



UDVIKLING AF METODE TIL BEREGNING AF BRINKEROSION OG FOSFORTAB VED RESTAURERING AF VÅDOMRÅDER OG VANDLØB

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 263

2023



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

UDVIKLING AF METODE TIL BEREGNING AF BRINKEROSION OG FOSFORTAB VED RESTAURERING AF VÅDOMRÅDER OG VANDLØB

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 263

2023

Brian Kronvang
Søren E. Larsen

Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr.263
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Udvikling af metode til beregning af brinkerosion og fosfortab ved restaurering af vådområder og vandløb
Forfattere:	Brian Kronvang og Søren E. Larsen
Institution:	Aarhus, Institut for Ecoscience
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Januar 2023
Redaktion afsluttet:	Januar 2023
Faglig kommentering:	Hans E. Andersen
Kvalitetssikring, DCE:	Signe Jung-Madsen
Sproglig kvalitetssikring:	Anne Mette Poulsen
Ekstern kommentering:	Miljøstyrelsen. Kommentarerne findes her: http://dce2.au.dk/pub/komm/TR263_komm.pdf
Finansiel støtte:	Miljøstyrelsen.
Bedes citeret:	Kronvang, B. & Larsen, S.E. 2023. Virkemiddel for brinkerosion og fosfortab ved restaurering af vådområder og vandløb. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 34s. - Teknisk rapport nr. 263 http://dce2.au.dk/pub/TR263.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	I rapporten udvikles metodegrundlaget for beregning af brinkerosion og deraf følgende fosfortab ved brinkerosion før og efter restaurering af vådområder og vandløb.
Emneord:	Restaurering, vådområder, vandløb, brinkerosion, fosfortab
Layout:	Grafisk Værksted
Foto forside:	Brian Kronvang
ISBN:	978-87-7156-xxx-x
ISSN (elektronisk):	2244-999X
Sideantal:	34
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/TR263.pdf

Indhold

Sammenfatning	5
1 Introduktion	10
2 Anvendte data og metoder	12
2.1 Beskrivelse af anvendte data	12
2.2 Beskrivelse af statistiske metoder	14
3 Betydning af vandløbet størrelse og form	15
4 Betydningen af brinkens hældning	16
5 Betydning af forekomst af træer langs vandløb	18
6 Fosforindhold i brinkmateriale	19
7 Anvendelse af virkemidlet til beregning af brinkerosion	20
8 Eksempler på overslagsberegninger af effekter på brinkerosion fra ældre vandløbs restaurerings projekter	21
8.1 Gelså ved Bevtøft	21
8.2 Brede Å ved Løgumkloster	22
8.3 Odense Å ved Tørringe bæk	23
9 Eksempler på effektberegninger af brinkerosion fra nyere vådområde projekter	25
9.1 Velds Møllebæk vådområdeprojektet i Viborg kommune	25
9.2 Brændstrup bæk vådområde projektet i Vejen kommune	26
9.3 Rind bæk vådområde projektet i Viborg kommune	26
10 Virkemiddel beregnerens opbygning	28
11 Konklusion og perspektiver	30
12 Referencer	32

Forord

Projektet er bestilt af Miljøstyrelsen i 2022. Denne rapport, som omhandler selve udviklingen af metode til beregning af brinkerosion og det deraf medfølgende fosfortab til overfladevand, forventes at danne baggrund for en virkemiddelberegner til anvendelse ved restaurering af vådområder og vandløb. Der er i projektet og rapporten lagt op til, at der udvikles en manual til beskrivelse af de nødvendige inputdata fra restaureringsprojekter, når virkemidlet skal anvendes til egentlige beregninger af brinkerosion og fosfortab i henholdsvis før situationen og situationen efter restaurering af vandløb. Desuden skal der senere udvikles et egentligt virkemiddelberegningssværktøj, som kan gennemføre beregningerne i forbindelse med planlagte restaurerings projekter. I projektforsløbet er der afholdt fire møder i følgegruppen for projektet bestående af repræsentanter fra Miljøstyrelsen.

Summary

Statistical analyses of a comprehensive set of previously collected data on bank erosion in Danish stream types from River Odense and River Skjern have been used in this report to develop proposals for a management tool allowing estimation of the effect of different types of stream restoration on bank erosion and the resulting phosphorus loss to surface water. The tool will be used in the planning of wetland and stream restoration projects to obtain an estimation of the significance of bank erosion in the pre-and post-situation on the basis of collected standard information on the stream.

The statistical analyses of data from River Odense showed that there is a difference between bank erosion in different sizes of streams (Strahler order), categorised into channelised and meandering streams, respectively. In small streams (Strahler Order 1 & 2), the statistical analyses identified a major difference between the annual average bank erosion in the meandering streams in the younger moraine landscape ($18 \text{ mm m}^{-1} \text{ year}^{-1}$) and the meandering streams in the old heath plain and moraine hill landscape ($89 \text{ mm m}^{-1} \text{ year}^{-1}$). In the analyses, an almost similar difference was found for the annual average bank erosion in the channelised streams in the two landscape types (21 and 45 mm year^{-1}). Measurements of the bank erosion 10 years after the remeandering of the lower part of River Skjern also demonstrated a relatively large annual average bank erosion rate ($41\text{--}64 \text{ mm m}^{-1} \text{ year}^{-1}$) just as the erosion rates recorded for heath plain and moraine hill streams. In general, there is no significant difference between bank erosion in channelised and meandering streams in the moraine landscape, whereas the difference is relatively significant in streams in the heath plain and older moraine hill landscape. However, relatively few measurements are available on streams in the heath plain and the older moraine hill landscape; thus, the data basis needs to be improved.

The slope of the bank also has an impact on the extent of bank erosion. A model was developed showing a significant increase of bank erosion with enhanced bank slope based on statistical analyses of all data from River Odense. The model developed for the impact of the bank slope will therefore be included in the efficiency estimations of the management tool based on collected data on the slope of the banks in the pre-and post-situation in connection with the establishment of wetlands and actual stream restoration projects. Finally, a significant impact was found of the occurrence of high vegetation (trees) along streams in relation to e.g. grass in the buffer for the extent of the bank erosion in the different stream types. It is thus possible to estimate the effect of establishing trees along streams in connection with a wetland or stream restoration project. Trees in the buffers along streams must be naturally occurring species such as willow or alder that either immigrate or are planted in connection with the restoration project.

Conversion of the tool's bank erosion rates to an expected phosphorus loss is carried out by using the many analyses of the phosphorus content of bank material in nine georegions of the country. The developed management tool for phosphorus loss in connection with bank erosion therefore contains the following parameters: 1) the location of the stream in the two main landscape types; 2) the size of the stream (Strahler order); 3) the location of stream in the georegions; 4) stream type (channelised / meandering); 5) stationing (sections)

of the stream; 6) the slope of the bank in the pre-and post-situation; 7) information about trees in the buffer along the stream before and after the restoration.

In the report, the management tool was applied to three older stream restoration / wetland projects as well as three recent wetland projects. Only in one of the three older restoration projects did the bank erosion decrease as an effect of the remeandering of the stream. In the estimations for the three recent wetland projects, bank erosion and phosphorus loss decreased in one of the projects and increased in two of the projects. None of these six restoration projects included planting of trees in the buffer along the streams, which would effectively have contributed to reducing the bank erosion. The results clearly show that it is important to include bank erosion when estimating the efficiency of management tools. This can contribute to optimising the projects so that the extent of the bank erosion after the restoration is minimised, which will also minimise the phosphorus loss to streams.

Sammenfatning

Statistiske analyser af et omfattende tidligere indsamlet datamateriale om brinkerosion i danske vandløbstyper fra Odense Å og Skjern Å er i denne rapport anvendt til at udarbejde forslag til et virkemiddelkoncept, der gør det muligt at estimere effekten af forskellige typer af vandløbsrestaurering på brinkerosion og det deraf følgende fosfortab til overfladevand. Virkemidlet skal anvendes ved planlægning af vådområde- og vandløbsrestaureringsprojekter til at opnå en beregning af betydningen af brinkerosion i før- og efter-situationen ud fra indsamlede standardoplysninger om vandløbet.

De statistiske analyser af data fra Odense Å viser, at der for vandløb med lav vegetation (græs og urter) i bræmmen er små og ikke signifikante forskelle i brinkerosion i forskellige størrelser af vandløb (Strahler orden) opdelt for henholdsvis udrettede og mæandrede vandløb. I mindre vandløb (Strahler orden 1 & 2) er der ved de statistiske analyser konstateret en stor forskel mellem den årlige gennemsnitlige brinkerosion i mæandrede vandløb i det yngre morænelandskab ($18 \text{ mm m}^{-1} \text{ år}^{-1}$) og mæandrede vandløb i det ældre hedeslette- og bakkeø-landskab ($89 \text{ mm m}^{-1} \text{ år}^{-1}$). En næsten tilsvarende forskel er i analyserne konstateret for den årlige gennemsnitlige brinkerosion i de udrettede vandløb i de to landskabstyper (21 og $45 \text{ mm m}^{-1} \text{ år}^{-1}$). Opmålinger af brinkerosion 10 år efter genslyngningen af den nedre del af Skjern Å viser også en forholdsvis stor årlig gennemsnitlig brinkerosionsrate ($41\text{--}64 \text{ mm m}^{-1} \text{ år}^{-1}$), ligesom de erosionsrater, der er målt for hedeslette og bakkeø vandløb. Generelt er der ikke stor forskel mellem brinkerosion i udrettede og mæandrede vandløb i morænelandskabet, hvorimod forskellen er forholdsvis stor i vandløb i hedeslette- og bakkeø-landskabet. I vandløb i hedeslette- og bakkeø-landskabet findes der dog forholdsvis få målinger, hvorfor datagrundlaget her bør forbedres.

