AALBORG UNIVERSITY
STUDENT REPORT

Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sohngårdsholmsvej 57
9000 Aalborg
http://www.ses.aau.dk

Projekt:

Fri faunapassage ved
Vandkraftsøen i Holstebro

Emne:

Faunapassage og sedimenttransport

Projekt:

Master Thesis,
Water & Environment

Projekt periode:

September 2012 - Juni 2013

Studerende:

Mads Frandsen

Vejledere:

Thomas Ruby Bentzen
Emil Dietz Fuglsang

Kopier: 5
Sidetal: 81
Bilag: 4
Afsluttet: 10-06-2013

Synopsis:

Formålet med dette projekt har været at se nærmere på problematikken omhandlende den nuværende- og fremtidige sedimenttransport i Storåen. I forbindelse med at faunapassagen for åens vandrefisk skal forbedres, ønsker Holstebro Kommune dette opnået ved etablering af et nyt omløbsstryg. Dette har rådgivervirksomheden Alectia haft som opgave at udarbejde nogle løsningsforslag til. Etableringen af det forslåede omløbsstryg vil medføre at Vandkraftsøen, delvist, bliver afskåret forbindelsen til Storåen. Da søen i sin nuværende form fungerer som et ganske effektivt sandfang, vil en isolering betyde øget sedimenttransport til Storåen nedstrøms Holstebro Vandkræftværk. Dette kan få betydning for de hydrauliske forhold, ligesom der er risiko for at vigtige gydeområder for Storålaksen tilsander.
Derfor er der i dette projekt set på muligheden for implementering af et sandfang i forbindelse med etableringen af omløbsstryget, hvorved sedimenttransporten kan foregå under mere kontrollerede forhold. Udarbejdelsen af løsningforslaget er gjort på bagrund af en række forsøg til bestemmelse af sedimentets karakter og egenskaber, hvis resultater er indgået i en endimensionel transportmodel for Storå-systemet. Ud fra de opnåede resultater i denne model er der set nærmere på et kort udsnit af åen, umiddelbart opstrøms Vandkraftsøen, hvori sandfanget indgår. Sedimenttransporten igennem sandfanget er modelleret som todimensionel.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

Forord

Projektet er udarbejdet i forbindelse med afslutningen af min kandidat i Water & Environment på Aalborg Universitet. De drivende kræfter i dette projekt har særligt været min store personlige interesse for naturen og lystfiskeri. Projektet har budt på en masse emner, som jeg personligt har fundet spændende. Af samme årsag været svært at afgrænse projektet til hovedsageligt at fokusere på ét af disse. Omend projektforløbet til tider har været stressende, og en forhindring i ny og næ er dukket op, så har det været en særdeles udbyttelsesrig periode. Jeg er ikke i tvivl om, at erfaringerne som jeg har gjort mig i forbindelse med dette projekt, har styrket mig med en viden og kunnen, som jeg fremadrettet kan drage nytte af.

I forbindelse med udarbejdelsen af projektet skal specielt lyde et stort tak til mine vejledere; Thomas Ruby Bentzen og Emil Dietz Fuglsang foruden vis viden og vejledning dette ikke var blevet til. Sidst skal der også lyde en tak til Holstebro Kommune og rådgivervirksomheden Alectia for at have bidraget med vigtige data til projektet.

Mads Frandsen

Indholdsfortegnelse

Forord iii

Kapitel 1 Dansk- og engelsk resume 1
1.1 Resume . . . 1
1.2 Summary . . . 2

Kapitel 2 Indledning 3
2.1 Projektlokalitet . . . 4
2.1.1 Vandkraftsøen . . . 5
2.1.2 Nuværende omløbsstryg . . . 5
2.2 Vandrefisk i Storå-systemet . . . 7
2.2.1 Storå-laksen . . . 8
2.3 Skitseforslag . . . 9
2.3.1 Skitseforslag stillet af Alectia . . . 10
2.3.2 Skitseforslag stillet af Rambøll . . . 12

Kapitel 3 Problemanalyse 13
3.1 Laksens habitatkrav i ferskvand . . . 13
3.2 Hydrologiske forhold . . . 14
3.3 Sedimentproblematik . . . 16
3.3.1 Aflejret sediment . . . 17
3.3.2 Miljøskadelige stoffer . . . 18

Kapitel 4 Problemformulering 21

Kapitel 5 Sedimentkarakteristik 23
5.1 Klassificering . . . 23
5.2 Sedimentprøver . . . 24
5.3 Kornstørrelsesfordeling . . . 25

Kapitel 6 Sedimenttransport - Teori 27
6.1 Erosion . . . 27
6.1.1 Begyndende bundtransport . . . 27
6.1.2 Bundtransport . . . 30
6.1.3 Begyndende suspenderet transport . . . 31
6.1.4 Suspenderet transport . . . 32
6.1.5 Total transport . . . 33
6.2 Aflejring . . . 34
6.3 Deposition . . . 35
6.4 Konsolidering . . . 36

Kapitel 7 Sedimentanalyse 37
7.1 Faldhastighed . . . 37

7.2 Cirkulær strømningsrende . . . 39
7.2.1 Erosionsforsøg . . . 40
7.2.2 Depositionsforsøg . . . 41
7.2.3 Bestemmelse af Shields parameter . . . 42
7.2.4 Vurdering af resultater . . . 43

Kapitel 8 Hydraulisk model af Storåen **45**
8.1 MIKE 11 . . . 45
8.2 Opsætning af hydraulisk model . . . 46
8.2.1 Fysiske rammer . . . 46
8.2.2 Konstruktioner . . . 49
8.2.3 Manningtal . . . 49
8.2.4 Tidsserier . . . 50
8.2.5 Randbetingelser . . . 51
8.2.6 Begyndelsesbetingelser . . . 52
8.3 Kalibrering . . . 52
8.3.1 Resultater . . . 52

Kapitel 9 Transportmodel for Storåen **55**
9.1 Valg af transport editor . . . 55
9.2 Opsætning af transportmodul . . . 55
9.3 Kalibrering af sedimenttransporten . . . 56
9.3.1 Kalibrering ud fra forsøg . . . 56
9.3.2 Justering af kalibreringsfaktor . . . 58

Kapitel 10 Implementering af sandfang **61**
10.1 Afgrænsning . . . 61
10.2 Dimensionering af sandfang . . . 62
10.2.1 Dimensioneringspraksis . . . 62
10.2.2 Dimensionering . . . 63
10.3 Hydrualisk model af sandfang, 2D . . . 63
10.3.1 Opsætning . . . 63
10.3.2 Kalibrering . . . 66
10.4 Sedimenttransport igennem sandfanget . . . 66
10.4.1 Opsætning . . . 66
10.4.2 Output . . . 68
10.5 Resultater . . . 69
10.6 Vurdering . . . 71

Kapitel 11 Diskussion **73**

Kapitel 12 Konklussion **75**

Kapitel 13 Perspektivering **77**

Referencer og kildehenvisninger **79**

Bilag B Bundforskydningsspænding **A 1**

Bilag C Indholdsfortegnelse CD-bilag **A 5**

Dansk- og engelsk resume 1

1.1 Resume

Holstebro Vandkraftværk og den tilhørende opstemmede vandkraftsø, udgør en delvis spærring for faunaens bevægelse i Storå-systemet. Især vandrefiskene er her af særlig interesse.

Da Holstebro Kommune ønsker at bibeholde Vandkraftsøens eksistens til rekreative formål, har der været foreslået et omløbsstryg som løsning. Det er således på baggrund af dette, at rådgivervirksomheden Alectia har udarbejdet nogle mulige løsningsforslag, [Rasmussen *et al.*, 2013].
Hvor sedimentet i den nuværende situation hovedsageligt bliver aflejret i vandkraftssøen, vil etableringen af omløbsstryget flytte denne aflejringsproces nedstrøms. Dette kan muligvis føre til at behovet for opgravning af sediment på strækningen i Holstebro, vil forekomme oftere. Endvidere er der en risiko for, at vigtige gydepladser for laksene tilsander nedstrøms vandkraftværket. Sedimenttransporten foregår ikke ligeligt fordelt hen over året. Det er typisk under større afstrømningshændelser at sedimenttransporten er forøget. Problemet er derfor størst om vinteren, hvor disse hændelser ofte indfinder sig og der heller ikke er noget undervandsvegetation til at tilbageholde sedimentet.
Dette projekt tager fokus på denne problemstilling, og i forbindelse med dette er udarbejdet et løsningsforslag i form af et sandfang. Funktionen af sandfanget er at få nedbragt strømningshastighederne, hvorved det transporterede sediment får mulighed for at fælde. For at undersøge virkningen af sandfanget indgår dette i en todimensionel dynamisk flowmodel opbygget i MIKE 21, hvor sedimenttransporten er tilkoblet. Denne model beskriver en kort strækning af Storåen umiddelbart opstrøms Vandkraftsøen, hvor dynamikken mellem strømninger og sedimenttransport er forsøgt simuleret.
Inputene til den todimensionelle model, i form af vandførings- og vandstandsdata samt sedimenttransport, er fremkommet gennem en endimensionel flowmodel for hele Storå-systemt opbygget i MIKE 11. Hvor vandføring og vandstanden i denne er kalibreret ud fra målinger fra målestation 22.10 ud for renseanlægget i Holstebro nedstrøms vandkraftværket. Sedimenttransporten i denne er forsøgt tilpasset en årlig tilførsel på 6.5 m^3/ha, en tilførsel som foreslås i [Ankjærø *et al.*, 2010]. Der er indsamlet prøver af søens sediment, hvilke har indgået i en række forsøg med det formål at bestemme karakteristika og egenskaber for sedimentet. Resultaterne af disse er benyttet til opsætningen af sedimenttransport modulet samt kalibrering af transportmodelen.

1.2 Summary

Holstebro Vandkraftværk and the associated reservoir, Vandkraftsøen, represents a partial obstruction for the fauna movement in the Storå-system. Especially the migrating fish is here of particular interest.

As Holstebro Kommune wishes to maintain the existence of Vandkraftsøen for recreational purposes, a bypass flow has been proposed as a solution. Based on this the consultancy firm Alectia has composed some possible solutions [Rasmussen *et al.*, 2013].
Where the sediment in the current situation mainly is deposited in the reservoir, the establishment of the bypass flow will move the deposition process downstream. This could possibly lead to the need of dredging the stretch of the Storå placed in Holstebro, occurs more often. Furthermore, as a consequence of modified sediment transport, there is a risk that important spawning grounds for the salmon placed downstream the hydropower plant gets buried. The sediment transport is not evenly distributed over the year, as it typically is the larger run-off events that results in an increase. The problem is greatest in the winter, where these events often materialize and the underwater vegetation is absent to retain sediment.
This project is focusing on the issue described above, and in connection to this a solution in the form of a sand trap has been composed. Where the function of the sand trap is to reduce flow rates, thus the transported sediment will be able to deposit. To examine the effect of the sand trap, this has been included in a two-dimensional dynamic flow model constructed in MIKE 21, to which the sediment transport is added. This model describes a short stretch of Storåen, which is situated upstream the reservoir, and attempts to simulate the dynamics between flow and sediment transport.
The inputs to the two-dimensional model, in the form of data for flow, water level and sediment transport, is obtained through a one-dimensional flow model, which represents the entire Storå-system constructed in MIKE 11. Where the flow and water level has been calibrated based on measurements, which originates from the measuring station 22.10. The measuring station is placed near the treatment plant in Holstebro, downstream the hydropower plant. The sediment transport in the model is attempted adapted an annual intake of 6.5 m^3 / ha, a quantity that has been suggested by [Ankjærø *et al.*, 2010]. Samples of lake sediment have been collected, which has been included into a series of experiments in order to determine the characteristics and properties of the sediment. The results of these have been used in the setup of the sediment transport module and calibration of the transport model.

Indledning 2

Mange danske vandløb og søer, samt floraen og faunaen i tilknytning til disse, er igennem tiden blevet påvirket af menneskelige aktiviteter. Det er i høj grad i forbindelse med industrialiseringen i 1900-tallet, at de største ændringer er blevet udført. Således er store arealer af vådområder og søer blevet drænet, samt vandløb er blevet kanaliserede for at øge vandledningsevnen (Figur 2.1). Ligeledes har opstemningen af vandløbene også været almindelige, til bl.a. vandmøller med landbrugsformål og senere til vandkraftværker.

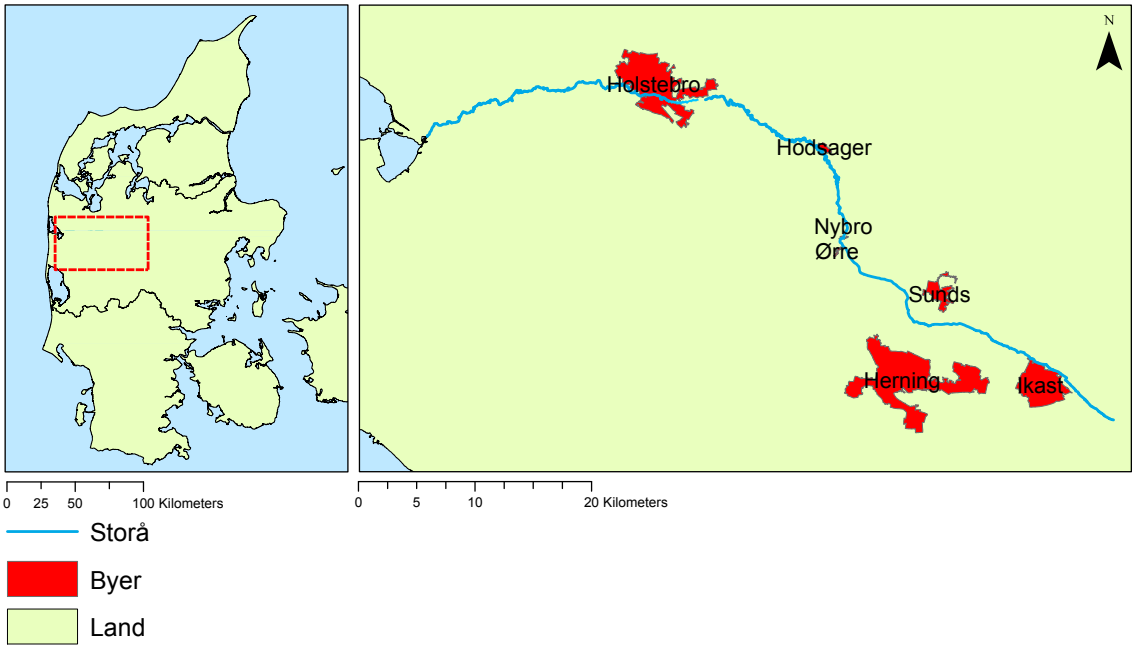
Figur 2.1. Storåen gennem Holstebro bærer præg af kanalisering. [Skovhus, 2010a]

Figur 2.2. Store dele af åen bevæger sig i dag mæandrerende gennem ådalen. [Skovhus, 2010b]

I nyere tid er det dog blevet klart, hvor vigtig vores natur og dennes værdi er, og som følge heraf har talrige restaurerings- samt reetableringsprojekter set dagens lys. Dette er også tilfældet med Storå-systemet, hvor der er og bliver gjort en stor indsats for at forbedre forholdene for laks og havørreder. Arbejdet ligger især ved de tilknyttede kommuner (Ikast-Brande, Herning og Holstebro), men også frivillige organisationer og foreninger har bidraget. Mange stræk af Storåens tilløb, som har været kanaliserede, er således blevet genslynget, en række opstemninger er blevet fjernet og i flere områder er der udlagt gydegrus samt store sten [SVS, 2010].
Disse indgreb har været med til at forbedre opvækst- og passageforholdende for åens vandrefisk og øvrige fauna. Indsatsen har særligt været rettet mod åens bestand af laks og ørred, da forbedringer for disse arter typisk også påvirker den øvrige fauna positivt. Dog er der stadig en del fremtidig arbejde for at genskabe det naturlige system, og især området omkring Vandkraftsøen i Holstebro kræver opmærksomhed.

2.1 Projektlokalitet

Storåen er med sine 104 km, fra udspringet sydøst for Ikast til sit udløb i Nissum Fjord, Danmarks næst længste vandløb. På sin vej mod fjorden, slynger åen sig forbi og igennem byerne; Herning, Sunds, Ørre, Nybro, Hodsager og Holstebro, som vist på Figur 2.3. Oplandet udgøres hovedsageligt af ekstramarginale aflejringer, sand og grus, som er fremkommet i forbindelse med afsmeltningen ved slutningen af sidste istid [Holstebro Kommune, Teknik og Miljø, 2011].



Figur 2.3. Storåens placering med omkringliggende byer.

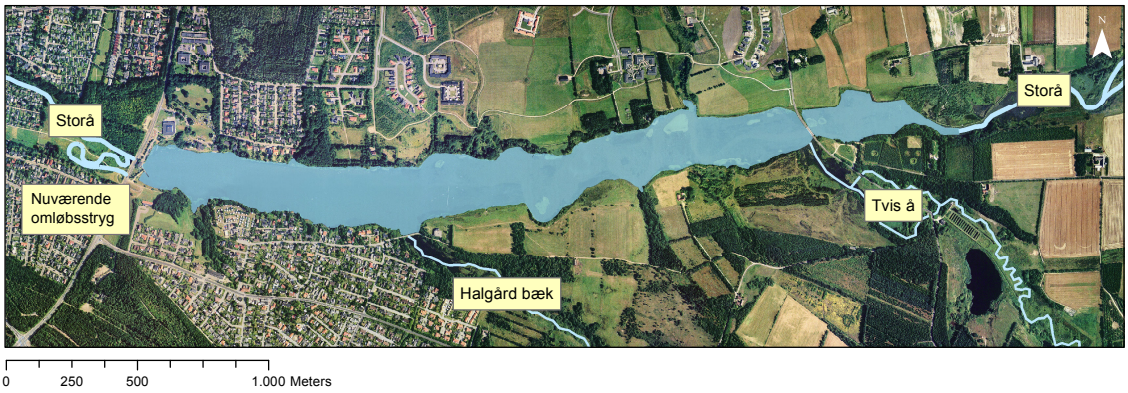
Ved Holstebro by udgøres åens opland af hele 825 km^2, og med en årlig nettonedbør på ca. 400 mm, som ledes via grundvands- og overfladeafstrømning, svarer dette til at byen gennemstrømmes af omkring 330 mio. m^3 vand årligt. Vandføringen i åen er påvirket af årstiderne, og der er således en større vandføring i vintermånederne sammenlignet med sommermånederne. Medianvandføringen er på ca. 9,5 m^3/s mens middelvandføringen er på lidt over 10 m^3/s. Ca. hvert andet år overskrider Storåen ved Holstebro medianmaksimumvandføringen på 35 m^3/s. Den største vandføring som er målt, blev registreret i 1970 og var på 105 m^3/s, hvilket førte til at store dele af Holstebro by stod under vand. I tabel 2.1 er vist gentagelsesperioderne for forskellige ekstremvandføringer for Storåen i Holstebro.

Middeltidsafstand [år]	Vandføring [m^3/s]
2	38,6
5	48,3
10	54,6
25	62,7
50	68,7
100	74,6
1000	94,2

Tabel 2.1. Ekstrem vandføringen i Holstebro By ved forskellige gentagelsesperioder. [Rasmussen *et al.*, 2013]

2.1.1 Vandkraftsøen

Grundet den høje vandgennemstrømning samt de gode faldforhold i området, blev der i perioden 1940-1942 etableret en opstemning af åen ved Holstebro med elproduktion for øje, og Vandkraftsøen blev dannet. Ved opførelsen dækkede elproduktionen fra værket en stor del af byens behov, men udgør i dag en meget lille andel af det samlede forbrug.



Figur 2.4. Vandkraftsøen ved Holstebro og dens tilløb.

Søen er grundet sin placering i ådalen, aflang af form, og med en længde på 2,5 km samt en bredde, der sjældent overstiger 250m. Vandspejlet udgør således ca. 70 ha. Middeldybden er på 1,6 m og den maksimale dybde er på 6,1 m, men søen er generelt meget lavvandet, så trods det store vandspejl er vandvolumenet kun på 1,03 mio. m^3. Udover at blive tilført vand fra Storåen, bidrager også vandtilførsel fra diffus grundvandstilstrømning samt tilløbene; Tvis å og Halgård bæk til søens vandudskiftning - placeringen af de to tilløb er vist på Figur 2.4. [Nuhanovic, 2011]

2.1.2 Nuværende omløbsstryg

Etableringen af Vandkraftsøen førte til ændring af åens hydrologi, og har samtidig påvirket sammensætningen af visse dele af faunaen i vandløbssystemet. Således har der siden etableringen været en betydelig nedgang af bestandene af vandrefisk. Dette skyldes især den reduceret mulighed for adgang til gydepladser. Overfiskningen i Nissum Fjord har dog også en vis betydning.
For at forsøge at forbedre forholdene for de gydevandrende fisk i åen, blev der derfor i 1989 etableret et omløbstryg ved vandkraftværket, Figur 2.5. Strygets fald er på i alt 5,5 m fordelt ud

på et 655 m langt forløb, og har derfor et gennemsnitligt fald på 8‰. Faldforholdene medfører at strømningshastighederne opnår kritiske værdier for mange fiskearter, og det har derfor været nødvendigt med implementering af seks hvilebassiner på strækningen.

Figur 2.5. Det nuværende omløbsstryg ved Vandkraftsøen. [Hedeselskabet, 1989]

Strygets vandføring var oprindeligt dimensioneret til et maksimum på 1 m^3/s, men har ikke været af tilstrækkelig størrelse til at fiskene har kunnet finde udløbet under opstrøms vandring. Dette har betydet at et stort antal af de opvandrende fisk, aldrig er nået længere end opstemningen og derfor har været fanget ved udgangsstrømmen fra turbinen. I håb om at øge mængden af fisk, som benytter sig af stryget, er den maksimale vandføring blevet hævet til 2 m^3/s i perioderne, hvor fiskene er på vandring. Dette har sandsynligvis ført til, at der for første gang siden søens etablering, blev registreret enkelte individer af laks og havørred opstrøms søen.[Ankjærø *et al.*, 2010]

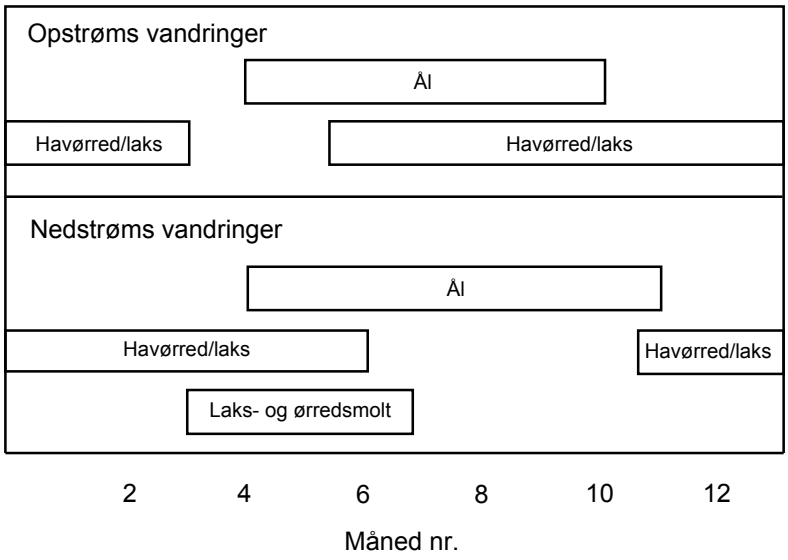
Det nuværende omløbsstryg har således haft meget lille effekt på opvandringen, og ses der på forholdene for de nedvandrende fisk, er virkningen også manglende. Særligt smolt og fiskelarver har stor dødelighed på deres vandring nedstrøms gennem søen, hvilket i høj grad skyldes prædation samt problemer med at navigere frem til omløbsstryget, hvormed mange ender deres dage i gitterindløbet til vandkraftværket. Således er dødeligheden for den nedvandrende lakse- og ørredsmolt, ned gennem søen, blevet estimeret til at være på hele 78,8% [Koed, 2010].

2.2 Vandrefisk i Storå-systemet

Laks og havørred udgør ikke alene alle vandrefiskene i Storåen. Andre arters livscyklus afhænger også af, at vandløbet er kontinuert og uden større forhindringer. Således er følgende arter negativt påvirkede af vandkraftværkets opstemning:

- Laks (bilag II art)
- Ørred
- Helt
- Ål
- Bæk-, flod og havlampret (bilag II arter)

De ovenævnte fisk har alle dele af deres opvækst i systemet og de fleste har også deres gydepladser i dette - ålen undtaget. Alt efter hvilken art, der er tale om foregår vandringen på forskellige tider af året, som illustreret på Figur 2.6.

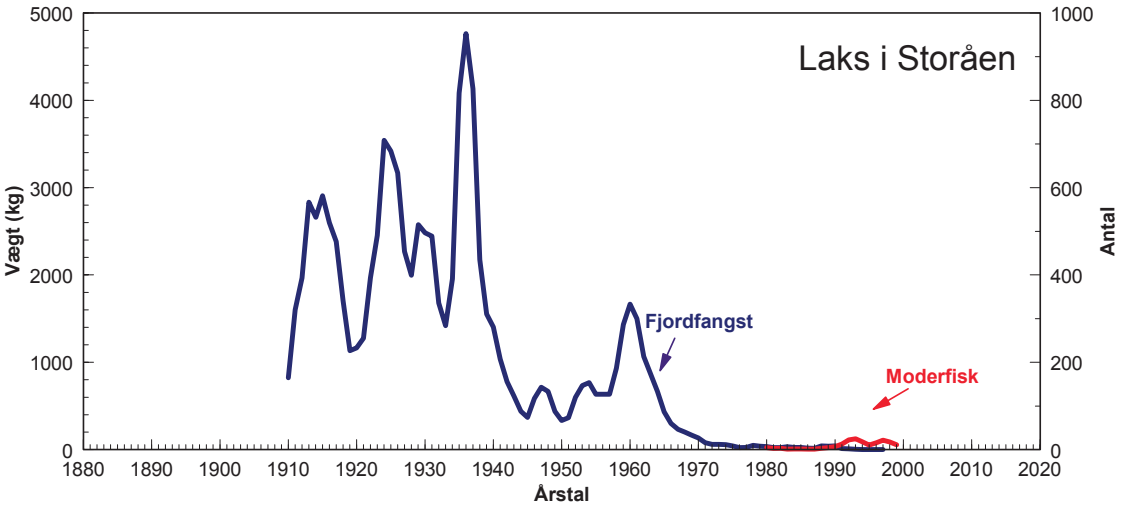


Figur 2.6. Alt efter art, har fiskene forskellige tider på året, hvor deres vandring foregår. [Rasmussen *et al.*, 2013]

Laksen og de forskellige lampretter er, i henhold til EU's Habitatdirektiv, udpegningsgrundlag for dele af Storåsystemet, hvilket indebærer at disse skal sikres en gunstig bevaringsstatus. En anden art som måske er at finde i Storåen er stavsilden (bilag II + V). Da denne art regelmæssigt forekommer i Nissum Fjord, må den formodes at kunne gyde i Storåen, dog er der ikke registreret nogle forekomster. [Naturstyrelsen]
På nuværende tidspunkt holdes bestandene af laks, ørred og ål oppe via. udsætningsplaner, hvor målet er at bestandene skal være selvbærende. Dette vil formentligt være muligt at opnå for laks og ørred. Da laksen stiller store krav til vandløbets miljøtilstand og fysiske forhold, vil man ved at forbedre forholdene for denne også komme de andre arter til gode. Da denne samtidig har stor økonomisk betydning for lokalsamfundet, grundet lystfiskeriet, er der derfor godt belæg for at have denne som fokus-art i forbindelse med etableringen af et nyt omløbsstryg. I en rapport udarbejdet af COWI A/S [2013], vurderes det således at hver enkelte laks i Gudenå-systemet har en værdi af 6.400 kr. for samfundet. Dette kan meget vel være af samme størrelsesorden for Storåen.

2.2.1 Storå-laksen

Den danske laks har igennem det sidste århundrede lidt et voldsomt tilbageslag, som følge af overfiskning samt manglende adgangen til gyde- og opvækstpladser. Således blev det antaget indtil slutningen af 1980'erne, at den danske laks var uddød. Igennem genanalyse af populationen i de forskellige vestvendte vandløb, fandt man frem til at en lille bestand af den oprindelige vestjyske stamme stadig eksisterede i Skjern Å, Ribe Å, Varde Å og muligvis også i Storåen.



Figur 2.7. Grafen viser hvorledes bestanden af Storå-laks langsomt blev reduceret til nærmest ikke-eksisterende, inden det storstilede redningsprojekt tog fart. [Dieperink, 2002]

I 1993 startede lakseprojektet, som havde til formål genetablere laksebestandene i ni jyske vandløb, heriblandt Storåen, som følge af planen; "Handlingsplan for ophjælpning og retablering af de danske laksebestande". Formålet med denne plan var at genskabe bestande i de vandløb, som historisk set havde haft naturlige bestande. I starten bestod udsætningerne dog hovedsageligt af laks fra irske, skotske og svenske laksestammer, da den vestjyske stamme talte meget få individer som kunne benyttes i avlsarbejdet. Mængden af moderfisk, der vendte tilbage til åerne af de udenlandske stammer var dog beskeden i forhold til fisk af den Vestjyske stamme, og med tiden blev disse udfaset af opdrætsplanen. [DTU Aqua, 2011]
I 2004 udarbejdede [Miljøministeriet, Skov- og Naturstyrelsen, 2004] "National forvaltningsplan for laks", hvilken satte rammerne for en fælles målsætning for de danske laksestammer. Målsætningen er, at de vestjyske laks skal opnå 'gunstig bevaringsstatus'. For at dette kan opnås for Storå-laksen, er det vurderet at gydebestanden skal være bestående af 1.000 individer, uden at være suppleret af udsætninger. Derved sikres det at bestanden ikke uddør, og at denne samtidig kan modstå dårlige sæsoner, hvor overlevelsen af yngel ikke er tilstrækkelig eller at gydebestanden er meget lille.

