



Undersøgelse af forskydningsspændinger i skyllesystemer

af

Emil Aagaard Thomsen

Kandidatspeciale, Byggeri og Anlæg, Vand og Miljø

Aalborg Universitet 2015



Civilingeniør i Vand og Miljø

Sofiendalsvej 9-11

9200 Aalborg SV

Telefon 99 40 84 84

E-Mail: civil@civil.aau.dk

Synopsis:

Titel:

Undersøgelse af forskydningsspændinger i skyllesystemer

Projektperiode:

September 2014 til juni 2015

Forfatter:

Emil Aagaard Thomsen

Vejledere:

Thomas Ruby Bentzen

Torben Larsen

Oplagstal: 4

Rapport sideantal: 69

Bilag: 5

Afleveringsdato: 10. Juni 2015

I dette projekt undersøges de forskydningsspændingerne, der opstår i skyllesystemer under skylning. Ved almindelig rørdimensionering anvendes ofte teori med forudsætning om stationær og ensformig strømning. Denne forudsætning er ikke overholdt i alle dele af flowet i et skyllesystem, og det er derfor usikkert om simpel teori kan anvendes til at beskrive alle flowområder under et skyl. Hastighedsgradienterne vil være store i starten og efterhånden flade ud som funktion af ledningens modstand på flowet. Forskydningsspændingerne vil dermed variere eksponentielt fra start til slut i ledningen, og det undersøges hvordan dette forløb kan beregnes.

I projektet opstilles et praktisk forsøg til validering af den numeriske model opstillet i programmet Mike Urban. Det undersøges herefter, om den numeriske 1D-model kan beskrive bølgerne lavet i forsøget, og de forskydningsspændinger der opstår som funktion heraf. I forsøget udføres forsøg med sediment udlagt i kanalen, for at undersøge sammenhængen mellem anvendt skyllevolumen og den transporterede mængde sediment. Transporten kan efterfølgende sammenlignes med de forskydningsspændinger der udregnes igennem forskellige teorier og Mike Urbans indbyggede beregningsmodul.

Det viser sig, at forskydningsspændingerne i starten af systemet er langt højere end først udregnet ved simpel bundforskydnings teori. Dette kommer som følge af de høje hastigheder i starten af systemet, når der frigives en stor mængde vand over kort tid. Anvendelsen af Mike Urbans sediment transport modul viste sig at være begrænset af de høje forskydningsspændinger i starten, og modulet kan derfor først anvendes efter en vis dæmpningsperiode af skyllebølgen.

Til sidst udarbejdes et kort casestudy på Damhusledning i København, hvor erfaringerne fra forsøget og modelleringen heraf anvendes i en praktisk sammenhæng. Undersøgelsen viser, at forskydningsspændingen følger de samme tendenser som i det opstillede forsøg med hensyn til de høje forskydningsspændinger i starten, og dæmpningsperioden af bølgen.

Forord

Dette afgangsprøjsjekt er udarbejdet af Emil Aagaard Thomsen fra studeretningslinjen Vand og Miljø, under instituttet Byggeri og Anlæg ved Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet på Aalborg Universitet. Prøjsjektet er udarbejdet som et langt afgangsspeciale, og er udarbejdet i prøjsjektperioden løbende fra September 2014 til Juni 2015.

Rapporten har titlen "Undersøgelse af forskydningsspændinger i skyllesystemer" og arbejder med sammenhængen mellem forskydningsspændinger og sediment transport i skyllesystemer. Der er i prøjsjektet opstillet et praktisk forsøg til analyse af fysiske forhold ved dannelsen af en bølge og effekten heraf. Indholdet af prøjsjektet er rettet mod personer med en interesse indenfor afløbstekniske installationer og dimensioneringen heraf. En fuld forståelse af rapportens indhold kræver derfor en grundlæggende forståelse indenfor hydrauliske parametre og hydrodynamik.

Vejlederene tilnyttet prøjsjektet har været Thomas Ruby Bentzen og Torben Larsen, begge fra Aalborg Universitet. Undertegnede vil gerne takke begge vejledere for deres hjælp igennem prøjsjektperioden, især den hurtige respons og muligheden for uplanlagte møder har været til stor hjælp. Udover vejlederne skal der rettes en speciel tak til værkstedsmand, Niels Drustrup, fra Aalborg Universitet, som har været behjælpelig igennem hele prøjsjektperioden. Specielt den fysiske opbygning af skyllesystemsforsoget, de løbende modificeringer samt hjælp til opstilling af måleudstyr har haft en stor betydning for prøjsjektets udførelse. Yderligere takkes det rådgivende ingeniørfirma NIRAS for udlevering af et prøjsjektudkast omhandlende et skyllesystem, som er blevet analyseret i rapporten.

Læsevejledning

I rapporten opstilles der to forskellige numeriske modeller i beregningsprogrammet Mike Urban. Der skelnes mellem en simpel model, standard-modellen og en mere kompliceret model RTC-modellen. Kilder er angivet ved Harvard metoden og vil derfor listes som [Forfatter, årstal] bagerst i rapporten. Besøgte hjemmesiders URL fremgår ved kortlinks, som er en komprimering af lange hjemmesiders internetadresse. Vandstande i prøjsjektet omtales både som bølgehøjder og vanddybder, begge udtryk angiver afstanden til bunden.

Abstract

In this project the bed shear stress happening during flushwaves in storage pipes is investigated. A lot of hydraulic theory is based on the assumption of stationary and uniform flow conditions. This is not the case during flushwaves, where large velocity gradients are present in the first part of the system. In this project it is investigated whether or not a 1D modelling program can be used to predict the bed shear stresses during a flushwave in a storage pipe. Because of the large velocity gradients the bed shear stresses along the length of the pipe will fall exponentially, as a function of the decreasing flow parameters.

Because of the restrictions using a 1D-model to predict bed shear stresses in a seemingly three dimensional problem, it is important to verify the calculation performance of the program. Therefore a practical experiment has been set up during the execution of the project. The practical experiment involves analysis of flow conditions in a rectangular channel, which is set up to act as a flushing system implemented to clean a storage pipe. The flow is generated by filling up a storage tank, and afterwards releasing the volume of water through a narrow flushing gate. In the analysis of flushing systems, this is considered the normal way to create the flush. The flow is then measured using ten wave gauges which are placed tactically along the length of the channel. Furthermore the water level in the storage tank is measured using a pressure transducer during each flush. This measurement is performed to be able to describe the flow into the system in the 1D model afterwards. After the initial flushwave investigations several experiments with coarse sediment was performed. Initially the connection between a flushing volume and transport of a single layer of sediment was investigated. The investigation gave knowledge of the interaction between the sediments and the flushwave, which was used to choose parameters for an experiment with a full even layer of coarse sediment in the channel. In this experiment the transport of sediments was measured of a number flushes with constant flushing volume. The results from the experiment was then later upheld against calculated bed shear stresses to see if there was a connection between the two.

The program used in this project is Mike Urban, created by the Danish Hydraulic Institute, the modelling software contains a lot of tools to model flow, transport and water quality in sewer pipelines. In the program two separate models are set up, one simple, which uses the measured pressure curve from the experiment as input of the flow. The other model is set up with a storage tank and a control system which ensures that the stored water is first released when it has reached a proper water level. This way the inflow to the system is modelled in a way which is identical to the practical experiment. The flow is then evaluated with different flushing volumes in the model to see if the model is able to calculate the water level and other hydraulic parameters. The initial modelling process shows that the simple model is not able to predict the measured water levels in the physical model and it is therefore chosen to leave this model out of the further calibration process. After the calibration process was completed the bed shear stresses were calculated through the programs build-in module and from the hydraulic parameters found from the numerical models.

It was found that the bed shear stress calculated from the build-in module the 1D-model was not applicable in all flow regions. In the start of the flushing system the velocity gradients are very high which caused the module to give false predictions. Furthermore it was concluded that the bed shear stress calculated from the hydraulic parameters found in the model gave a better fit when comparing the data to the observed transport from the practical experiment.

Indholdsfortegnelse

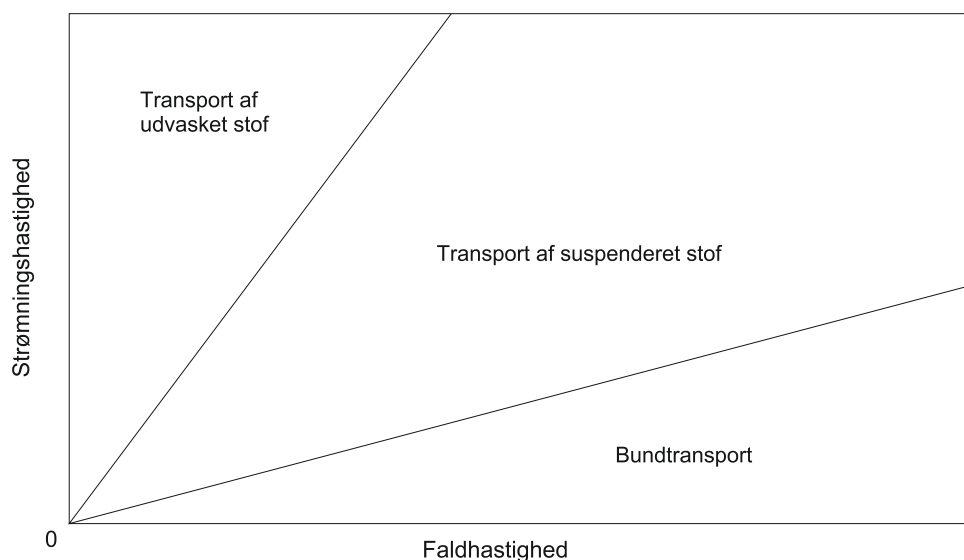
Kapitel 1	Introduktion til sedimenttransport	1
1.1	Projekt motivation	2
Kapitel 2	Introduktion til skyllesystemer	3
2.1	Introduktion til anvendelse af skyllesystemer	3
2.2	Eksempler på anvendte systemer	4
2.3	Skyllesystem til rørbassin	6
Kapitel 3	Modelleringsværktøjer	9
3.1	Introduktion til modellering af sedimenttransport	9
3.2	Anvendelse af MOUSE	10
3.3	Parameter forklaring	11
3.4	Bundforskydningsspænding	13
3.5	Valg af sedimenttransport model	18
Kapitel 4	Problemstillinger	21
Kapitel 5	Opstilling af skyllesystem forsøg	23
5.1	Fysisk opsætning af forsøg	23
5.2	Anvendelse og kalibrering af bølgemålere	26
5.3	Måling af vandføring	29
Kapitel 6	Resultater fra skyllesystem forsøg	31
6.1	Strømningsforsøg	31
6.2	Indledende sedimenttransport forsøg	36
6.3	Sedimenttransport forsøg	40
Kapitel 7	Modellering med Mike Urban	45
7.1	Standard Mike Urban model	45
7.2	Mike Urban-model med RTC randbetingelse	45
7.3	Sammenligning af strømningforhold	46
7.4	Beregning af forskydningsspændinger	50
7.5	Udregning af ændring i bundniveau	54
Kapitel 8	Opsamling af resultater	57
8.1	Sammenligning af transport og forskydningsspændinger	57
Kapitel 9	Casestudie: Damhusledningen	59
9.1	Introduktion til casen	59
9.2	Resultater fra indledende simulering	60
9.3	Resultater ved ændret randbetingelse	62
9.4	Beregning af forskydningsspænding ud fra friktionstallet	63

9.5	Udregning af forskydningsspændinger i Mike Urban	64
Kapitel 10	Diskussion	67
Kapitel 11	Konklusion	69
Litteratur		71
Bilag A	Indhold af bilags cd	
Bilag B	Målinger fra skyllesystem forsøg	
Bilag C	Kalibrering af tryk transducer	
Bilag D	Beregning af vandføring	
Bilag E	Billeder fra forsøg	

1. Introduktion til sedimenttransport

Ophobning af sediment i rør er igennem tiderne blevet et fænomen som er blevet undersøgt grundigt. Dette skyldes, at ophobning af sediment både kan føre til reduktion i den hydrauliske kapacitet, og dermed også bidrage væsentligt til koncentrationen og antallet af de forurenende overløb (Schaffner, 2008). Sedimenttransport foregår i alle rør forbindelser, og det har derfor været essentielt at opstille strenge kriterier til overholdelse af en vis form for selvrensning. Dette er dog ikke altid gunstigt, og på nogle strækninger er det ikke muligt at overholde kravet, hvilket i mange tilfælde resulterer i årlige udgifter til spuling af ledningerne.

Der er mange forskellige måder at beskrive sedimenttransport på, men oftest opdeles transporten i bund- og suspenderet transport. Bundtransporten er defineret som de sedimenter, der flyttes på bunden, og derfor delvist har fysisk kontakt til bunden under transporten. Den suspenderede transport består af de sedimenter, som løftes op og flyttes. Dog er der stadig mulighed for at disse en gang i mellem har kontakt til bunden i mindre grad. Nogle teorier tilføjer en yderligere transport, den udvaskende transport, som oftest defineres som de sedimenter, der flyttes uden at have nogen form for kontakt med bunden (Mark, 1995). De tre transportformer er illustreret på figur 1.1 som funktion af strømningshastigheden og faldhastigheden.



Figur 1.1. Forskellige typer transport som funktion af strømnings- og faldhastighed. (Mark, 1995)

Ud fra figur 1.1 kan det ses, at transporten dermed både vil variere som funktion af lokale strømningsforhold, men også befæstelsestypen da denne har stor indflydelse på de komponenter der tilføres afløbssystemet. Viden herom vil dermed forbedre muligheden for at beskrive den sedimenttransport der foregår i afløbssystemet. (Mark, 1995)

Da afløbssystemet er et kompliceret netværk af rør, samlinger og brønde med tilhørende

varierende mængde af tilført sediment, er det i mange tilfælde svært at sammenligne viden fra forskellige analyser med hinanden på grund af forudsætningerne. Desuden er det nævnt i Schaffner (2008), at en anvendelse af numeriske modeller kan anvendes til bedre at modellere de hydrauliske parametre. Dette kommer af de numeriske modellers evne til at analysere forskellige flow scenarier med skiftende randbetingelser. For at kunne opsætte en acceptabel numerisk model er det derfor vigtigt at kalibrere den mod praktisk målt data, for at sikre at modellen beskriver virkeligheden korrekt.

1.1 Projekt motivation

Intentionen med dette speciale er at analysere brugen af et kommercielt program til beregning af de hydrauliske parametre for en skyllebølge. Skyllsystemer er langsomt begyndt at få deres indtog på det danske afløbssystem og dette betyder, at det er vigtigt, at få verificeret om de normalt anvendte kommercielle programmer er udstyrede til at beregne effekten af en skyllebølge. I projektet er det derfor hensigten at opstille et praktisk eksperiment, der har til formål at simulere en skyllebølge i et almindeligt afløbssystem eller rørbassin. Dette eksperiment skal senere anvendes til sammenligning med resultater fra et eller flere kommercielle programmer hvor randbetingelserne vil være de samme som anvendt i forsøget, og dermed verificeres programmernes evne til at beregne skylleeffekten af en bølge.

Hovedformålet vil således være en analyse af de forskydningsspændinger, der dannes ved en bølge, da det er disse forskydningsspændinger, der er afgørende for størrelse af sedimenttransporten.

Eftersom forskydningsspændingen er betydende for størrelsen af sedimenttransport, vil det være essentielt at analysere forskellige måder og bestemme denne på. I denne sammenhæng vil det yderligere være interessant at undersøge forskellige transport modellers evne til at beskrive transporten.

Der fokuseres på sedimenttransport modellerne som er Engelund-Hansen og Ackers-White. De to formularer kan også anvendes i de fleste beregningsprogrammer. Intentionen er ikke af bekæfte eller afkæfte validiteten af de enkelte modeller, men nærmere at undersøge forskellen mellem de udregnede transporter og sammenligne dette med et virkeligt scenarie.

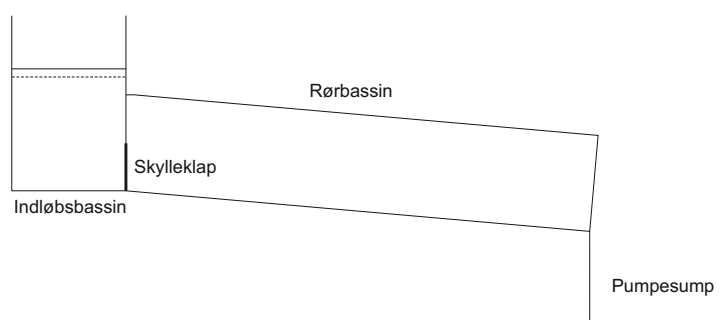
2. Introduktion til skyllesystemer

I dette kapitel undersøges de nuværende skyllesystemers implementering i forskellige afløbstekniske sammenhænge samt deres tekniske funktioner. Der redegøres kort for konceptet bag et skyllesystem, og de specielle forhold der gør sig gældende.

2.1 Introduktion til anvendelse af skyllesystemer

I lang tid har det i den afløbstekniske verden været et problem at mange afløbsledninger og bassiner ikke har kunnet overholde selvrensningsskravene. Dette har medført årlige omkostninger til spuling for at kunne mindske ophobningen af sediment og dermed sikre den hydrauliske kapacitet. Da disse omkostninger vil fortsætte igennem hele funktionsperioden for enten en ledning eller et bassin har det været en nødvendighed, at opfinde nye metoder, til at imødekomme problemer med selvrensning. De såkaldte skyllesystemer er med succes blevet indført i mange afløbstekniske sammenhænge, som et hjælpemiddel, til kontinuerligt at få rensede ledninger eller bassiner for ophobet sediment. Skyllesystemer er i sin enkelthed en simpel installation, der tilbageholder vand under regnhændelser, for senere at afgive vandet som en impuls igennem systemet. Det ophobede vandvolumen og hastigheden hvormed dette frigives er med at sikre en effektiv fjernelse af det tilbageliggende sediment.

På figur 2.1 ses en principskitse af et rørbassin, som kunne anvendes i sammenhæng med et afløbssystem der under kraftige regnhændelser har brug for aflastning. Under regnhændelserne vil overløbsbygværkerne lede det opspædede spildevand til bassinet. Efter hændelsen tømmes vandet ved pumping til renseanlæg, og derefter skylles rørbassinet rent med det opmagasinerede vandvolumen.



Figur 2.1. Eksempel på rørbassin med tilhørende skyllesystem.

Skyllsystemer afhænger oftest af automatisk styring, hvilket yderligere nedsætter driftsomkostninger i forhold til en almindelig højtryksspuling eller brugen af rensegrise. Selvom opstillingen i sin enkelthed kan opfattes som værende simpel, skal der stadig laves et tilstrækkeligt forarbejde til bestemmelse af de hydrauliske parametre, der styrer udløsningsfunktionen for det tilhørende spjæld. Desuden skal de anvendte komponenter have en høj driftssikkerhed, da gentagende

driftsfejl hurtigt kan udvikle sig til økonomisk ugunst i forhold til anvendelse af de integrerede metoder til rensning. Ved skyllesystemer anvendt i fælleskloakerede ledninger udformes spjældet således at en eventuel styringsfejl aldrig vil lukke ledningen fuldstændigt, hvormed vandet stadig kan løbe over spjældet efter en vis opstuvningsperiode. Denne opstuvning kan føre til risiko for vand på terræn, hvis spjældet i en længere periode forhindrer en fuld udnyttelse af ledningens hydrauliske kapacitet.

2.2 Eksempler på anvendte systemer

Skyllesystemer kan anvendes i mange forskellige sammenhænge og indtil videre er der kun præsenteret et system til renholdelse af almindelige kloakledninger. I Danmark findes der en række af forskellige firmaer der leverer skyllesystemer til forskellige applikationer herunder Ruma Industri A/S, HydroSystems ApS og Stjernholm A/S. De fleste specialiserer sig i flere installationer som rensningssystemer, regulering og optimering af afløbssystemer. Skyllesystemerne er i nyere tid blevet udviklet til at kunne implementeres i forskellige bassingeometrier, et eksempel herpå kunne være et skyllesystem til runde bassiner fra HydroSystems A/S som vist på figur 2.2.



Figur 2.2. Skyllesystem fra HydroSystems ApS til runde bassiner med op til 30 m i diameter. (HydroSystems ApS, 2014)

Skyllesystemet er udviklet til renholdelse af runde bassiner med op til 30 m i diameter. Systemet fungerer i tørvejrssituationer ved at lede spildevand rundt i rinde i periferien af bassinet. I en regnvejrssituation fyldes skyllekammeret op ved hjælp af pumpning, hvilket betyder at der altid er mulighed for rensning. Rensningsskyllet er styret af en niveaumåling og til udløsning af skylleklappen anvendes et hydraulisk system. Ved runde bassiner med større end 30 m i diameter

kan der med fordel anvendes et sektionsoptaget skyllesystem som vist på figur 2.3. (HydroSystems ApS, 2014)



Figur 2.3. Skyllesystem fra HydroSystems ApS til store runde bassiner. (HydroSystems ApS, 2014)

Ved at opdele bassinet i flere skyllebaner er det muligt, at sikre et skyllevolumen til de enkelte baner, og derved opnå en effektiv skylning af hvert enkelt område i bassinet.

En anden udformning af et skyllesystem til rektangulære tanke eller bassiner er vist på figur 2.4. Denne type skyllesystem virker overordnet set på samme måde som de cirkulære bassiner og kan enten fyldes in-situ eller eksternt.



Figur 2.4. Trommel skyllesystem fra Grande, Water management systems. (Grande - Water management systems, 2015a)

Der har i nyere tid været fokus på fremtidssikring af afløbssystemet i forhold til ekstremregn forårsaget af klimaændringer. Der er i den sammenhæng blevet oprettet og planlagt mange rørbassiner såsom Damhusledningen i København (NIRAS, 2014). Disse rørbassiner virker som almindelige rektangulære eller cirkulære bassiner og er designet til at tilbageholde vandmængder, som senere skal ledes til recipient eller rensning på nærliggende rensningsanlæg. Problemet med tilbageholdelse af overløbsvand er den sedimentering, der foregår, mens tilbageholdelse finder sted. De tilbageliggende sedimenter vil minimere den hydrauliske kapacitet samt øge stofkoncentrationen ved næste fyldning. Det er derfor nødvendigt, at rense ledningen tilstrækkeligt efter hver hændelse, hvilket hurtigt kan udvikle sig til en u hensigtsmæssig omkostning på lang sigt.

Til rensning af rørbassiner anvendes ofte skylleklapsystemer hvilke er udformet som vist på figur 2.5. Systemet følger opfyldningsprincippet fra tidligere, hvor et skyllevolumen fyldes op under starten af en regnhændelse. Dette sikrer fuld skylning, selv ved en delvis fyldning af røret. Ved denne opfyldningsmetode begrænses skylningen til efter hver hændelse, mens der ved pumpe opfyldning er mulighed for rensning mellem hændelser.