Brinkens hældning har også stor betydning for omfanget af brinkerosion. Der er udviklet en model, hvor brinkerosion stiger signifikant ved en stigning i brinkhældning ud fra statistiske analyser af alle data fra Odense Å. Den udviklede model for brinkhældningens betydning vil derfor indgå i virkemiddelberegningerne ud fra indsamlede data om brinkernes hældning i før- og efter-situationen ved etablering af vådområder og egentlige vandløbsrestaureringsprojekter. Endelig er der blevet påvist en signifikant betydning af, at der findes høj vegetation (træer) langs med vandløb i forhold til f.eks. græs i bræmmen for brinkerosionens størrelse i de forskellige typer af vandløb. Der kan således laves en beregning af betydningen af at etablere træer langs vandløb i forbindelse med et vådområde- eller vandløbsrestaureringsprojekt. Træer i bræmmen langs vandløb skal være naturligt forekommende arter som pil eller elletræer, der enten indvandrer af sig selv eller udplantes i forbindelse med restaureringsprojektet.

Omsætning af virkemidlets brinkerosionsrater til et forventet fosfortab foretages ved at anvende de mange analyser af fosforindholdet i brinkmateriale i ni georegioner af landet. Det samlede udviklede virkemiddel for fosfortab ved brinkerosion indeholder derfor følgende parametre: 1) Beliggenhed af vandløb i de to overordnede landskabstyper; 2) størrelse af vandløb (Strahler orden); 3) beliggenhed af vandløb i georegionen; 4) formen af vandløbet (regu-

leret / mæandreende); 5) stationering (delstrækninger) af vandløbet; 6) hældning af brinken i før- og efter-situationen; 7) oplysning om træer i bræmmen langs vandløb før og efter restaureringen.

I rapporten er virkemidlet demonstreret for tre ældre vandløbsrestaurerings- / vådområdeprojekter, samt tre nyere vådområdeprojekter. Kun i et af de tre ældre restaureringsprojekter falder brinkerosionen, som en effekt af genslyngningen af vandløbet. I beregningen for de tre nyere vådområdeprojekter falder brinkerosion og fosfortab i et af projekterne, mens den stiger i to af projekterne. Ingen af disse seks restaureringsprojekter har indeholdt plantning af træer i bræmmen langs vandløbene, som effektivt ville have medvirket til at reducere brinkerosionen. Resultaterne viser med al tydelighed, at det er vigtigt at inddrage brinkerosion i virkemiddelberegninger, da det kan medvirke til at optimere projekterne, så brinkerosions omfang minimeres efter den gennemførte restaurering, hvilket også vil minimere fosfortabet til vandløb.

1 Introduktion

Brinkerosion har vist sig at udgøre en betydelig kilde til sediment- og fosfortransport i vandløb (Laubel et al., 2003; Kronvang et al., 2013). Senest er der foretaget en landsdækkende kortlægning af brinkerosion og dens betydning for fosfortab i Andersen og Heckrath (2020). I denne undersøgelse blev brinkerosions betydning for fosfortab beregnet til i gennemsnit 644 tons på landsplan, hvilket er næsten halvdelen af det samlede diffuse fosfortab til overfladevand i Danmark. I undersøgelsen blev der udviklet landsdækkende kort over brinkerosionens betydning for fosfortab, og den store regionale forskel skyldes formentlig primært tætheden af vandløb og indholdet af fosfor i brinkmaterialet.

Brinkerosion forekommer ved flere fysiske processer:

- Brinksvækkelse – (ved påvirkning af grundvand, tryk på brinker, frost/tø – processer, der sker hele tiden, hvis betingelserne er til stede).
- Fluvial erosion af brinker (strømmens energi slider materiale fra brinker ved erosion – proces, der sker hele tiden, når brinken er vanddækket).
- Brinkkollaps (brinker skrider sammen efter underminering – proces, der sker med lange mellemrum).

Den samlede term for alle processer er brinkerosion. I målinger af brinkerosion med erosionspinde er det oftest de to første processer, som med sikkerhed bliver kvantificeret, da brinkskred er en længerevarende proces (Laubel et al., 2003).

Vandløb er fra naturens side meget dynamiske og ændrer løbende form ved brinkernes erosion og ved sedimentation af materiale internt i vandløbet (inderside af mæanderbuer) og eksternt i vandløbsbræmmen og på oversvømmede enge, da et naturligt mæanderende vandløb har god hydrologisk kontakt med den tilgrænsende ådal. Det slyngede vandløbs store dynamik sikrer leverance af materialer, som sten og grus, til vandløbets stryg, mens sand og finere materiale transporteres videre i vandløbet. Det er i de lige og oftest overdybe kanalagtige vandløb, at der er problemer med for stor en tilførsel af sediment fra brinkerosion, da flere af de vigtige interne og eksterne aflejringsmiljøer mangler, så alt materiale skal i transport. Vandløbenes transportkapacitet kan ofte ikke følge med input af sediment, hvorfor der sker tilsanding på strækningen og en deraf følgende stor sandtransport. Det vil påvirke levevilkårene for planter, smådyr og fisk i negativ retning (Baatrup-Pedersen, 2021). Hjemmehørende træer langs vandløb er af stor betydning for forekomst af dødt ved i vandløb, input af organisk stof, skyggevirksomhed for vandløb ift. vandtemperatur og reduktion af brinkerosionen (Kronvang et al., 2012; Baatrup-Pedersen, 2021).

Ved restaurering af vådområder i ådale er der meget ofte sket en samtidig genslyngning af vandløbet i ådalen, samtidig med at vandløbsbunden er hævet og dræn / grøfter afskåret for at sikre en højere grundvandsstand i området og gentagne oversvømmelser af de vandløbsnære arealer. I forbindelse med afskæring af dræn / grøfter og oversvømmelser i ådale sker der nemlig en øget fjernelse af nitrat-N samt en tilbageholdelse af partikulært fosfor (Kronvang et al., 2009).

Når vandløbet genslynges, etableres der et længere forløb i ådalen, som alt andet lige vil efterlade et større brinkareal for erosion. Dette bliver modvirket ved en hævnning af vandløbsbunden, da det mindsker brinkarealet, der udsættes for vandets eroderende kræfter, samt ved at der etableres nye tværprofiler af vandløbet med en mindre brinkhældning (anlæg).

I forbindelse med selve restaureringsarbejdet med udgravningen af det nye forløb af vandløbet har tidligere undersøgelser påvist, at der momentant sker en forøget brinkerosion og transport af sediment og fosfor (Kronvang et al., 1998). Endelig har målinger af brinkerosion i vandløb med og uden træer i bræmmen langs vandløb påvist, at træer har en stor gavnlig effekt på at stabilisere brinken og dermed nedsætte brinkerosionen (Kronvang et al., 2012; Laubel et al., 2000).

En for stor tilførsel af sediment til vandløb vil oftest påvirke de økologiske forhold negativt ved at danne ensartede bundforhold (levesteder). Et eksempel på dette er en sandbund, der er i bevægelse og dermed kan medvirke til at ødelægge gydepladser for eksempelvis ørred og laks i vandløb ved tilsanding af gydebankerne (Græsbøll et al., 1988). Desuden vil brinkerosion tilføre store mængder partikelbundet fosfor til vandløb, som ved erosion og senere transport i vandfasen (i suspension) eller langs bunden kan forårsage eutrofieringsproblemer i nedstrøms søer og kystvande. Derfor er det vigtigt at optimere vådområde- og restaureringsprojekter, så effekterne af restaureringen medvirker til at reducere sediment- og fosfortabet.

Formålet med dette projekt har været at udvikle en metode til bestemmelse af brinkerosion og det deraf følgende fosfortab ved restaurering af vådområder og vandløb. En restaurering omfatter elementer som genslyngning af vandløb, hævnning af vandløbsbunden, nyt anlæg på brinker og plantning af træer i bræmmen langs vandløb. Projektet skal understøtte udviklingen af et nyt holistisk virkemiddel for brinkerosion og afledt fosfortab, som kan anvendes ved restaurering af vådområder og egentlige vandløbsrestaureringsprojekter.

2 Anvendte data og metoder

2.1 Beskrivelse af anvendte data

Data og modeller omkring måling af brinkerosion i danske vandløb fra tidligere gennemførte forskningsprojekter har indgået i de statistiske analyser i dette projekt. Der er især tale om data indsamlet i diverse forsknings- og overvågningsprojekter gennem tid – de fleste fra forskningsprogrammet 'Landmanden som landskabsforvalter' i perioden 2005-2009 og innovationsfondsprojektet 'MONITECH' 2009-2015.