Figur 2.8. Store danske laks, som denne hanfisk i gydedragt og med kæbekrog, er et af målene for de mange restaureringsprojekter. [Krag, 2012]

Den samlede opgang af laks i 2010 er blevet estimeret til at udgøre 1.390 individer [Lindvig, 2011], det skal dog understreges at under 10% af disse fisk, er fremkommet ved naturlig reproduktion. DTU Aqua har vurderet, at Storåens samlede potentiale for opgangslaks er på mellem 4.000 til 6.000 individer, såfremt alle forhold er optimale. Især Vandkraftsøen og den tilhørende opstemning er her et problem, da denne vanskeliggør opvandringen af moderfisk opstrøms søen, hvor 2/3 af systemets samlede gydepladser er beliggende. [Dehli and Lindvig, 2011]

2.3 Skitseforslag

Selvom den periodevise øgede vandføringen i omløbsstryget nu har medført, at enkelte individer af laks og havørred vandrer opstrøms Vandkraftsøen, er der behov for yderligere tiltag. Da laksen er udpeget som Natura-2000 art, og der er stillet krav til vandkvaliteten af Storåen i forbindelse med Vandplanerne, er det de respektive kommuners ansvar at gøre en indsats for at forbedre forholdene. Storåen skal derfor i nær fremtid opfylde målsætningen:

At opnå kontinuitet i hele vandløbets længde, samt opnå gunstig bevaringsstatus for Storå Laksen.

For Holstebro Kommune gælder der således, at særligt forholdene i og omkring Vandkraftsøen skal forbedres. Derfor udarbejdede Kommunen i 2009 et skitseforslag, som omhandlede et omløb af Storåen, hvorved Vandkraftsøen ville blive afskåret denne. Efterfølgende har kommunen indgået et samarbejde med rådgivervirksomheden Alectia, som har udarbejdet en løsning på baggrund af dette forslag.
I 2010 blev der af Rambøll udarbejdet et alternativt løsningsforslag, hvilket var bestilt af Danmarks Sportsfiskerforbund, Sammenslutningen ved Storå, Frøjk Fiskepark og Dansk Laksefond. Dette forslag omhandler dræning af Vandkraftsøen, hvorved åen føres tilbage til sit oprindelige forløb. De to løsningsforslag vil uddybes i det følgende.

2.3.1 Skitseforslag stillet af Alectia

I samarbejde med Holstebro Kommune har Alectia udarbejdet et nyt løsningsforslag. Dette forslag omhandler etableringen af nyt omløbsstryg, hvorved Storåen føres udenom Vandkraftsøen og søen samtidig kan bevares, som vist på Figur 2.9. Stryget vil tage sin begyndelse ved Storåens indgang til vandkraftsøen i øst og forløbe langs søens sydlige bred, ned forbi vandkraftværket. Stryget vil være adskilt fra søen af et dige, hvor det er meningen at der skal anlægges en sti. Herved yder løsningen både rekreativ værdi, samt det bliver muligt at transportere udstyr til vedligehold på denne, og søen bevares.

Figur 2.9. Placeringen af omløbsstryget ved scenarie 1 og 2, forløber langs søens sydlige bred med tilhørende overløbskanter.

Det nye omløbsstryg skal kunne håndtere Storåens normale vandføring, og er således dimensioneret til vandføringer på op til 15 m^3/s. Ved højere vandføringer end dette, er der etableret to overløbskanter, hvor den øverste af disse, med en længde på 200 m, er placeret nedstrøms Tvis Møllevej og den anden i søens sydvestlige hjørne. Overskrides 15 m^3/s vil der blive ledt vand til søen via. den øvre overløbskant mens der ved den nedre overløbskant vil kunne blive ledt op til 25 m^3/s retur til omløbsstryget. Herved vil den maksimale vandføring på det stræk af omløbsstryget maksimalt opnå 40 m^3/s. Ved større vandføringer end dette vil det overskydende vand blive ledt gennem frislusen. på årsplan vil dette betyde en reduceret tilledning til Vandkraftsøen på omkring 90%. I store dele af året vil hele vandføringen således blive ledt udenom søen.
Udover delvist at isolere Vandkraftsøen fra å systemet, vil omløbsstryget opnå status som hovedstrøm nedenfor vandkraftværket. En udvikling der uden tvivl vil have en betydelig, og positiv, effekt på de opvandrende fisk samt de nedvandrende smolt/fiskelarver.
Alectia har ligeledes i forbindelse med skitseprojektet, overvejet strømningshastighedernes betydning for de opvandrende fisk, og er fremkommet med tre bud, der tilgodeser denne problemstilling. Scenarierne er som følger:

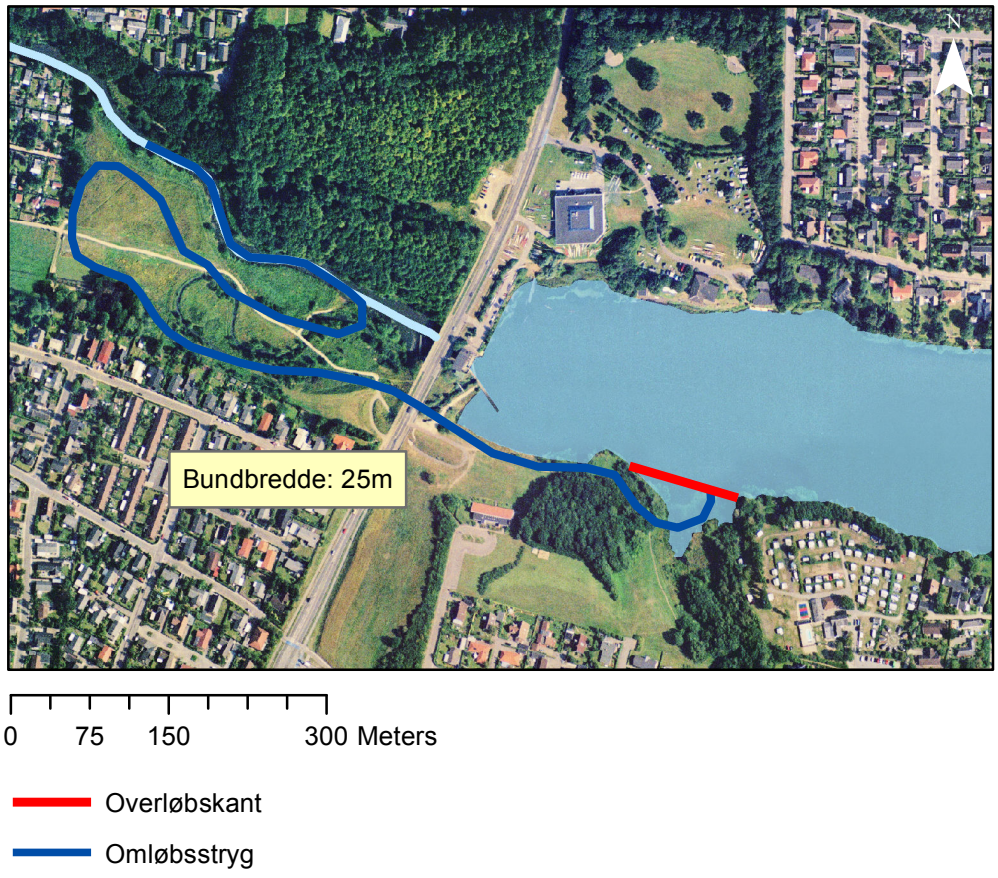
Scenarie 1 En forlægning af Storå på strækningen fra Tvis Møllevej og hele vejen ned forbi Ringvejen og ud i Storå, cirka 50 m nedstrøms vandkraftværket. Faldet på den øvre del er projekteret til 0,3‰ og på den nedre del 3,4‰. Det nye forløb ligger ved den sydlige brink af søen, og adskilles af et dige.

Scenarie 2 En forlægning af Storå på strækningen fra Tvis Møllevej og hele vejen ned forbi Ringvejen og ud i Storå cirka 50 m nedstrøms vandkraftværket. Faldet på den øvre del er

projekteret til 0,8‰ og på den nedre del 2,4‰. Det nye forløb ligger ved den sydlige brink af søen, og adskilles af et dige.

Scenarie 3 Udover de to ovennævnte scenarier, er yderligere et tredje scenarie blevet opstillet, Figur 2.10. Dette scenarie omhandler en udbygning af det eksisterende omløbsstryg, så det kan klare en vandføring på 15m^3/s. I forbindelse med ombygningen vil stryget samtidig blive forlænget, så en gennemsnitlig bundhældning på 4,5‰ opnås, altså næsten halvdelen af den nuværende bundhældning.

Bundbredderne for de to første scenarier er ens, og beskæftiger sig med to gennemsnitlige bundbredder for det samlede forløb. Således vil en bundbredde på 15 m være gældende fra Tvis Møllevej og ned til den nedre overløbskant, og 25 m fra denne til udløbet i Storåen omkring 50 m nedstrøms frislusen ved vandkraftværket.
Et valg af 3. scenarie vil mest tilgodese de opvandrende moderfisk, men ikke hjælpe ret meget på dødeligheden blandt smolt og fiskelarver, hvilket tidligere er blevet belyst i afsnit 2.1.2. Ligeledes vil der være tale om en strømningshastighed, som måske stadig er for høj til at være ideel for de opvandrende fisk.



Figur 2.10. Omløbsstryget, som det ville blive placeret, hvis scenarie 3 vælges.

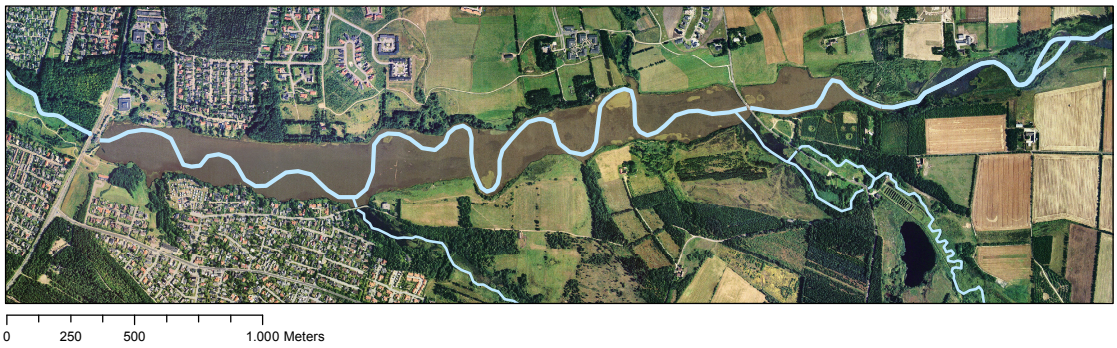
I forbindelse med de ovennævnte scenarier, har Alectia udført modellering for disse i MIKE 11 med to forskellige vandføringer:

- 15 m^3/s, som er lidt over middelvandføringen, men en vandføring, som er meget relevant i efterårs- og vintermånederne
- 40 m^3/s; en vandføring som forventes i forbindelse med større smeltevands- og regnhændelser

Ud fra disse, har det været muligt at konsekvensvurdere den ændring i hydrologien, som implementeringen af omløbsstryget vil forårsage. Her er det særligt sikring mod fremtidige ekstremhændelser, som har interesse, og oversvømmelseskort er på baggrund af dette blevet udarbejdet. [Rasmussen *et al.*, 2013]

2.3.2 Skitseforslag stillet af Rambøll

Danmarks Sportsfiskerforbund, Sammenslutningen ved Storå, Frøjk Fiskepark og Dansk Laksefond har anmodet Rambøll udarbejde et skitseprojekt, hvilket blev fremlagt i slutningen af 2010, hvor afvanding af Vandkraftsøen, og dermed genskabelse åens gamle forløb var målet, Figur 2.11. Dette løsningsforslag arbejder med at der på bunden af søen, trods mange årtiers aflejring af sediment, stadig er den gamle åslynge at finde. Udover at afvande søen, vil det være nødvendigt at oprense det gamle åløb. [Ankjærø *et al.*, 2010]



Figur 2.11. Ved dræning og udgravning, kan den gamle åslynge igen gøres til en del af Storåen.

Hvad dette skitseprojekt dog ikke beskæftiger sig med, er problemstillingen angående det sediment, som vil blive blotlagt på den tørlagte søbund. Dette indeholder, udover store mængder okker, en række andre miljøfarlige stoffer. En behandling af sedimentet vil derfor højst sandsynlig være påkrævet.

Problemanalyse 3

Dette projekt udarbejdes i samarbejde med Holstebro Kommune og Alectia, og det er derfor deres skitseprojektet denne rapport vil beskæftige sig videre med. Dette kapitel har til formål at belyse de problemstillinger, der skal tages hensyn til i forbindelse med implementeringen af skitseforslaget, hvorefter en problemformulering med tilhørende problemafgræsning kan opstilles. Der vil i det følgende blive set nærmere på følgende områder:

- Laksens krav til vandløbsfysik samt vandkemi
- Ændring af hydrologiske forhold
- Ændring af sedimenttransport

3.1 Laksens habitatkrav i ferskvand

Omløbsstryget ved Vandkraftsøen projekteres med henblik på at sikre fri passage for vandrefiskene, og særligt den skrøbelige bestand af laks er her i fokus. Ud over at fungere som faunapassage er det endvidere planen, at stryget skal kunne tilbyde gyde og opvækstpladser for laksen. Det er derfor relevant at få klarlagt, hvad der skal til for at opnå dette. Som nævnt i afsnit 2.2, stiller laksen relativt store krav til sine omgivelser, både hvad angår vandkvalitet og vandløbsfysik. Dette gør sig ikke kun gældende i forbindelse med gydningen, men også opvæksten. Generelt skal vandløbet, for at laksen kan trives, være iltrigt, og da arten er meget følsom over for ændringer i vandets surhedsgrad, skal denne også ligge nogenlunde stabilt.

Figur 3.1. Ideel gydebanke med hurtigt strømmende vand og grusbund. [Sloth]

Figur 3.2. Udover at yde vigtig skjul for lakseynglen, er vandplanterne også hjemsted for en masse fødedyr. [Madsen, 2009]

Den største opvandring af laks i Storå-systemet finder sted fra juli til oktober, men enkelte større individer er allerede at finde i åen fra april. Her befinder dig sig indtil gydningen, som foregår i det sene efterår til vinter. Gydningen finder sted i områder med grusbund, tilstrækkelig stor strømningshastighed og tilpas dybde, Figur 3.1. Årsagen til dette er, at den hurtige vandhastighed

og lave dybde gør, at de nedgravede æg tilføres rigelig med ilt. Samtidig sikrer strømmen at æggene holdes fri for sand og slam og at affaldsstoffer fjernes. At laksen gyder på grusbund skyldes, at når æggene placeres mellem de mindre grus-partikler ovenpå større sten, så sikres disse mod at blive skyllet bort ved høj vandføring som følge af sneafsmeltning/større regnhændelser. De ideelle gydeområder for laks er således de dele af Storåen og dennes tilløb, hvor følgende er opfyldt:

- Grusbanker, hvor kornstørrelsen ligger på mellem 5 og 125mm
- Strømningshastigheden ligger på i området 0,2 til 0,8m/s
- Dybden er fra 20 til 70cm
- Højt iltindhold
- Fri adgang

Når æggene er klækket og ynglen har bevæget sig ud fra gydebanken er det essentielt at det område deres opvækst forløber i, byder på et varieret forløb og har en tilpas undervandsbevoksning, som vist på Figur 3.2. Dette skyldes ikke kun at vandplanterne er levested for en del af de vandinsekter, der udgør fødegrundlaget, men også at planterne yder strømlæ samt skjulested for ynglen.
Ynglen lever i vandløbet i 1-4 år før de smoltificerer og begynder nedvandringen mod fjorden og videre ud til deres opvækstpladser i havet. I den tid kan en stor andel være gået tabt især som følge af prædation, hvilket understreger vigtigheden af god tilgang til skjulesteder. [Carl and Møller, 2012]

3.2 Hydrologiske forhold

Som led i EU's oversvømmelsesdirektiv har Miljøministeriet udarbejdet; "Lov om vurdering og styring af oversvømmelsesrisikoen fra vandløb og søer" og igennem denne er Holstebro blevet udpeget som risikoområde. Derfor er der blevet udarbejdet en indsatsplan for byen, hvad angår ekstreme oversvømmelser, som kan påvirke sundhed, miljø, kulturarv og økonomi. [Naturstyrelsen og Kystdirektoratet, 2011]
Årsagen til denne udpegning, skyldes at Holstebro har oplevet en række store oversvømmelser af det centrale og værdifulde byområde, som følge af øget vandføring i Storåen. Den værste af disse hændelser, fandt sted i 1970, hvor åen nåede op på en vandføring på 105m^3/s og oversvømmede store dele af midtbyen. Hændelsen er efterfølgende blevet kategoriseret som en 100 års hændelse. Siden da er byen blevet ramt af flere oversvømmeler, sidst d. 16 januar 2011, hvor åen nåede en vandføring på 65m^3/s, Figur 3.3.

Figur 3.3. Søndag d. 16. januar 2011, var Holstebro atter udsat for oversvømmelser, den største siden hændelsen i 1970. [Jakobsen, 2011]

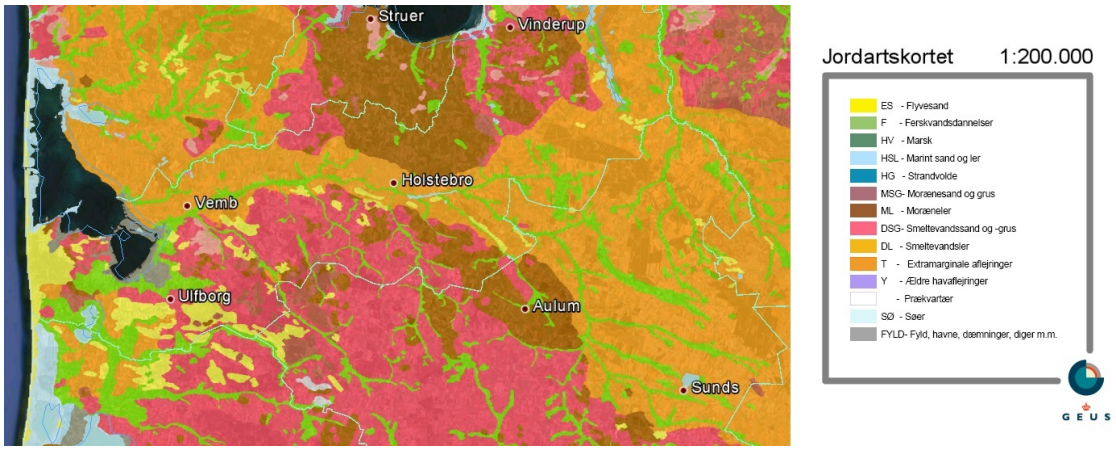
Det har således været relevant at undersøge hvilken betydning omløbsstryget vil få for åens evne til at bortlede vandet ved ekstremhændelser. I forbindelse med dette, har Alectia derfor udført modelberegninger for stuvningseffekten opstrøms søen ved brug af MIKE 11, kombineret med Spatial Analyst til ArcGis. Dette er sket for vandføringer på hhv. 20 og 40 m^3/s på scenarie 1 og 2, hvor scenarie 2 viste sig at give den største stuvning opstrøms søen, Figur 3.4.

Figur 3.4. Her vist stuvningen opstrøms søen ved scenarie 2. [Rasmussen *et al.*, 2013]

Resultatet af disse modelleringer viser at det vil være sværere at tilbageholde vand i Vandkraftsøen ved ekstremhændelser end det er i dag. Dog skal det bemærkes at magasineringsvolumenet, som står til rådighed i søen er meget begrænset. Dette skyldes især det konstant høje vandspejl. Det er muligt i forbindelse med ekstremhændelser at sænke vandspejlet i søen, forud for belastningen, men søens magasineringspotentiale vil alligevel være opbrugt i løbet af meget kort tid.
Holstebro Kommune er ligeledes igennem analyse, kommet frem til at midtbyen ikke kan sikres mod oversvømmelser udelukkende ved at benytte Vandkraftsøens magasineringsvolumen. Det er derfor mere relevant at se på om vandet kan tilbageholdes længere oppe i systemet, hvor skadesomkostningerne vil være langt mindre. Derved forsinkes afstrømningen og det sikres at belastningen ned gennem byen ikke bliver så stor. [Rasmussen *et al.*, 2013]

3.3 Sedimentproblematik

Storåens opland ligger i område, som nævnt i afsnit 2.1, der hovedsageligt er bestående af ekstramarginale aflejringer, hvilket fremgår af Figur 3.5. Jorden er derfor meget sandet, hvilket gør den let påvirkelig over for erosion. Fra naturens side er åen et dynamisk system, hvis morfologi ændrer sig med tiden. I områder med stærk strøm vil materiale fra brinker og bund således blive borteroderet og ført med strømmen. Mens dette aflejres i områder af åen, hvor strømningsforholdene er svage nok til at dette fældes. En proces, som er i nogenlunde ligevægt.
Vandkraftsøen fungerer, af samme årsag, som et ganske effektivt sandfang, hvilket bevirker at det nedre løb samt Nissum Fjord ikke belastes i samme grad, som hvis systemet var foruden denne. Store mængder sediment, hovedsageligt bestående af silt og sand, er således blevet aflejret her igennem tiden.



Figur 3.5. Storåens opland består hovedsageligt af ekstramarginale aflejringer. [GEUS, 1989]

Denne balance ophører dog, når de mennekselige aktiviteter for området inddrages. Således er store dele af oplandets areal benyttet til dyrkning af afgrøder. I vintermånederne, hvor de større regn- og smeltevandshændelser hovedsageligt finder sted, er mængden af vegetation på disse arealer meget begrænset. Dette resulterer i at store mængder materiale bliver ledt fra markene og ud i åen via overfladeerosion. Sedimenttransporten i systemet, er yderligere styrket af intensiv grødeskæring, hvilken tidligere var flittigt anvendt, for at optimere vandløbets bortledningsevne i sommermånederne.

Ved implementering af Alectia's skitseforslag 1, 2 eller 3, fjernes muligheden i store træk for at aflejre sedimentet i Vandkraftsøen. Det kan således få betydelige konsekvenser på det nedre løb, samt den modtagne recipient - Nissum Fjord, hvis ikke der udarbejdes nogen foranstaltninger mod dette. Konsekvenserne kan være en kombination af tilsandede gydeområder, ændret hydrologi samt øget stofbelastning. I forbindelse med at åløbet igennem Holstebro tilsander, vil risikoen for fremtidige oversvømmeler øges. Derfor vil det føre til øgede omkostninger på vedligeholdelse, da sedimentet om nødvendigt, skal opgraves. Det er derfor oplagt at integrere et sandfang i forbindelse med etableringen af omløbsstryget.

3.3.1 Aflejret sediment

Siden søens etablering i 1941, er mængden af aflejret sediment vokset stødt. Grundet bekymringen omhandlende sedimentets indhold af miljøfarlige stoffer, er det blevet udført en række undersøgelser af denne igennem tiderne. Der er ud fra disse undersøgelser fremkommet forskellige estimater af den totale sedimentmængde. Størrelsen af estimatet har i høj grad været styret af hvilken metode, der er anvendt, hvilket fremgår af det følgende:

1. Den første undersøgelse blev lavet i 1988 af [Hedeselskabets Forsøgsvirksomhed, 1988], hvor søens mængde af aflejret sediment blev forsøgt kortlagt. Ved denne, blev sedimentprofilet kortlagt for 7 tværsnit, og den samlede mængde blev vurderet til, at ligge i omegnen af 225.000m^3.

2. Anden undersøgelse er beskrevet i en rapport fra 1991, udarbejdet af en arbejdsgruppe bestående af Holstebro Kommune, MLK-enheden i Holstebro, den tidligere Ringkøbing Amtskommune og rådgivervirksomheden Birch og Krogboe. Sedimentlagets tykkelse blev bestemt via. en rundstok, hvor denne via en flad skive i snor blev målt tykkelsen. Ud fra bestemmelse af sandbankernes udbredelse, både via. luftfotos og besigtigelse ved en tørlægning i samme periode, blev det estimeret at der sedimentmængden lå i omegnen af 650.000m^3[Holstebro Kommune, 1991].

3. I den nyeste undersøgelse, foretaget af Fugro i 2003, blev siltlagets tykkelse kortlagt ved brug af ekkolod. Ud fra denne opmåling, antydes det at mængden, af aflejret sediment, ligger i omegnen 123.500m^3. Dog er dette estimatet vedhæftet en vis usikkerhed, da ekkoloddet som minimum kræver en vanddybe på 120cm for at kunne give en aflæsning af siltlagets tykkelse. Endvidere er denne aflæsning af siltlagets tykkelse tillagt en nøjagtighed på 10cm. [Fugro Denmark A/S, 2004]

Da undersøgelsen udført af Fugro er den nyeste af dato, og samtidig den undersøgelse, der vurderes at have anvendt den mest pålidelige metode til bestemmelse af sedimentforekomsten, antages det at estimatet fra denne er den mest pålidelige. I perioden 1993-1994 blev der endvidere opgravet op mod 80.000t sediment i den øvre sø, hvilket hovedsageligt var bestående af okkerslam [Liboriussen *et al.*, 2007]. De største aflejringer har fundet sted, i områder hvor der er den største ændring i strømningshastighederne, altså ved Storåens indløb til den øvre sø. Det er endvidere vurderet at sediment tilførslen til Storåen er på 6,5m^3/km^2 pr. år, hvilket svarer til en årlig tilførsel til Vandkraftsøen på 4.232 m^2. [Ankjærø *et al.*, 2010]

3.3.2 Miljøskadelige stoffer

Sedimentet i Vandkraftsøen bærer præg af de menneskelige aktiviteter, der i tidens løb har fundet sted i Storåens opland. Sedimentet er således indeholdende en række stoffer, som ved for høje koncentrationer kan påvirke vandkvaliteten negativt og derved også flora og fauna. I det følgende er en kort gennemgang af de mest relevante:

Okkerbelastning

En af de helt store belastninger Storåen lider under, er okker. Igennem tidligere undersøgelser er det blevet vurderet at en tredjedel af sedimentet i søen er bestående af okkerslam [Holstebro Kommune, 1991]. Denne belastning skyldes hovedsageligt at pyrit-holdige jorde, opstrøms søen er blevet drænet til fordel for landbruget. Idet grundvandsstanden er blevet sænket, kan ilt fra luften komme i kontakt med pyritten. Dette medfører at denne spaltes til ferrojern og svovl, der så bliver udledt med drænvandet. Bliver ferrojernet yderligere iltet, omdannes det til ferrijern, som med den rustrøde farve også er kendt som okker, Figur 3.6.

Figur 3.6. Ved sænkning af grundvandsstanden dannes grundlaget for dannelsen af okker i pyritholdige jorde. [Sloth]

Ferrojernet er giftigt for fisk og smådyr, hvorimod okkeret i sig selv ikke er giftigt. En for stor belastning af okker fører dog til, at lyspenetrationen i vandet nedsættes, og fotosyntesen derved hæmmes i vandplanterne. I et vandmiljø med en høj koncentration af okker, kan dette føre til at fysiske påvirkninger af fisk og vandinsekter. For fiskene er det særligt deres gæller, der er skrøbelige, idet okkeren kan sætte sig som et lag på disse og derved sænke fiskenes iltoptag. Svovlen, der udskylles i samme ombæring som jernforbindelserne, omdannes ofte til svovlsyre, hvorved det får betydning for vandløbets surhedsgrad og derved trivselsbetingelserne for fisk og vandinsekter. [Madsen]

Næringsstoffer

En anden vigtig faktor for vandmiljøet er tilførslen af næringssaltene kvælstof og fosfor. Da en for stor tilførsel af disse leder til eutrofiering. Især i søer og fjorde er dette fænomen kendt og iltindholdet sænkes i perioder som følge heraf. I værste tilfælde kan det føre til iltmangel, og endnu værre, iltsvind. Selvom der i de senere årtier er gjort en stor indsats for at nedbringe denne tilførsel, bl.a. som følge af de første Vandplaner og efterfølgende indsatsplaner for området, så er den tilledte mængde stadig for høj.

Figur 3.7. Især kvælstofpuljen er styret at landbrugets aktiviteter. [Hildebrandt, 2012]

Figur 3.8. Øgede mængder næringssalte i vandmiljøet medfører eutrofiering. [Kettunen]

I Storåens strømmende vand opstrøms Vandkraftsøen, har det ikke nogen direkte betydning, men for søens stillestående vand medfører denne tilførsel en kraftig opblomstring af fytoplankton i de varmere måneder, Figur 3.8. Vandet, der ledes ud af søen i denne periode kan derfor påvirke både sigtbarheden og iltniveauet i den nedre del Storåen, samt recipienten Nissum Fjord.
En stor andel af den tilledte mængde næringssalt kommer som følge af menneskelige aktiviteter. Hvor landbruget står for den største tilførsel af kvælstof, har dette ligeledes en markant rolle i fosfortilførslen, Figur 3.7.
Vandkraftsøen yder i dag en reduktion på det tilledte kvælstof på mellem 10-20%. Ved opførslen af et nyt omløbsstryg vil opholdstiden i søen stige og derfor lede til en øget kvælstofreduktion i søen, dog er det markant mindre mængder vand, som vil blive ledt gennem denne og det er derfor svært at vurdere, hvilken betydning det vil få for Nissum Fjord.
En stor andel af det partikulært bundne fosfor opfanges i dag af Vandkraftsøen, hvilket ikke vil være tilfældet fremover. Dette understreger vigtigheden i at få inkluderet et sandfang som led i etableringen af omløbsstryget, så det sikres at der ikke forekommer en øget belastning på recipienten.