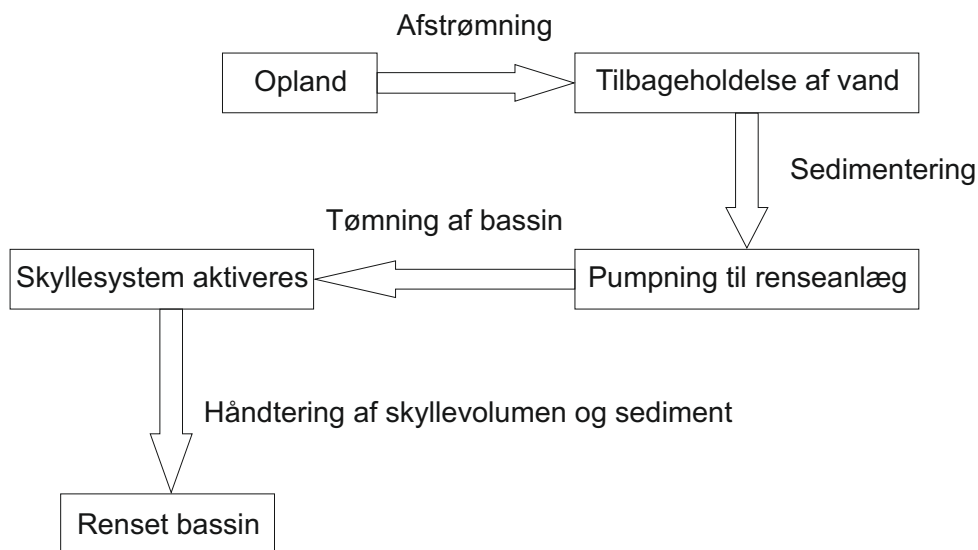
Figur 2.5. Skylleklapsystem fra Grande, Water management systems. (Grande - Water management systems, 2015b)

Åbningsklappen er i de fleste tilfælde styret af en niveaumåler placeret ved udløbet af ledningen, dermed sikres at skylningen først sker når ledningen er tømt og det ophobede vandvolumen er blevet pumpet eller afledt til nærliggende rensningsanlæg.

2.3 Skyllesystem til rørbassin

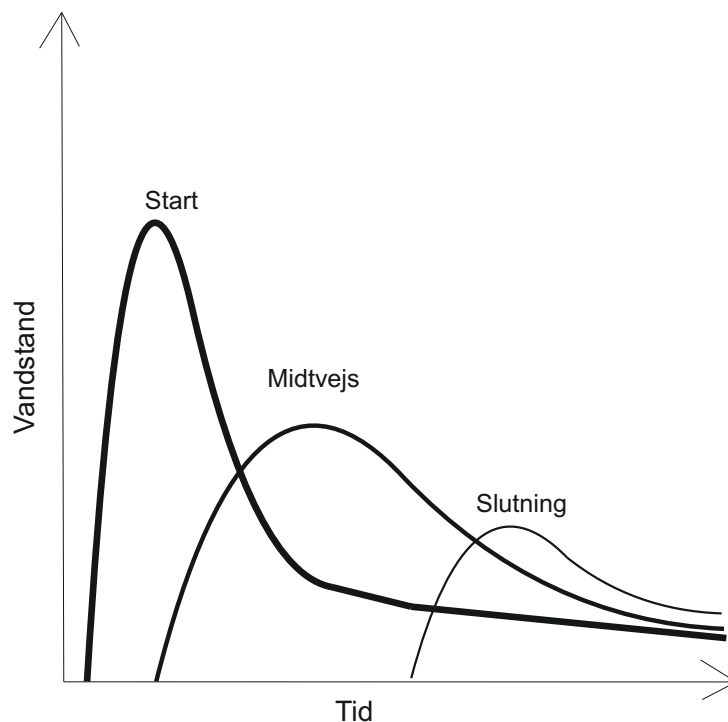
Et skyllesystem er ikke en enkeltstående afløbsteknisk installation, og afhænger derfor både af oplandet samt det tilkoblede renseanlæg. På figur 2.6 er der vist en konceptuel opbygning af

et rørbassin implementeret i et almindeligt afløbsnet. Figuren viser tidsforløbet fra starten af en regnhændelse til at vandet er afledt og bassinet er rensat.



Figur 2.6. Konceptuel opbygning af et skyllesystem i en regnvejrssituation hvor det almindelige afløbsnet ikke kan håndtere vandmængden, og der aflastes derfor til rørbassinet.

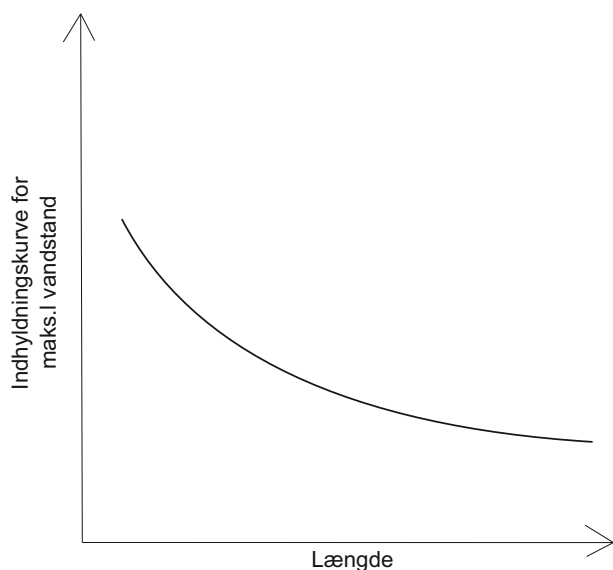
I dette projekt fokuseres på selve rensningen af rørbassinet, som sker ved hjælp af et skyllesystem. I et skyllesystem sendes der en mængde vand afsted over en kort tidsperiode, som skal fjerne det tilbageliggende sediment i rørbassinet. I systemet dannes der en bølge som over tid vil flade ud, hvilket er illustreret på figur 2.7. I starten af rørbassinet vil flowet dermed være ikke-stationært og efterhånden som bølgen aftager tilnærmeres en stationær situation.



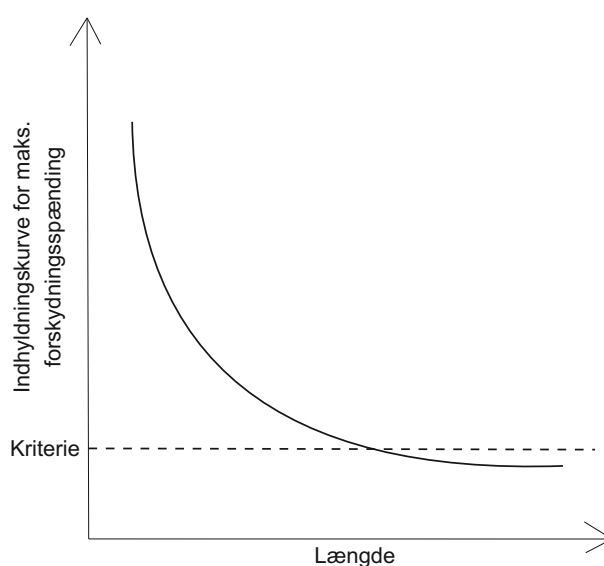
Figur 2.7. Princip model af vandstanden som funktion af tiden, i tre forskellige punkter.

Dette betyder endvidere, at en del af den teori der normalt anvendes til analyse af rørsystemer ikke direkte kan anvendes til at beskrive alle områder af systemet. Der vil derfor være en mulighed for at bestemte modeller og formularer ikke kan beskrive hele systemet, men først kan anvendes efter en vis dæmpningstid af bølgen. Dette skyldes, at de fleste afløbstekniske analyser er baseret på forudsætningen om stationær og ensformig strømning.

Selvrensningsevnen af et system vurderes ud fra størrelsen af forskydningsspændingerne. De maksimale forskydningsspændinger findes ved den største bølgehøjde, og det er derfor vigtigt at have viden om forløbet af bølgetoppene ned igennem systemet. I et almindeligt rørsystem kan forløbet af de maksimale bølgehøjder og forskydningsspændinger afbildes som på figur 2.8 og 2.9.



Figur 2.8. Princip skitse af den maksimale vandstand over længden af et rørsystem.



Figur 2.9. Princip skitse af de maksimale forskydningsspændinger over længden af et rørsystem, samt kriterie for selvrensning.

De største forskydningsspændinger findes således i den første del af rørsystemet, og falder derefter som funktion af bølgens dæmpning. Forskellige dele af afløbssystemet har forskellige kriterier til selvrensning, dette skyldes variationen, i de sedimentter der forekommer. Almindelige kloakledninger tørlægges sjældent på grund af tørvejrflowet fra forbrug, mens rørbassiner oftest vil være tørre indtil der sker en regnhændelse, hvor der kræves aflastning. I rørbassiner vil dette kriterie være højere end i almindelige ledninger, fordi de store regnhændelser kan føre større sedimentter med sig, dog begrænset af riste og andre sediment opsamlingsanordninger.

Transporten af sediment vil ligeledes være størst i starten af systemet, fordi denne er afhængig af størrelsen på forskydningsspændingen. Det kan i denne sammenhæng være svært at beskrive transporten ud fra kendte sedimenttransport formularer, da disse er udledt på baggrund af forsøg med stationære strømninger, hvor strømningforholdene adskiller sig meget fra skyllesystemets start.

3. Modelleringsværktøjer

I dette kapitel introduceres modelleringsværktøjet Mike Urban fra Dansk Hydraulisk Institut. Programmets beregningskerne og de anvendte moduler undersøges med hensyn til udregningsevne, opsætning og begrænsninger.

3.1 Introduktion til modellering af sedimenttransport

Modellering af sedimenttransport anvendes ofte indenfor det marine arbejdsområde, hvor sikring af kyst og sejlrender ofte indebærer problemer med sedimentering. I denne sammenhæng er det de morfologiske ændringer, som sedimenttransporten kan forårsage, der ofte er målet for en undersøgelse. Inden for afløbsteknik har fokus i mange projekter været opstilling af modeller til beskrivelse af de fysisk-kemiske forhold under tørvejsperioder. I afhandlinger såsom Schlütter (1999) og Celestini et al. (2007) opstilles modeller til analyse af sedimenttransport. Modellerne er baseret på data opsamlet i funktionelle fælleskloaker, der skelnes dog mellem den undersøgte transporttype som er henholdsvis suspenderet og solidt stof.

I dette projekt fokuseres på de hydrauliske problemer ved sedimenttransport. Det er derfor essentielt, at der vælges en sedimenttransport formular, der effektivt kan tage højde for de forskellige bidrag og udregne en samlet transport. Udover bestemmelse af den samlede sedimenttransport vil det være fordelagtigt at kunne tage højde for de morfologiske ændringer løbende, således at transporteret sediment får en direkte indflydelse på de hydrauliske beregninger. Ifølge DHI (2015a) og DHI (2015b) er modellering af sedimenttransport en kompleks proces grundet de utallige typer og størrelser af sediment, desuden varierer enkelte situationer i forhold til bundforhold, opløsning og sedimentering af materiale. Som følge af kompleksiteten ved beregning af sedimenttransport er der derfor igennem tiden udarbejdet mange forskellige semi-empiriske og empiriske formuleringer. De forsøger hver især, at beskrive fænomenet bedst muligt. Høj usikkerhed kendetegner formuleringerne og i de fleste tilfælde er det situationelt om de opnåede resultater passer med observationerne. Sedimenttransporten er styret af forskydningsspændingerne, og hvordan disse bestemmes er derfor altafgørende for størrelsen af transporten. I mange tilfælde analyseres forskydningsspændingen i rene ledninger, hvilket giver et konservativt estimat på de reelle forskydningsspændinger. Dette skyldes, at ruheden ændres i ledninger med bundfældet sediment, og dette kan have en stor betydning afhængigt af delfyldningsgraden.

Til udregning af sedimenttransporten anvendes programpakken Mike Urban, programmet indeholder et bredt udvalg af modelleringsværktøjer til simulering af afløbstekniske problemstillinger, og er opsætningsmæssigt forholdsvis let anvendeligt. Programmet kan håndtere ikke-stationære strømninger i rør med frie vandspejl, hvilket er nødvendigt ved analyse af bølger. DHI (2015c)

3.2 Anvendelse af MOUSE

Den hydrodynamiske beregninger i **MOUSE**, (**Modelling Of Urban SEwers**), er baseret på numerisk løsning af de 1-dimensionale ligninger for fri overfladestrømning, Saint Venant, igennem et implicit finite difference skema. DHI (2015c)

De 1-dimensionale Saint Venant ligninger kan opskrives som kontinuitetsligningen (3.1) og momentum ligningen (3.2). Udledningen af ligningerne vil ikke blive gennemgået i dette projekt, men en fuld udledning kan blandt andet findes i et oplæg af Asst. Prof. Dr. Orhan Gündüz.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA (I_0 - I_f) \quad (3.2)$$

hvor

Q	Vandføring	$m^3 s^{-1}$
A	Flow område	m^2
y	Flow dybde	m
g	Acceleration af tyngdekraften	ms^{-2}
x	Afstand i flow retning	m
t	Tid	s
α	Hastighedsfordelings koefficient	-
I_0	Bundhældning	-
I_f	Friktionshældning	-

Kontinuitetsligningen forudsætter, at en ændring i volumen af vand over en rørlængde balanceres af en stigning i det gennemstrømmende areal. Momentumligningen består af fem dele, hvoraf de to første led på venstresiden behandler lokale og konvektive accelerationer, mens det tredje led repræsenterer trykkrafterne. På højre siden findes bidrag fra tyngde- og friktions kræfter.

Hastighedsfordelingskoefficienten, α , skal anvendes for at tage højde for den aktuelle ændring i impuls grundet en ulige hastighedsfordeling over tværsnittet i forhold til impulsen fundet ved en jævn fordeling af hastigheden. Ved anvendelse af den dynamiske bølgebeskrivelse løses kontinuitets- og momentum ligningerne ud fra følgende forudsætninger nævnt i DHI (2015c):

- Vandet er inkompressibelt og homogent. Variation i densiteten kan hermed negligeres.
- Bundhældningen er lille.
- Bølgelængderne er store i forhold til vanddybden. Dette sikrer, at flowets retning er parallel med bunden, hvilket betyder at de vertikale accelerationer kan undlades og der kan dermed antages vertikal hydrostatisk trykfordeling.
- Flowet er strømmende. Strygende strømning kan beregnes, dog med mere restriktive forudsætninger.

I de fleste afløbssystemer vil alle disse forudsætninger være passende, men ved anvendelse af skyllesystemer indføres en forstyrrelse. Bølgen vil i de fleste tilfælde gøre modellen ustabil, på grund af den krævede tid og stedslige diskretisering. Det derfor vigtigt at få opstillet et holdbart beregningsgrundlag, der sikrer brugbare resultater.

Udover den dynamiske bølgebeskrivelse findes der to yderligere beskrivelser, den diffusive, og den kinematiske bølgebeskrivelse. Alle beskrivelserne anvender den samme kontinuitetsligning, men detaljeringsgraden af momentumligningen er reduceret i de forskellige beskrivelser. Den diffusive bølgebeskrivelse anvender momentumligningen beskrevet ved ligning (3.3).

$$gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA (I_0 - I_f) \quad (3.3)$$

Det ses, at de lokale og konvektive accelerationer undlades i forhold til den dynamiske beskrivelse, og det er nu kun tryk, tyngde og friktionskræfterne tilbage.

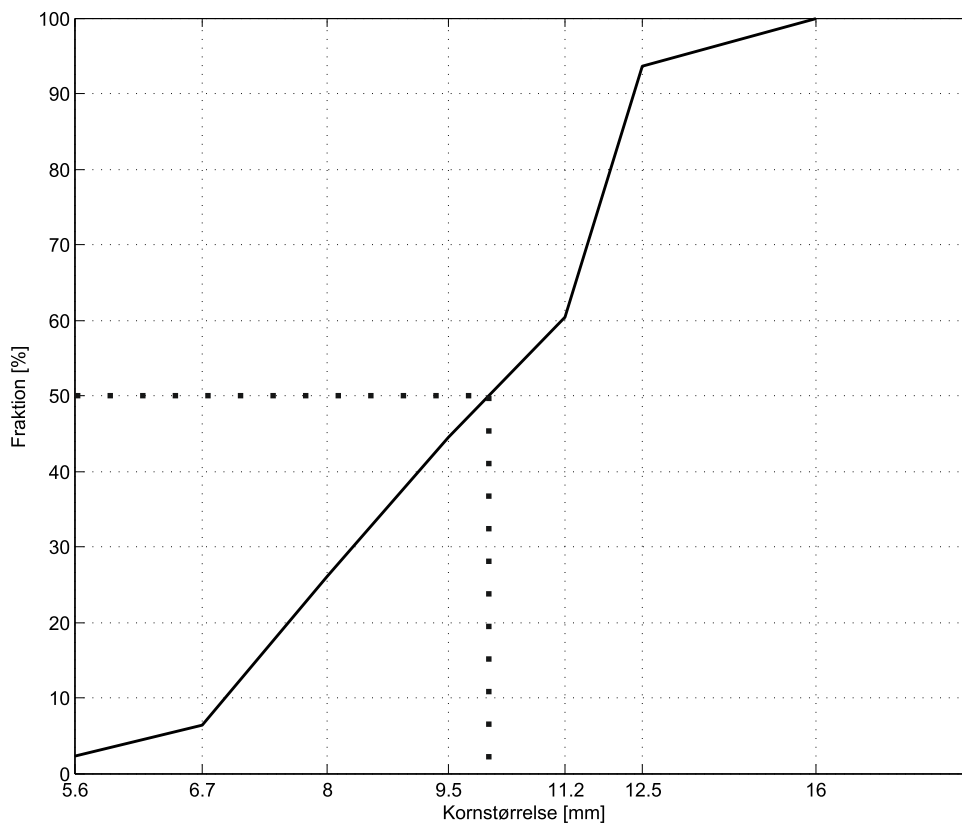
I den kinematiske bølgebeskrivelse reduceres momentumligningen yderligere til kun at beskrive balancen mellem tyngde og friktionskræfterne. Den kinematiske beskrivelse kan blandt andet anvendes til stejle og delvist fyldte ledninger, hvor flowet her vil være styret af gravitations og friktionskræfterne, mens bidrag fra acceleration og trykledene vil være mindre dominante. DHI (2015c)

3.3 Parameter forklaring

Udover sammenhængen mellem modulerne er det vigtigt at gennemgå de generelle parametre, som har en indflydelse på, hvilken form for transport der opstår. Dette er parametre som partikel størrelse, type, porøsitet og faldhastighed.

Partikel størrelse og type

Partikel størrelsen findes ved at lave sigteanalyse på en jordprøve. Produktet af analysen er en fordelingskurve for kornstørrelsen, og et eksempel herpå kan ses på figur 3.1. Sigteanalysen blev lavet på en grov sorteret prøve opsamlet fra parkeringspladsen ved Aalborg Universitet på Sohngårdsholmsvej. Der anvendes en groft sorteret prøve for at illustrere størrelsen på nogle af de største sedimenter, som kan findes på en almindelig afstrømningsoverflade såsom en parkeringsplads.



Figur 3.1. Eksempel på kornstørrelseskurve lavet for grovt materiale opsamlet på parkeringspladsen ved Aalborg Universitet på Sohngårdsholmsvej. Median kornstørrelsen d_{50} er markeret med en stiplet linje.

Sedimenttransport formularerne anvender den procentvise kornstørrelse og alt efter hvilken formular der vælges, varierer valget af denne. Oftest anvendes median kornstørrelsen d_{50} som angiver 50% fraktionen og dermed den kornstørrelse hvor halvdelen er sedimentet er mindre. Teoretisk er der tre definitioner af kornstørrelsen, hvor d_s er diameteren fundet ved sigteanalyse, d_v er diameteren af en sfære med det samme volumen som den givne partikel. Den tredje definition kaldes fald diameteren, d_f , som er diameteren af en sfære med samme faldhastighed som den givne partikel i vand ved 24 °C. Forskellen mellem de tre er ifølge DHI (2015a) normalt mindre end 10%, men det skal noteres, at det er falddiameteren d_f af partiklen, der anvendes i MOUSE ST modulet.

Udover størrelsen af en partikel er det vigtigt at bestemme hvilken type materiale partiklen består af. Forskellige materialetyper har forskellig vægt og det er derfor essentielt, at kende densiteten af de partikler der transporteres. Oftest anvendes en værdi på 2650 kgm^{-3} , som er massefylden på kvarts, hvilket normalt hvidt sand hovedsagligt er opbygget af. (AgriInfo.in, 2011)

Porøsitet

Aflejret sediment består både af solide partikler, men også hulrum hvilke kan fyldes med enten luft eller vand. Porøsiteten er givet som den ratio der er mellem et materiales porerumfang og det totale rumfang.

Faldhastighed

Faldhastigheden er defineret som den hastighed en partikel har ved bundfældning i en væske kun påvirket af tyngdekraften. Hastigheden findes således ved at løse ligevægtsligningen (3.4) mellem gravitationskraften og den modstand væsken laver på partiklen.

$$(\gamma_s - \gamma) \frac{\pi}{6} d^3 = \frac{1}{2} c_d \rho w^2 \frac{\pi}{4} d^4 \quad (3.4)$$

hvor

γ	Specifik vægt af vand	$kg(ms)^{-2}$
γ_s	Specifik vægt af sand	$kg(ms)^{-2}$
d	Kornstørrelse	m
c_d	Modstands koefficient	-
w	Bundfældningshastighed	ms^{-1}
ρ	Densitet af vand	kgm^{-3}

Isoleres bundfældningshastigheden fra ligning (3.4) fås følgende udtryk

$$w = \sqrt{\frac{4(s-1)gd}{3c_d}} \quad (3.5)$$

hvor

s	Specifik vægt af sediment partikler	γ_s/γ
g	Acceleration af tyngdekraften	ms^{-2}

I DHI (2015a) er det endvidere specificeret hvordan bundfældningshastigheden beregnes for partikler i en bestemt kornstørrelsesklasse.

3.4 Bundforskydningsspænding

Transporten er styret af bundforskydningsspændingen, og kommer derfor til at afhænge af, hvordan denne bestemmes. Ved analyse af almindelige rørstrømninger anvendes ofte ligning (3.6), men gyldighedsrummet er begrænset af forudsætningen om stationær og ensformig strømning. Det antages almindeligvis, at bundhældningen svarer til hældningen på vandspejlet, hvilket er en udmærket antagelse så længe bundhældningen er lille og strømmingen er stationær.

$$\tau_0 = \rho g R I_0 \quad (3.6)$$

hvor

τ_0	Bundforskydningsspænding	Nm^{-2}
ρ	Densitet af vand	kgm^{-3}
g	Tyngdeacceleration	ms^{-2}
R	Hydraulisk radius	m
I_0	Bundhældning	m/m

En bølge er ikke-stationær og strømningerne er ikke ensformige, hvilket betyder at fejlen ved anvendelse af ligning (3.6) bliver betydelig, især i starten af bølgedannelse hvor vandspejlshældningen er høj.

Ved anvendelse af den dynamiske bølgebeskrivelse behandles alle de kræfter der optræder, men ud fra ligning (3.6), ses det at anvendelsesområdet passer bedre sammen med den diffusive bølgebeskrivelse. Dette skyldes, at den diffusive bølge approksimation beskriver momentumligning uden de lokale og konvektive accelerationer.