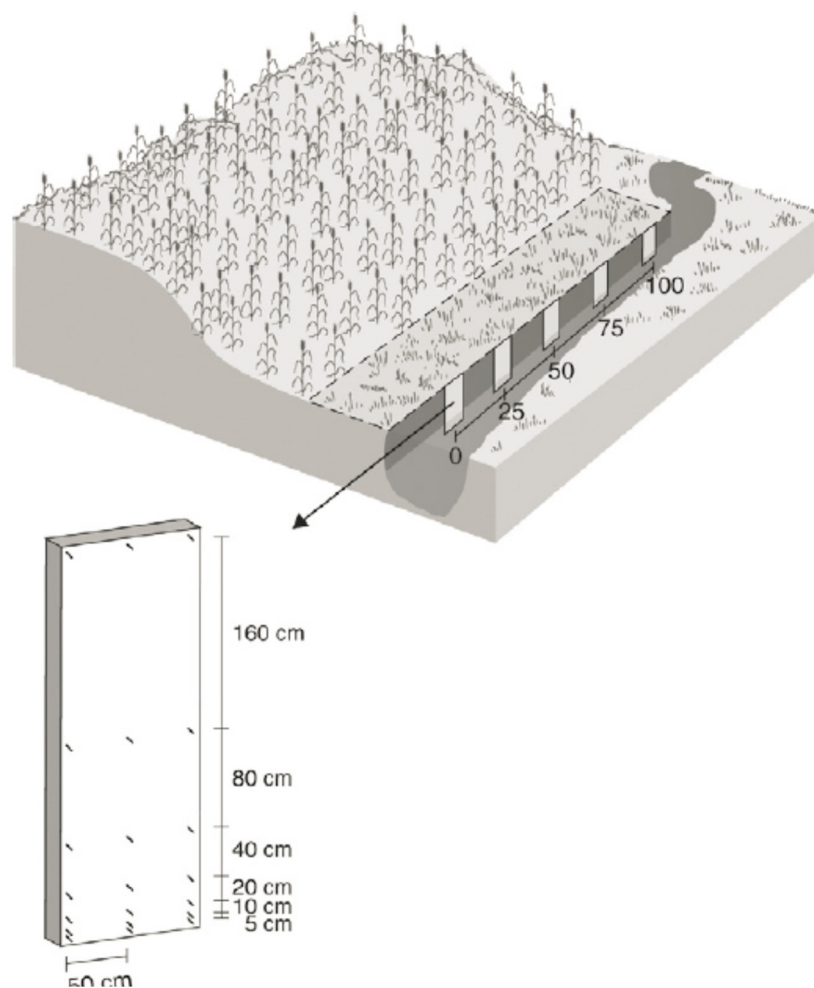
Hertil kommer målinger i forbindelse med genslyngninger af vandløbet Gelså i Sønderjylland (1989) og Brede Å i Sønderjylland (1994), samt den nedre del af Skjern Å i 2012. Viden fra disse projekter med opfølgning af egentlige vandløbsrestaureringer har indgået, som baggrundsmateriale i opgavens løsning. Endelig er det udviklede virkemiddelkoncept testet på tre nyligt gennemførte vådområdeprojekter, hvor informationer fra projekteringsrapporter fra Envi-Dan og Atkins er blevet anvendt.

Målinger af brinkerosion med erosionspinde blev i perioden 2006-2009 gennemført på i alt 36 strækninger af 100 m i Odense Å og 12 strækninger i Skjern Å. Erosionspinde var opsat i brinkplots af 1 m's bredde med fem plots på hver 100 m strækning af vandløbene, og hvert plot bestående af tre rækker af erosionspinde fra vandløbsbund til kronekant (figur 1). I Odense Å blev der målt på strækninger, der repræsenterer fem størrelser af vandløb (Strahler orden 1-5), regulerede og slyngede strækninger, strækninger med høj (træer) og lav (græs og urter) vegetation i bræmme samt strækninger med bred eller smal randzone. I Skjern Å blev der målt på tilsvarende udvalgte strækninger, men kun i to vandløbsstørrelser, Strahler orden 1 og 2.

De i alt 180 brinkplots i Odense Å og 60 brinkplots i Skjern Å er anvendt i dataanalyserne, hvor geometrisk gennemsnit for brinkerosion er beregnet for hvert brinkplot og for hvert år per m vandløbslængde. Der er til analyserne så beregnet et gennemsnit for hvert brinkplot for de tre måleår 2006/07, 2007/08 og 2008/09. For hvert brinkplot blev der i projekterne indsamlet standardiserede oplysninger om brinkens hældning, vandløbets størrelse, reguleret/slynget strækning, høj/lav vegetation, bredde af udyrket randzone, m.v., som anvendes i de statistiske grupperinger og analyser.

Brinkernes gennemsnitlige hældning i de forskellige vandløbstyper er vist i tabel 1.

Figur 1: Illustration af opsætning af erosionspinde på en af de 100 m strækninger, hvor der blev målt brinkerosion i perioden 2006-2009. Der er fem brinkplot af 1 m's bredde på en 100 m strækning, og hvert brinkplot består af tre rækker af erosionspinde indsat i forskellig højde over bunden af vandløbet.

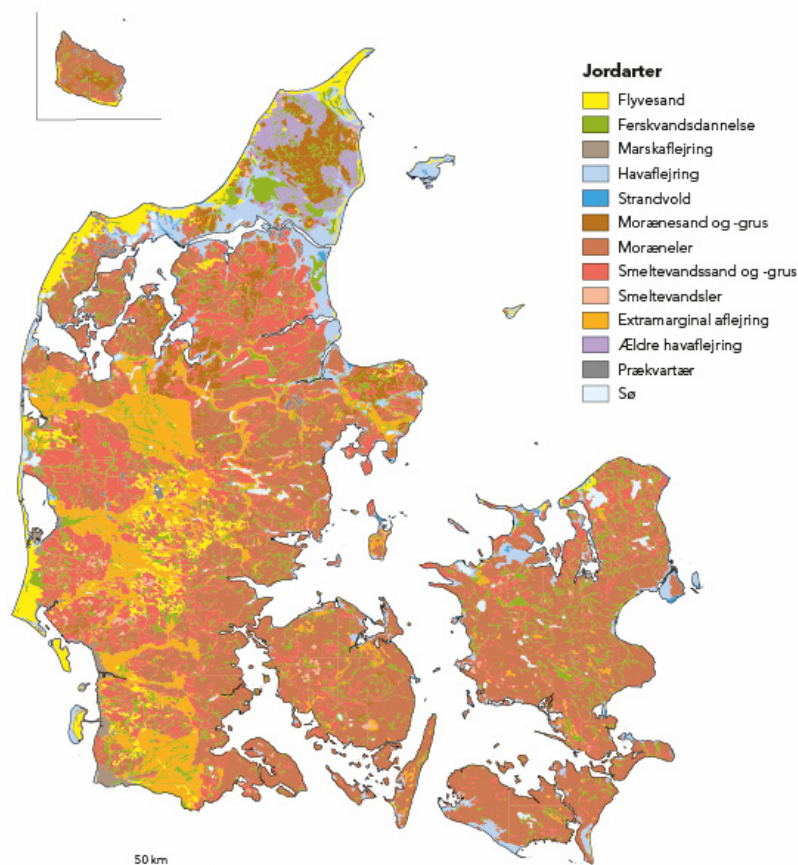


Tabel 1: Gennemsnitlig brinkhældning i de to undersøgte vandløb Odense Å og Skjern Å.

Vandløb	Reguleret strækning	Naturligt mæanderende strækning
Odense Å		
Strahler orden 1 & 2	44 °	51 °
Strahler orden 3 & 4	45 °	50 °
Strahler orden 5	47 °	51 °
Skjern Å		
Strahler orden 1 & 2	48 °	66 °

Målingerne af brinkerosion i Odense Å forventes at repræsentere moræne-landskabet, mens målingerne i Skjern Å forventes at repræsentere hedeslette- og bakkeø-landskabet, som vist i figur 2.

Figur 2: Kort, der viser de dominerende jordarter i 1 m's dybde i hele Danmark. Iskappens fremskred stoppede ved det, der i dag er den Jyske Højderyg, og det ses tydeligt på fordelingen af især moræneler og smeltevandssand (orange og røde farver). (Kort: GEUS).



2.2 Beskrivelse af statistiske metoder

Den statistiske analyse består af tosidet variansanalyse samt kovariansanalyse (Casella, 2008). Både den årlige erosion samt deposition, angivet i mm, transformeres med den naturlige logaritme, før de analyseres statistisk. Responsvariablen brinkeroseion grupperes i alle analyser efter Strahler orden. Strahler orden kombineres på skift med naturlig/reguleret, lav/høj brinkvegetation samt smal/bred randzone til at danne en tosidet variansanalyse. I kovariansanalysen inddrages hældningen af brinken som en regressionsvariabel og er et tal mellem 0-90, og klassevariablen er igen Strahler orden. Data fra Odense Å og Skjern Å er analyseret separat.

Mindste kvadraters gennemsnit beregnes for hver kombination i den tosidede variansanalyse og tilbagetransformeres og ganges med en faktor, der sørger for, at der tilbagetransformeres til middelværdi og ikke kun medianværdi (Ferguson, 1986). I kovariansanalysen estimeres brinkhældningens effekt på erosion.

3 Betydning af vandløbet størrelse og form

De statistiske analyser viser, at brinkerrosionen i vandløb med lav vegetation (græs og urter) i bræmmen er næsten af samme omfang i de kanaliserede og slyngede vandløb for de to mindste typer af vandløb (Strahler orden 1&2 og 3&4) i Odense Å, som repræsenterer morænelandskabets vandløb (tabel 2). I de store vandløb (Strahler orden >4) er der en større med ikke signifikant forskel i den målte brinkerrosion (tabel 2).

I Skjern Å blev der kun målt brinkerrosion i de mindre Strahler orden 1 & 2 vandløb. I disse vandløb er brinkerrosionen konstateret til at være betydeligt større end i de tilsvarende vandløb i Odense Å og med en signifikant forskel mellem kanaliserede og slyngede vandløb (tabel 2). Dette resultat er forventeligt af to hovedgrunde:

Der er en større sammenhængskraft (eroderbarhed af brinkmateriale er lav) i morænelandskabets jorde, end i de dominerende sandede jorder i hedeslette- og bakkeø-landskabet, hvor brinkmaterialet er mere eroderbart.

Der er en større vandafstrømning i vestdanske vandløb pga. mere regn og højere grundvandstilstrømning, hvilket medfører større fluvial erosion end i morænelandskabets vandløb.