Tungmetaller

Ifølge Vandplanen for området, ligger indholdet af tungmetaller i Vandkraftsøen over 75%-fraktilen for danske søer, hvad angår koncentrationen af kobber, zink, cadmium, krom og nikkel [Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2011]. Der er dog tale om data af ældre dato så ændringer kan sidenhen have forekommet. Bekymringen angående tungmetallerne er, at de ikke bliver nedbrudt i naturen og at forhøjede koncentrationer af disse kan være giftige for flora og fauna. Virkningen er forskellige alt efter hvilket tungmetal, der er tale om.

Problemformulering 4

Som følge af analysen udarbejdet i kapitel 3, står det klart at en række områder er relevante mht. etableringen af det foreslåede omløbsstryg. Det er således først og fremmest vigtigt at omløbsstryget er med til at opfylde målsætningen om et kontinuert vandløb. Dertil kommer kravet om at det samtidig skal byde på gyde- og opvækstområder for laksefiskene. Endvidere ønskes Vandkraftsøen bevaret som rekreativt område. Da der allerede er en vis kendskab til hvordan disse punkter skal opnås, vil det ikke blive videre behandlet i dette projekt.
Det samme gør sig gældende mht. problematikken omhandlende ekstreme afstrømningshændelser. Det er vurderet at Vandkraftsøen ikke yder et særlig stort magasinerings potentiale, og det foreslås at engarealerne opstrøms søen kan oversvømmes under disse hændelser. Hvilket gerne skulle mindske peaket af belastningen, inden den når til Holstebro by. Herved kan større fysiske skader på bebyggelse i byen undgås og det økonomiske eftermæle mindskes.
Hvad der er af særlig relevans i forbindelse med dette projekt, er sedimentproblematikken. Det er kendt at sedimenttransporten i Storåen er af en markant størrelse, og at dette samtidig er indeholdende miljøskadelige stoffer af et vist omfang. Hvor sedimentet i den nuværende situation hovedsageligt bliver aflejret i Vandkraftssøen, vil etableringen af omløbsstryget flytte denne aflejringsproces nedstrøms. Det er derfor oplagt at se på muligheden for integreringen af et sandfang, hvorved denne belastning mindskes. Dette danner således grundlaget for følgende problemformulering:

Hvorledes vil etableringen af et omløbsstryg påvirke aflejringen af sediment i Storå-systemet, og kan etableringen af et sandfang afhjælpe denne belastning?

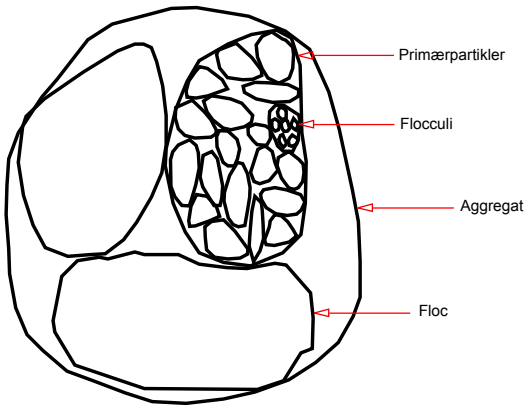
Dette projekt vil derfor undersøge sedimenttransporten ved de nuværende forhold, samt for ændringen, som må forekomme som følge af etableringen af omløbsstryget, hvorefter der forsøges dimensioneret et sandfang til afhjælpning af problemet. Til dette benyttes programpakken MIKE 11 og MIKE 21 fra DHI og deres tilhørende sedimenttransportmoduler. Endvidere vil der blive indsamlet prøver af sedimentet fra søen, hvilke analyseres i laboratoriet, med henblik på at bestemme sedimentets fysiske egenskaber.

Sedimentkarakteristik 5

Sedimenttransporten i Storåen er, som fremhævet i sektion 3.3, af en betydelig størrelse og derfor udvalgt som fokusområde i dette projekt. Hvor størstedelen af dette hovedsageligt er udgjort af fraktioner af silt og sand. Siltindholdet i sedimentet kan skabe tvivl om, hvorvidt der er tale om kohæsions- eller friktionsmateriale, hvilket kan have stor betydning for, hvordan sedimenttransporten udfolder sig. Dette kapitel vil derfor fastslå, hvilken materialetype sedimentet bedst kan beskrives ved.

5.1 Klassificering

Silt betegnes som værende overgangsmateriale mellem kohæsions- og friktionsjordarter, og lader sig derfor sjældent klassificere som rent kohæsions- eller friktionsmateriale. Klassificering afhænger både af siltfraktionens kornstørrelsesfordeling, samt indholdet af sand, ler og organisk materiale i sedimentet. Er fraktion af ler på over 10 % af den samlede kornstørrelsesfordeling, samt andelen af partikler over 0,06 mm lille, kan sedimentet karakteriseres som kohæsivt. Er dette ikke gældende, regnes sedimentet for værende friktionsmateriale. [Nielsen *et al.*, 2011]
Grunden til at lerfraktionen har så stor betydning for sedimentets egenskaber er, at disse mineraler grundet deres flade struktur, har en et stort overfladeareal i forhold til deres masse. Overfladen på lerpartiklerne er ionisk ladet, hvilket får partiklerne til at interagere med hinanden elektrostatisk. Et samspil, som er medførende til, at lerpartiklerne danner flokkulationer, som illustreret på Figur 5.1.



Figur 5.1. Principskitse af flokkuleringsstruktur, [Johansen, 1998].

Flokkulationerne for kohæhsivt sediment kan deles op i fire undergrupper:

- Primærpartikler (1 μ m)
- Flocculi (5 μ m)
- FLoc (50 μ m)

- Aggregater (> 50 μ m)

Ved dannelse af flokkulationer i aggregaterne, stiger porøsiteten af disse, hvilket medfører et fald i densiteten, og får betydning for faldhastigheden.

5.2 Sedimentprøver

For at Klassificere sedimentet, blev der under en ekskursion til Vandkraftsøen, den 1. november 2012, derfor indsamlet sedimentprøver med henblik på bestemmelse af kornstørrelsesfordelingen. Der blev således udtaget insituprøver af bunden på fem forskellige lokaliteter af Vandkraftsøen, hvor oplysninger om disse er angivet i tabel 5.1. På en enkelt lokalitet blev der endvidere udgravet en større prøve, hvilken er indgået i en række forsøg til bestemmelse af sedimentets egenskaber (beskrevet i kapitel 7).

ID	x-koordinat	y-koordinat	insituprøve	prøve til forsøg
1	477927.315	6245288.467	x	
2	478241.201	6245215.621	x	
3	478595.175	6245091.633	x	
4	479016.790	6245301.835		
5	480154.686	6245430.656	x	x

Tabel 5.1. UTM-koordinaterne til lokaliteterne samt oplysning om hvilke prøver, der er indsamlet hvor.

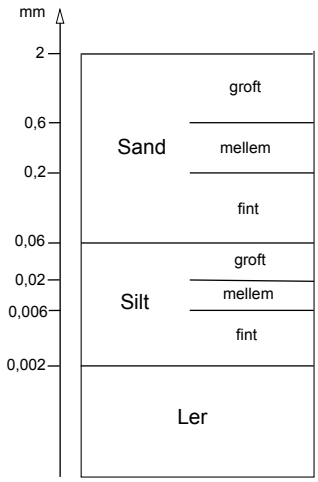
Prøvetagningslokaliteterne er vist på Figur 5.2.

Figur 5.2. Lokationerne for de forskellige prøveudtagninger.

Generelt bar insituprøverne præg af store aflejringer, hvilke hovedsageligt var bestående af silt og fint sand. På en enkelt lokalitet, 4, var det dog ikke muligt at udtage prøver med røret, da sedimentet her udgjordes udelukkende af sand. Dette skyldes, at denne lokalitet lå meget brednært og har været påvirker af bølger. Generelt kunne anes en lagdeling i prøverne, samt et fint lag trådalger oven på det indsamlede sediment.

5.3 Kornstørrelsesfordeling

Kornstørrelsesfordelingen er med til at kortlægge, hvor stor en andel af sedimentet de forskellige jordarter udgør. Her har særligt lerfraktionen interesse, som forklaret tidligere. Opdelingerne af disse er beskrevet på Figur 5.3.



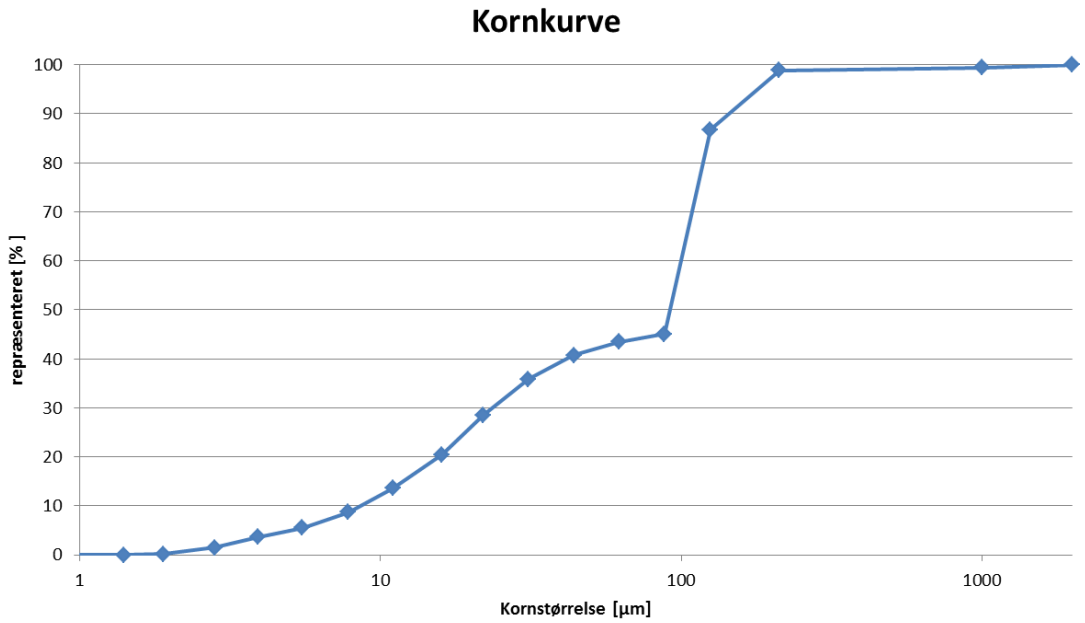
Figur 5.3. Opdelingen af sedimentfraktioner.

For at finde ud af om sedimentet går ind under kategorien kohæsivt materiale eller friktions materiale, er der foretaget analyse af kornstørrelsesfordelingen for sedimentet opsamlet på lokation 5. Da prøven var bestående af relativt fint materiale, blev denne først ført igennem en vådsigtning, som vist på Figur 5.4. Her er sier med følgende maskevidde anvendt; 2000, 1000, 212 og 125 μm.

Figur 5.4. Opstilling til vådsigtning.

Da der er tale om vådsigtning, har det været nødvendigt også at bestemme vandindholdet for sedimentet, så dette kan modregnes. Den resterende del af prøven, som har været for fint til at

blive opsamlet af sigterne, er blevet ført videre igennem en microtrack particle analyse. Denne analyse er udført af tre omgange for at negligere evt. afvigelser, og det er således gennemsnittet heraf, der benyttes. Den fremkomne kornkurve for sedimentet er vist på Figur 5.5.



Figur 5.5. Kornkurven for sedimentet opsamlet på lokalitet 5.

Kornstørrelsesfordelingen benyttes videre til bestemmelse af de inputparameter, som skal indgå i MIKE 11's sedimenttransport-modul. Således indgår 50%-fraktilen samt standardafvigelsen i denne. De relevante fraktiler er vist i tabel 5.2.

Fraktil [%]	diameter [μ m]
16	12
50	92
84	123

Tabel 5.2. De relevante fraktiler af kornkurven.

Standardafvigelsen er bestemt til 3,20 ud fra ligning 5.1.

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \tag{5.1}$$

Ud fra kornkurven står det klart at fraktionen af ler i sedimentet (d < 2μ m) er nærmest ikke-eksisterende, mens siltfraktionen udgøres af ca. 43 % og sandfraktionen ca. 56 %. Sedimentet antages derfor i forbindelse med modelleringen af sedimenttransporten, at være friktionsmateriale.

Sedimenttransport - Teori 6

For at få en bedre forståelse af dynamikken, som udspiller sig i forbindelse med sedimenttransporten, vil dette kapitel beskæftige sig med teorien bag denne for friktionsmateriale. Dette er især anvendeligt i det senere, når transporten beskrives via en matematisk model, igennem MIKE 11 og MIKE 21. Dette kapitel er skrevet ud fra [Chanson, 1999], [Bentzen, 2006] og [Johansen, 1998]. Overordnet set består sedimenttransporten af de de fire processer:

1. Vertikal opadrettet erosion
2. Horisontal bundtransport
3. Horisontal suspenderet transport
4. Vertikal nedadrettet aflejring/deposition

I det følgende vil der således være en teoretisk gennemgang af disse.

6.1 Erosion

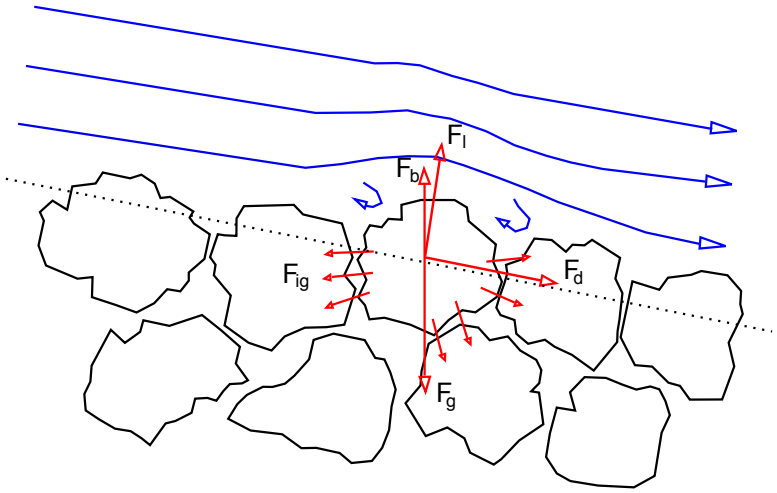
Erosionen af sedimentet begynder, når bundforskydningsspændingen overstiger en vis grænse - benævnt kritisk bundforskydningsspænding. Denne er lig med overfladesedimentets friktionsstyrke og afhænger således af sedimentkarakteristikken.

6.1.1 Begyndende bundtransport

Partiklerne på vandløbsbunden af påvirket af en række kræfter, hvor nogle af disse virker stabiliserende mens andre er destabiliserende. Bundtransporten går således i gang, når de stabiliserende kræfter bliver mindre end de destabiliserende. Af kræfter, der virker på partiklerne er følgende:

- Tyngdekraft (stabiliserende)
- Opdriftskraft (destabiliserende)
- Hydrodynamisk trækkraft (destabiliserende)
- Hydrodynamisk løftekraft (destabiliserende)
- Interpartikulære kræfter (stabiliserende)

Hvorledes de forskellige kræfter påvirker det enkelte partikel er illustreret på Figur 6.1.



Figur 6.1. Illustrering af de kræfter, som påvirker det enkelte partikel. [Bentzen, 2006]

Tyngde- og opdriftskraften, F_g og F_b, virker begge i den vertikale retning, mens trækkraften, F_d virker i strømningsretningen. Løftekraften, F_l, virker vinkelret på strømningsretningen og de interpartikulære kræfter, F_ig er relateret til partiklernes disposition og konsolidering.

$$F_g = \rho_p \cdot g \cdot v_p \tag{6.1}$$

$$F_b = \rho \cdot g \cdot v_p \tag{6.2}$$

$$F_d = \frac{C_d \cdot \rho \cdot A_p \cdot V^2}{2} \tag{6.3}$$

$$F_l = \frac{C_l \cdot \rho \cdot A_p \cdot V^2}{2} \tag{6.4}$$

hvor

ρ_p	Densitet partikel [kg/m^3]
ρ	Densitet vand [kg/m^3]
g	Tyngdeaccelerationen [m/s^2]
v_p	Volumen af partikel [m^2]
C_d	Trækkoefficient [-]
C_l	Løftekoefficient [-]
A_p	Karakteristisk tværsnitsareal af partikel [m]
V	Karakteristisk hastighed over vandløbsbund [m/s]

De interpartikulære kræfter skal brydes før re-suspension indfinder sig, og den kritiske bundforskydningsspænding skal overskrides før erosionen går i gang.
Ud fra eksperimentale observationer er vigtigheden af en stabilitetsparameter blevet fremhævet, den såkaldte Shields parameter, [Shield, 1936]. Shield påviste således, at stabilitetsparameteren, ligning (6.5), primært er en funktion af partiklens Reynolds tal, ligning (6.6).

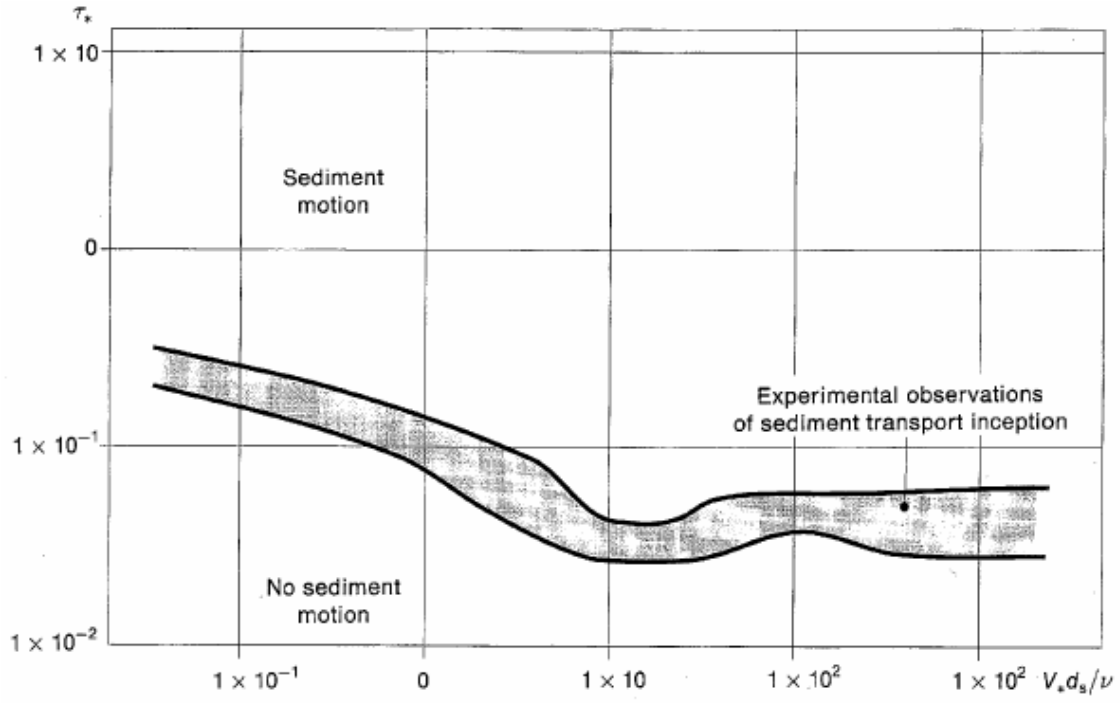
$$\tau_* = \frac{\tau_0}{\rho\,(s-1)\,g\,d_s} \tag{6.5}$$

$$Re_p = \frac{V_* d_s}{\nu} \tag{6.6}$$

hvor

τ_*	Shields parameter [-]
τ_0	Bundforskydningsspænding[N/m^2]
s	Relativ densitet af sediment [kg/m^3]
d_s	Middel kornstørrelse [m]
ν	Kinematisk viskositet [m^2/s]
V_*	Friktionshastighed [s^{-1}]

Ud fra en række eksperimenter fremkom han med Shields diagram, Figur 6.2, hvilket indikerer hvornår der kan forventes en begyndende bundtransport.

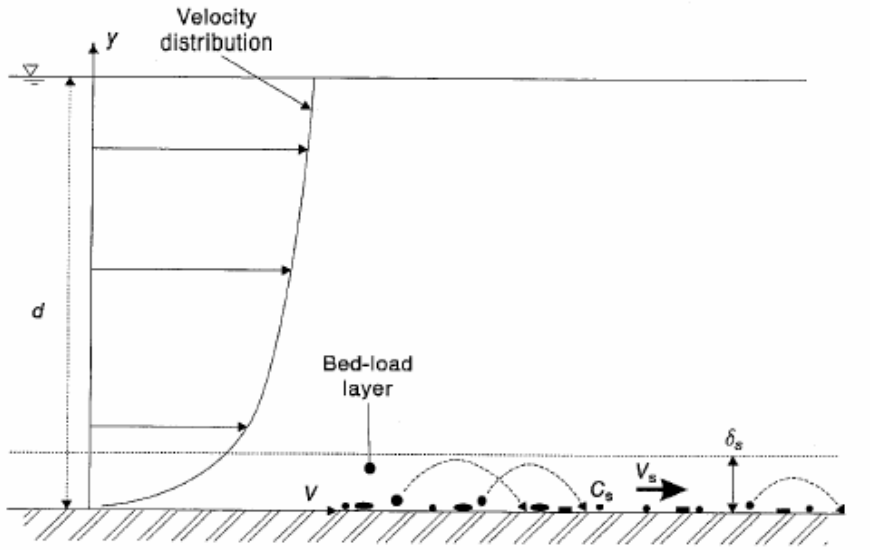


Figur 6.2. Shields parameter som funktion af partiklens Reynolds tal. [Shield, 1936]

Shields parameter aftager i størrelse ved tiltagende kornstørrelse, således at for en given strømningshastighed kan føre til bevægelse af mindre partikler, mens de større partikler ikke sættes i bevægelse.

6.1.2 Bundtransport

Bundtransporten foregår i forskellige former, partiklerne kan således transporteres trillende, glidende eller i små hop. Transporten er nært sammenhængende med de interpartikulære kræfter og finder sted i et tyndt lag over vandløbsbunden, illustreret på Figur 6.3. Ud fra observationer, er det vurderet at tykkelsen på dette lag kun udgøres af 10-20 partikeldiameters højde.



Figur 6.3. Bundtransporten foregår i et tyndt lag over vandløbsbunden. [Chanson, 1999]

I forbindelse med bundtransporten udsættes partiklerne således for hydrodynamiske kræfter, tyngdekraften samt de interpartikulære kræfter. Samtidig udsættes de immobile partikler på vandløbsbunden for vægten fra bundtransporten i form af normalspænding. Nomalspændingen/den effektive spænding, σ_e , som påvirker de immobile partikler er proportional med udtryk (6.7).

$$\sigma_e \, \alpha \, \rho \, (s-1) \, g \cos(\theta \, C_s \, \beta_s) \tag{6.7}$$

hvor

θ	Hældningen af vandløbsbunden [-]
C_s	Volumenkoncentration af sediment i transportlaget [kg/m^3]
β_s	Tykkelse af transportlaget [m]

Den effektive spænding øger derfor friktionsstyrken af vandløbsbunden samt forskydningsspændingen, ligning (6.8), hvilket påvirker den øverste grænse af det immobile sediment.

$$\tau_0 = (\tau_0)_c + \sigma_e \, tan(\phi_s) \tag{6.8}$$

hvor

$(\tau_0)_c$	Kritisk bundforskydningsspænding [N/m^2]
ϕ_s	Friktionsvinklen [$\circ$]

Fysisk er bundtransportraten sammenhængende med karakteristikken af det lag hvor bundtransporten foregår i. Denne er således forbundet med middelkoncentrationen af det transporterede sediment, tykkelsen af transportlaget samt middelhastigheden af det transporterede sediment. Raten, q_s hvorved bundtransporten foregår, kan derfor beskrives ved ligning (6.9).

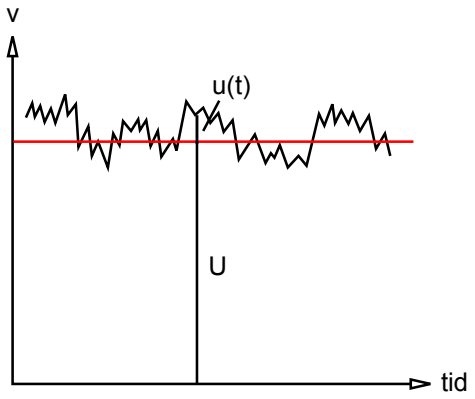
$$q_s = C_s \beta_s V_s \tag{6.9}$$

hvor

V_s	Middelhastigheden for sedimentet i transportlaget [m/s]

6.1.3 Begyndende suspenderet transport

Der er ikke nogen klar definition for hvornår den suspenderede transport tager sin begyndelse. Når bundforskydningsspændingen har oversteget den kritiske værdi, starter bundtransporten med trillen og små hop. Ved yderligere stigning i bundforskydningsspændingen stiger også mængden af partikler, som hopper og bliver rikochetteret, indtil disse danner en sky af partikler i suspension. Betragtes en partikel i suspension, vil bevægelsen af denne i retningen af normalen til vandløbsbunden, være i relation til balancen mellem komponenten af partiklens faldhastighed og den turbulente hastigheds fluktuation, u, i normalens retning (illustreret på Figur 6.4).



Figur 6.4. Tidsserie af hastigheden hvor fluktuationen er markant. [Bentzen, 2006]

Der er opstillet en række kriterier igennem tiden for suspenderet transport, men det vurderes at den turbulente hastighedsfluktuation er af nogenlunde samme størrelsesorden som friktionshastigheden, udtrykt ved ligning (6.10). Dette udtryk inddrager dog ikke effekten af vandløbets bundhældning.

$$\frac{V_*}{w_0} > \text{kritisk værdi} > 0{,}2 - 2 \tag{6.10}$$

hvor

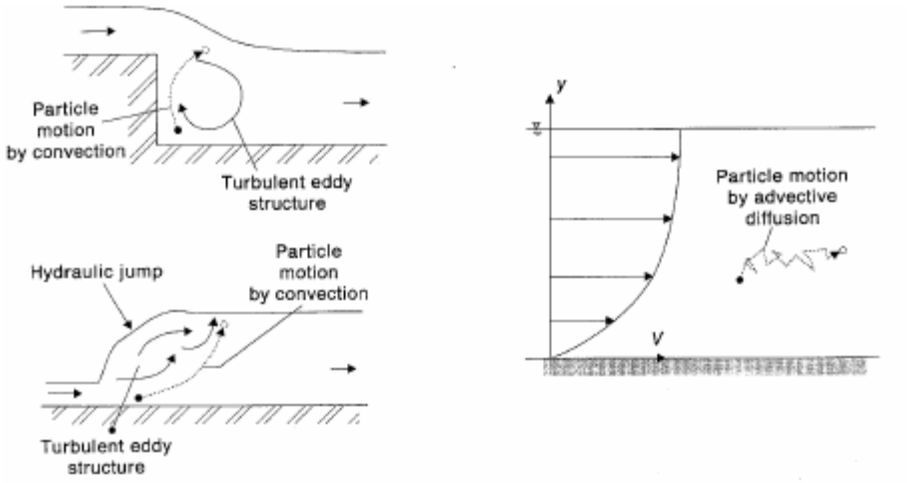
V_*	Friktionshastighed [m/s]
w_0	Partiklens faldhastighed [m/s]

6.1.4 Suspenderet transport

Suspenderet transport kan beskrives som en sky af partikler omgivet af væske, hvilke sjældent kommer i kontakt med bunden. Suspension af sedimentet finder sted, når de turbulente strømninger når en størrelse, der er i ligevægt med partiklens vægt, ligning (6.11).

$$\frac{V_*}{w_o} > 0{,}2 - 2 \tag{6.11}$$

Transporten af suspenderet sediment finder sted via. en kombination af de to mekanismer, advektion og diffusion/dispersion, Figur 6.5. Advektionen er foregår som transport af strømmen og større hvirvler, mens diffusion/dispersion foregår som tilfældig transport via små hvirvler. Koncentrationen af de suspenderede sediment vil være størst langs bunden og diffusionen vil frembringe en opadgående transport til områder med lavere koncentration.