I teorien er forskydningsspændingen også afhængig af væskens viskositet, middelhastigheden og ruhedselementerne. Det vil derfor være mere korrekt, at beskrive forskydningsspændingen som funktion af friktionstallet, som vist i ligning (3.7). Denne formel fremkommer ved at anvende modstandsformlen til beregning af energilinjegradienten, istedet for at sætte denne lig bundhældningen. Brorsen and Larsen (2009)

$$\tau_0 = f \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.7)$$

Friktionstallet, f , kan beskrives ud fra forskellige formler. I Mike Urbans standard opsætning beskrives friktionstallet ud fra ligning (3.8), som findes ved anvendelse af den eksplicitte Manning formel. (DHI, 2015c)

$$f = \frac{1}{M^2 A^2 R^{4/3}} \quad (3.8)$$

Friktionstallet afhænger således af materialeruheden beskrevet igennem Manning-tallet, M , arealet, A og den hydrauliske radius R . Ruheden beskrevet igennem Manning-tallet kan dog have en betydelig fejl, givet at der er en 3% fejl på anvendelsen af Manning-formlen. Potensen på ruheden giver derfor en afvigelse på op til 20%. (PH-Consult, 2009)

En bedre formulering til bestemmelse af friktionstallet er fundet ud fra Colebrook-Whites formel, ligning (3.10). Formlen afhænger af Reynolds'tal, ruheden og den hydrauliske radius. Forskydningsspændingen kan dermed beskrives, som funktion af både middelhastigheden og ruheden fra væggenes materiale. Reynolds' tal er beskrevet ved ligning (3.9), og efter denne er fundet kan friktionstallet findes ved iteration, hvis ruheden er kendt.

$$Re = \frac{VR}{v} \quad (3.9)$$

$$f = \frac{2}{\left(6,4 - 2,45 \ln \left(\frac{k}{R} + \frac{4,7}{Re\sqrt{f}}\right)\right)^2} \quad (3.10)$$

I Mike Urban kan Colebrook-Whites formel kun anvendes i sammenhæng med cirkulære rør, og det vil derfor være nødvendigt at foretage beregningen af friktionstallet manuelt. Friktionstallet ligger normalt i intervallet 0,002 – 0,01 og indstiller sig forholdsvist hurtigt (Brorsen and Larsen, 2009)

Definition af transport

Efter bundforskydningsspændingen er fundet skal det vurderes om denne giver anledning til transport af bestemte partikler, og dette gøres ud fra Shields parameter, θ . Shields parameter er beskrevet ved ligning (3.11).

$$\tau_* = \theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gD_s} \quad (3.11)$$

hvor

ρ_s	Densitet af sediment	kgm^{-3}
D_s	Diameter på sediment	m

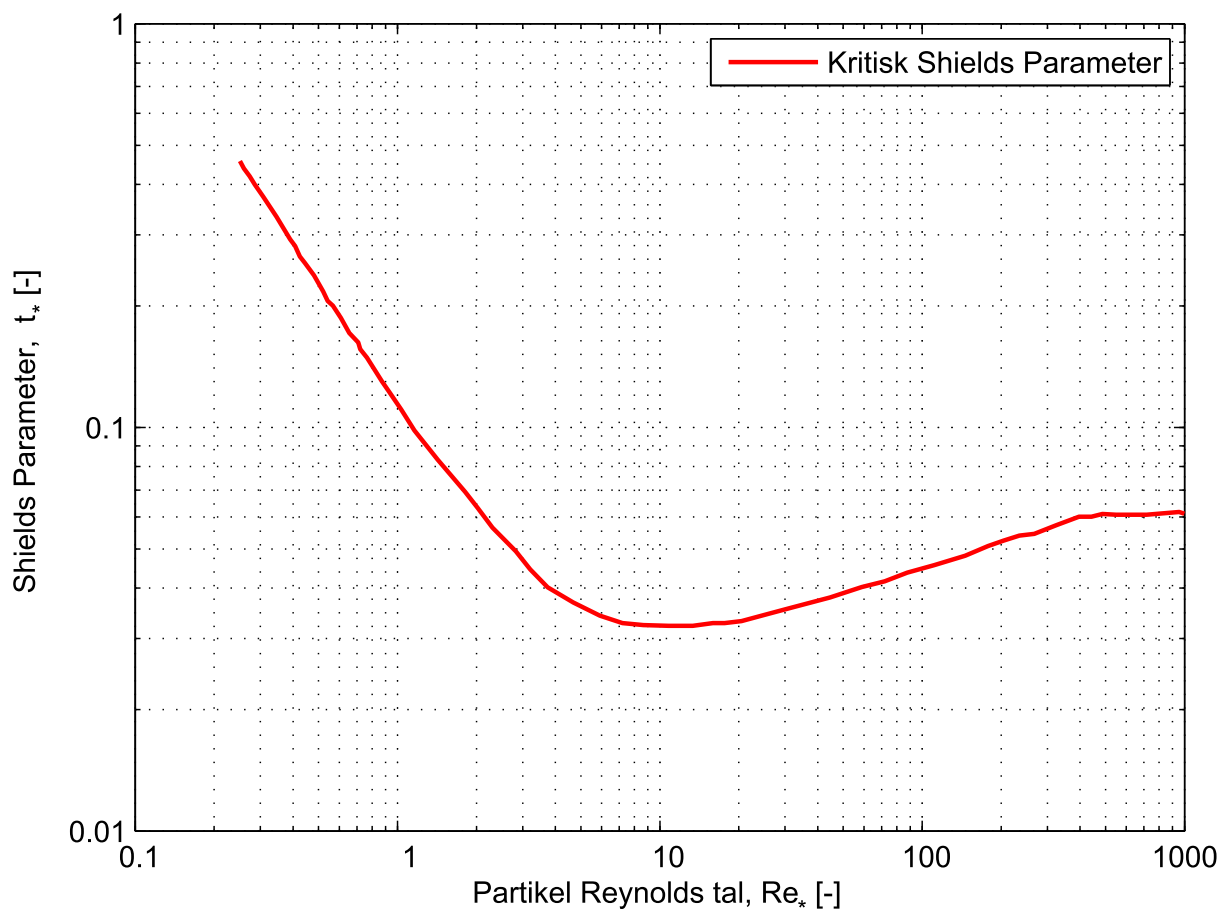
Shields parameter angiver forholdet mellem gravitations- og væske kræfterne som en partikel udsættes for, hvis kraften fra væsken er større end gravitationskræfterne flyttes partiklen Southard (2006). Umiddelbart kan transporten foregå som enten bundtransport eller suspenderet transport, alt efter størrelsen på forholdet mellem de virkende kræfter. Suspenderet transport opstår kun hvis væskekræfterne er signifikant større end gravitationskræfterne. Dette er en situation, som ofte kan opstå i starten af et skyllesystem, da væskekræfterne i starten af skylledistancen er store. Det skal desuden nævnes, at en af forudsætningerne for anvendelse af Shields parameter er en ru bund, og teorien gælder derfor ikke for enkeltpartikler.

Den kritiske Shields parameter findes for en bestemt partikel størrelse ved at finde friktionshastigheden, U_f ud fra ligning (3.12), og efterfølgende beregne partikel Reynolds tallet, Re_* ud fra ligning (3.13).

$$U_f = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3.12)$$

$$Re_* = \frac{U_f D_s}{\nu} \quad (3.13)$$

Samtlige notationer er gældende for alle ligninger, dog skal det nævnes at ν er den kinematiske viskositet af vand ved en bestemt temperatur. På figur 3.2 er forløbet af den kritiske Shields parameter vist som funktion af partikel Reynolds tallet.



Figur 3.2. Shields diagram.

Kriteriet for, om der opstår bundtransport er givet som $\tau_* > \theta_c$, hvor den kritiske værdi af θ_c findes ud fra det udregnede partikel Reynolds tal. Hvis værdien af den dimensionsløse forskydningsspænding τ_* overgår den kritiske værdi af θ begynder bundtransporten og den suspenderende transport starter først senere, hvis spændingerne stiger yderligere. (Bentzen, 2006)

Ved at fastsætte en kritisk værdi for Shield's parameter er det muligt at beregne den forskydningsspænding der netop giver anledning til transport, for en bestemt sedimentdiameter.

Antages der en kritisk theta værdi på 0,06 samt en sedimentdiameter på 10 mm fra sigteanalysen findes forskydningspændingen til 9,7 Pa. Denne forskydningspænding vil dermed give anledning til bundtransport, hvis forudsætningen om stationær strømning og ru bund, er overholdt.

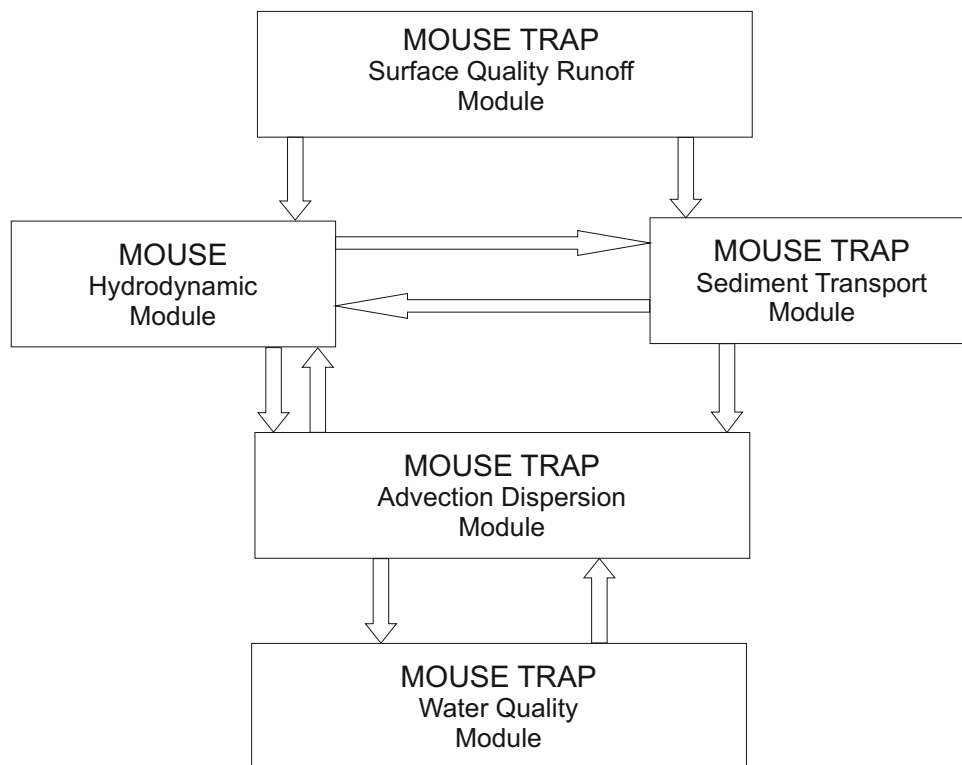
Flowmodstanden i ledninger med sediment er kompleks i forhold til rene rør, fordi ruheden ikke er ens over tværsnittet. Dermed er anvendelsen af den først introducerede forskydningspændingsformel yderligere reduceret. Bidrag til den totale ruhed for rør med bundfældet sediment kan opdeles i følgende punkter ifølge DHI (2015a):

- Rørmateriale
- Sediment korn
- Forskellige bundformer
- Biologisk vækst, fejkoblinger, aldring

Modstanden fra henholdsvis rørmaterialet og sedimentkornene kan findes ved at anvende hydraulisk teori. Modstanden fra forskellige bundformer beskrives ved anvendelse af sedimenttransport formularer. Bundformene kan opdeles i ripper, sandbanker og plane bunde. Modstanden fra biologisk vækst, fejkobling og aldring er svær at medtage, da effekten heraf kan variere lokalt. Ledningens funktion, alder og beliggenhed vil derfor have en væsentlig betydning, hvilket gør beregningen af modstanden situationel og kompleks.

3.5 Valg af sedimenttransport model

I dette projekt anvendes MOUSE TRAP modellen til at modellere sedimenttransport. **MOUSE TRAP** (**M**odelling **O**f **U**rban **S**ewers **T**Ransport of **P**ollutants) modellen indeholder en række moduler, der kan anvendes til beregning af forurenings afstrømning, vandkvalitet og transport processer i afløbssystemer. Modulerne kan både anvendes individuelt eller forbundet hvilket gør det muligt at justere detaljeringsgraden i forhold til det enkelte projekts behov. På figur 3.3 er sammenhængen mellem de forskellige moduler vist, og det ses at de hydrodynamiske beregninger stammer fra MOUSE modulet. DHI (2015b)



Figur 3.3. MOUSE TRAP moduler og deres indbyrdes sammenhænge. DHI (2015b)

I det følgende laves en kort gennemgang af det anvendte modul, sedimenttransport (ST). En mere dybdegående forklaring af de enkelte moduler og deres begrænsninger kan findes i Mark (1995). Der arbejdes i projektet ikke med forurenende komponenter, og det vil derfor ikke være nødvendigt at anvende advektion-dispersions modulet. Modulet anvendes til udregning af transport forårsaget af koncentration og temperatur gradienter.

Modstands beskrivelse (ST)

Det er besværligt at beskrive flowet i rør med bundfældet sediment, fordi forskydningsspændingen fra bunden og vægge er forskellig. Den totale modstand på flowet beskrives i beregningsmodulet ved hjælp af Einsteins Side Wall Elimination Procedure (Einstein, 1941). Metoden antager, at den totale modstand kan beskrives som summen af modstanden fra de enkelte dele af flowet og er baseret på Manning-formlen og Darcy-Weisbach's formel (DHI, 2015a). I Perusquía et al. (1995) er forskydningsspændingerne fundet ud fra beregninger med en turbulens

model, sammenlignet med resultater baseret på modstanden fundet ud fra førnævnte metode. Det konkluderes i artiklen, at metoden giver et solidt estimat på middelforskydningspændingen, samt at en mere detaljeret viden omkring flow- og forskydningspændingsforholdene ville kræve mere dybdegående analyser.

Metodens basale forudsætninger kan opstilles i følgende punkter:

- Tværsnitsarealet kan opdeles i forskellige delflowområder, som alle er forbundet til den våde perimenter.
- Gennemsnitshastigheden og hældningen er ens for alle delområder.

Den totale modstand findes således ud fra ligning (3.14). (DHI, 2015a).

$$n = \sqrt{\frac{P_r n_r^2 + P_s n_s^2}{P}} \quad (3.14)$$

hvor

n	Total modstand
P	Total våd perimenter
n_s	Mannings n for sedimentlag
n_r	Mannings n for rørmateriale
P_s	Bredden af sedimentlaget
P_r	Våd perimenter af rør

Det gennemsnitlige Manning-tal varierer som funktion af vanddybden og vil tilnærme sig Manning-tallet bestemt ud fra væggenes ruhed ved høje vanddybder og omvendt tilnærme sig sedimentlagets Manning-tal ved lave vanddybder.

Sediment Transport (ST)

I MOUSE TRAP er der implementeret fire forskellige sedimenttransport formularer, som kan anvendes til at beskrive den sedimenttransport der opstår i et givet system. Der er ingen rekommandation på hvilken af de fire formuleringer, der bedst kan anvendes i forskellige scenarier. Anvendelsen afhænger derfor normalt af hvilke parametre, der er til rådighed ved det enkelte projekt. I tabel 3.1 ses de fire forskellige modeller og deres tilhørende resultat muligheder.

Sedimenttransport formular	Resultat	
Ackers-White	Total transport	Ackers and White (1973)
Engelund-Hansen	Total transport	Engelund and Hansen (1967)
Engelund-Fredsøe	Separat transport	Engelund and Fredsøe (1976)
Van Rijn	Separat transport	van Rijn (1984a) and van Rijn (1984b)

Tabel 3.1. De fire forskellige sedimenttransport formularer tilgængelige i MOUSE TRAP. Total transport indikerer, at bund og suspenderet transport summeres, hvorimod den separate beregning holder dem afskilt.

Det er yderligere i Mark et al. (1995) diskuteret hvorledes modellering af sedimenttransport afhænger af omstændighederne. Det konkrete hydrauliske system skal analyseres, og det skal undersøges, om der er tale om lave eller høje flow hastigheder, svarende til en tørvejrs eller regnvejrs situation. Derover skal faldhastigheden bestemmes ud fra viden om sedimentet, og først derefter kan en sedimenttransport formular vælges. I situationer med høj faldhastighed, tunge partikler, og høje flowhastigheder skal sedimenttransport formularen kunne medtage både bundtransport og suspenderet transport. I et rørbassin der anvendes til aflastning af overløbsvand optræder en række forskellige sedimentpartikler, og der vil derfor både være langsomt og hurtigt bundfældende sediment. I projektet fokuseres kun på partikler med en høj faldhastighed, da det må forventes, at ruheden af disse er styrende for forskydningsspændingen. I projektet anvendes derfor kun de to modeller, der kan udregne total transport, Engelund-Hansen og Ackers-White.

Efter valg af passende sedimenttransport formular skal der vælges mellem ST-modulets følgende to beregningsmetoder:

- eksplicit model
- morfologisk model

I den eksplicitte sedimenttransport model fastholdes bundniveauet i modellen under hele simuleringen, hvilket betyder at sedimenttransportens løbende virkning på den hydrauliske kapacitet kun evalueres igennem Manning-tallet. Dermed udregnes sedimenttransporten som en eksplicit funktion på baggrund af de tilhørende hydrodynamiske flow parametre, og der bliver således udregnet en potentiel transport, mens der ikke flyttes på sedimentet i modellen. Metoden anvendes normalt til at estimere den hydrauliske kapacitet i systemer med bundfældet sediment, eller til beregning af transporten i situationer, hvor en ændring i bundforholdene ikke er af betydning under simuleringen.

Den morfologiske model medtager ændringer i den hydrauliske kapacitet ved at løse kontinuitetsligningen for sedimenttransport med tilhørende hydrodynamiske parametre. Gennemstrømningsareal og flow modstand opdateres dynamisk igennem beregningen således at sedimenttransporten løbende får en virkning. Desuden er der både mulighed for at anvende ensformigt sediment og uensformigt sediment i simuleringen. Ved anvendelse af ensformigt sediment anvendes én kornstørrelse ved de forskellige beregningspunkter i afløbssystemet, hvorimod der ved uensformig opsætning kan regnes på en række forskellige kornstørrelser.

4. Problemstillinger

I de første kapitler er det blevet omtalt hvorledes skyllesystemer er taget i brug på det danske afløbstekniske marked. Problemet med systemerne er flowet, som afskille sig specielt fra de normalt stationære og ensformige forhold, hvilket gør det svært at analysere eksempelvis forskydningsspændingen. En bølge afbildes bedst i flere dimensioner, men dette er normalt beregningstungt og det vil desuden være besværligt at implementere i store afløbssystemer. Det vil derfor være fordelagtigt, at undersøge en 1-dimensional models evne til at beregne de forskydningsspændinger, der opstår i skyllesystemer. Denne problematik kan imødekommes ved analysere et praktisk forsøg, med henblik på at validere evnen af førnævnte program til at bestemme forskydningsspændingen. Forskydningsspændingen kan sammenlignes med de observationer, der laves i det praktiske forsøg, og det kan derefter konkluderes om disse resultater er i overensstemmelse med hinanden.

Første del af rapporten vil således omhandle opbygningen af det praktiske forsøg, der skal ligge til grund for analysen. Forsøget opstilles som et af de tidligere introducerede skyllesystemer, hvor bølgen generes ved en opstuvet vandmængde. Efter beskrivelse af forsøgsopstilling og de dertil hørende resultater vil fokus ligge på at sammenligne resultater fra forsøget med et modelleret scenario i programmet Mike Urban fra Dansk Hydraulisk Institut.

Hovedformålet med projektet kan opdeles i nogle få problemstillinger, der beskriver den nuværende situation indenfor anvendelse af skyllesystemerne:

- Kan forskydningsspændingerne i et skyllesystem beskrives tilfredsstillende ud fra teori udledt for stationære forhold
- Hvilken betydning har valget af sedimenttransport formularer for transporten
- Er det en holdbar løsning at anvende 1D-modellering til udregning af forskydningsspændingerne i skyllesystemer

Projektet vil således håndtere centrale problemstillinger, hvoraf de første behandles igennem et eksperimentalt forsøg samt analyse igennem valgt program. Den sidste problemstilling arbejder fremadrettet mod at bestemme den bedst mulige metode til at dimensionere de nye skyllesystemer. Dette kunne eventuelt være en kombination af flere forskellige virkemidler.

5. Opstilling af skyllesystem forsøg

I dette kapitel gennemgås den fysiske opsætning af forsøget. Målet med forsøget er at genskabe en virkelighedstro situation hvor et skyllesystem anvendes til renholdelse af et rørbassin.

5.1 Fysisk opsætning af forsøg

Kommercielle programmer anvendes tit til dimensionering af store anlægs projekter, og det er derfor vigtigt at sørge for at disse kan modellere virkeligheden tilnærmelsesvist korrekt. Dette kan gøres på mange forskellige måder, men den mest pålidelige metode er at udføre forsøg til sammenligning med den program modellerede situation. Især bølger kan være problematiske at modellere i de kommercielle programmer til afløbssystemer, da det er svært at opsætte eksakte randbetingelser for en bestemt bølges udformning og dæmpning. Derfor udføres der i dette projekt et forsøg med formålet at undersøge overensstemmelsen mellem virkelighed og program. I dette forsøg anvendes strømningranden som er vist på figur 5.1 og 5.2



Figur 5.1. Strømningranden, set fra indløb.



Figur 5.2. Øverst, strømningranden længde set fra udløbet. Nederst, strømningranden set fra siden.

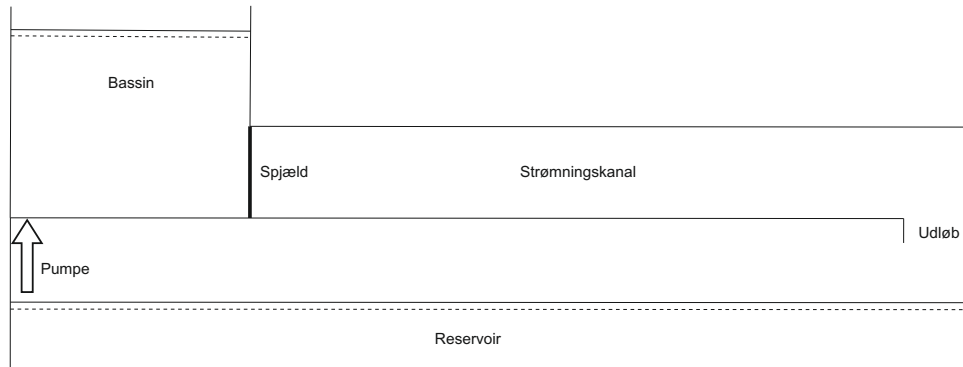
Strømningsrandens mål findes ved opmåling til $20\text{ m} \times 1,5\text{ m} \times 0,50\text{ m}$ i forholdet LxBxH. Bredden er efterfølgende blevet vurderet til at være for stor i forhold til den maksimale opstuvningskapacitet, og det vælges, at indsnævre kanalen i bredden. Strømningsrandens bredde bliver efter indsnævringen $0,75\text{ m}$ og med disse mål vil der være mulighed for at lave en større bølge, indsnævringen er illustreret på figur 5.3. Desuden vil indsnævringen muliggøre anvendelse af det tørre areal til bedre at kunne opsætte målingsudstyr, og opsamle sediment.



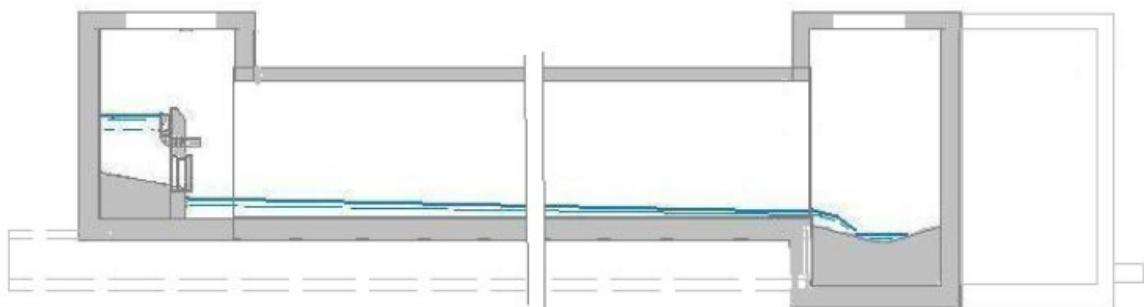
Figur 5.3. Strømningsranden med indsnævret bredde.