Tabel 2: Oversigt over de beregnede og estimerede brinkerrosionsrater i de tre størrelser af vandløb (Strahler orden 1 & 2 vandløb; Strahler orden 3 & 4 vandløb, Strahler orden 5 vandløb samt for henholdsvis udrettede og slyngede vandløb. Analyserne omfatter kun vandløb med lav vegetation (græs og urter) i bræmmen. Kun de målte brinkerrosionsrater i vandløb af Strahler orden 1 & 2 på hedeslette/bakkeø er signifikant forskellige imellem de udrettede og slyngede vandløb ($P = 0.0052$). *) Brinkerrosionen er antaget ens med de målte erosionsrater i Strahler orden 1&2 vandløb på hedeslette og bakkeø, da der ikke er gennemført de samme *in situ* målinger af brinkerrosion som i vandløb i morænelandskabet i større vandløb. I forhold til test af signifikans anvendes følgende kategorier: ^{a)} $P < 0,05$; ^{b)} $P < 0,01$; ^{c)} $P < 0,001$

	Udrettede vandløb (sinuositet 1,0-1,1)	Slyngede vandløb (sinuositet > 1,1)
	Gennemsnitlig brinkerrosion ($\text{mm m}^{-1} \text{år}^{-1}$) [95 % konfidensinterval]	
Strahler 1 & 2 ordens vandløb: moræne (målt)	21,3 [16,9-27,0]	18,0 [12,9-25,1]
Strahler 1 & 2 ordens vandløb: hedeslette (målt)	45,2 [35,1-58,1]	89,2 [60,1-132] ^{b)}
Strahler orden 3 & 4 vandløb: moræne (målt)	25,3 [19,7-32,4]	30,9 [21,8-43,9]
Strahler orden 3 & 4 vandløb: hedeslette og bakkeø (estimeret)	45,2*	89,2*
Strahler orden > 4 vandløb: moræne (målt)	32,4 [24,6-42,6]	20,8 [14,5-30,0]
Strahler orden > 4 vandløb: hedeslette og bakkeø (estimeret)	45,2*	89,2*

De estimerede brinkerrosionsrater i Strahler orden 3 & 4 og 5 på hedeslette og bakkeø er antaget at være de samme, som i de målte erosionsrater i Strahler orden 1 & 2 vandløb på hedeslette og bakkeø. Det skyldes at der mangler egentlige målinger af brinkerrosion med erosionspinde i de større vandløb i denne landskabstype. I en tidligere opgørelse af brinkernes tilbageg4. vandløb på hedeslette og bakkeø (tabel 2). De uafhængige beregninger af brinkerrosionsrater i Skjern Å over en periode på ti år ud fra tværsnitsopmålinger viser, at der er en forholdsvis stor brinkerrosion i slyngede vandløb på hedeslette og bakkeø. Det skyldes formentlig, at brinkmaterialet er mere let eroderbart, pga. dets store sandindhold, end i morænelandskabets mere lerede brinkmateriale.

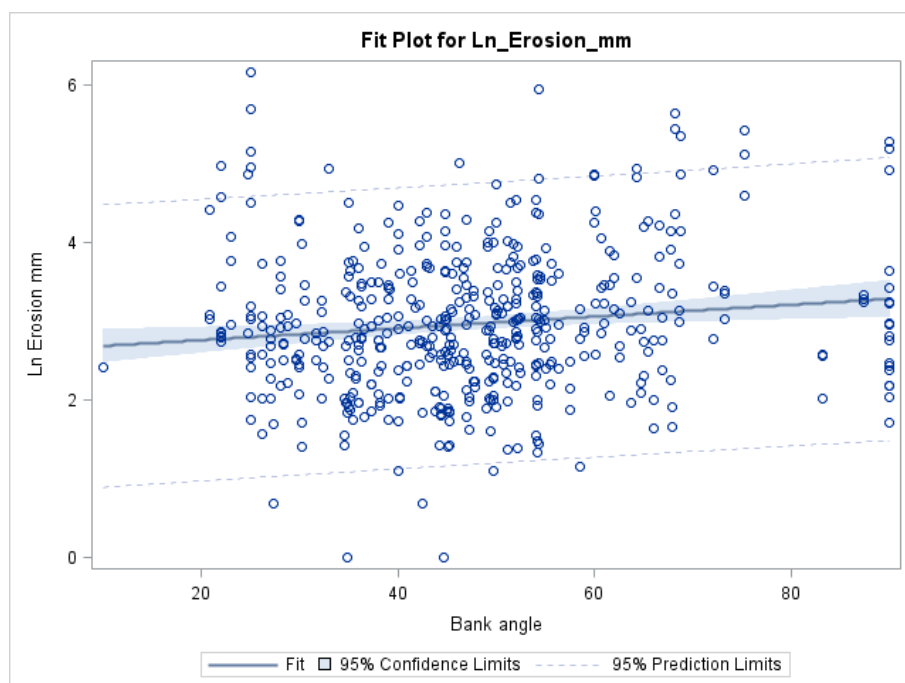
4 Betydningen af brinkens hældning

Det er tidligere påvist af Laubel et al. (2005), at brinkens hældning har stor betydning for brinkerosionens omfang. I deres studie blev der kun målt på mindre type 1-vandløb, men der blev fundet en eksponentielt stigende brinkerosion med stigende hældning af brinken. I vores analyser af hældningens betydning for brinkerosion i Odense Å kunne der etableres en signifikant sammenhæng ($R^2 = 0,02$; $P = 0,005$; $N = 491$), som dækker alle Strahler ordener af vandløb (1):

$$BE \text{ (mm / m / år)} = 13,65 * \exp(0,00746 * \text{brinkhældning (grader)}) \quad (1)$$

Ligningen viser, at der sker en svagt stigende brinkerosion med stigende hældning af brinken, som vist i figur 3. Sammenhængen er dog med en meget lille forklaringsgrad (R^2) hvorfor der er mange andre faktorer, som spiller en rolle for brinkerosionen (Laubel et al., 2005).

Figur 3. Samplot mellem omfanget af brinkerosion (logaritme transformeret) og brinkens hældning (grader) med viste konfidensintervaller for den estimerede model (1) og for prediktionsintervallet.



Da de beregnede årlige gennemsnitlige brinkerosionsrater i tabel 2 er målt ved de angivne gennemsnitlige brinkhældninger i Odense Å og Skjern Å (tabel 1), vil der skulle korrigeres (ofte en reduktion) for brinkerosion ved anvendelse af lavere brinkhældninger end dem, som målingerne er udført ved.

Typisk anvendes der en række forskellige brinkanlæg ved projektering af nye slyngede vandløb. Derfor er der i tabel 3 vist eksempler på de forskellige korrektioner af brinkerosion angivet i tabel 2 for et slynget vandløb i henholdsvis morænelandskabet og hedeslette landskabet ved forskellige typisk anvendte brinkanlæg. Der skal ved alle de angivne brinkanlæg i tabel 3 ganges en korrektionsfaktor på, der reducerer den målte brinkerosion. Korrektionsfaktoren reducerer brinkerosionen jo fladere anlæg, der er anvendt.

Tabel 3: Beregnede korrektionsfaktorer for de målte brinkerosionsrater i Odense Å og Skjern Å for slyngede vandløb ved anvendelse af formelen for brinkhældningens betydning (formel 1).

Brinkens anlæg	Moræne landskab	Hedeslette landskab
	Korrektionsfaktor, der skal ganges på den målte brinkerosion	Korrektionsfaktor, der skal ganges på den målte brinkerosion
1:1	0,96	0,85
1:1,25	0,91	0,82
1:1,5	0,88	0,79
1:2	0,83	0,75
1:3	0,78	0,70
1:4	0,76	0,68

5 Betydning af forekomst af træer langs vandløb

Træer langs vandløb har i flere tidligere undersøgelser vist sig at reducere omfanget af brinkerrosion (f.eks. Laubel et al., 2000 & 2003; Kronvang et al., 2012). I denne undersøgelse har vi gennemført en ny analyse på brinkerrosionsdata fra Odense Å og Skjern Å, der samstemmende påviser en signifikant reducerende effekt af træer i bræmmen langs vandløb langs de fleste typer af vandløb (tabel 4). Reduktionen af brinkerrosion ved træer i bræmmen langs vandløb er på ca. 27 % i Strahler orden 1&2 vandløb i morænelandskabet, stigende til 43 % og 38 % i Strahler orden 3&4 og 5 vandløb. I Strahler orden 1&2 vandløb på hedeslette og bakkeø er reduktionen større, nemlig på 53 %.

Tabel 4: Resultater for betydningen af forekomst af træer i bræmmen langs vandløb af forskellig størrelse for den gennemsnitlige brinkerrosions omfang med angivelse af 95 % konfidensinterval. *De fleste kategorier baserer sig på målinger, men for Strahler orden 3&4 vandløb samt Strahler orden > 4 vandløb på hedeslette og bakkeø er tallene sat lig med målingerne i Strahler orden 1&2 vandløb på hedeslette og bakkeø, pga. manglende målinger i disse typer af vandløb. I forhold til test af signifikans anvendes følgende kategorier: ^{a)} $P < 0,05$; ^{b)} $P < 0,01$; ^{c)} $P < 0,001$.

