæredygtige træflis. Der anbefales dog at vælge træarter med et højt C/N forhold for at opnå øget levetider af træflisfiltre og reduceret udvaskning af opløste organisk stof og næringstoffer under opstartsfasen (Christianson et al., 2012). Specielle træsorter, såsom cedertræ, kan have antimikrobielle eller antifungale egenskaber, der dog ikke er eftervist/testet i træflisfiltre.

Der er i flere undersøgelser ikke fundet nogen signifikant effekt af træflisens størrelse på nitratfjernelsesraten (Carmichael, 1994; Van Driel et al., 2006; Robertson et al., 2000; Cameron og Schipper, 2010).

Størrelsen og formen på flisen, der anvendes i træflisfilter er dog vigtig med hensyn til gennemstrømning af vandet og for at minimere risikoen for tilstopning. De bedste træflis har følgende egenskaber:

- Er relativt fri for smuld og snavs
- Er relativt store, ca. 7-15 cm i længden
- Har uregelmæssige former, fremfor flade, firkantede, der kan reducere mellemrummene for vandets flow

Etablering af træflisfiltre

Christianson et al. (2016) undersøgte risikoen for tilstopning af træflisfiltre med partikulært organisk stof, der transporteres med afløbsvandet fra opdrætsanlæg. Tilstopning kan potentielt føre til nedsat gennemstrømning/forandret hydraulik hvorfor tilledning af partikler og organisk stof generelt bør mi-

nimeres. Det kan f.eks. ske ved at filtrene etableres midtvejs i en plantelagune. Herved kan partikler bundfældes inden filtret, og samtidig bidrager omsætningen af let omsætteligt, organisk materiale til en reduktion af vandets iltindhold. Den sidste del af plantelagunen efter træflisfiltret sikrer derefter omsætning/polering inden udløb til recipienten.

For at reducere tryktabet og risikoen for tilstopning anbefales desuden, at større træflisfiltre etableres med vertikalt flow. Vertikalt flow filtre kan f.eks. opbygges som down-flow filtre, hvor vandet trækkes ud af bunden af filtret f.eks. ved brug af $\varnothing 160$ mm drænslinger, der lægges med 1-1,5 m afstand til hinanden i bunden af filtret. Drænslingerne skal fastholdes i bunden af filtret ved hjælp af bøjler, sandposer eller lignende for at undgå at drænslingerne løftes op grundet denitrifikationens gasudviklingen (N_2) i filtret.

På udløbssiden kan drænslingerne føres igennem en spunsvæg/jordvold, hvor der i hver slange monteres et rør med bøjning i højde svarende til vandoverfladen. Herved kan mængden af vand der trækkes fra det enkelte drænrør reguleres. Vandet skal fordeles ligeligt i filtret og "short-cutting" af vand skal undgås.

Hvis træflisfiltret fungerer korrekt, bør der være omkring 1 mg O_2/l eller mindre i afløbet derfra. Vandet bør derfor beluftes inden endelig afledning til recipient.

Potentielle negative effekter ved brug af træflisfiltre

Det er dokumenteret, at der sker en frigivelse af opløst organisk stof under opstart af træflisfiltre (Gibert et al., 2008; Cameron og Schipper, 2010; Healy et al., 2012; von Ahnen et al., 2016b). Observationer af træflisfiltre, der behandler akvakulturudløbsvand, stemmer overens med adskillige feltundersøgelser af træflisfilter inden for landbrug, hvor en øjeblikkeligt forøget mængde opløst organisk stof typisk reduceres efter 1 - 6 måneder (f.eks. Robertson et al., 2005; Schipper et al., 2010a; Healy et al., 2012). Varighed og størrelse af udvaskningsperioden afhænger af filtrets opholdstid (Schipper et al., 2010b) og hydraulisk belastning ligesom flisets "forhistorie" herunder fældningstidspunkt, alder og lagring formodes at have betydning.

Frisk træ indeholder 1-2 vægtprocent opløselige organiske bestanddele (Vogan, 1993), der bruger opløst ilt under nedbrydning (Taylor et al., 1996; Taylor og Carmichael, 2003; Tao et al., 2005; Hedmark og Scholz, 2008). Risikoen for en udvaskning af opløst organisk stof i opstartsfasen bør derfor tages i betragtning, når man planlægger et træflisfilter. Dette kan f.eks. gøres ved nævnte etablering af træflisfiltre midtvejs i plantelaguner, ved efterbehandling eller ved forbehandling af flisen. Laboratorieundersøgelser hos DTU Aqua har vist, at 38% af de organiske stoffer som udvaskes i løbet af de første 11 dage efter filteropstart, kan fjernes hvis vandet internt recirkuleres over en protein skimmer i perioden.