Figur 6.5. Suspenderet sediment transporters som følge af konvektion- og diffusions processer. [Chanson, 1999]

Ved ligevægt mellem sedimentation og diffusion gælder Fick's 1. lov (kontinuitetsligning for sedimentet) , udtryk (6.12).

$$D_s \frac{\mathrm{d}c_s}{\mathrm{d}y} = -w_0 c_s \tag{6.12}$$

hvor

D_s	Diffusionskoefficient [m^2/s]
c_s	Lokal koncentration af sediment [kg/m^3]
y	Afstand til vandløbsbund [m]

Diffusionskoefficienten er tilnærmelsesvis af samme størrelse som hvirvel viskositeten, og kan estimeres ud fra ligning (6.13).

$$D_s \approx \nu_T \approx 0{,}4 V_* (d - y) \frac{y}{d} \tag{6.13}$$

hvor

ν_T	Hvirvel viskositet [N/m^2 s]
d	Strømningsdybde [m]

Som følge af ligning (6.13) kan kontinuitetsligningen for sedimentet, ligning (6.12), løses i forhold til koncentrationen i en given strømningsdybde, hvorved udtryk (6.14) fremkommer.

$$c_s = (C_s)_{y=y_s} \left(\frac{\frac{d}{y} - 1}{\frac{d}{y_s} - 1} \right)^{w_0 / 0.4 V_*} \tag{6.14}$$

hvor

$(C_s)_{y\,=\,y_s}$	Koncentration i refferencedybde y_s [kg/m^3]
y_s	Bundtransportzonen (β_s) [m]

Transportraten for suspenderet sediment er givet ved udtryk (6.15)

$$q_s = \int_{\beta_s}^{d} c_s \, v \mathrm{d}y \tag{6.15}$$

hvor

v	Strømningshastighed [m/s]

6.1.5 Total transport

Den totale transport af sedimentet er givet ved summen af bundtransporten og den suspenderede transport, ligning (6.16)

$$q_s = (q_s)_{bundtransport} + (q_s)_{suspenderet\ transport} \tag{6.16}$$

6.2 Aflejring

Aflejringen af sedimentet er styrret af faldhastigheden for partiklen/flokkulationen, hvilken er med til at beskrive den nedadrettede vertikale transport samt depositionen. For alflejring i en hvilende væske gælder, at en partikel tungere end vand vil falde til bunden. Faldhastigheden, w_0, er hastigheden i en ligevægtssituation, hvor summen af de påvirkende kræfter er lig nul, som vist i ligning (6.17).

$$-\rho_s g v_s + \rho g v_s + \frac{1}{2} C_d \rho {w_0}^2 A_s = 0 \tag{6.17}$$

hvor

g	Tyngdeacceleration [m/s^2]
v_s	Volumen af partikel [m^3]
C_d	Trækkoefficient [-]
w_0	Faldhastighed i ligevægtssituation [m/s]
A_s	Areal af partikel i vertikal retning[m^2]

Faldhastigheden for sfæriske partikler kan udtrykkes som vist ved ligning (6.18)

$$w_0 = -\sqrt{\frac{4 g d_s}{3 C_d} (s-1)} \tag{6.18}$$

hvor

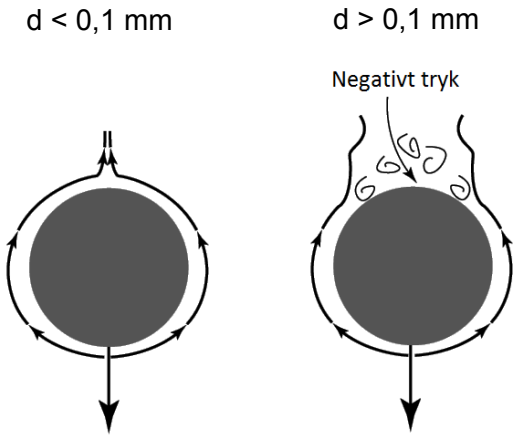
d_s	Diameter af partikel [m]

Trækkoefficientens størrelse afhænger af om der er tale om laminær- eller turbulent strømning, til at forudsige dette benyttes Reynolds tal, som for partikler i væske er givet ved ligning (6.19)

$$\mathrm{Re}_s = \frac{w_0 d_s}{\nu} \tag{6.19}$$

hvor

ν	Kinematisk viskositet [-]



Figur 6.6. Ekpsempel på laminær- og turbulent strømning rundt om en sfærisk partikel. [Bentzen, 2006]

Alt efter størrelsen af Reynolds-tallet, udtrykkes trækkoefficienten for sfæriske partikler forskelligt. Enten som beskrevet i ligning (6.20) ved laminær strømning, eller ved ligning (6.21) når strømningen rundt om partiklen er turbulent. Eksempler på disse er illustreret i Figur 6.6.

$$C_d = \frac{24}{\mathrm{Re}_s} \text{ for } \mathrm{Re}_s < 1 \tag{6.20}$$

$$C_d \approx 0{,}5 \text{ for } \mathrm{Re}_s > 1000 \tag{6.21}$$

Da de fleste naturlige partikler ikke opfylder beskrivelsen af at være sfæriske, er der fremkommet forskellige udtryk til beskrivelse af trækkoefficienten for de naturlige partikler. [Engelund and Hansen, 1967] har således opstillet udtryk (6.22) for trækkoefficienten, når der er tale om sediment bestående af grus og sand.

$$C_d = \frac{24}{\mathrm{Re}_s} + 1{,}5 \text{ for } \mathrm{Re}_s < 10000 \tag{6.22}$$

6.3 Deposition

Deposition er den proces, der beskriver transporten af materiale i den suspenderede fase til til vandløbsbunden. Processen er styret af dynamiks interaktion mellem flokkuleringerne/opbrud og sandsynligheden for at aggregater af en given størrelse kan aflejres på vandløbsbunden. Koncentrationen af suspenderet materiale aftager over tid og tilnærmer sig en ligevægts koncentration. Denne ligevægts koncentration afhænger af startkoncentrationen, bundforskydningsspændingen samt sedimenttype. Depositionsraten, D, er udtrykt ved ligning (6.23).

$$D = w_s \, c_b \, \alpha \tag{6.23}$$

hvor

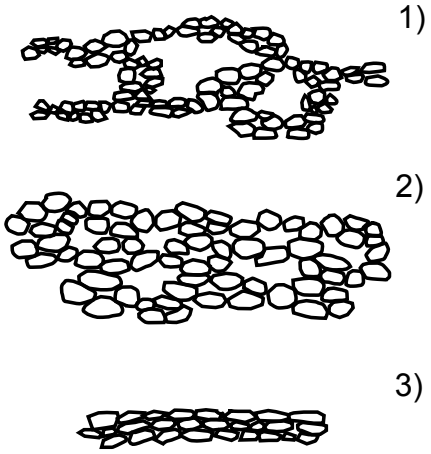
w_s	Sedimentationshastighed lige over bunden [m/s]
c_b	Koncentration af suspenderet materiale nær bunden [kg/m^3]
α	Sandsynlighed for deposition [-]

Sandsynligheden for deposition af det suspenderede sediment er beskrevet ved ligning (6.24).

$$\alpha = \left(1 - \frac{\tau_0}{(\tau_0)_c}\right) \tag{6.24}$$

6.4 Konsolidering

Selvom det udtagende sediment fra projektlokaliteten antages at være friktionsmateriale, så vil det stadig have visse træk, som er gældende for kohæsivt materiale. Da insituprøverne blev taget, var det således tydeligt, at konsolideringen af sedimentet gav det kohæsivt karakter. Af denne årsag, er dette lille teori-afsnit inddraget.
Konsolideringen af kohæsivt sediment er komprimering og deformering af det aflejrede sediment grundet egenvægten af det ovenpå liggende materiale. Konsolideringsprocessen er styret af bl.a. kornstørrelsesfordelingen, indholdet af organisk materiale og intensiteten af turbulensen. Hvor meget det pågældende sediment er konsolideret har stor betydning for størrelsen af erosionen.
Ses der på et tværsnit af sedimentlaget, så vil det øverste suspenderede lag have en lav koncentration, der gradvist stiger jo længere ned i det konsoliderede lag, der betragtes. Over tid vil konsolideringen af sedimentlaget blive kraftigere eftersom det ovenpå flydende materiale falder til ro og bliver pakket tættere. Mere specifikt betyder dette, at strukturen af sedimentet bliver deformeret, hvilket tvinger vandet ud af porerne. Mens aggregaterne over tid bliver aflejret på bundens overflade vil de begravede aggregater konsolidere mere og mere.
I suspensionsfasen vil de fine partikler af især silt og organisk materiale flokkulere. Grundet en kombination af hindret aflejring og konsolidering, vil aggregaterne interagere med hinanden og danne større løse strukturer. Under denne proces, vil den opadgående strømning af vand fra porerne fra den underliggende sediment reducerer sedimentationshastigheden til nul. Med tiden vil strømningen af porevand aftage, eftersom sedimentet bliver komprimeret mere og mere. Dette betyder samtidig at den effektive forskydningsspænding gradvist vokser som følge af kontakten mellem partiklerne.



Figur 6.7. 1) flokkuleret sediment i løst stadie, 2) konsolidering som følge af øget belastning fra oven og 3) tæt pakket sediment. [Johansen, 1998]

Overgangen fra hindret aflejring til konsolidering kan variere signifikant, som følge af de pågældende betingelser for deposition. Således vil sediment, som aflejres langsomt danne meget mere åbne strukturer i forhold til det samme sediment, hvilket depositionere hurtigt, som vist på Figur 6.7. Dette betyder samtidig, at sediment aflejret ved lave strømningshastigheder, bliver meget blødt og har et højt vandindhold samt lav granulær friktionsstyrke.

Sedimentanalyse 7

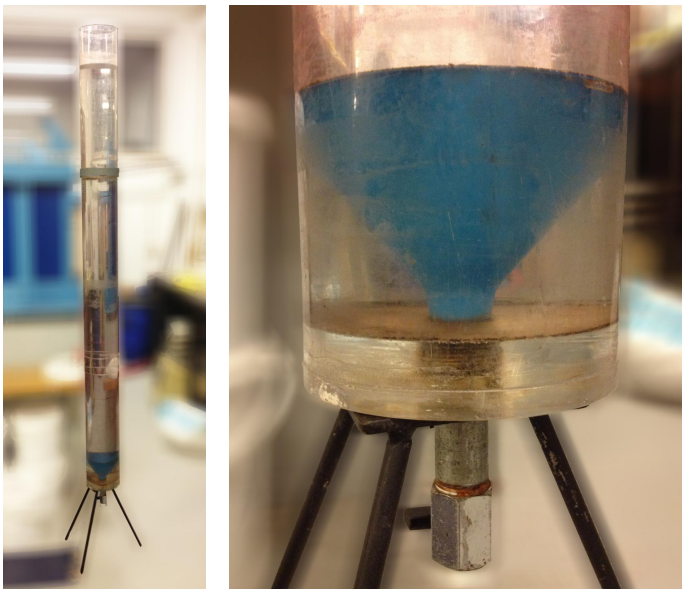
Forsøgene beskrevet i dette afsnit, udføres med hensigt på at bestemme en række egenskaber for sedimentet. Disse indgår direkte, men også indirekte, i opsætningen af sedimenttransporten i MIKE 11 og MIKE 21. Ved at kalibrere sedimenttransporten ud fra forsøgsresultaterne, håbes på en bedre tilnærmelse af de faktiske forhold. I forbindelse med forsøgene vil følgende blive bestemt:

- Faldhastighed
- Kritisk bundforskydningsspændning i forbindelse med erosion og deposition
- Erosions- og depositionsrate
- Shields parameter

Faldhastigheden findes ved brug af et vertikalt sedimentationsrør. Den kritiske bundforskydningsspænding for erosion og deposition, samt erosions- og depositionsraterne findes gennem forsøg i en cirkulær strømningsrende. Shields parameter bestemmes ud fra den funde kritiske værdi for bundforskydningsspændingen.

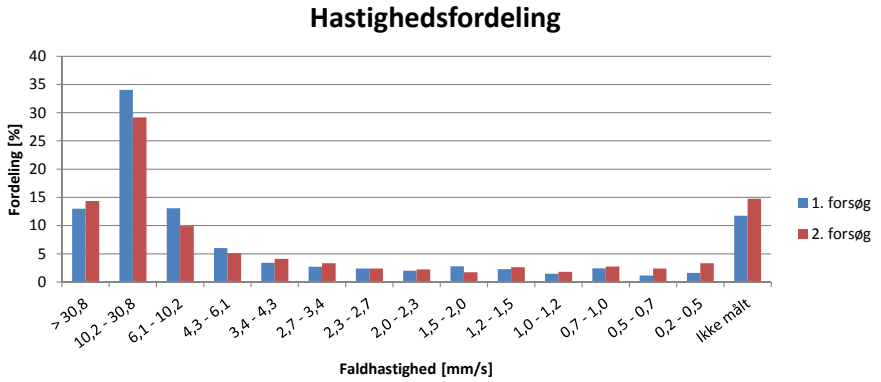
7.1 Faldhastighed

Til at bestemme faldhastigheden er benyttet en forsøgsopstilling som vist på Figur 7.1. En vertikal cylinder med en tragt til opsamling i bunden med udgang til en ventil til prøvetagningen. Der udtages 16 vandprøver af hver 100 ml størrelse for et bestemt tidspunkt fra 1 - 120 min. Forud for forsøget er der frataget en prøve af sedimentet til bestemmelse af vandindholdet.



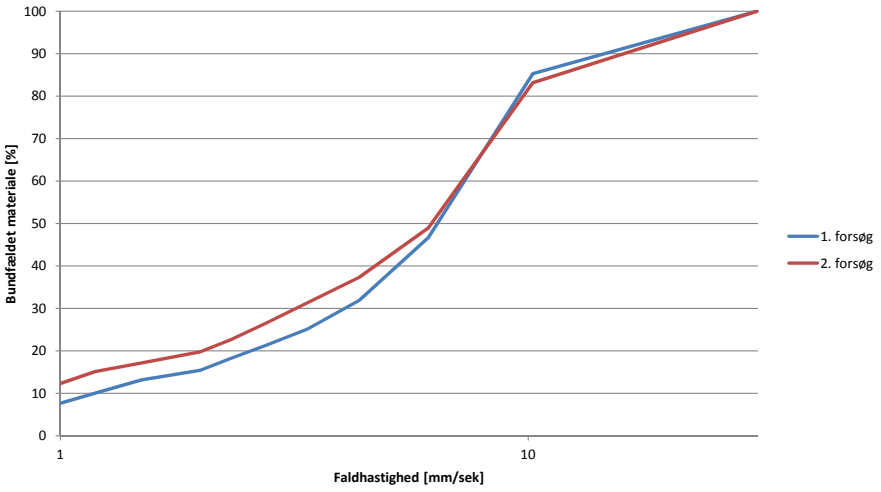
Figur 7.1. Forsøgsopstilling til bestemmelse af sedimentets faldhastighed.

Når alle prøverne er blevet opsamlet, afdampes vandet og mængden af bundfældet sediment findes. Grafen på Figur 7.2 viser de målte faldhastigheder, og hvor stor en andel af sediment som er repræsenteret indenfor hver fraktion. For begge forsøg er det er tydeligt at hastighedsfordelingen er log-normal fordelt, og at meget af sedimentet er bundfældet forholdsvist hurtigt.



Figur 7.2. Diagrammet viser den procentvise fordeling af bundefældet sediment for 1. forsøg, indenfor de forskellige faldhastigheder.

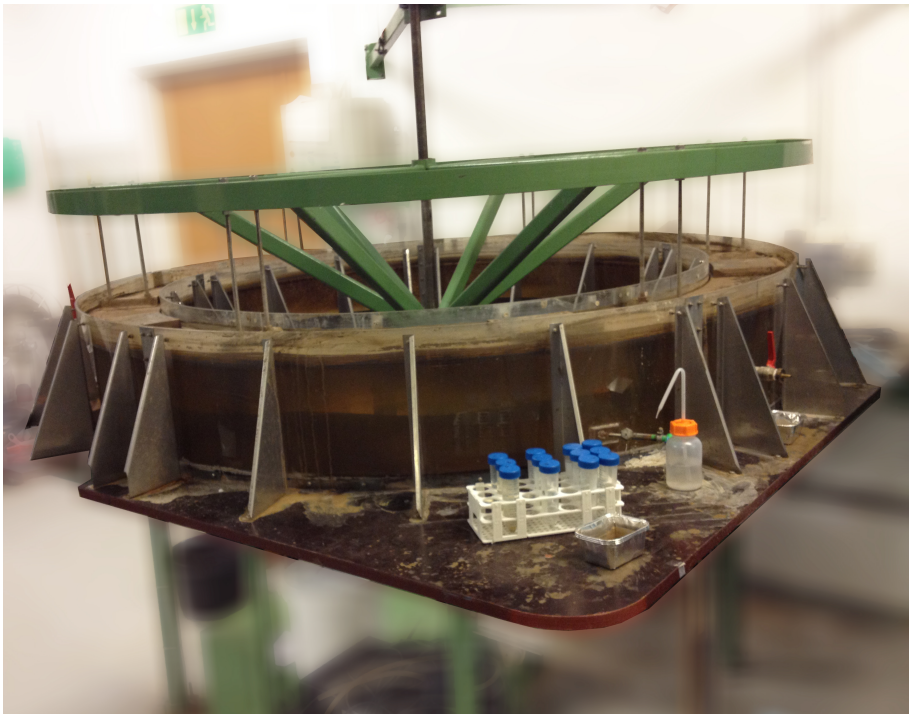
Der synes at være en ret god korrelation mellem resultaterne af de to forsøg. Resterende materiale, som ikke er kommet igennem systemet ved forsøgets afslutning, er da også af nogenlunde samme størrelse. 1. forsøg havde således en rest på 11,73 % og 2. forsøg på 14,73 %. At resten bliver af denne størrelsesorden, skyldes til dels at noget af prøven har en lavere faldhastighed end de målte, og således stadig befinder sig i vandfasen, men også at der forekommer aflejring på cylinderens- samt tragtens sider.
Ved optegnelse af resultaterne for overstående forsøg, kommer sumkurverne til at se ud som vist på Figur 7.3. Det skal bemærkes, at der kun indgår den mængde sediment fra de to forsøg, som har nået at bundfælde inden forsøgenes ophør. Ud fra disse findes 50%-fraktilen af faldhastigheden for de to forsøg til hhv. 6,45 mm/sek og 6,24 mm/sek. Den gennemsnitlige 50%-fraktil for faldhastigheden ligger således på 6,35 mm/sek.



Figur 7.3. Sumkurve over de to forsøg.

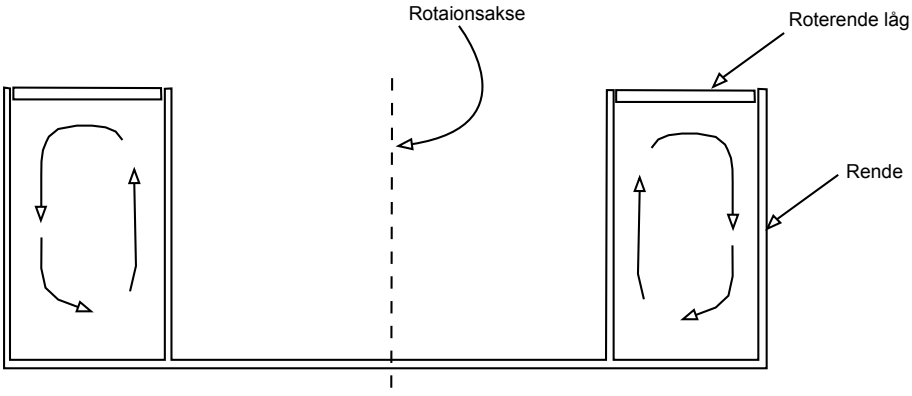
7.2 Cirkulær strømningsrende

Den cirkulære strømningsrende, som er vist på Figur 7.4 er anvendt i forbindelse med bestemmelse af den kritiske bundforskydningsspænding, både ved erosion samt deposition. De fundne værdier benyttes efterfølgende til bestemmelse af Shieldsparameter. Endvidere bestemmes erosions- og depositionsraten for sedimentet ved forskellige bundforskydningsspændinger.
Den cirkulære rende benyttes teoretisk set til, via. et roterende låg, at generere et ensartet strømningsfelt i en uendelig lang kanal - i praksis forholder det sig dog noget anderledes.



Figur 7.4. Den cirkulære strømningsrende anvendt til forsøgene.

Udover den ønskede tangentiale strømning, generes der nemlig også en sekundær strømning, grundet centrifugalkraftens påvirkning. Således dannes der også en cirkulær strømning i rendens tværsnit, som illustreret på Figur 7.5. Derved opstår der en større strømningshastighed ved rendens ydre periferi, sammenlignet med den indre. Teorien om et ensformigt strømningsfelt er derfor ikke helt korrekt.



Figur 7.5. Principskitse af de generede cirkulære strømninger i renden forårsaget af centrifugalkraften.

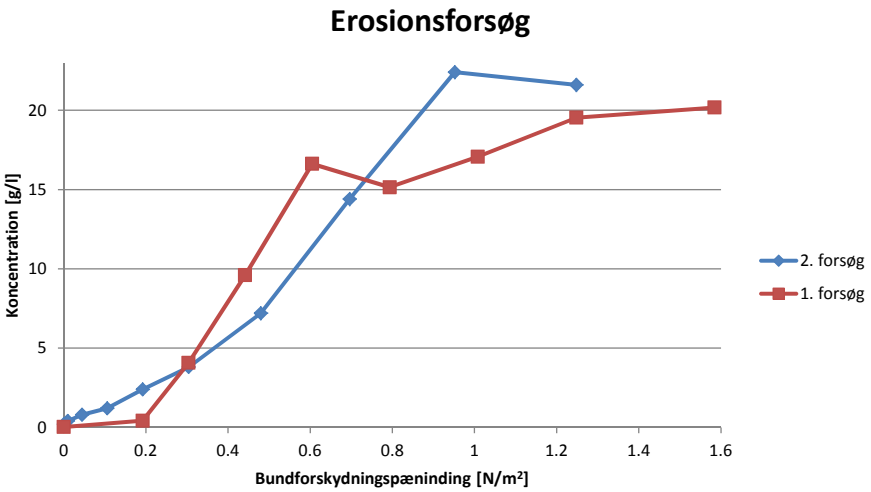
Strømningsrenden kan køre med rotationshastigheder i området 0-3 m/s og er styret af en regulator, som kan indstilles til 0-100 %. Ud fra et kalibrerende forsøg, beskrevet i bilag B på side A 1, er ligning (7.1) fremkommet. Denne benyttes til at omregne regulatorens niveau, x, til en middel bundforskydningsspænding for renden.

$$\tau_0 = 0{,}0008\,x^2 - 0{,}0008\,x \tag{7.1}$$

Den cirkulære strømningsrende køres ved forskellige hastigheder, hvor der for hver udtages vandprøver fra midten af renden. Ud fra disse prøver bestemmes stofkoncentrationen for det suspenderede materiale, og der kan hermed dannes en sammenhæng mellem denne og størrelsen på bundforskydningsspændingen. Ved erosionsforsøgene starters der med en lav hastighed, som så langsomt gennem bestemte tidsskridt bliver forøget. For depositionsforsøgene gøres det modsat.

7.2.1 Erosionsforsøg

Erosionsforsøget blev udført to gange, hvor der for begge forsøg blev anvendt et tidsskridt på 1 time mellem hvert spring. Resultaterne af disse fremgår af Figur 7.6.



Figur 7.6. Resultatet af de to erosionsforsøg.

Den sidste måling for 1. forsøg ved en bundforskydningsspænding på 1,248 N/m^2 har en lavere koncentration, end målingen forinden ved 0,952 N/m^2. Dette kan betegnes som en måleusikkerhed, men kan også skyldes at centrifugalkraften er blevet tilpas stor til at der er en ulige fordeling af sedimentet, hvorved en mindre koncentration opnås ved randens indre periferi i forhold til den ydre. Resultatet af 2. forsøg ved en bundforskydningsspænding på 0,6048 N/m^2 bærer præg af måleusikkerheder, og må betegnes som en outlier.
Det ses at erosionen ved 2. forsøg først indfinder sig ved en lidt større bundforskydningsspænding i forhold til 1. forsøg. Dette kan skyldes at sedimentet har lagt stille i renden en uge, mellem de to forsøg, og har derved haft mulighed for at konsolidere. Den kritiske bundforskydningsspænding bestemmes af samme årsag ud fra 1. forsøg og det vurderes at erosionen begynder, når bundforskydningsspændingen når op på 0,1056 N/m^2.

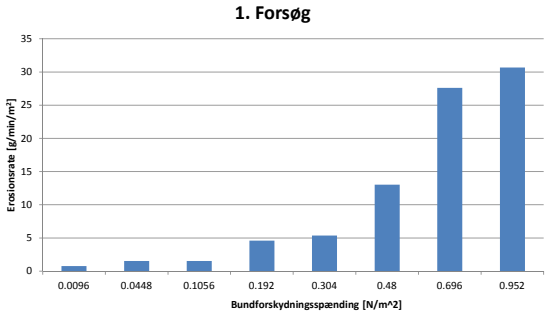
Eriosionsraten, E, bestemmes ud fra ligning (7.2).

$$\mathrm{E} = \frac{C_2 - C_1}{\Delta t} V \tag{7.2}$$

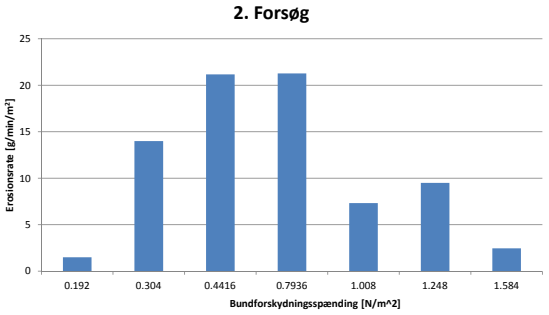
hvor

C_1	Koncentration ved 1. måling [g/l]
C_2	Koncentration ved 2. måling [g/l]
Δt	Tid mellem målingerne [min]
V	Volumen af strømningsrende [l]

Sammenhængen mellem denne og bundforskydningsspændingen, er vist på hhv. Figur 7.7 og 7.8.



Figur 7.7. Erosionsraten for 1. forsøg, hvor outlieren ikke indgår.

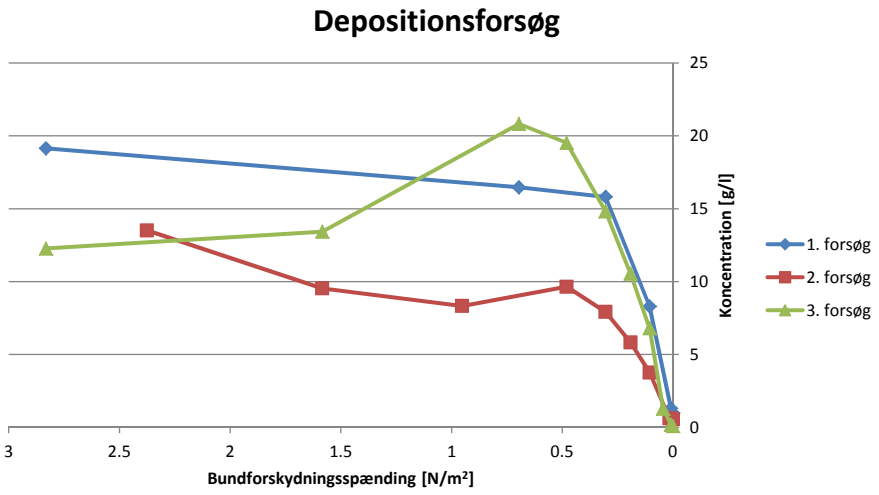


Figur 7.8. Erosionsraten for 2. forsøg, hvor outlieren ikke indgår.

Der er således stor forskel i resultaterne de to forsøg sammenlignet.

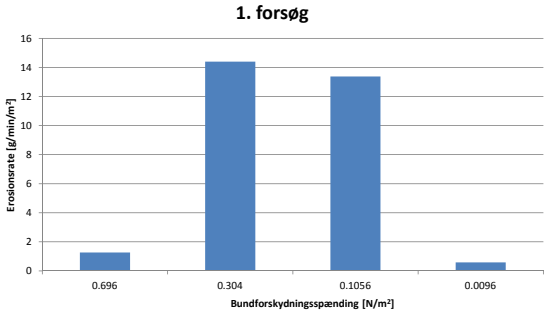
7.2.2 Depositionsforsøg

Depositionsforsøget blev udført tre gange, hvor der for de to første forsøg blev anvendt et tidsskridt på 2 timer mellem hvert spring, ved det 3. forsøg var tidsskridtet på 12 timer. Resultaterne af disse fremgår af Figur 7.9.

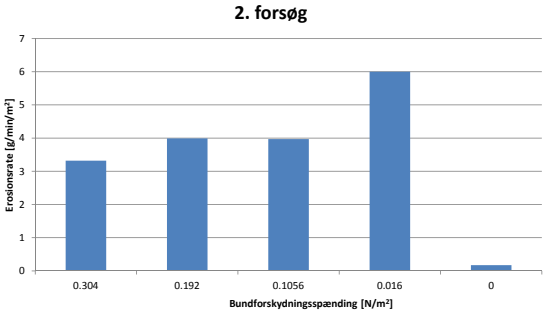


Figur 7.9. Resultatet af de tre depositionsforsøg.

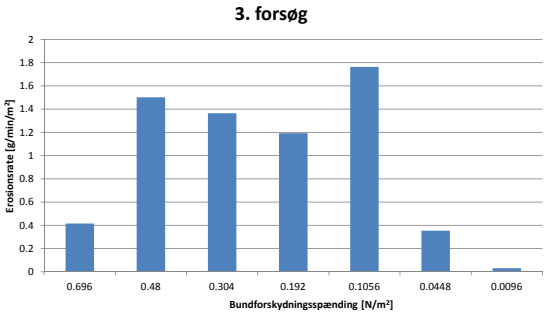
En tendens, der gør sig gældende for alle tre forsøg, er at når bundforskydningsspænding er over 0,696 N/m^2, så er måleresultaterne ikke troværdige, hvilket med stor sandsynlighed skyldes centrifugalkraften, som nævnt i afsnit 7.2.1. I det videre forløb ses der derfor kun nærmere på andelen af målinger, som ligger i intervallet 0,696 N/m^2 og ned. Her passer resultaterne mellem 1. og 3. forsøg godt overens indtil bundforskydningsspædningen overstiger 0,304 N/m^2, mens målingerne for 2. forsøg har en tendens til at ligge noget lavere. Dette kan skyldes at sedimentet i 2. forsøg har været bedre opbrudt efter opstartsfasen og flokkulationerne derved ikke har været så store. Sammenhængen mellem depositionsraten og bundforskydningsspændingen, er vist på hhv. Figur 7.10, 7.11 og 7.12.