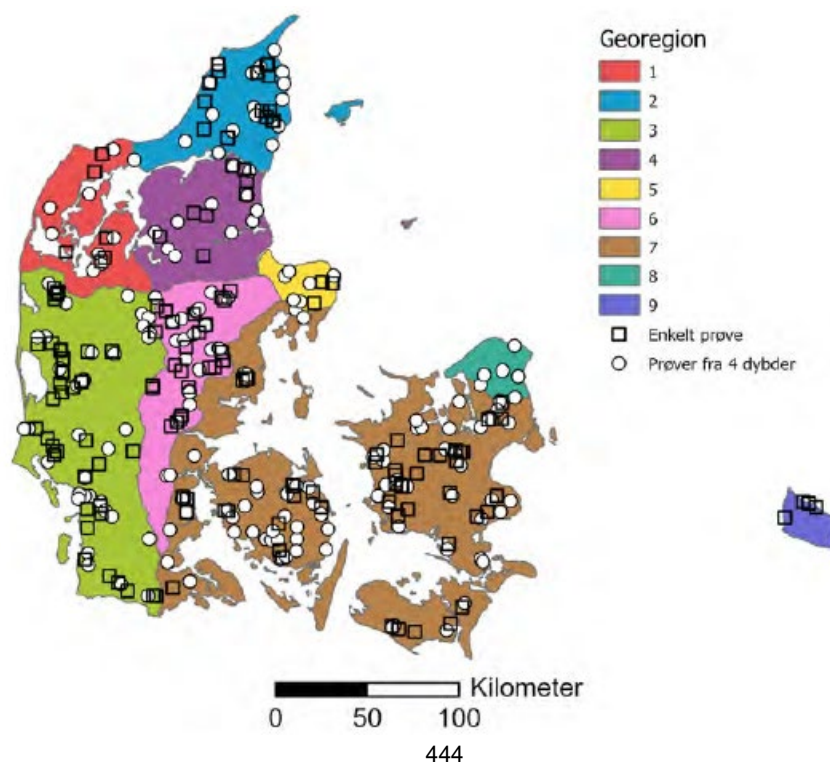
	Vandløb (uden høj vegetation)	Vandløb (med høj vegetation)
	Gennemsnitlig brinkerrosion (mm m ⁻¹ år ⁻¹) [95 % konfidensinterval]	Gennemsnitlig brinkerrosion (mm m ⁻¹ år ⁻¹) [95 % konfidensinterval]
Strahler orden 1 & 2 vandløb: moræne (målt)	20,2 [16,7-24,3]	14,8 [12,7-41,1] ^a
Strahler orden 1 & 2 vandløb: hedeslette (målt)	55,0 [43,0-70,3]	25,6 [20,3-32] ^c
Strahler orden 3 & 4 vandløb: Moræne (målt)	27,1 [22,2-33,0]	15,5 [12,8-18,9] ^b
Strahler orden 3 & 4 vandløb: hedeslette (estimeret)	55,0*	25,6*
Strahler orden > 4 vandløb: moræne (målt)	27,6 [22,3-34,1]	17,1 [14,2-20,7]
Strahler orden > 4 vandløb: hedeslette (estimeret)	55,0*	25,6*

De målte reduktioner kan derfor anvendes direkte til beregning af brinkerrosionens omfang ved etablering af træer i bræmmen langs vandløb. I Strahler orden 3&4 vandløb samt Strahler orden > 4 vandløb for hedeslette og bakkeø anvendes der dog den samme brinkerrosion, som den der er må i Strahler orden 1&2 vandløb på hedeslette / bakkeø (tabel 4).

6 Fosforindhold i brinkmateriale

I fosforprojektet fra 2017-2020 blev der indsamlet et stort datamateriale om fosforindholdet i danske vandløbsbrinker (Andersen & Heckrath, 2020). Ud fra disse ca. 310 analyser af fosfor i brinkmateriale er der gennemført en gennemsnitsberegning for hver af de ni georegioner i landet (tabel 3). Indholdet af fosfor i brinkmateriale kan derfor knyttes til, hvor vådområde og vandløb ligger ift. georegionerne (se figur 4).

Figur 4: Vandløbsstationer i georegionerne i Danmark, hvor der er foretaget prøvetagning af brinkmateriale for analyse af fosforindhold. Gengivet fra Andersen & Heckrath (2020).



Fosforindholdet i brinkmaterialet varierer lidt mellem georegionerne og er størst i georegion 8 (Nordsjælland) og mindst i georegion 9 (Bornholm) (tabel 5).

Tabel 5: Gennemsnitligt fosforindhold i brinkmaterialet fra udtagne brinkprøver i Danmarks ni georegioner. Data fra Andersen & Heckrath (2020).

Georegion	Antal brinkprøver udtaget	Gennemsnitligt fosforindhold i brinkmateriale (kg P m ⁻³) (± 95 % konfidensinterval)
1	14	0,656 ± 0,316
2	26	0,825 ± 0,182
3	75	0,874 ± 0,214
4	19	0,559 ± 0,122
5	9	0,412 ± 0,136
6	44	0,803 ± 0,268
7	115	0,817 ± 0,064
8	6	1,311 ± 0,832
9	4	0,359 ± 0,120

7 Anvendelse af virkemidlet til beregning af brinkerosion

De statistiske analyser af brinkerosion i de forskellige størrelser af vandløb kan anvendes i praksis ved beregning af omfanget af brinkerosion på strækninger, som restaureres ved retablering af vådområder eller ved egentlige vandløbsrestaureringsprojekter, som indeholder genslyngning. Til dette formål kan opdelingen af brinkerosion i de tre vandløbsstørrelser i de to landskabstyper i Danmark for henholdsvis de regulerede og mæandrede strækninger anvendes (tabel 2). I sådanne projekttypen skal der ikke gennemføres beregninger med ændringer af brinkens hældning, da denne forventes at være repræsenteret i henholdsvis målingerne i de udrettede og mæandrede strækninger i Odense Å og Skjern Å.

Hvis der er tale om en restaurering af et vådområde eller et egentligt vandløbsrestaureringsprojekt, som kun løfter bundens beliggenhed i forhold til terræn og bevarer det udrettede løb, kan viden fra betydningen af brinkernes hældning inddrages i virkemiddelberegningen (se tabel 3).

Endelig kan der ved beplantning med træer i bræmmen langs vandløb eller tilladelse til naturlig opvækst af træer gennemføres effektberegninger med virkemidlet om træers betydning for brinkerosion (se tabel 4).

Derfor er det udviklede virkemiddel fleksibelt til at effektberegne for brinkerosion efter en restaurering af vådområder og egentlige vandløbsrestaureringsprojekter. I det følgende vises nogle eksempler på beregninger fra tre gamle vandløbsrestaurerings- og vådområdeprojekter samt tre nyere vådområderestaureringer.

Beregningerne af brinkerosion er foretaget ud fra den tilgængelige viden fra projektrapporter og artikler for de tre gamle vandløbsrestaureringsprojekter, hvorfor det er helt overordnede informationer for hele strækningen, der indgår som grundlag for effektberegningerne. Derfor må resultaterne betragtes som helt overordnede effektberegninger med en relativ stor usikkerhed omkring resultaterne.

Beregningerne for de tre nyere vådområderestaurering projekter er derimod foretaget ud fra de foreliggende projekteringsrapporter, som giver bedre og mere detaljeret information om udformningen af brinkerne og dybden til vandløbsbunden fra kronekant for delstrækninger (stationeringer) af vandløbene. Det skal dog anføres- at beregningerne igen er gennemført uden at have adgang til egentlige opmålinger af brinker og vandløbsbund i situationen efter restaureringens gennemførelse. Desuden er der heller ikke konkrete målinger af brinkernes total fosfor-indhold. Derfor må de gennemførte effektberegninger stadigvæk tillægges en rimelig stor usikkerhed, måske med den største usikkerhed for situationen efter restaureringens gennemførelse.

I de store vandløb på hedeslette og bakkeø (Strahler orden > 2) mangler der målinger af brinkerosionens omfang, hvorfor vi i denne rapport simpelt har anvendt målingerne fra Strahler orden 1 & 2 på de større vandløb. Desuden mangler der målinger af brinkerosionens omfang i egentlige afvandingsgrøfter, som ofte fjernes ved tildækning ved restaurering af vådområder.

8 Eksempler på overslagsberegninger af effekter på brinkerosion fra ældre vandløbs-restaureringsprojekter

8.1 Gelså ved Bevtøft

Gelså ved Bevtøft er et Strahler orden 3 vandløb på hedeslette, som blev restaureret ved genslyngning i 1989 af Sønderjyllands Amt (Kronvang et al., 1994). Projektet blev fulgt før og efter genslyngningen igennem flere år for især at undersøge de opnåede økologiske effekter (Friberg et al., 1994), men også restaureringens betydning for sediment- og næringstoftransport blev målt (Kronvang et al., 1994).

I beskrivelsen af restaureringen kan man se, at der ved genslyngningen skete en forlængelse af vandløbet fra 1340 m i det lige løb til 1850 m i det nye slyngede løb. Vandløbsbunden blev i gennemsnit hævet med 0,3 m (fra en gennemsnitlig dybde på 1,95 m fra kronekant), og der blev etableret flade anlæg (1:3) i alle indersider af mæanderbuerne. Brinkernes anlæg i før-situationen var generelt 1:1,25. Efter genslyngningen var brinkerne generelt etableret med et anlæg på 1:1.