Der anvendes et recirkuleringssystem i strømningsranden og det er derfor vigtigt, at alt sediment samles op, og ikke skylles ud i det underliggende reservoir som er vist på figur 5.4. Hvis sedimentet ikke opsamles ved udløbet, vil der være en mulighed for at dette senere suges ind i pumpen og forårsager skade. Det skal derfor sikres, at sedimentet udligges i et omfang, hvormed dette ikke skylles ud. Ud fra figur 5.4 er det desuden muligt at opstille en opsamlingsanordning ved udløbet.

Bølgen i strømningranden genereres ved at stuve vand op i et bassin. Bassinet har dimensionerne $1,42\text{ m} \times 1,5\text{ m} \times 1\text{ m}$ og rummer derfor maksimalt $2,13\text{ m}^3$ vand. Bølgen dannes derefter ved at åbne et spjæld indtil randen, hvormed vandet bliver presset ud gennem åbningen. Denne metode anvendes på samme måde i de fleste tilgængelige skyllesystemer, et eksempel herpå kunne være et skyllesystem til rørbassiner fra HydroSystems ApS som vist på figur 5.5.



Figur 5.4. Skitse af skyllesystems forsøg.



Figur 5.5. Skitse af skyllesystem fra HydroSyStems ApS til rørbassiner. (HydroSystems ApS, 2012)

Til venstre på figur 5.5 ses bassinet, som fyldes op under regnhændelsen. Efter tømning af rørbassinet anvendes dette vandvolumen til at skylle røret rent. Vandet lukkes ud af kammeret ved at åbne et spjæld, der er styret af vandstanden i skyllesumpen til højre på figuren. Det anvendte skyllevolumen er udregnet til at kunne rense rørbassinet efter fuld opfyldning, men da opstuvningsbassinet fyldes op først, anvendes der altid en maksimal skylleeffekt, uafhængigt af fyldningsgraden i bassinet (HydroSystems ApS, 2012). Da forsøget ikke skal køre automatisk over flere skyl, er det ikke nødvendigt at implementere styring til åbning af spjældet, hvorfor spjældet er udformet som vist på figur 5.6 og 5.7.



Figur 5.6. Spjæld set fra randen.

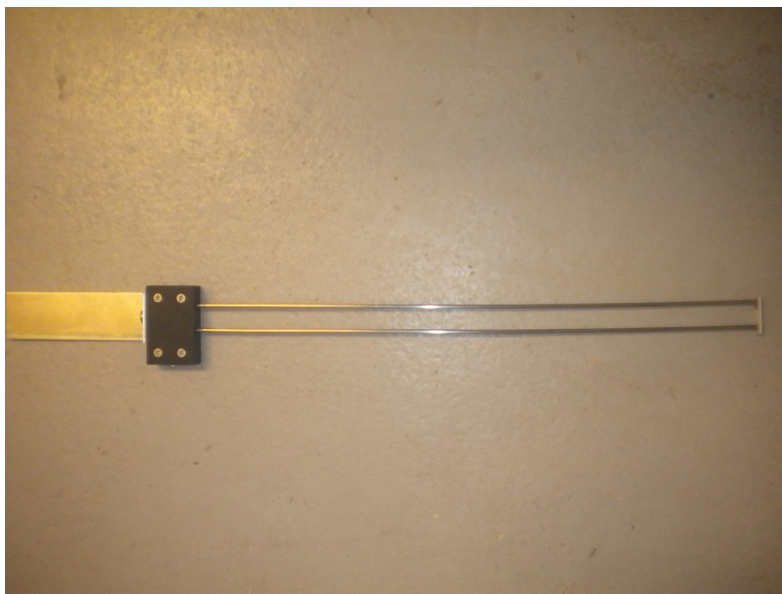


Figur 5.7. Spjæld set fra opstuvningskammer.

Spjældet åbnes ved at trække i et håndtag, og lukkes på samme måde ved at slippe håndtaget. Opsætningen er simpel, men giver god mulighed for at styre hvornår der skal åbnes og lukkes for vandtilførslen. Desuden kan der åbnes relativt hurtigt, hvilket giver en bedre bølgeeffekt, fordi vandet kan strømme ud af hele åbningsarealet fra start.

5.2 Anvendelse og kalibrering af bølgemålere

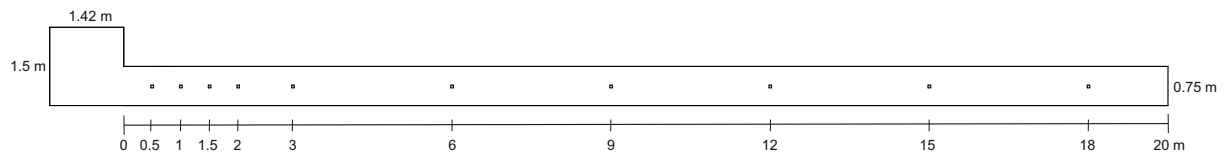
Under eksperimentet er det vigtigt at få målt vandstanden ned gennem systemet, når bølgen dannes. Til dette formål opsættes ti bølgemålere, som er lavet på Aalborg Universitet og udformet som vist på figur 5.8.



Figur 5.8. Eksempel på bølgemåler anvendt til eksperimentet.

Bølgemålerene er udstyret med to lange ben, som er holdt sammen i toppen af en opsamlingsboks og en plasticsamling i bunden til stabilitet.

På figur 5.9 placeringen af målerne. Ved opsætningen er der lagt vægt på, at de største fysiske ændringer sker i starten af forsøget og dermed er målingstætheden højere i starten end længere nede i forsøgsranden, hvor bølgen er fladet ud. Målerne er navngivet med tal fra første placering til sidste, dermed kaldes måleren ved 0,5 m, Måler 1.



Figur 5.9. Grundplan for opstilling af bølgemålere.

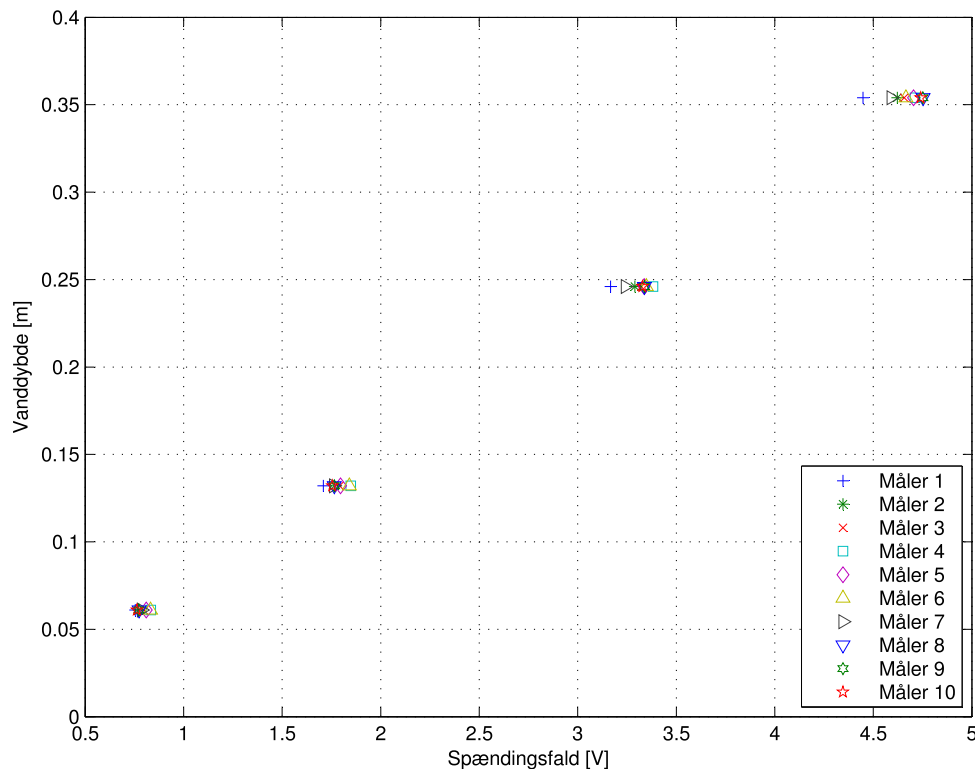
For at kunne anvende bølgemålerne til eksperimentet er det vigtigt at kalibrere dem, således at det spændingsfald de enkelte målere opfanger omdannes til en korrekt vandstand. Til kalibreringen er det derfor vigtigt at den fysiske måling af vandstanden er korrekt og ikke har de store udsving. Dette har i midlertidigt vist sig at være en svær situation at opnå på grund af små udsving i pumpens ydelse. Udsvingene har ifølge Bilag B vist sig at medføre målingsfejl, hvilket vil gøre kalibreringen af målerne meget usikker.

Eftersom en stationær situation ikke kan opnås ved almindeligt flow fra pumpen, vælges det at forsegle forsøgsranden ved udløbet, for hermed at kunne tilbageholde vandet. Forseglingen er vist på figur 5.10 og består af en plade som dækker hele strømningsarealet.



Figur 5.10. Forseglingen af strømningsranden nær udløbet.

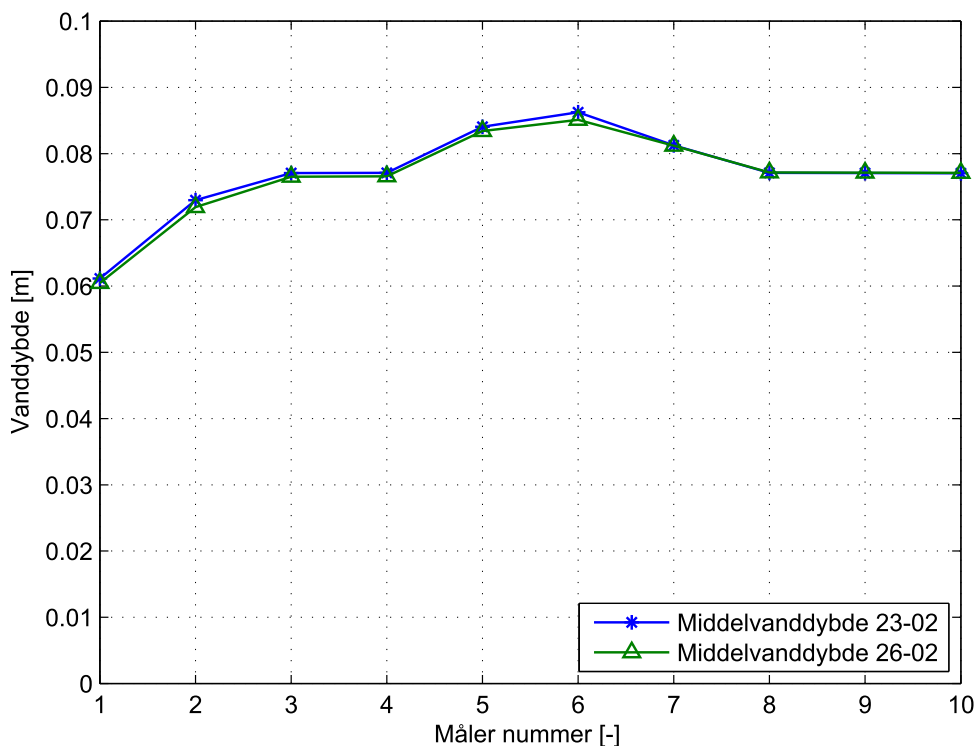
Kalibreringsopsætningen afspejler hermed opstuvet vand i et bassin, med konstant vandoverflade i sted og tid, da bundhældningen er nul. Til opsamling af data fra bølgemålerne anvendes programmet WaveLab 3, hvilket er let anvendeligt til opsamling af data på flere kanaler. Kalibreringen laves derefter ved at finde middelspændingsfaldet over tre minutter med en målefrekvens på 20 Hz og plote disse mod målte vandstande ved hver enkelt bølgemåler. Dette gøres for fire forskellige vandstande, og de resulterende kalibreringspunkter ses på figur 5.11.



Figur 5.11. Middelspændingssignal over tre minutter plottet mod den målte vandstand.

Punkterne viser at det kun er spændingsfaldet, der varierer indenfor de enkelte vandstande, dette er en konsekvens af den aflukkede og tætte strømningsrand, der gør det muligt at fastholde en konstant vandstand ved alle målerne.

Bølgemålerne skal anvendes over en længere periode, og det er derfor vigtigt at undersøge om det målte spændingsfald ændres fra tid til anden. Til undersøgelse af dette er der målt på den samme vandføring på to forskellige dage. Resultatet ses på figur 5.12, og målingen viser at forskellen på de målte vandstande er minimal.



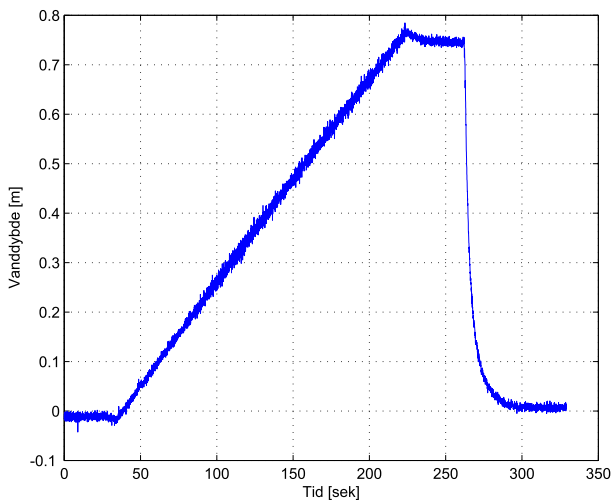
Figur 5.12. Middelvandstand målt på to forskellige dage uden at ændre på pumpens ydelse. Vandføringen må derfor antages at være ens ved de to målinger.

Denne undersøgelse sikrer dermed, at vandstandsmålingerne fundet ud fra spændingsfaldet målt af bølgemålerne ikke er afvigende fra dag til dag. Dette er en afgørende faktor, når der senere skal foretages målinger, da en ny kalibreringsproces er særdeles tidskrævende.

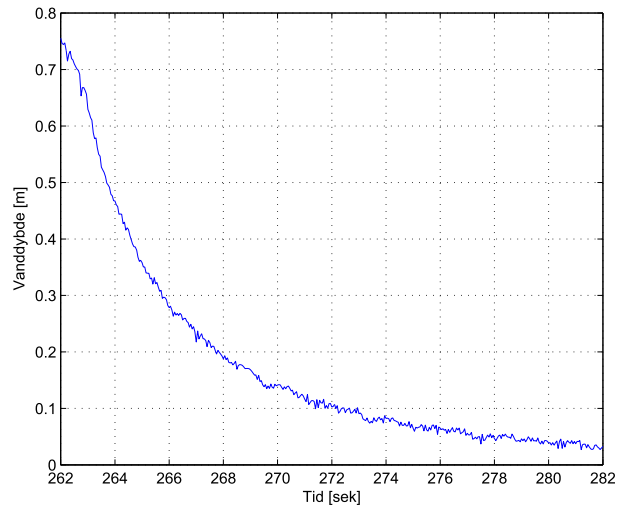
5.3 Måling af vandføring

Vandføringen ved de enkelte forsøg findes ved hjælp af en tryk transducer, der opsættes inde i opstuvnings kassen. Tryktransduceren skal på samme måde som bølgemålerne kalibreres, og da metoden er den samme gennemgås denne ikke yderligere, men en beskrivelse kan findes i Bilag C.

Tryk transduceren og bølgemålerne opsamler begge data med en frekvens på 20 Hz, opsamlingsraten er en anbefalet værdi fra programmet, men det vurderes at denne er brugbar til dette forsøg. På figur 5.13 og 5.14 ses en måleserie fra tryk transduceren for et af forsøgene foretaget d. 19. marts.



Figur 5.13. Vanddybde som funktion af tiden målt af tryk transducer inde i opstuvningskassen ved bølgeforsøg d. 19. marts.



Figur 5.14. Vanddybden som funktion af tiden efter at spjældet åbnes ved et forsøg med 75 cm opstuvet vand, svarende til et skyllevolumen på $1,6 \text{ m}^3$

På figur 5.13 er et fuldt måleforløb vist, og det ses hvordan vandet først opstuves, for efterfølgende at løbe ud når spjældet åbnes. På figur 5.14 ses forløbet fra åbningen af skottet til at vandet næsten er løbet ud af strømningsranden, hvilket ifølge figuren tager ca. 20 sekunder. Efter 20 sekunder er der kun få centimeter vand tilbage i opstuvningskassen, men på grund af strømningsrandens hældning på 0% er det tidsmæssigt ugunstigt at vente på en fuld tømning mellem hvert forsøg. Det accepteres således, at de fleste forsøg foretages på en våd bund, mens effekten heraf først analyseres senere.

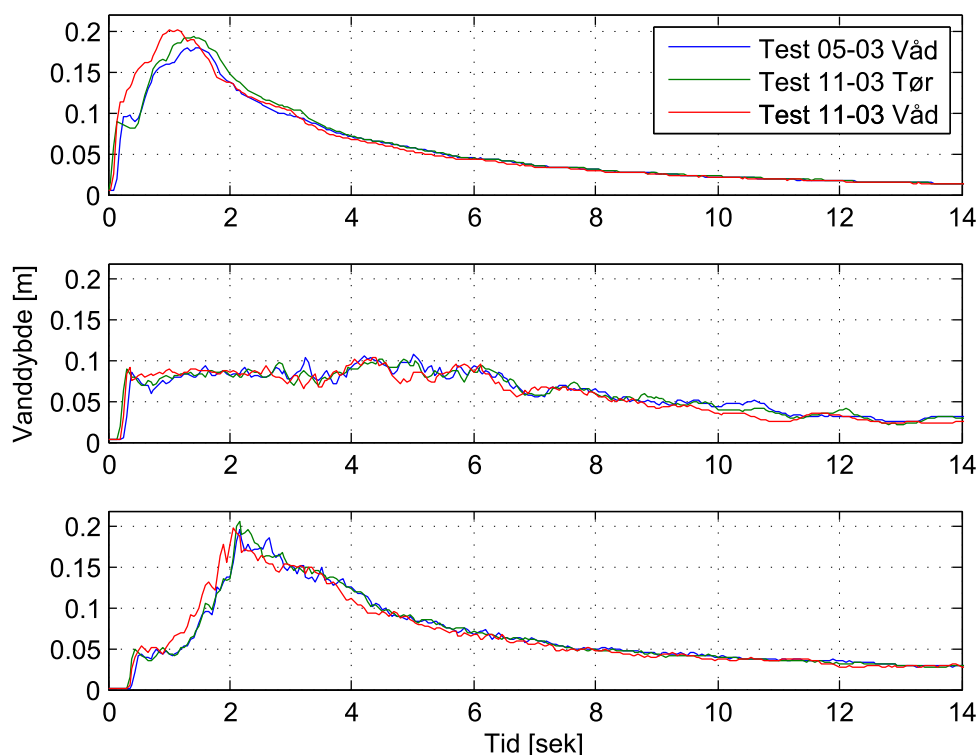
Vandføringen beregnes ved at anvende kontinuitetsligningen og beregne vandføringen ud fra den ændring der sker i vanddybden inde i bassinet over en bestemt tid, dette beskrives ikke yderligere i kapitlet, men et eksempel kan findes i Bilag D.

6. Resultater fra skyllesystem forsøg

I dette kapitel gennemgås resultaterne fra skyllesystems forsøget. Først præsenteres de indledende forsøg, herunder undersøgelse af sammenhængen mellem individuelle bølger samt bølger lavet med forskellige skyllevolumener. Dernæst analyseres transporten af sediment igennem to adskilte forsøg.

6.1 Strømningsforsøg

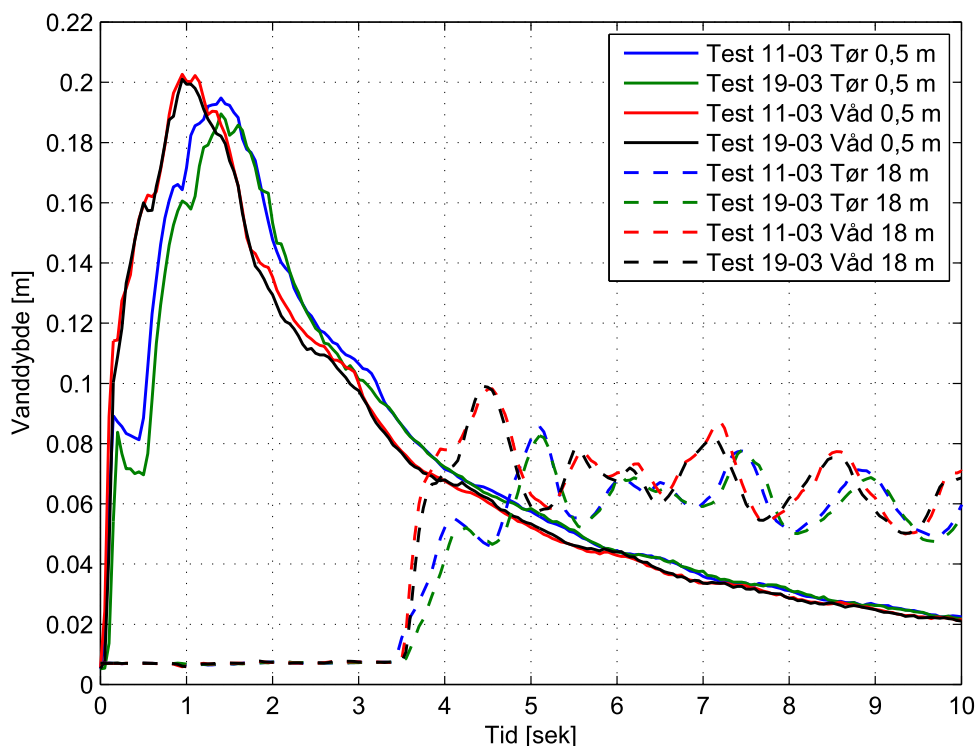
Indledningsvist er der foretaget forsøg med konstant skyllevolumen på $1,60 \text{ m}^3$, for at undersøge om der skulle være en forskel mellem de enkelte bølger grundet start betingelserne i strømningsranden. På figur 6.1 kan det ses, at der er en forskel på de enkelte bølger, som følge af strømningsrandens starttilstand.



Figur 6.1. Sammenligning af tre forskellige bølger lavet med ens skyllevolumen. Øverst: måler 1, midten: måler 2, nederst: måler 3, hvilket er henholdsvis 0,5, 1 og 1,5 m fra indløb.

