

Effektstudier af Vandløbsrestaureringsprojekter



Afgangsprojekt 2010/2011
Udarbejdet af Anders Lund Jensen
K-Studienævnet

Forord

Dette afgangsprøjsjekt er udført i perioden fra september 2010 til juni 2011. Prøjsjektet er udført under K-studienævnet ved Aalborg Universitet. Vejledere på prøjsjektet er Morten Lauge Pedersen, Institut for Byggeri og Anlæg, og Jens-Ole Frier, Institut for Kemi, Miljøteknologi og Bioteknologi. Udover prøjsjektarbejdet har undertegnede assisteret Seniorforsker Stig Pedersen, DTU Aqua, med feltarbejdet i forbindelse med notatet vedrørende *Rør i udlagte gydebanks som metode til forhindring af sandindlejring*. Udvalgte resultater af prøjsjektet blev desuden fremlagt på poster (se bagerst) ved konferencen NORBS2011 i Aalborg i maj 2011. Der rettes tak til Videnskabelig Assistent Emil Fuglsang for hjælp ved feltarbejde.

Aalborg, juni 2011.

Summary

The effects of two river restorations in Denmark are investigated in order to assess, whether the restoration measures had the wanted effects. In the river Gudenå at Vilholt Mill, a weir was removed in order to ensure the free passage for fish and macroinvertebrates. The weir removal initiated erosion of sediment in the upstream reaches which led to deposition of sediment in the downstream reaches. Today, about two years later, the reaches upstream the former weir are still being eroded, but they are considered stable. The physical quality of spawning gravel in the riffles located downstream the former weir is difficult to assess due to lack of documentation of the quality before the weir removal. The deposition of sediment above the spawning gravel is negligible. In the stream Rakkeby Å in Vendsyssel spawning habitat rehabilitation has been performed by reintroducing spawning gravel and construction of a sediment trap. The physical quality of spawning gravel located upstream and downstream the sediment trap is investigated by measurements of the infiltration rates of fine sediment in a period in autumn/winter 2010/2011. The measurements show that the sediment trap generally sorts all sediment coarser than 0.5 mm from the sediment transport in the river. Consequently less sediment is infiltrating in the spawning gravel located downstream of the sediment trap. The effect of the sediment trap is negligible around 1500 meter downstream of the sediment trap. The sediment trap is only functioning during periods of high flow, where the bed load transport of sediment is high. Local hydraulic conditions and the morphology of the reaches have some effect on the infiltration rates. It is generally found that the total transport of sediment above the spawning gravel is controlling the infiltration rates of fine sediment. Although the sediment trap is reducing the total sediment transport, the physical quality of the spawning gravel downstream of the sediment trap is low due to a high amount of sediment finer than 0.5 mm. The supply of sediment to the stream has to be reduced in order to improve the physical quality of spawning gravel in the stream.

Resume

Effekterne af to vandløbsrestaureringer undersøges med henblik på at vurdere, hvorvidt de udførte tiltag har haft den ønskede virkning. I Gudenåen ved Vilholt Mølle blev et stemmeværk fjernet for at sikre den frie passage for fisk og makroinvertebrater. Fjernelsen igangsatte erosion af bunden på strækninger opstrøms det tidligere stemmeværk og deposition af sediment på nedstrøms beliggende strækninger. I dag omkring to år senere eroderes strækningen opstrøms det tidligere stemmeværk stadig, men strækningen vurderes dog at være stabil. Den fysiske tilstand af gydegrus i nedstrøms beliggende stryg er svær at vurdere på grund af manglende dokumentation af tilstanden før stemmeværket blev fjernet. Depositionen af sediment over gydegruset er dog ubetydelig. I Rakkeby Å i Vendsyssel er der udført et restaureringsprojekt med udlægning af gydegrus og etablering af et sandfang. Den fysiske tilstand af gydegrus opstrøms og nedstrøms sandfanget undersøges ved at måle infiltrationen og akkumuleringen af fint sediment over en periode i vinteren/foråret 2010/2011. Undersøgelsen viser, at sandfanget generelt sorterer kornstørrelser større end 0,5 mm fra sedimenttransporten i vandløbet. Dette medfører, at der infiltreres mindre sediment i det gydegrus, der er placeret nedstrøms sandfanget. Omkring 1500 meter nedstrøms sandfanget er effekten dog ubetydelig. Sandfanget fungerer kun under store afstrømningshændelser, hvor bundtransporten i vandløbet er stor. Det findes endvidere, at lokale hydrauliske forhold og lokale morfologiske forhold har en effekt på infiltrationen og akkumuleringen af fint sediment i gydegrus. Overordnet findes det, at det er den totale sedimenttransport over gydebanken, der har effekt på infiltrationen og akkumuleringen af fint sediment. Selvom sandfanget reducerer denne, vurderes den fysiske tilstand af gydegruset nedstrøms sandfanget at være dårlig på grund af højt indhold af sediment mindre end 0,5 mm. Tilførslen af fint sediment til vandløbet bør således reduceres for at forbedre den fysiske kvalitet af gydegruset i vandløbet.

Indhold

1. Introduktion	1
2. Ørredens gydebiologi og effekter af fint sediment	3
3. Infiltration og akkumulering af fint sediment i gydegrus	6
4. Metoder til vurdering af kvaliteten af gydegrus	9
5. Case 1: Gudenåen ved Vilholt Mølle	11
6. Case 2: Rakkeby Å	13
7. Materialer og metoder	15
7.1 Case 1: Gudenåen ved Vilholt Mølle	15
7.1.1 Strømhastigheder	15
7.1.2 Sedimenttransport	15
7.1.3 Makroinvertebrater	15
7.1.4 Infiltration og akkumulering af fint sediment	15
7.2 Case 2: Rakkeby Å	16
7.2.1 Infiltration og akkumulering af fint sediment	16
7.2.2 Vandstand og vandføring	17
7.2.3 Sedimenttransport	18
7.2.4 Hydraulisk model	19
7.3 Laboratorieforsøg	21
7.3.1 Erosion og deposition af fint sediment	21
7.3.2 Strømforhold over gydebanke	23
7.3.3 Hydraulisk model af gydebanke	26
8. Resultater	29
8.1 Case 1: Gudenåen ved Vilholt Mølle	29
8.1.1 Strømhastigheder og sedimenttransport	29
8.1.2 Makroinvertebrater	32
8.1.3 Infiltration og akkumulering af fint sediment	32
8.2 Case 1: Rakkeby Å	33
8.2.1 Infiltration og akkumulering af fint sediment	33
8.2.2 Sedimenttransport	36
8.2.3 Hydraulisk model	38
8.3 Laboratorieforsøg	42
8.3.1 Erosion og deposition af fint sediment	42
8.3.2 Strømforhold over gydebanke	43
8.3.3 Hydraulisk model af gydebanke	44
9. Diskussion	46

10. Konklusion	54
Referencer	56
Bilag 1	59
Bilag 2	62
Bilag 3	66

1. Introduktion

Vandkvaliteten i de danske vandløb er blevet forbedret efter indførelsen af vandmiljøplanerne, der har stillet krav til reduceret udledning af næringsstoffer fra landbruget samt forbedret rensning af spildevand fra by og industri [Wiberg-Larsen, 2010]. Selvom vandkvaliteten er blevet forbedret, er den generelle vandløbskvalitet i Danmark påvirket af dårlige fysiske forhold, der giver et reduceret udbud af egnede habitater for fisk, makroinvertebrater og makrofytter i vandløbene [Hansen, 1996]. Den primære årsag til de dårlige fysiske forhold i vandløbene er de kanaliseringer, der er blevet udført for at forbedre afledningen af vand fra landbrugsarealer og byer. Omkring 98 procent af de danske vandløb har været kanaliserede, mens omkring to procent har bibeholdt deres naturlige morfologi [Sear *et al.*, 1998]. De fysiske forhold i vandløbene forringes endvidere af brud i vandløbets kontinuitet i form af faunaspærringer som stemmeværker og lignende [Hansen, 1996].

Med Vandløbsloven af 1949 blev vandafledningsinteresser prioriteret i forhold til enhver anden benyttelse af de danske vandløb, men med Vandløbsloven af 1982 blev hensyn til miljøforhold i vandløbene opprioriteret og loven gav endvidere mulighed for gennemførelse af vandløbsrestaureringer [Iversen og Ovesen, 1997]. Siden 1982 er en række restaureringsprojekter blevet gennemført i de danske vandløb. Restaureringsprojekterne er generelt mindre projekter, der lokalt har forbedret habitater i vandløb og brinker, projekter, der har genoprettet vandløbets kontinuitet ved fjernelse af faunaspærringer og større projekter, der har genoprettet forbindelsen mellem vandløbet og de vandløbsnære arealer. Størstedelen af de gennemførte vandløbsrestaureringer i Danmark er mindre projekter under de to førstnævnte typer [Hansen og Baattrup-Pedersen, 2006].

I mange restaureringsprojekter indgår overvågning af effekterne ikke i planlægningen og budgetteringen. De mest omfattende effektstudier stammer fra større restaureringsprojekter [Hansen, 1996]. Eksempler på effektstudier er restaureringerne af Gelså ved Bevtøft [Kronvang *et al.*, 1994], Brede Å [Holmes *et al.*, 1998] og Skjern Å [Andersen, 2005]. De manglende effektstudier medfører, at der til fremtidige restaureringer ikke kan inddrages nyttige erfaringer fra tidligere projekter af samme slags. Således vil restaureringstiltag, der har lille eller ingen effekt, blive unødigt gentaget i flere vandløbsrestaureringsprojekter [Pasternack, 2008].

I dette projekt undersøges effekterne af to typer vandløbsrestaurering. I Gudenåen ved Vilholt Mølle blev der i efteråret 2008 udført et restaureringsprojekt ved fjernelse af et stemmeværk og udlægning af gydegrus. Effekterne i vandløbet på geomorfologi, vandkemi og dyreliv i månederne efter fjernelsen af stemmeværket er dokumenteret i Winther (2009). Det sediment, der i årene før fjernelsen sedimenteredes opstrøms stemmeværket, blev sat i bevægelse og transporteret nedstrøms mod vigtige gydebanks i Vilholt Stryget. Et midlertidigt sandfang blev etableret nedstrøms det tidligere stemmeværk og store mængder sediment blev gravet op. På trods af sandfanget blev der observeret et mindre antal yngel på Vilholt Stryget sommeren efter fjernelsen [Winther, 2009]. Formålet med effektstudiet i Gudenåen er at følge op på resultaterne i Winther (2009) og dermed vurdere strækningens stabilitet samt undersøge den fysiske tilstand af gydegruset i Vilholt Stryget. Derudover vurderes det, hvorvidt etablering af midlertidige sandfang i forbindelse med lignende projekter er nødvendigt.

I Rakkeby Å i Vendsyssel er der på en to kilometer lang strækning udført et restaureringsprojekt ved udlægning af gydegrus og etablering af et sandfang. Udlægning af gydegrus i vandløb, hvor naturligt gydegrus er blevet fjernet som følge af kanaliseringer eller tilsanding, udføres på baggrund af anvisninger i Lauge Madsen (1995) og har til formål at genskabe en selvproducerende bestand af ørred og laks, således at gentagen udsætning af dambrugsyngel kan undgås. I nogle tilfælde anlægges et sandfang opstrøms gydegrusudlægningen for at reducere sedimenttransporten over gydegruset. Sandfangene anlægges ikke ud fra dimensioneringsprincipper baseret på vandløbets og sedimenttransportens størrelse, men derimod ud fra nogle simple ideer om at uddy-

be og gøre vandløbet bredere end de øvrige strækninger, således at strømhastigheden nedsættes. Generelt er de anlagte sandfang 2-3 gange bredere end vandløbet, 2 gange dybere end vandløbet og med en længde på 10 gange vandløbets bredde [Lauge Madsen, 1995]. Sandfangene etableres ofte et lettilgængeligt sted. Formålet med effektstudiet i Rakkeby Å er at undersøge funktionen af sandfanget, den fysiske tilstand af gydegruset og vurdere, om der til fremtidige projekter er bedre løsninger med hensyn til placering af gydegrus og reduktion af sedimenttransport. Undersøgelserne vil kunne påvise, hvorvidt etableringen af et sandfang er en fornuftig løsning til at reducere sedimenttransporten på strækningen i Rakkeby Å. Der er udført få effektstudier af projekter vedrørende rehabilitering af gydehabitat [Pedersen *et al.*, 2009]. I tilknytning til effektstudiet i Rakkeby Å udføres en række forsøg i laboratorium for at undersøge sedimenttransport og strømninger over gydegrus under kontrollerede forhold.

I projektet undersøges således følgende punkter vedrørende effektstudierne af de to vandløbsrestaureringer:

1. De geomorfologiske ændringer på strækningerne opstrøms og nedstrøms det tidligere stemmeværk to år efter fjernelsen undersøges for at vurdere strækningernes stabilitet. Den fysiske tilstand af gydegrus i stryget på den nedstrøms beliggende strækning undersøges for at vurdere nødvendigheden af midlertidige sandfang i lignende restaureringsprojekter.
2. Funktionen og nyttigheden af sandfanget i Rakkeby Å undersøges ved at vurdere den fysiske tilstand af gydegrus opstrøms og nedstrøms sandfanget. Den fysiske tilstand af gydegruset vurderes som mængden af fint sediment, der akkumulerer i gydegruset over tid. Derudover undersøges hydrauliske og geomorfologiske parametres kontrol af akkumuleringen af fint sediment i gydegruset.

I begge restaureringsprojekter er effekten af fint sediment på gydehabitatet for ørred et væsentligt fokusområde. Projektet indledes derfor med en litteraturgennemgang af de dokumenterede effekter af fint sediment i gydegrus, hvilke parametre, der styrer akkumuleringen af fint sediment samt hvilke metoder, der er egnede til at vurdere den fysiske tilstand af gydegrus.

2. Ørredens gydebiologi og effekter af fint sediment

I Danmark findes ørreden i tre former, der alle tilhører arten *Salmo trutta* (Linnæus). Alle tre former gyder og lever de første år efter udklækning i vandløb, hvorefter en andel migrerer til søer og havområder for at søge føde. De migrerende ørreder kaldes henholdsvis søørreder og havørreder. De ørreder, der tilbringer hele livet i vandløb, kaldes bækørreder. Længden af den periode søørreden og havørreden tilbringer i vandløb efter udklækning afhænger af størrelsen på fiskene og vandløbet, idet store fisk i mindre vandløb migrerer tidligst. Inden gydning migrerer ørreden tilbage til det vandløb, hvor den blev udklækket. Alle tre former for ørred bruger den samme type gydeplads og kan gyde med hinanden. De normale måneder for ørredens gydning er november og december [Frost og Brown, 1967] og [Nielsen, 1995].

Hunørreden udvælger gydepladser med passende vanddybde, strømhastighed og kornstørrelser i gydegrus. Baseret på undersøgelser af gydepladser i store vandløb (vandføring over 10 m³/s) og små vandløb (vandføring under 10 m³/s) angiver Louhi *et al.* (2008), at typiske gydepladser for ørreder er karakteriseret ved vanddybder på mellem 15 cm og 45 cm, strømhastigheder på mellem 20 cm/s og 55 cm/s og kornstørrelser i gydegrus på mellem 16 mm og 64 mm. Undersøgelser af gydepladser i danske vandløb viser, at vanddybder mellem 10 cm og 80 cm er normale. Desuden er kornstørrelser mellem 16 mm og 64 mm ligeledes dominerende i anvendt gydegrus, se tabel 1 [Nielsen, 1995].

Tabel 1. Typisk kornstørrelsesfordeling i gydegrus i danske vandløb. D₅₀ 15 mm, D₁₅ < 4 mm og D₈₅ 38 mm Efter Nielsen [1995].

Kornstørrelser (mm)	Under 4	4 - 8	8 - 16	16 - 32	32 - 64
Andel (vægtprocent)	22	9	20	30	19

Hunørreden udgraver en rede i det udvalgte gydegrus, og æggene lægges i reden på samme tid som hanørreden fertiliserer dem. De fertiliserede æg, der er tungere end vand, falder ned i reden, der efterfølgende fyldes med grus [Frost og Brown, 1967]. Reden kan have en dybde på mellem 15 cm til 35 cm afhængig af ørredens størrelse [Barlaup *et al.*, 2008].

Ørredens foretrukne gydeplads i et naturligt og mæandrerende vandløb er placeret ved overgangen fra høl til stryg. Netop her skabes en forøget trykgradient og en acceleration af strømhastigheden på grund af forhøjningen i vandløbsbunden, således at vand fra vandløbet strømmer igennem gruset. I den modsatte ende af gydereden strømmer vandet op fra gruset [Greig *et al.*, 2007] og [Kondolf *et al.*, 2008]. Kunstige gydebanker i vandløb udlægges også som forhøjninger i vandløbsbunden, således at lignende trykgradienter opstår. Gennemstrømningen i gydegruset kan beskrives ved hjælp af Darcys Lov for strømninger igennem porøse medier (1):

$$V = K \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

V er Darcy-hastigheden igennem gruset (m/s), K er den hydrauliske konduktivitet af gydegruset (m/s) og dh/dx er trykgradienten over gydegruset (m/m). Trykgradienten kan også dannes over flad grusbund på grund af vandspejlets fald og som følge af selve udgravningen af reden [Alonso *et al.*, 1996]. Tilstrækkelig gennemstrømning af iltrigt overfladevand er nødvendigt for at tilføre æggene ilt samt for at fjerne forskellige affaldsstoffer, især ammoniak. Der skal generelt være en iltkoncentration på mellem 0,8 mg/L til 8 mg/L ved æggene. Æggenes iltforbrug stiger med stigende temperatur og udviklingsniveau, således at iltforbruget er størst umiddelbart før udklækning [Ferreira *et al.*, 2010] og [Louhi *et al.*, 2008].

Det gydegrus, som ørreden benytter naturligt, har ikke nødvendigvis kornstørrelser, der falder indenfor intervallet 16 mm til 64 mm angivet i Louhi *et al.* (2008), da kornstørrelserne i undersøgel-

serne stammer fra allerede anvendte gydepladser. Under udgravningen af reden er hunørreden i stand til at reducere andelen af fint sediment i gydegruset, da en del af sedimentet vil blive suspenderet i vandfasen på grund af turbulens og transporteret nedstrøms [Acornley og Sear, 1999]. Reduktionen af fint sediment i forhold til før gydningen er omkring 41 % for sediment under 2 mm og omkring 63 % for sediment under 1 mm [Kondolf *et al.*, 1993] og [Zimmermann og Lapointe, 2005b]. Desuden er nogle hunørreder ikke i stand til at flytte alle kornstørrelser. Generelt kan ørreder flytte kornstørrelser op til 10 % af deres kropslængde [Kondolf, 2000]. Pakningen af gydegruset har også betydning for flytbarheden og dermed gydningsegnetheden. Hård pakning af gydegrus kan ske nedstrøms søer og stemmeværker på grund af reduceret tilførsel af egnede mindre og mobile kornstørrelser og som følge af akkumulering af fint sediment i gydegrus [Sear *et al.*, 2003].

Inkubationsperioden, der er perioden mellem gydning og udklækning af æg, er afhængig af vandets temperatur, idet højere temperaturer giver kortere inkubationsperioder. Temperaturer mellem 5 °C og 13 °C svarende til inkubationsperioder på mellem fire måneder og en måned giver den største andel udklækkede æg [Frost og Brown, 1967]. I Danmark er længden af inkubationsperioden mellem tre og fire måneder [Nielsen, 1995]. Efter udklækning lever fiskelarverne mellem to og tre uger i gydegruset, hvorefter de som yngel søger mod vandløbsbunden [Frost og Brown, 1967] og [Nielsen, 1995].

Antallet af yngel, der kommer frem fra gydegruset, vil være mindre end antallet af æg, der oprindeligt blev lagt i gruset. Allen (1951) angiver ikke-fertiliserede æg og æg, der dør i gydegruset i inkubationsperioden, som de primære årsager herfor i naturlige gydebanker.

Akkumulering af fint sediment i gydegrus regnes for nuværende som den væsentligste årsag til forhøjet dødelighed af æg i gydegrus [Sear *et al.*, 2008]. Fint sediment defineres generelt som sediment mindre end 2 mm [Soulsby *et al.*, 2001], [Zimmermann og Lapointe, 2005b], [Lisle og Eads, 1991] og [Wood og Armitage, 1999]. Talrige undersøgelser har dokumenteret effekten af fint sediment på æggenes overlevelse i gydegrus. Generelt er fint sediment årsag til en reduktion i den hydrauliske konduktivitet i gydegruset og dermed strømhastigheden i gydegruset jævnt (1). Den lavere strømningshastighed øger vandets opholdstid i gydegruset, således at æggenes iltforbrug kan overstige tilførslen af ilt til æggene. Akkumulering af organisk stof i gydegrus i forbindelse med infiltration af fint sediment giver et yderligere forbrug af ilt. Udover at reducere den hydrauliske konduktivitet kan fint sediment, specielt silt og ler, dække æggenes overflade, således at diffusionen af ilt igennem membranen formindskes. Endvidere kan fint sediment blokere fremkomsten af ynglen fra gydegruset efter inkubationsperioden ved dannelse af et låg over gydebanken [Acornley og Sear, 1999], [Louhi *et al.*, 2008], [Kondolf *et al.*, 2008], [Soulsby *et al.*, 2001], [Julien og Bergeron, 2006], [Heywood og Walling, 2007], [Lisle, 1989], [Sear, 1993], [Greig *et al.*, 2005] og [Sear *et al.*, 2008].

Forskellige fraktioner af det fine sediment har indflydelse på henholdsvis tilførslen af ilt til æggene og fremkomsten af yngel fra gydegruset. Fint sand, silt og ler reducerer generelt den hydrauliske konduktivitet og dermed tilførslen af ilt til æggene, mens de grovere sandfraktioner danner et låg over gydebanken og kan blokere fremkomsten af yngel [Acornley og Sear, 1999], [Lisle, 1989], [Sear *et al.*, 2008] og [Julien og Bergeron, 2006]. Alonso *et al.* (1996) angiver, at sediment i størrelsen 9,50 mm til 0,85 mm blokerer fremkomsten af yngel, mens sediment mindre end 0,85 mm og typisk mindre end 0,063 mm reducerer den hydrauliske konduktivitet og dermed tilførslen af ilt.

Da andelen af fint sediment i gydegruset reduceres under gydning, afhænger effekten af fint sediment på æggenes overlevelse af sediment akkumuleret i tiden efter gydning og til ynglens fremkomst fra gydegruset [Acornley og Sear, 1999] og [Lisle, 1989]. I Danmark vil den kritiske periode for akkumulering af fint sediment i gydegrus således være mellem november og maj. Inkubationsperioden er sammenfaldende med store afstrømningshændelser og øget sedimenttransport i vandløb [Lisle, 1989].

Allen (1951) angiver yderligere en række årsager til, at antallet af yngel efter inkubationsperioden er mindre end antallet af æg, der blev lagt under gydningen. I vandløb, hvor antallet af egnede gydepladser er lille, kan æg mistes på grund af en ørreeds gydning i gydegrus, der allerede har været anvendt til gydning i samme sæson. Dette fænomen kaldes superimposition. Selv i vandløb, hvor antallet af egnede gydepladser er stort, vil gydeaktiviteten være forhøjet i nogle områder med mulighed for superimposition. Æg, der under gydning ikke falder ned i den udgravede rede, erosion af reder ved store afstrømninger i vandløbet, for lave temperaturer ($< 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) under inkubationsperioden og reder, der ødelægges af menneskelig aktivitet, kan yderligere give anledning til færre yngel.

3. Infiltration og akkumulering af fint sediment i gydegrus

En væsentlig kilde til sediment i vandløb er overfladeerosion af ubeskyttet overflade i oplandet til vandløbet og dræn fra marker. I ustabile vandløb kan brinkerosion ligeledes være en betydelig kilde [Ferreira *et al.*, 2010] og [Soulsby *et al.*, 2001].

Sedimenttransporten i vandløb foregår i suspenderet form i vandfasen og langs bunden som bundtransport [Sear *et al.*, 2003]. Den suspenderede sedimenttransport består primært af silt og ler (< 0,063 mm) og er begrænset af tilgængeligheden af sediment. Ved høj vandføring, hvor strømhastigheden når 1 m/s, kan fint sand (0,063 mm – 0,125 mm) og medium sand (0,125 mm og op til 0,4 mm) dog også transporteres i suspenderet form [Acornley og Sear, 1999] og [Allen, 1964]. Sedimentet bibeholdes i vandfasen på grund af turbulens og koncentrationen stiger med stigende vandføring indtil tilgængeligheden af sediment falder. Bundtransporten består primært af sand (> 0,063 mm). Ved typiske strømhastigheder i danske vandløb på mellem 0,2 m/s og 1 m/s transporteres kornstørrelser mellem 0,1 mm og 6 mm langs bunden [Allen, 1964]. Bundtransporten er ofte begrænset af tilgængeligheden af sediment og vandløbets transportevne, således at bundtransporten ikke nødvendigvis stiger med stigende vandføring [Sear *et al.*, 2003]. Erosion og transport af en given kornstørrelse langs bunden kan beskrives ved hjælp af Shields Parameter τ^* (2):

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_v)D_{50}} \quad (2)$$

τ_0 er bundforskydningsspændingen (N/m²), γ_s er den specifikke vægt af sedimentet (N/m³), γ_v er den specifikke vægt af vand (N/m³) og D_{50} er mediankornstørrelsen for sedimentet (m). Værdier i intervallet $0,00 < \tau^* < 0,01$ betyder, at ingen transport foregår, mens værdier for $\tau^* > 0,1$ betyder, at sediment i en dybde ned til $1 - 2D_{90}$ er fuldt mobilt [Brown og Pasternack, 2009]. Mellemliggende værdier er en overgangszone. Shields Parameter udtrykker, at et sedimentkorn eroderes og transporteres, når bundforskydningsspændingen og kornets opdrift overstiger den kraft, som tyngdekraften udøver på kornet. Det ses af ligning (2), at erosionen stiger med stigende bundforskydningsspænding.

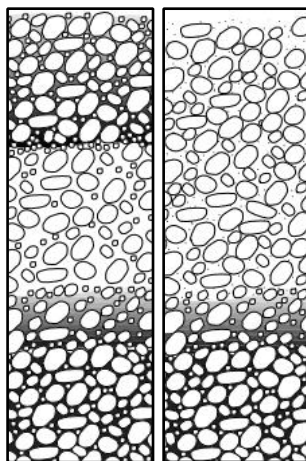
Den samlede sedimenttransport i et vandløb er således styret af tilførslen af sediment og dermed mængden af sediment, der er tilgængeligt til transport, vandløbets transportevne og dermed størrelsen af erosionen samt transportlængden af de enkelte partikler. Tilførslen af sediment afhænger primært af oplandet, mens vandløbets transportevne afhænger af de lokale hydrauliske forhold. Generelt udgør bundtransporten en mindre andel af den totale sedimenttransport. Acornley og Sear (1999) finder, at 2 % af den totale sedimenttransport udgøres af bundtransport i et engelsk vandløb. Det sediment, der akkumulerer i gydegrus, er både sediment transporteret langs bunden og suspenderet sediment. Variationerne i akkumuleret sediment afspejler ændringer i vandføring i den forudgående periode [Acornley og Sear, 1999]. Generelt infiltrerer finere sediment i perioder med lille vandføring, hvor sedimentationen er stor og resuspensionen er lille. I perioder med høj vandføring infiltrerer grovere sediment på grund af forøget bundtransport [Frostick *et al.*, 1984].

To begreber knytter sig til de processer, hvor fint sediment indlejres i gydegrus. Infiltration er den proces, hvor fint sediment bevæger sig ind i gydegruset, hvorimod akkumulering er resultatet af infiltration over tid. Infiltrationsraten er ikke nødvendigvis lig akkumuleringsraten af fint sediment i gydegrus, da akkumuleringsraten kan falde over tid som følge af tilstoppede porer i gydegruset. Infiltrationsraten og akkumuleringsraten af fint sediment angives normalt som masse sediment per kvadratmeter gydebanke per dag. Det infiltrerede sediment kan fastholdes og akkumuleres ved filtrering eller ved læeffekt fra gydegruset [Fries *et al.*, 2010]. Det er akkumuleringen af fint sediment i gydegrus, der har indflydelse på overlevelsen af æg i gydegrus [Sear *et al.*, 2008]. Infiltrationsprocessen og de parametre, der styrer infiltrationsraten af fint sediment i gydegrus, er blevet

undersøgt i en række forskningsprojekter i løbet af de seneste 50 år [Einstein, 1968], [Frostick *et al.*, 1984], [Carling, 1987], [Lisle, 1989], [Sear, 1993] og [Acornley og Sear, 1999].

Generelt er infiltrationsprocessen styret af tyngdekraften, turbulens, strømhastigheder, størrelsen af det fine sediment og gydegruset og gydegrusets stabilitet. Infiltrationsprocessen opdeles i de processer, der fører det fine sediment fra vandfasen og vandløbsbunden til den øverste del af gydegruset, og de processer, der fører til infiltration af sedimentet i de dybere lag af gydegruset. Den mest simple proces, hvorved fint sediment føres til den øverste del af gydegruset, er sedimentering af fint sediment fra vandfasen. En partikel vil dog kun sedimentere, hvis de nedadrettede kræfter (i form af tyngdekraften og turbulens), overstiger de opadrettede kræfter (i form af turbulens og opdrift). Turbulensen har mindre betydning for det tungere sediment, der transporteres langs bunden, således at tyngdekraften har størst indflydelse på tilførslen af sediment transporteret ved bunden til den øverste del af gydegruset [Sear *et al.*, 2008]. På grund af den tættere kontakt til gydegrusets overflade udgør bundtransporten generelt mest af det sediment, der akkumulerer i gydegruset [Lisle, 1989] og [Heywood og Walling, 2007].

I den øverste del af gydegruset medvirker tyngdekraften til, at især mindre fraktioner (< 1 mm) af det fine sediment infiltrerer længere ned i gydegruset. Udover tyngdekraften har størrelsen af porerne i gydegruset i forhold til det tilførte fine sediment, forstyrrelse af gydegrusets struktur og strømninger igennem gydegruset indflydelse på den videre infiltration og fordeling af fint sediment. Netop forholdet mellem gydegrusets porestørrelse og størrelsen af det tilførte fine sediment er blevet anført som den parameter, der kontrollerer infiltrationsraten mest [Frostick *et al.*, 1984] og [Greig *et al.*, 2005]. Porestørrelsen i gydegrus varierer med pakning, kornstørrelser og grusets form, men er tilnærmelsesvis 40 % af mediankornstørrelsen af gydegruset. Fint sediment mindre end denne porestørrelse vil kunne infiltrere gydegruset, mens større partikler vil forblive på overfladen og danne et låg, der potentielt forhindrer yderligere akkumulering af fint sediment [Sear *et al.*, 2008]. Andre undersøgelser tyder dog på, at låget forhindrer fremkomst af yngel fra gydegruset og udvekslingen af vand mellem grus og vandløb [Heywood og Walling, 2007]. Figur 1 illustrerer dannelsen af et låg på overfladen af gydegrus.



Figur 1. Dannelsen af et låg på overfladen af gydegrus. Fra Alonso *et al.* (1996).

Gydegrusets porer umiddelbart efter gydning er større på grund af det reducerede indhold af fint sediment. Således er infiltrationsraten også større umiddelbart efter gydning, hvorefter den oftest mindskes på grund af gradvis tilstopning af porerne [Heywood og Walling, 2007].