En eventuel udvaskning af fosfor varer typisk ikke længe, og den største frigivelse ser ud til at ske i løbet af de første 24 timer (Sharrer et al., 2016; von Ahnen et al., 2016b).

Drivhusgasser kan under visse betingelser frigives fra træflisfiltre, såsom nitrogenoxid (N₂O), eller metan (CH₄) hvis nitrat er opbrugt, hvorimod selve kuldioxidemissionen er neutral, idet den frigivne CO₂ tidligere er blevet assimileret fra luften under træets vækst.

Betyder træflisfiltrets alder noget?

Nitratfjernelsen i træflisfiltre anvendt til behandling af drænvand i landbruget har vist sig at falde efter det første driftsår, men er herefter stabil i mange år (Robertson et al., 2000; Schipper et al., 2010b; Addy et al., 2016). Når træflisen er ny, bidrager den i starten med mere organisk stof som energikilde til nitratfjernelsesprocessen. Første års nitratfjernelse kan derfor være lidt højere end den langsigtede performance, der generelt er stabil. Ved behandling af drænvand blev nitrat fjernet i op til 15 år uden udskiftning af flisen (Robertson et al., 2008).

Udgifter til etablering af træflisfilter varierer fra 240 til 500 kr. per m³ og omkostningerne per kg N fjernet er meget afhængige af filtrets resulterende levetid (Lepine et al., 2018). Den ældste flisfilter der d.d. findes på et dansk dambrug har indtil videre fungeret i tre år uden udskiftning af træflis.

Fjernelse af øvrige forurenende stoffer

Ud over kvælstof blev der fjernet 0.2-2.0 g BI₅/m³/d og 0.1 g P/m³/d i træflisfiltre installeret på recirkulerende dambrug i Danmark (von Ahnen et al., 2018). Træflisfiltres evne til at fjerne mindre mængder af fosfat er i overensstemmelse med tidligere undersøgelser i drænvandbehandling (Schipper et al., 2010a; Warneke et al., 2011; Sharrer et al., 2016). Undersøgelser har vist, at tilførsel af jern til træflisfilteret resulterer i betydelig forøgelse i fosfor-fjernelsen (Baker et al., 1998; Robertson, 2000; Christanson et al., 2017).

Helt nye studier har endvidere påvist, at træflisfiltre også kan omsætte f.eks. formalin og dermed forhindre/reducere en eventuel udledning heraf. Fjernelsen af formalin sker dels gennem en umiddelbar reduktion som skyldes overflade-adsorption (Sortkjær et al., 2008) og dels via mikrobiel omsætning. Laboratorieundersøgelser har vist, at den umiddelbare reduktion udgjorde ~40-50% ved undersøgte formaldehyd startkoncentrationer op til 115 mg/l. Formaldehydfjernelsesrater i træflisfiltre er afhængige af temperaturen med koncentrationsuafhængige (0¹-ordens) fjernelsesrater på 20, 39 og 77 g/m³ flis/d ved temperaturer på hhv. 7, 15 og 23 grader. Dette svarer til en temperaturkoefficient på 1.086 (en Q₁₀ faktor på 2.3). Fjernelsesraterne blev begrænset af formaldehydkoncentrationen ved koncentrationer under 11, 12 og 15 mg formaldehyd/l ved temperaturer på 7, 15 og 23 grader. Ved

lavere koncentrationer kunne koncentrationsafhængige (1^o-ordens) fjernelsesrater beskrives ved formaldehydkoncentrationen ganget med den volumenbaserede første-ordens ratekonstante $k_{1v} : C$ (g/m^3) * k_{1v} (1/d). Værdierne for k_{1v} var 1.8, 3.3 og 5.2 ved hhv. 7, 15 og 23 grader. Det vil være første-ordens fjernelsesraterne som bør anvendes til at estimere formaldehyd-fjernelseskapaciteterne i træflisfiltre idet vandkvalitetskravet for formaldehyd i vandløb er lavt (9.2 $\mu\text{g/l}$; Miljø- og Fødevarerministeriet, BEK nr 1022, 2010).