Ud fra de tre bølger på figur 6.1 må det konkluderes, at der ved den første måler er sket en mindre forskel i vanddybden, hvorimod der ikke er nogen synlig forskel ved de næste to målere. Forskellen i vanddybden mellem testen på våd bund taget d. 5. marts og d. 11. marts kan forklares ved en udbøjning i strømningsretningen på den første bølgemåler. Problemet blev løst ved at skrue en skrue i bag den stabiliserende plasticlods ved hver enkelt måler. Dermed fastholdes alle

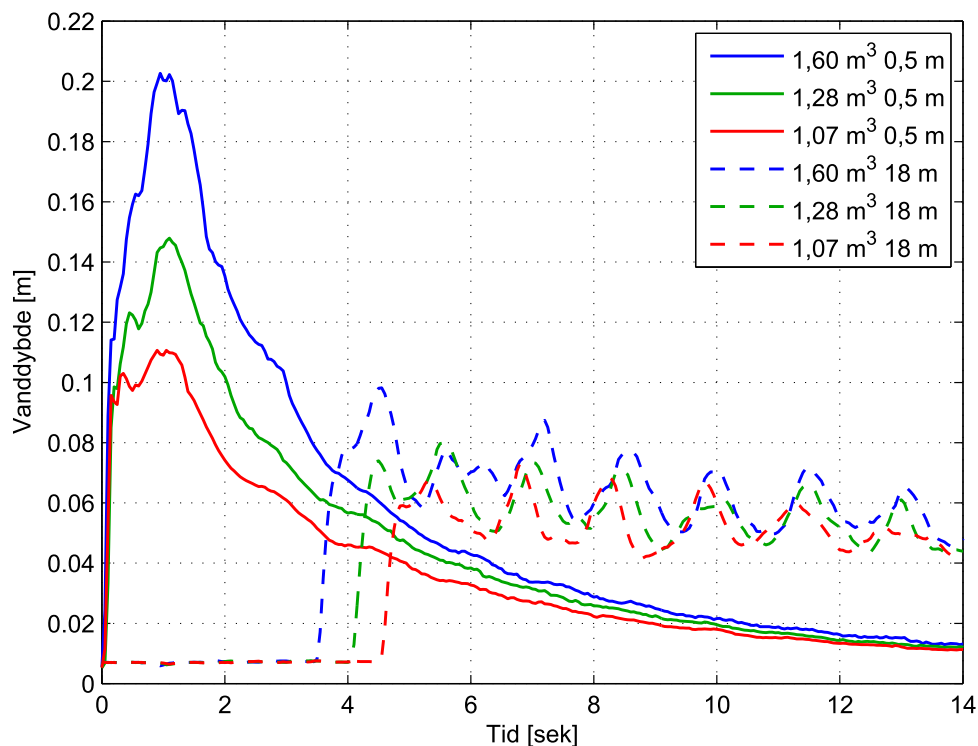
målerne i en lodret position under forsøget. På figur 6.2 er data fra bølgemålerne ved 0,5 m og 18 m vist. Det er tydeligt, at der er en forskel på bølgenes udformning, mens selve tidspunktet hvorpå bølgerne ankommer til Måler 10, ved 18 m, er ens.



Figur 6.2. Sammenligning af vanddybde for skyllesystems forsøg på henholdsvis tør og våd bund i strømningsranden. Resultater fra bølgemåleren ved 0,5 m og 18 m respektivt i forhold til tiden.

Ud fra figur 6.2 kan det yderligere ses, at forskellen mellem forsøgene foretaget på tør og våd bund varierer mere i slutningen end ved starten. De kritiske forskydningsspændinger opstår i slutningen af et ledningssystem, hvilket skyldes, at vanddybden og hastigheden i slutningen er mindre end i starten. I en driftssituation må bunden forventes at være våd, eftersom skyllet aktiveres kort tid efter tømning af det tilbageholdte vand, og der foretages derfor kun forsøg på våd bund i resten af forsøgene.

Ud fra de indledende forsøg er det tydeligt, at det er muligt at lave ensartede bølger med forsøgsopstillingen. Dernæst er det vigtigt at få bestemt skyllesystemets type, dette sker på baggrund af kapitel 2. Forsøget er opbygget som et skyllesystem til rensing af et rørbassin, og ud fra tidligere analyse anvendes der i de fleste tilfælde et fast skyllevolumen ved disse opstillinger. Dette skyldes, at der i starten af regnhændelsen opstaves det dimensionerede skyllevolumen, så der altid foretages en fuld rensning. Førnævnte scenario anvendes videre i projektet, og det er derfor vigtigt at undersøge sammenhængen mellem bølgehøjden og det anvendte skyllevolumen. På figur 6.3 ses sammenhængen mellem bølgehøjde og skyllevolumen for tre forskellige opsætninger, henholdsvis ved 0,5 og 18 m fra indløb.



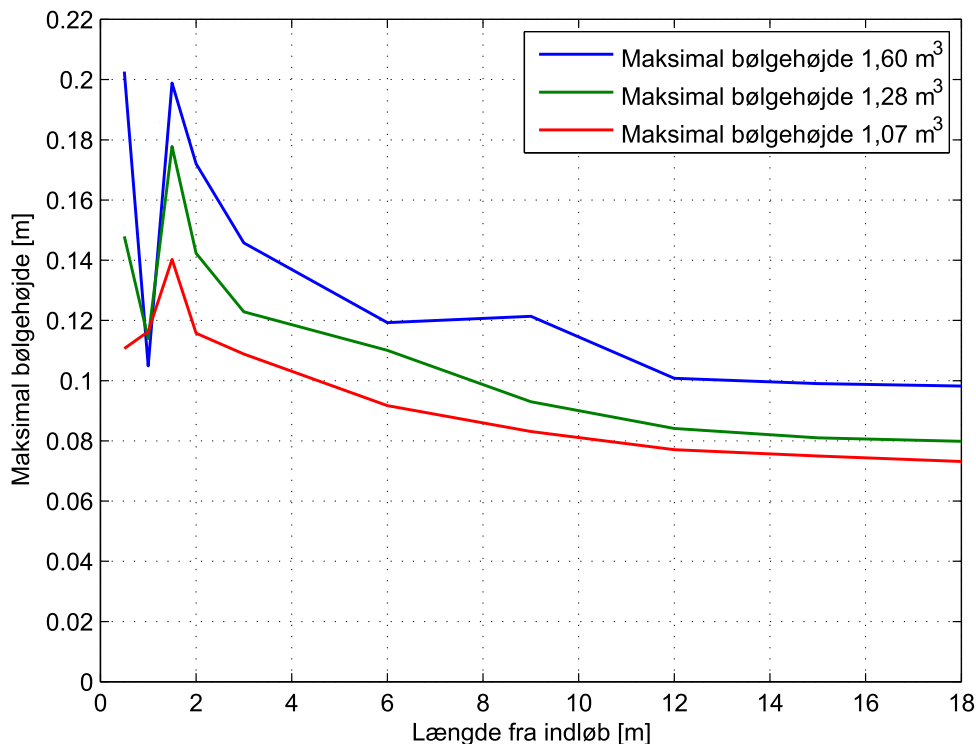
Figur 6.3. Sammenligning af bølgehøjde ved 0,5 og 18 m fra indløb for tre forskellige skyllevolumener.

Forskellen mellem bølgerne er størst i starten af strømningskanalen, og efterhånden som bølgen dæmpes begynder forløbene at ligne hinanden. Derudover er der en lineær sammenhæng mellem peakværdien ved 0,5 m og det anvendte skyllevolumen. Ved 18 m er peakværdierne tidsforskudte, hvilket sker på grund af de forskellige hastigheder. Dette måtte forventes, da kraften og dermed hastigheden reduces ved mindre trykhøjde. De maksimale vanddybder for hver enkelt måler findes desuden i tabel 6.1.

Måler nr.	Placering [m]	Skyllevolumen		
		1,60 m ³	1,28 m ³	1,07 m ³
		Bølgehøjde [m]		
1	0,5	0,203	0,148	0,111
2	1,0	0,105	0,114	0,116
3	1,5	0,199	0,178	0,140
4	2,0	0,172	0,142	0,123
5	3,0	0,146	0,123	0,109
6	6,0	0,119	0,110	0,092
7	9,0	0,121	0,093	0,083
8	12,0	0,101	0,084	0,077
9	15,0	0,099	0,081	0,075
10	18,0	0,098	0,080	0,073

Tabel 6.1. Maksimale vanddybder ved de enkelte målere, ved forskellige skyllevolumener,

På figur 6.4 er værdierne fra tabel 6.1 plottet. Sammenlignes grafen med indhyldningskurven for vanddybden fra beskrivelsen af skyllesystemer i kapitel 2, ses en vis lighed. Bølgen i forsøget knækker kort efter åbningen af spjældet, hvilket giver en mindre vanddybde ved 1 m end de to målere omkring. Dette medvirker, at bølgeforløbet først starter ordentligt efter 1,5 m, med høje vanddybder i starten af kanalen, som over længden flades ud. Udfladningen sker efter ca. 12 m, og den maksimale vanddybde er derefter næsten konstant for de tre forskellige skyllevolumener.



Figur 6.4. Forløb af den maksimale bølgehøjde over længden af kanalen for de tre opsætninger af skyllevolumen.

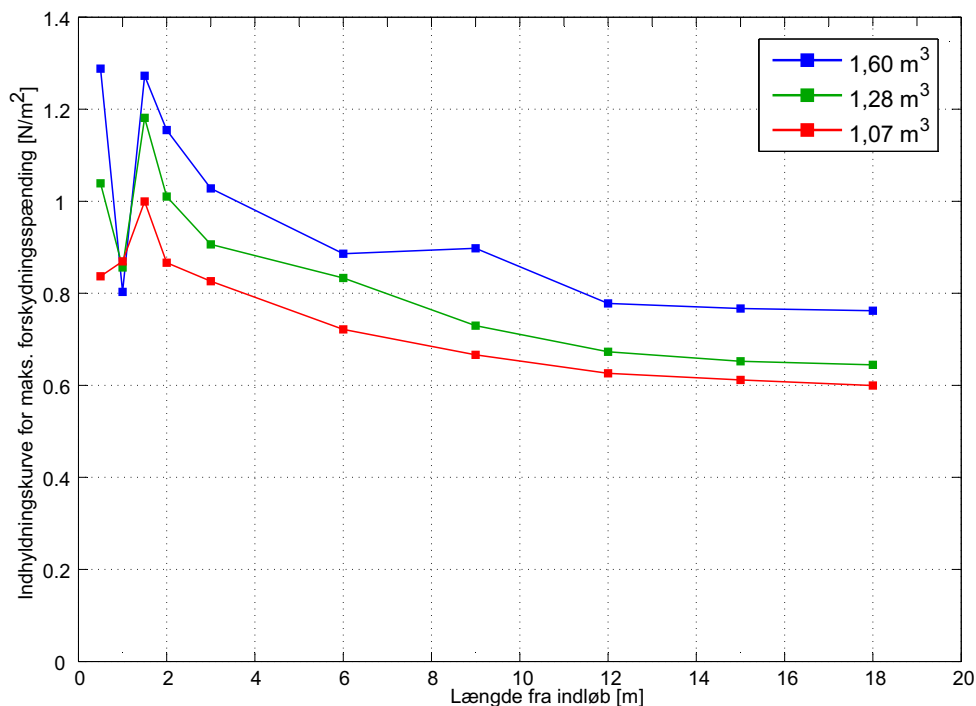
Det ses ud fra tabellen, at reduktionen i den maksimale vanddybde bliver mindre fra start til slut ved mindre skyllevolumen. Den største bølgeeffekt findes således ved at anvende det højeste skyllevolumen.

Bundforskydningsspændingen kan bestemmes ved bundforskydningsligningen (6.1), men som tidligere nævnt i kapitel 3 er anvendelsesområdet begrænset. Dette kan illustreres ved beregning af forskydningsspændinger i rør uden hældning, hvor forskydningsspændingen ifølge formelen bliver 0 Pa.

$$\tau_0 = \rho g R I_0 \quad (6.1)$$

De maksimale forskydningsspændinger undersøges imidlertid ud fra formelen, for at få en idé om størrelsen heraf. Hvis der antages en bundhældning på 1‰ kan de maksimale forskydningsspændinger findes ud fra ligning (6.1).

På figur 6.5 ses forløbet af de maksimale forskydningsspændinger for tre skyllevolumener. Forskydningsspændingen ved 1 m er mindre, fordi vanddybden i dette punkt er lav på grund af et knæk i bølgen. Umiddelbart virker dette ikke logisk, fordi hastigheden i dette punkt vil være størst.



Figur 6.5. Maksimale forskydningsspændinger ved tre forskellige skyllevolumener udregnet med bundforskydningsformlen, med en antaget bundhældning på 1‰.

Yderligere ses det, at forløbet af de maksimale forskydningsspændinger følger forløbet af de maksimale bølgehøjder. Dette vil ikke være tilfældet i et skyllesystem, hvor hastighederne i den første del af systemet adskiller sig markant fra hastighederne fundet i en dæmpet situation længere nede i systemet.

De fundne forskydningsspændinger er generelt lave, eftersom der i almindelig praksis dimensioneres efter en minimums forskydningsspænding på 2-3 Pa for regnvands- og fællesledninger (Winther et al., 2011). Forskydningsspændingen er fundet for en ren ledning, og ruheden må derfor forventes at være anderledes i en situation med bundfældet sediment, hvormed situation forværres yderligere. Derudover er forskydningsspændingen i ligning (6.1) direkte afhængig af bundhældningen, og ved antagelse af en lav bundhældning bliver den resulterende forskydningsspænding tilsvarende lav.

Til at analysere forskydningsspændingerne i systemet kunne der med fordel anvendes forskellige teorier til forskellige dele af strømningskanalen. I starten kunne forskydningsspændingen udregnes ved friktionstallet, mens det efter dæmpningen er passende at anvende den simple bundforskydningsformel, så vidt der er en bundhældning.

Efter undersøgelse af strømningsforholdene, og den potentielle transport igennem forskydningsspændingerne, opstilles der et forsøg med et lag sediment i bunden af forsøgskanalen. Dette gøres, for at undersøge sammenhængen mellem skyllelængden, mængden af transporteret sedi-

ment og det anvendte skyllevolumen. Forsøgsresultaterne kan herefter bruges til at bestemme en passende kornstørrelse samt skyllevolumen til forsøg med en komplet ru bund. En ru bund er en vigtig forudsætning ved de fleste transportanalyser såsom Shield's studie, som blev introduceret tidligere.

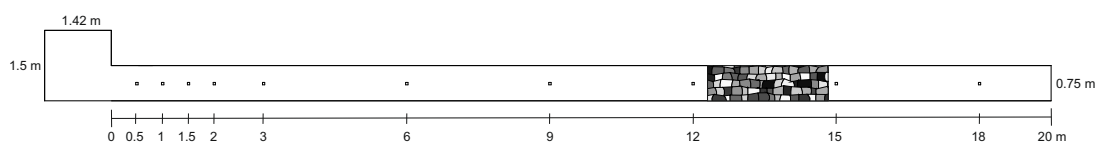
6.2 Indledende sedimenttransport forsøg

I forsøget opstilles der en situation med et 2,35 m langt lag af sediment, som vist på figur 6.6. Formålet med forsøget er, at undersøge sammenhængen mellem skyllelængden inden bølgen rammer et lag af sediment, og den mængde sediment der transporteres, ved et bestemt skyllevolumen.



Figur 6.6. Sediment lag på 2,35 m udlagt i den nederste del af strømningskanalen.

Ud fra sammenhængen mellem det anvendte skyllevolumen og den transporterede mængde sediment, kan det fastslås om kornstørrelsen og skyllevolumenet er passende til efterfølgende forsøg. Total mængden af den udlagte sediment findes til 50 liter, hvilket fordeles jævnt ud over en strækning på 2,35 m. Mediandiameteren af sediment er ca. 15 mm, og valgt på baggrund af den tidligere sigteanalyse. I det første forsøg placeres sediment laget, som illustreret på figur 6.7, mellem 12,40 m og 14,75 m fra indløb.



Figur 6.7. Grundplanstegning af sedimenttransport forsøg 1 med udlagt sediment mellem 12,40 og 14,75 m.

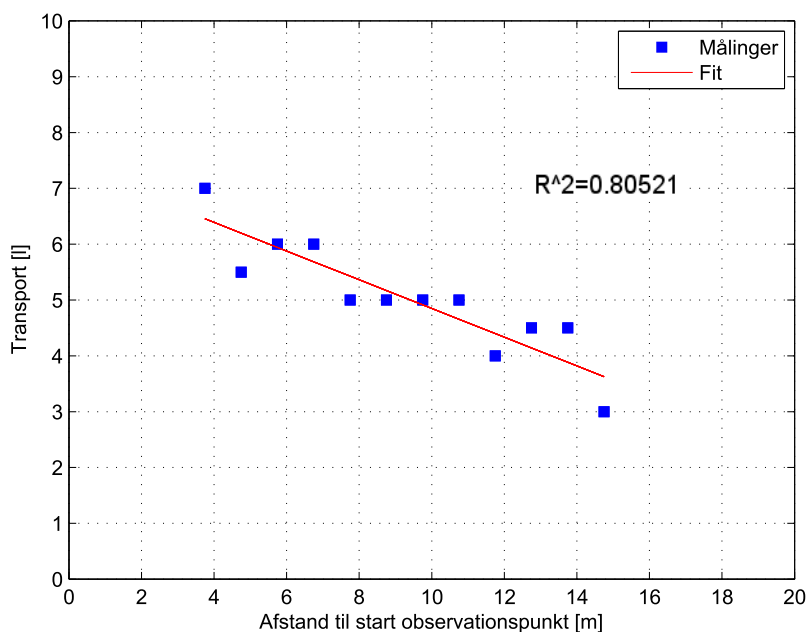
Forsøget udføres først med et skyllevolumen på $0,64 \text{ m}^3$, svarende til 30 cm opstuvet vand inde i opstuvningskassen. Efter hvert skyl opsamles alt det sediment der ligger efter slutpunktet af sedimentlaget. Ved første forsøg opsamles dermed alt det sediment, der ligger efter 14,75 m.

Sedimentlaget flyttes efterfølgende 1 m mod indløbet og proceduren gentages indtil at sedimentlaget er ført op i nærheden af indløbet. Skyllenvolumenet fastholdes, og der findes dermed en sammenhæng mellem den transporterede mængde sediment i forhold til afstanden skyllebølgen har tilbagelagt. Sedimentlagets placering samt den transporterede mængde sediment ved hvert forsøg kan findes i tabel 6.2.

Forsøgs nr.	Startpunkt	Slutpunkt	Transporteret mængde
	[m]		
1	12.40	14.75	3,0
2	11.40	13.75	4,5
3	10.40	12.75	4,0
4	9.40	11.75	4,0
5	8.40	10.75	5,0
6	7.40	9.75	5,0
7	6.40	8.75	5,0
8	5.40	7.75	5,0
9	4.40	6.75	6,0
10	3.40	5.75	6,0
11	2.40	4.75	5,5
12	1.40	3.75	7,0

Tabel 6.2. Placering af sedimentlag og transporteret mængde sediment fra transport forsøget.

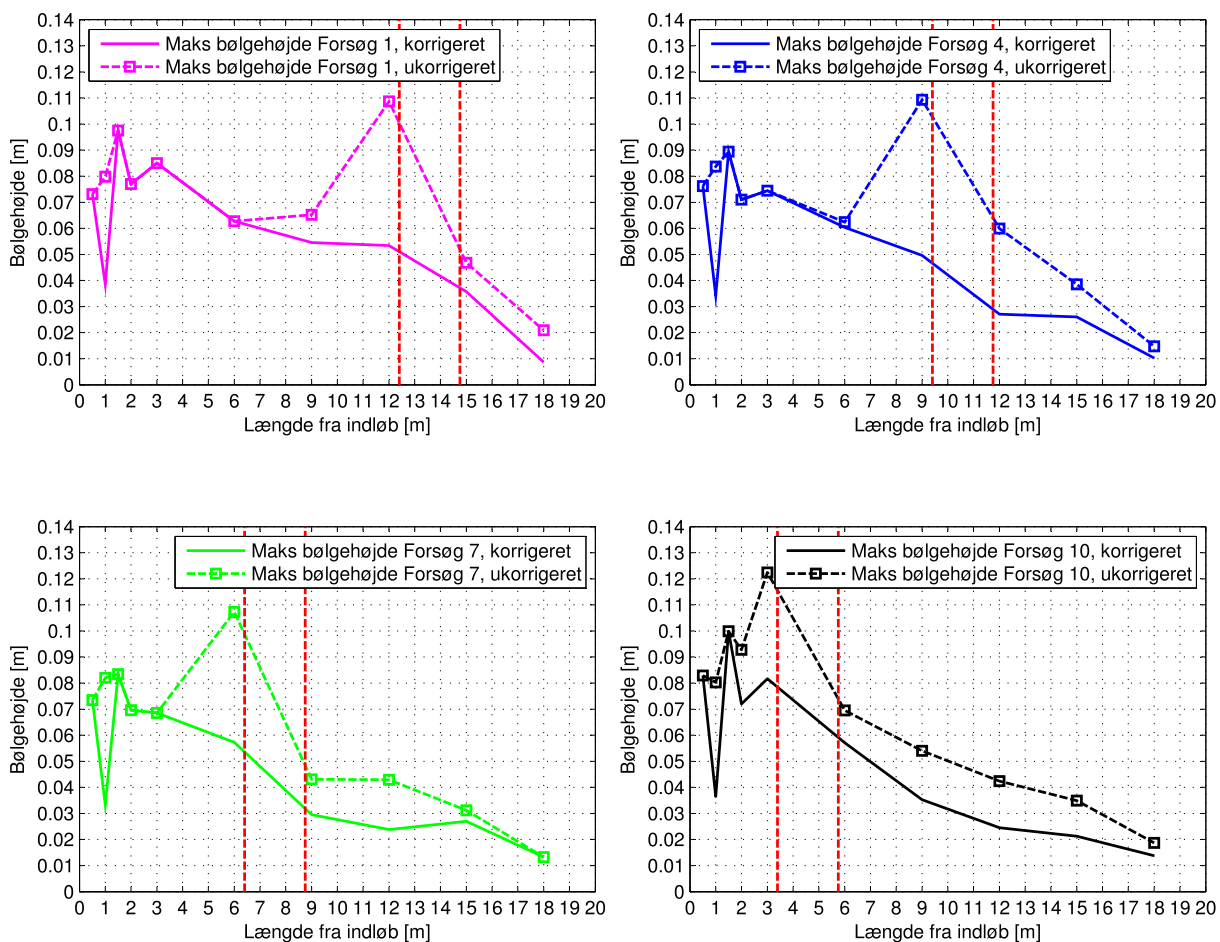
Mængden af transporteret sediment øges ved at flytte sedimentlaget tættere på indløbet. Dette måtte forventes, da vanddybden ud fra strømningforsøgene viste sig at være større i starten af forsøgskanalen. Det viste sig desuden at bølgeeffekten bliver større ved stigende skyllevolumen, og med et skyllevolumen på $0,3 \text{ m}^3$ er bølgeeffekten begrænset. På figur 6.8 er den transporterede mængde sediment plottet som funktion af afstanden til sedimentlaget, og der ses en rimelig relation mellem de to.



Figur 6.8. Relation mellem transporteret mængde sediment i forhold til slutplaceringen af sedimentlaget.

Udover sammenhængen mellem afstand og transporteret mængde sediment undersøges det, om der er en relation mellem vanddybden og den transporterede mængde sediment. Dette vurderes ud fra forsøg 1, 4, 7 og 10, da disse har identiske forhold med hensyn til bølgemålerens placering foran sedimentlaget. Ved analyse af vanddybden i de fire udvalgte forsøg var det tydeligt, at vanddybden lige før sedimentlaget var forkert. De uregelmæssigt høje bølgetoppe skyldes den tilbagegående bølge, der dannes efter sammenstød med sedimentet.

På figur 6.9 er forløbet af de maksimale bølgehøjder vist for de fire udvalgte forsøg. Der er angivet værdier både for en ukorrigeret situation med de maksimale værdier som følge af den tilbagegående bølge, men også værdier for den reelle bølge.