Generelt skelnes mellem vandløb, hvor gydegrus kan mobiliseres, og vandløb, hvor gydegruset er immobiliseret. Mobilisering af gydegrus kan være skadeligt under inkubationsperioden, eftersom det kan føre det fine sediment længere ned i gruset og erodere æg væk fra gruset [DeVries, 2008].

Brown og Pasternack (2009) fremhæver dog, at mobilisering af gydegrus uden for og under inkubationsperioden er gavnligt, da det reducerer indholdet af fint sediment i gydegruset ved at resuspendere sediment. Alonzo *et al.* (1996) fremhæver, at fint sediment kun kan fjernes fra overfladen af immobiliseret gydegrus, da det fine sediment, der infiltrerer, fastholdes og dermed oftest akkumuleres i gruset. Acornley og Sear (1999) angiver en dybde på D_{50} (partikeldiameter) for gydegruset, hvortil fint sediment kan fjernes som følge af vandstrømningerne i vandløbet. Diplas og Parker (1985) finder desuden, at kun suspenderet sediment kan fjernes fra immobiliseret gydegrus. Acornley og Sear (1999) angiver, at vandløb, hvor gydegrus mobiliseres, generelt har begrænset tilførsel af sediment, således at vandløbene eroderer mere sediment fra gydegruset under store afstrømningshændelser. Dette skyldes, at vandløbet transporterer mindre sediment og derfor kan erodere sediment fra gydegruset. Disse forhold gør samlet, at der generelt akkumuleres mere fint sediment i gydegrus, der ikke kan mobiliseres [Sear *et al.*, 2008].

Fint sediment kan også infiltrere gydegrus ved at vand fra vandløbet med indhold af suspenderet sediment strømmer igennem gydegruset og filtreres. Strømninger igennem gydegrus dannes som beskrevet i kapitel 2 på grund af en trykgradient over gydegruset på grund af den forhøjede topografi. Det fine sediment filtreres igennem gydebanken, således at forsiden af gydebanken, hvor vandløbsvandet presses ind i gydebanken, indeholder mindre fint sediment end bagsiden af gydebanken [Sear *et al.*, 2008].

Infiltrationsraten afhænger også af sedimenttransportens størrelse over gydebanken, der afhænger af afstrømningshistorien i vandløbet. Derudover afhænger infiltrationsraten af sedimenttilførsel, lokal hydraulik, strækningens morfologi, bundens geologi og den dominerende sedimenttransportmekanisme (suspenderet transport eller bundtransport) [Sear, 1993]. Ved lav vandføring, hvor bundtransporten er lille, er infiltrationsraten lille og infiltreret sediment består af suspenderet sediment fra vandfasen. Ved højt flow er det primært bundtransport, der infiltrerer gydegruset [Acornley og Sear, 1999]. Generelt findes det i flere undersøgelser, at høj vandføring og bundforskydningspænding i et vandløb giver forøget sedimenttransport og akkumulering af fint sediment i gydegrus [Acornley og Sear, 1999], [Sear *et al.*, 2008], [Heywood og Walling, 2007], [Zimmermann og Lapointe, 2005a], [Frostick *et al.*, 1984] og [Greig *et al.*, 2005]. Sear (1993) finder dog, at dette fænomen kun gælder for gydegrus, der ikke er mobilt. Undersøgelser finder generelt også, at infiltrationsraterne er højere i gydeområder med lav strømhastighed og lille bundforskydningspænding på grund af forøget sedimentering af fint sediment og større mulighed for mobilisering af gydegrus og resuspension af sediment i gydeområder med høj strømhastighed og stor bundforskydningspænding [Lisle, 1989] og [Sear, 1993]. Carling og McCahon (1987) og Sear (1993) finder dog, at gydeområder med høj strømhastighed kan have højere infiltrationsrater. Dette skyldes, at høj strømhastighed kan presse det fine sediment ned i gruset. Desuden stiger bundtransporten i områder med høj strømhastighed og bundforskydningspænding.

4. Metoder til vurdering af kvaliteten af gydegrus

Der eksisterer flere forskellige metoder til at vurdere den fysiske tilstand af gydegrus med hensyn til infiltration og akkumulering af fint sediment og den resulterende effekt på æggernes overlevelse i gruset. Generelt kan metoderne betegnes som biologiske og fysiske. De biologiske metoder dokumenterer effekten af fint sediment på baggrund af iltmålinger i gydegruset og andelen af overlevende æg efter inkubationsperioden. De er dog svære at udføre i praksis [Kondolf *et al.*, 2008]. I det følgende præsenteres fordele og ulemper ved de fysiske metoder, der kan anvendes til vurdering af den fysiske tilstand af gydegrus i form af indholdet af fint sediment.

Gentagen opmåling af gydebankens bundniveau i løbet af inkubationsperioden giver information omkring omfanget af erosion af gydegrus og sedimentering af sediment over gydegrus over tid. Metoden er ikke i stand til at dokumentere omfanget af infiltration og akkumulering af sediment i selve gydegruset [Lisle og Eads, 1991].

Indsamling af 100 tilfældige kornstørrelser over gydebanken giver information omkring substratet på overfladen, men ikke i selve gydegruset. Denne information kan opnås ved indsamling af en volumenprøve af gydegruset, hvorefter kornstørrelsesfordelingen bestemmes. Hvis gydegruset indeholder meget store kornstørrelser, skal den udtagne prøvemængde være stor. Kondolf *et al.* (2008) angiver, at en prøvemængde på mellem 200 kg – 2000 kg er nødvendig for at opnå en statistisk korrekt kornstørrelsesfordeling. Ved sådanne prøvemængder bliver mængden af gydegrus begrænsende. Derudover er ulempen, at tab af fint sediment fra gydegruset under prøveudtagelse er uundgåeligt. Desuden giver metoden ikke mulighed for at dokumentere ændringer i sedimentmængde og sedimenttype over tid [Kondolf *et al.*, 2008].

Udtagelse af frysekerner i gydegrus giver information om kornstørrelsesfordelingen i gydegruset og den vertikale fordeling af sediment. Metoden går ud på at nedstikke et metalrør i gydegruset, hvorefter flydende kvælstof eller kuldioxid hældes i røret. Blandingen af sediment og vand på ydersiden af røret fryser til og frysekernen kan tages op. Ulemper ved metoden er for lille prøvemængde til en statistisk korrekt kornstørrelsesfordeling på grund af ueffektiv frysning samt manglende mulighed for at dokumentere ændringer i kornstørrelsesfordeling og sedimentmængde over tid. Fordelen er, at tabet af fint sediment fra prøven under udtagelse er minimalt [Kondolf *et al.*, 2008] og [Lisle og Eads, 1991].

Nedgravning af infiltrationsbeholdere indeholdende gydegrus med en kendt kornstørrelse og renset for fint sediment giver mulighed for at dokumentere ændringer i infiltrationen og akkumuleringen af fint sediment over tid i gydebanker. Metoden går ud på at nedgrave en beholder i gydebanken, hvorefter fint sediment infiltrerer og akkumulerer i det anvendte grus. Efter en periode kan beholderen tømmes for fint sediment og udsættes samme sted i gydebanken. Indholdet af fint sediment kan sigtes til analyse af kornstørrelser og vejes for at bestemme infiltrationsraten. Eventuelt nedgraves en ydre ramme i gydebanken omkring beholderen, således at sammenfald af gydegruset ved optagelse undgås. Beholderens sider kan enten være impermeable, således at fint sediment kun infiltrerer fra toppen, eller bestå af net, således at sediment også kan infiltrere fra siderne. Anvendes net skal der monteres en membran, der kan trækkes op over nettet ved optagelse fra gydebanken for at undgå tab af fint sediment [Kondolf *et al.*, 2008] og [Lisle og Eads, 1991].

I modsætning til de andre metoder gør infiltrationsbeholdere det således muligt at undersøge variationen i mængden af infiltreret fint sediment over tid i det samme volumen grus. Metoden minimerer også tabet af fint sediment ved udtagelse. Sear *et al.* (2008) og Zimmermann og Lapointe (2005a) fremhæver dog en række problemer i forbindelse med anvendelse af infiltrationsbeholdere til bestemmelse af infiltrationsrater i gydegrus. Infiltrationsraterne bestemt med infiltrationsbeholdere kan ikke sammenlignes med rater i naturlige gydebanker. Dette skyldes den unaturlige kornstørrelsesfordeling uden fint sediment og den løse pakning af gydegruset i beholderne, der gør, at infiltrationsraten i beholderne overestimeres. Infiltrationsraten i naturlige gydebanker kan desuden

falde med tiden som følge af tilstopning af porer, men den initialt høje infiltrationsrate i rent grus genskabes i infiltrationsbeholdere for hver gang de tømmes og nedgraves på ny. Infiltrationsraterne bestemt med infiltrationsbeholdere kan derfor ikke anvendes til at forudsige, hvornår en gydebanke vil være fyldt med fint sediment.

Sear *et al.* (2008) og Zimmermann og Lapointe (2005a) konkluderer, at brug af infiltrationsbeholdere er en nyttig metode til at dokumentere forskelle i infiltrationsrater mellem forskellige strækninger indenfor et vandløb og mellem forskellige vandløb. Sammenligning kræver dog, at den samme metode er anvendt til bestemmelse af infiltrationsraten. Dette skyldes, at forskellige typer infiltrationsbeholdere giver forskellige infiltrationsrater. Yderligere ulemper ved sammenligning af forskellige undersøgelser er forskelle i afreporteret enhed for infiltrationsrate og forskellige perioder mellem optagelse af infiltrationsbeholdere fra gydebanken.

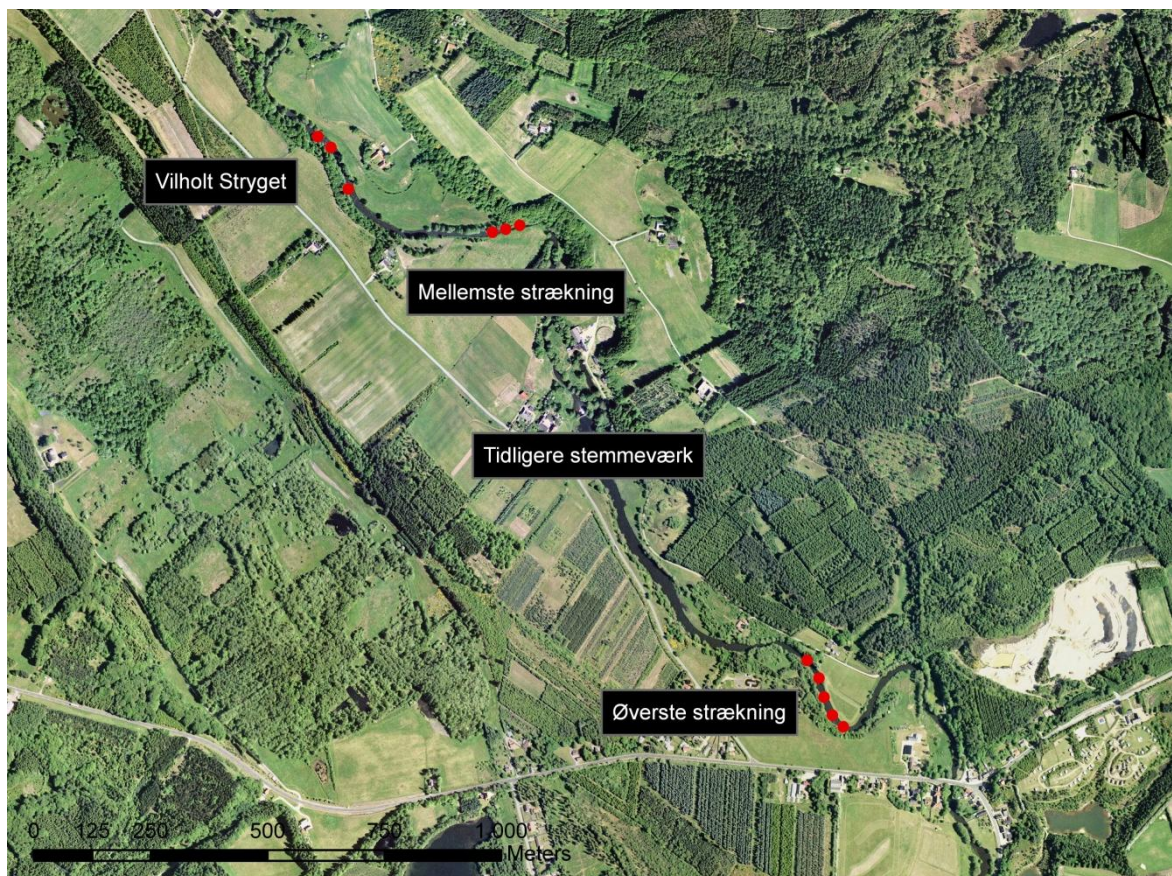
5. Case 1: Gudenåen ved Vilholt Mølle

I efteråret 2008 blev stemmeværket i Gudenåen ved Vilholt Mølle fjernet og det sidste brud i åens kontinuitet syd for Silkeborg forsvandt. Formålet med fjernelsen var at genskabe muligheden for vandring af fisk og makroinvertebrater under hensyntagen til nedstrøms beliggende gydebanks i Vilholt Stryget. Det var forventningen, at fjernelsen af stemmeværket ville forbedre gyde- og opvækstmuligheder for især laksefisk i Gudenåen [Skov- og Naturstyrelsen, udateret]. Strækningerne opstrøms og nedstrøms det tidligere stemmeværk er placeret mellem Vestbirk Søerne og Mossø i et område med relativt lidt intensivt dyrket landbrugsareal. Vandløbets form fremstår naturligt mæ-
anderende, se figur 2.

Opsætning af stemmeværker i vandløb har effekt på dyrelivet og geomorfologien. Stemmeværker forhindrer vandring af fisk og makroinvertebrater, således at de ikke kan benytte opstrøms beliggende vandløbsstrækninger [Hansen, 1996]. Geomorfologien ændres på grund af ændringer i sedimentdynamikken opstrøms og nedstrøms stemmeværket. Opstrøms stemmeværket vil vandstanden stige og strømhastigheden reduceres, hvilket medfører, at sediment transporteret til strækningen som især bundtransport aflejres. Vandspejlets og bundens hældning formindskes således på en længere strækning opstrøms stemmeværket. Nedstrøms stemmeværket vil tilførslen af sediment være reduceret og vandløbsbunden eroderes umiddelbart omkring stemmeværket. Vandspejlets og bundens hældning formindskes således også på strækningen nedstrøms stemmeværket. Ved fjernelse af stemmeværket vil det kraftige fald lokalt omkring placeringen af stemmeværket resultere i forøgede strømhastigheder og erosion af det sediment, der blev aflejret opstrøms stemmeværket. Endvidere vil fjernelsen lokalt medføre ustabile brinker [Simons og Sentürk, 1992]. Effekten på nedstrøms beliggende strækninger er øget sedimenttilførsel med mulighed for aflejringer. Varigheden af effekten afhænger af sedimenttransportens størrelse, herunder især transporthastigheden for de enkelte sedimenttyper. Data omkring transporthastigheden for sediment er usikker, da hastigheden varierer mellem hvert vandløb og indenfor hvert vandløb [Sear *et al.*, 2003]. Bunte og MacDonald (1995) estimerede i bjergvandløb transporthastighederne for suspenderet sediment, sand og grus til henholdsvis 10^4 , 10^3 og 10^2 m/år.

Strækningerne opstrøms og nedstrøms det tidligere stemmeværk ved Vilholt Mølle blev undersøgt før og efter fjernelsen i 2008 for at dokumentere effekterne i vandløbet på geomorfologi, vandkemi og dyreliv. Undersøgelserne viste, at strækningerne nedstrøms, herunder Vilholt Stryget, blev påvirket af aflejringer af sediment. Strækningerne opstrøms det tidligere stemmeværk blev derimod sedimentroderende og tidligere gydebanks blev genetablerede [Winther, 2009].

Opfølgningen af målingerne i Winther (2009) består af opmåling af bundniveauer og strømhastigheder i tværsnit opstrøms og nedstrøms det tidligere stemmeværk, der blev undersøgt før og efter fjernelsen af stemmeværket. Der foretages indsamling af makroinvertebrater på strækningerne opstrøms og nedstrøms det tidligere stemmeværk for at vurdere, om nye arter har indtaget strækningerne opstrøms det tidligere stemmeværk. Endvidere undersøges den fysiske tilstand af gydegruset i Vilholt Stryget ved en punktmåling af infiltrationsraten af fint sediment i en gydebanke. På figur 2 ses den undersøgte strækning og placering af undersøgte tværsnit.



Figur 2. Vilholt Stryget og placering af tværsnit.

6. Case 2: Rakkeby Å

Rakkeby Å er et mindre vandløb i Vendsyssel. Vandløbet er et typisk reguleret og sandbundet vandløb (bundsediment under 2 mm) uden naturlige mæandere og det er på de fleste steder nedgravet dybt i terræn. Oplandet er overvejende opdyrket landbrugsjord og eng. Flere steder er den lovmæssige 2-meter-bræmme eneste barriere mellem vandløbet og landbrugsjord, se figur 3. Rakkeby Å er, som de fleste regulerede vandløb, præget af en unaturligt høj tilførsel af sediment fra oplandet og dermed sedimenttransport i vandløbet samt en dimension, der er ustabil ved høje strømhastigheder og således giver anledning til brinkerosion.



Figur 3. Sandfang i Rakkeby Å og nedstrøms strækning.

I 2006 blev der udført et restaureringsprojekt i Rakkeby Å på foranledning af den lokale lystfiskerforening i Liver Å med udlægning af omkring 50 cm gydegrus på udvalgte steder. Gydegruset blev udlagt som tæpper i hele vandløbetets bredde. Et sandfang blev etableret i vandløbet et lettilgængeligt sted umiddelbart nedstrøms den øverste placering af gydegrus, se figur 3. Sandfanget er 20 meter langt, 4-6 meter bredt og med en estimeret magasineringsskapacitet på 100-200 ton sediment. Sandfanget tømmes efter behov af Hjørring Kommune.

Effekten af sandfanget og den fysiske tilstand af gydegruset dokumenteres ved en målekampagne i vinteren/foråret 2010/2011 sammenfaldende med inkubationsperioden for ørredæg. Infiltrationsraterne af fint sediment i gydegruset opstrøms og nedstrøms sandfanget undersøges ved hjælp af infiltrationsbeholderne beskrevet i afsnit 4. De hydrauliske og morfologiske forhold på strækningen i Rakkeby Å beskrives ved opsætning af en Q-h-relation og en endimensionel hydraulisk model (MIKE 11). Sedimenttransporten i perioden beskrives indirekte på baggrund af de registrerede vandføringsdata samt ved måling af bundtransporten og den suspenderede sedimenttransport under en større afstrømningshændelse i perioden. På figur 4 ses et kort over den undersøgte strækning samt placeringerne af de fem gydebanker, hvor infiltrationsraterne for fint sediment bestemmes. Gydebankerne V1, V2 og V3 ved Vråvej er placeret henholdsvis 100 meter opstrøms, 25 meter og 250 meter nedstrøms sandfanget. Gydebankerne B1 og B2 ved Bombækvej er placeret henholdsvis 1600 meter og 1500 meter nedstrøms sandfanget.

For at undersøge infiltrationsraten af fint sediment i gydegrus ved varierende sedimenttransport udføres forsøg i en cirkulær strømrende. Endvidere undersøges den opstuvende effekt af udlagt gydegrus i en aflang strømrende og ved opstilling af en tredimensionel hydraulisk model (MIKE 3).



Figur 4. Den undersøgte strækning i Rakkeby Å og placering af gydebanker. Sandfanget er placeret mellem gydebanke V1 og V2.

7. Materialer og metoder

7.1 Case 1: Gudenåen ved Vilholt Mølle

7.1.1 Strømhastigheder

Strømhastighederne blev bestemt i de 11 tværsnit, der er markeret på figur 2. For hver meter blev vanddybden registreret og strømhastigheden målt ved hjælp af propel (OTT Universalflügel) i dybderne svarende til 10 cm under vandspejlet, 40 procent af dybden fra bunden og 10 cm over bunden. 40 procent af dybden svarer til den teoretiske middelstrømhastighed [Hauer og Lamberti, 2006].

7.1.2 Sedimenttransport

Sedimenttransporten på strækningerne i Gudenåen vurderes på baggrund af gentagne opmålinger af bundniveauet i de 11 tværsnit, der er markeret på figur 2. Ved sammenligning med de bundniveauer, der blev opmålt for samme tværsnit i Winther (2009), er det muligt at visualisere og beregne resultatet af den foregående periodes erosion og deposition af sediment i tværsnittene. Tværsnittene blev opmålt med differential GPS (Leica 1200), der angiver koordinater i UTM (Zone 32N) samt højdekote i meter over DVR90. Præcisionen er en centimeter i højdemålingen. Tætheden af målepunkterne afgør hvor præcist sedimenttransporten kan vurderes og skal vælges på baggrund af den forventede størrelse af sedimenttransporten og dermed strækningens sedimentbudget. Forventes sedimenttransporten at være lille, skal tætheden af målepunkterne være høj for at opnå en acceptabel præcision. Afstanden mellem målepunkter var omkring 0,5 meter i tværsnittene i Gudenåen. De steder, hvor differential GPS'en ikke modtog tilstrækkeligt signal på grund af træer, blev bundniveauet forlænget ved opmåling af vanddybder, der senere kunne omregnes til højdekoter på baggrund af et opmålt fikspunkt ved hvert tværsnit.

Samtlige tværsnit på figur 2 blev opmålt i oktober/november 2010. Det blev herefter vurderet, at de største ændringer i bundniveau sker på strækningerne opstrøms stemmeværket. Her blev bundniveauerne i tværsnit 2, 4 og 5 i nedstrøms retning opmålt igen i marts 2011.

7.1.3 Makroinvertebrater

Der blev indsamlet makroinvertebrater på den øverste strækning, den mellemste strækning og Vilholt Stryget i efteråret 2010. Makroinvertebraterne blev indsamlet ved tilfældige sparkeprøver i bundsedimentet over en strækning på omkring 100 meter. Et standard sparkenet med en maskestørrelse på 0,5 mm blev placeret på bunden, og ved hjælp af bagudrettede spark blev sedimentet løsgjort og prøvematerialet opsamlet i sparkenettet. De indsamlede makroinvertebrater blev artsbestemt i henhold til Dall og Lindegaard (1995).

7.1.4 Infiltration og akkumulering af fint sediment

Infiltrationsraten i en gydebanke i Vilholt Stryget bestemmes over en periode i foråret 2011 for at vurdere den fysiske tilstand af gydebanken og for at dokumentere, hvilken type sediment der akkumuleres. Endvidere vil infiltrationsraten fungere som en naturlig reference til infiltrationsraterne i Rakkeby Å. Fremgangsmåden for målingen af infiltrationsraten i gydebanken er beskrevet i afsnit 7.2.1. To infiltrationsbeholdere anvendes i gydebanken i Vilholt Stryget. Metoden er mere præcis til vurdering af konsekvensen af sedimenttransport for gydebankerne i Vilholt Stryget i forhold til de gentagne opmålinger af bundniveauer beskrevet i afsnit 7.1.2.

7.2 Case 2: Rakkeby Å

7.2.1 Infiltration og akkumulering af fint sediment

Infiltrationsraterne for fint sediment i de fem gydebanks på figur 4 bestemmes ved hjælp af infiltrationsbeholdere baseret på samme princip som beholderne i Acornley og Sear (1999) og Heywood og Walling (2007). Beholderne består af rustfrit net med en maskestørrelse på 6 mm. Beholderne er 25 cm dybe med en diameter på 24 cm svarende til et overfladeareal på 0,045 m². Omkring beholderne er fastmonteret et stykke sammentrykkeligt ventilationsrør (Ø250), der kan trækkes op omkring nettet under optagelse fra gydebanken for at undgå tab af fint sediment.

Infiltrationsbeholderne blev fyldt med renskyllet gydegrus fra Rakkeby Å (kornstørrelser over 6 mm, D₅₀ 29 mm, D₁₅ 19 mm og D₈₅ 62 mm). Den mindste kornstørrelse i det renskyllede grus skal svare til infiltrationsbeholderens maskestørrelse. Kun kornstørrelser mindre end 6 mm regnes således som infiltreret sediment. Generelt vurderes indholdet af grus mellem 2 mm og 6 mm i det udlagte gydegrus og vandløbet dog at være lille. Infiltrationsbeholderne blev nedgravet i gydebankskerne, således at toppen flugtede med gydebankskerne overflade. Efter omkring en måned blev beholderne taget op fra gydebankskerne. Gydegruset blev skyllet fri for sediment ved at placere det på en sigte med en maskestørrelse på 6 mm, hvorefter gruset blev skyllet med vand fra vandløbet. Det skyllede gydegrus fyldtes igen i infiltrationsbeholderne, der blev nedgravet samme sted i gydebankskerne. For at undgå at forurene det rene grus med sediment under nedgravning, anvendtes rent grus til at påfylde omkring beholderen. På figur 5 ses en infiltrationsbeholder umiddelbart før skylning og med akkumuleret fint sediment samt en nedgravet infiltrationsbeholder.



Figur 5. Infiltrationsbeholder med indhold af fint sediment under tømning og infiltrationsbeholder nedgravet i gydebanke.

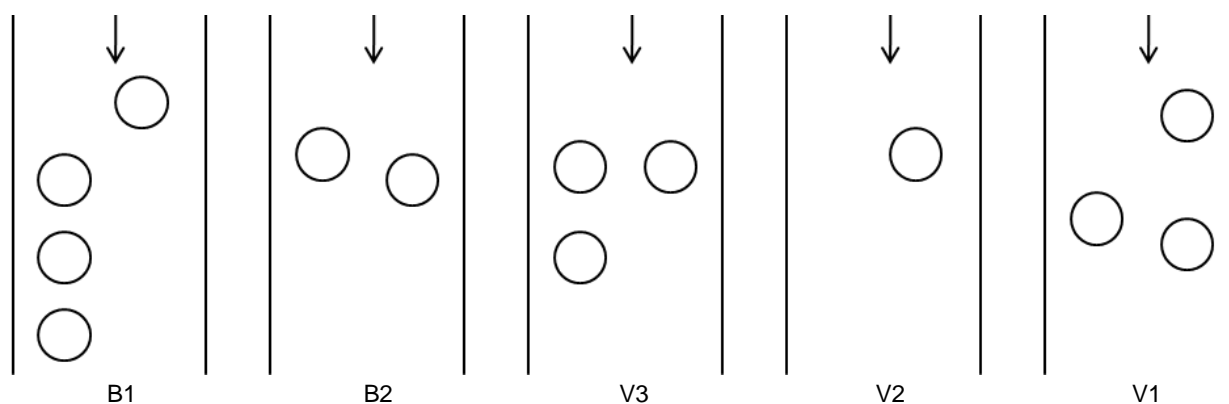
Blandingen af vand og sediment fra den enkelte beholder blev placeret i en separat beholder og bragt til laboratoriet. Efter omkring 24 timer dekanteredes vandfasen fra, således at størstedelen af det fine sediment blev tilbageholdt. Sedimentet ovntørredes ved 105 °C i omkring 48 timer, hvorefter det blev vejlet. Infiltrationsraten angives i enheden kg/m²/dag i henhold til Acornley og Sear (1999). Det tørrede sediment blev løsgjort og kornstørrelsesfordelingen for sedimentet fra den enkelte beholder blev bestemt ved en sigteanalyse. 100 g sediment blev sigtet gennem sigter med maskestørrelser på 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,425 mm, 0,250 mm, 0,125 mm og 0,075 mm. Sigterne blev placeret i et sigtetårn og anbragt på en rystemaskine (Endecotts) i omkring 10 minutter, hvorefter de enkelte sigterester blev vejlet og kornstørrelsesfordelingen beregnet. Ud fra kornstørrelsesfordelingen interpoleredes fraktilværdierne D₅₀, D₁₅ og D₈₅ for det akkumulerede sediment.

Infiltrationsraterne blev bestemt i fem gydebanker med et varierende antal infiltrationsbeholdere i løbet af målekampagnen. Endvidere blev infiltrationsbeholderne første gang i målekampagnen allerede optaget efter otte dage for at undersøge, hvor hurtigt akkumuleringen foregår. I tabel 2 ses en oversigt over antal anvendte infiltrationsbeholdere, placering i løbet af målekampagnen og antal dage i gydebankerne.

Tabel 2. Oversigt over placering og antal af infiltrationsbeholdere i perioden.

Periode	Gydebanker (antal beholdere)	Dage i gydebanke
17.11.2010 – 25.11.2010	V1(1), V3(1), B1(1), B2(1)	8
25.11.2010 – 16.12.2010	V1(1), V3(1), B1(1), B2(1)	21
17.11.2010 – 16.12.2010	V3(1), B1(1), B2(1)	29
16.12.2010 – 13.01.2011	V1(1), V3(2), B1(2), B2(2)	28
13.01.2011 – 14.02.2011	V1(3), V3(3), B1(4), B2(2)	32
14.02.2011 – 28.02.2011	V1(3)	14
28.02.2011 – 17.03.2011	V2(1)	17
14.02.2011 – 17.03.2011	V3(3), B1(4), B2(2)	31
17.03.2011 – 14.04.2011	V2(1), V3(3), B1(4), B(2)	28

På figur 6 ses den relative placering af infiltrationsbeholderne i gydebankerne. Placeringerne af infiltrationsbeholderne blev udvalgt primært på baggrund af tilgængeligheden af gydegrus i den udvalgte gydebanke. Derudover blev placering af infiltrationsbeholdere forskellige steder i bredden og under forskellige hydrauliske forhold tilstræbt. Dette skyldes, at varierende sedimenttransport i bredden af vandløbet og højere strømhastighed samt bundforskydningsspænding kan have betydning for infiltrationsraten af fint sediment.



Figur 6. Relativ placering af infiltrationsbeholdere i fem gydebanker i Rakkeby Å.

7.2.2 Vandstand og vandføring

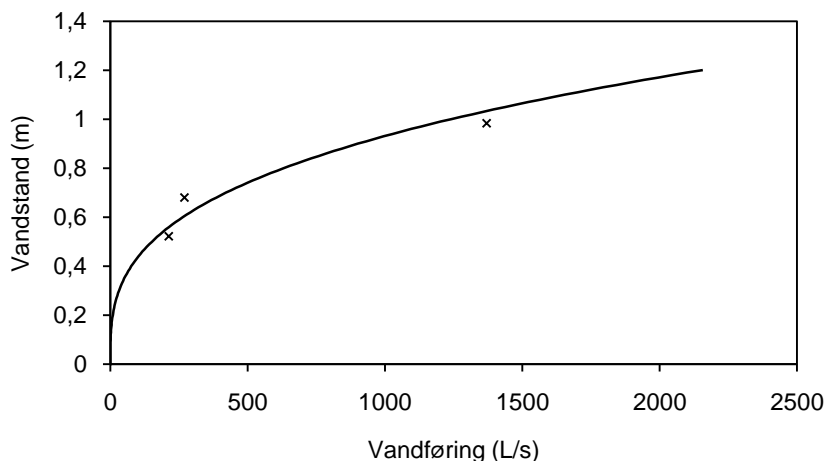
En vandstandslogger (ONSET) blev udsat i starten af målekampagnen ved gydebanken V1. Loggeren registrerede totaltrykket hvert 30. minut. Totaltrykket korrigeres for lufttryk og omregnes til meter vandsøjle. Meteorologiske data over dagsmiddel for landsdelen anvendes for lufttrykket, da registreringen af lufttryk på stedet var ustabil. En Q-h-relation opsættes for strækningen efter anvisninger i Hauer og Lamberti (2006). Vandstanden relateres til vandføringen ved hjælp af en potensfunktion (3):

$$Q = a(h - z)^b \quad (3)$$

Q er vandføring (m^3/s), h er vandstand (m), z er vandstand ved nul flow og a og b er regressionskoefficienter. Vandføring og vandstand blev bestemt tre gange i løbet af målekampagnen inklusiv en måling ved højt flow. Koefficienterne z, a og b bestemmes ved lineær regression. Ligning (3) omskrives til (4):

$$\log(Q) = b \log(h - z) + \log(a) \quad (4)$$

Koefficienten z varieres indtil den bedste korrelation opnås. Koefficienterne a og b kan herefter bestemmes ud fra skæring og hældning. Q-h-relasjonen for strækningen ses på figur 7.