Udover temperaturen er fjernelsesraten og den procentvise fjernelse også påvirket af filtrets opholdstid og startkoncentrationen. Fjernelsesrater stiger ved reduceret opholdstid og øget indløbskoncentration, mens den relative (%-) fjernelse stiger ved forlænget opholdstid og reduceret indløbskoncentration. I et feltforsøg på et kommercielt dambrug hvor 52 kg formaldehyd blev tilsat til 1500m³ træflis (i triplikat forsøgsopstilling) med et flow på 25 l/s og en vandtemperatur på 5.6 grader, blev koncentrationer ud af filtrene på <1mg formaldehyd/l opnået efter 24 timer svarende til en fjernelse på 44 kg formaldehyd/d (85% fjernelse) og en fjernelsesrate på 29 g/m³ flis/d. Omsætning af formalin har i alle undersøgelser føret til forøgede denitrifikationsrater i træflisfiltrene. Dette skyldes, at formaldehyd bidrager med organisk stof til en forøget kvælstof-omsætning og der dannes metanol ved nedbrydning af formaldehyd.

Træflis / savsmuldsfiltre har også vist at være effektive til at fjerne bakterier, *Escherichia coli*, idet man over flere år var under detektionsgrænsen (<10cfu / 100 ml) ved behandling af spildevand fra septiktanke (Robertson et al., 2005). Der er endvidere rapporteret om fuldstændig fjernelse af sporniveauerne af perchlorat (ClO_4) via træflisfiltre (Robertson et al., 2007; 2009).

Konklusioner

Fuldskala træflisfiltre kan simpelt anvendes til fjernelse af $\text{NO}_3\text{-N}$ fra afløbsvand fra recirkulerende opdrætsanlæg. Træflisfiltre udviser stabile $\text{NO}_3\text{-N}$ -fjernelsesrater året rundt (inden for det målte temperaturområde 4 - 16 °C) med relativt lille teknisk og operationel indsats. Designet af kommercielle træflisfiltre bør tage højde for en risiko for tilstopning og ledsagende tryktab, f.eks. ved anlæg af lodrette filtre. Dræningsrør i bunden af lodrette filtre bør forankres/holdes nede for at modvirke opdrift, og mulighed for periodisk rensning/returspulning af sektioner bør indtænkes. Opholdstiden bør være kort nok til at sikre, at denitrifikationen ikke bliver $\text{NO}_3\text{-N}$ begrænset, og der bør være mindst 1-2 mg $\text{NO}_3\text{-N/l}$ i udløbet. Ved idriftsætning og placering af flisfiltre skal en mulig initial periode med udvaskning af organisk stof og andre potentielt skadelige komponenter tages i betragtning. Under hensyntagen til disse forholdsregler gør det faktum, at træflisfiltre er relativt lette at installere, er stabile i drift samt simple og billige at drive dem til en tiltalende, omkostningseffektiv end-of-pipe-behandlingsteknologi til reduktion af kvælstofudledningen fra recirkulerende anlæg.

Fjernelsen af $\text{NO}_3\text{-N}$ kan som udgangspunkt antages at være:





5°	5 g N/m ³ træflis/d
10°	7 g N/m ³ træflis/d
15°	10 g N/m ³ træflis/d
20°	14 g N/m ³ træflis/d



Projektet er støttet økonomisk af EU og den danske stat gennem Den Europæiske Hav- og Fiskerifond.