Effekterne af restaureringen fra før til efter på brinkerosions omfang er blevet beregnet med de nyetablerede brinkerosionsrater i en situation uden træer langs vandløbet (tabel 2). Sedimenttabet ved brinkerosion beregnes simpelt ved at multiplicere den angivne erosionsrate i tabel 2 for den givne vandløbstype (Strahler orden) ($\text{mm m}^{-1} \text{år}^{-1}$) med længden af vandløbet (m) og længden af brinken (m). Alene det længere og nu slyngede forløb øger brinkerosionen i efter-situationen med 140 % (tabel 6). Med inddragelse af hævnning af vandløbsbund og nye brinkhældninger i svingene er der fortsat en nettoforøgelse af brinkerosionen efter projektets afslutning (tabel 6). Hvis der var blevet etableret træer langs vandløbet på den ene side, kunne forøgelsen af brinkerosionen være blevet delvist afværget (tabel 6). Kun ved etablering af træer på begge sider af vandløbet vil den beregnede brinkerosion falde til et niveau under omfanget i før-situationen (tabel 6). Overslagsberegningerne viser dog, at restaureringsprojektet i Gelså har medført en øget tilførsel af sediment og dermed fosfor til vandløbet på 92 % (tabel 6).

Tabel 6: Oversigt over effekter på brinkerosion af den gennemførte genslyngning i 1989 samt yderligere effekter, hvis der var træer langs vandløbet – enten naturligt indvandret eller plantet. Brinkerosionens ændring er beregnet som: (Efter-situation minus før-situation)/før-situation).

*) Opvækst af træer vil tage flere år – fem til ti, afhængigt af naturlig tilvæksthastighed og træarter/tilplantning – alder).

Strahler orden 3 vandløb, hedeslette	Brinkerosion (før-situation – reguleret forløb) (m^3)	Brinkerosion (efter-situation – genslynget forløb) (m^3)	Brinkerosions- ændring (%)
Længden af vandløb før og efter genslyngningen	1340 m	1850 m	
Brinkerosion (dybde af vandløb til terræn som i før-situationen)	378	907	140
Brinkerosion (dybde af vandløb til terræn som i efter-situationen)		768	103
Introduktion af ny lav hældning i sving		728	92
Simuleret effekt af etableringen af træer langs den ene side af vandløbet		513*	36
Simuleret effekt af etableringen af træer på begge sider af vandløbet		326*	-14

Sedimenttransporten i Gelså blev målt både som input til den restaurerede strækning og ud fra den restaurerede vandløbsstrækning i to år efter genslyngningens afslutning. Der blev også etableret et midlertidigt sandfang i åens nederste del for at fange de store mængder af bundtransport af sediment, der forventedes at blive skabt fra en øget brinkerrosion i den første ustabile periode med justeringer af tværprofiler med nye gravede brinker (Kronvang et al., 1994). Det etablerede sandfang tilbageholdt i alt ca. 500 m³ sediment i løbet af det første år efter restaureringen, hvilket er i samme størrelsesorden som den beregnede brinkerrosionsrate på 728 m³ for strækningen i Gelså i tabel 6 (Kronvang et al., 1994). Tilsvarende blev der ud fra opmålinger af tværprofiler beregnet en bruttoerosion af sediment i det første år efter genslyngningen af Gelså i størrelsesordenen 400-800 m³ sediment på den restaurerede strækning i Gelså (Kronvang et al., 1994), hvilket igen er i samme størrelsesorden som den beregnede brinkerrosion i tabel 6. Det skal dog anføres, at Gelså i de første år efter genslyngningen ikke var i en dynamisk ligevægt på grund af de store skift i sedimenttransporten mellem år et og år to efter restaureringens afslutning (Kronvang et al., 1994).

8.2 Brede Å ved Løgumkloster

Brede Å ved Løgumkloster er et Strahler orden 4 vandløb på hedeslette, som blev restaureret ved genslyngning i 1994 af Sønderjyllands Amt (Kronvang et al., 1998). Projektet blev fulgt før og efter genslyngningen igennem flere år for især at undersøge de opnåede økologiske effekter, men også restaureringens betydning for sediment- og næringstoftransport blev målt (Kronvang et al., 1998).

I beskrivelsen af restaureringen kan man se, at der ved genslyngningen skete en forlængelse af vandløbet fra 3600 m før i det lige løb til 4600 m i det nye slyngede løb. Vandløbsbunden blev i gennemsnit hævet med 0,5-1,0 m (fra en gennemsnitlig dybde på 2,5 m fra kronekant), og der blev etableret flade anlæg (1:4) i alle indersider af mæanderbuerne. Brinkernes anlæg var både før og efter restaureringen generelt på 1:2.

Effekterne af restaureringen fra før til efter for brinkerrosions omfang er blevet beregnet med de nyetablerede brinkerrosionsrater uden træer langs vandløbet (tabel 2). Alene det længere og slyngede forløb øger brinkerrosion i efter-situationen med 147 % (tabel 7). Med inddragelse af hævnningen af vandløbsbunden og nye brinkhældninger i svingene har der fortsat været en stigning i brinkerrosionen efter projektets afslutning på 67 % (tabel 7). Kun hvis der var blevet etableret træer langs vandløbet på begge sider, kunne brinkerrosionens omfang være blevet reduceret (tabel 7). Restaureringsprojektet har ud fra disse overslagsberegninger medført en øget tilførsel af sediment og derfor også øget tilførsel af fosfor til Brede Å.

I Brede Å blev der også målt på sedimenttransporten under og efter genslyngningen (Kronvang et al., 1998). Som i Gelså blev der målt en meget stor nettotransport af sediment i åen i de første måneder efter restaureringen, som må antages hovedsagelig at skyldes en justering af tværprofiler umiddelbart efter afslutningen af gravearbejdet af de nye slyngninger. Derfor anbefales det altid at sørge for at sikre brinkerne mod erosion efter gravearbejdet ved at udså en naturlig græsblanding.

Tabel 7: Oversigt over effekter på brinkerosion af den gennemførte genslyngning i 1994 samt yderligere effekter, hvis der var træer langs vandløbet – enten naturligt indvandret eller plantet. Brinkerosionens ændring er beregnet som: (Efter-situation minus før-situation)/før-situation).

*) Opvækst af træer vil tage flere år – fem til ti, afhængigt af naturlig tilvæksthastighed og træarter/tilplantning – alder).

Strahler orden 4 vandløb, hedeslette	Brinkerosion (før-situation – reguleret forløb) (m³)	Brinkerosion (efter-situation – genslynget forløb) (m³)	Brinkerosions- ændring (%)
Længden af vandløb før og efter restaureringen	3600 m	4500 m	
Brinkerosion (dybde af vandløb til terræn som i før-situationen)	1790	4415	147
Brinkerosion (dybde af vandløb til terræn som i efter-situationen)		3091	73
Introduktion af ny lav hældning i sving		2993	67
Simuleret effekt af etableringen af træer langs den ene side af vandløbet		2140*	20
Simuleret effekt af etableringen af træer på begge sider af vandløbet		1359*	-24

8.3 Odense Å ved Tørringe Bæk

Odense Å ved Tørringe Bæk er et Strahler orden 5 vandløb i det unge morænelandskab, som blev restaureret ved genslyngning i 2003 ved restaurering af et Vandmiljøplan 2 vådområde af Fyns Amt. Projektet blev fulgt før og efter genslyngningen igennem flere år for især at undersøge effekter af vådområdet i forhold til kvælstoffjernelse samt sediment- og fosfortilbageholdelse (Windolf et al., 2015; Kronvang et al., 2015).

I beskrivelsen af restaureringen kan man se, at der ved genslyngningen skete en forlængelse af vandløbet fra 3600 m før i det lige løb til 4800 m i det nye slyngede løb. Vandløbsbunden blev i gennemsnit hævet med 1,0 m (fra en gennemsnitlig dybde på 2,0 m fra kronekant), og der blev etableret flade anlæg (1:3) i alle indersider af mæanderbuerne. Brinkernes anlæg i før-situationen var generelt 1:1,25. Efter genslyngningen var brinkerne generelt etableret med et anlæg på 1:1.

Effekterne af restaureringen fra før til efter for brinkerosions omfang er blevet beregnet med de nyetablerede brinkerosionsrater uden træer langs vandløbet (tabel 2). Det længere og slyngede forløb reducerer brinkerosionen i efter-situationen med 25 % (tabel 8). Den mindre brinkerosion i eftersituationen i Odense Å, som er omvendt af det som blev konstateret i de to vandløb å hedeslette skyldes, at Odense å ligger i morænelandskabet og, at der her er mindre brinkerosion i slyngede vandløb end i udrettede vandløb (tabel 2). Med inddragelse af hævnings af vandløbsbund og nye brinkhældninger i svingene har der været en fortsat reduktion af brinkerosionen efter projektets afslutning på 64 % (tabel 8). Hvis der var blevet etableret træer langs vandløbet på begge sider, kunne brinkerosionens omfang være blevet reduceret endnu mere (tabel 8). Restaureringsprojektet har ud fra disse overslagsberegninger medført en relativ stor reduceret tilførsel af sediment og fosfor til Odense Å.

Tabel 8: Oversigt over effekter på brinkerosion af den gennemførte genslyngning i 2003 samt yderligere effekter, hvis der var træer langs vandløbet – enten naturligt indvandret eller plantet. Brinkerosionens ændring er beregnet som: (Efter-situation minus før-situation)/før-situation).

*) Opvækst af træer vil tage flere år – fem til ti, afhængigt af naturlig tilvækst hastighed og træarter/tilplantning – alder.