Figur 7. Q-h-relasjon for strækningen. Kryds er angiver målte vandstande og vandføringer.

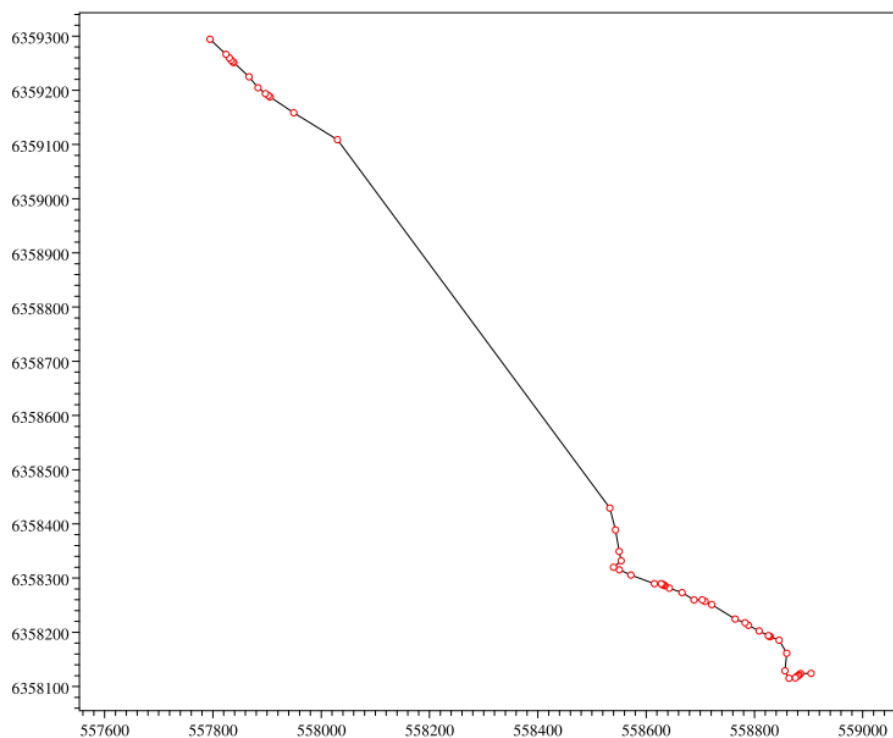
Hauer og Lamberti (2006) angiver, at der minimum kræves tre vandføringsmålinger til opstilling af en Q-h-relasjon, hvoraf mindst en skal være ved høj vandføring. De sikreste vandføringsbestemmelser ved hjælp af en Q-h-relasjon fås ved interpolation af vandføringer inden for det interval, hvor vandføringen er målt. Vandføringsbestemmelsen er mere usikker ved ekstrapolation af vandføringer uden for intervallet.

7.2.3 Sedimenttransport

Under en større afstrømningshændelse i marts 2011 i tidsrummet omkring den største vandføring, blev bundtransporten og den suspendede sedimenttransport bestemt over hver gydebanke. Bundtransporten og den suspendede sedimenttransport umiddelbart nær bunden blev bestemt ved hjælp af en Helley-Smith-fælde. Fælden består af et stativ med en finmasket nethale påmonteret. Nethalen kan justeres i højden, således at den kan placeres lige over bunden. Nethalen har et kvadratisk indløb med en sidelængde på 8 cm. Bundtransporten måles over hver gydebanke over en periode på 20 minutter. Nethalen tømmes for det indfangede sediment, der ovntørres ved 105 °C og derefter brændes ved 600 °C for at fjerne organisk stof. Bundtransporten angives i enheden g/m/s. Da fældens evne til at indsamle materiale forventes at falde med tid på grund af tilstopning af nettet, angives bundtransporten i et interval svarende til, at sedimentet i fælden er opsamlet i mellem 5 minutter og 20 minutter. Generelt vurderes det, at Helley-Smith-fælden kun kan bruges til at indikere forskelle i bundtransport mellem strækninger og ikke den faktiske bundtransport. Kornstørrelsesfordelingen for en samlet prøve af bundsedimentet bestemmes, da den enkelte prøve indeholdt for lidt sediment til analyse. Den suspendede sedimentkoncentration i vandfasen bestemmes ved udtagelse af en vandprøve. 150 mL af vandprøven filtreres gennem et 1,6 µm filter (GF/A), der ovntørres ved 105 °C og derefter brændes ved 600 °C for at fjerne organisk stof. Vandføringen i måleperioden måles. Den suspendede sedimenttransport angives i enheden g/s.

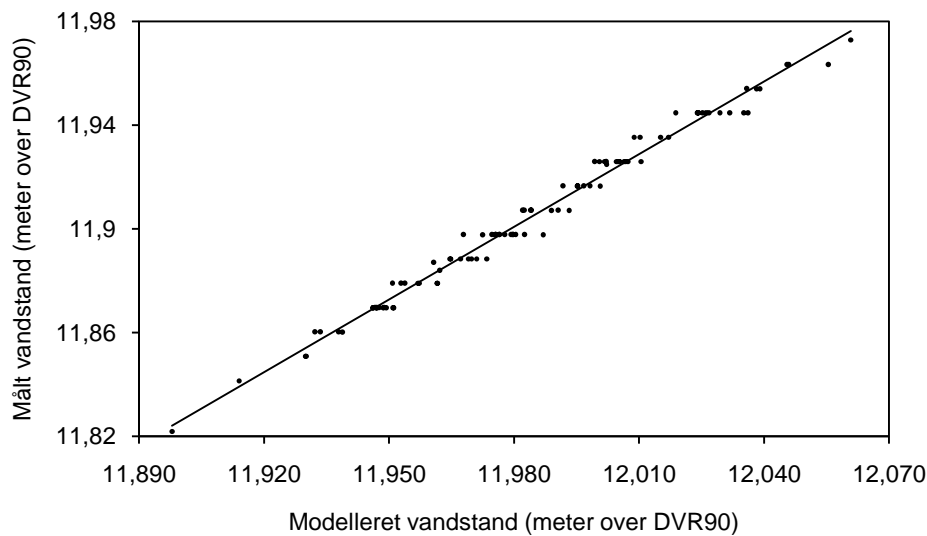
7.2.4 Hydraulisk model

For at undersøge den tidlige variation af bundforskydningsspændingen og middelstrømhastigheden over hver gydebanke i inkubationsperioden opsættes en ikke-stationær endimensionel hydraulisk model i MIKE 11 for strækningen på figur 4. Det hydrodynamiske modul i MIKE 11 løser de styrende ligninger for væskestrømninger. De styrende ligninger er kontinuitetsligningen og Newtons 2. lov, der i en dimension i kombination giver Saint-Vernant-Ligningerne. Strækningens morfologi defineres i modellen ved beskrivelse af tværsnit. Tværnittene blev opmålt med differential GPS (Leica 1200). I alt 49 tværsnit blev opmålt på den to kilometer lange strækning i Rakkeby Å. Der blev opmålt flest tværsnit omkring de fem gydebanker for at opnå den bedste beskrivelse af morfologien her. På de mellemliggende strækninger, hvor der ikke blev opmålt tværsnit, blev der i MIKE 11 interpoleret tværsnit. På figur 8 ses den modellerede strækning samt placering af opmålte tværsnit.



Figur 8. Den modellerede strækning i MIKE 11 samt placering af opmålte tværsnit (røde cirkler). Koordinater er i UTM zone 32N.

Randbetingelsen på den øvre rand sættes til de vandstande (i meter over DVR90), der blev registreret i perioden. På den nedre rand anvendes de tilhørende vandføringer. Modellen kalibreres ved hjælp af vandstande registreret ved gydebanken V3 på figur 4 i en periode under målekampagnen. Fejlen mellem modellerede vandstande og målte vandstande minimeres ved at regulere ruheden i modellen (angivet som Manningtallet). På figur 9 ses modellerede vandstande plottet mod målte vandstande ved anvendelse af et Manningtal på $12 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, der giver den bedste overensstemmelse.



Figur 9. Modellerede vandstande plottet mod målte vandstande for kalibreringsperioden. Tendenslinjens forskrift er $y = 0,93 \cdot x + 0,71$ med en korrelationskoefficient R^2 på 0,99.

Middelværdien og standardafvigelsen for de modellerede vandstande i kalibreringsperioden er henholdsvis 11,92 m over DVR90 og 0,040 m over DVR90, mens tilsvarende værdier for de målte vandstande er 12,00 m over DVR90 og 0,042 m over DVR90. Der er ikke kontrolleret for normalfordelte data. Afvigelsen mellem målte og modellerede vandstande og det for perioden lave Manningtal tillægges anvendelsen af dagsværdier for lufttrykket registreret for landsdelen. Den tidlige variation i vandstand er dog modelleret korrekt i henhold til standardafvigelserne. Manningtallet forventes dog at ændre sig på strækningen, over tid og med vandstand, da højere vandstand nedsætter strømodstanden. Anvendelse af en enkelt værdi for Manningtallet på hele strækningen og i hele perioden er derfor usikker. Den bedste kalibrering af modellen opnås ved at bestemme Manningtallet for hver enkelt delstrækning og den tidlige variation. Dette ville kræve måling af vandstanden på hver delstrækning i hele perioden. Modellen er ikke valideret.

Modellen anvendes til at beskrive middelstrømhastighed og bundforskydningsspænding over hver gydebanke for perioden samt trykgradienten over hver gydebanke ved medianvandføringen og maksimalvandføringen for perioden. I MIKE 11 beregnes middelstrømhastighed og bundforskydningsspænding for hvert tværsnit og for hvert tidsskridt. Bundforskydningsspændingen beregnes som (5):

$$\tau_0 = \rho g R \frac{V^2}{M^2 R^{4/3}} \quad (5)$$

ρ er vands densitet (kg/m^3), g er tyngdeaccelerationen (m/s^2), R er hydraulisk radius (m), V er middelstrømhastigheden (m/s) og M er Manningtallet ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$) [DHI, 2009]. Sidste led i (5) er udtrykket for vandspejlsældning i Manning-formlen. Trykgradienten over hver gydebanke bestemmes ud fra modellerede vandstande ved medianvandføringen og maksimalvandføringen for perioden. Gydegruset virker som et overløb med lavere vandstand opstrøms i forhold til nedstrøms. Vandspejlsforskellen over den enkelte gydebanke bestemmes fra det punkt opstrøms gydebanken, hvor vandstanden begynder at falde og til det punkt, hvor den stabiliseres nedstrøms gydebanken. Ved høj vandstand bliver trykgradienten mindre, da gydegrusets højde bliver lille i forhold til vandstanden.

7.3 Laboratorieforsøg

7.3.1 Erosion og deposition af fint sediment

For at belyse sammenhængen mellem erosion af sediment fra Rakkeby Å og den efterfølgende akkumulering i en gydebanke, blev der lavet en række laboratorieforsøg i en cirkulær strømrønde. Forsøgene skulle give viden om, hvilke hydrauliske forhold der giver den mindste infiltration og akkumulering af fint sediment i en gydebanke under kontrollerede forhold.

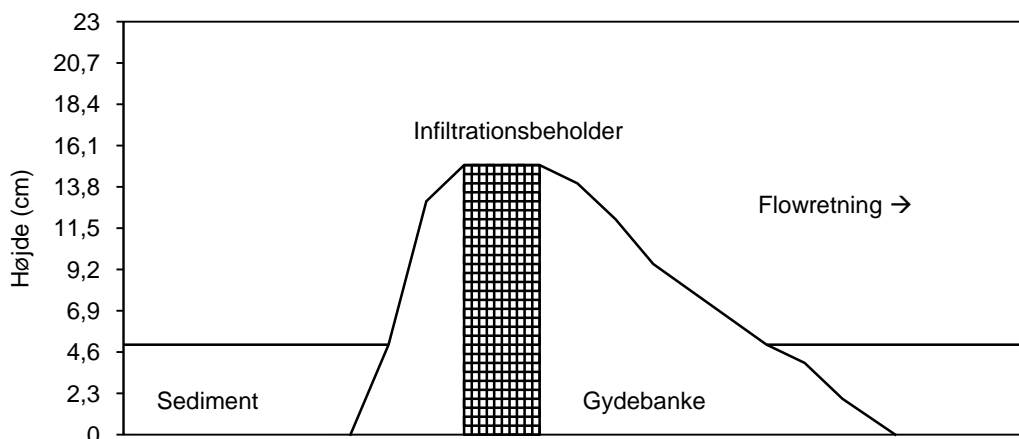
Den cirkulære strømrønde er 1,9 m i ydre diameter, 20 cm bred og 26 cm dyb. Strømningerne induceres af et roterende låg, der er placeret på vandoverfladen. Låget kan rotere med hastigheder på mellem 0 og 0,5 omdrejninger per sekund i begge retninger. Fordelen ved den cirkulære strømrønde er at den fungerer som en uendelig kanal, mens ulemperne er de forskellige strømhastigheder ved strømrøndens indre og ydre væg, der skyldes lågets højere hastighed ved den ydre væg i forhold til den indre [Johansen, 1998].

Den gennemsnitlige bundforskydningsspænding i strømrønden ved en vanddybde på 23 cm kan relateres til hastigheden af strømrøndens låg gennem den empirisk bestemte ligning (6):

$$\bar{\tau}_0 = 0,28U_{\text{låg}}^2 \quad (6)$$

$\bar{\tau}_0$ er den gennemsnitlige bundforskydningsspænding på tværs af strømrønden (N/m^2) og $U_{\text{låg}}$ er strømrøndens låghastighed (m/s). Sammenhængen mellem bundforskydningsspænding og hastigheden af låget er beregnet på baggrund af målinger af det vertikale hastighedsprofil i strømrønden. Middelstrømhastigheden i strømrønden er omkring en tredjedel af låghastigheden [Johansen, 1998].

En gydebanke bestående af vasket gydegrus fra Rakkeby Å blev opsat i 70 cm af strømrønden. Gydebanken blev opsat efter illustrationer i Frost og Brown (1967) og havde en højde på maksimum 15 cm. I den resterende del af strømrønden blev 5 cm sediment fra Rakkeby Å placeret. Det anvendte sediment bestod af kornstørrelser under 2 mm med en mediankornstørrelse D_{50} på 0,2 mm (tjek). I gydebankens bredde blev to infiltrationsbeholdere med vasket gydegrus placeret ved siden af hinanden. Beholderne er 15 cm høje og 10 cm i diameter og består af 6 mm net uden en ydre oprækkelig membran, da tab af sediment fra beholderne blev undgået ved at tømme strømrønden for vand. Se figur 10 for forsøgsopstilling.



Figur 10. Placering af gydebanke, sediment og infiltrationsbeholder i cirkulær strømrønde.

Strømrøndens låg var under forsøget placeret 23 cm over røndens bund svarende til, at vanddybden ved start var 18 cm over sedimentet og minimum 8 cm over gydebanken. Da ligning (6) gæl-

der for en vanddybde på 23 cm, kan bundforskydningsspændingen over sedimentet kun estimeres. Da vanddybden og friktionen ændres over gydebanken, ændres bundforskydningsspændingen og strømhastigheden ligeledes. Dette belyses i afsnit 7.3.2. Forholdene i strømrønden er forsøgt opstillet således, at de efterligner en gydebanke placeret opstrøms løst og fint sediment i et reguleret vandløb som Rakkeby Å.

Strømrøndens låg blev sat i gang og kørte i en periode på omkring 24 timer. Herefter blev vandet i strømrønden pumpet væk og beholderne blev tømt for sediment. Sedimentet blev tørret ved 105 °C og vejret. Infiltrationsraten angives i enheden kg/m²/dag. En middelværdi for de to infiltrationsbeholdere anvendes. Forsøget blev udført ved middellåghastigheder på 1,4 m/s, 1,6 m/s, 1,9 m/s, 2,5 m/s og 2,8 m/s. Mellem hvert forsøg blev gydebanken rensat for sediment og genopbygget.

7.3.2 Strømforhold over gydebanke

En aflang strømrende, 14 m lang, 30 cm bred og 30 cm dyb, blev anvendt til at undersøge fordelingen af strømhastigheder og bundforskydningsspændinger over en gydebanke ved forskellige vandføringer. Undersøgelsen vil give viden om den opstuvende effekt udlagt gydegrus har i et reguleret vandløb. Strømningerne induceres af hældningen på strømrenden, der kan reguleres, vanddybden og forskellen i vandspejl mellem indløb og udløb. Vandspejlet i indløbet løftes af en pumpe og kan reguleres ved hjælp af en ventil.

En gydebanke bestående af vasket gydegrus fra Rakkeby Å blev opsat i strømrenden. Gydebanken blev opsat efter illustrationer i Frost og Brown (1967). Et skarpkantet overløb blev placeret 2 m nedstrøms gydebanken for at hæve vandstanden og estimere vandføringen. Vandføringen Q (m^3/s) estimeres ved hjælp af overløbsformlen (7):

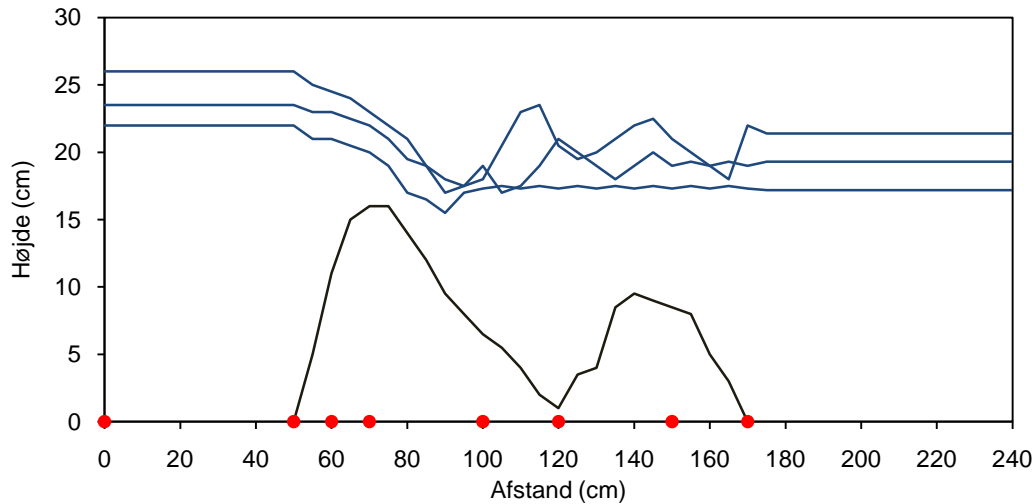
$$Q = CBh\sqrt{2gh} \quad (7)$$

$$C = 0,40 + 0,053 \frac{h}{d} \quad (8)$$

B er bredden af overløbet (m), h er overløbshøjden (m), d er højden af det skarpkantede overløb og den empirisk bestemte korrelationskoefficient C bestemmes af (8) [Brorson og Larsen, 2007].

Vertikale hastighedsprofiler før gydebanken og over gydebanken blev bestemt ved hjælp af en ADV-probe (NORTEK Acoustic Doppler Velocimeter Probe). ADV-proben udsender en lydimpuls mod et målevolumen placeret 5 cm under senderen for at opnå en uforstyrret hastighedsmåling. Lydimpulsens ekko sendes tilbage mod ADV-probens tre mikrofoner, der på baggrund af Dopplereffekten beregner hastigheden af partiklerne i målevolumenet [Nortek, 2011]. ADV-proben måler de øjeblikkelige værdier af de tre hastighedskomponenter u , v og w med en foruddefineret frekvens og over en foruddefineret tidsperiode. Den tilhørende software beregner herefter de tidslige gennemsnit af hastighedskomponenterne og variansen.

Profilerne blev bestemt langs en lige linje midt i strømrenden for at undgå effekter af strømrendens sider. Der blev foretaget målinger af otte hastighedsprofiler før og over gydebanken. Afstanden mellem målingerne i hvert punkt blev øget med afstand fra henholdsvis strømrendens bund og gydebankens top, da de største hastighedsændringer forventes at finde sted nær en fast overflade. Forsøgsopstillingen tillod en mindste afstand mellem målinger på 1 mm. Hver måling blev foretaget over en tidsperiode på 60 sekunder med en frekvens på 10 Hz. Hastighedsprofilerne blev målt ved vandføringer på 16,3 L/s, 11,0 L/s og 6,4 L/s. Ved de to laveste vandføringer blev hastighedsprofilerne kun målt ved 70 cm og 150 cm. Hældningen på strømrenden var 0 m/m. Se figur 11 for dimensioner af gydebanke, vandstande ved forskellige vandføringer og placering af målepunkter.



Figur 11. Dimensioner af gydebanke, vandstand ved $Q = 16,3$ L/s (højeste), vandstand ved $Q = 11,0$ L/s (mellemste), vandstand ved $Q = 6,4$ L/s (laveste) og placering af målepunkter (røde prikker).

Det vertikale hastighedsprofil kan opdeles i to zoner. I zonen nær bunden (grænselaget) er effekten af friktion stor. I zonen langt fra bunden (den frie væske) er effekten af friktion mindre og hastighedsprofilen kan beskrives ved hjælp af det logaritmiske hastighedsprofil (9):

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + 8,5 \quad (9)$$

U_* er friktionshastigheden (m/s), u er hastighedskomponenten i x-aksens retning (m/s), K er von Karman-konstanten (0,4), z er afstanden fra nulpunktet (m) og k_s er den ækvivalente sandruhed (m) [Bockelmann-Evans *et al.*, 2008]. Det logaritmiske hastighedsprofil (9) gælder for en hydraulisk ru bund, der haves når kornenes Reynolds tal (10) er større end 70:

$$Re_* = \frac{k_s U_*}{\nu} > 70 \quad (10)$$

ν er den kinematiske viskositet af vand ($1,003 \cdot 10^{-6}$ m²/s) [Kopecki, 2008]. Kendes friktionshastigheden, kan bundforskydningsspændingen bestemmes af (11):

$$\tau_0 = \rho U_*^2 \quad (11)$$

τ_0 er bundforskydningsspændingen (N/m²) og ρ er densiteten af vand (kg/m³). Omskrivning af ligning (9) gør det muligt først at bestemme friktionshastigheden og derefter den ækvivalente sandruhed. Bundforskydningsspændingen bestemmes herefter af (11). Ved at plote u mod $\ln(z)$ fås en ret linje (12) og U_* og k_s kan bestemmes af regressionskoefficienterne (13) og (14) [Boillat og Lavelli, 1999]:

$$u = A_1 \ln(z) + A_2 \quad (12)$$

$$U_* = K A_1 \quad (13)$$

$$k_s = \exp\left[\left(\frac{A_2}{U_*} - 8,5\right) \cdot (-K)\right] \quad (14)$$

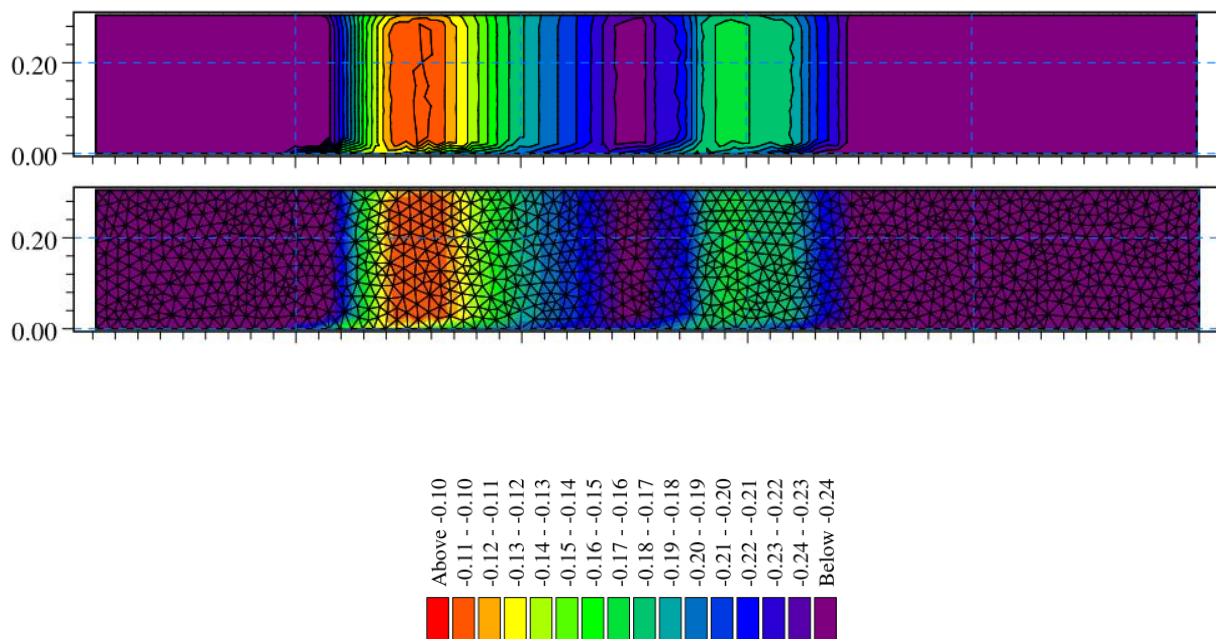
Da det logaritmiske hastighedsprofil ikke er gældende tæt ved bunden, ændres nulpunktet z i ligning (12) indtil den bedste overensstemmelse findes mellem det målte hastighedsprofil og det logaritmiske hastighedsprofil. Overensstemmelsen mellem det målte hastighedsprofil og det logaritmiske hastighedsprofil beregnes som korrelationskoefficienten R^2 for ligning (12) [Kopecki, 2008].

Bestemmelsen af friktionshastigheden, den ækvivalente sandruhed og bundforskydningsspændingen er afhængig af, hvilke hastighedsmålinger der medtages i det vertikale hastighedsprofil. En større hældning i ligning (12) giver en større friktionshastighed og dermed bundforskydningsspænding [Bockelmann-Evans *et al.*, 2008]. Alle punkter er som udgangspunkt medtaget i beregningen.

7.3.3 Hydraulisk model af gydebanke

En ikke-stationær tredimensionel hydraulisk model opsættes i MIKE 3 FM (Flexible Mesh) for strømningerne over gydebanken i afsnit 7.3.2 for at modellere strømhastigheder og bundforskydningsspændinger ved forskellige flow. Modellen gør det muligt at undersøge, om den strømhastighed, der giver den mindste infiltration og akkumulering af fint sediment i den cirkulære strømrønde, vil forøges over en gydebanke. I så fald vil det kunne vurderes, om strømhastigheden når en størrelse, der falder inden for en ørreds præference for strømhastighed over gydegrus. Det hydrodynamiske modul i MIKE 3 FM løser de styrende ligninger for væskestrømninger. De styrende ligninger er kontinuitetsligningen og Newtons 2. lov, der i kombination giver Navier-Stokes ligningerne for en usammentrykkelig og newtonsk væske. Da strømningerne over en gydebanke er turbulente, løses de Reynolds-glatte Navier-Stokes ligninger sammen med en turbulensmodel i det hydrodynamiske modul. I MIKE 3 FM diskretiseres og løses de styrende ligninger i et tredimensionelt beregningsnet bestående af trekantelementer, der er ustrukturerede plant og strukturerede vertikalt. Antallet af trekantelementer og vertikale lag bestemmer antallet af beregningsceller og dermed beregningstiden og opløsningen af de beregnede parametre.

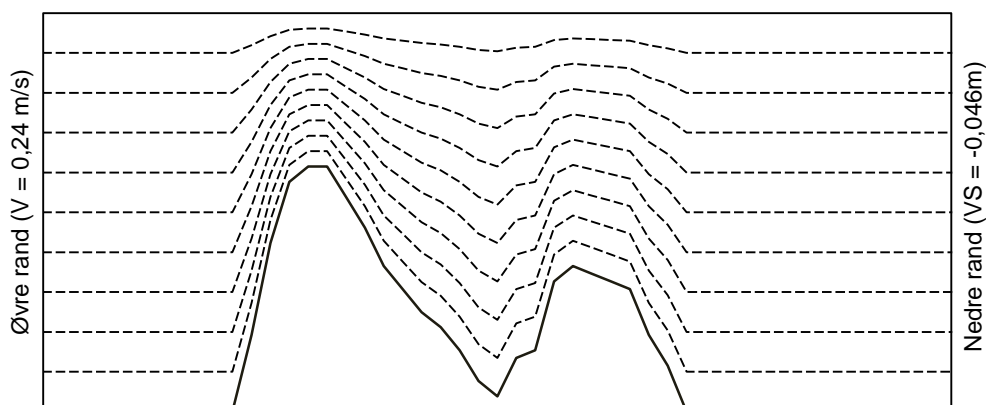
Gydebankens dimensioner defineres i modellen ved beskrivelse af bundkoterne. Bundkoten opstrøms og nedstrøms gydebanken defineres til -0,26m. Ud fra punktmålinger af gydebankens bundkoter interpoleres bundkoterne i hele modelområdet. På figur 12 ses bundkoterne i modelområdet og det anvendte beregningsnet. Et udsnit på 2,4 m af strømrønden anvendes. Strømrønden har en bredde på 0,3 m. Der anvendes 10 lag i vertikal retning af hensyn til beregningstiden.



Figur 12. Bundkoter (m) og anvendt beregningsnet i MIKE 3 FM set i et xy-plan. Hvert aksemærke på x-aksen er 0,1 m. Enheden på y-aksen er meter.

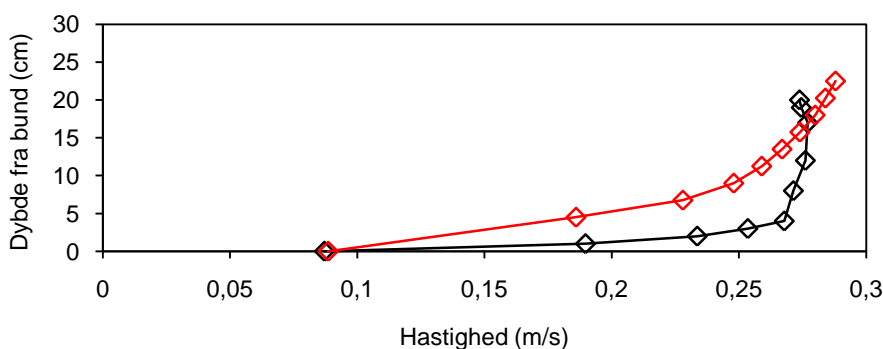
For at have et kalibreringsgrundlag i form af hastighedsprofiler opstrøms og over gydebanken, opsættes modellen for vandføringen på 16,3 L/s. Randbetingelsen på øvre rand sættes til middelstrømhastigheden på 0,24 m/s målt 50 cm opstrøms gydebanken med ADV-proben. Randbetingelsen på nedre rand sættes til en vandstand på -0,046 m svarende til en vandstand på 0,214 m målt umiddelbart opstrøms overløbet. Startbetingelsen i modellen sættes til en vandstand på 0 meter

svarende til en vandstand på 0,26 m opstrøms og nedstrøms gydebanken. På figur 13 ses øvre og nedre rand samt de 10 vertikale lag i modellen, der automatisk justeres til vandstanden.