Referencer

- Addy, K., Gold, J.A., Christianson, L.E., David, M.B., Schipper, L.A., Ratigan, N.A., 2016. Denitrifying bioreactors for nitrate removal: A meta-analysis. *Journal of Environmental Quality* 45 (3), 873-881.
- Baker, M.J., Blowes, D.W., Ptacek, C.J., 1998. Laboratory development of permeable reactive mixtures for the removal of phosphorus from onsite wastewater disposal systems. *Environmental Science and Technology* 32, 2308-2316.
- Blowes, D.W., Robertson, W.D., Ptacek, C.J., Merkley, C., 1994. Removal of agricultural nitrate from tile-drainage effluent water using in-line bioreactors. *Journal of Contaminant Hydrology* 15, 207-221.
- Cameron, S.G., Schipper, L.A., 2010. Nitrate removal and hydraulic performance of organic carbon for use in denitrification beds. *Ecological Engineering* 36, 1588-1595.
- Carmichael, P.A., 1994. Using wood chips as a source of organic carbon in denitrification: a column experiment and field study implementing the funnel and gate design. M.Sc. Thesis, Dept Earth Sci., University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada.
- Christianson, L.E., Bhandari, A., Helmers, M.J., 2012. A practice-oriented review of woodchip bioreactors for subsurface agricultural drainage.
- Christianson, L.E., Schipper, L.A., 2016. Moving Denitrifying Bioreactors beyond Proof of Concept: Introduction to the Special Section. *Journal of Environmental Quality* 45, 757-761.
- Christianson, L.E., Lepine, C., Sharrer, K.L., Summerfelt, S., 2016. Denitrifying bioreactor clogging potential during wastewater treatment. *Water Research* 105, 147-156.
- Christianson, L.E., Lepine, C., Sibrell, P.L., Penn, C., Summerfelt, S.T., 2017. Denitrifying woodchip bioreactor and phosphorous filter pairing to minimize pollution swapping. *Water Research* 121, 129-139.
- Elgood, Z., Robertson, W.D., Schiff, S.L., 2010. Greenhouse gas production in a stream bed bioreactor for nitrate removal. *Journal of Ecological Engineering* 36, 1575-1580.
- Gibert, O., Pomierny, S., Rowe, I., Kalin, R.M., 2008. Selection of organic substrates as potential materials for use in a denitrification permeable reactive barrier (PRB). *Bioresource Technology* 99, 7587-7596.
- Greenan, C.M., Moorman, T.B., Kaspar, T.C., Parkin, T.B., Jaynes, D.B., 2009. Denitrification in woodchip bioreactors at different water flows. *Journal of Environmental Quality* 38, 1664-1671.
- Healy, M.G., Rodgers, M., Mulqueen, J., 2006. Denitrification of nitrate-rich synthetic wastewater using various wood-based media materials. *J. Environ. Sci. Health Part A* 41, 779-788.
- Healy, M.G., Ibrahim, T.G., Lanigan, G.J., Serrenho, A.J., Denton, O., 2012. Nitrate removal rate, efficiency and pollution swapping potential of different organic carbon media in laboratory denitrification bioreactors. *Ecological Engineering* 40, 198-209.
- Hedmark, Å, Scholz, M., 2008. Review of environmental effects and treatment of runoff from storage and handling of wood. *Bioresour. Technol.*, 99, 5997-6009.
- Kritzberg, E.S., Graneli, W., Björk, J., Brönmark, C., Hallgren, P., Nicolle, A., Persson, A., et. al., 2014. Warming and browning of lakes: consequences for pelagic carbon metabolism and sediment delivery. *Freshwater Biol.* 59 (2), 325-336.
- Lepine, C., Christianson, L., Sharrer, K., Summerfelt, S., 2016. Optimizing hydraulic retention times in denitrifying woodchip bioreactors treating recirculating aquaculture system wastewater. *Journal of Environmental Quality* 45 (3), 813-821.
- Lepine, C., Christianson, L., Davidson, J., Summerfelt, S., 2018. Woodchip bioreactors as treatment for recirculating aquaculture systems' wastewater: A cost assessment of nitrogen removal. *Aquacultural Engineering* 83, 85-92.

Miljø- og Fødevarerministeriet, BEK nr 1022 af 25/08/2010. Bekendtgørelse om miljøkvalitetskrav for vandområder og krav til udledning af forurenende stoffer til vandløb, søer eller havet. J. nr. BLS-405-00029.

Moorman, T.B., Parkin, T.B., Kaspar, T.C., Jaynes, D.B., 2010. Denitrification activity, wood loss, and N₂O emissions over nine years from a wood chip bioreactor. *Ecological Engineering* 36, 1567-1574.

Robertson, W.D., 2000. Treatment of wastewater phosphate by reductive dissolution of iron. *Journal of Environmental Quality* 29, 1678-1685.

Robertson, W.D., Yeung, N., van Driel, P.W., Lombardo, P.S., 2005. High-permeability layers for remediation of ground water; go wide, not deep. *Ground Water* 43, 574-581.