Figur 7.10. Depositionsraten for 1. forsøg.



Figur 7.11. Depositionsraten for 2. forsøg.

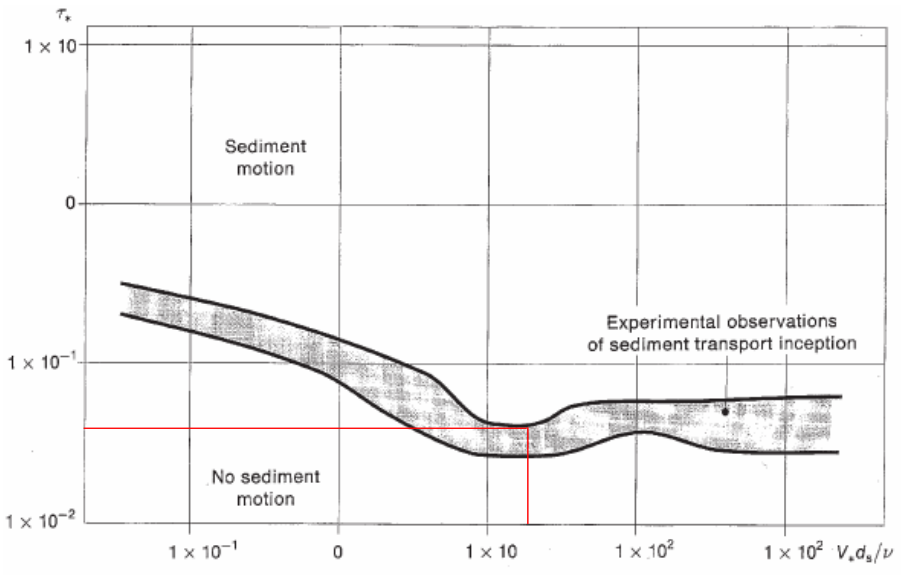


Figur 7.12. Depositionsraten for 3. forsøg.

Ud fra den fundne depositionsrate i de tre forsøg, vurderes det at bundforskydningsspændingen på 0,1056 N/m^2 udgør den kritiske værdi.

7.2.3 Bestemmelse af Shields parameter

Da de kritiske bundforskydningsspændinger, bestemt ved hhv. erosions- og depositionsforsøgene, begge er på 0,1056 N/m^2, vurderes disse at være korrekte. Den kritiske bundforskydningsspænding benyttes nu til at bestemme Shields parameter.
Idet sedimentet er bestående af både sand og silt, antages den relative densitet at være på 2650 kg/m^3 og middelkornstørrelsen, som blev bestemt i afsnit 5.3, er på 92 μm. Ud fra ligning (6.5) bliver størrelsen på Shields parameter 0,0708. Shields parameteren kan optegnes som funktion af Reynolds tallet for partiklerne i Shields diagram, hvilket er vist på Figur 7.13. Reynolds tallet for partiklerne er blevet bestemt til at være 29,90 ud fra ligning (6.6).



Figur 7.13. Den fundne Shields parameter ligger indenfor grænserne på Shields diagrammet.

Den fundne Shields parameter ligger således indenfor det interval, hvor eksperimentale observationer har påvist en begyndende transport.

7.2.4 Vurdering af resultater

I forsøgene med den cirkulære strømningsrende var formålet at bestemme mængden af suspenderet materiale. Da sedimentet har været en blanding bestående af silt og sand. Grundet udformningen af renden og højden hvor prøveudtageren er placeret, kan det dog ikke sikres, at noget af bundtransporten også er indgået i disse prøveudtag, især ved de højere hastigheder. Generelt har der været et fald i den målte koncentration, når strømningshastighederne har overskredet et bestemt niveau, hvilket skyldes centrifugalkraften.
Endvidere er der udført 5 forsøg og udtaget 2-3 prøver for hvert tidsskridt i disse, derfor vil koncentrationen med tiden falde i vandfasen, idet det er det samme sediment, der går igen ved alle forsøgene og især det finere suspenderede sediment er blevet udtaget. Trods disse fejlkilder har det været muligt at fremkomme med nogle resultater, som kan anvendes i det videre forløb

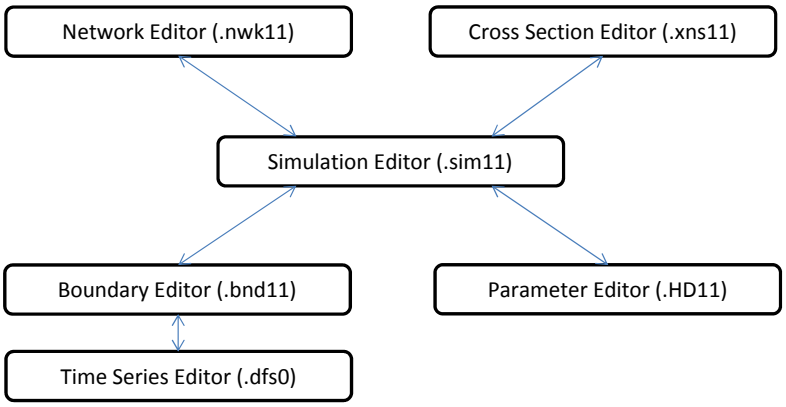
Hydraulisk model af Storåen 8

Sedimenttransporten for Storå-systemet er forsøgt modelleret via en hydraulisk model hvorpå sedimenttransporten tilkobles. Helt præcist, er Storå-systemet blevet opbygget i MIKE 11, hvorved hydrologien og transporten er blevet modelleret i 1D. Resultaterne af denne model er blevet benyttet som input til MIKE 21-modellen, hvilken beskriver et mindre udsnit af Storåen omkring indgangen til Vandkraftsøen. Formålet med dette har været, at se på virkningen af et sandfang. For at tilnærme modelleringen af sedimenttransporten de virkelige forhold, er benyttet de input-parametre, som blev bestemt i kapitel 7.
Modellen et at finde i det vedlagte CD-bilag C - *Model af Storå*.

8.1 MIKE 11

MIKE 11 er specielt tilpasset til at simulere strømningshastigheder og vandstand i 1D og er derfor egnet til at modellere for vandløb.

MIKE 11 indeholder en række forskellige editors, hvor data kan implementeres og redigeres uafhængigt af hinanden. Dette betyder samtidig at der ikke er nogen direkte forbindelse mellem de forskellige editors hvis de åbnes separat. Integration og udveksling af data mellem hver af de enkelte editors opnås gennem Simulation Editoren. Denne editor kobler således bl.a. data over netværket sammen med data om tværsnittene, som vist på Figur 8.1. Samtidig indeholder denne editor kontrolparametrene for simulering og beregning og anvendes til at starte simuleringen.



Figur 8.1. Koblingen mellem de forskellige editors finder sted igennem Simulation Editoren. [DHI, 2011]

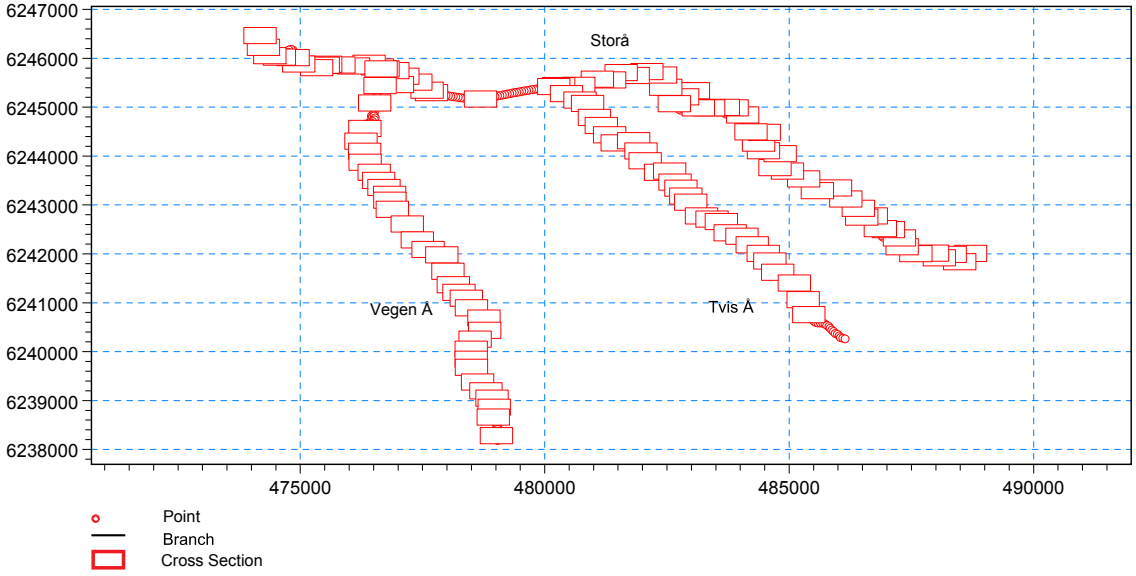
I Simulation Editoren kan vælges hvilke modeller der skal simuleres for, samt hvilken simuleringsform, der anvendes til dette. I forbindelse med dette projekt modelleres der for hydrodynamikken og sedimenttransporten. Simuleringsformen er her unsteady flow, da det er et dynamisk system, der forsøges genskabt.

8.2 Opsætning af hydraulisk model

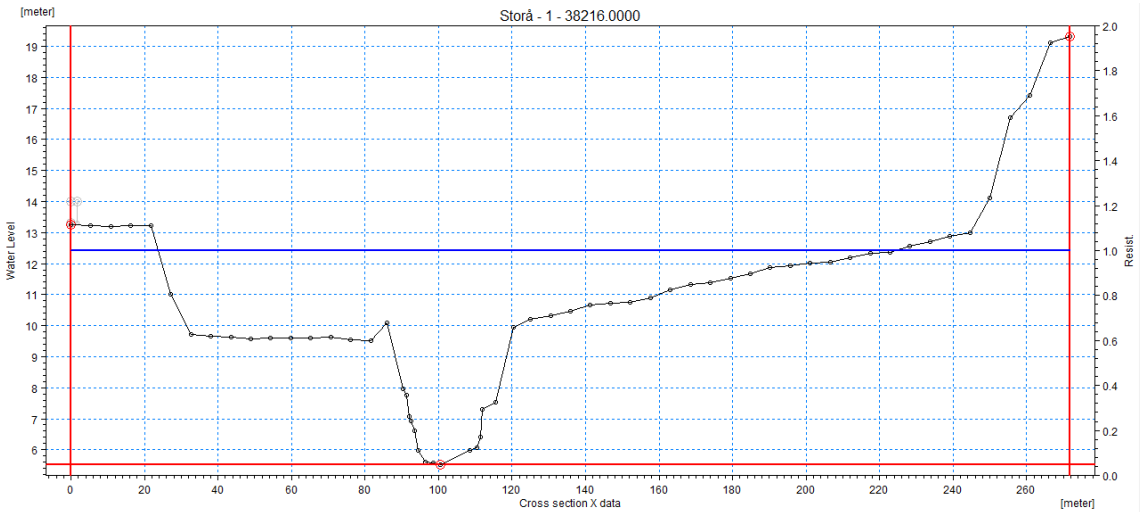
Der er blevet stillet en hydraulisk model til rådighed af Alectia, hvilken dog oprindeligt er blevet udarbejdet af [Garsdal *et al.*, 2011]. Modellens oprindelige formål var at se nærmere på problemstillingen omkring magasinering af vand i oplandet ved den nuværende tilstand og beskriver derfor kun Storåen i området omkring Holstebro samt tilløbene Tvis- og Vegen Å, vist på Figur 8.2. I forbindelse med denne problemstilling ville det være en fordel at inddrage det øvrige opland, for at undersøge om der kan gøres tiltag længere opstrøms, der vil afhjælpe på belastningen ved Holstebro By under ekstreme afstrømningshændelser.
Da der stadig er nogle stræk af tilløbene, som er kanaliserede, vil en genslyngning af disse både kunne hjælpe til med at nedbringe peaket på afstrømning nedstrøms i systemet, men også hjælpe på tilbageholdelsen af sediment. Andre tiltag for de enkelte vandløb, såsom etablering af våde enge og sandfang, kan ligeledes inddrages. En udvidet hydraulisk model vil således være et godt redskab til at vurdere, hvor stor effekten kan forventes at være af forskellige fremtidige tiltag, både hvad angår afstrømning og sedimenttransport.

8.2.1 Fysiske rammer

Tværsnittene for vandløbene i denne model er detaljeret beskrevne, og indeholder samtidig topografisk beskrivelse af den tilknyttede ådal, Figur 8.3.



Figur 8.2. Oversigt over den sektion af Storå-systemet, som er beskrevet i den oprindelige model. [Garsdal *et al.*, 2011]

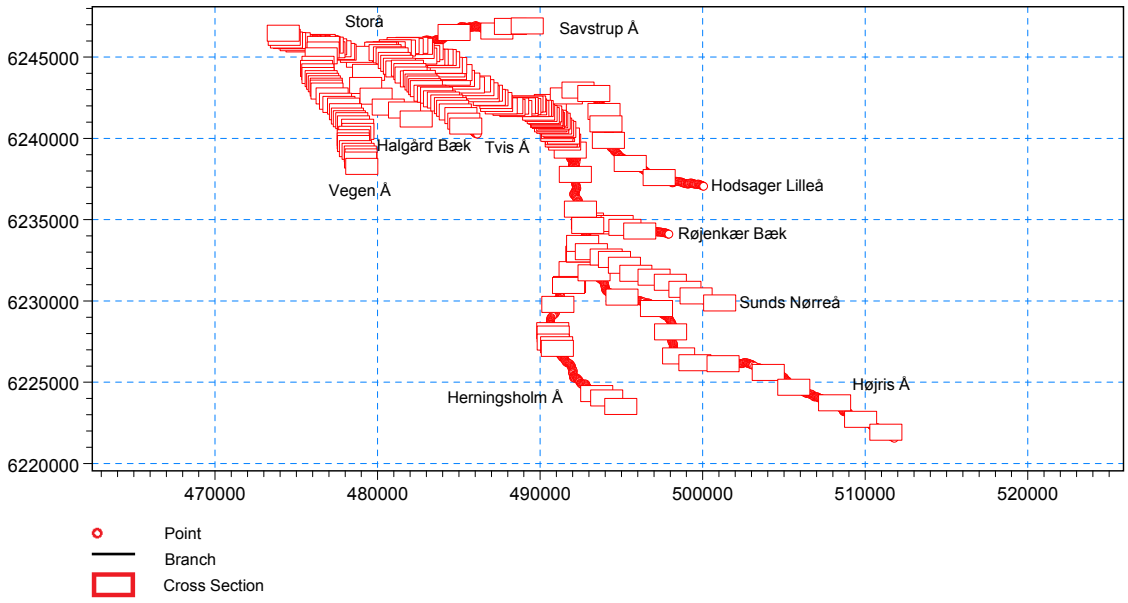


Figur 8.3. Tværsnittet for st. 38.216 i Storåen.

Den oprindelige model er blevet udbygget til at repræsentere hele Storåen opstrøms Vandkraftssøen, samt de større tilløb. De tilløb, som ikke er beskrevet fysisk i modellen vil således blive koblet på som punktkilder eller distribueret tilledning, alt efter størrelsen på disse. De større tilløb som bliver koblet på modellen er:

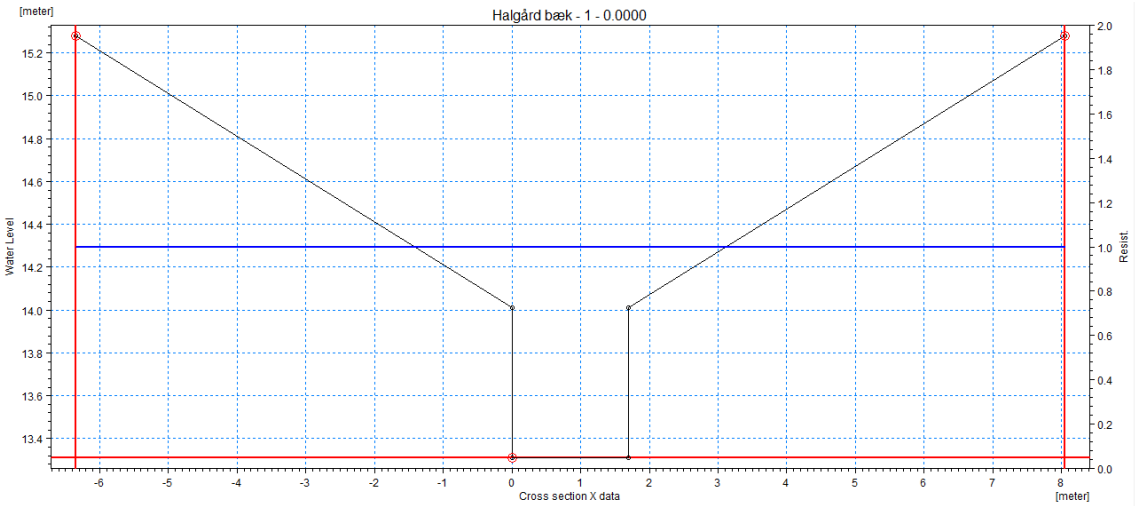
- Herningsholm Å [Hedeselskabet, 1992]
- Højris Å [Teknik- og Miljøforvaltningen, Ringkøbing Amtskommune, 1992]
- Sunds Nørreå [Teknisk forvaltning, Herning kommune, 1992]
- Røjenkær Bæk [Teknik og Miljø, Herning kommune, 2011]
- Hodsager Lilleå [Aulum-Haderup kommune]
- Savstrup Å [Miljøafdelingen - Teknisk Forvaltning, Holstebro kommune, 2009a]
- Halgård Bæk [Miljøafdelingen - Teknisk Forvaltning, Holstebro kommune, 2009b]

Optegnelsen af den øverste del af Storåen samt tilløbene, er blevet gjort ud fra opmålingsdata beskrevet i regulativerne tilknyttet de enkelte vandløb. Det nye netværk kommer derfor til at se ud som vist på Figur 8.4



Figur 8.4. Oversigt over netværket i den nye model.

Ved de fleste regulativer er givet bredden af strømrenden og anlægshøjden. Hvor dette ikke forefindes, er et estimeret mål anvendt af anlægshøjden og bredden er anslået ud fra opmåling på ortofotos af det pågældende vandløb. Hermed er et rektangulært tværsnit blevet optegnet. Det har dog vist sig at disse tværsnit ikke er egnede, når systemet pålægges belastning fra større vandføringer, da vandstanden i nogle punkter her overskrider anlægshøjden med en faktor 4. Dette vil kunne løses ved at have beskrivelse af det tilhørende terræn koblet på tværsnittet, hvilket dog ikke er blevet gjort grundet tidsbegrænsning. I stedet er alle tværsnittene, som er optegnet ud fra regulativerne, blevet tilføjet en skrånende kant i forholdet 5:1, som vist på Figur 8.5. Derved sikres at den beregnede vandstand ikke overskrider højden af tværsnittet.



Figur 8.5. Tværsnit ved st. 00 for Halgård Bæk.

8.2.2 Konstruktioner

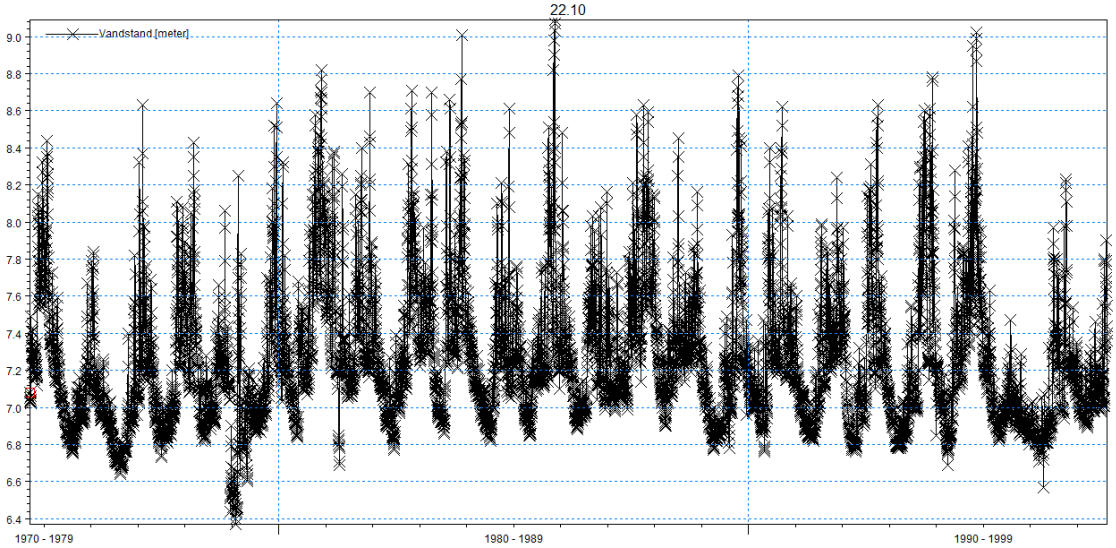
I modellen beskrives også de konstruktioner i systemet, som kan have påvirkning på vandstanden og strømningshastighederne i forbindelse med opstuvning og det tilhørende energitab. Således er slusen ved vandkraftværket (st. 35.427) i modellen beskrevet som et overløb via. en Q-h relation. Når vandstanden i søen overstiger 13.6 DNN lukkes der vand ud af denne. Vandføringen fra det nuværende omløbstryg indgår i denne. Ligeledes er der beskrevet to broer, hvilke udgør væsentlige indsnævringer - broen over Vandkraftsøen på Tvis Møllevej (st. 32.870) samt Store Bro i Holstebro By (st. 38.190). Disse er opbygget som stenkister (mindre underløb under den pågældende vej), og Manningtallet er for begge sat til 13.

8.2.3 Manningtal

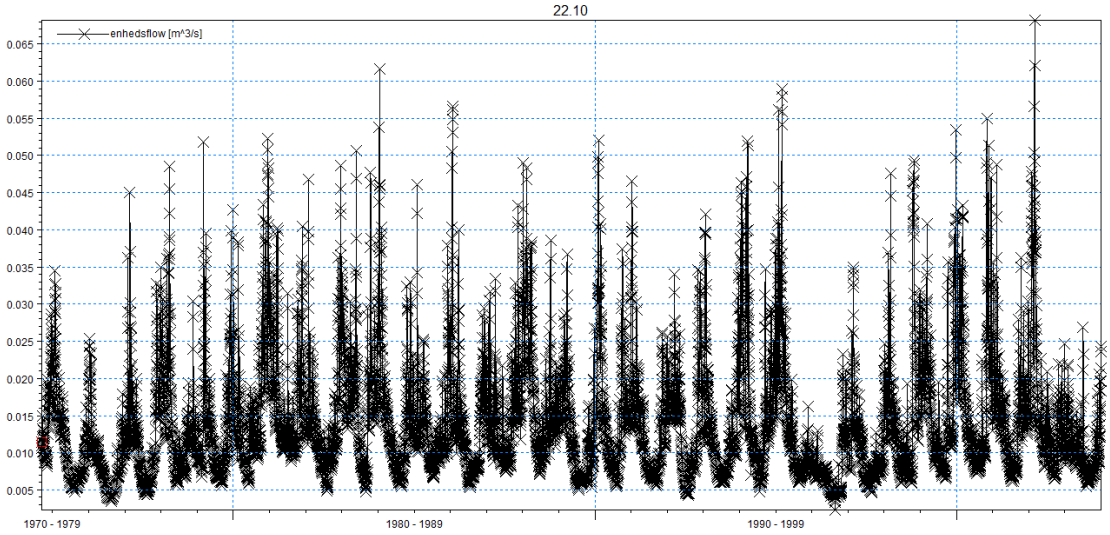
Manningtallet, M, er en proportionalitetsfaktor relateret til ruheden. Faktoren afspejler sammenhængen mellem strømningshastighed og længde-/tværsnitsforholdene i vandløbet. I model sammenhæng mister Manningtallet dog lidt denne betydning, da den her mere anvendes som en parameter, der kan skrues på, i forbindelse med kalibreringen. Denne kan enten vælges at være beskrivende for hele vandløbet (global værdi), eller et udsnit af dette (lokal værdi).
I COWI's model, er Manningtallet sat til en global værdi på 20, dog er der på strækningen st. 35.450-38.000 givet et Manningtal på 13, hvilket var gjort for tage højde for de enkelttab som de mange broer i Holstebro By giver. Disse værdier er bevaret i den udvidede model forud for kalibreringen.
Orbicon har arbejdet videre med modellen fra COWI i forbindelse med et projekt omhandlende klimatilpasning ved Holstebro [Orbicon A/S, 2012], og kommet frem til at et årstids-varierende Manningtal ville passe bedst. Om sommeren er der oftest lavere vandføring samt grøde, som yder modstand, hvorfor Manningtallet for denne periode sættes til 13. Vintermånederne byder på de største vandføringer og i denne periode har åen samtidig ingen beplantning, hvorfor Manningtallet sættes til 16 for denne periode.

8.2.4 Tidsserier

I forbindelse med input til modellen i form af vandføringsdata, har der kun været målinger til rådighed fra en målestation (st. 22.10) placeret nedstrøms vandkraftværket. Da fokusområdet for sedimenttransporten er umiddelbart opstrøms Vandkraftsøen, ville data for dette område selvfølgelig have været mere passende. Målestationen ved renseanlægget i Holstebro (st. 22.10) leverer måledata af døgnmiddel vandstand for perioden 13. september 1974 til 14. januar 1998 (Figur 8.6), samt døgnmiddel vandføring i perioden 13. september 1974 til 31. december 2003. Vandstands- og vandføringsdata er således begge repræsenteret i perioden 1975-1998.



Figur 8.6. Vandstand for målestation 22.10, opgivet i DNN.



Figur 8.7. Vandføringsdata for målestation 22.10, omregnet til enhedsflow [$m^3/s/km^2$].

Hvor vandføringsdataene er koblet på modellens rande som enhedsflow, Figur 8.7 , benyttes vandstandsmålingerne til at kalibrere modellen ud fra.

8.2.5 Randbetingelser

De fleste af randbetingelserne fra den oprindelige model anvendes, men til de områder hvor modellen er blevet udvidet tilskrives nye rande. Hvert vandløb får således en rand, som beskriver den distribuerede tilledning på vandløbsstrækningen samt en åben rand ved vandløbets begyndelse, hvilken tager højde for oplandet opstrøms denne. Randbetingelserne som benyttes i modellen er vist i tabel 8.1 nedenfor.

Randbetingelse	Type	Vandløb	Station [m]	Oplandsareal [km^2]
Åben	Indstrømning	Savstrup Å	9489,3	61,81
Åben	Indstrømning	Hodsager Lilleå	15526,6	24,15
Åben	Indstrømning	Højris Å	25421,7	61,11
Åben	Indstrømning	Sunds Nørreå	10906,6	73,37
Åben	Indstrømning	Røjenkær Bæk	6269,8	42,18
Åben	Indstrømning	Herningsholm Å	13234,3	67,01
Åben	Indstrømning	Tvis Å	10650	23,30
Åben	Indstrømning	Halgård Bæk	6427,8	1,02
Åben	Indstrømning	Vegen Å	14200	19,90
Distribueret	Indstrømning	Savstrup Å	0 - 9489,3	36,49
Distribueret	Indstrømning	Hodsager Lilleå	0 - 15526,6	39,65
Distribueret	Indstrømning	Højris Å	0 - 25421,7	71,50
Distribueret	Indstrømning	Sunds Nørreå	0 - 10906,6	14,72
Distribueret	Indstrømning	Røjenkær Bæk	0 - 6269,8	7,22
Distribueret	Indstrømning	Herningsholm Å	0 - 13234,3	81,30
Distribueret	Indstrømning	Tvis Å	0 - 10650	29,10
Distribueret	Indstrømning	Halgård Bæk	0 - 6427,8	12,28
Distribueret	Indstrømning	Vegen Å	0 - 14200	53,80
Distribueret	Indstrømning	Storå	0 - 17600	51,67
Distribueret	Indstrømning	Storå	17600 - 36900	24,66
Distribueret	Indstrømning	Storå	36900 - 38200	20,42
Punktbidrag	Indstrømning	Storå	26470	2,10
Punktbidrag	Indstrømning	Storå	21930	4,90
Punktbidrag	Indstrømning	Storå	18000	0,90
Åben	Q-h	Storå	40200	-
Ialt				824,55

Tabel 8.1. Randbetingelserne for den hydrauliske model.

Enkelte punktbidrag som var med i orginalmodellen er bibeholdt. Den nedre rand er beskrevet med en Q-h relation. Oplandsarealet til de enkelte vandløb er i MIKE 22 ganget på randende som en scale factor.