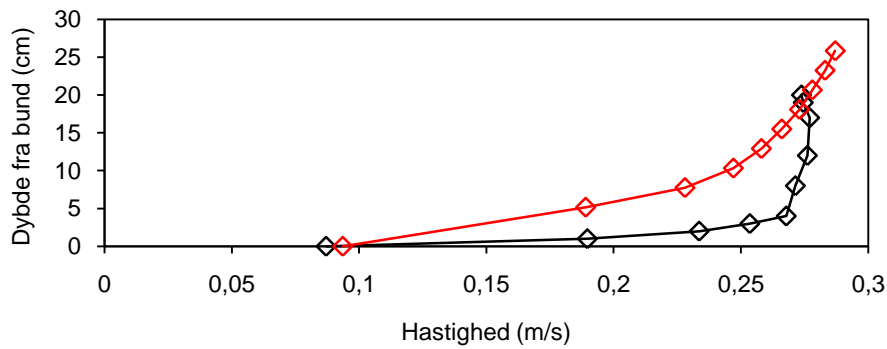


Figur 13. Øvre og nedre rand samt de 10 vertikale lag i modellen ved start. De 10 vertikale lag justeres automatisk til vandstanden.

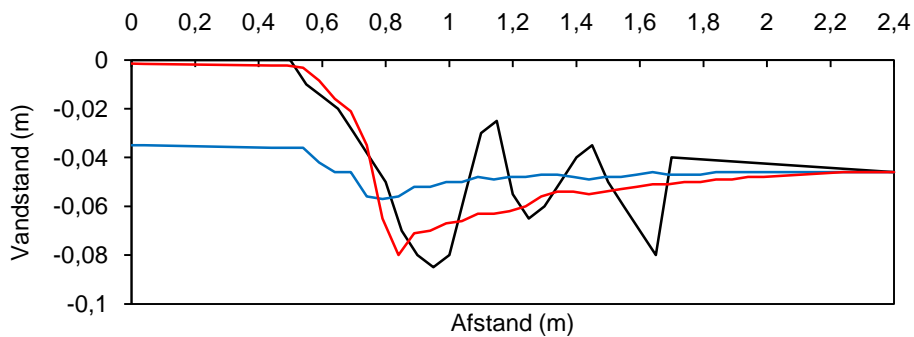
En del af vandet strømmer igennem gydebanken. Den del af vandet, der strømmer over gydebanken, estimeres ved hjælp af hastighedsprofilen målt ved 70 cm og $Q = 16,3$ L/s i afsnit 7.3.2. Fra trækkes denne vandføring den totale vandføring på 16,3 L/s, kan vandgennemstrømningen i den første del af gydebanken estimeres til 6 L/s. Vandgennemstrømningen i den anden del af gydebanken estimeres til 3 L/s. I MIKE 3 FM modelleres vandgennemstrømningen i gydebanken ved at placere et antal kilder på forsiden og bagsiden af hver del af gydebanken. På forsiden af den første del af gydebanken placeres 15 kilder, der hver indsuger 0,4 L/s. På bagsiden af den første del af gydebanken placeres ligeledes 15 kilder, der hver udpumper 0,4 L/s. På forsiden og bagsiden af den anden del af gydebanken placeres 5 kilder, der hver henholdsvis indsuger og udpumper 0,6 L/s. Den hastighed, hvormed indsugningen og udpumpningen foregår, specificeres i modellen til 0,125 m/s svarende til Darcy-hastigheden i gydebanken beregnet som gennemstrømningen i den første del af gydebanken divideret med det gennemstrømmede areal. Modellen kalibreres ved at minimere fejlen mellem modellerede og målte hastighedsprofiler. Kalibreringsparametrene er bundruheden (m) og mængden af vand, der gennemstrømmer gydebanken, da denne mængde kun er estimeret. Parametrene i den anvendte turbulensmodel ($k-\epsilon$) er universelle og kan ikke ændres [DHI, 2009]. Den bedste beskrivelse af de målte hastighedsprofiler fås med henholdsvis 6 L/s og 3 L/s i den henholdsvis første og anden del af gydebanken. Fejlen er her 0,03 (RMSE) for hastighedsprofilen målt 50 cm opstrøms gydebanken. Derimod fås den bedste beskrivelse af de målte vandstande med henholdsvis 2,25 L/s og 1 L/s i den henholdsvis første og anden del af gydebanken. Se figur 14 og 15 for sammenligning af hastighedsprofiler og figur 16 for sammenligning af vandstande.



Figur 14. Sammenligning af modelleret hastighedsprofil (rød) og målt hastighedsprofil 50 cm opstrøms gydebanke (sort) ved henholdsvis 6 L/s og 3 L/s i den henholdsvis første og anden del af gydebanken.



Figur 15. Sammenligning af modelleret hastighedsprofil (rød) og målt hastighedsprofil 50 cm opstrøms gydebanke (sort) ved henholdsvis 2,25 L/s og 1 L/s i den henholdsvis første og anden del af gydebanken. RMSE = 0,15.



Figur 16. Målt vandstand (sort), modelleret vandstand ved henholdsvis 6 L/s og 3 L/s i den henholdsvis første og anden del af gydebanken (blå) og modelleret vandstand ved henholdsvis 2,25 L/s og 1 L/s i den henholdsvis første og anden del af gydebanken (rød).

I afsnit 7.3.2 blev de ækvivalente sandruheder bestemt for strømrønden og gydebanken. Tilsvarende værdier i modellen giver ikke den bedste overensstemmelse mellem modellerede og målte hastighedsprofiler. Derimod fås den bedste overensstemmelse ved anvendelse af en urealistisk høj bundruhed på 100 m overalt i modelområdet. Se bilag 1 for sammenligninger af modellerede og målte hastighedsprofiler.

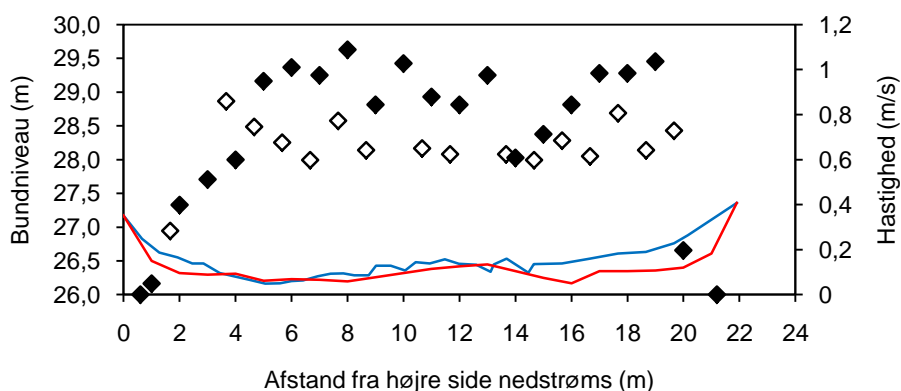
8. Resultater

8.1 Case 1: Gudenåen ved Vilholt Mølle

8.1.1 Strømhastigheder og sedimenttransport

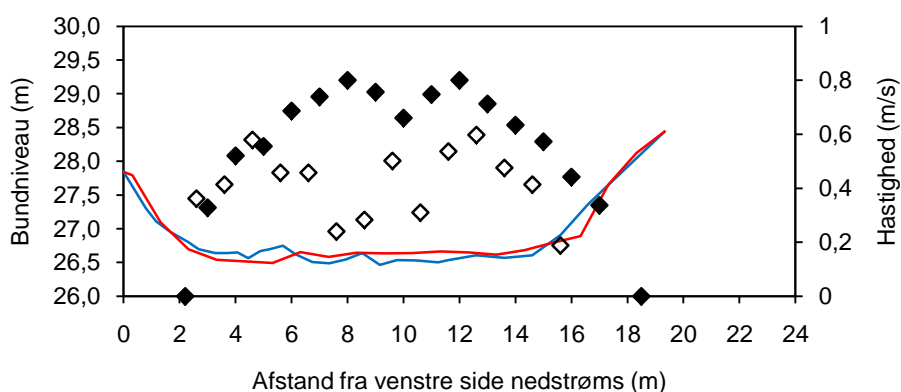
På figur 17-21 ses et udvalg af de gentagne opmålinger af bundniveauer på strækningerne i Gudenåen. Desuden er strømhastighederne målt ved 40 procent af dybden i de pågældende tværsnit angivet til sammenligning. I bilag 3 ses samtlige opmålte bundniveauer.

Figur 17 viser opmålingerne af bundniveauet i tværsnit 2 (nedstrøms retning) ved Vilholt Stryget foretaget i oktober 2010 (blåt forløb) i denne undersøgelse og marts 2009 (rødt forløb) i Winther (2009). Bundniveauet i tværsnittet er uændret de første 14 meter, hvorimod bundniveauet mellem 14 meter og 22 meter er forhøjet ved opmålingen i 2010. Netop de sidste 8 meter er præget af gydegrus, hvorfor det forhøjede bundniveau kan skyldes ældre gydninger. Strømhastighederne målt ved 40 procent af dybden varierer i tværsnittet mellem 0 m/s og omkring 1 m/s. Forskellen i strømhastigheder mellem opmålingerne i marts 2009 og oktober 2010 kan skyldes forskellig vandføring og grødebevoksning.

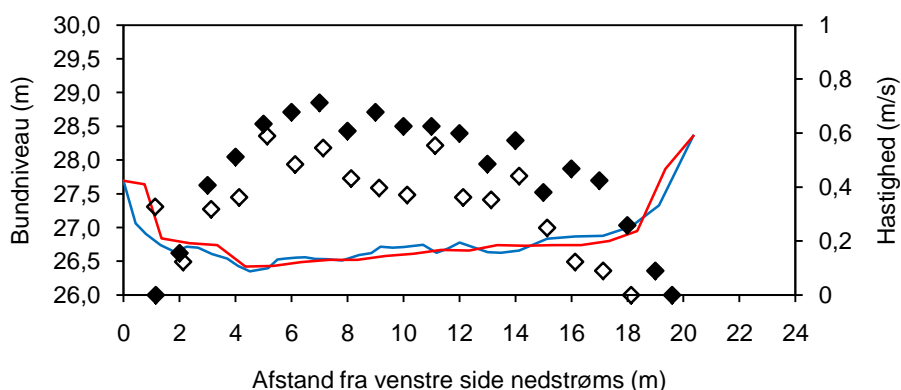


Figur 17. Tværsnit 2 (nedstrøms retning) ved Vilholt Stryget. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010 og rødt bundniveau er opmåling fra marts 2009 af Winther (2009). Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 1 ved Vilholt Stryget oktober 2010 (hvide) og middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 2 ved Vilholt Stryget (sorte) af Winther (2009).

Figur 18 og 19 viser opmålingerne af bundniveauet i tværsnit 2 og 3 (nedstrøms retning) ved den mellemste strækning i Gudenåen foretaget i oktober 2010 (blåt forløb) i denne undersøgelse og marts 2009 (rødt forløb) i Winther (2009). Bundniveauet i tværsnittene er uændret i hele bredden. Strømhastighederne målt ved 40 procent af dybden varierer i begge tværsnit mellem 0 m/s og omkring 0,8 m/s. Forskellen i strømhastigheder mellem opmålingerne i marts 2009 og oktober 2010 kan skyldes forskellig vandføring og grødebevoksning.



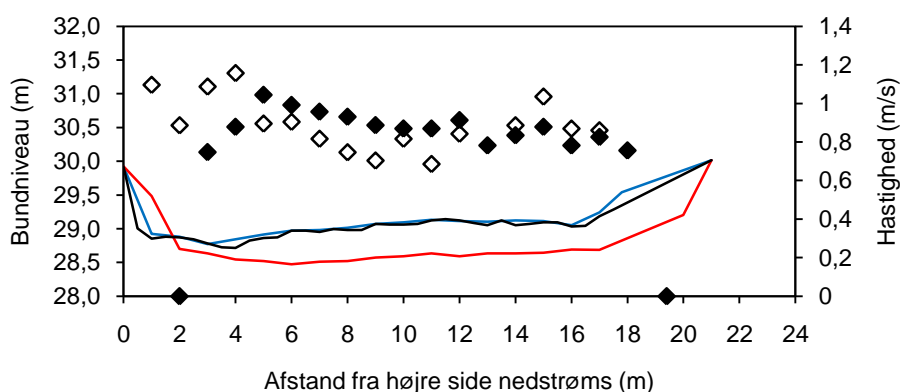
Figur 18. Tværsnit 2 (nedstrøms retning) på mellemste strækning. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010 og rødt bundniveau er opmåling fra marts 2009 af Winther (2009). Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 2 på mellemste strækning oktober 2010 (hvide) og middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) på mellemste strækning (sorte) af Winther (2009).



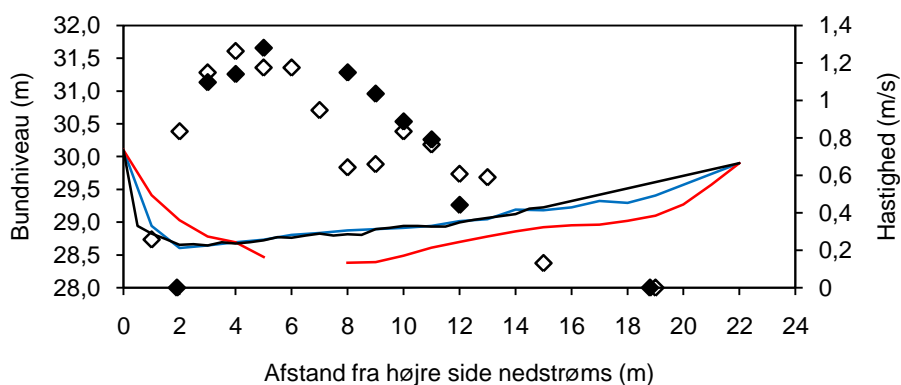
Figur 19. Tværsnit 3 (nedstrøms retning) på mellemste strækning. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010 og rødt bundniveau er opmåling fra marts 2009 af Winther (2009). Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 3 på mellemste strækning oktober 2010 (hvide) og middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 3 på mellemste strækning (sorte) af Winther (2009).

Figur 20 og 21 viser opmålingerne af bundniveauet i tværsnit 4 og 5 (nedstrøms retning) ved den øverste strækning i Gudenåen opstrøms det tidligere stemmeværk. Opmålingerne er foretaget i oktober 2010 (blåt forløb) og marts 2011 (sort forløb) i denne undersøgelse og marts 2009 (rødt forløb) i Winther (2009). Bundniveauet i begge tværsnit er mindre de første 2 til 4 meter ved opmålingerne i oktober 2010 og marts 2011 i forhold til opmålingen i marts 2009. I de resterende dele af tværsnittene er bundniveauet forhøjet i forhold til opmålingen i marts 2009.

Strømhastighederne målt ved 40 procent af dybden varierer i begge tværsnit mellem 0 m/s og omkring 1,2 m/s. Forskellen i strømhastigheder mellem opmålingerne i marts 2009 og oktober 2010 kan skyldes forskellig vandføring og grødebevoksning.



Figur 20. Tværsnit 4 (nedstrøms retning) på øverste strækning. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010, sort bundniveau er opmåling fra marts 2011 og rødt bundniveau er opmåling fra marts 2009 af Winther (2009). Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 4 på øverste strækning oktober 2010 (hvide) og middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 4 på øverste strækning (sorte) af Winther (2009).



Figur 21. Tværsnit 5 (nedstrøms retning) på øverste strækning. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010, sort bundniveau er opmåling fra marts 2011 og rødt bundniveau er opmåling fra marts 2009 af Winther (2009). Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 5 på øverste strækning oktober 2010 (hvide) og middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 5 på øverste strækning (sorte) af Winther (2009).

8.1.2 Makroinvertebrater

I tabel 3 ses antal og arter af indsamlede makroinvertebrater på de tre undersøgte strækninger i Gudenåen. På Vilholt Stryget blev der indsamlet to arter døgnfluer, to arter slørvinger og tre arter vårfluer. På den mellemste strækning blev der indsamlet tre arter døgnfluer, to arter slørvinger, tre arter vårfluer og *Elmidae*. På den øverste strækning blev der indsamlet tre arter døgnfluer, to arter slørvinger og tre arter vårfluer. Udover de arter, der er angivet i tabel 3, blev der indsamlet en række makroinvertebrater, der findes vidt udbredt i mange forskellige typer vandløb, herunder vandtanglopper og igler.

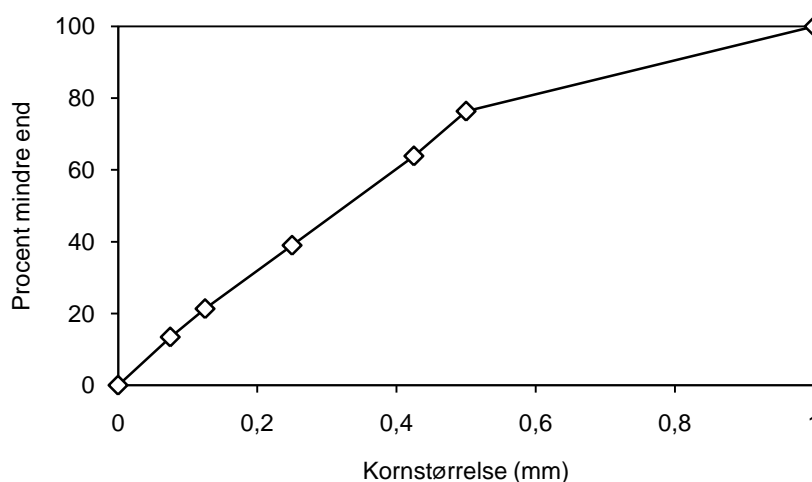
Tabel 3. Indsamlede makroinvertebrater (antal) i Gudenåen.

Art	Vilholt Stryget	Mellemste strækning	Øverste strækning
<i>Ephemera Danica</i> (D)	15	32	10
<i>Heptagenia</i> (D)	8	7	3
<i>Baetis</i> (D)	-	1	-
<i>Paralephophlebia sp.</i> (D)	-	-	1
<i>Isoperla</i> (S)	2	2	1
<i>Perlodes</i> (S)	2	1	1
<i>Sericostomatidae</i> (V)	17	9	16
<i>Hydropsyche</i> (V)	10	11	6
<i>Rhyacophila</i> (V)	1	2	1
<i>Elmidae (elmis aenea)</i> (B)	-	1	-

^D Døgnflue, ^S Slørvinge, ^V Vårflue, ^B Bille

8.1.3 Infiltration og akkumulering af fint sediment

I perioden fra den 01.03.2011 til den 24.03.2011 blev infiltrationsraten målt i en gydebanke i Vilholt Stryget. Infiltrationsraten blev målt til 0,28 kg/m²/dag. Det akkumulerede sediment var under 1 mm med D₅₀ 0,33 mm, D₁₅ 0,08 mm og D₈₅ 0,68 mm. På figur 22 ses kornstørrelsesfordelingskurven for det akkumulerede sediment.



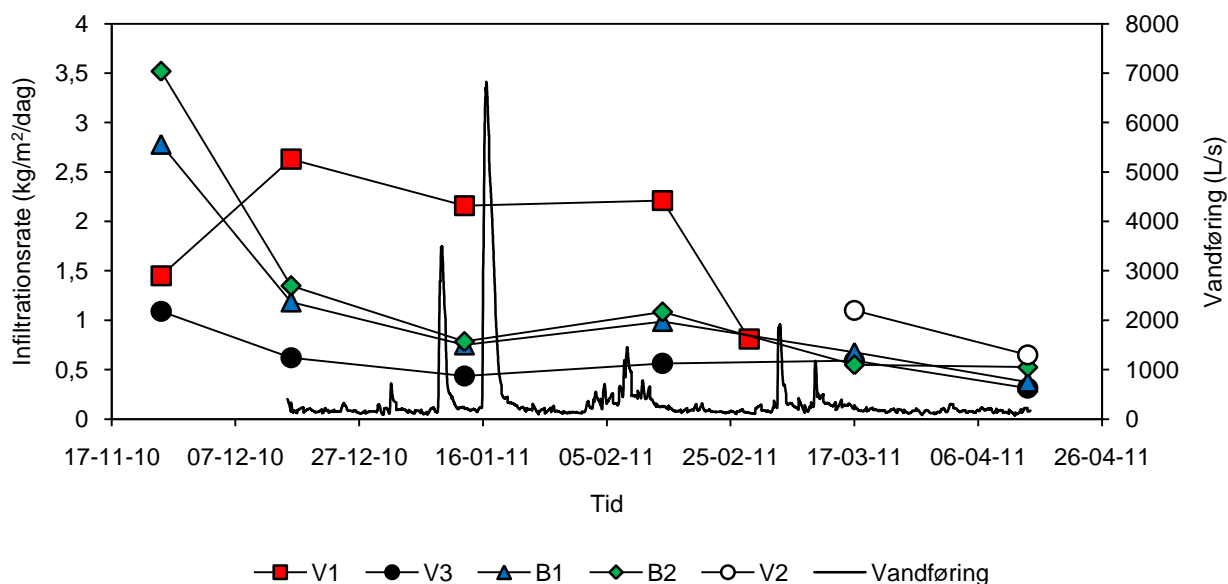
Figur 22. Kornstørrelsesfordelingskurve for akkumuleret sediment i Gudenåen i perioden 01.03.2011 til 24.03.2011.

8.2 Case 1: Rakkeby Å

8.2.1 Infiltration og akkumulering af fint sediment

På figur 23 ses de gennemsnitlige infiltrationsrater af akkumuleret fint sediment i de fem undersøgte gydebanks i Rakkeby Å i måleperioden fra den 17.11.2010 til den 14.04.2011. Desuden fremgår den registrerede vandføring i perioden. Infiltrationsraten er i hele perioden mindst i gydebanken V3, der er placeret 250 m nedstrøms sandfanget. Infiltrationsraten overstiger her ikke 1 kg/m²/dag i løbet af måleperioden og er generelt omkring 0,5 kg/m²/dag.

Infiltrationsraten er i starten størst i gydebankerne B1 og B2, der er placeret henholdsvis 1600 m og 1500 m nedstrøms sandfanget. I de efterfølgende omkring tre måneder er infiltrationsraten størst i gydebanken V1, der er placeret 100 m opstrøms sandfanget, hvor infiltrationsraten er omkring 2,5 kg/m²/dag. I samme periode er infiltrationsraten i gydebankerne B1 og B2 omkring 1 kg/m²/dag. Sidst i perioden falder infiltrationsraten i gydebanken V1 ned på niveau med raterne i gydebankerne B1, B2 og V3. I den sidste periode er infiltrationsraten størst i gydebanken V2, der er placeret 25 m nedstrøms sandfanget. Sandfanget blev tømt af Hjørring Kommune i første halvdel af november umiddelbart før målingerne begyndte samt i første halvdel af marts.

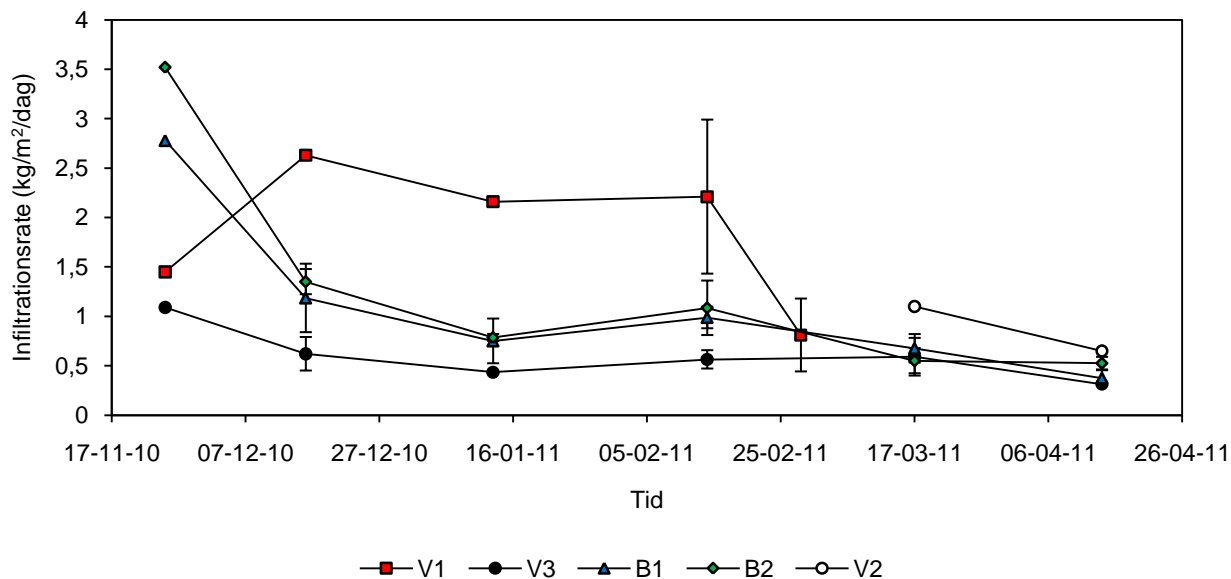


Figur 23. Gennemsnitlige infiltrationsrater af akkumuleret fint sediment i fem gydebanks i Rakkeby Å. Vandføring i perioden er angivet på den sekundære y-akse.

De registrerede vandføringer i Rakkeby Å i måleperioden viser, at der igennem perioden har været fem markante større afstrømningshændelser. Den største afstrømningshændelse gav en vandføring på omkring 6800 L/s, hvilket er 36 gange større end medianvandføringen i perioden på 190 L/s. Den mindste vandføring i perioden er på 70 L/s og er et udtryk for grundvandsbidraget i Rakkeby Å, da vandføringen indtraf efter en periode med koldt og nedbørsfattigt vejr. Generelt skyldes de store afstrømningsvolumener i Rakkeby Å tøbrud i perioden. På grund af frost i jorden bidrog hele oplandet på kort tid med afsmeltet sne og regn til vandløbet.

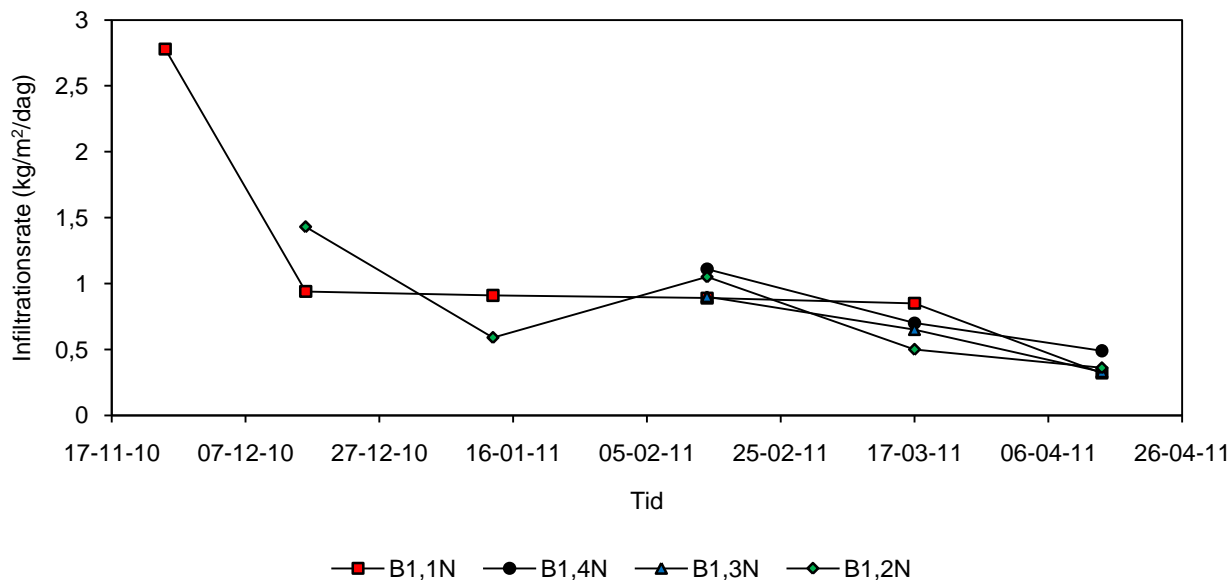
På figur 24 ses de gennemsnitlige infiltrationsrater af akkumuleret fint sediment i de fem undersøgte gydebanks i Rakkeby Å med standardafvigelse i de perioder, hvor flere beholdere var udsat i samme gydebanke. Der ses en generel tendens til, at infiltrationsraterne i gydebankerne B1 og B2 ikke er signifikant forskellige i måleperioden. Derudover ses en meget lille variation i infiltrationsraterne i gydebankerne B1, B2 og V3, hvorimod variationen i infiltrationsraterne i gydebanken V1 er

store, hvorfor infiltrationsraten her omkring midt i perioden er på niveau med de gydebanker, der er placeret over 1500 m nedstrøms sandfanget.



Figur 24. Gennemsnitlige infiltrationsrater af akkumuleret fint sediment med standardafvigelser i fem gydebanker i Rakkeby Å. Der er ikke kontrolleret for normalfordelte data.

Figur 25 viser den lille variation i infiltrationsraterne målt i fire infiltrationsbeholdere i gydebanken B1 i løbet af måleperioden. Den relative placering af beholderne ses på figur 6. Infiltrationsbeholderen B1,1N er placeret som den første i nedstrøms retning og så videre. Variationen er størst i den første del af måleperioden, hvor forskellen er omkring 0,5 kg/m²/dag mellem højeste og laveste infiltrationsrate. Variationen er mindst sidst i perioden, hvor forskellen er omkring 0,2 kg/m²/dag mellem højeste og laveste infiltrationsrate.



Figur 25. Infiltrationsraterne i fire infiltrationsbeholdere i gydebanken B1 i måleperioden.

I tabel 4 ses de gennemsnitlige infiltrationsrater i de fem gydebanker i Rakkeby Å, der er illustreret i figur 23 og 24.

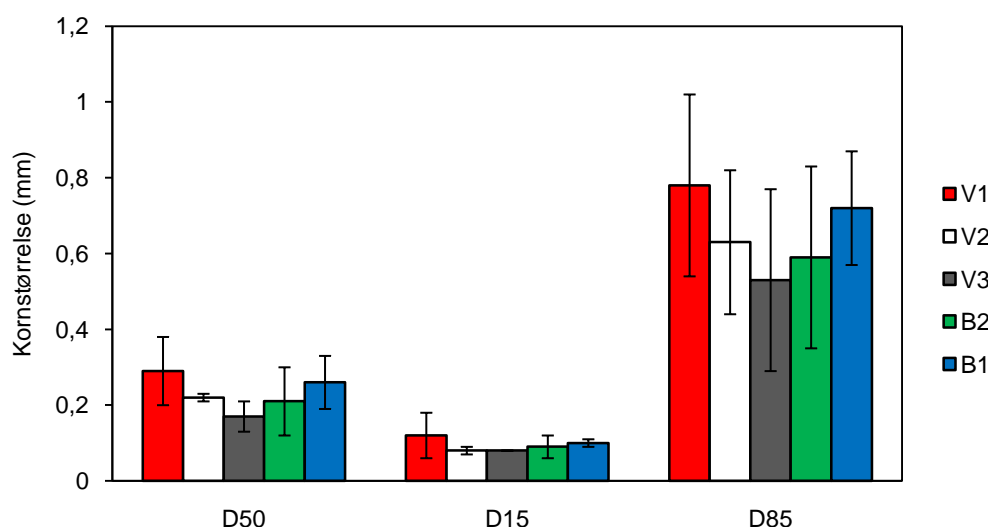
Tabel 4. Gennemsnitlige infiltrationsrater i kg/m²/dag (standardafvigelse) for de fem gydebanker i perioden.