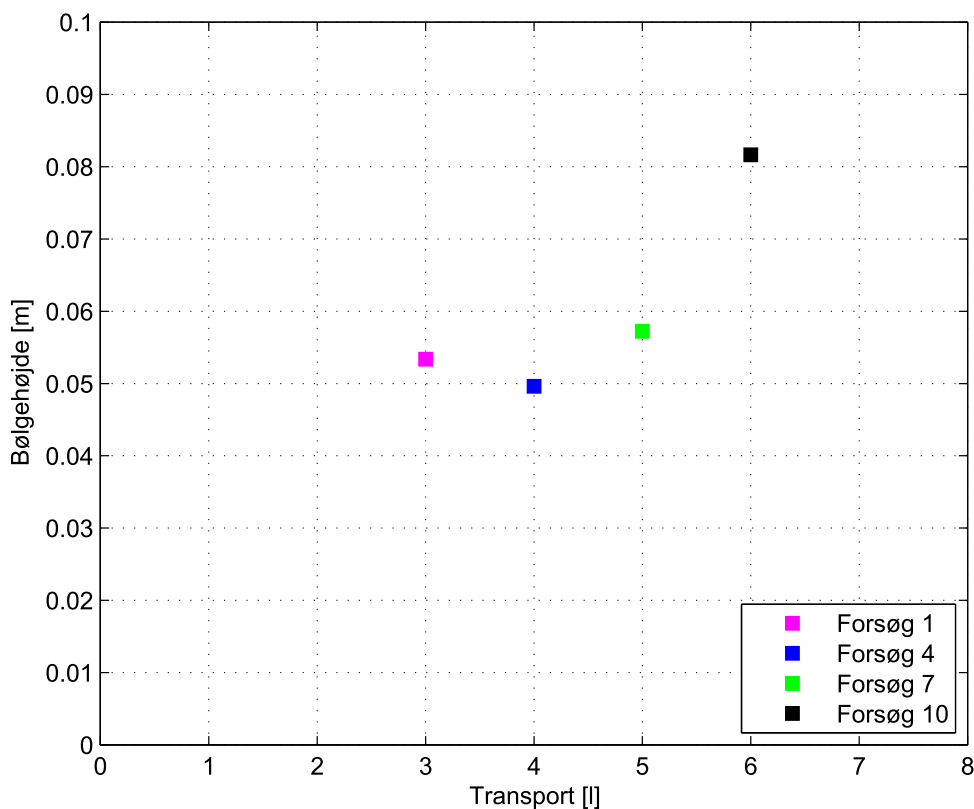
Figur 6.9. Forløbet af den maksimale bølgehøjde for forsøg 1, 4, 7 og 10 ved et skyllevolumen på $0,3\text{ m}^3$. De røde streger markerer sediment lagets start og slut inden hvert forsøg. Øverst venstre: forsøg 1, øverst højre: forsøg 4, nederst venstre: forsøg 7, nederst højre: forsøg 10.

Det ses, at vanddybdeforløbet i den korrigerede situation stemmer fint overens med forløbene fundet ved de indledende strømningsforsøg, hvor vanddybden ved 1 m er lav, fordi bølgen knækker i dette punkt. Yderligere noteres det, at forløbet er stabilt faldende, hvilket er forventet på grund af forsøgskanalens ruhed. Dette er ikke tilfældet i den ukorrigerede situation, hvor den tilbagegående bølge giver anledning til misvisende resultater.

Forløbet af den maksimale bølgehøjde i den korrigerede situation er tilnærmelsesvis ens, inden bølgen rammer sedimentlaget. Eftersom dette er tilfældet, er det muligt, at undersøge om der er

en sammenhæng mellem bølgehøjden fra bølgemåleren placeret lige inden sedimentlagets start og den fundne transport.

De maksimale bølgehøjder findes for bølgemålerne ved 12 m, 9 m, 6 m og 3 m og det undersøges herefter, om der er en sammenhæng mellem den transportede mængde sediment og disse bølgehøjder. Ud fra figur 6.10 ses det, at der ikke er en entydig sammenhæng mellem bølgehøjden og den fundne transport.

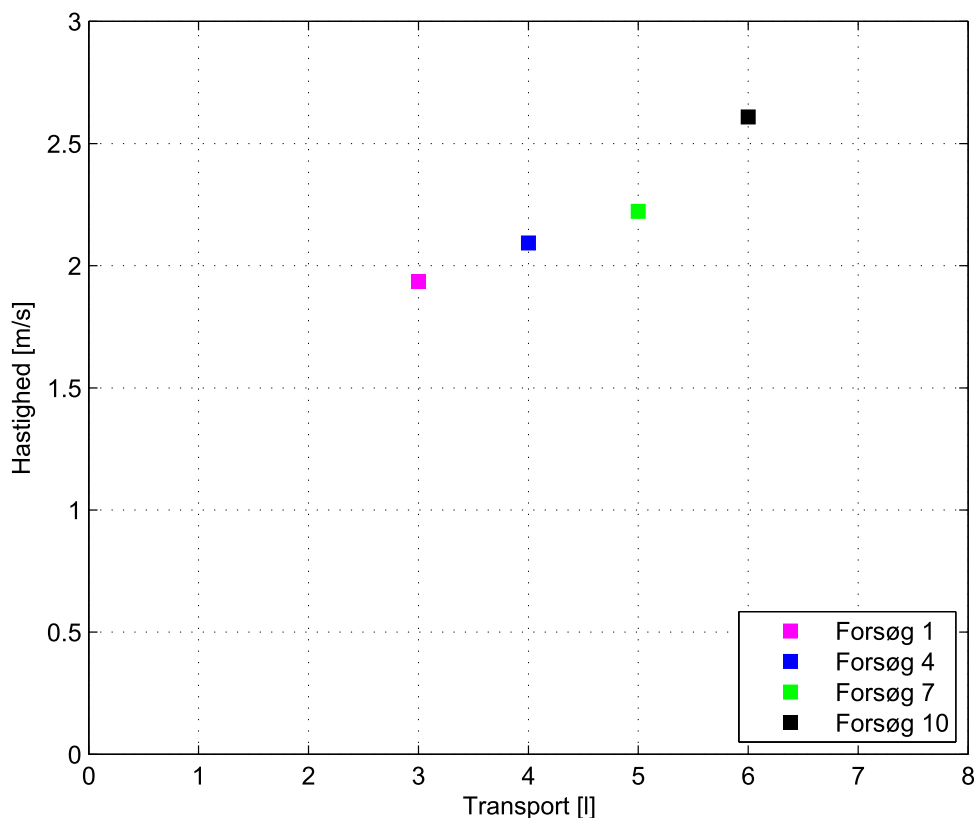


Figur 6.10. Korrigeret maksimal bølgehøjde som funktion af transporteret sediment.

På figur 6.10 ser det ud som om, at resultaterne fra forsøg 4 og 7 er forskudt vertikalt i forhold til resultaterne fra forsøg 1 og 10 eller omvendt. En mulig årsag til variationen kan findes i startbetingelserne til hvert forsøg, hvor en mindre forskel i det anvendte skyllevolumen kan give anledning til fejl. Skyllébølgen vil derfor ikke have de samme forudsætninger ved åbning af skottet og den dannede bølge bliver mindre og svagere.

Da der ikke var en tydelig sammenhæng mellem bølgehøjden og transporten, undersøges det, om der er en bedre sammenhæng mellem hastigheden af bølgen og transporten. Hastigheden af bølgen findes ud fra den tid der går fra skottet åbnes, til at bølgemålerne registrerer en ændring.

Ud fra figur 6.11 ses det, at der er en god sammenhæng mellem hastigheden af bølgen samt den transportede mængde sediment.



Figur 6.11. Hastighed ved de enkelte bølgemålere i de fire udvalgte forsøg som funktion af den transporterede mængde sediment ved hvert forsøg.

Delresultater fra forsøget kan opsummeres i følgende punkter:

- Rimelig sammenhæng mellem skyllelængden og mængden af transporteret sediment.
- Små variationer i forsøgsudførelsen kan have en væsentlig betydning for bølgens forløb ned igennem systemet.
- God sammenhæng mellem hastigheden af bølgen og den transporterede mængde sediment.
- Maksimal transport på 7l sediment tættest på indløb, hvilket ikke udgør en stor andel af det samlede udlagte sedimentlag.
- Stor reduktion i bølgens højde og dermed kraft ved sammenstød med sedimentlaget.

Ud fra forsøgsresultaterne må det konkluderes, at enten ændres kornstørrelsen eller skyllevolumenet inden der kan foretages forsøg med komplet ru sedimentbund. Dette skyldes, at transporten ville være minimal med det nuværende anvendte setup, efter en reduktion af bølgen tidligt i kanalen. Det vælges endvidere, at øge skyllevolumenet fra $0,64\text{ m}^3$ til $1,07\text{ m}^3$, hvilket svarer til en opstuvningshøjde på 50 cm i stedet for 30 cm.

6.3 Sedimenttransport forsøg

Ud fra de indledende forsøg for strømmingen og sedimenttransport er det tydeligt, at der skal foretages et forsøg med en komplet ru bund for at vurdere transporten i systemet. Forsøget opstilles ved at udlægge et jævnt lag af sediment i bunden af strømningenskanalen, som vist på figur 6.12.



Figur 6.12. Strømningskanal med jævnt fordelt sedimentlag før forsøgs start.

Laget består af sediment med en diameter på mellem 10-20 mm med d_{50} på 15 mm, densiteten af materialet er 2650 kgm^{-3} og porøsiteten er fundet til 0,38. Laget fordeles jævnt med en højde på ca. 2 cm startende 1,6 m fra skottet. Den totale mængde af sediment er 462,05 kg, inden forsøget startes. Forsøget foretages ved at lave ti skyllebølger med konstant skyllevolumen på $1,07 \text{ m}^3$. Efter hver bølge opsamles kun materiale skyllet ud i udløbet. Starten af sedimentlaget markeres efter hver bølge for at vurdere den gennemsnitslige flytning af sedimentfronten. Efter ti bølger opsamles sedimentet meter for meter og der kan således optegnes en akkumuleret sedimenttransportkurve.

Resultaterne for den akkumulerede sedimenttransport kan senere sammenlignes med indhyldningskurven for den maksimale forskydningsspændingen ned igennem systemet.

I studier såsom Shirazi et al. (2014) er erosionen efter gentagne skyllebølger vurderet ud fra bundens udformning. Analysen vurderer to forskellige sedimenttransport formularers evne til at beskrive erosionen forårsaget af de gentagne skyllebølger. I undersøgelsen sammenlignes resultater fra et praktisk forsøg med resultater fra en 1D-modellering. Det konkluderes endvidere, at 1D-modellerne kan beskrive udviklingen af bunderosionen til en vis grad, men at modellerne er sensitive overfor hældning på kanalen og skyllevolumenet. Det anbefales, at der skal udvikles nye transportformularer, som er specifikt lavet til at håndtere situationer med højere forskydningsspændinger end de normalt forekomne. I stedet for at vurdere forskellige setups er der i projektet valgt at fokusere på en enkelt situation med et fastsat skyllevolumen. Det sammenlignes herefter om de opstillede 1D-modeller i Mike Urban kan beregne den observerede transport.

I tabel 6.3 fremgår værdier for den udskyllede sedimentmængde i udløbet efter hvert skyl, samt ændringen i sedimentlagets start. Den samlede mængde efter de ti skyl blev 9,64 kg hvilket svarer til 2,7% af den totale mængde sediment, som blev udlagt.

Skyl nr.	Sediment i udløb	Flytning af start
	[kg]	[m]
1	0,21	0,67
2	0,89	0,27
3	0,80	0,37
4	0,93	0,51
5	1,01	0,45
6	1,01	0,49
7	1,28	0,29
8	1,10	0,36
9	1,23	0,40
10	1,18	0,30
Sum	9,64	4,08

Tabel 6.3. Sediment mængder opsamlet i udløbet efter hvert af de ti skyl.

Umiddelbart er der ikke nogen sammenhæng mellem de fundne sedimentmængder i udløbet, på trods af ændringen i sedimentlagets startplacering mellem hvert enkelt skyl. Gennemsnitsflytningen af sedimentlagets start er ud fra de anførte data, 0,45 m per skyl, hvilket kan sammenlignes med flytningen fundet i Shirazi et al. (2014). Ved et lavt skyllevolumen på 0,144 m³ blev den gennemsnitlige flytning i undersøgelsen fundet til 0,02 m per skyl, mens flytningen steg til 0,25 m per skyl ved et skyllevolumen på 0,48 m³. I tabel 6.4 er forsøgs parametrene givet for de to forsøg der omtales. Selvom undersøgelserne er lavet med forskellige opsætninger, er det stadig interessant at sammenligne resultaterne, da forsøgene er ensartede.

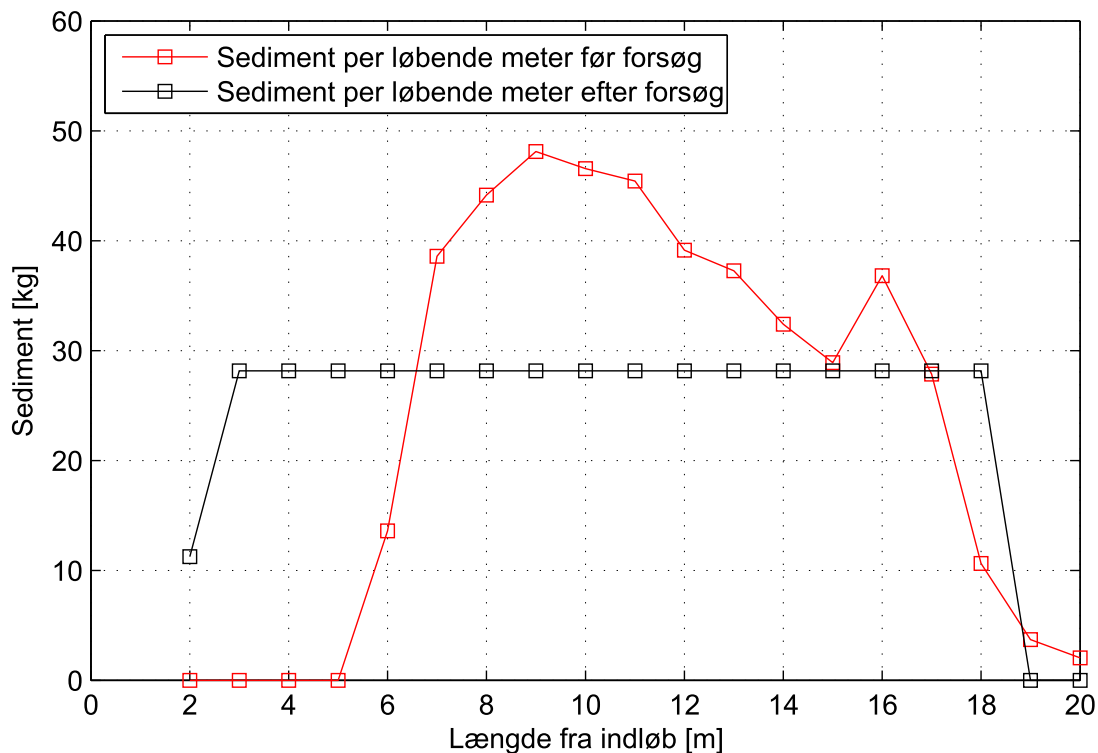
	Skyllevolumen	Porøsitet	d_{50}	H/B kanal	Flytning
	[m ³]	[–]	[mm]	[–]	[m]
(Shirazi et al., 2014)	0,14	0,41	1,8	1,63	0,02
(Shirazi et al., 2014)	0,48	0,41	1,8	1,63	0,25
Indledende transport forsøg	0,64	0,38	15,0	0,67	0,07
Sedimenttransport forsøg	1,07	0,38	15,0	0,67	0,40

Tabel 6.4. Data fra forsøg foretaget i (Shirazi et al., 2014) og i dette projekt. Flytningen er gennemsnitlig.

I tabel 6.4 findes data fra det indledende sedimenttransport forsøg foretaget i projektet. Eftersom undersøgelsen ikke direkte var rettet mod at finde flytningen, er denne senere blevet estimeret ud fra videomateriale til at være ca. 0,07 m per skyl.

Ud fra Shirazi et al. (2014) kan det ses, at der ved ændring af skyllevolumenet, sker en markant ændring i den gennemsnitlige flytning. Ved de udførte forsøg i projektet er tendensen den samme, selvom størrelsen af værdierne i begge tilfælde er mindre. I praksis vil det derfor være vigtigt, at skyllesystemer dimensioneres med et korrekt skyllevolumen i forhold til de partikler, der skal flyttes. Hvis skyllevolumenet underestimeres, vil der være en høj risiko for, at det ophobede materiale ikke flyttes tilstrækkeligt.

På figur 6.13 er mængden af sediment per løbende meter vist før og efter forsøget. Sedimentlaget var før forsøget jævnt, og efter de ti skyl er sedimentet blevet transporteret mod udløbet i forskelligt omfang langs strømningsskanalens længde. Sammenholdes resultaterne for sediment mængden og flytningen passer dette godt overens. Dette skyldes, at sedimentlagets start placering var 1,4 m fra indløb, og med flytningen på 4,08 m passer dette med, at den første målte sedimentmængde findes mellem 5 og 6 m.

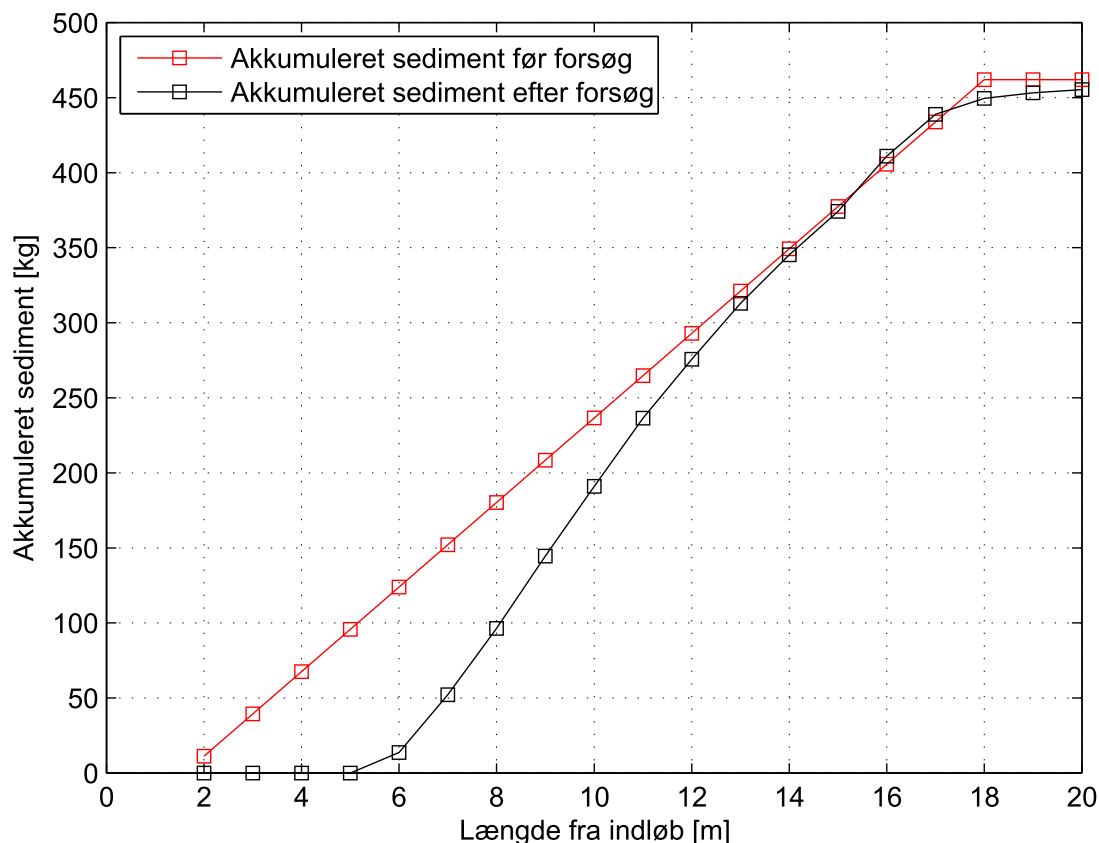


Figur 6.13. Sediment mængde per løbende meter i strømningsskanalen før og efter forsøget.

Den største mængde sediment findes efter forsøget mellem 8 og 9 m til 48 kg, hvilket er en stigning på 42 % fra udgangspunktet. Ud fra kurven dannes der en ide om de forskydningsspændinger, der optræder igennem de ti skyl. Hvert skyl har gennemsnitligt flyttet sedimentfronten 40 cm. Dette betyder, at forskydningsspændingen har været høj omkring sammenstødet med sedimentlaget, og er derefter aftaget som funktion af reduktionen i vanddybde og hastighed.

Opvejningen af sedimentet efter forsøg gav en total mængde på 464,97 kg, inklusiv det sediment der blev fundet i udløbet. I forhold til de 462,05 kg fra før forsøget giver dette en tilførsel af sediment på 2,92 kg. Den ekstra vægt stammer fra vand, eftersom opvejningen af sedimentmængden skete kort efter sidste skyl.

På figur 6.14 er den akkumulerede mængde sediment vist per løbende meter i strømningsskanalen. Den akkumulerede mængde viser, at de ti skyllebølger har haft en effekt på sedimentet i strømningsskanalen, dog mest markant mellem 2 og 12 m. Mellem 13 og 16 m er den akkumulerede mængde ens, og i den sidste del er den akkumulerede mængde efter forsøget lavere, fordi en del af sediment blev skyllet ud i udløbet.



Figur 6.14. Akkumuleret mængde sediment per løbende meter i strømningsskanalen før og efter forsøget.

Analyseres transporten ud fra Shield's parameter, som blev introduceret i kapitel 3, er forskydningsspændingerne højere end først udregnet. Det kan ud fra den transporterede mængde sediment konkluderes, at forskydningsspændingerne udregnet med den simple bundforskydningsformel underestimerer forskydningsspænding i strømningsskanalen. I starten af kapitlet blev den maksimale forskydningsspænding fundet til at være ca. 1 Pa, for en bølge med et skyllevolumen på $1,07 \text{ m}^3$. Selvom sedimentets ruhed og den ekstra højde på grund af sedimentlaget ikke er medtaget i beregningen, er det tydeligt at forskydningsspændingerne må være langt større end tidligere udregnet. Endvidere må forskydningsspændingen på de første 5 m være forholdsvis høj igennem de ti skyl, fordi alt sedimentet her har rykket sig.

Opsummering af resultater fra praktisk forsøg:

- Større skyllevolumen giver en bedre bølgeeffekt, og et eksponentielt større peak i starten.
- Hastigheden ved en skyllebølge er høj, og det er derfor vigtigt at tage højde for dette ved beregning af forskydningsspændingen.
- Forskydningsspændingen må være høj på de første 5 m, eftersom alt sedimentet her er blevet flyttet.

7. Modellering med Mike Urban

I dette kapitel gennemgås opsætningen af de forskellige Mike Urban modeller, som anvendes i projektet. Der arbejdes med en standard model og en model der anvender Real Time Control, RTC. RTC-modulet er i projektet anvendt til at lave en øvre randbetingelse, hvor åbningen af en port er styret af en vandstandsmåling. De numeriske modeller opdeles i følgende to notationer: Standard model og RTC-model.