Strahler orden >4 vandløb moræne landskab	Brinkerosion (før-situation – reguleret forløb) (m³)	Brinkerosion (efter-situation – genslynget forløb) (m³)	Brinkerosions- ændring (%)
Længden af vandløb før og efter restaureringen	3600 m	4800 m	
Brinkerosion (dybde af vandløb til terræn som i før-situationen)	746	559	-25
Brinkerosion (dybde af vandløb til terræn som i efter-situationen)		280	-63
Introduktion af ny lav hældning i sving		271	-64
Simuleret effekt af etableringen af træer langs den ene side af vandløbet		211*	-71
Simuleret effekt af etableringen af træer på begge sider af vandløbet		114*	-85

9 Eksempler på effektberegninger af brinkerosion fra nyere vådområdeprojekter

9.1 Velds Møllebæk vådområdeprojektet i Viborg Kommune

Viborg Kommune gennemførte i 2020 restaureringen af Velds Møllebæk og et vådområde på ca. 78 ha i de ånære arealer omkring bækken (Viborg Kommune, 2020). I projektområdet blev der gennemført en genslyngning af den kanaliserede og udrettede Velds Møllebæk (fra 1200 m til en længde på 1340 m) samt genoprettet en rørlagt del af et vandløb fra Viskum med genslyngning af bækken (fra ca. 1000 m til 1500 m). Desuden blev der lukket et større antal grøfter (ca. 1000 m) og overrislet fra flere dræn, der løber til i området. Velds Møllebæk er et 2. ordens (Strahler) vandløb i det unge morænelandskab i georegion 4.

I grøfter er det anvendt et ekspertskøn for brinkerosionens omfang. Det antages at brinkerosionen er halvdelen af omfanget i 1-2. ordens vandløb i de to landskabstyper. Ved en sløjfning af grøfter i et vådområdeprojekt bliver brinkerosionen og det afledte fosfortab derfor sat til nul efter restaureringens afslutning (se tabel 9).

Til anvendelse i beregningen af effekter af vådområderestaureringen for brinkerosion og det medfølgende fosfortab med det nyudviklede virkemiddelværktøj i denne rapport, er der ekstraheret oplysninger om vandløbsforløb og brinkhøjde på baggrund af 200 m-stationeringer i tilgængelige længdeprofiler og indhold i projekteringsrapporten (EnviDan A/S, 2020a). Brinkhældninger er ikke angivet for den regulerede før-situation, men er i efter-situationen angivet som anlæg 1:3 eller 1:2.

Vådområdeprojektet har, ifølge beregningerne med brinkerosionsraterne i denne rapport, medført en reduktion af brinkerosionen i vandløb og grøfter i området med 20 % fra før- til efter-situationen (tabel 9). Dermed er der også sket en reduktion af tilførslen af fosfor til vandløb fra brinkerosion fra ca. 106 kg P i før-situationen til ca. 84 kg P i situationen efter vådområdets etablering ved beregninger med anvendelse af P-indhold i brinker i tabel 5.

I projekteringen arbejdes der ikke med plantning af træer langs de nye vandløb. Hvis dette var planlagt, ville reduktion af brinkerosion og fosfortab fra før- til efter-situationen blive større, som vist i tabel 9.

Tabel 9: Beregnet virkemiddeleffekt af restaurering af vådområde ved Velds Møllebæk i Viborg Kommune. Brinkerosionsændringen er beregnet som: (Efter-situation minus før-situation)/før-situation).

	Brinkerosion i før-situationen (m ³)	Fosfortab i før-situationen fra brinkerosion (kg)	Brinkerosion efter etablering af vådområdet (m ³)	Fosfortab i efter-situationen fra brinkerosion (kg)
Velds Mølleå	132	73,8	96	53,5
Vandløb fra Viskum	36	19,9	55	30,6
Sløjfning af grøfter	18	11,7	0	0
Totalt (ændring)	189	105,5	151 (-20 %)	84,1 (-20 %)

9.2 Brændstrup Bæk vådområdeprojektet i Vejen Kommune

Vejen Kommune har i 2021 gennemført restaureringen af Brændstrup Bæk og et vådområde på ca. 69 ha i de ånære arealer omkring bækken (Vejen Kommune, 2020). I projektområdet blev der gennemført en genslyngning af den kanaliserede og udrettede Brændstrup Bæk til et nyt slynget forløb på 1600 m. Brændstrup Bæk er et 2. ordens (Strahler) vandløb på hedeslette / bakkeø i georegion 3.

Desuden overrisledes vand fra et større antal grøfter og dræn i området. Til anvendelse i beregningen af effekter af vådområderestaureringen for brinkerosion og medfølgende fosfortab med det nye udviklede virkemiddelværktøj i denne rapport er der ekstraheret oplysninger om vandløbsforløb, brinkhøjde og brinkhældninger på baggrund af 100 m stationeringer i tilgængelige længdeprofiler og indhold i projekteringsrapporten (EnviDan A/S, 2020b).

Vådområdeprojektet har ifølge disse beregninger medført en stigning af brinkerosionen i vandløb og grøfter i området med ca. 34 % fra før- til efter-situationen (tabel 10). Dermed er der også sket en stigning af tilførslen af fosfor (P) til vandløb fra brinkerosion fra ca. 225 kg P i før-situationen til ca. 301 kg P i situationen efter vådområdets etablering.

I projekteringen arbejdes der ikke med plantning af træer langs de nye vandløb. Derfor indgår dette ikke i virkemiddelberegningen af brinkerosion for projektet (tabel 10).

Tabel 10: Beregnet virkemiddeleffekt af restaurering af vådområde ved Brændstrup Bæk i Vejen Kommune. Brinkerosionsændringen er beregnet som: (Efter-situation minus før-situation)/før-situation).

	Brinkerosion i før-situationen (m ³)	Fosfortab i før-situationen fra brinkerosion (kg)	Brinkerosion efter etablering af vådområdet (m ³)	Fosfortab i efter-situationen fra brinkerosion (kg)
Brændstrup Bæk	257	225	344 (34 %)	301 (34 %)

9.3 Rind Bæk vådområdeprojektet i Viborg Kommune

Viborg Kommune har i 2019 gennemført restaurering af Rind Bæk og enge, et vådområde på ca. 28 ha i de ånære arealer omkring bækken (Viborg Kommune, 2019). I projektområdet blev der gennemført en genslyngning af den kanaliserede og udrettede Rind Bæk til et nyt slynget forløb på ca. 2100 m fra det oprindelige lige forløb på ca. 900 m. Rind Bæk er et 1. ordens (Strahler) vandløb i det yngre morænelandskab i georegion 4. Bunden er i det nye forløb generelt hævet i forhold til det omgivende terræn for det gamle forløb.

Til anvendelse i beregningen af effekter af vådområderestaureringen for brinkerosion og det medfølgende fosfortab med det nye udviklede virkemiddelværktøj i denne rapport er der ekstraheret oplysninger om vandløbsforløb, brinkhøjde og brinkhældninger på baggrund af 100 m stationeringer i tilgængelige længdeprofiler og indhold i projekteringsrapporten (Atkins, 2017).

Vådområdeprojektet har ifølge disse beregninger medført en stigning af brinkerosionen i vandløb og grøfter i området med 81 % fra før- til efter-situationen (tabel 11). Stigningen skyldes hovedsageligt det meget lange nye slyngede forløb af bækken set i forhold til det gamle udrettede forløb. Dermed er der også sket en stigning i tilførslen af fosfor (P) til vandløb fra brinkerosion fra ca. 13 kg P i før-situationen til ca. 24 kg P i situationen efter vådområdets

etablering. Stigningen i brinkerosion og fosfortab skyldes forlængelsen af det nye løb, som en lavere brinkhøjde ikke kan kompensere for. Etablering af naturligt hjemmehørende træer langs vandløbet ville i projektet have kunnet modvirke stigningen i brinkerosion og fosfortab beregnet i tabel 11.

Tabel 11: Beregnet virkemiddeleffekt af restaurering af vådområde ved Rind Bæk i Viborg Kommune. Brinkerosionsændringen er beregnet som: (Efter-situation minus før-situation)/før-situation).

	Brinkerosion i før-situationen (m³)	Fosfortab i før-situationen fra brinkerosion (kg)	Brinkerosion efter etablering af vådområdet (m³)	Fosfortab i efter-situationen fra brinkerosion (kg)
Rind bæk	23,5	13,1	42,6 (81 %)	23,8 (81 %)

10 Virkemiddel beregnerens opbygning

Den nye virkemiddelberegner forventes at bestå af forskellige beregningsselementer, der kan anvendes ved forskellige restaureringstiltag i og omkring vandløb:

- Et til anvendelse ved genslyngning af vandløb i vådområde- og vandløbs-restaurerings projekter.
- Et til projekter, som kun hæver vandløbsbunden.
- Et til projekter hvor der alene plantes træer i bræmmen langs vandløbet.

De nødvendige oplysninger og data, der skal indhentes for at kunne gennemføre effektberegninger, er følgende:

1. I virkemiddelberegneren skal der angives, hvilken type vandløb projektet omfatter ud fra en beregning i GIS (Strahler orden).
2. I virkemiddelberegneren skal der angives, hvilken overordnet landskabstype vandløbet, der skal restaureres, ligger i (yngre moræne eller hedslette / bakkeø) – den dominerende landskabstype, hvis flere (GIS-hjælpeværktøj).
3. I virkemiddelberegneren angives, hvilken georegion (dominerende) vandløbet ligger i ud fra GIS-hjælpeværktøj – dominerende, hvis flere (GIS-hjælpeværktøj).
4. For den kanaliserede strækning (før-situationen) oprettes de nødvendige delstrækninger (stationeringer) med angivelse af deres længde (i meter for hver side af vandløbet).
5. Herefter beregnes den gennemsnitlige vertikale brinkhøjde for hver side af vandløbet ud fra opmålinger (bund til kronekant).
6. For hver delstrækning angives det dominerende brinkanlæg (hældning) for hver side af vandløbet på baggrund af opmålinger af tværprofiler (minimum én pr. delstrækning).
7. Der opmåles/beregnes et gennemsnit for brinklængden for hver delstrækning og for hver side af vandløbet i en situation uden træer langs vandløbet.
8. For den restaurerede strækning oprettes de nødvendige delstrækninger efter de regler, der er opstillet i den tekniske manual til virkemiddelberegneren. Længden (i meter) på hver side af vandløbet indberettes i virkemiddelberegneren.
9. For hver delstrækning angives det dominerende brinkanlæg (hældning) for begge sider af vandløbet ud fra projekteringen.
10. Der beregnes en gennemsnitlig brinklængde for hver side af vandløbet for hver delstrækning.