Periode	V1	V2	V3	B1	B2
17.11.2010 – 25.11.2010	1,45	-	1,09	2,78	3,52
25.11.2010 – 16.12.2010	2,63	-	0,50	0,94	1,44
17.11.2010 – 16.12.2010	-	-	0,74	1,43	1,26
16.12.2010 – 13.01.2011	2,16	-	0,44 (0,02)	0,75 (0,23)	0,79 (0,04)
13.01.2011 – 14.02.2011	2,21 (0,78)	-	0,56 (0,09)	0,99 (0,11)	1,09 (0,28)
14.02.2011 – 28.02.2011	0,81 (0,37)	-	-	-	-
28.02.2011 – 17.03.2011	-	1,10	-	-	-
14.02.2011 – 17.03.2011	-	-	0,59 (0,19)	0,68 (0,14)	0,55 (0,13)
17.03.2011 – 14.04.2011	-	0,65	0,31 (0,03)	0,38 (0,08)	0,53 (0,06)

I tabel 5 og figur 26 er angivet de gennemsnitlige karakteristika for akkumuleret sediment i gydebankerne i løbet af hele måleperioden. Det ses, at størstedelen af det sediment, der akkumuleres i gydebankerne i Rakkeby Å, er mindre end 1 mm. Det groveste sediment findes opstrøms sandfanget i gydebanken V1, hvor værdierne for D₅₀, D₁₅ og D₈₅ er størst. Det fineste sediment findes i gydebanken V3 placeret 250 meter nedstrøms sandfanget. Sedimentet i gydebankerne V2 placeret 25 meter nedstrøms sandfanget og B1 placeret 1600 meter nedstrøms sandfanget er i samme størrelsesorden. Generelt varierer D₈₅ mest i forhold til D₅₀ og D₁₅. Sedimentet i gydebanken V1 ligner sedimentet i gydebanken B2 placeret 1500 m nedstrøms sandfanget. De mindste fraktioner af det akkumulerede sediment (D₁₅) er en ukendt blanding af fint sand (0,063 mm – 0,125 mm), silt (0,002 mm – 0,063 mm) og ler (< 0,002 mm). De mellemste og største fraktioner (D₅₀ og D₈₅) er primært medium sand (0,125 mm – 1mm) og i mindre grad groft sand (1 mm – 2 mm).

Tabel 5. Gennemsnitlige karakteristika (standardafvigelse) for akkumuleret sediment i hele måleperioden.

Gydebanke	D ₅₀ (mm)	D ₁₅ (mm)	D ₈₅ (mm)
V1	0,29 (0,09)	0,12 (0,06)	0,78 (0,24)
V2	0,22 (0,01)	0,08 (0,01)	0,63 (0,19)
V3	0,17 (0,04)	0,08	0,53 (0,24)
B1	0,21 (0,07)	0,09 (0,01)	0,59 (0,15)
B2	0,26 (0,09)	0,10 (0,03)	0,72 (0,24)



Figur 26. Gennemsnitlige karakteristika for akkumuleret sediment i gydebankerne i hele måleperioden. Der er ikke kontrolleret for normalfordelte data.

I tabel 6 ses de gennemsnitlige værdier for D_{50} for de forskellige perioder i løbet af målekampagnen. D_{50} for det akkumulerede sediment i gydebanken V1 varierer mellem 0,37 mm og 0,19 mm. En tilsvarende variation ses i gydebankerne B1 og B2, hvor D_{50} varierer mellem 0,50 mm og 0,16 mm. En mindre variation ses i gydebankerne V2 og V3, hvor D_{50} varierer mellem 0,23 mm og 0,12 mm. Sammenlignes værdierne med vandføringen i perioden ses en svag sammenhæng mellem lav vandføring og lille D_{50} for akkumuleret sediment.

Tabel 6. Gennemsnitlige værdier for D_{50} (mm) for de forskellige perioder.

Periode	V1	V2	V3	B1	B2
17.11.2010 – 25.11.2010	0,34	-	0,15	0,46	0,50
25.11.2010 – 16.12.2010	0,32	-	0,12	0,19	0,26
17.11.2010 – 16.12.2010	-	-	0,15	0,19	0,33
16.12.2010 – 13.01.2011	0,27	-	0,15	0,20	0,20
13.01.2011 – 14.02.2011	0,37 (0,07)	-	0,22 (0,02)	0,23	0,24 (0,02)
14.02.2011 – 28.02.2011	0,19 (0,06)	-	-	-	-
28.02.2011 – 17.03.2011	-	0,23	-	-	-
14.02.2011 – 17.03.2011	-	-	0,22 (0,02)	0,21 (0,02)	0,22 (0,01)
17.03.2011 – 14.04.2011	-	0,21	0,14 (0,02)	0,16 (0,03)	0,24 (0,04)

8.2.2 Sedimenttransport

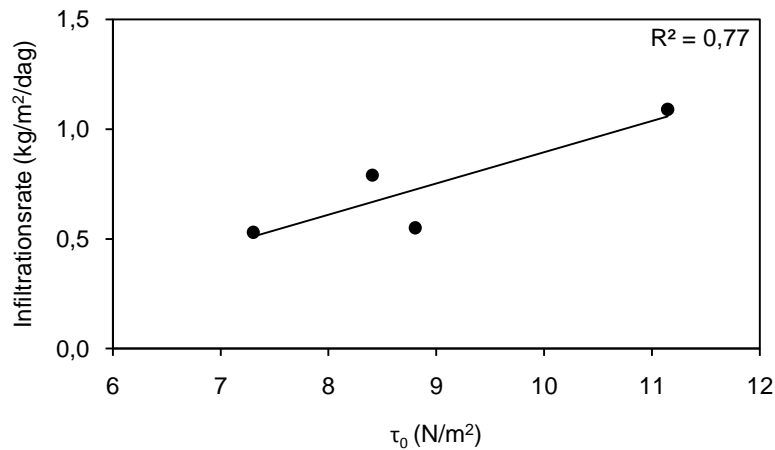
Den totale sedimenttransport over hver gydebanke i Rakkeby Å umiddelbart omkring tidspunktet for den højeste vandføring under en større afstrømningshændelse i marts 2011 i Rakkeby Å kan ses i tabel 7. Det ses, at den suspenderede sedimenttransport er mindst opstrøms sandfanget over gydebanke V1. De største suspenderede sedimenttransporter er over gydebankerne B1 og V3. Bundtransporten er størst opstrøms sandfanget over gydebanke V1 og nedstrøms sandfanget over gydebanke B1, mens bundtransporten over de øvrige gydebanker er på samme niveau. Bundtransporten udgør mellem 0,3 % og 40 % af den totale sedimenttransport over gydebankerne.

Tabel 7. Sedimenttransporten over gydebankerne i Rakkeby Å under afstrømningshændelsen den 10 marts 2011. Vandføring på 1370 L/s.

Gydebanke	Suspenderet sedimenttransport (g/s)	Bundtransport (g/m/s)	Total (g/s)
V1	86	11-0,4	119-87
V2	171	6-0,3	189-172
V3	300	5-0,3	315-300
B1	342	10-0,5	371-344
B2	171	6-0,3	189-172

Kornstørrelserne for det sediment, der transporteres som bundtransport, ligger i et snævert interval under 0,5 mm. D_{50} er 0,14 mm, D_{85} er 0,23 mm og D_{15} er 0,08 mm.

Sedimenttransportens betydning for infiltrationsraterne kan illustreres ved at korrelere infiltrationsraten i en gydebanke og bundtransporten af sediment opstrøms gydebanken. På figur 27 ses infiltrationsraten i gydebanken B2 korreleret med den gennemsnitlige bundforskydningsspænding 50 m opstrøms gydebanken for de enkelte perioder, hvor infiltrationsraterne er bestemt.

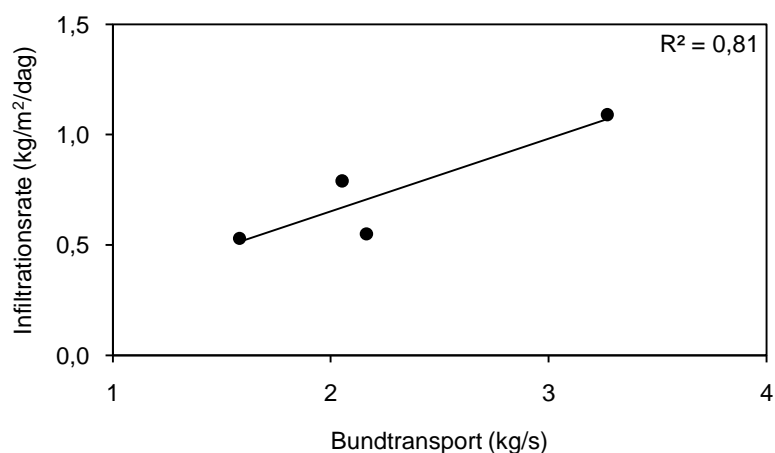


Figur 27. Korrelation mellem bundforskydningspænding og infiltrationsrate.

En høj bundforskydningspænding i vandløbet angiver den potentielle kraft, der er tilgængelig til at transportere sediment. Bundtransportens størrelse afhænger ligeledes af tilgængeligheden af sediment i vandløbet. Den potentielle størrelse af bundtransporten i et vandløb kan bestemmes ved hjælp af empiriske ligninger [Simons og Sentürk, 1992]. På figur 28 ses infiltrationsraten i gydebanken B2 korreleret med den potentielle bundtransport af sediment (kg/s) 50 m opstrøms gydebanken. Den potentielle bundtransport (M_s) er bestemt ved hjælp af Meyer-Peter-korrelationen (15).

$$M_s = \left(\frac{4\tau_0}{\rho_v (s-1)gD_{50}} - 0,188 \right)^{3/2} \cdot \sqrt{(s-1)gD_{50}^3} \cdot B \cdot \rho_s \quad (15)$$

M_s er den potentielle bundtransport (kg/s), τ_0 er bundforskydningspændingen for flad bund (N/m²), ρ_v er densiteten af vand (1000 kg/m³), s er 2,65, g er tyngdeaccelerationen (9,81 m/s²), D_{50} er mediankornstørrelsen for bundsedimentet (m), B er vandløbets bredde (m) og ρ_s er partikeldensiteten (2650 kg/m³) [Chanson, 2004]. I beregningerne er anvendt D_{50} for det infiltrerede sediment i gydebanken B2 (0,26 mm) og en vandløbsbredde på 2 m. Sediment med en mediankornstørrelse på 0,26 mm eroderes ved en bundforskydningspænding på omkring 0,5 N/m² i henhold til Shields Parameter.

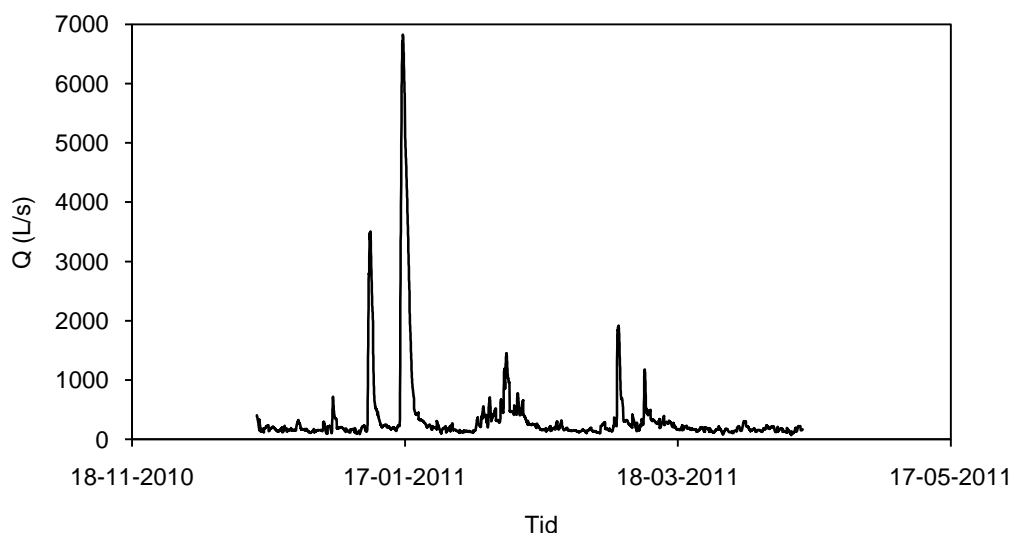


Figur 28. Korrelation mellem bundtransport og infiltrationsrate.

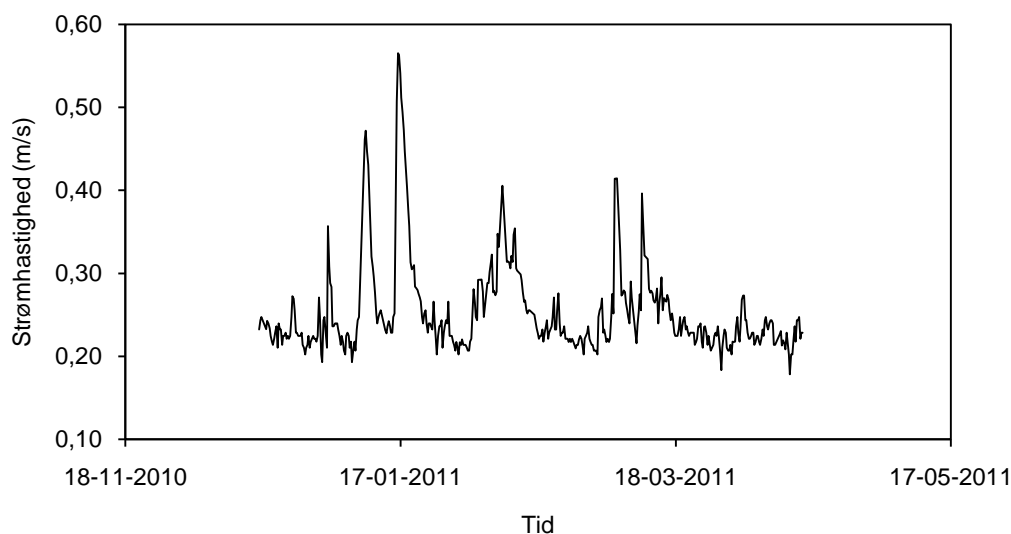
De urealistisk høje værdier for bundtransporten skyldes, at det er den potentielle bundtransport i vandløbet. Beregningen tager ikke højde for tilgængeligheden og pakningen af sediment, vegetation på brinker og i vandløb samt større og immobile korn i vandløbet. Endvidere er de empiriske formler for bundtransport ikke universelle og reelt kun gældende for de forhold, de blev opsat under [Simons og Sentürk, 1992]. Det ses af figur 28, at infiltrationsraten stiger med stigende bundtransport. Lisle og Lewis (1992) korrelerer netop infiltrationsraten og bundtransporten med henblik på at forudsige infiltrationsraterne i et vandløb. Bundtransporten bestemmes ud fra målinger i det undersøgte vandløb. Lisle og Lewis (1992) finder, at forudsigelse af infiltrationsraten er usikker på grund af usikker forudsigelse af bundtransporten, der afhænger af tilførslen af sediment og afstrømningsmønstret i vandløbet.

8.2.3 Hydraulisk model

I tabel 8 ses statistik for modellerede gennemsnitlige middelstrømhastigheder midt på de undersøgte gydebanker i Rakkeby Å. Middelstrømhastighederne er generelt lavest over gydebanken V1 placeret 100 m opstrøms sandfanget. Hastigheden varierer her mellem 0,18 m/s og 0,57 m/s med en medianmiddelstrømhastighed på 0,23 m/s. På figur 29 og 30 ses, at de høje strømhastigheder over gydebanken er sammenfaldende med høj vandføring i perioden.



Figur 29. Registreret vandføring i måleperioden.



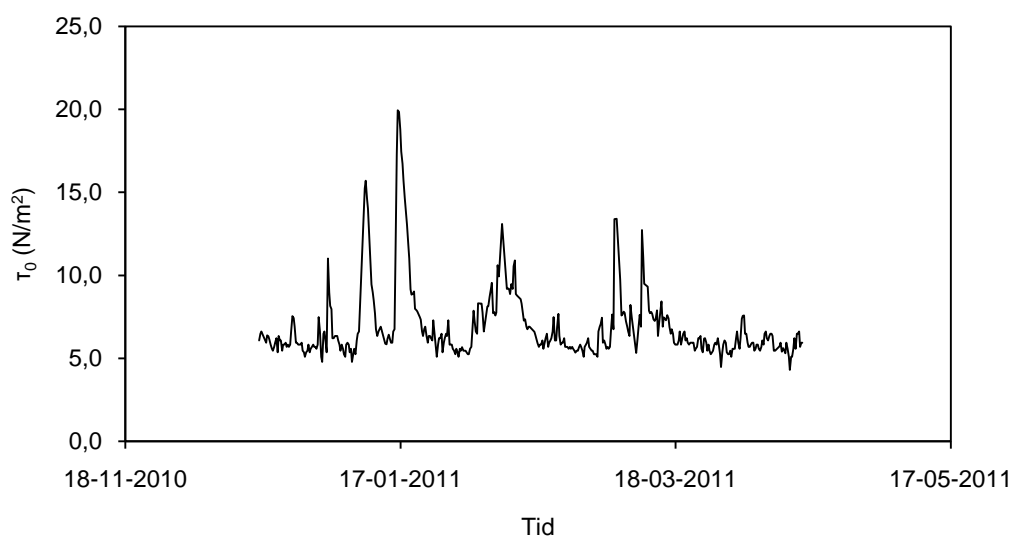
Figur 30. Modellerede hastigheder midt på gydebanke V1.

Middelstrømhastighederne over gydebankerne V3 placeret 250 m nedstrøms sandfanget, B1 placeret 1600 m nedstrøms sandfanget og B2 placeret 1500 m nedstrøms sandfanget er ens med hensyn til medianværdi, middelværdi og minimumsværdi, mens maksimumsværdien for middelstrømhastigheden er betydeligt større over gydebanke B2.

Tabel 8. Statistik for middelstrømhastigheder midt på gydebanke i måleperioden.

Gydebanke	Middel (m/s)	Standardafvigelse (m/s)	Minimum (m/s)	Maksimum (m/s)	Median (m/s)
V1	0,25	0,05	0,18	0,57	0,23
V2	0,31	0,04	0,23	0,55	0,3
V3	0,44	0,03	0,36	0,62	0,44
B1	0,41	0,06	0,33	0,83	0,4
B2	0,43	0,13	0,28	1,20	0,39

I tabel 9 ses statistik for gennemsnitlige bundforskydningsspændinger over gydebankerne i løbet af måleperioden. Der ses samme tendenser til størrelse og variation som for middelstrømhastighederne i tabel 8. De største bundforskydningsspændinger over gydebankerne forekommer også under større afstrømningshændelser, se figur 31.



Figur 31. Modellerede bundforskydningsspændinger midt på gydebanke V1.

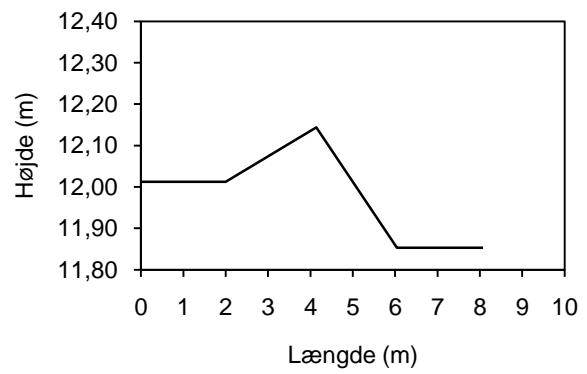
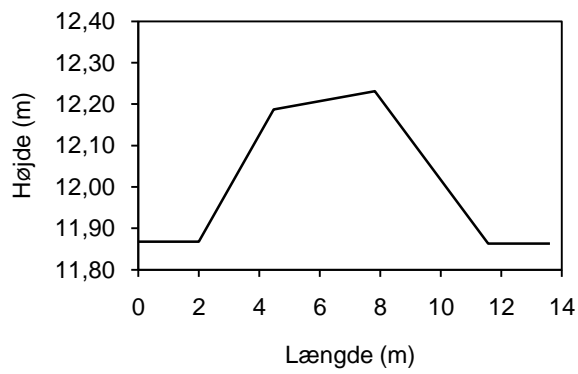
Tabel 9. Statistik for bundforskydningsspændinger midt på gydebanker i måleperioden.

Gydebanke	Middel (N/m ²)	Standardafvigelse	Minimum (N/m ²)	Maksimum (N/m ²)	Median (N/m ²)
V1	6,8	2,2	4,3	19,9	6,1
V2	11,8	1,2	7,6	19,1	11,5
V3	25,9	5,9	7,0	39,1	26,2
B1	22,0	2,9	18,4	45,5	21,6
B2	24,5	12,1	12,4	101,9	20,8

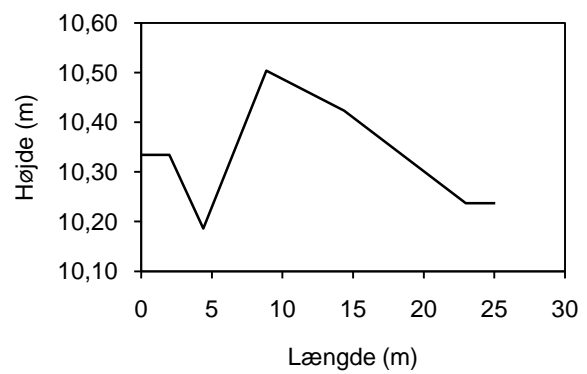
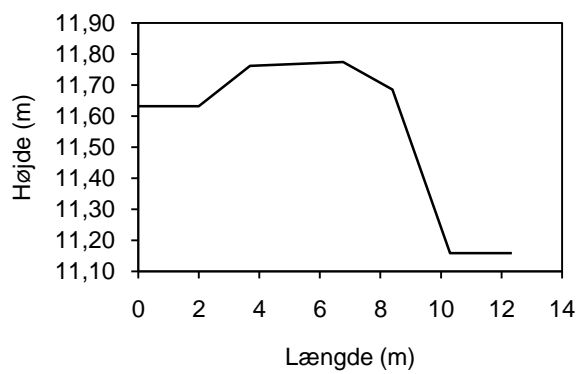
I tabel 10 ses modellerede trykgradier over hver gydebanke ved henholdsvis medianvandføringen og maksimalvandføringen i måleperioden. Ved medianvandføringen og maksimalvandføringen er trykgradierne størst over gydebankerne V3 og B1. Trykgradierne er mindst over gydebankerne V1 og V2. Trykgradierne er størst ved medianvandføringen, hvor gydebankernes højde i forhold til vandstanden er størst. Ved maksimalvandføringen er trykgradierne over gydebankerne på niveau med vandspejlets fald på de steder, hvor der ikke er udlagt gydegrus. I figur 32, 33 og 34 ses gydebankernes morfologi. Gydebankerne V1, B1 og B2 er omkring 30 cm høje, mens gydebanken V3 er omkring 60 cm høj. Gydebanken V2 er mindst med en højde på 20 cm.

Tabel 10. Trykgradier over gydebanker ved medianvandføringen og maksimalvandføringen for perioden.

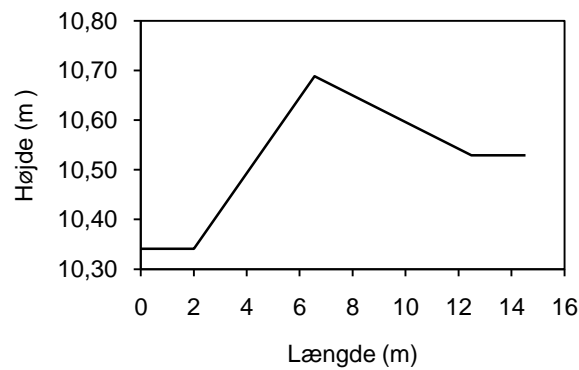
Gydebanke	Trykgradient dh/dx ved 190 L/s (m/m)	Trykgradient dh/dx ved 6800 L/s (m/m)
V1	0,002	0,0011
V2	0,003	0,0012
V3	0,011	0,0014
B1	0,012	0,0090
B2	0,007	0,0029



Figur 32. Morfologi af gydebankerne V1 (venstre) og V2 (højre). Strømretning fra venstre mod højre.



Figur 33. Morfologi af gydebankerne V3 (venstre) og B1 (højre). Strømretning fra venstre mod højre.

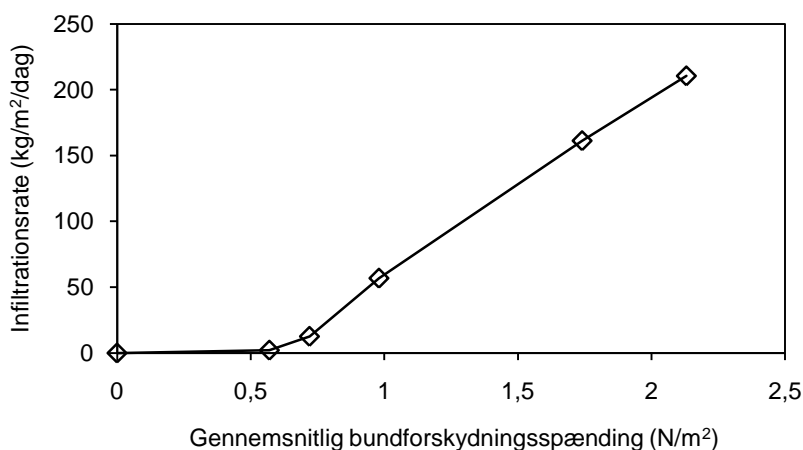


Figur 34. Morfologi af gydebanken B2. Strømretning fra venstre mod højre.

8.3 Laboratorieforsøg

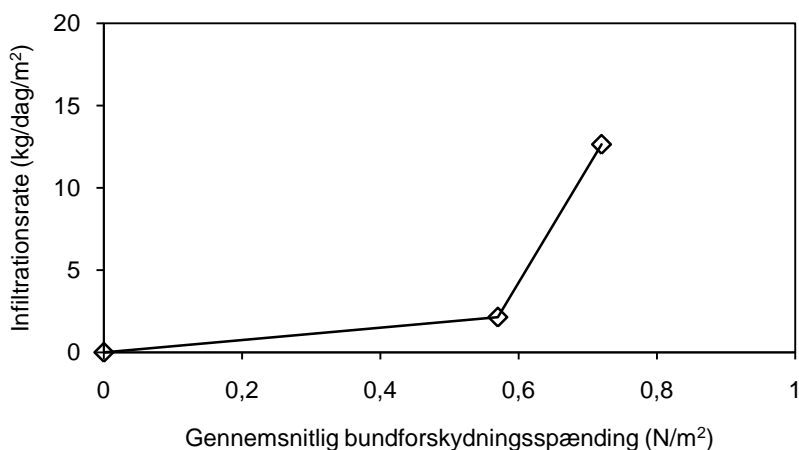
8.3.1 Erosion og deposition af fint sediment

På figur 35 ses den gennemsnitlige infiltrationsrate i gydebanken i den cirkulære strømrønde som funktion af den gennemsnitlige bundforskydningsspænding over sedimentet i den øvrige del af strømrønden. Det ses, at infiltrationsraten stiger betydeligt ved bundforskydningsspændinger over $0,5 \text{ N/m}^2$.



Figur 35. Gennemsnitlig infiltrationsrate ($\text{kg/m}^2/\text{dag}$) som funktion af gennemsnitlig bundforskydningsspænding (N/m^2) i den cirkulære strømrønde.

På figur 36 ses den gennemsnitlige infiltrationsrate for gydebanken i intervallet mellem 0 N/m^2 og 1 N/m^2 .



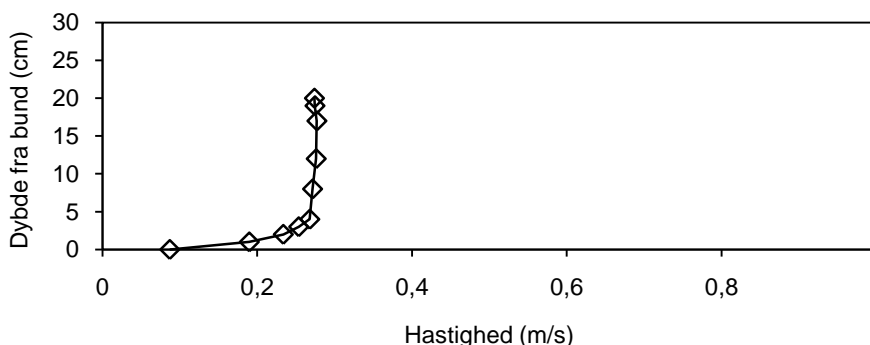
Figur 36. Gennemsnitlig infiltrationsrate ($\text{kg/m}^2/\text{dag}$) som funktion af gennemsnitlig bundforskydningsspænding (N/m^2) i den cirkulære strømrønde.

Ud fra sammenhængen i figur 36 er det muligt at estimere de hydrauliske forhold, der giver en lille infiltration og akkumulering af fint sediment. Den gennemsnitlige dybde, som ørredæg lægges i, er 15 cm [Acornley og Sear, 1999]. To ekstremer er de tilfælde, hvor infiltrationen og akkumuleringen af fint sediment giver henholdsvis 15 cm sedimentmættet gydegrus og 0 cm sedimentmættet gydegrus over inkubationsperioden. Det sidste tilfælde vil kun finde sted i et vandløb uden sediment eller uden strømmende vand. Antages en acceptabel infiltration og akkumulering af fint sediment

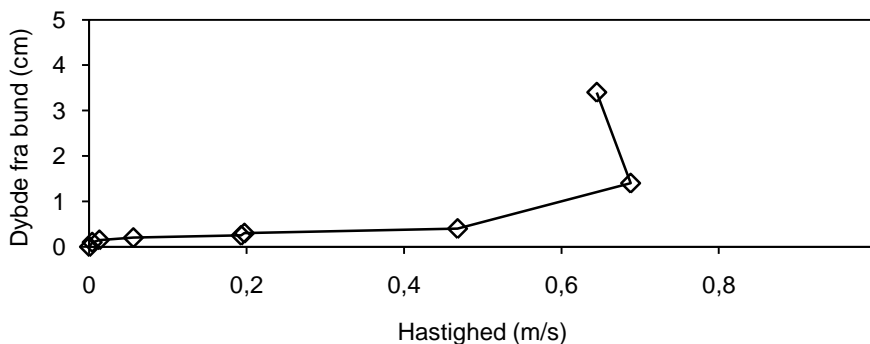
fra bunden af en gydebanke på en kvadratmeter at være to centimeter over en periode på 120 dage svarende til fiskeæggenes inkubationstid, skal den gennemsnitlige infiltrationsrate være 0,18 kg/m²/dag. Her er anvendt en porøsitet på 0,4 cm³ porer/cm³ gydegrus og en partikeldensitet for sediment på 2650 kg/m³. Porøsiteten er bestemt for gydegrus fra Rakkeby Å. Ved lineær interpolation findes, at en gennemsnitlig bundforskydningsspænding på 0,05 N/m² over sedimentet svarende til en middelstrømhastighed i renden på 0,14 m/s giver en infiltrationsrate på 0,18 kg/m²/dag.