Robertson, W.D., Ptacek, C.J., Brown, S.J., 2007. Aquifer nitrate and perchlorate remediation using a wood particle layer. *Ground Water Monitoring and Remediation* 27, 85-95.

Robertson, W.D., Vogan, J.L., Lombardo, P.S., 2008. Nitrate removal rates in a 15-year old permeable reactive barrier treating septic system nitrate. *Groundwater Monitoring and Remediation*. 28, 65-72.

Robertson, W.D., Merkley, L.C., 2009. In-stream bioreactor for agricultural nitrate removal. *Journal of Environmental Quality* 38, 230-237.

Robertson, W.D., Ptacek, C.J., Brown, S.J., 2009. Rates of nitrate and perchlorate removal in a 5-year-old wood particle reactor treating agricultural drainage. *Ground Water Monitoring and Remediation* 29 (2), 87-94.

Robertson, W.D., 2010. Nitrate removal rates in woodchip media of varying age. *Ecological Engineering* 36, 1581-1587.

Sharrer, K.L., Christianson, L.E., Lepine, C., Summerfelt, S.T., 2016. Modeling and mitigation of denitrification 'woodchip' bioreactor phosphorous releases during treatment of aquaculture wastewater. *Ecological Engineering* 93, 135-143.

Schipper, L.A., Cameron, S., Warneke, S., 2010a. Nitrate removal from three different effluents using large-scale denitrification. *Ecological Engineering* 36, 1552-1557.

Schipper, L.A., Robertson, W.D., Gold, A.J., Jaynes, D.B., Cameron, S.C., 2010b. Denitrifying bioreactors-An approach for reducing nitrate loads to receiving waters. *Ecological Engineering* 36, 1532-1543.

Sortkjær, O., Pedersen, L-F & Ovesen, N.B. 2008: Omsætning af formalin i danske dambrug. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. 122 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 699.

Svensson, H., Marques, M., Kaczala, F., Hogland, W., 2014. Leaching patterns from wood of different tree species and environmental implications related to wood storage areas. *Water Environ. J.* 28, 277-284.

Van Driel, P.W., Robertson, W.D., Merkley, L.C., 2006. Denitrification of agricultural drainage using wood-based reactors. *Trans. ASAE* 48, 121-128.

Tao, W.D., Hall, K.J., Masbough, A., Frankowski, K., and Duff, S.J.B., 2005. Characterization of leachate from a wood waste pile. *Water Qual. Res. J. Can.*, 40, 476-483.

Taylor, B.R., Goudley, J.S., Carmichael, N.B., 1996. Toxicity of aspen wood leachate to aquatic life: laboratory study. *Environ. Toxicol. Chem.* 15, 150-159.

Taylor, B.R., Carmichael, N.B., 2003. Toxicity and chemistry of aspen wood leachate to aquatic life: field study. *Environ. Toxicol. Chem.*, 22, 2048-2056.

Van Driel, P.W., Robertson, W.D., Merkley, L.C., 2006. Denitrification of agricultural drainage using wood-based reactors. *Trans ASAE* 48, 121-128.

Vogan, J.L., 1993. The use of emplaced denitrifying layers to promote nitrate removal from septic effluent. M.Sc. Thesis, Dept Earth Sci., Univeristy of Waterloo, ON, Canada.



Von Ahnen, M., Pedersen, P.B., Hoffmann, C.C., Dalsgaard, J., 2016a. Optimizing nitrate removal in woodchip beds treating aquaculture effluents. *Aquaculture* 458, 47–54.

von Ahnen, M., Pedersen, P.B., Dalsgaard, J., 2018. Performance of full-scale woodchip bioreactors treating effluents from commercial RAS. *Aquacultural Engineering* 83, 130-137.

Von Ahnen, M., Pedersen, P.B., Dalsgaard, J., 2016b. Start-up performance of a woodchip bioreactor operated end-of-pipe at a commercial fish farm – a case study. *Aquacultural Engineering* 74, 96-104.

Warneke, S., Schipper, L.A., Bruesewitz, D.A., McDonald, I., Cameron, S., 2011. Rates, controls and potential adverse effects of nitrate removal in a denitrification bed. *Ecological Engineering* 37, 511–522.



Projektet er støttet økonomisk af EU og den danske stat gennem Den Europæiske Hav- og Fiskerifond.