8.2.6 Begyndelsesbetingelser

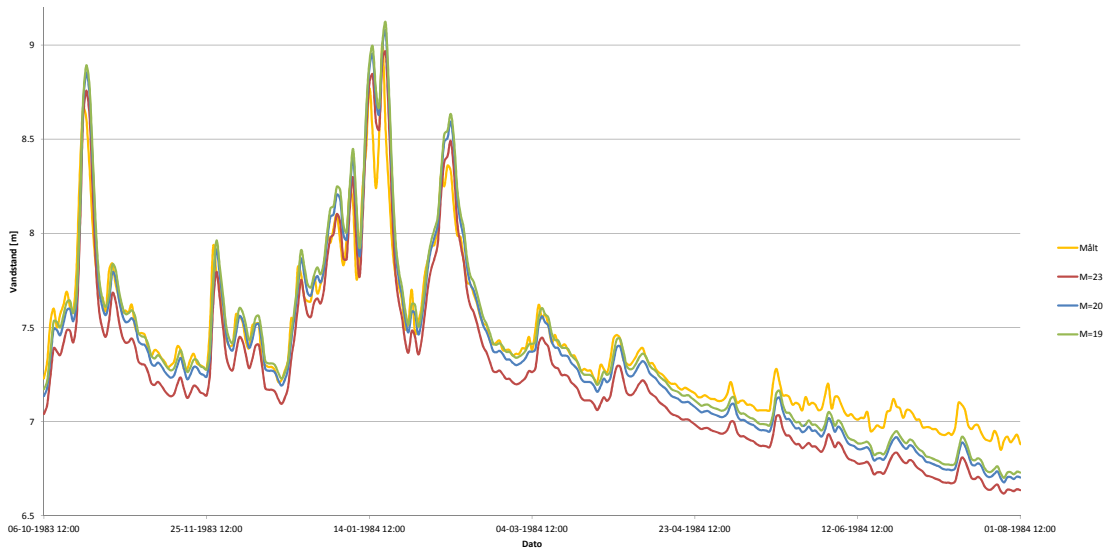
I det hydrologiske modul findes muligheden for at sætte begyndelsesbetingelser på modellen, dette kan både være globale- og lokale værdier. Dette er ikke gjort i forbindelse med dette projekt. I stedet benyttes de første to måneder af tidsserien til at få systemet fyldt med vand. Af samme årsag er resultaterne for denne periode ikke valide.

8.3 Kalibrering

Som beskrevet i afsnit 8.2.4, benyttes den registrerede vandstand i målestation 22.10 til at kalibrere modellen ud fra. Kalibreringen sker, som nævnt i afsnit 8.2.3, ved at justere Manningtallet, hvorved den modellerede vandstand tilpasses den registrerede ved målestationen.
Da det er et stort modelområde, ville det optimale have været at kalibrere for det øverste af systemet først, før der kalibreres for vandstandende på den nedre strækning. Dette har desværre ikke været muligt, da der kun forefindes nyere vandstandsmålinger for strækningen opstrøms Vandkraftsøen, hvilke ligger udenfor den periode, hvor randene er beskrevet via. tidsserien for målestation 22.10. Havde der også forekommet målinger af vandføringen for disse stationer, kunne det have ladet sig gøre. Af samme årsag justeres der kun for en global værdi af Manningtallet, da det ville kræve flere referencemålinger til begrundelse for at give hvert vandløb en specifik værdi. Da sedimenttransporten er størst ved de større afstrømningshændelser, kalibreres modellen med disse som udgangspunkt. Således kalibreres modellen for perioden 6. september 1983 til 1. august 1984, hvor Storåen opnåede en døgnmiddel vandføring på 50.9m^3/s den 18. januar 1984.

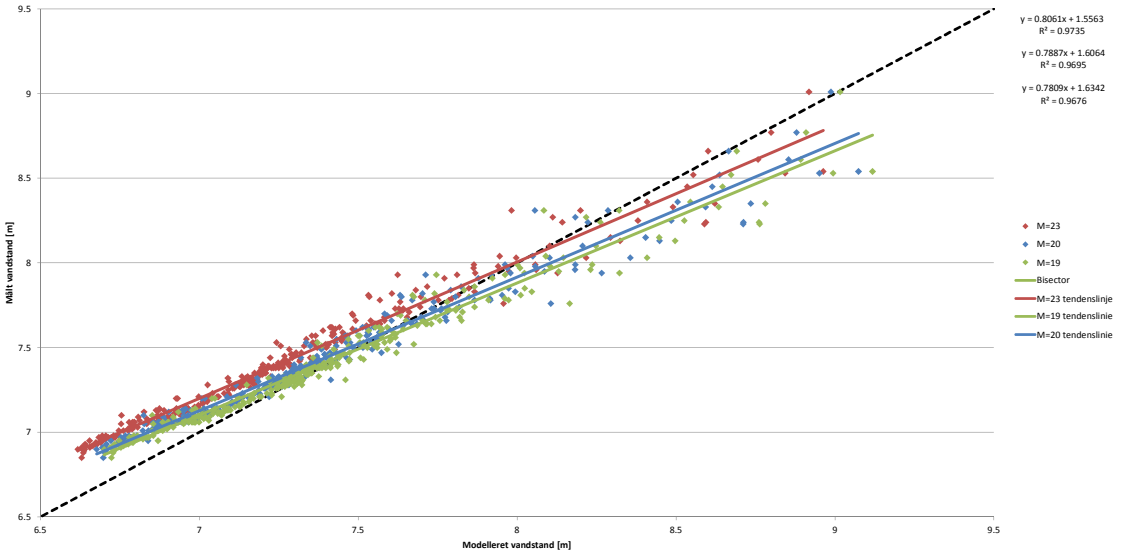
8.3.1 Resultater

Den første simulering har taget udgangspunkt i indstillingerne fra COWI. Således er det globale Manningtal sat til 20 samt en lokal værdi for st.35.450-38.000 på 13, grundet de mange broer. Resultatet heraf er vist på Figur 8.8 med tilhørende korrelationsdiagram på Figur 8.9.



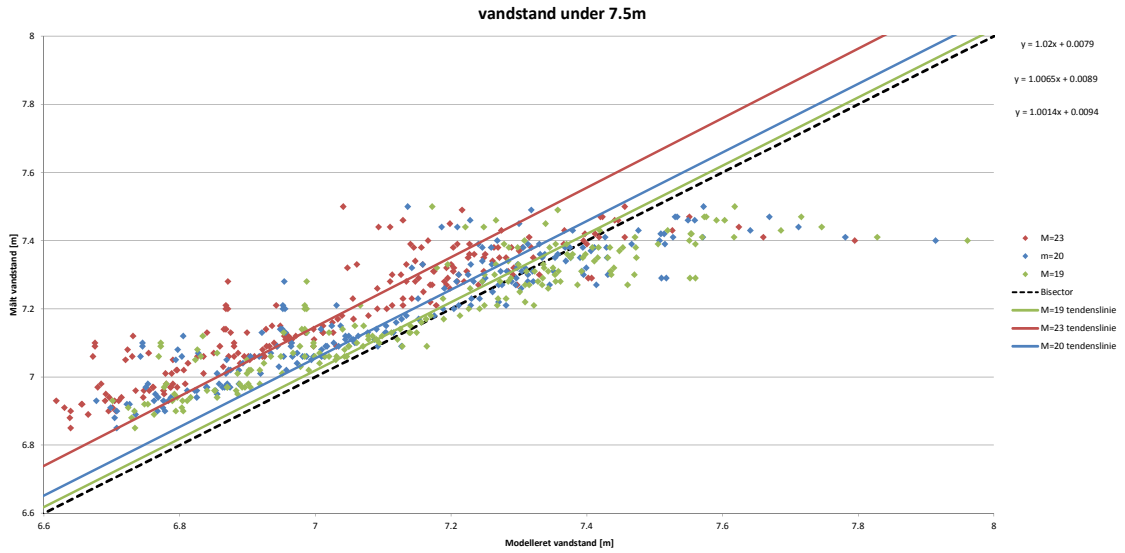
Figur 8.8. Den målte vandstand i målestation 22.10 sammenlignet med den beregnede vandstand for modellens st. 38.216 ved globale Manningtal på hhv. 19, 20 og 23.

Med startværdien for Manningtallet sat til 20, stod det klart at det generelle fit var godt. Dog kunne det uddrages fra Figur 8.8, at modellen overestimerede vandstandene ved peakværdierne ved de helt store afstrømningshændelser, hvor vandstanden oversteg kote 8,5 DNN.

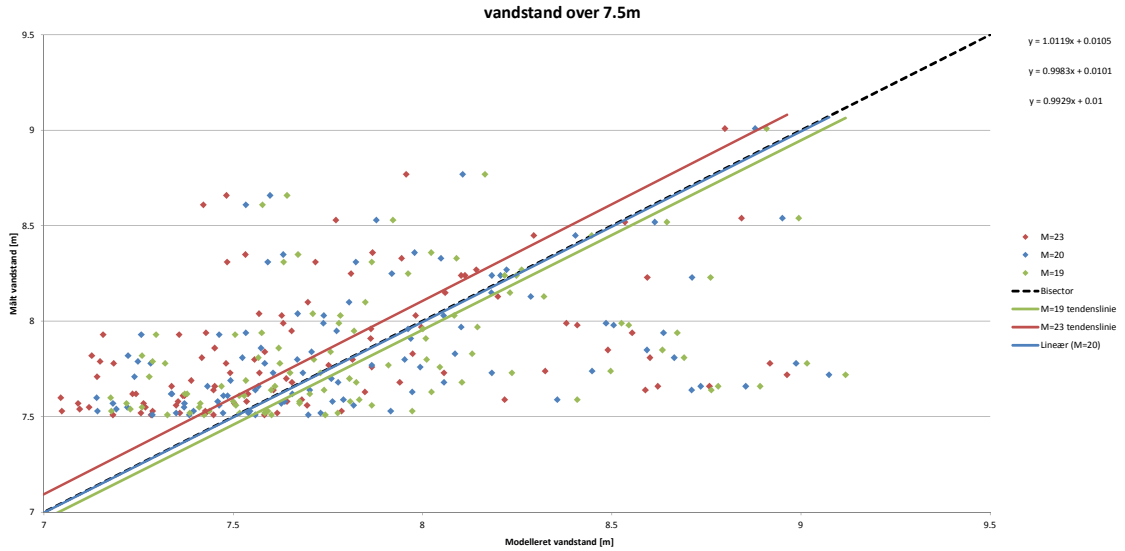


Figur 8.9. Korrelationsdiagram over målt vandstand kontra simuleret ved et Manningtal på 20.

Da det særligt er disse afstrømningshændelser, som har betydning for sedimenttransporten, får en overestimering stor betydning for mængden af transporteret sediment. Derfor blev forsøgt med et Manningtal på 23, hvorved modellen underestimerede peaksne en smule. Endvidere blev der forsøgt med en værdi for Manningtallet på 19, med henblik på at forbedre modellens fit af de lavere vandføringer.
Korrelationsdiagrammet er efterfølgende blevet opdelt i to fraktioner; en for vandstande over kote 7,5 DNN, Figur 8.11,) og en for vandstande under kote 7,5 DNN, Figur 8.10. For vandstande under kote 7,5 DNN ses det at et Manningtal på 19 gav den bedste korrelation i forhold til den målte. Dette står dog ikke klart, når det drejer sig om vandstandene over kote 7,5 DNN. Her resulterede et Manningtal på 20 faktisk i en bedre korrelation, end et Manningtal på 23. Var der kun set nærmere på peaksne for de større afstrømningshændelser, således at værdierne umiddelbart før og efter disse ikke var inddraget, ville Manningtallet på 23 give det bedste resultat.



Figur 8.10. Korrelationsdiagram over målt vandstand under kote 7.5 DNN kontra modelleret vandstand.



Figur 8.11. Korrelationsdiagram over målt vandstand over kote 7.5 DNN kontra modelleret vandstand.

I forbindelse med kalibreringen er modellen således både kalibreret for større og mindre vandføringer, hvorfor en validering ikke vil ikke blive udført. Dette begrundes samtidig med, at der ikke forefindes øvrige data for perioden fra andre målestationer, hvorfor det i realiteten ikke er muligt. Havde det været muligt at benytte en indstilling for Manningtallet, hvorved størrelsen på dette varierede hen over året, ville dette højst sandsynligt kunne bidrage med et endnu bedre overordnet fit.
Sedimenttransporten er i næste kapitel modelleret for et Manningtal på 19 og 23, hvorved det vurderes, hvor stor en betydning valget af dette har på resultatet.

Transportmodel for Storåen 9

I forbindelse med sedimenttransporten i Storåen, antages selve å-systemet at have opnået ligevægt. Størstedelen af af transporten foregår således ved større afstrømningshændelser, hvor materiale fra oversvømmede arealer rives med. Af denne årsag inddrages morfologiske ændringer ikke i denne model. Der ses derfor udelukkende på volumentransporten i forhold til tid og sted. Denne beregnes som en eksplicit funktion af de hydrodynamiske parametre, hvorfor sedimenttransporten ikke vil påvirke hydrodynamikken.
Modellen et at finde i det vedlagte CD-bilag C - *Model af Storå*.

9.1 Valg af transport editor

I forbindelse med simulering af sedimenttransporten i MIKE 11 kan der vælges mellem to editorer til at modellere for sedimenttransporten:

- Sediment Transport Editor
- Advection-Dispersion Editor

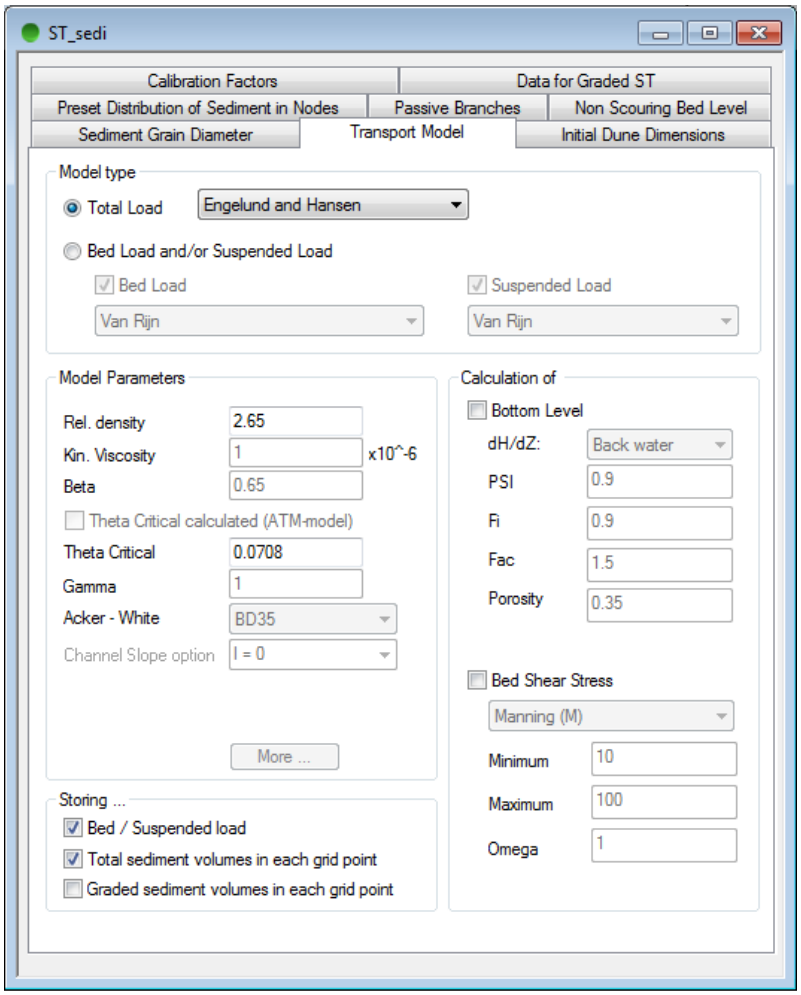
Hvor Sediment Transport Editoren er beregnet til friktionsmateriale og Advection-Dispersion Editoren er indeholde et modul til at håndtere transport af kohæsivt materiale.
Da sediment fra projektlokaliteten er bestemt til at være friktionsmateriale, benyttes Sediment Transport editoren. Sedimentransporten kalibreres i første omgang ud fra de opnåede resultater, beskrevet i afsnit 7.2.1, før sedimenttransporten kobles på den hydrauliske model for Storåen.

9.2 Opsætning af transportmodul

Forsøgene og disses resultater, beskrevet i kapitiel 7, har bidraget til viden om sedimentets egenskaber og benyttes nu til opsætningen samt kalibrering af MIKE 11's ST-modul. Således anvendes følgende resultater fra forsøgene som input til ST-modulet:

- Middelkornstørrelsen
- Kornkurvens standardafvigelse
- Sedimentets relative densitet
- Shields parameter (i MIKE 11 benævnt theta critical)

Da det er den totale transport der er af interesse for dette projekt, er der tre mulige modeller at vælge imellem: Aclers og White, Engelund og Hansen samt Smart Jaeggi. Som udgangspunkt er her valgt Engelund og Hansen's transportmodel, Figur 9.1.



Figur 9.1. Parameterne som kan varieres i forbindelse med opsætning af ST-modulet i MIKE 11.

ST-modulet skal herefter kalibreres før dette kobles på den hydrauliske model for projektlokaliteten.

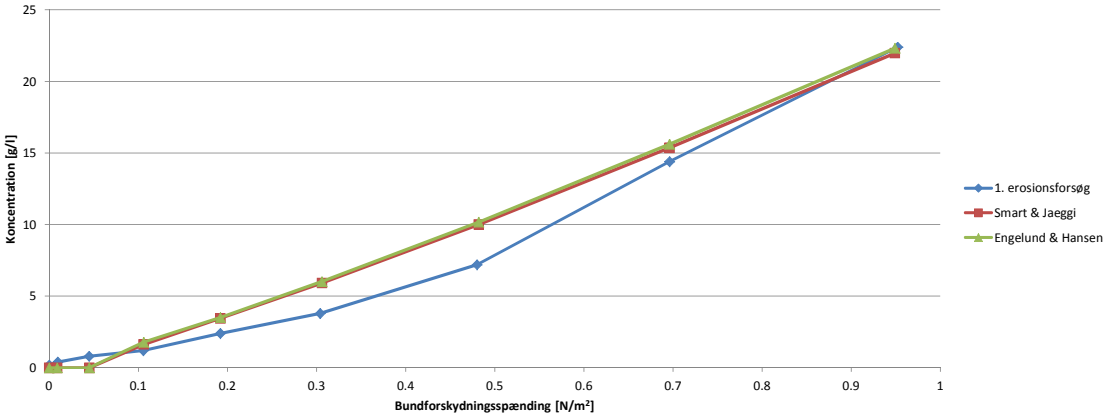
9.3 Kalibrering af sedimenttransporten

Som det blev nævnt i afsnit 3.3.1, har Rambøll anslået den årlige sedimenttransport i Storåsystemet til at være 6,5 m^3/km^2. Storåens opland opstrøms søen er anslået til at være 648.65 km^2 og giver, ud fra Rambølls estimat, således en årlig tilførsel på 4232 m^3. Det er denne volumenmængde, som ST-modulet i sidste ende vil blive kalibreret i forhold til. Først kalibreres dette dog ud fra måleresultaterne fra erosionsforsøgene.

9.3.1 Kalibrering ud fra forsøg

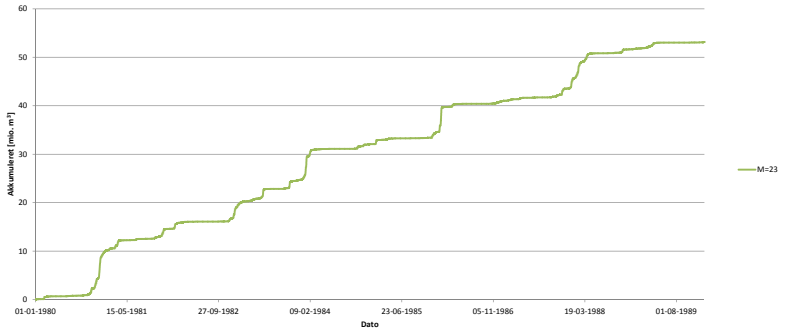
Forsøgene udført i strømningsrenden var udelukkende tiltænkt den suspenderede transport, men som nævnt i afsnit 7.2.4, kan de udtagne prøver være en blanding af både suspenderet transport og bundtransport, grundet prøveudtagerens placering samt andre fysiske rammer for forsøgene. Da det samtidig er Storåens totale sedimenttransport, der er af interesse, er det derfor valgt at kalibrere modellen ud fra den antagelse, at forsøgene har givet resultater for den totale transport.
ST-modulet kalibreres ud fra de målte data i 1. erosionsforsøg. Fremgangsmåden er, at

måleresultaterne forsøges genskabt gennem modellering af sedimenttransporten for den cirkulære strømningsrende. Der opbygges derfor en hydraulisk model for strømningsrenden. Da renden teoretisk set er en kanal af uendelig udstrækning, vil denne blive forsøgt tilnærmet i MIKE 11, som en 5 km lang kanal med en bredde på 100 m. Dimensionerne af tværsnittet har ikke den store betydning, da der gennem tilkoblede tidsserier med varierende vandføring og vandstand, genskabes de bundforskydningsspændinger, der blev anvendt i forsøget. De fysiske rammer opstillet for modellen gør dog også at den påvirkende centrifugalkraft ikke bliver genskabt.
Når den hydrauliske del af modellen er opstillet, kobles ST-modulet på denne, og de måle koncentrationer forsøges tilnærmet i modellen ved at justere på kalibreringsfaktoren. Udover at benytte Engelund og Hansens transportmodel, er her også forsøgt med Smart og Jaeggi's model. Resultaterne af kalibreringen er vist nedenfor i Figur 9.2



Figur 9.2. Resultaterne fra Engelund & Hansen samt Smart & Jaeggi, sammenholdt med måleresultaterne fra 1. erosionsforsøg.

Kalibreringsfaktoren er for begge modeller sat til 188, og som det fremgår af resultaterne, er der ikke den store forskel mellem de to modeller. Modellen anvendt til denne kalibrering er at finde i det vedlagte CD-bilag C - *Model af forsøg*.
ST-modulet kobles på den hydrauliske model for Storå-systemet, hvor den akkumulerede sedimenttransport for hvert grid-point beregnes. Da det første lange stræk fra udløbet af Savstrup Å til Vandkraftsøen er udgjort af delta, er der ikke meget bevægelse i vandet her. Betragtes den akkumulerede sedimenttransport for åens udløb i søen (st. 32.400) vil den beregnede sedimenttransport derfor ikke gengive hvad der bliver reelt bliver tilført søen. Derfor er det den akkumulerede sedimenttransport ved st. 30.500, Som er udløbet for Savstrup Å , der betragtes. Dette betyder samtidig at den årlige transportmængde, der skal kalibreres efter, er 4216 m^3 istedet for 4232 m^3 grundet reduktion af oplandsarealet.
Sedimenttransport-modulet kobles på den hydrauliske model af Storåen, efter at dette er blevet kalibreret mht. erosionsforsøget. Modellen simulerer herefter for perioden d. 1/1-1980 til d. 1/1-1990 for et globalt Manningtal på 23. Den gennemsnitlige årlige transportmængde til søen beregnes således ud fra en 10 årig periode.

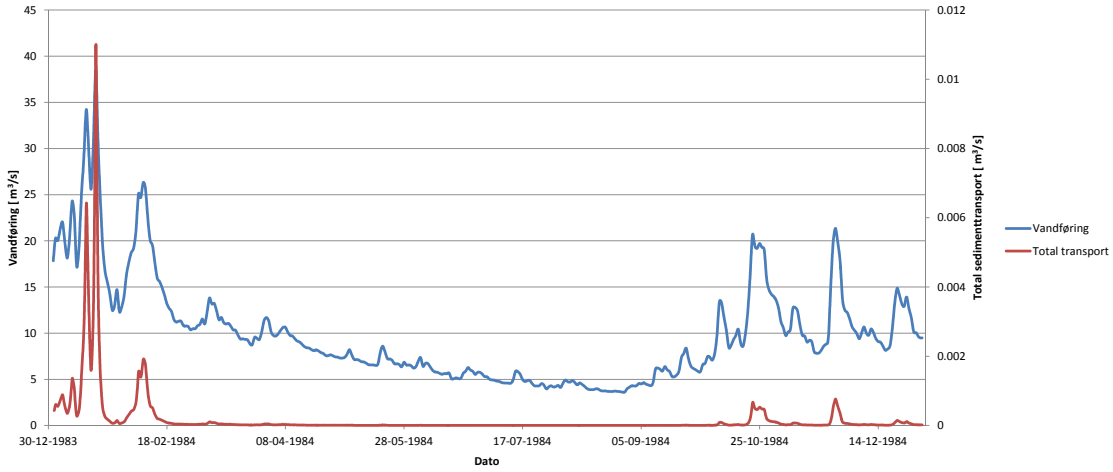


Figur 9.3. Den akkumulerede sedimenttransprot for en periode på 10 år, ved et Manningtal på 23 og kalibreringsfaktor på 188.

Som grafen på Figur 9.3 illustrerer, viser det sig at forholdende givet i forsøget, ikke afspejler de forhold, som er at finde ved Storåen, da den gennemsnitlige akkumulerede årlige transport findes til at være i omegnen af 5,3 mio. m^3. Ved den pågældende kalibreringsfaktor opnår sedimenttransporten altså markant højere værdier. Problematikken med de beskrevne tværsnit, som nævnt i afsnit 8.2.1, kan også have påvirket resultatet, men i noget mindre omfang.

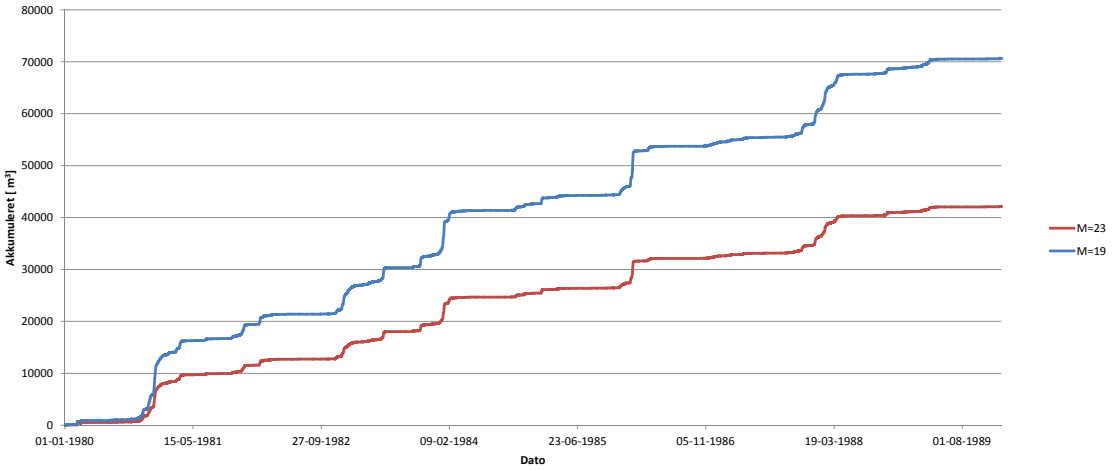
9.3.2 Justering af kalibreringsfaktor

Da kalibreringsfaktoren i ST-modulet tydeligvist har været for højt sat i forbindelse med modellen af Storåen, vil der blive justeret på denne. Ved at nedjustere værdien til 0.25, altså med en faktor 750, bliver den gennemsnitlige sedimenttransport fundet til at være 4215 m^3/år, for et Manningtal på 23. Som vist på Figur 9.4, er der en god sammenhæng mellem den modellerede sedimenttransport og vandføringen. Det er tydeligt at se, at især de store afstrømningshændelser har betydning for den årlige transport.



Figur 9.4. Sedimenttransporten vist i forhold til vandføringen for st. 30.500.

For at understrege vigtigheden af den valgte værdi for Manningtallet, så bliver den gennemsnitlige sedimenttransport på 7068,82 m^3/år, ved et Manningtal på 19. Sammenligningen af den akkumulerede transport for de to Manningtal er vist på Figur 9.5.



Figur 9.5. Akkumuleret sedimenttransport for st. 30.500 ved Manningtal på 19 og 23.

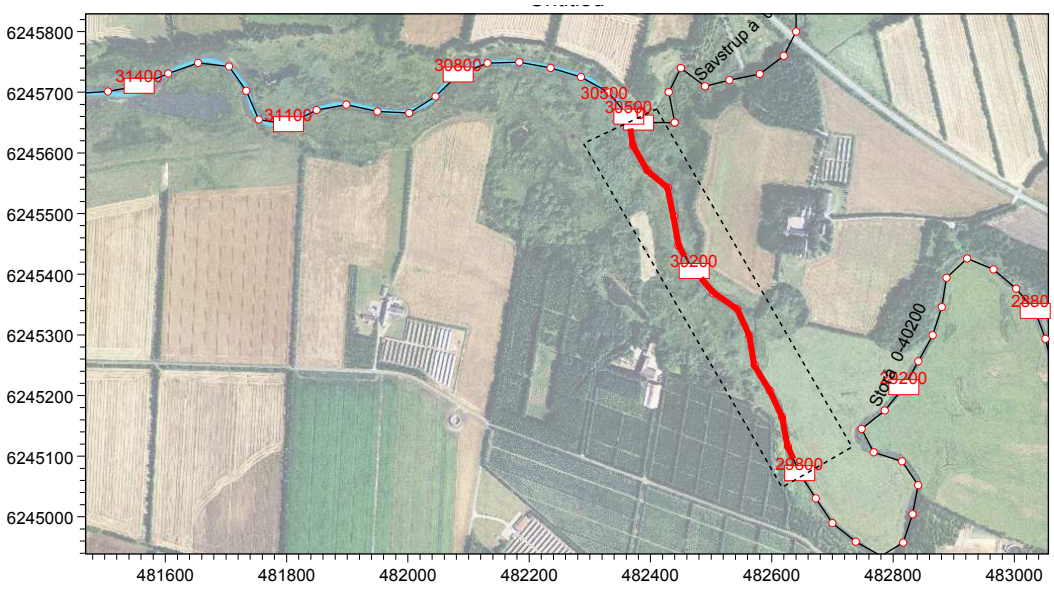
Da et Manningtal på 19 betød overestimerede peak værdierne for de større afstrømningshændelser (afsnit 8.3.1), vil det være resultaterne opnået ved Manningtallet sat til 23, der anvendes i det videre forløb. 1D-modellen for sedimenttransporten antages med disse indstillinger at være kalibreret.