8.3.2 Strømforhold over gydebanke

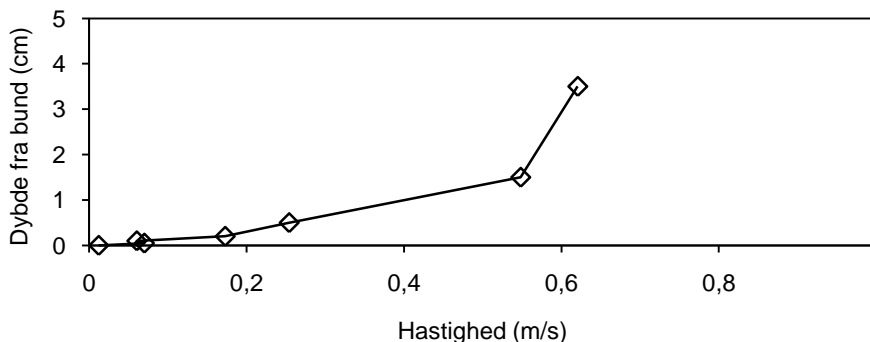
På figur 37, 38 og 39 ses hastighedsprofilerne målt ved målepunkterne 0 cm (placeret 50 cm opstrøms gydebanken) og 70 cm og 150 cm (svarende til den øverste del af hver del af gydebanken) i den aflange strømrørende ved en vandføring på 16,3 L/s. Det ses af hastighedsprofilerne, at strømhastigheden accelereres over gydebanken og at den er omkring tre gange højere over gydebanken i forhold til opstrøms gydebanken. Se bilag 2 for alle hastighedsprofiler.



Figur 37. Hastighedsprofil målt ved 0 cm ved en vandføring på 16,3 L/s.



Figur 38. Hastighedsprofil målt ved 70 cm ved en vandføring på 16,3 L/s.



Figur 39. Hastighedsprofil målt ved 150 cm ved en vandføring på 16,3 L/s.

I tabel 11 ses beregnede bundforskydningsspændinger og de ækvivalente sandruheder for gydebanken i den aflange strørende ved en vandføring på 16,3 L/s. Det ses, at bundforskydningsspændingerne er størst på forsiden og toppen af hver del af gydebanken, mens de er lavest på bagsiden af hver del af gydebanken.

For målepunkterne 100 cm, 120 cm og 170 cm kunne det logaritmiske hastighedsprofil ikke tilpasses tilfredsstillende til det målte hastighedsprofil. Alligevel estimeres bundforskydningsspændingerne ved anvendelse af en middelværdi af den ækvivalente sandruhed for de øvrige målepunkter. Friktionshastigheden bestemmes herefter ved anvendelse af ligning (16):

$$u = A_1 \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + 8,5KA_1 \quad (16)$$

Hastighedsprofilerne målt ved 11,0 L/s og 6,4 L/s kunne heller ikke tilpasses det logaritmiske hastighedsprofil, og da den ækvivalente sandruhed ændres med vandstand og vandføring, kan bundforskydningsspændingerne ikke estimeres ved anvendelse af en middelværdi af den ækvivalente sandruhed bestemt ved en vandføring på $Q = 16,3$ L/s [Kopecki, 2008].

Tabel 11. Bundforskydningsspændinger (N/m^2), de ækvivalente sandruheder (mm) før og over gydebanken ved en vandføring på $Q = 16,3$ L/s, korrelationskoefficienten R^2 og nulpunktet for ligning (6).

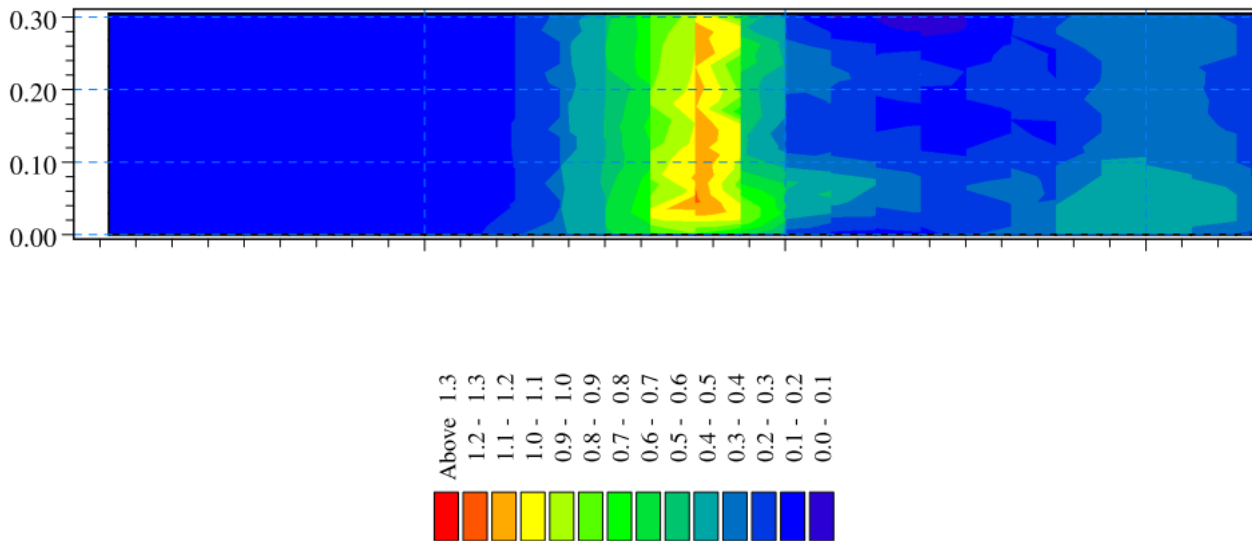
Målepunkt (cm)	0	50	60	70	100	120	150	170
τ_0 (N/m^2)	0,1	0,7	2,4	9,8	1,6	0,7	7,2	1,8
k_s (mm)	0,04	58	51	50	53	53	51	53
R^2	0,95	0,99	0,89	0,84	0,61	0,61	0,98	0,67
z (mm)	0,05	1,5	1,1	1,2	0,5	1,8	1,7	0,5

Målepunktet 0 cm placeret 50 cm opstrøms gydebanken opfylder ikke kornenes Reynolds tal. Ligning (9) anvendes alligevel, selvom hastighedsprofilen for en glat væg skulle anvendes, da overensstemmelsen mellem ligning (9) og det målte hastighedsprofil er god i henhold til korrelationskoefficienten.

8.3.3 Hydraulisk model af gydebanke

De hydrauliske forhold, der kendetegner en lille infiltration og akkumulering af fint sediment i en gydebanke, blev bestemt i afsnit 8.3.1. En middelstrømhastighed på 0,14 m/s i vandsøjlen over sedimentet opstrøms en gydebanke og en gennemsnitlig bundforskydningsspænding på 0,05 N/m^2 giver en gennemsnitlig infiltrationsrate på 0,18 $kg/m^2/dag$ svarende til en akkumulering af 2 cm sediment i en gydebanke. I MIKE 3 FM opsættes en model for den situation, hvor der opstrøms gydebanken er en middelstrømhastighed på 0,14 m/s.

Den øvre randbetingelse i modellen sættes til en strømhastighed på 0,14 m/s, mens den nedre randbetingelse sættes til en vandstand på -0,088 m svarende til en vandstand på 17,2 cm målt ved en vandføring på 6,4 L/s i strørenden. På figur 40 ses de modellerede maksimalstrømhastigheder opstrøms, nedstrøms og over gydebanken. Det ses, at middelstrømhastigheden på 0,14 m/s accelereres og når et niveau på 1 m/s midt på gydebanken.



Figur 40. Modellerede maksimalstrømhastigheder over gydebanken ved en middelstrømhastighed opstrøms gydebanken på 0,14 m/s. Udsnittet er set fra et xy-plan ovenfra. Hvert aksemærke på x-aksen er 0,1 m. Enheden på y-aksen er meter.

Gennemstrømningen i gydebanken er sat til 1,5 L/s igennem den første del af gydebanken og 0,75 L/s igennem den anden del af gydebanken, da disse værdier giver den bedste overensstemmelse med vandstande målt ved en vandføring på 6,4 L/s i strømrønden. Strømhastighederne i modellen er generelt større end de strømhastigheder, der blev målt ved en større vandføring med ADV-proben. Dette skyldes delvist, at ADV-proben ikke kan måle strømhastigheder ved vandspejlet, hvor strømhastighederne generelt er større.

9. Diskussion

Gudenåen ved Vilholt Mølle

Det ses af de opmålte bundniveauer fra Vilholt Stryget og den mellemste strækning i Gudenåen ved Vilholt Mølle, at der ikke er sket betydelige ændringer her. De største ændringer i bundniveau er derimod sket på den øverste strækning opstrøms stemmeværket, hvor bundniveauet er hævet i venstre side (set i nedstrøms retning) og sænket i højre side (set i nedstrøms retning). Der kan findes flere forklaringer på denne udvikling. Der kan være udlagt gydegrus i den venstre side af strækningen. Dette grus koncentrerer vandstrømmen i den højre side, således at denne brink eroderes. Denne erosion vil fortsætte indtil tværsnittet er så bredt, at strømhastigheden er mindre end den kritiske hastighed for erosion af det sediment, der findes i brinken, eller indtil brinkens sediment ændres væsentligt. Der er således ingen mæandring i gang på den øverste strækning. En mæandring på strækningen ville kræve, at der langsomt aflejres materiale i den venstre side af tværsnittet, således at strømmen fortsat vil erodere den højre side og ikke ophøre, så snart vandløbet er for bredt. En anden forklaring på at den øverste strækning bliver bredere gennem erosion af højre side kan være, at tilførslen af sediment er lille i forhold til vandløbets transportkapacitet [Hauer og Lamberti, 2006]. Vestbirk Søerne opstrøms strækningen kan virke som sandfang og reducere tilførslen af sediment. Dette forklarer dog ikke depositionen af sediment i den venstre side. Den store sænkning af bundniveauet på den øverste strækning umiddelbart efter fjernelsen af stemmeværket skyldes erosion af fint sediment, der sedimenteredes på strækningen før fjernelsen af stemmeværket på grund af den lave strømhastighed. Efter fjernelsen blev bundniveauet eroderet ned til samme niveau som umiddelbart før opsætningen af stemmeværket. En tredje forklaring på det forøgede bundniveau i venstre side på den øverste strækning kan således være forøget sedimenttilførsel til danske vandløb i 1900-tallet [Lauge Madsen, 1995].

Der har formentligt været forskellig vandstand og vandføring samt grødevækst ved målingerne af strømhastigheder i Gudenåen i marts 2009 af Winther (2009) og i oktober/november 2010 i denne undersøgelse. På grund af dette kan værdierne ikke umiddelbart sammenlignes. Det vurderes dog, i overensstemmelse med de ubetydelige ændringer i bundniveauet, at strømhastighederne har samme niveau og fordeling på Vilholt Stryget og den mellemste strækning. I overensstemmelse med den erosion i højre side (nedstrøms retning), der ses ved den øverste strækning, er strømhastighederne ved den øverste strækning forskudt mod højre side i forhold til strømhastighederne i Winther (2009).

Generelt dokumenterer de fundne makroinvertebrater i Gudenåen, at der på de tre undersøgte strækninger efter fjernelsen af stemmeværket nu er den samme udbredelse af arter. Slørvingerne *Perlodes* og *Isoperla*, der blev observeret af Winther (2009) efter fjernelsen af stemmeværket, blev genfundet i oktober 2010. Dette betyder, at den øverste strækning efter fjernelsen er præget af grovere substrat, og at *Perlodes* og *Isoperla* er i stand til at opholde sig på strækningen.

Infiltrationsraten af fint sediment i gydebanken i Gudenåen blev bestemt til 0,28 kg/m²/dag. I tabel 4 ses det, at dette svarer til den mindste infiltrationsrate i Rakkeby Å. Hovedårsagen til den mindre infiltrationsrate i Gudenåen i forhold til Rakkeby Å vurderes at være en mindre sedimenttransport. Infiltrationsraterne i andre gydebanker i Vilholt Stryget vurderes dog at være lavere end den målte, da Vilholt Stryget er et dokumenteret produktivt stryg [Skov- og Naturstyrelsen, udateret]. Der er generelt en stor fysisk variation i Vilholt Stryget med nedfaldne træstammer, store sten og strøm på tværs af hovedstrømmen. Pasternack (2008) vurderer, at netop sådanne elementer i et vandløb kan være med til at nedbringe infiltrationsraterne lokalt. Det kan således forventes, at der opstrøms en træstamme aflejres materiale, der ellers ville strømme over nedstrøms beliggende gydebanker. Endvidere kan Vestbirk Søerne opstrøms Vilholt Stryget og det ekstensivt dyrkede landbrug omkring strækningen medføre en mindre tilførsel af sediment. Det sediment, der infiltrerer gydegruset i Vilholt Stryget, er generelt i samme størrelsesorden som sedimentet i Rakkeby Å. Det er uklart, hvorvidt strækningerne opstrøms det tidligere stemmeværk bidrager med betydelige mængder

sediment til Vilholt Stryget. Dokumentation af dette ville kræve måling af infiltrationsraterne i forskellige gydebanks i Vilholt Stryget i perioden umiddelbart efter fjernelsen af stemmeværket. Nødvendigheden af et midlertidigt sandfang i fremtidige projekter af samme slags vurderes dog lille, med mindre de hydrauliske forhold på nedstrøms beliggende stryg er således, at fint sediment ikke vil eroderes fra overfladen af gydegruset men derimod deponeres over gydegruset. Fint sediment, der udfylder porevolumenet i gydegruset, vil kunne fjernes ved ørredens gydning, således at det fine sediment kun bliver et kortvarigt problem.

Rakkeby Å

De gennemsnitlige infiltrationsrater på figur 23 og 24 viser, at der er en svag tendens til større infiltration af fint sediment, når vandføringen i den foregående periode har været høj. Efter den store afstrømningshændelse i januar 2011 stiger infiltrationsraterne i samtlige gydebanks i Rakkeby Å. Ligeledes er der en tendens til lavere infiltrationsrater ved mindre vandføring, eftersom infiltrationsraterne falder i samtlige gydebanks sidst i perioden, der er kendetegnet ved perioder med lavere vandføring. Den svage tendens skyldes, at infiltrationsraterne beskriver infiltrationen af sediment i gydebanks over en periode på omkring en måned. Den relativt korte periode med høj vandføring og stor infiltration af fint sediment bliver således mindre tydelig. Infiltrationsraterne i figur 23 og 24 dækker således over store variationer i perioden. Figur 27 viser ligeledes, at infiltrationsraten stiger med stigende vandføring og dermed bundtransport.

Infiltrationsraterne er i starten af perioden størst i gydebanks B1 og B2 placeret henholdsvis 1600 m og 1500 m nedstrøms sandfanget. Infiltrationsraterne er i den resterende del af perioden betydeligt lavere i samme gydebanks, hvor infiltrationsraten er omkring 1 kg/m²/dag. Der er ikke registreret vandføring i den første del af perioden. Grunden til de højere infiltrationsrater kan være lokal høj og kortvarig tilførsel af sediment til strækningen eller den korte infiltrationsperiode ved første optagelse af infiltrationsbeholdere, så variationerne i infiltrationsraten vil være større.

I perioden fra den 25.11.2010 til den 14.02.2011 er infiltrationsraterne højest i gydebanks V1 placeret 100 m opstrøms sandfanget. Perioden er kendetegnet ved to større afstrømningshændelser med forventeligt stor sedimenttransport. Der er altså mindre infiltration af fint sediment i gydebanks nedstrøms sandfanget i denne periode. På figur 24 ses det dog, at infiltrationsraten i gydebanks V1 placeret 100 m opstrøms sandfanget varierer betydeligt i perioden fra den 13.01.2011 til den 14.02.2011. Standardafvigelsen er 0,78 kg/m²/dag. Enkeltmålinger af infiltrationsraten i gydebanks V1 er i denne periode nede på 1,65 kg/m²/dag. Enkeltmålinger af infiltrationsraten i gydebanks B2 placeret 1500 m nedstrøms sandfanget når i samme periode 1,28 kg/m²/dag. Infiltrationsraten opstrøms sandfanget er i denne periode således på niveau med infiltrationsraterne i gydebanks B1 og B2 placeret henholdsvis 1600 m og 1500 m nedstrøms sandfanget. Dette indikerer, at effekten af sandfanget er ubetydelig 1600 m nedstrøms. Infiltrationsraten i gydebanks V1 placeret 100 m opstrøms sandfanget er på niveau med gydebanks B1 og B2 i perioden efter den 14.02.2011. Perioden er kendetegnet ved en lavere vandføring og forventeligt mindre sedimenttransport, især mindre bundtransport.

Infiltrationsraterne er i hele perioden mindst i gydebanks V3. Dette skyldes delvist sandfanget placeret 250 m opstrøms. Kornstørrelserne i det infiltrerede sediment 100 m opstrøms sandfanget i gydebanks V1 er generelt betydeligt større end i det infiltrerede sediment i gydebanks V3. Mediankornstørrelsen D₅₀ varierer i gydebanks V1 mellem 0,19 mm og 0,37 mm i perioden, mens værdierne for gydebanks V3 varierer mellem 0,12 mm og 0,22 mm. Det tyder således på, at sandfanget reducerer en stor del af det grovere sediment, der transporteres i Rakkeby Å. Denne reduktion kan have indflydelse på den lavere infiltrationsrate i gydebanks V3 placeret 250 m nedstrøms sandfanget. Ved gydebanks B1 placeret 1600 m nedstrøms sandfanget er det infiltrerede sediment igen grovere og sammenligneligt med sedimentet i gydebanks V1. Dette indikerer ingen, at effekten af sandfanget er ubetydelig 1600 m nedstrøms. Det er ikke usandsynligt, at sandfanget er i stand til at sortere de grovere kornstørrelser fra det sediment, der transporteres igen-

nem sandfanget. Det grovere sediment transporteres formentligt som bundtransport. I tabel 7 ses det, at bundtransporten er større over gydebanken V1 placeret 100 m opstrøms sandfanget i forhold til bundtransporten over gydebanken V3 placeret 250 m nedstrøms. På grund af den lavere strømhastighed igennem sandfanget, stopper bundtransporten af sediment fra opstrøms beliggende strækninger i sandfanget indtil dette er fyldt op. Bundtransporten af sediment igangsættes på ny nedstrøms sandfanget, og når formentlig først samme størrelse 1600 m nedstrøms sandfanget jævnfør tabel 7. Kornstørrelserne af det sediment, der blev opsamlet som bundtransport, er dog finere end det sediment, sandfanget forventes at tilbageholde. Jævnfør figur 26 tilbageholder sandfanget generelt sediment større end 0,5 mm, men mediankornstørrelsen for bundtransporten blev bestemt til 0,14 mm. Grunden hertil kan være det generelt mindre indhold af sediment over 0,5 mm i Rakkeby Å eller fordi Helley-Smith-fælden også indsamler suspenderet sediment fra vandfasen umiddelbart over bunden.

Sandfanget har således begrænset effekt på tilbageholdelse af sediment mindre end 0,5 mm og sediment suspenderet i vandfasen. Fuglsang (2010) finder da også, at opholdstiden i de konstruerede sandfang i Nordjyske vandløb generelt er for lille, da sedimentationshastigheden for det fine suspenderede sediment er lille. De gennemsnitlige infiltrationsrater på figur 23 og 24 viser da også, at sandfang generelt har størst effekt på reduktionen af bundtransporten i vandløb. I perioden med lav vandføring og dermed lille bundtransport, er infiltrationsraten i gydebanken V1 placeret 100 m opstrøms sandfanget på niveau med de øvrige gydebanker. Acornley og Sear (1999) finder ligeledes, at det i perioder med lav vandføring primært er suspenderet stof i vandet, der infiltrerer i gydebankerne. Kornstørrelserne for infiltreret sediment i Rakkeby Å i perioder med lavt flow er generelt finere (D_{50} mindre end 0,2 mm) i forhold til perioder med højere vandføring (D_{50} større end 0,2 mm). Værdierne for suspenderet sedimenttransport i tabel 7 ved afstrømningshændelsen i marts 2011 viser da også, at den suspenderede sedimenttransport er større eller på samme niveau nedstrøms sandfanget i forhold til opstrøms sandfanget, hvilket indikerer, at suspenderet sediment blot gennemstrømmer sandfanget uden at sedimentere. Noget tyder dog på, at størrelsen af sandfanget har mindre betydning for, hvilke kornstørrelser der sedimenterer. Sear (1993) finder, at et reservoir opstrøms en opstemning ligeledes fjerner sediment større end 0,5 mm, selvom det har en størrelse på 10 km². Således vil størrelsen af sandfanget kun have betydning for kapaciteten. De to konstruktioner kan dog ikke umiddelbart sammenlignes, da et stort reservoir vil stoppe hele bundtransporten fra opstrøms strækninger i modsætning til et sandfang. Ligeledes forventes forskellige kornstørrelser at være i transport i vandløbsstrækningerne opstrøms. Det vurderes dog, at selve sedimentsorteringseffekten er sammenlignelig.

Selvom sandfanget sandsynligvis er i stand til at reducere tilførslen af sediment større end 0,5 mm til de gydebanker, der er placeret op til 250 m nedstrøms, er effekten på overlevelse af fiskeæg uklar. Netop det fine sediment, der forsætter nedstrøms sandfanget, har lav permeabilitet og kan blokere æggenes membran. Det er således ikke nødvendigvis de mest kritiske kornstørrelser, sandfanget sorterer fra. Selvom sandfanget i bedste fald reducerer infiltrationsraten i gydegrus fem gange nedstrøms i forhold til opstrøms, er infiltrationsraterne stadig store. Selvom infiltrationsraterne reelt ikke kan anvendes til at forudsige, hvornår en gydebanke er fyldt med sediment, angives i tabel 12 alligevel værdier for infiltrationsraterne i kg sediment/m²/dag omregnet til cm sediment/dag for at illustrere, hvor hurtigt det fine sediment akkumulerer.

Tabel 12. Infiltrationsrater i cm/dag og i kg/m²/dag.

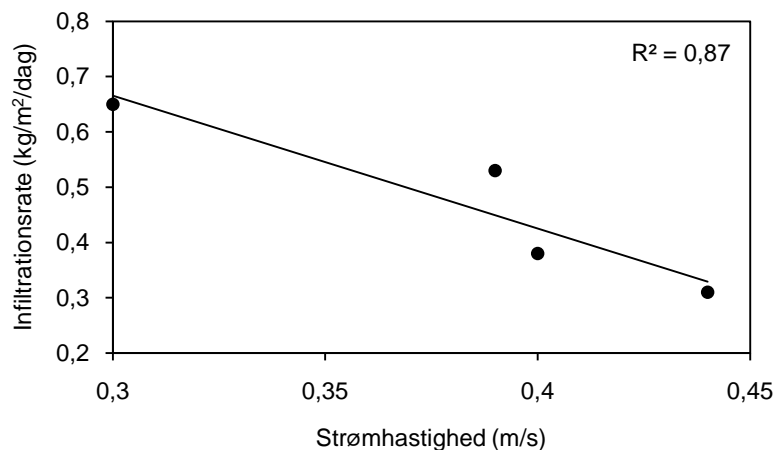
Infiltrationsrate (kg/m ² /dag)	Infiltrationsrate (cm/dag)
0,5	0,05
1	0,09
1,5	0,14
2	0,19
2,5	0,24

Lægges æggene i gydebanken under 15 cm gydegrus og det fine sediment infiltrerer fra bunden, vil fiskeæggene være dækket af 6 cm fint sediment efter en inkubationsperiode på 120 dage såfremt infiltrationsraten er 0,5 kg/m²/dag. Netop denne infiltrationsrate findes generelt i gydebanken V3 placeret 250 m nedstrøms sandfanget. I dette tilfælde vil det sandsynligvis være æg, der netop ikke er lagt i en dybde på præcis 15 cm, der overlever. Det er i ovenstående beregning antaget, at gydebanken er helt fri for fint sediment efter gydning. Dette er ikke tilfældet i naturlige gydebanker.

Resultaterne for infiltrationsraterne i gydebankerne viser også, at der generelt er lille variation i infiltrationsraten indenfor samme gydebanke. Infiltrationsraterne i gydebanken B1 placeret 1600 m nedstrøms sandfanget på figur 25 illustrerer denne tendens. Infiltrationsbeholderne i gydebanken B1 blev placeret under forskellige hydrauliske forhold med højere strømhastighed og fald over de nederste beholdere (nedstrøms retning) i forhold til de øverste beholdere, hvilket figur 6 og figur 33 (højre) illustrerer. Der ses imidlertid ingen systematik i forhold til infiltrationsraterne i gydebanken. Resultaterne indikerer derfor, at det primært er den totale sedimenttransport over tværsnittet af vandløbet, der har betydning for infiltrationsraten. Den variation i infiltrationsrate, der ses i gydebankerne i måleperioden, kan således også tilskrives forskelle i sedimenttilførsel og transportevne lokalt opstrøms gydebankerne. Lauge Madsen (1995), Sear (1993) og Carling og McCahon (1987) finder lignende resultater.

De hydrauliske forhold over gydebankerne og de morfologiske udformninger af gydebankerne kan dog også have en betydning for infiltrationsraterne. Dette bekræftes af Sear (1993). Især vurderes de hydrauliske og morfologiske forhold ved gydebanken V3 placeret 250 m nedstrøms sandfanget at forklare noget af den reduktion, der sker i infiltrationsraten her i forhold til gydebanken V1 placeret 100 m opstrøms sandfanget. I tabel 8, 9 og 10 samt på figur 32, 33 og 34 ses de hydrauliske og morfologiske forhold, der kendetegner gydebankerne. Der er generelt en lavere strømhastighed og bundforskydningsspænding over gydebanken V1 placeret 100 m opstrøms sandfanget i forhold til gydebankerne V3, B1 og B2 placeret henholdsvis 250 m, 1600 m og 1500 m nedstrøms sandfanget. Den lavere vertikale udstrækning af gydebanken V1 i forhold til gydebankerne V3, B1 og B2 giver desuden anledning til en lavere trykgradient over gydebanken og dermed en mindre gennemstrømning af vand. De hydrauliske og morfologiske forhold ved gydebanken V2 placeret umiddelbart 25 m nedstrøms sandfanget kan dog sammenlignes med forholdene ved gydebanken V1 placeret 100 m opstrøms sandfanget. Der er ingen registrering af infiltrationsraterne i gydebankerne V1 og V2 i den samme forudgående periode. Dog vurderes sandfanget at have en lignende effekt på gydebanken V2 som på gydebanken V3, da kornstørrelserne i det infiltrerede sediment i gydebanken V2 er betydeligt mindre end kornstørrelserne i det sediment, der er infiltreret i gydebanken V1. Såfremt sandfanget var den eneste forklaring på de lavere infiltrationsrater nedstrøms sandfanget i forhold til opstrøms sandfanget, ville infiltrationsraterne i gydebanken V2 placeret 25 m nedstrøms sandfanget være på niveau med infiltrationsraterne i gydebanken V3 placeret 250 m nedstrøms sandfanget. På figur 23 ses det dog, at infiltrationsraten sidst i perioden i gydebanken V2 er dobbelt så stor som infiltrationsraten i gydebanken V3.

Sammenholdes netop infiltrationsraterne i gydebankerne V2, V3, B1 og B2 i den sidste del af perioden med medianstrømhastigheden over gydebankerne for hele perioden fås korrelationen på figur 41. Medianstrømhastigheden anvendes for at undgå effekten af kortvarige og høje strømhastigheder. Korrelationen indikerer, at der i nogen grad er resuspension af især helt fint sediment over gydebanker med høj strømhastighed og bundforskydningsspænding, men formentligt kun fra overfladegruset.



Figur 41. Korrelation mellem infiltrationsrate og medianstrømhastighed.

Netop de større trykgradienter over gydebankerne V3, B1 og B2 vurderes at have stor effekt på overlevelsen af æg. Ved høj vandstand forsvinder trykgradienten, og en mindre andel af overfladevandet med højt indhold af suspenderet sediment kan infiltrere gydebankerne. Ved lav vandstand gennemstrømmer derimod overfladevand med et betydeligt mindre indhold af suspenderet sediment. Fint sediment vil dog også kunne reducere effekten af god gennemstrømning i gydebankerne. Fiskeæg kræver generelt mindst en gennemstrømning på 0,01 mm/s til 0,05 mm/s [Zimmermann og Lapointe, 2005b]. Antages en hydraulisk konduktivitet for gydegruset i Rakkeby Å at være 3 cm/s umiddelbart efter gydning i henhold til Zimmermann og Lapointe (2005b), fås en gennemstrømningshastighed på 0,33 mm/s ved gydebanken V3 placeret 250 m nedstrøms sandfanget. Zimmermann og Lapointe (2005b) finder, at en akkumulering af sediment (< 2 mm) på 7 kg/m² er i stand til at reducere gennemstrømningshastigheden med mellem 0,2 mm/s til 1 mm/s.

Infiltrationsraterne i gydebanks i vandløb forskellige steder i verden er blevet dokumenteret ved anvendelse af infiltrationsbeholdere. I tabel 13 ses en oversigt over infiltrationsraterne i andre undersøgelser sammenlignet med infiltrationsraterne i denne undersøgelse angivet i kg sediment per m² per dag. I tabel 14 ses mediankornstørrelsen for gydegrus, den generelle koncentration af suspenderet sediment og Unit Stream Power for vandløbene i tabel 13. Vandløbets Unit Stream Power (W/m²) beregnes som (17). Unit Stream Power-værdier større end 35 W/m² kendetegner høje energivandløb, hvor gydegruset generelt mobiliseres [Acornley og Sear, 1999].

$$\Omega = \frac{\rho g Q S}{b} \quad (17)$$

ρ er vands densitet (kg/m³), g er tyngdeaccelerationen (m/s²), Q er vandføring (m³/s), S er vandspejlets fald (m/m) og b er vandløbets bredde (m).

Tabel 13. Sammenligning af infiltrationsrater.

Vandløb	Infiltrationsrate (kg/m ² /dag)	Kilde
Rakkeby Å	0,31 – 3,52	Denne undersøgelse
Gudenå	0,28	Denne undersøgelse
Amerikansk vandløb	9 – 133 (højt flow)	Lisle (1989)
Engelsk vandløb	0,01 – 0,41	Acornley og Sear (1999)
Engelsk vandløb	0,24 – 4,4	Frostick <i>et al.</i> (1984)
Engelsk vandløb	0,004 – 1,6	Sear (1993)
Engelsk vandløb	0,01 – 1,4	Carling og McCahon (1987)
Engelsk vandløb	0,01 – 0,64	Walling og Amos (1994)

Tabel 14. Karakteristika for vandløbene i tabel 13.

D ₅₀ for gydegrus (mm)	SS (mg/L)	Ω (W/m ²)	Kilde
29	63 – 250 (højt flow)	0,3 – 33,4	Denne undersøgelse (Rakkeby Å)
28	5 – 26	-	Denne undersøgelse (Gudenå)
21 – 25	50 – 2000	30 – 91	Lisle (1989)
21,6 – 36,6	1 – 225	6,4 – 9,5	Acornley og Sear (1999)
27	10 – 2000	25,7	Frostick <i>et al.</i> (1984)
54	4 – 442	95	Sear (1993)
20	1 – 80	15,3	Carling og McCahon (1987)
22,6	4 – 700	5,2	Walling og Amos (1994)

Infiltrationsraterne i gydegruset i Rakkeby Å er generelt større end infiltrationsraterne i fem ud af de syv øvrige undersøgelser. Undersøgelserne i tabel 13 og 14 dokumenterer, at det primært er sedimenttransportens størrelse, der styrer infiltrationsraten. Endvidere tyder undersøgelserne på, at gydegrus i højenergivandløb generelt kan have en mindre infiltrationsrate på grund af mobilisering af gydegrus. I lavenergivandløb som Rakkeby Å er gydegruset immobilt og depositionen af sediment er generelt større end erosionen.