11. Der opgøres, hvor stor en del af hver delstrækning der skal tilplantes med træer.

På baggrund af de indhentede oplysninger ovenfor kan virkemidlet gennemføre en beregning af forventet effekt på brinkerosion og fosfortab i før-situationen og i situationen efter restaurering.

Ovenstående punkter med indhentning af data til virkemiddelberegneren vil blive mere detaljeret beskrevet i en manual for brinkerosions-virkemiddelberegneren. Ligeledes skal der udvikles et værktøj, hvor beregningerne kan gennemføres.

11 Konklusion og perspektiver

På baggrund af de eksisterende målinger af brinkerrosion i to større danske vandløbssystemer (Odense Å og Skjern Å) er der udviklet et metodegrundlag til en virkemiddel beregner af brinkerrosion i forbindelse med restaurering af vandløb og vådområder. I de større vandløb i hedeslette og bakkeø landskabet (Strahler orden > 2) mangler der dog *in situ* målinger af brinkerrosionens omfang i udrettede og slyngede vandløb. Her er der derfor kun anslået en størrelse af brinkerrosionen ud fra de mindre vandløb (Strahler orden 1 & 2). Det samme gør sig gældende i andre landskabstyper, som de hævdede havbundsarealer på Yoldia fladerne i Nordjylland og vandløb på Bornholm. Endelig mangler der helt målinger af brinkerrosion i afvandingsgrøfter, der kun fører vand en del af året. En mere præcis opgørelse af brinkerrosionens omfang i vandløb i disse landskabstyper vil derfor kræve nye målinger eller anvendelse af alternative metoder til at opnå viden om brinkerrosionens omfang.

Virkemiddelværktøjet kan anvendes til at beregne effekter af restaurering af vådområder og forskellige vandløbsrestaureringsprojekter for brinkerrosion. De beregnede brinkerrosionsrater forventes at kunne anvendes til effektberegninger i følgende typer af restaureringsprojekter:

- Restaurering af vådområder, som indebærer en ændring i vandløbets form og skikkelse med eller uden træer langs brinken.
- Restaureringer af vandløb, som indebærer en ændring i vandløbets form og skikkelse, f.eks. ved genslyngning af vandløb, hævnning af vandløbsbund, ændring af brinkhældning og plantning af træer langs vandløbet.

Effektberegningerne gennemføres i praksis ud fra en konkret indhentning af data om beliggenhed og størrelse af vandløb, oplysninger om vandløbets form og forløb i før-situationen samt i situationen efter restaurering. Desuden skal oplysninger om træer langs vandløb indgå, da det i analyserne er påvist at være et meget effektivt virkemiddel til at reducere brinkerrosionens omfang.

Effekter af restaureringsprojekter for fosfortab kan også beregnes, da der ud fra mere end 300 analyser af fosforindhold i brinkmateriale er beregnet en gennemsnitskoncentration af total fosfor i brinkmaterialet inden for ni georegioner af landet. Det skal i den forbindelse påpeges, at der er en stor variation i fosforindholdet i brinkmaterialet langs vandløb, som det også er vist i vores analyser af fosfor i brinkmateriale i de ni georegioner (se tabel 5). Derfor vil egentlige målinger af total fosforindholdet i brinkmateriale i de områder, der restaureres, alt andet lige være bedre, end at anvende gennemsnitsindholdet af total fosfor på georegions niveau.

Virkemiddelværktøjet er i sin første udgave blevet overordnet demonstreret anvendt på seks eksempler, hvoraf de tre er 'gamle' vandløbs- og vådområderrestaureringer, mens de tre andre er nyere gennemførte vådområderrestaureringsprojekter. De udførte effektberegninger af brinkerrosion og deraf følgende fosfortab er gennemført ud fra helt overordnet viden om de tre 'gamle' vandløbsrestaureringer, mens mere detaljerede inputdata har været tilgængelige for de tre nyere vådområderrestaureringsprojekter. Beregningerne udviser i to tilfælde en nettoreduktion i brinkerrosionen efter restaureringen med

deraf følgende reduktion i fosfortilførsel til vandløbet, mens fire restaureringsprojekter viser en øget brinkreduktion og fosfortilførsel efter restaureringens gennemførelse. Der er især stigninger i de beregnede restaureringsprojekter i vandløb på hedeslette og bakkeø, da der her er målt en stor stigning i brinkerosion mellem udrettede og slyngede mindre vandløb (se tabel 2). Ingen af de seks restaureringsprojekter har indeholdt plantning af træer langs vandløbene, som effektivt ville have reduceret brinkerosionen og det deraf følgende fosfortab til vandløbet efter restaurering.

Resultaterne af analyserne i rapporten viser med al tydelighed, at det er vigtigt at inddrage brinkerosion i virkemiddelberegninger, da det kan medvirke til at optimere projekterne, så brinkerosionens omfang minimeres efter den gennemførte restaurering, hvilket også vil minimere fosfortabet til vandløb.

Det anbefales, at der udarbejdes en manual for anvendelse af den udviklede metode, som virkemiddelværktøj til at beregne brinkerosion og det deraf følgende fosfortab til vandløb. Manualen skal give en uddybende beskrivelse af, hvilke oplysninger og data som skal indhentes i restaureringsprojekter for anvendelse af værktøjet. Desuden anbefales det at teste virkemiddelværktøjet og manualen i en række pilotprojekter, inden det endeligt tages i anvendelse.

12 Referencer

Andersen H & Heckrath G. 2020. Fosforkortlægning af dyrkningsjord og vandområder i Danmark. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 340 s. Videnskabelig rapport nr. 397.

Atkins. 2017. Detailrapport Rind enge vådområde. Udarbejdet for Viborg kommune. 40 s. + bilag.

Baatrup-Pedersen, A. 2021. Vandløb og vådområdeplaner. Vand og Jord 28(3): 129-132.

Casella F. 2008. Statistical design. Springer Texts in Statistics. Springer. ISBN 978-0-387-75965-4.

EnviDan A/S. 2020a. Vådområde projekt ved Velds Møllebæk. Detailprojektering. Udarbejdet til Viborg kommune. 45 s. + bilag.

EnviDan A/S. 2020b. Vådområde projekt ved Brændstrup bæk. Detailprojektering. Udarbejdet for Vejen kommune. 58 s. + bilag.

Ferguson, R.I. 1986. River loads underestimated by rating curves. Water Resources Research 22(1): 74-76. <https://doi.org/10.1029/WR022i001p00074>.

Friberg, N, Kronvang, B, Svendsen, LM, Hansen, HO & Nielsen, MB. 1994. Restoration of channellized reach of the River Gelså, Denmark: Effects on the macroinvertebrate community. Aquatic Conservation 4: 289-297.

Græsbøll, P., Aub-Robinson, A. og Kronvang, B. 1988 Etablering af gydeplander i vandløb. Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium, Teknisk rapport nr. 22, publ. Nr. 99: 75 s.

Kronvang, B, Græsbøll, P, Svendsen, LM, Friberg, N, Hald, AB, Kjellsson, G, Nielsen, MB, Petersen, BD & Ottosen, O. 1994. Restaurering af Gelså ved Bevtøft: Miljømæssig effekt i vandløb og de vandløbsnære arealer. Faglig rapport fra DMU, vol. 110, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet.

Kronvang B, Svendsen LM, Brookes A, Fisher K, Møller B, Ottosen O, Newson M & Sear D. 1998. Restoration of the rivers Brede, Cole and Skerne: A joint Danish and British EU-LIFE Demonstration project, III - Channel Morphology, Hydrodynamics and Transport of Sediment and Nutrients. Aquatic Conservation 8: 209-222.

Kronvang, B, Hoffmann, CC & Dröge, R 2009. Sediment deposition and net phosphorus retention in a hydraulically restored lowland river floodplain in Denmark: combining field and laboratory experiments. Marine and Freshwater Research 60: 638-646.

Kronvang, B, Andersen, HE, Larsen, SE & Audet, J 2013. Importance of bank erosion for sediment input, storages and export at the catchment scale. Journal of Soils and Sediments 13: 230-241.

Kronvang, B, Audet, J, Baattrup-Pedersen, A, Jensen, HS & Larsen, SE. 2012. Phosphorus load to surface water from bank rrosion in a Danish lowland river basin. *Journal of Environmental Quality* 41: 304-313.

Laubel A, Kronvang B, Hald AB & Jensen C. 2003. Hydromorphological and biological factors influencing sediment and phosphorus loss via bank erosion in small lowland rural streams in Denmark. *Hydrological Processes* 17: 3443-3463.

Laubel A, Kronvang B, Larsen SE, Pedersen ML, Svendsen LM & Stone M (ed.). 2000. Bank erosion as a source of sediment and phosphorus delivery to small Danish streams. *IAHS Publication* 263: 75-82.

UDVIKLING AF METODE TIL BEREKNING AF BRINKEROSION OG FOSFORTAB VED RESTAURERING AF VÅDOMRÅDER OG VANDLØB

I rapporten udvikles metodegrundlaget for beregning af brinkerosion og deraf følgende fosfortab ved brinkerosion før og efter restaurering af vådområder og vandløb.