Implementering af sandfang 10

Den endimensionale model for sedimenttransporten i Storå-systemet, har bidraget med viden om det dynamiske samspil, der er mellem størrelsen på sedimenttransporten og vandføringens størrelse. Resultaterne opnået i afsnit 9.3.2 understreger således vigtigheden af, at sedimentet kan tilbageholdes ved de større afstrømningshændelser. Formålet med dette kapitel er derfor at se på muligheden for etablering af et sandfang opstrøms Vandkraftsøen, og undersøge hvilken effekt dette har på sedimenttransporten. Dimensioneringen af sandfanget vil foregå ud fra tilgængelig viden indenfor området, og vil blive afprøvet i en todimensional transport model i MIKE 21. Modellen for Storå-systemet bidrager til opsætningen af denne model, idet de opnåede resultater benyttes som input til randene.
Modellen anvendt i dette afsnit er at finde i CD-bilaget C - *Model af sandfang*).

10.1 Afgrænsning

Sandfanget skal placeres umiddelbart før omløbsstrygets begyndelse. Som belyst i afsnit 9.3.1, er strækket fra udløbet af Savstrup Å til Vandkraftsøen præget af stuvning grundet søens vandstand. Ved implementering af Alectia's løsningsforslag, vil denne stuvning selvfølgelig forsvinde, men det har desværre ikke været muligt at opnå dette i MIKE 11-modellen indenfor den tidslige periode for projektet. Derfor er sandfgangs-modellen afgrænset til at udgøre strækningen mellem st. 29.800 og st. 30.500, som vist på Figur 10.1, hvorved stuvningsproblematikken omgås.



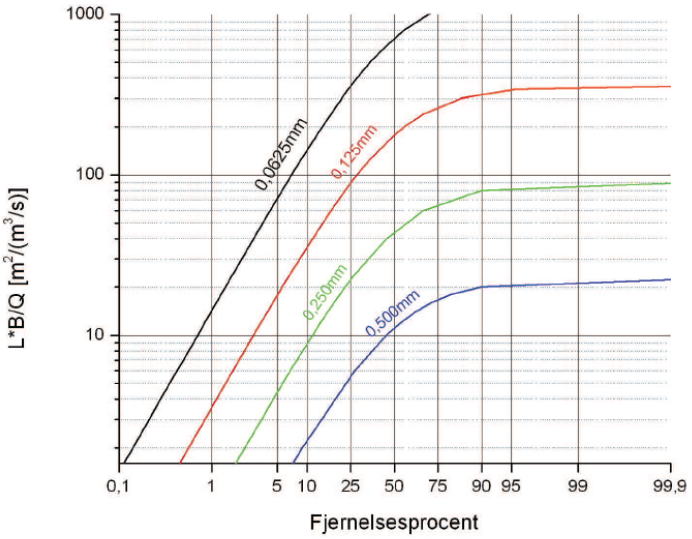
Figur 10.1. Afgrænsning for MIKE 21-modellen.

10.2 Dimensionering af sandfang

Størrelsen af sandfanget er afhængig af de fysiske forhold for vandløbet samt hvilken sedimenttype, der skal fældes i dette. Da de tilstedeværende strømningshastigheder samt størrelsen og strukturen af sedimentet har betydning for faldhastigheden. Grundlæggende betyder dette, at sandfanget skal være stort nok til at bringe strømningshastigheden ned på en størrelse, der tillader fældning af sedimentet.

10.2.1 Dimensioneringspraksis

Der findes ikke nogen egentlig dimensioneringspraksis indenfor området, men det foreslås at sandfanget dimensioneres til at være 3-4 gange bredere end vandløbsbunden og have en længde svarende til 10 gange bredden af denne. Ligeledes foreslås det, at sandfanget skal anlægges med en dybde, der er 1 m under vandløbsbunden [Wandall *et al.*, 2000]. Denne metode tager dog ikke højde for om sedimentet bliver bragt i bevægelse på ny ved større afstrømningshændelser, og derved bidrager til en øget transport nedstrøms i den gældende periode, en problemstilling, som er blevet dokumenteret af Just [2007].

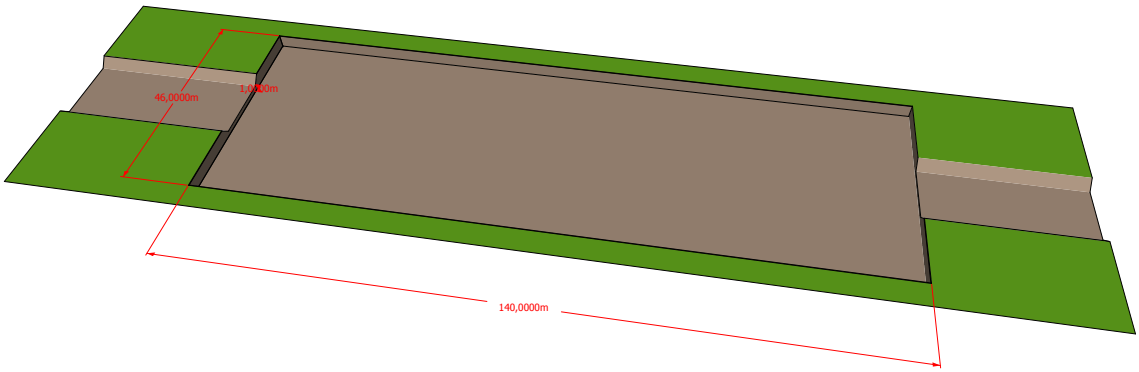


Figur 10.2. Eksempel af [Hansen, 1973]'s fjernelseskurve for bestemte sedimentdiametre ved forskellige areal/vandføringsforhold ved 5○C (omregnet til SI-enheder af [Fuglsang, 2010]).

Hansen [1973] er fremkommet med dimensioneringsdiagram for sandfang, Figur 10.2, der er baseret på beregnede fjernelsesprocenter for bestemte størrelsesfraktioner af sedimentet ved forskellige vandtemperaturer. Da vandtemperaturen har stor betydning for viskositeten, f.eks. er denne ved 5 °C på 1,519 m^2/s mens den ved 20 °C er 1,007 m^2/s [Brorsen and Larsen, 2009]. Diagrammet viser at forholdet mellem sandfangets areal og vandløbets vandføring har indflydelse på hvor stor en andel af den pågældende fraktion, der kan forventes fældet. Dog er der ikke beskrevet noget gyldighedsinterval for denne sammenhæng, men ikke alle forhold mellem længden og bredden af sandfanget er lige egnede til at opnå fældning.

10.2.2 Dimensionering

Ud fra de beskrevne tværsnit er bundbredden af Storåen på den pågældende strækning bestemt til at være 12 m. For at være på den sikre side i forhold til de anbefalende dimensioner, bliver målene på dette som følger; 46 m bredt og 140 m langt. Bundkoten af dette sættes til at være 1 m under vandløbets bundkote ved indgangen, og anlægges uden hældning for at sænke strømningshastighederne igennem dette. Principskitse af sandfanget er vist på Figur 10.3.



Figur 10.3. Skitse af sandfanget med tilhørende længde- og breddeangivelse.

10.3 Hydrualisk model af sandfang, 2D

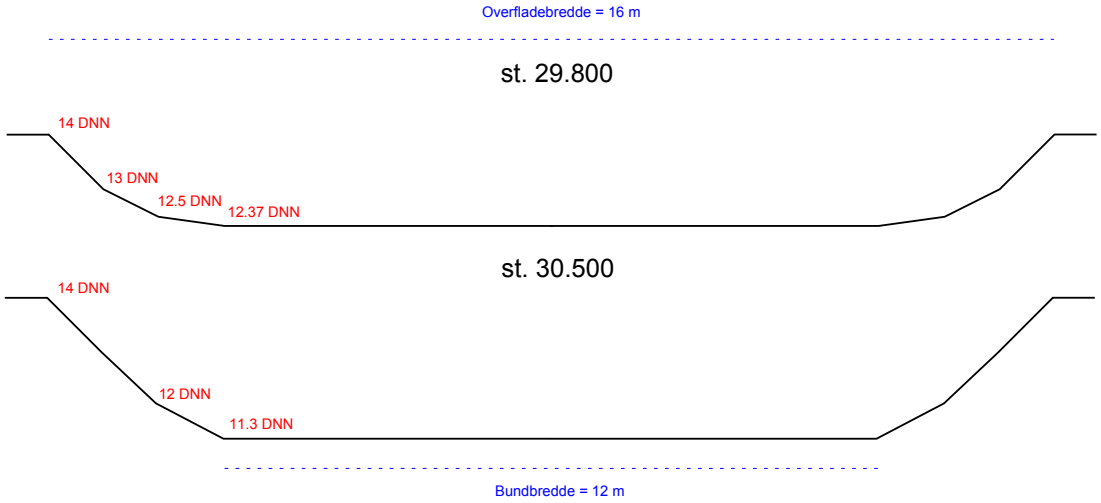
Den udvalgte strækning opbygges i MIKE 21 med henblik på at beskrive hydraulikken og sedimenttransporten todimensionelt. Hvor de målte vandstande og vandføringer, fra modellen af Storå-systemet, anvendes som input til randene samt i forbindelse med kalibreringen af modellen.

10.3.1 Opsætning

Opsætningen af denne model er ikke forskellig fra den endimensionelle model af Storåen. Der er dog visse input og indstillinger, som kræver yderligere forklaring, hvorfor disse er beskrevet i det følgende.

10.3.1.1 Fysiske rammer

En lille sektion af Storåen opstrøms Vandkraftsøen opbygges i MIKE 21, nærmere betegnet er det strækningen fra st. 29.800 til st. 30.500. Tværsnittene for disse stationer er detaljeret beskrevne i modellen udarbejdet af [Garsdal *et al.*, 2011], og indeholder samtidig beskrivelse af det tilknyttede terræn. Ved opsætningen af de fysiske rammer for MIKE 21-modellen, er disse tværsnit dog blevet simplificeret. Dette er gjort både for at mindske opsætningstiden, og får samtidig betydning for simuleringstiden, da gridet får en mindre detaljeringsgrad. Tværsnittene, der beskriver randene i modellen kommer således til at få dimensionerne, som vist på Figur 10.4.

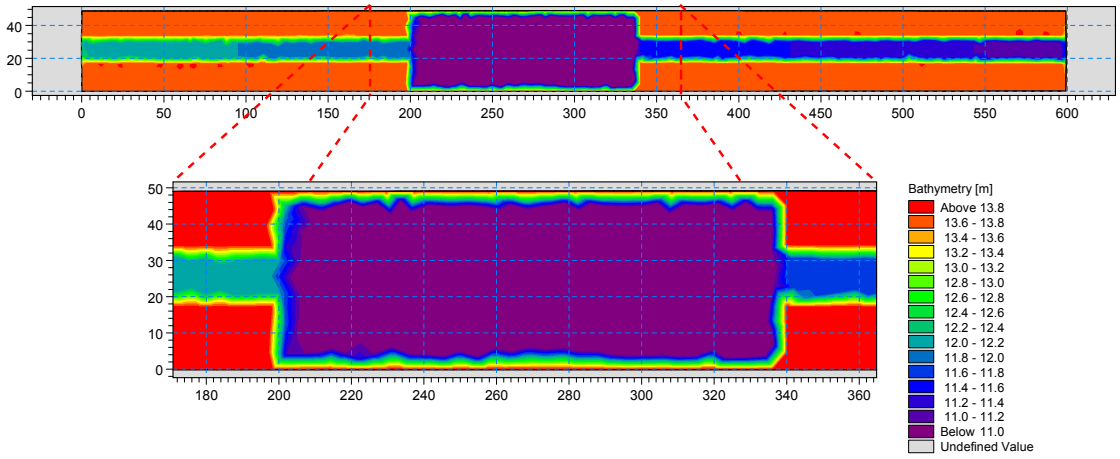


Figur 10.4. Principskitse af tværprofilerne, som beskriver de fysiske rammer ved randene - st. 29.800 er den øvre rand og st. 30.500 den nedre.

Begge tværsnit får således en bundbredde på 12 m og en overfladebredde på 16 m, kote 14 DNN angiver grænsen til terræn.
Dataene for tværsnittene beskriver randene for gridet, som benyttes til at danne et mesh for strækningen. Hver celle i dette har størrelsen 1 x 1 m, og ved at interpolere mellem de to rande laves en beskrivelse af den mellemliggende vandløbsstrækning. Sandfanget er anlagt med bundkote 11 DNN, således at dette er placeret med lidt over en meter under bundkoten for vandløbet ved indgangen til dette.
Gridet er efterfølgende blevet brugt til at danne en bathymetri fil ved brug af et flexible mesh. Egenskaberne for det genererede mesh er som følger:

- 2831 elementer
- 1857 beregningspunkter

Hvor størrelsen på disse elementer maksimalt opnår en størrelse på 18 m^3. Antallet af beregningspunkter i meshet er valgt af hensyn til simuleringsstiden, men er samtidig afbalanceret med om detaljeringsgraden er god nok til at opnå de ønskede resultater. Beskrivelsen af bathymetrien kommer således til at se ud som illustreret på Figur 10.5.



Figur 10.5. Barthymetri af vandløbsstrækningen.

10.3.1.2 Rand- og begyndelsesbetingelser

Som input til modellen, benyttes resultater opnået igennem Storå-modellen. Den nedre rand er således styret af den simulerede vandstand for st. 30.500, mens den øvre rand er beskrevet ud fra vandføringen for st. 30.500. At den øvre rand også beskrives af data fra st. 30.500, er gjort, for at tage højde for den indsivning der er på strækning i Storå-modellen, samt at vandføringen fra Savstrup Å dermed også inddrages. Denne antagelse leder selvfølgelig til en fejlkilde i kalibreringsprocessen, idet der her modellen kalibreres i forhold til vandstaden i st. 29.800.
Ud fra hvornår den størst målte vandføring forekommer, er det blevet valgt at simulere for perioden 1. januar 1984 til 1. januar 1985, hvilket tidsserierne er tilpasset. Modellens begyndelsesbetingelse er sat til at være lig den første måling i disse tidsserier.

10.3.1.3 Oversvømmelse og udtørring af celler

Idet modellens tværsnit er udgjort af et vandløbsprofil, hvor land kun er beskrevet som værende i kote 14 DNN, vil denne opleve oversvømmelse ved de højere vandføringer. Derfor er det nødvendigt at stille nogle betingelser for hvornår den enkelte celle skal indgå i simuleringen. På baggrund af dette er fastsat følgende værdier:

- Dybde for udtørring 0,005 m
- Dybde for oversvømmelse 0,05 m
- Dybde for vædning 0,1 m

Når vanddybden i cellen er mindre end den fastsatte dybde for vædning, sættes bevægelses fluxene lig nul. Kun hvis denne dybde er mindre end dybden fastsat for udtørring, udgår denne celle i simuleringen. Overstiger vandstanden i cellen den givne dybde for oversvømmelse, inddrages denne igen i simuleringen.

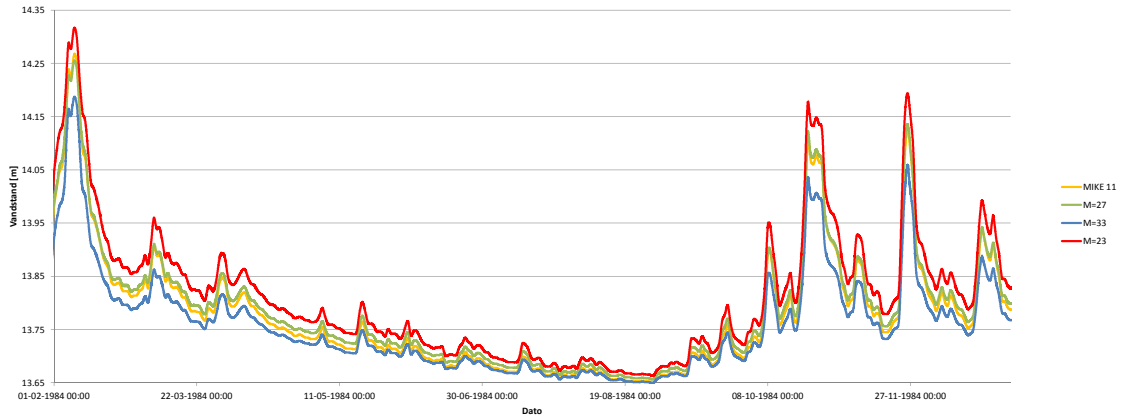
10.3.1.4 Løsningsmetode

Modellens simuleringstid og nøjagtighed kan reguleres ud fra, hvilken orden den numeriske løsningsmetode er indstillet til. Således er det muligt at vælge imellem enten en løsningsmetode af 1. orden, eller løsningsmetode af højere orden. Dette kan gøres for både tidsintegrationen samt

diskretisering af rum. Hvor 1. ordens løsningsmetoden er hurtigt, men knap så præcis, kræver løsningsmetoden af højere orden mere regnekraft, men giver også nogle mere præcise resultater. Grundet tidsbegrænsning er her valgt den hurtige metode.

10.3.2 Kalibrering

Da modellens område ikke er beskrevet helt ligesom i Storå-modellen, vil Manningtallet højst sandsynligt heller skulle ikke have samme værdi for at opnå den samme vandstand. Modellen for sandfanget kalibreres derfor ved justering af Manningtallet, hvor den modellerede vandstand ved den øvre rand (st. 29.800) tilnærmes vandstanden modelleret i Storå-modellen. For at resultatet ikke bliver influeret af randen, er denne målt i et punkt 25 m fra denne.
Indledningsvis er benyttet det samme Manningtal som ved Storå modellen, dette er derfor sat til 23.



Figur 10.6. De modellerede vandstande ved forskellige værdier for Manningtallet, sammenlignet med den modellerede vandstand i Storå-modellen.

Som det fremgår af Figur 10.6, så er denne værdi for lavt sat. Modellen overestimerer således vandstanden ud fra den givne vandføring. Der derfor forsøgt med andre værdier, og det vurders at det bedste fit opnås ved et Manningtal på 27. Denne formår således at ramme peaket for de store afstrømningshændelser godt, men overestimerer vandstanden i en smule ved de mindre vandføringer i simuleringsperioden.

10.4 Sedimenttransport igennem sandfanget

MIKE 21 har ligesom MIKE 11 flere valgmuligheder, når det gælder modellering af sedimenttransport. Da sedimenttransporten i Storå-modellen blev modelleret under antagelsen at være friktionsmateriale, vil det samme gære gøre sig gældende i modellen for sandfanget. Dette begrundes med at inputtet til den øvre rand i transportmodulet netop er fremkommet igennem Storåmodellen. Sedimenttransporten gennem sandfanget bliver derfor modelleret via MIKE 21's Sand Transport modul (ST-modul).

10.4.1 Opsætning

ST-modulet modellerer sedimenttransporten for friktionsmaterialet ud fra strømningsforhold beskrevet i de hydrodynamiske beregninger, og kan også indrage bølgers indvirkning på

transporten via bølgeteorien. Modellen for sandfagnet er udført med strømningsgenereret transport for øje, hvorfor den bølgegenerede transport er udeladt. I det følgende vil de vigtigste dele af modulets opsætning blive behandlet.

10.4.1.1 Løsningsmetode

Som ved transportmodellen for Storåen, anvendes der i denne model ligeledes Engelund og Hansens metode til beregning af sedimenttransporten. Metoden beskrevet af Engelund og Hansens kan dog kun regne for total transport, imidlertid kræver Sand Transport modulet både information om bundtransport og suspenderet transport. Den totale last kan dog stadig benyttes i modellen, dette kræver blot at denne opdeles i de to transporttyper, hvilket gøres ved brug af kalibrerings faktorne k_b og k_s. Da bundtransporten begynder før den suspenderede transport, antages denne at udgøre en større andel af den totale transport, hvorfor k_b sættes til 0,7 og k_s sættes til 0,3. Således udgør bundtransporten 70 % af den totale transport, mens den suspenderede transport udgør de resterende 30 %.
For at fastholde modellens stabilitet, er koncentrationen af de suspenderede transport fastsat til højst at kunne opnå 10 kg/m^3.

10.4.1.2 Sedimentkarakteristik

ST-modulet benytter sig af stort set samme information om sedimentet, som transport modulet i MIKE 11. I modullet indgår således følgende karakteristika for sedimentet:

- Middelkornstørrelsen, som er bestemt ud fra forsøg til 0,092 mm
- Relativ densitet, er her sat til 2,65
- Porøsitet, hvilken antages at være på 0,4

Hvor porøsiteten benyttes i forbindelse med volumenbestemmelse af materialet.

10.4.1.3 Rand- og begyndelsesbetingelser

Som input til den øvre rand, benyttes den modellerede totale sedimenttransport for st 30.500 i perioden 1. januar 1984 til 1. januar 1985. Hvor Sand Transport modulet benytter sig af enheden tilført masse pr. tidsenhed. [g/s], er outputtet fra MIKE 11 transportmodul i enheden volumen pr. tidsenhed [m^3/s]. Med kendskab til vandføringen samt sedimentets densitet, er MIKE 11's output blevet konveteret til den nødvendige enhed og kan kobles på modellen.
Som begyndelsesbetingelse er sat den samme koncentration, som er repræsenteret i denne tidsserie ved første tidsskridt.

10.4.1.4 Morfologi og allubvial rughedskoefficient

Det morfologiske modul i forbindelse med sedimenttransporten er indstillet til at opdatere vanløbsbunden som følge af forøgelsen af aflejret sediment. Endvidere er der sat en øvre grænse på 1 m/dag for hvor meget vandløbsbunden må forandre sig under simuleringen. Det er endvidere muligt som tilvalg at inddrage erosion af vandløbsbredden, hvilket dog ikke er gjort i forbindelse med denne model.
Som følge af at bundens morfologi ændrer sig, vil dette også få betydning for hydraulikken. I Sand Transport modulet tages der hensyn til dette, ved at inddrage den alluviale ruhedskoefficient, som

beregnes på baggrund af den fastsatte værdi af Manningtallet. Værdien for Manningtalle skal være den samme som i HD-modulet. Den alluviale ruhedskoefficient er funktionen af den lokale dybde for hvert tidsskridt, og beregnes derved som udtrykt i ligning (10.1).

$$M h^{(1/6)} = a h^b \tag{10.1}$$

hvor

h	Lokal dybde [m]
a	Modstandskoefficient [-]
b	Modstandsstyrke [-]

Som følge af denne opdateres effekten af erosion og aflejring i modellen, således at strømninger over lave vanddybder afbøjes mere end ved dybere områder. Dette medfører at sedimenttransporten forøges i de lavvandede område, som følge af en øget bundforskydningsspænding. Den alluviale ruhedskoefficient får ligeledes betydning når erosionen træder i kraft, og forårsager at udformningen af aflejringerne bliver mere afrundede.

10.4.2 Output

Sedimenttransportens adfærd overvåges igennem sandfanget via en række forskellige outputs. Disse er alle todimensionelt orienteret og giver enten retningsbestemte resultater (x- og y-retningen) eller resultater baseret på arealet. Hvert output fokuserer på et bestemt område af modellen, og er som følger:

1. Et arealbetinget output, som fokuserer på hele modelområdet og gengiver resultaterne i et grafisk oversigtskort.
2. Et linjebaseret output, der spænder over modellens udbredelse i y-retningen umiddelbart før vandløbets indgang til sandfanget.
3. Et linjebaseret output, som spænder over modellens udbredelse i y-retningen umiddelbart efter vandløbets udgang fra sandfanget.
4. Et arealbetinget output, som er afgrænset af sandfangetfangets rammer.

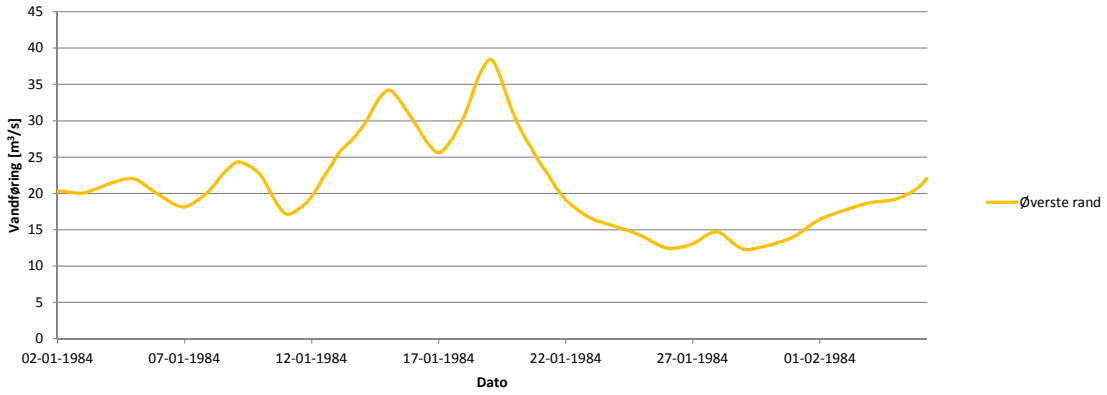
De to linjebaserede outputs er indeholdende 50 beregningspunkter, hvilke danner grundlaget for resultatfilen. De tre første outputs er indstillet til at lagre data for hvert 10. minut om:

- Bundtransporten i x-retning
- Suspenderet transport i x-retning
- Total transport i x-retning
- Kote af vandløbets og sandfangets bund, samt raten for dette

Hvor bundtransporten, den suspenderede transport og den totale transport, endvidere er beskrevet i form akkumulerede volumen. Det sidste output lagrer data for massen af det suspenderede sediment.

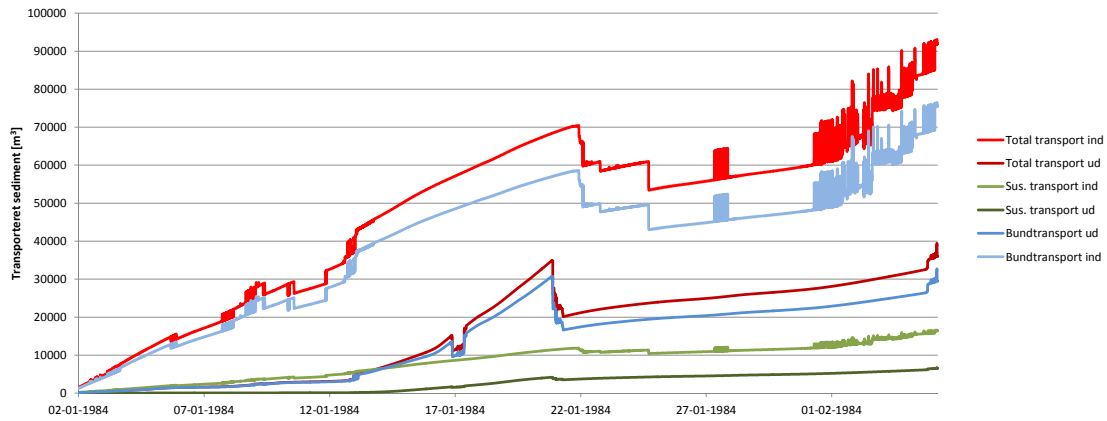
10.5 Resultater

Der er blevet simuleret for perioden 2. januar 1984 til 5. februar 1984, 10.7. Dette er gjort på baggrund af at det er her de største vandføringer forekommer og at der gerne vil undersøges for, hvorvidt sandfanget kan tilbageholde sediment ved en sådan hændelse. Resultaterne af denne simulering er gennemgået i det følgende.



Figur 10.7. Vandføringen for simuleringsperioden, som den er repræsenteret ved det øverste rand uden påvirkning fra morfologien.