I andre undersøgelser findes generelt, som i Rakkeby Å, at infiltreret sediment er mindre end 2 mm. Heywood og Walling finder, at det primært er kornstørrelserne mellem 0,063 mm og 2 mm, der infiltrerer. I samme undersøgelse er 98 % af det suspenderede sediment mindre end 0,063 mm. Zimmermann og Lapointe (2005a) finder, at 80 % af det infiltrerede sediment er større end 0,25 mm og dermed sandsynligvis bundtransport. Ved lavt flow finder Acornley og Sear (1999), at 70-80 % af det infiltrerede sediment er mindre end 0,25 mm og dermed primært suspenderet sediment. Soulsby *et al.* (2001) finder, at alt infiltreret sediment er mindre end 2 mm, hvoraf 60 % er mindre end 1 mm. Undersøgelserne i Rakkeby Å tyder ligeledes på, at både suspenderet sediment og bundtransport infiltrerer gydegruset.

Der kan udpeges en række årsager til, at infiltrationsraterne af fint sediment generelt er store i Rakkeby Å i forhold til for eksempel Gudenåen og andre vandløb i tabel 13. Den primære årsag er den forhøjede tilførsel af fint sediment til vandløbet fra opdyrkede arealer i oplandet. Ved store afstrømningshændelser vil især arealer, der skrånede ned mod vandløbet, bidrage med betydelige mængder sediment. 2-meter-bræmmen er ikke alle steder tilstrækkelig til at forhindre, at sedimentet finder ned til vandløbet. Derudover vurderes Rakkeby Å at have en ustabil dimension i forhold til den jordbund, den løber igennem. Ved tidligere reguleringer af åen blev den stabile vandløbsbund fjernet. Vandløbet blev gravet ned i terræn for at sænke grundvandsstanden, men fremstår i dag ikke umiddelbart bredgjort. For at opnå en stabil vandløbsdimension i det fine sand, som vandløbsbunden består af i dag, skulle Rakkeby Å gøres bredere for at nedsætte strømningshastigheden. Simons og Sentürk (1992) angiver, at en kanal udgravet i fint sand maksimalt må have en strømhastighed på 0,46 m/s for at være stabil. Denne strømhastighed overskrider mange steder i

Rakkeby Å ved høj vandføring. Resultatet er ustabile brinker og dermed forøget sedimenttransport. Det vil dog ikke være en fornuftig løsning at gøre vandløbet bredere for at reducere sedimenttransporten på grund af den medfølgende reduktion i habitatudvalg.

En anden mulig årsag til de forhøjede infiltrationsrater kan være den store forskel i størrelse mellem gydegrusets porer og det fine sediment, der infiltrerer. Gydegruset i Rakkeby Å har en mediankornstørrelse på 29 mm svarende til, at poremellemrummene tilnærmelsesvis er 11,6 mm. Da det sediment, der infiltrerer gydegruset, generelt er mindre end 1 mm, forventes det meste af sedimentet at infiltrere fra bunden af gydebanken og videre op. Der er således ikke stor mulighed for dannelse af et låg på overfladen af gydebanken, der potentielt kan forhindre yderligere akkumulering af fint sediment. I denne sammenhæng kan sandfang måske ligefrem have en negativ effekt på grund af frasortering af større sandkorn, der potentielt kan danne et låg. Gydegruset i Gudenåen ligner gydegruset i Rakkeby Å, men kun for fraktionerne over 6 mm. En del sediment mindre end 6 mm blev ikke medtaget i analysen. Diplas og Parker (1985) finder for naturlige vandløb, at den største kornstørrelse i det sediment, der infiltrerer, er lig den mindste kornstørrelse i gydegruset. Carling og McCahon (1987) finder, at eneste krav til gydegrus bør være, at det er over 2 mm.

Det grove gydegrus i Rakkeby Å medfører desuden, at gydegruset ikke mobiliseres ved højt flow. Som beskrevet i afsnit 3 har mobilt gydegrus generelt et mindre indhold af fint sediment. De maksimale bundforskydningsspændinger ved gydebankerne V1, V2, V3 og B1 varierer mellem 19,1 N/m² og 45,5 N/m², mens den maksimale bundforskydningsspænding er 101,9 ved gydebanken B2. For at mobilisere gydegrus med en mediankornstørrelse på 29 mm skal der, i henhold til Shields Parameter (2), virke en bundforskydningsspænding på omkring 50 N/m² over gydegruset. Denne bundforskydningsspænding virker kun over gydebanken B2. Gydegruset er dog sandsynligvis ikke mobiliseret her alligevel, da der i gydegruset findes sten over 60 mm, der ikke mobiliseres ved en bundforskydningsspænding på 101,9 N/m² og derfor kan forhindre mobilisering af mindre kornstørrelser. Der er dog problemer med at udlægge mobilt gydegrus i et vandløb som Rakkeby Å. Gydegruset vil blive spredt og dækket af sediment, da der ikke er en naturlig transport af grus i vandløbet, der kan supplere udlægningen.

På grund af de forhøjede infiltrationsrater i Rakkeby Å selv nedstrøms sandfanget, er den reelle effekt af sandfang uklart. Især vurderes selve kapaciteten af sandfanget at være for lille til at magasinere alt bundtransporteret sediment i vandløbet. Derudover er det uklart, hvor kort nedstrøms sandfanget sedimenttransporten når samme størrelse som opstrøms. Pasternack (2008) angiver også, at der efter konstruktion af et sandfang ikke blev observeret et større antal yngel nedstrøms. Hvorvidt andre parametre end sediment er skyld i dette angives ikke.

Laboratorieforsøg

Forsøget i den cirkulære strømmende gengiver principperne i sedimenttransporten i Rakkeby Å. Der ses en stigende infiltrationsrate i gydegruset med stigende strømhastighed og bundforskydningsspænding over det løse og fine sediment (< 2 mm) opstrøms gydebanken. Dette indikerer ligeledes, at det er den totale sedimenttransport over gydebanken, der har betydning for infiltrationsraten. Forsøget i strømmenden viser, at strømhastigheden over fint sediment af den type, der findes i Rakkeby Å, skal være lille, før sedimenttransporten bliver ubetydelig i forhold til gydegrusets fysiske kvalitet og for at vandløbets dimension er stabil. Selvom infiltrationsraten vil kunne nedsættes med lavere strømhastighed, og selvom strømhastigheden over gydegruset vil være tilstrækkelig høj, vil gennemstrømningen af iltrigt vand i gydegruset formentligt ikke være tilstrækkelig. Principet med lav strømhastighed umiddelbart opstrøms gydegrus kendes også fra mæanderende vandløb. Strømhastigheden i høllet er generelt lav og sediment transporteret over stryget aflejres på indersiden af mæanderen. Infiltrationsraterne i forsøget i den cirkulære strømmende er ikke absolutte, da de hydrauliske forhold i den cirkulære strømmende ikke kan sammenlignes med forholdene i et vandløb. I den cirkulære strømmende er trykgradienten over gydebanken hele tiden 0 m/m på grund af låget, og strømhastigheden er højest langs den ydre væg. Derudover er det sediment,

der anvendes i strømrønden, mere løst pakket i forhold til det fluviale sediment. Desuden er sedimenttilførslen i strømrønden ikke begrænsende for sedimenttransporten og dermed infiltrationen af sediment i gydegruset. I et naturligt vandløb medvirker vegetation endvidere til øget strømmodstand og dermed mindre sedimenttransport. Disse forhold gør samlet, at infiltrationsraten generelt overestimeres i den cirkulære strømrønde. De uforudsigelige afstrømningsforhold i et naturligt vandløb gør desuden, at sammenhængen mellem bundforskydningsspænding og infiltrationsrate i den cirkulære strømrønde ikke umiddelbart kan overføres til virkeligheden.

Forsøget i den aflange strømrønde illustrerer, hvordan en forhøjning af gydegrus i et vandløb kan skabe et kunstigt gydehabitat i form af et hydraulisk spring, der skaber en trykgradient og en acceleration af strømhastigheden. Forsøget illustrerer ligeledes, at gydebankens morfologi kan have betydning for infiltrationsraten. I tabel 11 ses det, at bundforskydningsspændingen er størst på forsiden af gydebanken og mindst på bagsiden. Denne fordeling vil medføre, at der generelt er erosion af fint sediment på forsiden, mens der er akkumulering af fint sediment på bagsiden. Forsøget illustrerer dermed også, at udlægning af gydegrus fladt over et længere stykke af vandløbsbunden formentligt vil føre til større infiltrationsrate af fint sediment i forhold til gydegrus, der placeres som forhøjninger over bunden. Der er væsentlige skalaforskelle i beregningen af bundforskydningsspændingen over gydebanken i strømrønden og langs den undersøgte strækning i Rakkeby Å i MIKE 11. I MIKE 11 beregnes bundforskydningsspændingen over tværsnittet, som generelt har en hydraulisk radius på > 1 m. I strømrønden beregnes bundforskydningsspændingen over et stykke grus med en mediankornstørrelse på 29 mm. Disse forhold gør, at bundforskydningsspændingerne beregnet i MIKE 11 primært vil kunne anvendes til at forudsige erosion og deposition af sediment på strækningsskala, mens mere nøjagtige beregninger af bundforskydningsspændinger er krævet for at forudsige forholdene på den enkelte gydebanke.

Der er i projektet konstateret en række problemer ved anvendelse af hydrauliske modeller til beskrivelse af strømforhold i strømrønder og vandløb. Ofte skal kalibreringsparametrene ændres til urealistiske værdier for at opnå den bedste overensstemmelse mellem modellerede og målte værdier. Selvom resultaterne af de hydrauliske modeller ikke er absolutte, vurderes de umiddelbart godt at kunne anvendes i de tilfælde, hvor den relative forskel mellem strækninger og mellem forskellige betingelser ønskes belyst.

10. Konklusion

Effektstudier af store og mindre vandløbsrestaureringsprojekter kan udføres ved hjælp af relativt simple metoder, der giver information omkring restaureringens betydning for vandløbets geomorfologi, hydraulik og dyreliv. Et fuldt og præcist effektstudie kræver, at der foretages registreringer af forholdene i vandløbet før restaureringen for at kunne isolere effekten af projektet.

Der sker kun geomorfologiske ændringer i Gudenåen på den strækning, der ligger opstrøms det tidligere stemmeværk. Denne strækning er derfor stadig ikke fuldstændig stabil. Nedstrøms beliggende strækninger er uændrede to år efter fjernelsen af stemmeværket. Infiltrationsraten af fint sediment i en gydebanke i Vilholt Stryget er lav i forhold til infiltrationsrater i Rakkeby Å, men infiltrationsraten er dog højere end forventet. Dette er formodentligt et udtryk for en stor variation i infiltrationen af fint sediment i gydebankerne i Vilholt Stryget. Nødvendigheden af midlertidige sandfang vurderes lille, da det fine sediment kan transporteres over stryg, og da det sediment, der akkumulerer i gydegruset, fjernes ved næste gydning.

Der ses en svag tendens til større infiltrationsrater ved store afstrømningshændelser i Rakkeby Å på grund af igangsættelse af bundtransport. Infiltreret sediment er generelt mindre efter perioder med lille vandføring, mens grovere sediment, der primært transporteres som bundtransport, infiltrerer i perioder med høj vandføring. Det vurderes dog, at det overvejende er sediment transporteret som bundtransport, der infiltrerer gydegruset i Rakkeby Å.

Sandfanget i Rakkeby Å sorterer primært kornstørrelser over 0,5 mm og dermed bundtransport fra den samlede sedimenttransport. Dette skyldes en generel underdimensionering af sandfanget. Infiltrationsraten af fint sediment i gydegrus reduceres omkring fem gange mindst 250 m nedstrøms sandfanget i perioder med store afstrømningshændelser og dermed stor bundtransport. 1500 m nedstrøms er effekten ubetydelig. Effekten af sandfanget er desuden ubetydelig ved lav vandføring. Hydrauliske og morfologiske forhold ved gydebankerne nedstrøms sandfanget kan forklare noget af den reduktion, der sker i infiltrationsraten. Sandfanget fjerner ikke de kornstørrelser, der er mest kritiske for overlevelsen af æg i gydegrus. Sandfang kan dog være en midlertidig og omkostningseffektiv løsning på problemet med infiltration af fint sediment i gydegrus. For at afklare den præcise effekt af sandfanget, skal de hydrauliske og morfologiske forhold over gydebankerne opstrøms og nedstrøms sandfanget være ens. Det skal endvidere understreges, at det vil kræve undersøgelser af flere sandfang af samme type i forskellige vandløb for endeligt at kunne afklare effekten af sandfang. Derudover vil det kræve undersøgelser af sandfang, der er anlagt på baggrund af forskellige dimensioneringsprincipper. Konklusionerne i dette projekt er i bedste fald kun gældende for sandfanget i Rakkeby Å.

Der er konstateret en række årsager til de høje infiltrationsrater i Rakkeby Å. Manglende mobilitet af gydegruset og manglende overlap i kornstørrelsesfordeling mellem gydegrus og infiltreret fint sediment kan være to forklaringer. Dette betyder, at fint sediment akkumulerer i gydegruset i løbet af inkubationsperioden og først fjernes ved næste gydning. Der er kun mulighed for at de øverste få centimeter af gydegruset friskylles for sediment. Det er dog primært den totale sedimenttransport over gydegruset i Rakkeby Å, der styrer infiltrationsraten.

For at nedbringe infiltrationsraten skal tilførslen af sediment til vandløbet fra oplandet derfor reduceres, vandløbet skal stabiliseres og vandløbets evne til at magasinere sediment skal fjernes. Dette kan ske gennem etablering af større bræmmer langs vandløbene, ved hævelse af vandløbet i terrænet og ved udlægning af groft substrat i hele vandløbet. Dette vil dog ikke være omkostningseffektive løsninger. En omkostningseffektiv løsning kunne være at udføre restaureringsprojekter med udlægning af gydegrus på de strækninger i et vandløbssystem, hvor tilførslen af sediment er lille. Dette kunne eksempelvis være i skovområder og på de øverste strækninger i et vandløb.

På grund af den manglende direkte sammenhæng mellem hydrauliske parametre og infiltrationsraten af fint sediment i gydegrus samt den uforudsigelige natur af sedimenttransporten i vandløb, vurderes det ikke muligt at bruge en hydraulisk model til at forudsige infiltrationsrater i gydegrus.

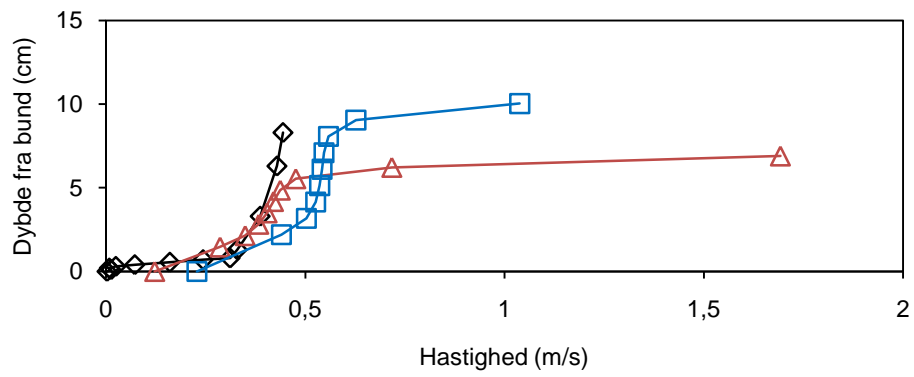
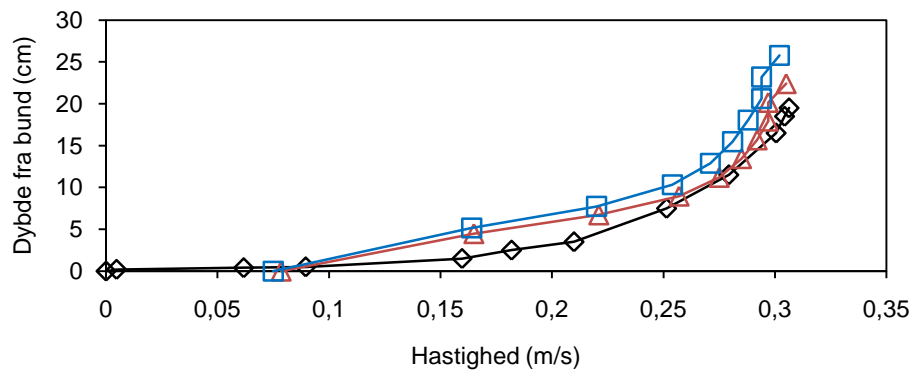
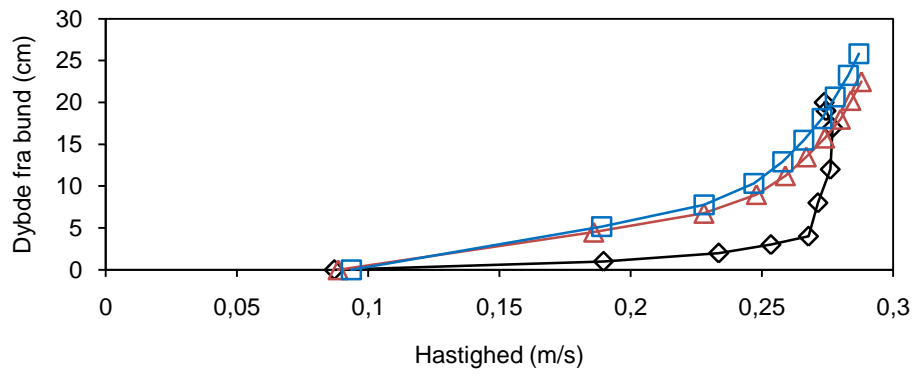
Referencer

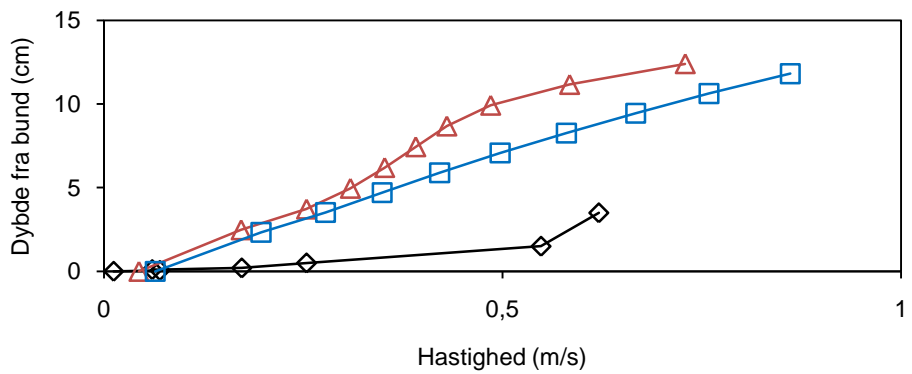
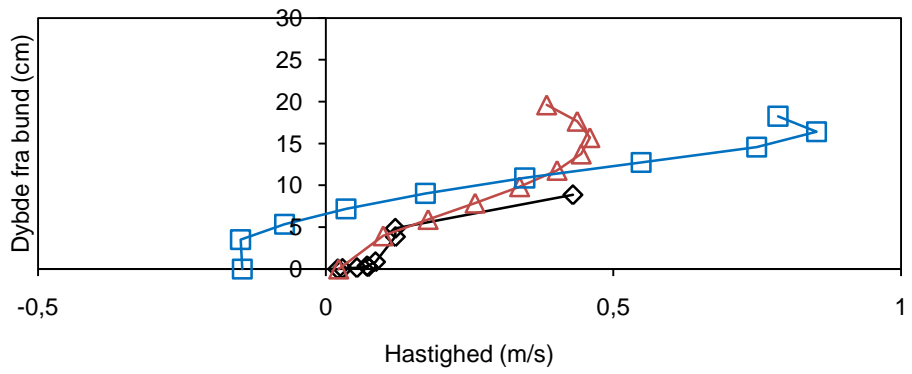
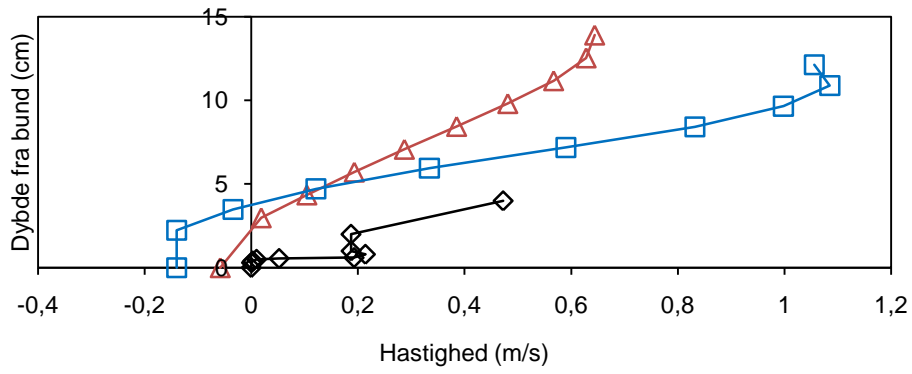
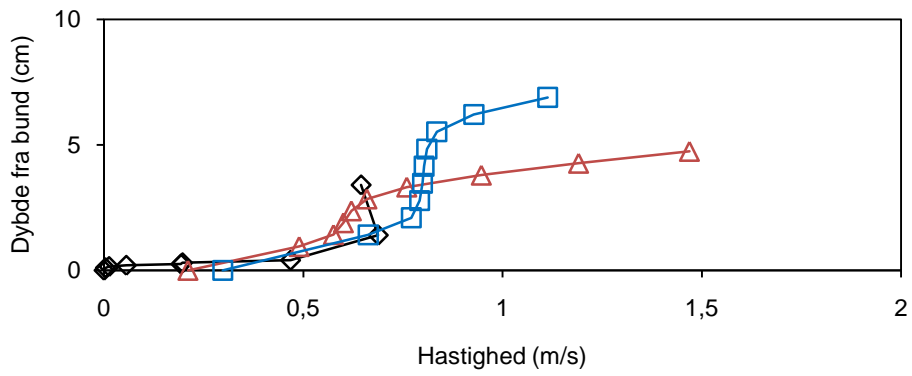
- Acornley, R.M. and Sear, D.A. (1999): Sediment transport and siltation of brown trout (*Salmo trutta* L.) spawning gravels in chalk streams. *Hydrological Processes* 13: 447-458 (1999).
- Allen, K.R. (1951): The Horokiwi Stream. A Study of a Trout Population. New Zealand Marine Department. Fisheries Bulletin No. 10.
- Allen, J.R.L. (1964): A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments. *Sedimentology* 5 (1965) 89-191.
- Alonso, C.V., Theurer, F.D. og Zachmann, D.W. (1996): Sediment Intrusion and Dissolved-Oxygen Transport Model – SIDO. Technical Report No. 5. USDA-ARS National Sedimentation Laboratory (1996).
- Andersen, J.M. (red.) (2005): Restaurering af Skjern Å. Sammenfatning af overvågningsresultater 1999-2003. Danmarks Miljøundersøgelser. 96 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 531.
- Barlaup, B.T., Gabrielsen, S.E., Skoglund, H. og Wiers, T. (2008): Addition of spawning gravel – a means to restore spawning habitat of Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.), and anadromous and resident brown trout (*Salmo trutta* L.) in regulated rivers. *River Research and Applications* 24: 543-550 (2008).
- Bockelmann-Evans, B.N., Davies, R. og Falconer, R.A. (2008): Measuring bed shear stress along vegetated river beds using FST-hemispheres. *Journal of Environmental Management* 88 (2008) 627-637.
- Boillat, J. og Lavelli, A. (1999): Surface roughness determination based on velocity profile measurements. 2nd International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering.
- Brorson, M. og Larsen, T. (2007): Lærebog i hydraulik. Aalborg Universitetsforlag. ISBN 9788773076910.
- Brown, R.A. og Pasternack, G.B. (2009): Comparison of methods for analysing salmon habitat rehabilitation designs for regulated rivers. *River Research and Applications* 25: 745-772 (2009).
- Bunte, K. og MacDonald, L.H. (1995): Detecting Change in Sediment Loads: where and how is it possible? Effects of Scale on Interpretation and Management of Sediment and Water Quality. IAHS Publication No. 226.
- Carling, P.A. og McCahon, C.P. (1987): Natural Siltation of Brown Trout (*Salmo trutta* L.) Spawning Gravels During Low-Flow Conditions. *Regulated Streams – Advances in Ecology*. Redigeret af Craig, J.F. og Kemper, J.B. (1987).
- Chanson, H. (2004): The hydraulics of open channel flow: an introduction. Second Edition. Elsevier. BH. ISBN 9780750659789.
- Dall, P.C. og Lindegaard, C. (1995): En oversigt over danske ferskvandsinvertebrater til brug ved bedømmelse af forureningen i søer og vandløb. Ferskvandsbiologisk Laboratorium. Københavns Universitet. ISBN 8789143132.
- DeVries, P. (2008): Bed Disturbance Processes and the Physical Mechanisms of Scour in Salmonid Spawning Habitat. *American Fisheries Society Symposium* 65: 149-173 (2008).
- DHI (2009): MIKE 11: A modelling system for rivers and channels. User guide. DHI (2009).
- Diplas, P. og Parker, G. (1985): Pollution of Gravel Spawning Ground due to Fine Sediment. Project Report No. 240. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory. University of Minnesota.
- Einstein, H.A. (1968): Deposition of suspended particles in a gravel bed. *Journal of the Hydraulics Division*. Vol. 94. No. HY5 (1968).
- Ferreira, R.M.L., Ferreira, L.M., Ricardo, A.M. og Franca, M.J. (2010): Impacts of sand transport on flow variables and dissolved oxygen in gravel-bed streams suitable for salmonid spawning. *River Research and Applications* 26: 414-438 (2010).
- Fries, J.S. og Taghon, G.L. (2010): Particle Fluxes into Permeable Sediments: Comparison of Mechanisms Mediating Deposition. *Journal of Hydraulic Engineering*. April 2010.
- Frost, W.E. og Brown, M.E. (1967): The Trout. The New Naturalist. NMN Collins. St. James's Place, London (1967).

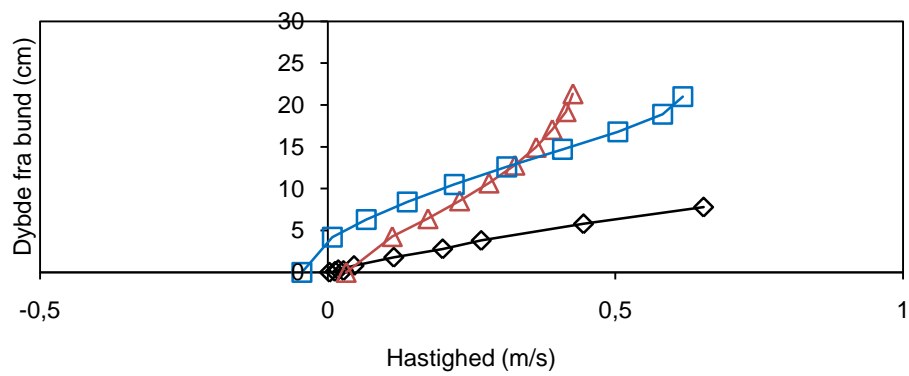
- Frostick, L.E., Lucas, P.M. og Reid, I. (1984): The infiltration of fine matrices into coarse-grained alluvial sediments and its implications for stratigraphical interpretation. *Journal of the Geological Society* 1984, v. 141, s. 955-965.
- Fuglsang, E. (2010): Modellering af sandfang i vandløb. Specialeopgave fra Aalborg Universitet.
- Greig, S.M., Sear, D.A. og Carling, P.A. (2005): The impact of fine sediment accumulation on the survival of incubating salmon progeny: Implications for sediment management. *Science of the Total Environment* 344 (2005) 241-258.
- Greig, S.M., Sear, D.A. og Carling, P.A. (2007): A review of factor influencing the availability of dissolved oxygen to incubating salmonid embryos. *Hydrological Processes* 21. 323-334 (2007).
- Hansen, H.O. (red.) (1996): Vandløbsrestaurering – eksempler og erfaringer fra Danmark (1996). Danmarks Miljøundersøgelser. 136s. – Faglig rapport fra DMU nr. 151.
- Hansen, H.O. og Baattrup-Pedersen, A. (2006): *Running Waters – Historical development and restoration of lowland Danish streams*. National Environmental Research Institute, Denmark. ISBN 9788777729294.
- Hauer, F.R. og Lamberti, G.A. (2006): *Methods in Stream Ecology*. Second Edition. AP. ISBN 9780123329080.
- Heywood, M.J.T. og Walling, D.E. (2007): The sedimentation of salmonid spawning gravels in the Hampshire Avon catchment, UK: implications for the dissolved oxygen content of intragravel water and embryo survival. *Hydrological Processes* 21: 770-788 (2007).
- Holmes, N.T.H. og Nielsen, M.B. (1998): Restoration of the rivers Brede, Cole and Skerne: a joint Danish and British EU-LIFE demonstration project, I – setting up and delivery of the project. *Aquatic Conversion: Marine and Freshwater Ecosystems*. 8: 185-196 (1998).
- Iversen, H.L. og Ovesen, N.B. (1997): Vandføringsevne i danske vandløb 1976-1995. 2. udgave. Danmarks Miljøundersøgelser. 56 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 218.
- Johansen, C. (1998): Dynamics of cohesive sediments. Department of Civil Engineering Aalborg University. Series paper 16.
- Julien, H.P. og Bergeron, N.E. (2006): Effect of fine sediment infiltration during the incubation period on Atlantic salmon (*Salmo salar*) embryo survival. *Hydrobiologia* (2006) 563: 61-71.
- Kondolf, G.M., Sale, M.J. og Wolman, M.G. (1993): Modification of Fluvial Gravel Size by Spawning Salmonids. *Water Resources Research*. Vol. 29, No. 7, s. 2265-2274 (1993).
- Kondolf, G.M. (2000): Assessing Salmonid Spawning Gravel Quality. *Transactions of the American Fisheries Society* 129: 262-281 (2000).
- Kondolf, G.M., Williams, J.G., Horner, T.C. og Milan, D. (2008): Assessing Physical Quality of Spawning Habitat. *American Fisheries Society Symposium* 65 (2008).
- Kopecki, I. (2008): *Calculational Approach to FST-Hemispheres for Multiparametrical Benthos Habitat Modelling*. University of Stuttgart. ISBN 3933761735.
- Kronvang, B., Græsbøll, P., Svendsen, L.M., Friberg, N., Hald, A.B., Kjellsson, G., Nielsen, M.B., Petersen, B.D. og Ottosen, O. (1994): Restaurering af Gelså ved Bevtoft: Miljømæssig effekt i vandløb og de vandløbsnære arealer. Danmarks Miljøundersøgelser. 88s. – Faglig rapport fra DMU nr. 110.
- Lauge Madsen, B. (1995): Vandløbene – 10 år med den nye vandløbslov. *Miljønyt* nr. 13. Miljøstyrelsen (1995). ISBN 8778103797.
- Louhi, P., Mäki-Petäys, A. og Erkinaro, J. (2008): Spawning habitat of Atlantic Salmon and brown trout: General criteria and intragravel factors. *River Research and Applications*. 24: 330-339 (2008).
- Lisle, T.E. (1989): Sediment transport and Resulting Deposition in Spawning Gravels, North Coastal California. *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 6, s. 1303-1319 (1989).
- Lisle, T.E. og Eads, R.E. (1991): *Methods to Measure Sedimentation of Spawning Gravels*. Res. Note PSW-411. United States Department of Agriculture. Forest Service. Pacific Southwest Research Station.