7.1 Standard Mike Urban model

Det er vigtigt, at der er en god overensstemmelse mellem den fysiske struktur ved det opstillede eksperiment og de numeriske modeller, der skal beskrive dette. Overordnet set er der i programmet Mike Urban mange opsætningsmuligheder, hvilket gør at problemer kan løses på flere forskellige måder. I dette projekt opstilles først en standard model hvor opsætningen består af en indløbsbrønd og en udløbsbrønd samt en rektangulær kanal, der forbinder de to, opstillingen er desuden vist på figur 7.1.



Figur 7.1. Skitse af model opsætning i Mike Urban for standard modellen.

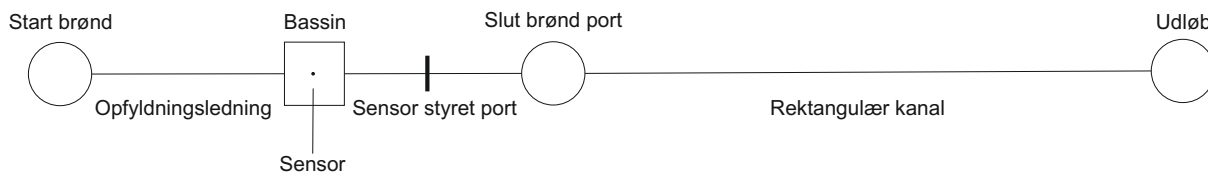
Indløbsbrønden er udformet som et bassin med dimensionerne $1,42\text{ m} \times 1,5\text{ m} \times 1\text{ m}$, og den rektangulære kanal har dimensionerne, $20\text{ m} \times 0,75\text{ m} \times 0,5\text{ m}$, begge i forholdet $L \times B \times H$, som også er nævnt tidligere i kapitel 5.

Standard modellen i Mike Urban er simpel, og opsættes for at kunne sammenligne med en mere kompliceret model. Da der ikke anvendes nogen form for kontrol af vandføringen i modellen, udover den tidsserie som påføres indløbsbrønden, er det svært at vurdere på forhånd hvor stor bølgeeffekten bliver.

7.2 Mike Urban-model med RTC randbetingelse

Ved at anvende Real Time Control modulet i Mike Urban er det muligt, at lave en start betingelse, hvor skyllebølgen er vandspejlsafhængig. I den numeriske model placeres niveau måleren i bassinet, for at kunne kontrollere skyllevolumenet. I Mike Urban opbygges modellen som illustreret på figur 7.2, og det noteres, at der i starten er indsat en start brønd med en opfyldningsledning forbundet til bassinet. Dette skyldes, at alle brønde/bassiner i Mike Urban-modellen skal være forbundet til mindst ét rør. Porten mellem bassinet og slut brønden er ikke defineret som et rør, og det er derfor nødvendigt at indsætte en ekstra ledning. Opfyldningsledningen er derfor udformet med en lille diameter, således at denne ikke har nogen

fysisk betydning i forhold til det ekstra vandvolumen, der skal fyldes i modellen for at få aktiveret sensoren i bassinet.

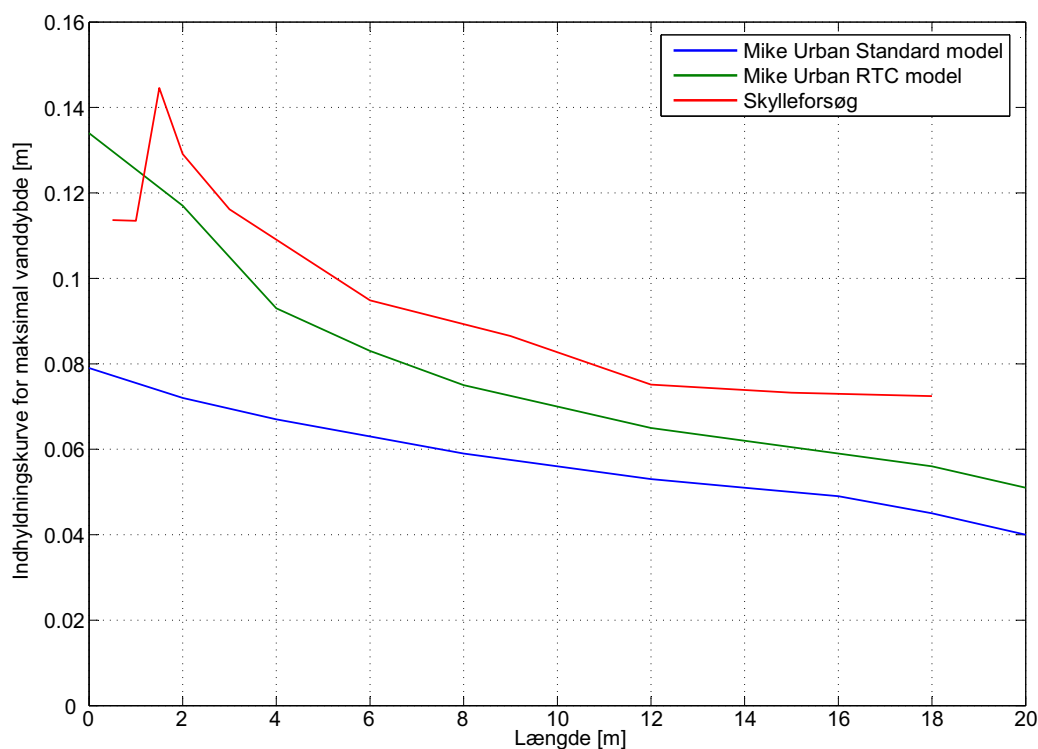


Figur 7.2. Skitse af model opsætning i Mike Urban for RTC modellen.

Udformningen af RTC-modellen introducerer flere variable, der kan have en indflydelse på bølgen, herunder åbningsareal af porten og udformningen af bassinet.

7.3 Sammenligning af strømningsforhold

I dette afsnit sammenlignes resultaterne fra forsøget med de to opstillede modeller. Sammenligningen tager udgangspunkt i resultater fra forsøg med et skyllevolumen på $1,07 \text{ m}^3$, svarende til skyllevolumenet anvendt i sedimenttransport forsøget. De numeriske modeller anvender et Manning-tal på $97 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, værdien blev bestemt i de indledende forsøg med stationær strømning, men som beskrevet i Bilag B er dette usikkert på grund af usikkerhed ved vandspejlsmålingerne. På figur 7.3 ses forløbet af de maksimale vanddybder som funktion af strømningsskanalens længde.



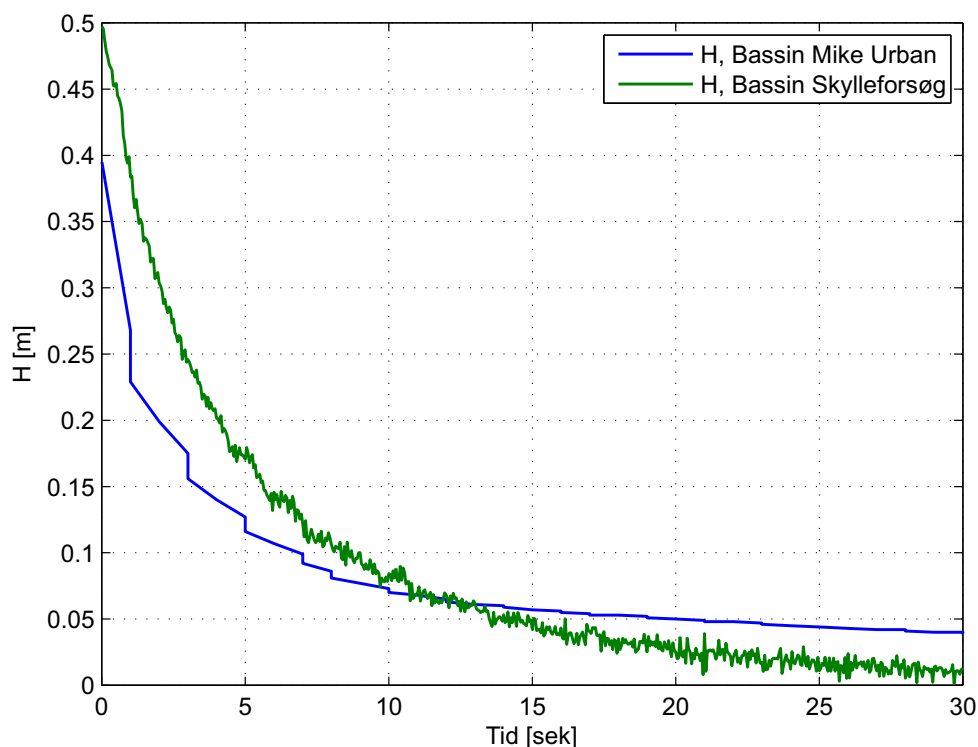
Figur 7.3. Maksimal vanddybde som funktion af længden for henholdsvis standard modellen og RTC modellen samt et skylleforsøg.

Ud fra figuren ses det, at standard modellen underestimerer vanddybden over hele længden, hvilket skyldes den mindre bølgeeffekt fra randbetingelsen. RTC-modellen overestimerer vanddybden i de første beregningspunkter, og underestimerer efterfølgende vanddybden. Forløbet af bølgen fra forsøget har et toppunkt ved 1,5 m, som benævnt tidligere, skyldes dette et knæk i bølgen. Årsagen til bølgens knæk i forsøget er ukendt, og det er derfor svært, at tage højde for dette ved opstillingen af de numeriske modeller.

Den maksimale vanddybde udregnet ved standard modellen ligger langt fra det observerede i forsøget, og det forsøges derfor ikke at optimere denne numeriske model yderligere. Bølgen fra det praktiske forsøg kan således ikke modelleres ved hjælp af en tidsserie i indløbsbrønden. Videre i projektet sammenlignes der derfor kun med modellen, der anvender en RTC-randbetingelse.

Til validering af RTC-randbetingelsen, sammenlignes tømningstiden af opstuvningsbassinet i modellen med den fundne fra forsøget på figur 7.4. Opløsningen på resultaterne fra forsøget er højere end i den numeriske model, hvilket er mest tydeligt i slutningen af dataserien. Den numeriske model er sat til at gemme resultater for hvert sekund, men har nogle gange to værdier for det samme sekund, hvilket kan ses i starten af dataserien. Dette medvirker, at vandet i den numeriske model frigives hurtigere end i forsøget de første ca. 10 sekunder, indtil bassinet næsten er tomt.

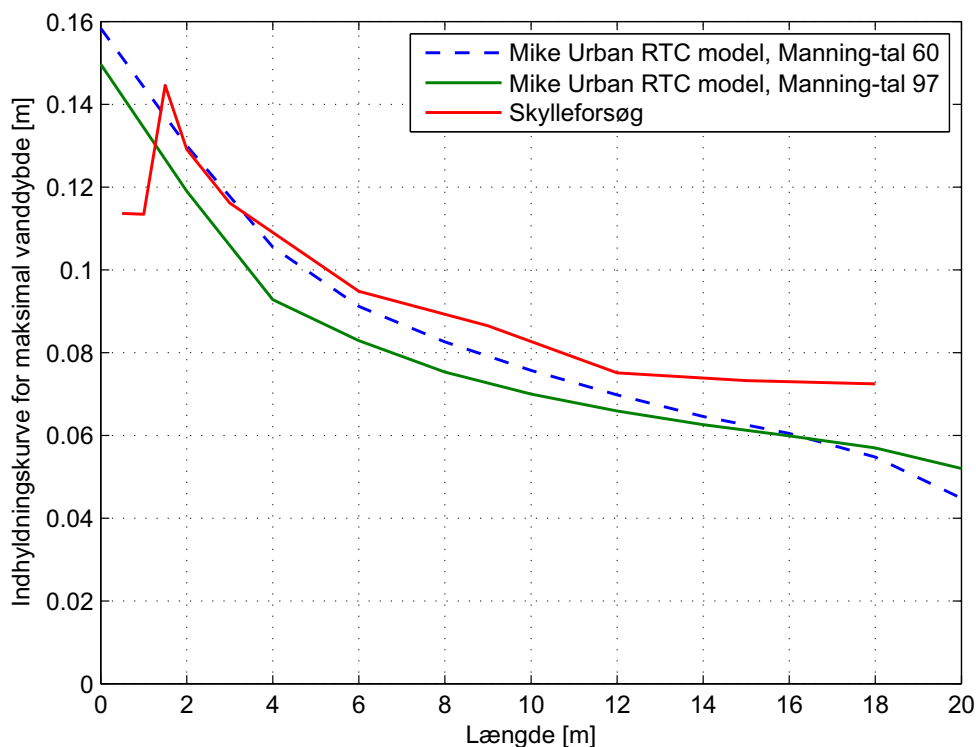
Der er en rimelig sammenhæng mellem tømningstiden i den fysiske og numeriske model. Efter 30 sekunder er bassinet i den fysiske model næsten helt tomt, hvorimod der stadig er vand tilbage i bassinet i den numeriske model. Det må forventes, at bølgen er helt fladet ud efter de 30 sekunder, og vanddybden vil derfor være afhængig af den nedre randbetingelse.



Figur 7.4. Vanddybde som funktion af tiden efter åbning af spjældet i forsøget og modellen, for et skyllevolumen på $1,07 \text{ m}^3$.

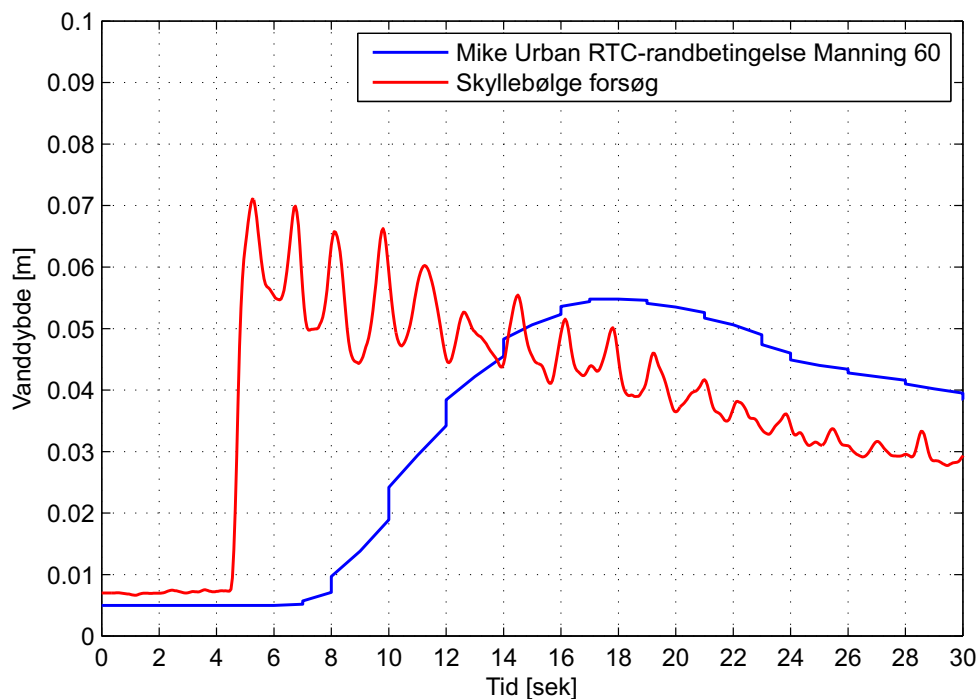
Ud fra resultatet for tømningstiden vurderes det, at den øvre randbetingelse giver en udemærket tilførsel af vand til den numeriske model. Det undersøges videre i projektet, om der er en god sammenhæng mellem vanddybderne, vandvolumenet og hastigheden ned igennem systemet.

På figur 7.5 er Manning-tallet ændret fra 97 til 60, dette giver et bedre fit for de maksimale vanddybder over det meste af længden. Den største forskel findes nu i slutningen af kanalen, hvor vanddybden i den numeriske model er en del lavere end målt. I den numeriske model er udløbet defineret som et skarpt kantet overløb, og vanddybden i det sidste punkt udregnes derfor som værende kritisk dybde.



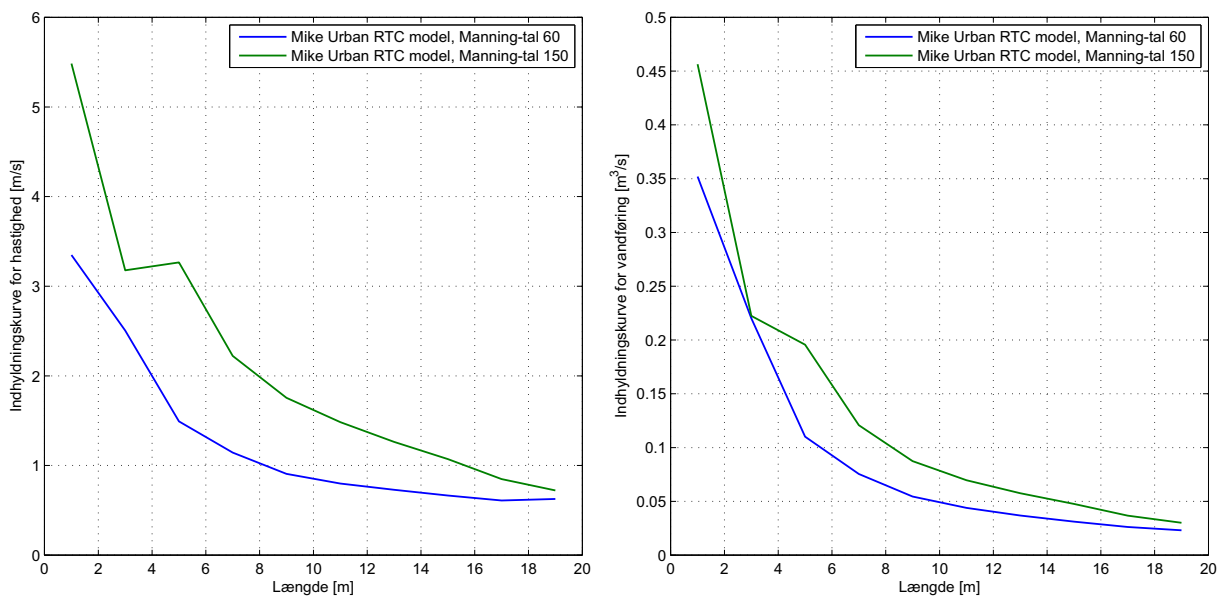
Figur 7.5. Maksimal vanddybde som funktion af længden for RTC modellen, med to forskellige opsætninger af Manning-tallet.

Dette passer dog ikke overens med den observerede vanddybde i det praktiske forsøg, selvom udløbet er udformet på samme vis. Vanddybdens forløb over tiden undersøges derfor nærmere i sidste målingspunkt på figur 7.6. Ud fra figuren ses, at der er forholdsvist store udsving i måledatene, samt at der er en tidsforskydning mellem de fysiske og modellerede målinger. En ændring i Manning-tallet giver dermed kun bedre resultater for vanddybden mens tidsforskydningen forøges. Det blev efterfølgende undersøgt, om en ændring i udformningen af nedre randbetingelse kunne have en betydning. Undersøgelsen viste ikke nogen ændring i vanddybden, og problemet må derfor være kontrolleret af definitionen på energitabet i udløbet.



Figur 7.6. Vanddybde som funktion af tiden ved Måler 10, 18 m.

Ud fra undersøgelserne indtil videre, virker det ikke muligt, at tilpasse Manning-tallet i den numeriske model, således at både de maksimale vanddybder, samt middelhastigheden passer overens med de fundne værdier i det praktiske forsøg. På figur 7.7 ses hastigheden og vandføringen som funktion af kanalens længde for et højt og et lavt Manning-tal. Hastigheden og vandføringen er højest i modellen med et højt Manning-tal, og dermed en lav ruhed, dette passer fint overens med at de maksimale vanddybder ved denne opsætning er lavest.



Figur 7.7. Indhyldningskurver for hastighed og vandføring fra den numeriske model som funktion af kanalens længde for et højt og et lavt Manning-tal.

I de indledende kapitler blev der endvidere konkluderet, at det ikke er forskydningsspændingerne i starten af systemet der er kritiske i et skyllesystem. Sammenlignes derfor hastigheden og vandføringen i slutningen af ledningen, ses en mindre forskel på de to opsætninger. Forskydningsspændingen beregnes i næste afsnit ud fra de to anførte tilfælde af Manning-tals opsætningerne, henholdsvis en lav værdi på 60 og en høj værdi på 150.

Erfaringerne med kalibreringen kan listes ved følgende punkter:

- Sænkning af Manning-tallet giver større vanddybder, fordi ruheden øges, og dermed sænkes middelhastigheden over tværsnittet.
- En ændring i opsætningen af den nedre randbetingelse ændrede ikke vanddybden.
- Energitabet i udløbet underestimeres i den numeriske model, og der beregnes derfor en højere vanddybde, end fundet i det praktiske forsøg.

Det har i projektperioden ikke været muligt at opnå et bedre fit mellem de numeriske modeller og det praktiske forsøg. Hvorvidt dette skyldes fejl i opsætningen af de numeriske modeller eller et for svagt sammenligningsgrundlag med det praktiske forsøg vides ikke. Dette diskuteres til sidst i projektet.

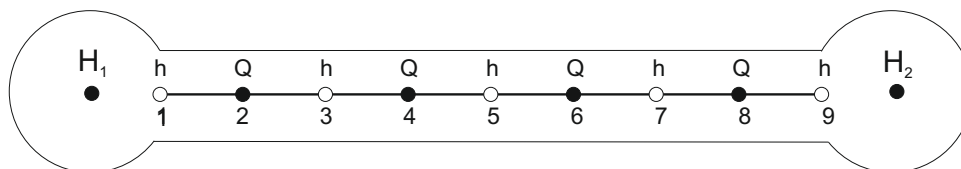
7.4 Beregning af forskydningsspændinger

I projektet udregnes forskydningsspændingen i den næste analyse på to forskellige måder:

- Ud fra friktionstal
- Mike Urban ST-modul

Den simple bundforskydningsformel, med energilinjegradienten antaget til at være lig bundhælden har allerede i de indledende kapitler vist sig at være ubrugbar til beregningen af forskydningsspændinger i det opstillede skyllesystem. Dette skyldes, at hældningen på strømningskanalen er nul, hvilket betyder at forskydningsspændingen udregnes til nul i alle beregningspunkter.

I MOUSE opdeles antallet af beregningspunkter som vist på figur 7.8, som udgangspunkt skal der altid anvendes et ulige antal beregningspunkter, ellers bliver det sidste beregningspunkt en vandføring, hvilket ikke kan lade sig gøre med den numeriske model.