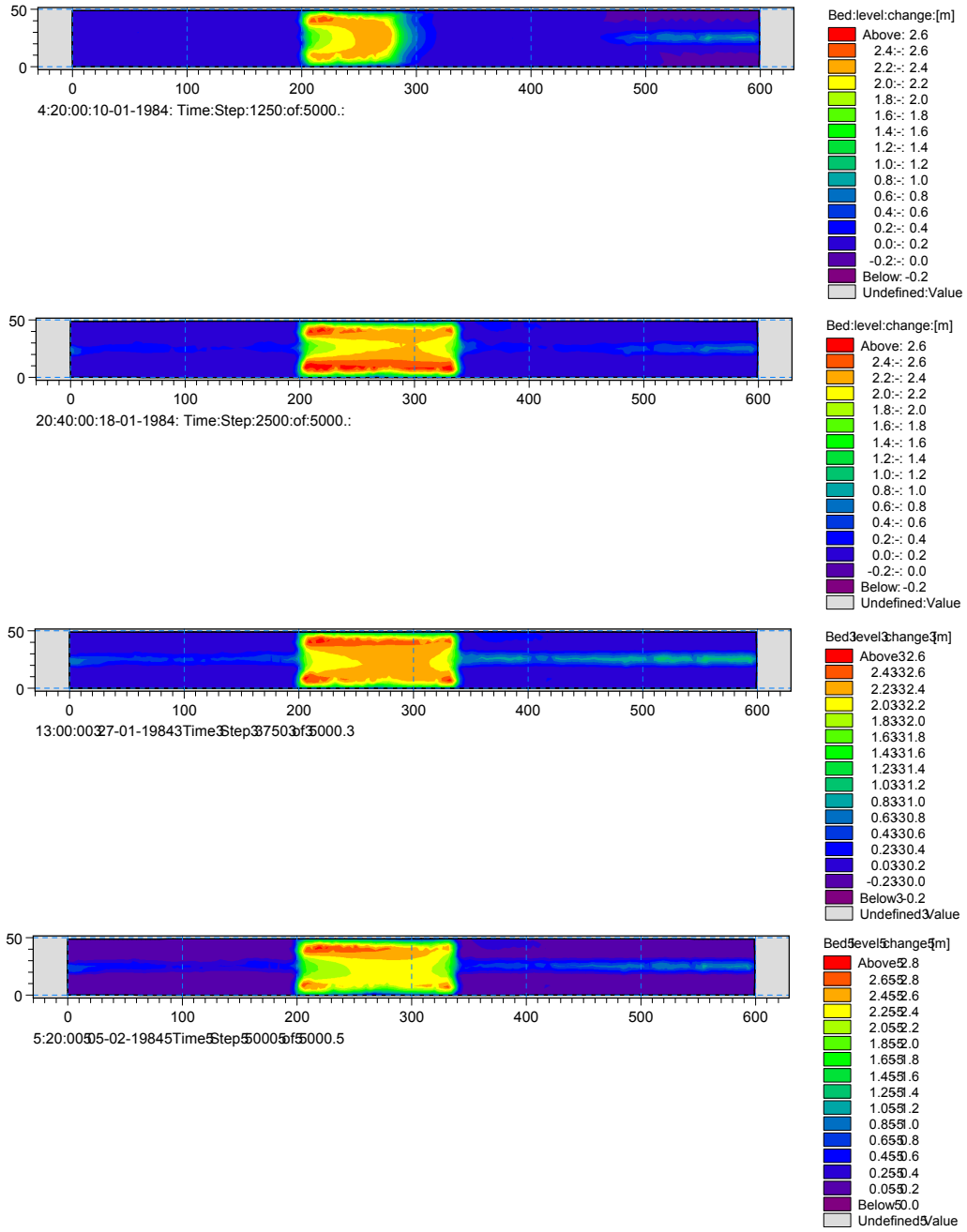
Den akkumulerede total-, bund- og suspenderet transport for simuleringsperioden fremgår af Figur 10.8.



Figur 10.8. Den akkumulerede total- bund- og suspenderet transport i sandfanget sandfangets ind- og udløb.

Ud fra resultaterne kan det ses at bundtransporten udgør 5/6 af total transporten nogenlunde konstant, og at den suspenderede transport står for resten. For den pågældene periode var den akkumulerede tilførsel af sediment på den øvre rand på lidt over 4000 m^3. Denne værdi er således vokset med en faktor 20 ind igennem modellen. Udover de tilførte kocentrationer på den øvre rand, genereres der selvfølgelig også noget transport på den simulerede strækning, men dette tal synes alligevel urealistisk højt.
En ting som er sammenfaldende for alle transportresultaterne er, at når det højeste peak har passeret, så aftager den akkumulurede transport. Dette kan forklares ved, at modellen måske ikke

kan håndtere en så ekstrem afstrømningshændelse. Flowet kan således have gået i modsat retning i følge af stuvning i modellen, hvorved transporten er blevet negativ.
Trods disse problemstillinger viser resultaterne på Figur 10.8, at sandfanget har en betydelig virkning på sedimenttransporten. De akkumulerede mængder fra udløbet opnår kun halv størrelse sammenlignet med hvad der strømmer ind i sandfanget.
Mængden af fældet sediment i sandfanget er ikke blevet bestemt. Som følge af den grafiske output-fil, vist på Figur 10.9, er det dog tydeligt at der foregår en vis fældning i dette. I løbet af simuleringsperioden opbruger sandfanget således næsten sin kapacitet.



Figur 10.9. Tilvækst af bundkoten som følge af fældet sediment.

10.6 Vurdering

Da modellen for sandfanget stadig kræver en vis tilpasning for at give retvisende resultater af sedimenttransporten, er det svært at afgøre den præcise effekt af sandfanget. Der er endvidere kun modelleret for en sedimenttransport som er baseret på middelkornstørrelsen for det undersøgte sediment. Ud fra 10.5 er det dog tydeligt at en vis andel af det transporterede sediment fældes i sandfanget. Forslag til ændringer og forbedringer af modellen er behandlet i Diskussionen, kapitel 11.

Diskussion 11

I forbindelse med udarbejdelsen af dette projekt er der taget valg undervejs, som retrospektivt kunne have været gjort anderledes. Denne diskussion vil af samme årsag opsummere disse, og komme med forslag til forbedringer.

Forsøgsresultater
Igennem forsøgene er en række karakteristika og egenskaber for søens sediment blevet kortlagt. Der var udtaget insituprøver for 4 lokaliteter, men kun prøven udtaget fra samme lokalitet som den støre mængde sediment, der indgik i forsøgene fik bestemt kornstørrelsesfordeling. Havde kornstørrelsesfordelingen været bestemt for de 3 andre insituprøver, ville det have været en bedre begrundelse for at denne fordeling var gældende for hele søen - hvis altså disse lå nogenlunde op af hinanden.
Generelt var forsøgsresultaterne fra den cirkulære strømningsrende meget svingende, og der burde være foretaget flere forsøg, for at forbedre resultaterne. Havde den cirkulære rende haft sider, som roterede med låget, kunne centrifugalkraftens påvirkning på resultaterne negligeres. Dette ville især have betydning for de målinger, som blev foretaget ved højere hastigheder.

Hydraulisk model af Storåen
Input-tidserien til den hydrauliske model for Storåen er baseret på data fra en enkelt målestation (st. 22.10), hvilken er placeret nedstrøms Vandkraftsøen. Det er derfor ikke til at vurdere om den modellerede vandstand og vandføring længere opstrøms i systemet afspejler de faktiske forhold. I forbindelse med at der fokuseres på sedimenttransporten umiddelbar før Storåens indløb til Vandkraftsøen, ville data tættere på dette område være at foretrække. Tilgang til data for de enkelte vandløb, for samme periode, ville have været optimalt.
I forbindelse med at undersøge for fremtidige forbedringer af vandløbene i Storåens opland, som beskrevet i afsnit 8.2, ville dette kræve flere måledata. Idet den målte vandføring i målestation 22.10 benyttes som input til randene i hele modellen, tages der ikke hensyn til den forsinkelsestid, som reelt forekommer. Endvidere varierer afstrømningen pr. arealenhed fra opland til opland, grundet topografiske og geologiske forhold.
Under kalibreringen af den hydrauliske model for systemet stod det klart at et Manningtal på 20, var bedst til at gengive vandstandene for de større afstrømningshændelser. Denne overestimerede dog værdien for peaksne, hvorfor et Manningtal på 23 blev valgt. Der burde være modelleret for et Manningtal liggende mellem de to nævnte værdier, da dette ville have resulteret i et bedre fit til disse hændelser. Selvom det er blevet undersøgt, har det ikke været muligt at finde frem til om en tidsserie for Manningtallet kan kobles på modellen. På den måde kunne værdien for dette sættes til at variere over årstiderne, hvorved vandstanden ville kunne tilpasses for både høje og lave vandføringer.

Sedimentransport for Storåen
Formålet med Storå-modellen var at simulere dynamikken for sedimenttransporten på projektlokaliteten. Som udgangspunkt blev dette gjort på basis af gældende forhold, men det var planen

at denne også skulle simuleres fremtidige forhold. Ved at inddrage det foreslåede omløbsstryg i modellen, kunne der være undersøgt for de morfologiske ændringer, der ville forekomme i Storåen nedstrøms vandkraftværket, hvis ikke et sandfang blev opført. Sidstnævnte scenarie nåede dog desværre ikke at blive gennemført indenfor projektperioden. Det ville endvidere have været interessant at se på bundtransport og suspenderet transport i forbindelse med Storå-modellen. Da disse i det videre forløb kunne have bidraget til bedre viden om sandfangets effektivitet.
Det er for sent blevet opdaget at Engelund & Hansens metode ikke er egnet til denne type sedimenttransport. Idet denne *ikke* benytter sig af den kritiske Shields parameter, $(\tau_*)_c$ til at beregne hvornår transporten går i gang. Den benytter sig i stedet af den dimensionsløse bundforskydningsspænding, τ, hvilken er af meget højere værdi. Dette fremgår af udtrykkene for de to, hvilke er beskrevet i hhv. ligning (11.1) og (11.2).

$$(\tau_*)_c = \frac{u_{f,c}^2}{\rho\,(s-1)\,g\,d_s} \tag{11.1}$$

$$(\tau_* = \frac{U_f^2}{\rho\,(s-1)\,g\,d_s} \tag{11.2}$$

hvor

$u_{f,c}$	Friktionshastigheden baseret på den kritiske bundforskydningsspænding [-]
U_f	Forskydningshastigheden relateret til den totale friktion [-]

Engelund & Hansens metode benytter sig således af en metode, hvor den maksimale kapacitet for transporten beregnes. Derved opnås der meget højere koncentrationer af den totale transport, end det ville være tilfældet ved valg af en anden løsningsmetode, hvor den kritiske Shields parameter indgår. Dette forklarer således, hvorfor kalibreringsfaktoren i Storå-modellen skulle have en så lav værdi, for at få transporten til at give et nogenlunde resultat. Det samme gør sig gældende for modellen for sandfanget.

Model af sandfang
Terrænet og åløbet i modellen for sandfanget, er simplificerede sammenlignet med de faktiske forhold. Havde denne været beskrevet mere præcist og var der mere sikkerhed omkring inputene, ville det være lettere at bekræfte effektiviteten af sandfanget. Det kan dog ses på resultaterne at det har en effekt og det er helt klart en mulig hjælp til at aflaste den nedre del af Storåen for fremtidig sedimenttilførsel. I samme ombæring kunne der ses nærmere på sandfangets effektiv for fældning af forskellige fraktioner af sedimentet, og ud fra resultaterne justere på dimensionerne for dette.

Konklussion 12

Som løsning på problematikken om faunapassage ved Holstebro Vandkraftsø er der af forskellige rådgiverfirmaer opstillet en række løsningsforslag. Ingen af de stillede forslag forholder sig i imidlertid til sedimenttransporten i vandløbet og dennes eventuelle konsekvens for nedstrøms beliggende vandløbsstræk. Mængden af sediment, som bliver aflejret i Vandkraftsøen er af en betydelig størrelse og fældet sediment er løbende blevet opgravet. En stor del af denne belastning kan tilskrives menneskelige aktivitet i oplandet. Dette betyder samtidigt, at der kan gøres en indsats for mindske tilledningen.
Etableres et nyt omløbsstryg, som bedre imødekommer vandrefiskenes behov end det eksisterende, vil dette kunne få betydning for den fremtidige sedimenttransport nedstrøms Vandkraftsøen. I dette projekt er der opstillet en hydraulisk model inkluderende et sandfang opstrøms det nye omløbsstryg. Simuleringen af sedimenttransporten igennem dette vist, at en betydelig mængde materiale kan fældes - selv ved høje afstrømningshændelser.
Udførelsen af et sandfang i forbindelse med etableringen af omløbsstryget, vil således kunne hjælpe med at tilbageholde en del at det transporterede sedimentet, inden dette når strækningen i Holstebro By og længere nedstrøms. Yderligere undersøgelser af sedimenttransportens størrelse og type bør iværksættes og yderlige designforslag kan opstilles for at give en bedre estimering af fældningsprocenten for sedimentet og i forbindelse med dette tilpasse dimensionen af sandfanget. Samtidig kan dette bidrage med at kortlægge hvornår sandfangets kapacitet er opnået og derved hvor ofte det skal tømmes. Det skal dog understreges at et sandfang ikke er en løsning på sedimentproblematikkens oprindelse.

Perspektivering 13

Sedimenttransporten for Storåen er en naturlig proces, hvor raten for erosion og deposition især er styret af strømningshastigheder og geologien for området. Dog er størrelsen på denne blevet påvirket kraftigt igennem menneskelige aktiviteter. Dræning af vandløbsnære arealer og efterfølgende dyrkning på disse, har således medført en øget tilledning af materiale, som følge af overfladeerosion. Ligeledes har udretning af især mindre vandløb med det ene formål at øge vandledningsevnen, ført til en kraftigere erosion på disse stræk. For at opretholde vandledningsevnen har aggressiv grødeskæring fundet sted, hvorved en stor mængde af det sediment, der ellers ville være kunnet tilbageholdt, er blevet ført nedstrøms i systemet.
I dag gøres der dog en stor indsats for at mindske brugen af de nævnte indgreb, hvilket gerne skulle nedbringe den del af transporten, som ikke er naturlig. Mange kanaliserede vandløbsstrækninger er således blevet genslynget, og der er stillet skærpede krav til dyrkningsformen på de vandløbsnære arealer. Grødeskæringen er ligeledes mindsket, og bliver nu gjort på enkelte, bestemte tidspunkter af året, som er nøje overvejet ud fra den pågældende vækstrate af grøden samt virkningen af beskæringen. Mængden af sediment, som føres med åen kan dog stadig mindskes.
Da de forskellige strækninger og tilløb i systemet ikke bidrager ligeligt til sedimenttransporten, er det oplagt at fokusere på de områder, hvor sedimenttransporten er særligt stor. Typen af indgreb afhænger af, om der er tale om tilledning af materiale som følge af overfladeerosion, eller om det er selve hydraulikken i vandløbet, som medfører den øgede transport. Hvor der er tale om tilførsel som følge af overfladeerosion, bør der ses på muligheden for at arealerne i disse områder braklægges, således at der er en vis vegetation til at tilbageholde sedimentet året rundt. På de arealer, hvor dyrkning stadig forekommer, vil etablering af sandfang på drænkanalerne kunne mindske tilledningen til recipienten. På vandløbsstrækninger med kraftig sandvandring, kan udlægning af grus bidrage til at undervandsvegetationen får lettere rodfæste, hvilken kan hjælpe med til at tilbageholde noget af sedimentet. Der er de senere år etableret våde enge på en lang række lokationer her i landet, med henblik på at tilbageholde en del af næringsstof-puljen, disse fungerer derudover som naturlige sandfang.

Referencer og kildehenvisninger

Torben Ankjærø, Tore B. Bro, Dorte Harrekilde, and Peter B. Adamsen, **2010**. Vandkraftsøen, Fri faunapassage.

Aulum-Haderup kommune. Regulativ for vandløb i Hodsager Lilleå systemet samt Lillekær Bæk, URL: `http://goo.gl/O6aQ8`. Downloaded: 15-04-2013.

Thomas Ruby Bentzen, **2006**. Introduktion til sedimenttransport. DCE Lecture Notes No. 007.

Michael Brorsen and Torben Larsen, **2009**. Lærebog i hydraulik. ISBN: 978-87-7307-691-0. Aalborg Universitetsforlag.

Henrik Carl and Peter Rask Møller, **2012**. Atlas over danske ferskvandsfisk. ISBN: 978-87-87519-74-8. Statens Naturhistoriske Museum i samarbejde med DTU Aqua.

Hubert Chanson, **1999**. The Hydraulics of Open Channel Flow - an Introduction. ISBN: 0-340-74067-1. Eliane Wigzell.

COWI A/S, **2013**. Lokaløkonomiske effekter af det udsætningsbaserede laksefiskeri i Gudenåen.

Bjarke Dehli and Daniel Lindvig, **2011**. Flere laks i Storåen. Downloaded: 26-03-2013.

DHI, **2011**. MIKE 11 - a Modelling System for Rivers and Channels, Short Introduction Tutorial.

Christian Dieperink, **2002**. Fangster af laksefisk fra Skjern Å og Storåen. ISBN: 87-90968-19-0, DFU-rapport. Danmarks Fiskeriundersøgelser, Afd. for Ferskvandsfiskeri.

DTU Aqua, **2011**. Udsætning af laks i vandløb. URL: `http://www.fiskepleje.dk/vandloeb/udsaetning/laks.aspx`. Downloaded: 26-03-2013.

Engelund and Hansen, **1967**. Monograph on sediment transport in alluvial streams. ISBN: 8757104220-9788757104226. Teknisk forlag.

Emil Dietz Fuglsang, **2010**. Modellering af sandfang i vandløb.

Fugro Denmark A/S, **2004**. Opmåling af Holstebro Vandkraftsø, Uhre Sø og Øvre Sø.

Henrik Garsdal, Anders Refsgaard, Bo Christensen, Jeppe Sikker Jensen, Søren Hinge Christensen, and Jes Clauson-Kaas, **2011**. Effektiv metodik til screening af oversvømmelsesrisici i vandløb.

GEUS, **1989**. Danmarks Jordartskort 1:200.000. URL: `http://goo.gl/nigEq`. Downloaded: 01-04-2013.

Edward E. Hansen, **1973**. In-channel Sedimentation Basins - a Possible Tool for Trout Habitat Management.

Hedeselskabet, **1989**. Plantegning stryg ved Holstebro.

Hedeselskabet, **1992**. Regulativ for Herningsholm Aa, URL: `http://goo.gl/ISHWn`. Downloaded: 15-04-2013.

Hedeselskabets Forsøgsvirksomhed, **1988**. Undersøgelse af Vandkraftsøen, Holstebro.

Sybille Hildebrandt, **2012**. Farlige bakterier fra gylle går direkte i grundvandet. http://videnskab.dk. Downloaded: 02-04-2013.

Holstebro Kommune, **1991**. Vandkraftsøen ved Holstebro - Miljøproblemer og oprensning.

Holstebro Kommune, Teknik og Miljø, **2011**. Miljørapport / VVM-redegørelse - Vindmøller øst for Tvis.

Knud Jakobsen, **2011**. Værste oversvømmelser i 40 år. BT.

Claus Johansen, **1998**. Dynamics of Cohesive Sediments.

Klaus Vejlgaard Just, **2007**. Effektivitet af sandfang i reduktion af sedimenttransporten i mindre danske vandløb.

Henrik Kettunen. Eutrofiering. URL: `http://goo.gl/V3XI6`. Downloaded: 02-04-2013.

Anders Koed, **2010**. Indskudte søer – en udfordring for vandrefiskene, URL: `http://www.fiskepleje.dk`. Downloaded: 30-03-2013.

Pia Krag, **2012**. Laks i Storå. Downloaded: 26-03-2013.

Lone Liboriussen, Martin Søndergaard, Erik Jeppesen, Asger Roer Pedersen, Christian Skov, Henrik Skovgaard, Inge Christensen, Mette Bramm, Simon Marsbøl, and Lise-Lotte Pedersen, **2007**. Sørestaurering i Danmark. URL: `http://www2.dmu.dk/pub/fr636_del1.pdf`. Downloaded: 20-03-2013.

Daniel Einar Lindvig, **2011**. Bestandsstørrelse og gydeoverlevelse hos atlantisk laks (Salmo salar L.) i Storå.

Bent Lauge Madsen. Okker. URL: `http://goo.gl/mBWOR`. Downloaded: 25-03-2013.

Bent Lauge Madsen, **2009**. Vandstjernefamilien, URL: `http://goo.gl/0CNgH`. Downloaded: 01-04-2013.

Miljøafdelingen - Teknisk Forvaltning, Holstebro kommune, **2009a**. Vandløbsregulativ for Savstrup Å.

Miljøafdelingen - Teknisk Forvaltning, Holstebro kommune, **2009b**. Vandløbsregulativ for Halgård Bæk.

Miljøministeriet, Naturstyrelsen, **2011**. Vandplan 2010-2015. Nissum Fjord. Hovedvandopland 1.4 Vanddistrikt: Jylland og Fyn. URL: `http://www.naturstyrelsen.dk`. Downloaded: 19-03-2013.

Miljøministeriet, Skov- og Naturstyrelsen, **2004**. National forvaltningsplan for laks. URL: `http://www2.sns.dk/udgivelser/2004/87-7279-589-1/laks_handlingsplan.pdf`. Downloaded: 26-03-2013.

Naturstyrelsen. Basisanalyse af Nissum Fjord - N 65, URL: `http://www.naturstyrelsen.dk`. Downloaded: 15-03-2013.

Naturstyrelsen og Kystdirektoratet, **2011**. Endelig udpegning af risikoområder for oversvømmelse fra vandløb, søer, havet og fjorde. ISBN: 978-87-7279-298-9. Miljøministeriet, Naturstyrelsen og Transportministeriet, Kystdirektoratet.

Benjaminn Nordahl Nielsen, Flemming S. Eriksen Nik Okkels, and Nik Okkels, **2011**. Silt.

Haris Nuhanovic, **2011**. Natur, geografi, metrologi, hydrologi. URL: `http://www.holstebro.dk/Geografi-og-hydrologi-1844.aspx`. Downloaded: 11-12-2012.

Orbicon A/S, **2012**. Storå – vandstande, klimatilpasning og vandtilbageholdelse ovenfor Holstebro, URL: `http://goo.gl/ZTcRn`. Downloaded: 04-04-2013.

Kasper Rasmussen, Rasmus Bang, and Thomas Wernberg, **2013**. Forlægning af Storå forbi Holstebro - Skitseprojekt og konsekvensvurdering.

A. Shield, **1936**. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung.

John Skovhus, **2010a**. Storåen ved Boldhusgade i Holstebro. URL: `http://www.panoramio.com/photo/40914533`. Downloaded: 16-01-2013.

John Skovhus, **2010b**. Storåen ved Boldhusgade i Holstebro. URL: `http://www.panoramio.com/photo/40914533`. Downloaded: 16-01-2013.

N Sloth. Gydebanke. URL: `http://www.biopix.dk`. Downloaded: 01-04-2013.

Sammenslutningen ved Storå SVS, **2010**. Laks i Storå.

Teknik- og Miljøforvaltningen, Ringkøbing Amtskommune, **1992**. Højris Å - Regulativ for amtsvandløb nr. 5, URL: `http://goo.gl/idgwJ`. Downloaded: 15-04-2013.

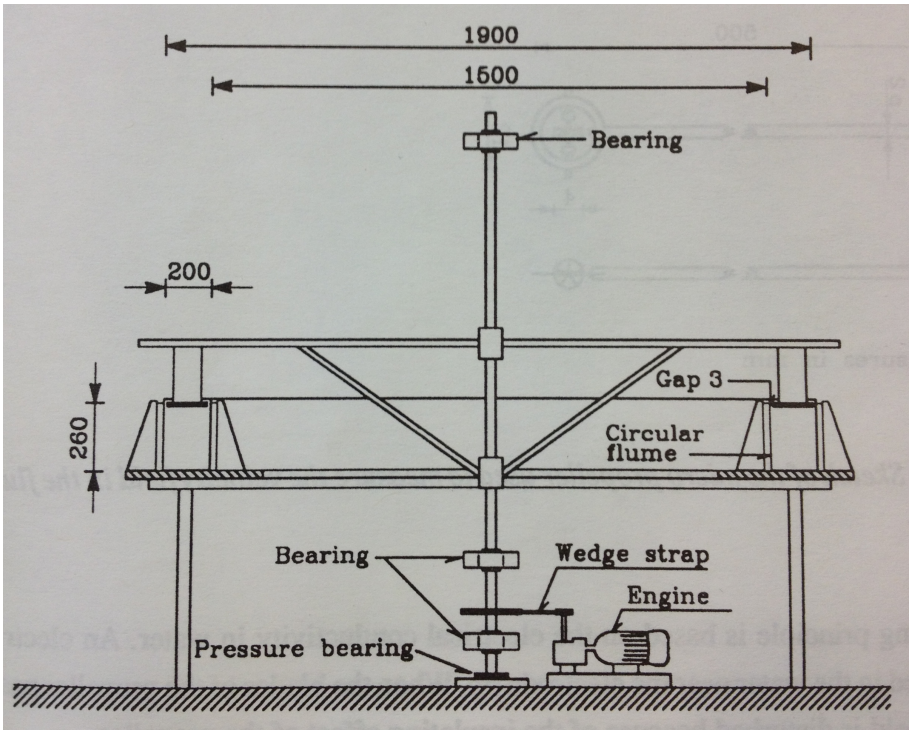
Teknik og Miljø, Herning kommune, **2011**. Tillægsregulativ for Røjenkær Bæk st. 0 – 4133., URL: `http://goo.gl/kYPGm`. Downloaded: 15-04-2013.

Teknisk forvaltning, Herning kommune, **1992**. Regulativ for Sunds Nørreå, URL: `http://goo.gl/s2ze5`. Downloaded: 15-04-2013.

Karsten Wandall, Bo Levesen, and Paul Landsfeldt og Sten Bøgild Frandsen, **2000**. Bedre vandløb – en praktisk håndbog. ISBN: 87-7750-969-2. Vejle Kommune.

Bundforskydningsspænding B

Den cirkulære strømningsrendes omdrejningshastighed kan justeres, hvorved en ændring af denne i samme ombæring vil svare til en ændring af bundforskydningsspændingen. For at få omregnet strømningshastigheden til en gennemsnitlig bundforskydningsspænding, er der udført et kalibrerende forsøg. Strømningsrenden har dimensionerne opgivet på Figur B.1, (det roterenede låg passer til renden med en tolerance på 3mm til begge sider).



Figur B.1. Dimensionerne af den cirkulære strømningsrende. [Johansen, 1998]

Derudover er følgende data nødvendige for de videre forløb:

	Omkreds [m]
Indre	5,97
Ydre	4,71
Midte	5,34

Tabel B.1. .

Der er anvendt en tæller, som registrerer rendens rotation, hvor hver fulde rotation tæller 6 registreringer. Ud fra antal registrerede tællinger indenfor et givent tidsrum (her 100 sek), kan omdrejningstallet findes.

Regulator [%]	1. Tælling	2. Tælling	3. Tælling	Tid [sek]	Omdrejning/tid [RPM]
4	20	19	19	100	1,93
6	32	33	33	100	3,27
8	44	44	44	100	4,40
12	68	67	66	100	6,70
20	112	113		100	11,25
30	172	173		100	17,25
40	69	69		30	23,00

Tabel B.2. .

Med omdrejningstallet, samt kendskabet til størrelsen på rendens omkreds, kan hastigheden for det roterende låg opskrives:

Regulator [%]	U_{ydre} [m/s]	U_{indre} [m/s]	U_{midte} [m/s]
4	0,19	0,15	0,17
6	0,32	0,26	0,29
8	0,44	0,35	0,39
12	0,67	0,53	0,60
20	1,12	0,88	1,00
30	1,72	1,35	1,54
40	2,29	1,81	2,05

Tabel B.3. .

Bundforskydningsspændingen kan herefter beregnes ud fra ligning (B.1):

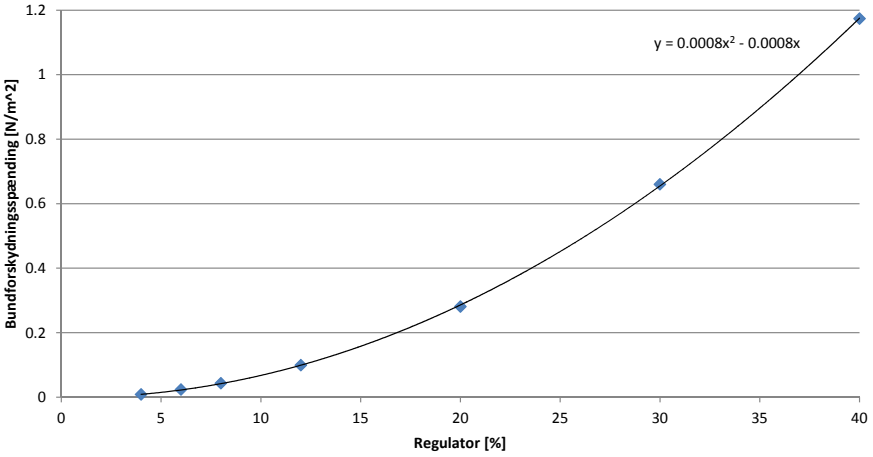
$$\tau_{bund} = 0{,}28\,{U_{låg}}^2 \tag{B.1}$$

Hvorved bundforskydningsspændingen for de givne hastigheder er som følger:

Regulator [%]	τ_{ydre} [N/m^2]	τ_{indre} [N/m^2]	τ_{midte} [N/m^2]
4	0,010	0,006	0,008
6	0.030	0,018	0,024
8	0,054	0,033	0,043
12	0,124	0,078	0,100
20	0,351	0,219	0,281
30	0,825	0,514	1,660
40	1,466	0,914	1,174

Tabel B.4. .

Plottes bundforskydningsspændingen op i forhold til regulatorens indstilling kan der via. en tendenslinje findes et udtryk for sammenhængen, som vist på Figur B.2



Figur B.2. Dimensionerne af den cirkulære strømningsrende.

Derved kan regulatorens indstilling hurtigt omregnes til en bundforskydningsspænding.

Indholdsfortegnelse CD-bilag C

Model af forsøg	MIKE 11-model til kalibrering af ST-modul ud fra forsøg.
Model af Storå	MIKE 11-model til simulering af sedimenttransporten for Storåen.
Model af sandfang	MIKE 21-model til simulering af sedimenttransporten gennem sandfanget.