- Lisle, T.E. og Lewis, J. (1992): Effects of Sediment Transport on Survival of Salmonid Embryos in a Natural Stream: A Simulation Approach. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49: 2337-2344.
- Nielsen, J. (1995): Fiskenes krav til vandløbenes fysiske forhold. Miljøprojekt nr. 293. Miljøstyrelsen (1995).
- Nortek (2011): Manual for ADV-probe. Nortek AS, Norge.
- Pasternack, G.B. (2008): Spawning Habitat Rehabilitation: Advances in Analysis Tools. *American Fisheries Society Symposium* 65: 149-173 (2008).
- Pedersen, M.L., Kristensen, E.A., Kronvang, B. and Thodsen, H. (2009): Ecological effects of re-introduction of salmonid spawning gravel in lowland Danish streams. *River Research and Applications* 25: 626–638 (2009).
- Sear, D.A. (1993): Fine Sediment Infiltration into Gravel Spawning beds within a Regulated River Experiencing Floods: Ecological Implications for Salmonids. *Regulated Rivers*. Vol. 8. Issue No. 4. 373-390 (1993).
- Sear, D.A., Briggs, A. og Brookes, A. (1998): A preliminary analysis of the morphological adjustment within and downstream of a lowland river subject to river restoration. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 8: 167-183 (1998).
- Sear, D.A., Newson, M.D. og Thorne, C.R. (2003): Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology. R&D Technical Report FD1914. ISBN 0855210532.
- Sear, D.A., Frostick, L.B., Rollinson, G. and Lisle, T.E. (2008): The Significance and Mechanics of Fine-Sediment Infiltration and Accumulation in Gravel Spawning Beds. *American Fisheries Society Symposium* 65: 149-173 (2008).
- Skov- og Naturstyrelsen (udateret): Genopretning af Gudenåen ved Vilholt Mølle. Folder udgivet i forbindelse med fjernelsen af stemmeværket ved Vilholt Mølle.
- Simons, D.B. og Sentürk, F. (1992): Sediment Transport Technology. Water Resources Publications. ISBN 0918334667.
- Soulsby, C., Youngson, A.F., Moir, H.J. og Malcolm, I.A. (2001): Fine sediment influence on salmonid spawning habitat in a lowland agricultural stream: a preliminary assessment. *The Science of the Total Environment* 265 (2001) 295-307.
- Wiberg-Larsen, P. (red.) (2010): Vandløb 2008. NOVANA. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. 66 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 764.
- Winther, L. (2009): Genåbning af Gudenåen ved Vilholt Mølle efter 142 års totalspærring. Fysiske og biologiske effekter på vandløbet. Specialeopgave fra Aalborg Universitet.
- Walling, D.E. og Amos, C.M. (1994): River Piddle Action Plan. Report for the Southern Region NRA. University of Exeter.
- Wood, P.J. og Armitage, P.D. (1999): Sediment Deposition in a Small Lowland Stream – Management Implications. *Regulated Rivers: Research and Management*. 15: 199-210 (1999).
- Zimmermann, A.E. og Lapointe, M. (2005a): Sediment infiltration traps: their use to monitor salmonid spawning habitat in headwater tributaries of the Cascapédia River, Québec. *Hydrological Processes*. 19: 4161-4177 (2005).
- Zimmermann, A.E. og Lapointe, M. (2005b): Intergranular Flow Velocity Through Salmonid Redds: Sensitivity to Fines Infiltration From Low Intensity Sediment Transport Events. *River Research and Applications* 21: 865-881 (2005).

Bilag 1

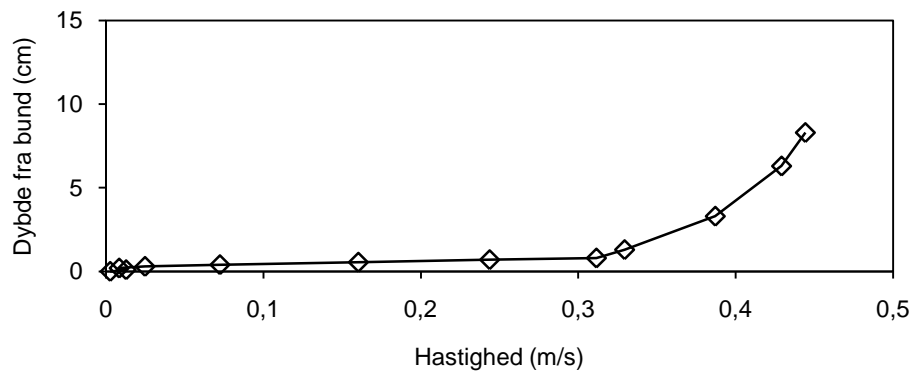
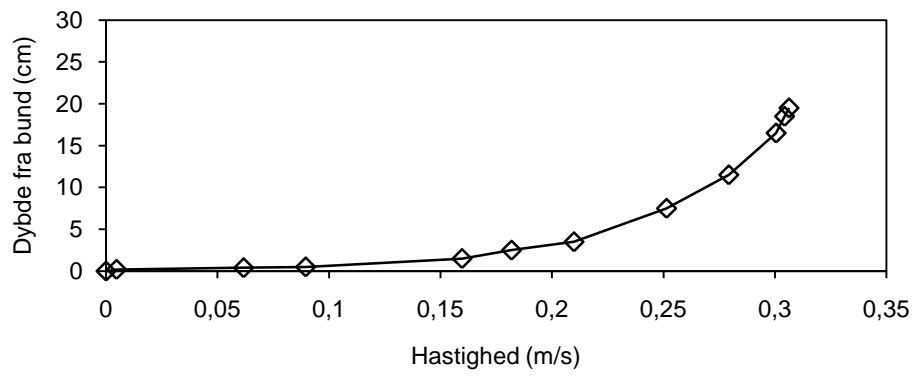
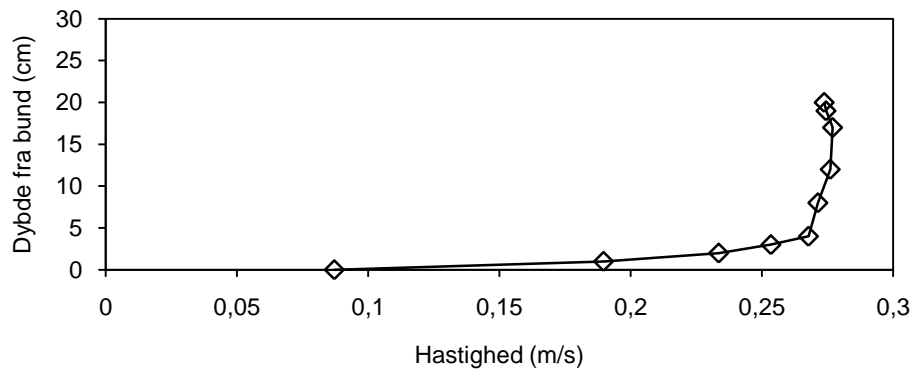


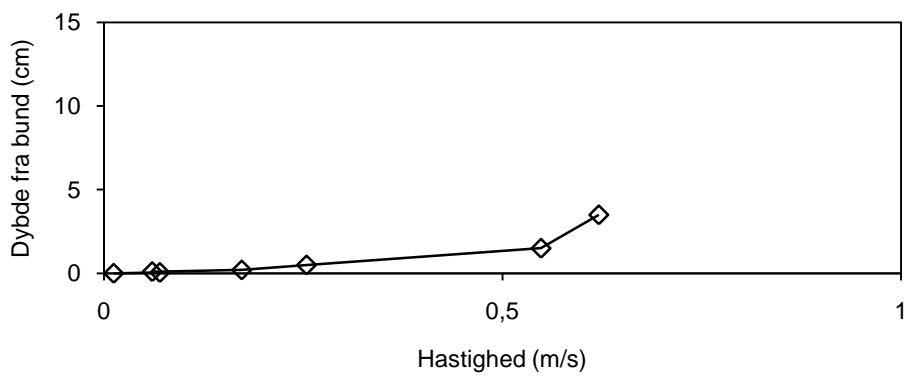
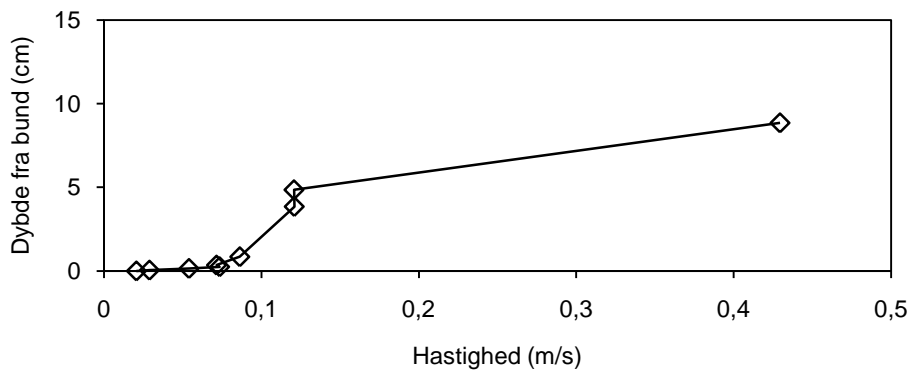
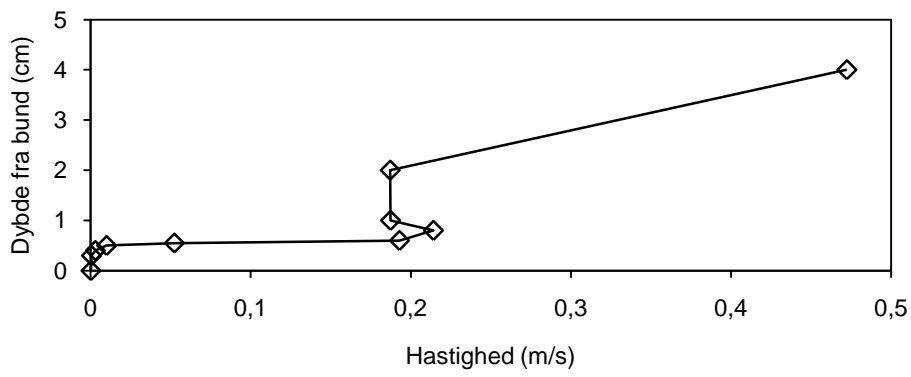
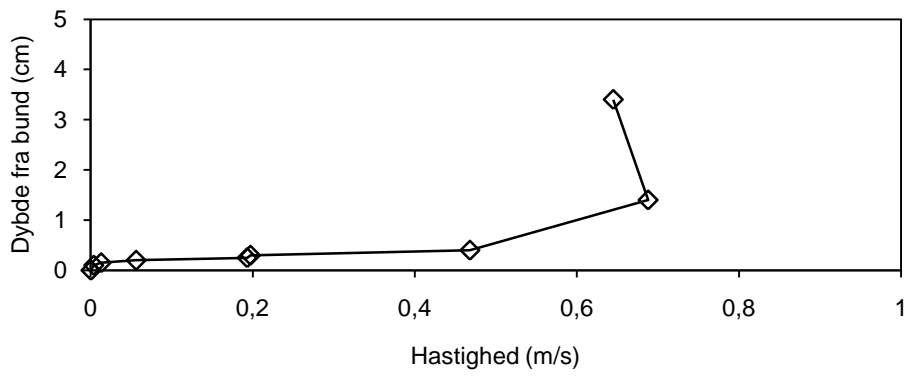


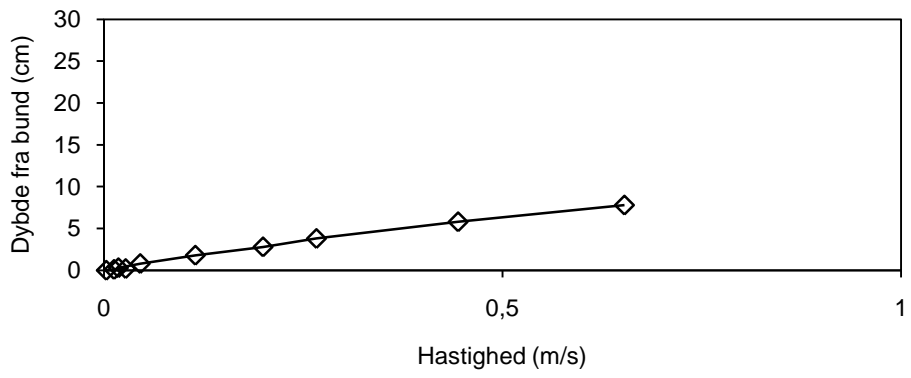


Figur 42. Kalibrering af hydraulisk model. Rødt kurveforløb er med gennemstrømninger på henholdsvis 6 L/s og 3 L/s igennem første og anden del af gydebanken. Blåt kurveforløb er med gennemstrømninger på henholdsvis 2,25 L/s og 1 L/s.

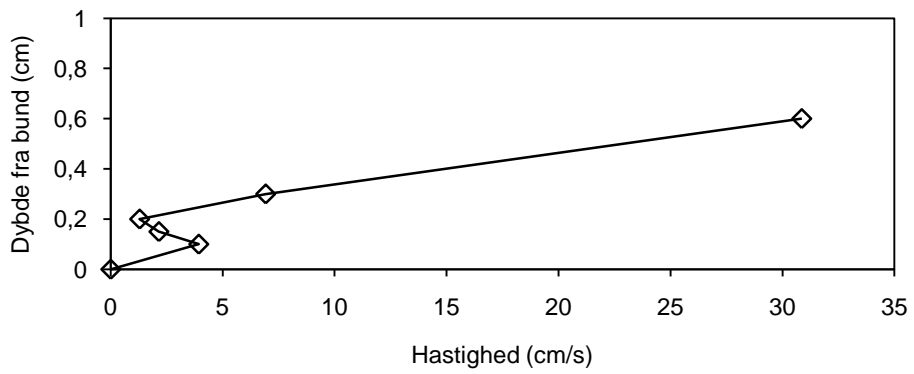
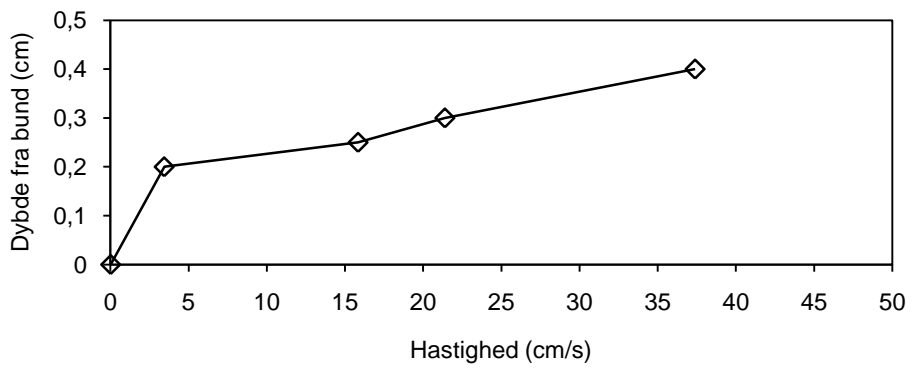
Bilag 2



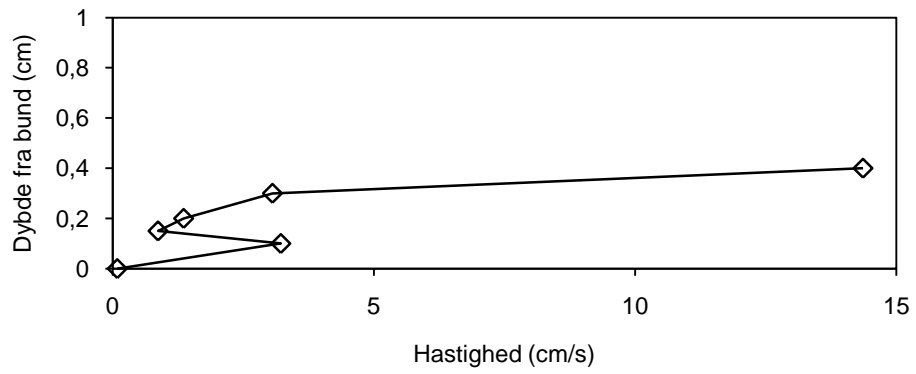




11,0 L/s

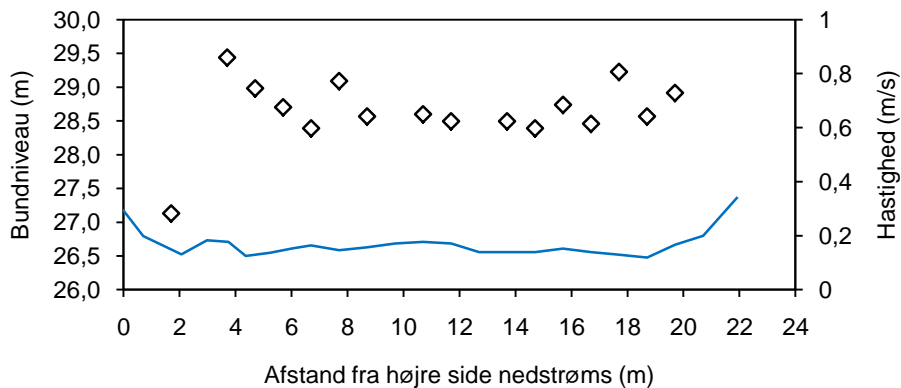


6,4 L/s

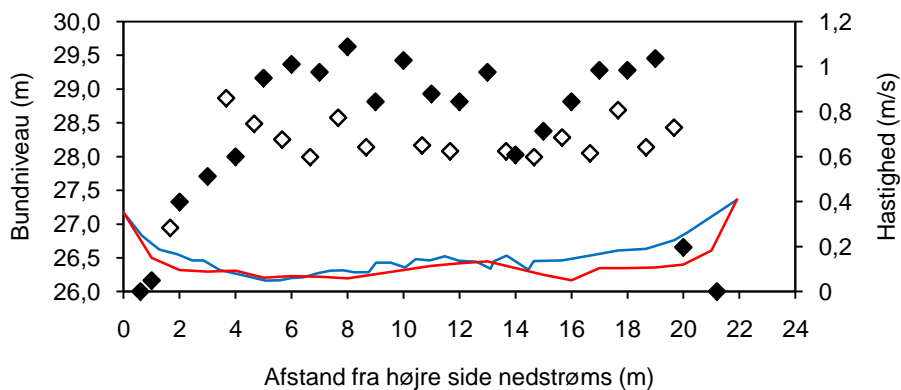


Figur 43. Målte hastighedsprofiler i aflang strømrende.

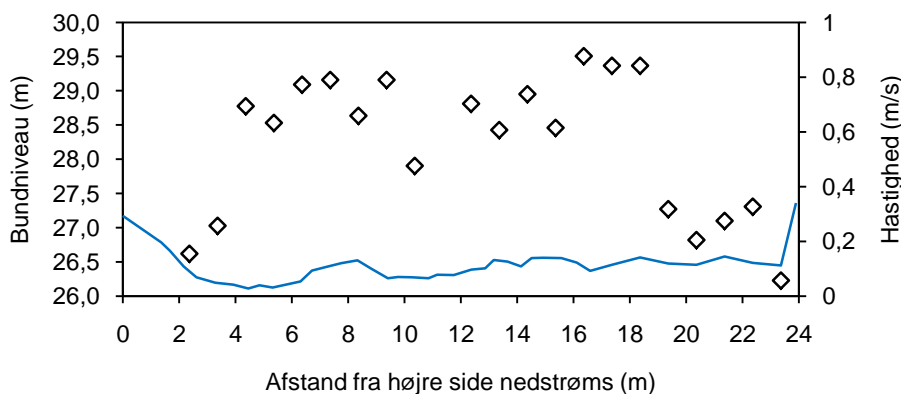
Bilag 3



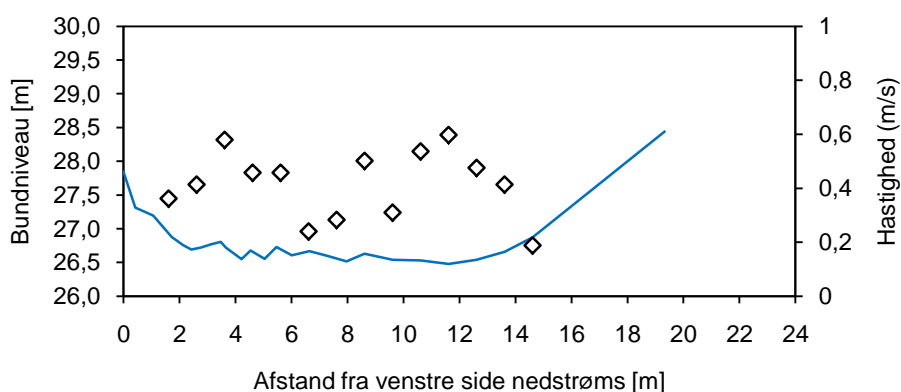
Figur 44. Tværsnit 1 ved Vilholt Stryget. Bundniveauet er opmålt oktober 2010. Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden).



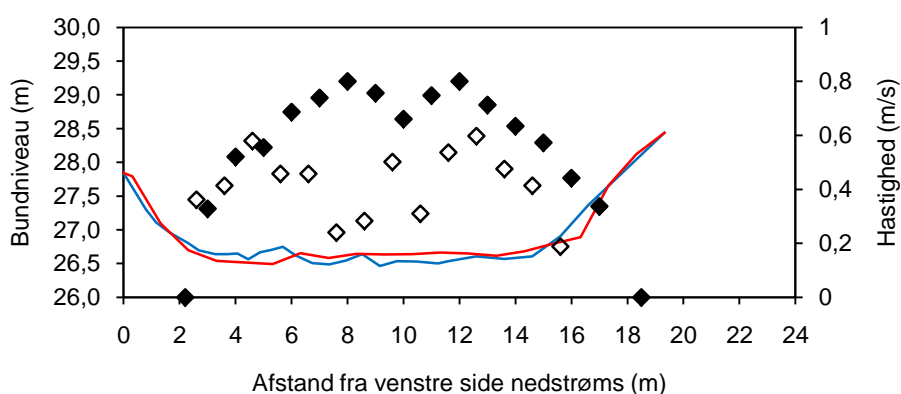
Figur 45. Tværsnit 2 ved Vilholt Stryget. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010 og rødt bundniveau er opmåling fra marts 2009 af Winther (2009). Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 1 ved Vilholt Stryget oktober 2010 (hvide) og middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 2 ved Vilholt Stryget (sorte) af Winther (2009).



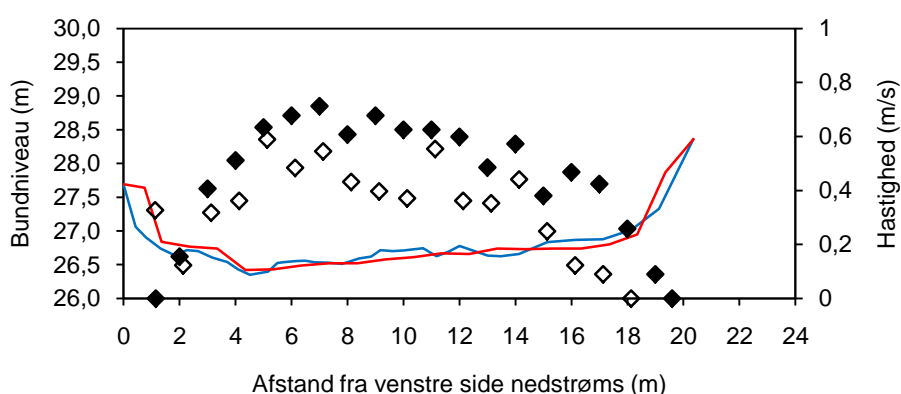
Figur 46. Tværsnit 3 ved Vilholt Stryget. Bundniveauet er opmålt oktober 2010. Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden).



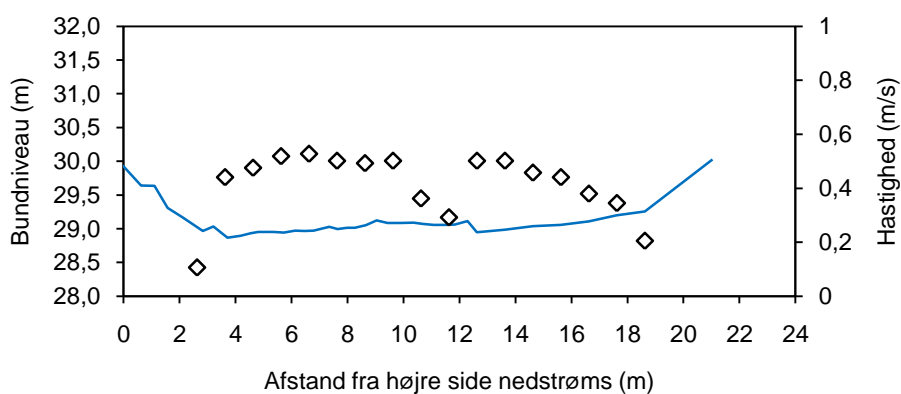
Figur 47. Tværsnit 1 på mellemste strækning. Bundniveauet er opmålt oktober 2010. Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden).



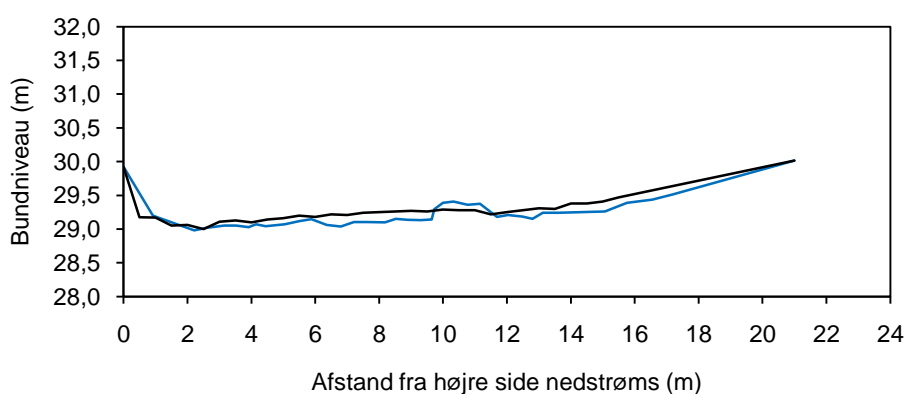
Figur 48. Tværsnit 2 på mellemste strækning. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010 og rødt bundniveau er opmåling fra marts 2009 af Winther (2009). Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 2 på mellemste strækning oktober 2010 (hvide) og middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 2 på mellemste strækning (sorte) af Winther (2009).



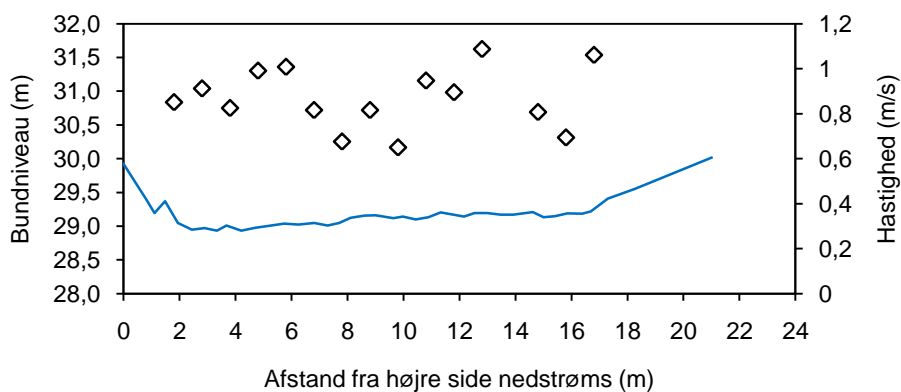
Figur 49. Tværsnit 3 på mellemste strækning. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010 og rødt bundniveau er opmåling fra marts 2009 af Winther (2009). Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 3 på mellemste strækning oktober 2010 (hvide) og middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 3 på mellemste strækning (sorte) af Winther (2009).



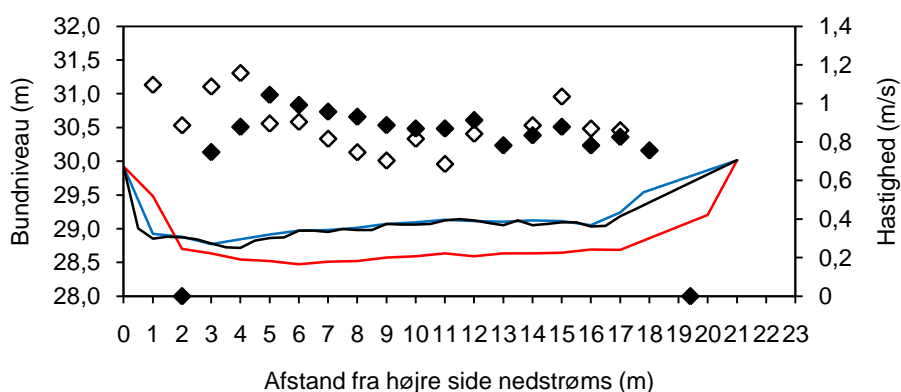
Figur 50. Tværsnit 1 på øverste strækning. Bundniveauet er opmålt oktober 2010.



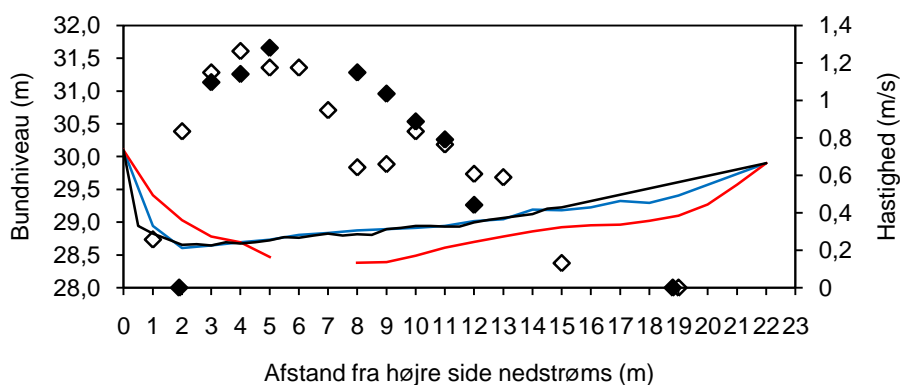
Figur 51. Tværsnit 2 på øverste strækning. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010 og sort bundniveau er opmåling fra marts 2011.



Figur 52. Tværsnit 3 på den øverste strækning. Bundniveauet er opmålt oktober 2010.



Figur 53. Tværsnit 4 på øverste strækning. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010, sort bundniveau er opmåling fra marts 2011 og rødt bundniveau er opmåling fra marts 2009 af Winther (2009). Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 4 på øverste strækning oktober 2010 (hvide) og middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 4 på øverste strækning (sorte) af Winther (2009).



Figur 54. Tværsnit 5 på øverste strækning. Blåt bundniveau er opmåling fra oktober 2010, sort bundniveau er opmåling fra marts 2011 og rødt bundniveau er opmåling fra marts 2009 af Winther (2009). Målepunkter angiver middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 5 på øverste strækning oktober 2010 (hvide) og middelstrømhastigheden (målt ved 40 procent af dybden) ved tværsnit 5 på øverste strækning (sorte) af Winther (2009).