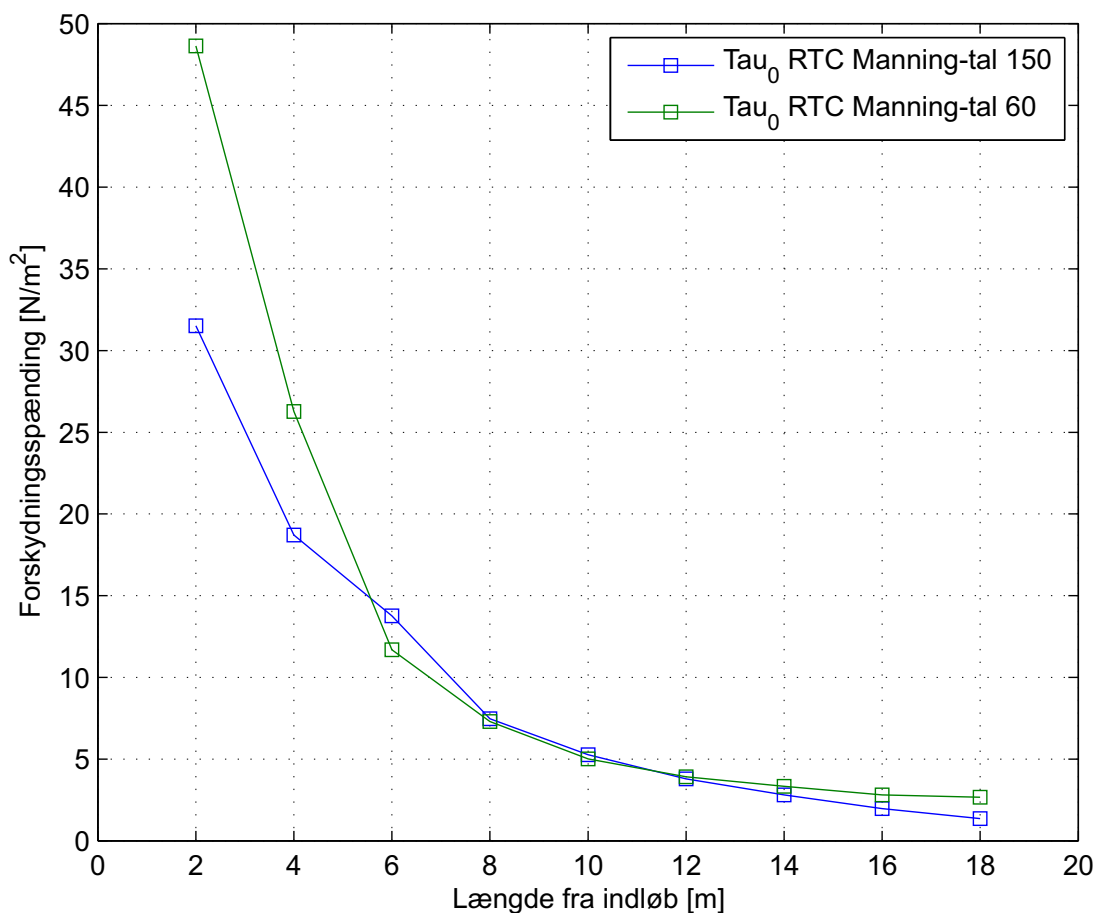


Figur 7.8. Grid definition for numerisk model i MOUSE. Modificeret figur fra (DHI, 2015c)

I modellerne anvendes 21 beregningspunkter, hvilket medvirker at vanddybden beregnes for hver anden meter, med en vandføringsberegning i mellem disse. I programmet er det ikke direkte muligt at udtrække hastigheden mellem de enkelte punkter, eftersom denne er afhængig af både vandføringen og vanddybden.

Ved udregning af forskydningsspændingen som funktion af friktionstallet beregnes middelhastigheden derfor ud fra middelvandføringen i H-punkterne, og den tilhørende vanddybde. Middelhastigheden kan godt udregnes i alle H og Q-punkter, men dette vil kræve, at der skiftevis regnes en middelhastighed ud fra gennemsnitsværdi af vandføringen og vanddybden. I Mike Urbans ST-modul udregnes forskydningsspændingen kun i alle H-punkter, og det er derfor ikke nødvendigt at udregne forskydningsspændingen i samtlige punkter.

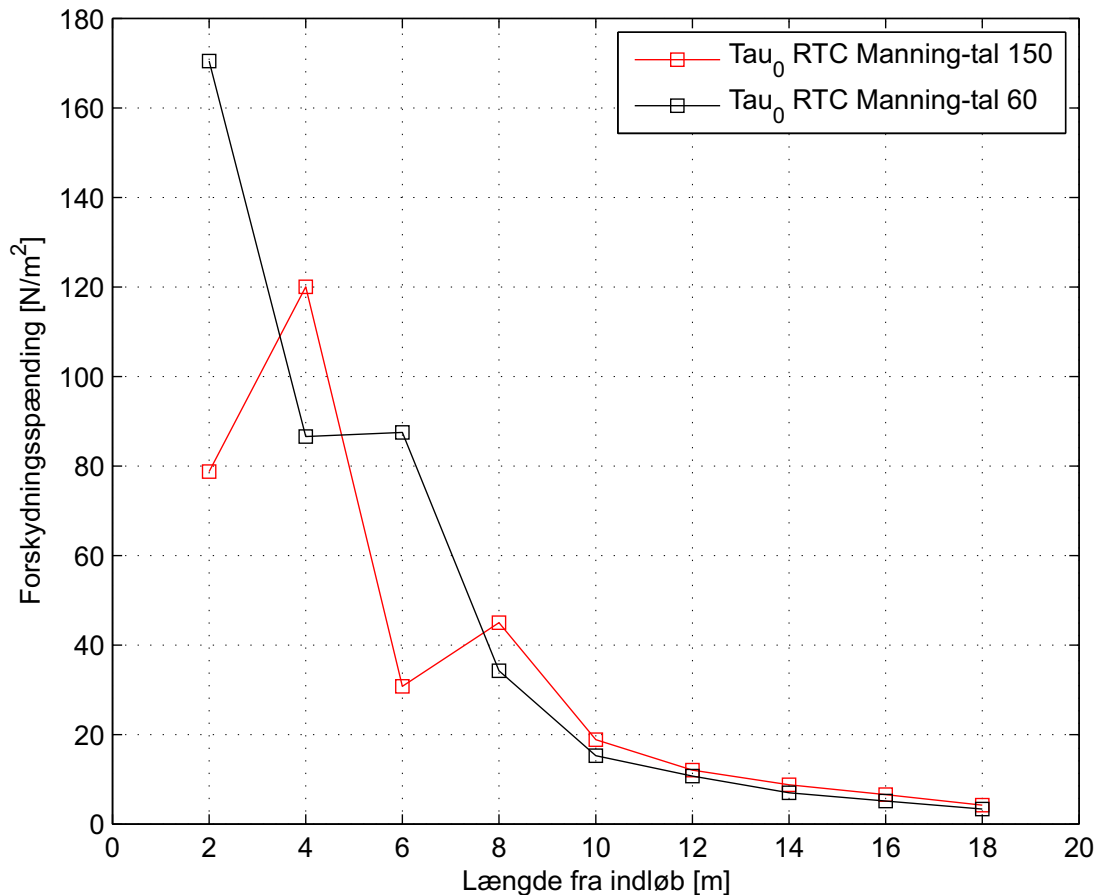
Forskydningsspændingen beregnes ud fra friktionstallet fundet ved iteration i Colebrook-Whites formel vist i kapitel 3. Den ækvivalente sandruhed findes ud fra Manning-tallet. Ud fra de valgte forudsætninger findes forskydningsspændingen for de to modelopsætninger som funktion af kanalens længde på figur 7.9.



Figur 7.9. Forskydningsspænding som funktion af længden for to modelopsætninger. Friktionstal bestemt ved iteration af Colebrook-Whites formel.

Forskydningsspændingerne er høje i starten og falder eksponentielt over kanalens længde. Efter 8 m er forskydningsspændingerne ens for de to modelopsætninger, og afvigelsen herefter er lille. Selvom der er en forskel på vandføringen og hastigheden ved de enkelte opsætninger, udjævnes denne ved beregningen af forskydningsspændingen.

På figur 7.10 er forskydningsspændingen udregnet med Mike Urbans ST-modul. Forskydningsspændingerne udregnes ud fra samme grundformel, men med et friktionstal som er udledt for den eksplícitte Manning-formel, som også blev benævnt i kapitel 3.



Figur 7.10. Maksimale forskydningsspændinger beregnet Mike Urbans ST-modul. Friktionstal bestemt ud fra udledning af den eksplícitte Manning-formel.

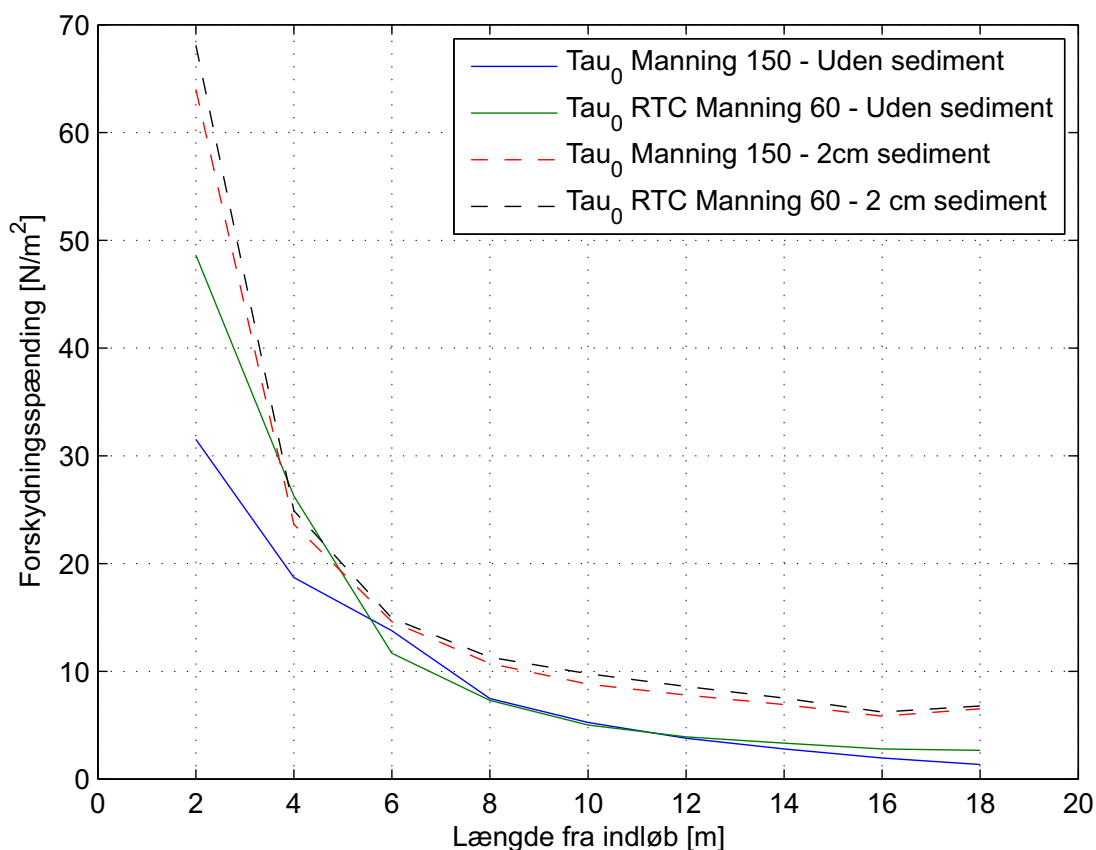
Forskydningsspændingerne udregnet på baggrund af et friktionstal, bestemt ud fra den eksplícitte Manning-formel, virker mere ustabile end ved anvendelse af Colebrook-Whites formel. Modelopsætningen med et Manning-tal på 150 ses at have en maksimal forskydningsspænding ved 4 m. Dette virker misledende, eftersom både vandføringen og hastigheden i dette punkt er lavere end tidligere. Ved ca. 12 m udregnes forskydningsspændingen ensformigt for de to model opsætninger, mens værdien heraf stadig er en del større end ved anvendelse af Colebrook-Whites formel.

Indtil videre er forskydningsspændingen kun udregnet for en situation uden sediment. Forskydningsspændingerne vil ændres, som funktion af den ændrede ruhed fra sedimentet, og betydningen af dette evalueres igennem et ændret Manning-tal. I kapitel 3 er det beskrevet hvordan den totale modstand på flowet kan beregnes som summen af modstanden på forskellige dele af flowet. Den våde perimeter for flowet er dermed styret af vanddybden, mens den våde perimeter for sediment er konstant, fordi der anvendes en rektangulær kanal. Det antages endvidere, at Manning-tallet for sedimentet kan udregnes jævnfør ligning (7.1), hvor d er middelkornstørrelsen. (DHI, 2015a).

$$M = \frac{25.4}{(2.5d)^{\frac{1}{6}}} \quad (7.1)$$

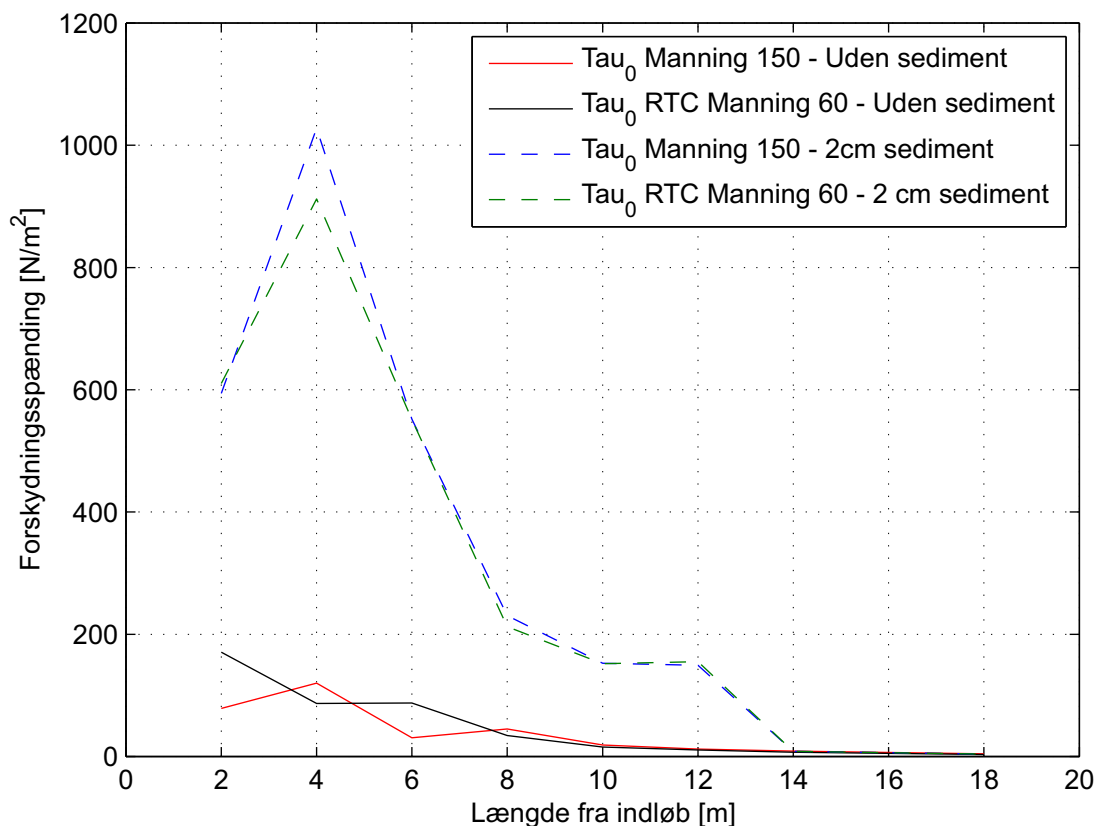
Til forskel fra det rene rør varieres modstanden nu som funktion af vanddybden, og det vil nu være muligt at udregne en forskydningsspænding, som afhænger af modstanden fra sedimentet. Manning-tallet for det anvendte sediment udregnes til 43,9, ud fra en sedimentdiameter på 15 mm. Kanalen er bredere end den er høj, og de maksimale dybder er relativt små i forhold til højden. Manning-tallet vil derfor tilnærmes det fundne for sedimentet, fordi bundbredden udgør en større andel af den totale våde perimeter. Derudover er der anvendt groft sediment, hvilket betyder, at ruheden på hele bunden er høj. Sedimentlaget sættes i den numeriske model til at have en tykkelse på 2 cm, hvilket var den anvendte tykkelse i det praktiske forsøg.

På figur 7.11 er forskydningsspændingerne udregnet med en vægtning af Manning-tallet for henholdsvis modelopsætningen med et Manning-tal for vægelementerne på 150 og 60. Ved at tilføje et sedimentlag på 2 cm bliver forskydningsspændingerne ensartet for begge opsætninger af Manning-tallet. Dette skyldes, at det vægtede Manning-tal og dermed ruheden, varierer meget lidt. De hydrauliske parametre i begge modeller, bestemmes dermed ud fra næsten den samme ruhed.



Figur 7.11. Forskydningsspænding som funktion af længden for to modelopsætninger. Friktionstal bestemt ved iteration af Colebrook-Whites formel.

Dette kan desuden ses på figur 7.12, hvor forskydningsspændingen er udregnet med ST-modulet. Udover størrelsen af forskydningsspændingerne ses at begge modeller giver næsten det samme resultat. Ud fra resultaterne ved beregning med ST-modulet, må det konkluderes, at modulet ikke kan anvendes til beregning af forskydningsspændingerne i den første del af skyllesystemet.



Figur 7.12. Forskydningsspænding som funktion af længden for to modelopsætninger. Friktionstal bestemt ved iteration af Colebrook-Whites formel.

Ud fra undersøgelsen af forskydningsspændingerne viste det sig, at der er en stor forskel mellem de udregnede forskydningsspændinger afhængigt af udregningspunktet. Forskellen er størst i starten af systemet, og efter en vis dæmpningslængde, begynder forskydningsspændingerne at falde lineært. Det er i Mike Urban kun muligt, at specificere en sedimentdybde over hele ledningen, og det er derfor ikke muligt, at opsætte en situation hvor sedimentlaget først begynder længere nede i systemet, som det er udformet i det praktiske forsøg. De forskydningsspændinger der optræder, må dog forventes at være en kombination af de udregnede for henholdsvis en ren og sedimentfyldt ledning.

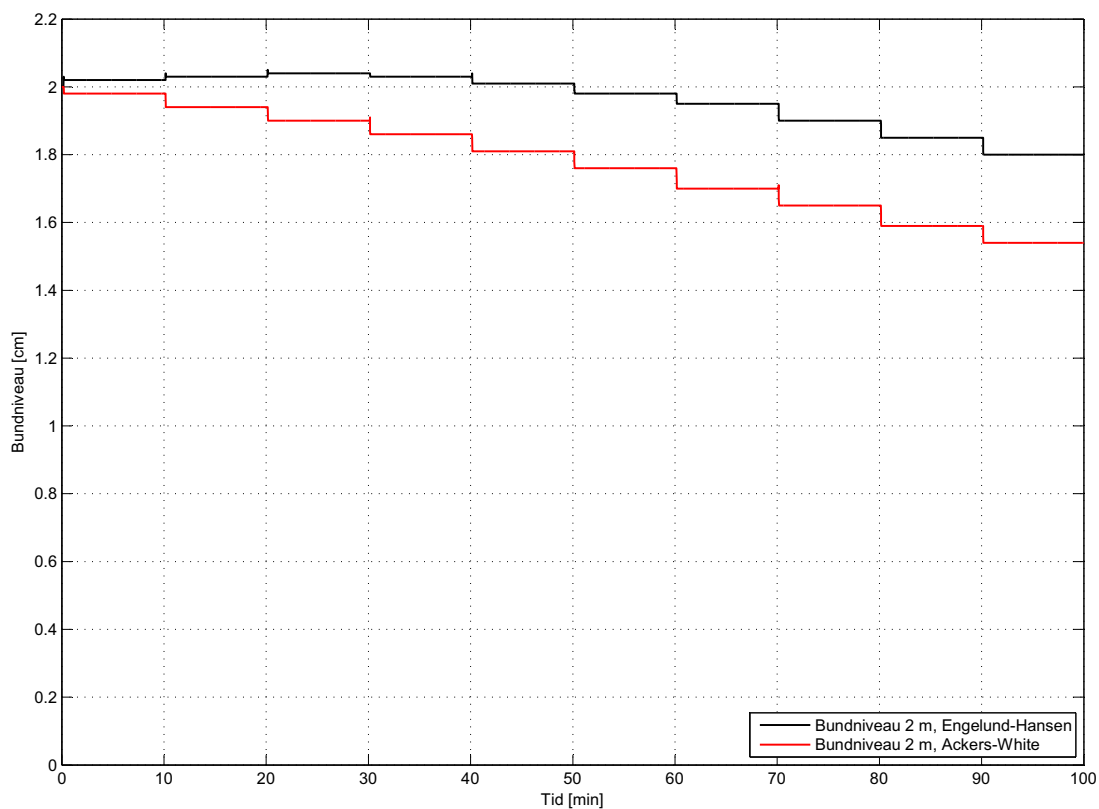
7.5 Udregning af ændring i bundniveau

Forskydningsspændingerne udregnet igennem ST-modulet er urealistisk høje, og det forventes derfor, at alt sedimentet i den første del af kanalen fjernes. Tidligere blev det konkluderet, at de fleste almindelige sedimenttransport formularer kan have problemer med at håndtere høje forskydningsspændinger.

I det praktiske forsøg blev sedimentlaget flyttet ca. 0,4 m per skyl, og det vil derfor kræve mindst 5 skyl før alt sedimentet ved første beregningspunkt, 2 m, er skyllet væk.

I Mike Urban opsættes en RTC-model med ti gentagne skyl, skyllene styres ud fra en tidsserie, hvor bassinet fyldes op med 10 minutters mellemrum. Opfyldningen aktiverer en sensor i bassinet som styrer skylleklappen, hvormed der laves et skyl hvert tiende minut. Tiden mellem skyllene er valgt ud fra en analyse af tømningstiden af det tilbageliggende vand i systemet. Der er udlagt et jævnt sedimentlag med en tykkelse på 2 cm i hele kanalen, og middeldkornstørrelsen er sat til 15 mm.

På figur 7.13 er bundniveauets udvikling som funktion af tiden vist for de to udvalgte sedimenttransport modeller. Ud fra resultaterne, er der ingen af modellerne der er i stand til at beskrive den transport der skete i det praktiske forsøg.



Figur 7.13. Bundniveau ved 2 m fra indløb som funktion af tiden.

Udviklingen i bundniveauet beskrevet ud fra Engelund-Hansens teori estimerer en mindre stigning i bundniveauet efter de første fire skyl, hvilket betyder, at der er sket en mindre transport på de første par metre. Herefter flyttes en mindre del sediment over de næste seks skyl og bundniveauet ender med at have en tykkelse på 1,8 cm. Ud fra Engelund-Hansens teori flyttes hermed 0,2 cm sediment fra den oprindelige jævne fordeling. Ackers-Whites teori estimerer ikke nogen stigning, men derimod en jævn transport over alle ti skyl. Tykkelsen af bundniveauet ender på 1,55 cm, hvilket svarer til en ændring på 0,45 cm fra den oprindelige situation. Ud fra resultaterne er det ikke nødvendigt at analysere bundniveauet i flere snit i kanalens længde, eftersom transporten ved 2 m er minimal.

En af årsagerne til den minimale transport kan være valget af middeldkornstørrelsen, som i forsøget er sat til 15 mm, hvilket er højt i forhold til mange andre analyser. Kornstørrelsen kan desuden være uden for gyldighedsområdet af de to anvendte teorier, hvilket betyder at transporten ikke beregnes korrekt. I manualen til transport modulet er der ikke specificeret nogle krav til sedimentstørrelsen, og viden herom skal derfor findes andre steder. Et studie af sedimenttransport formularernes applikationsområde er udenfor horisonten af dette projekt, og det konkluderes derfor, at de valgte formularer ikke umiddelbart kan anvendes til at beskrive transporten i forsøgsopsætningen.

Resultat af modelleringen med Mike Urban kan opsummeres i følgende punkter:

- Den opstillede standard model gav ikke tilfredsstillende resultater for strømningsforholdene, og blev derfor tidligt valgt fra.
- Modellen med RTC-randbetingelse kunne ikke direkte kalibreres ved ændring af Manning-tallet.
- To modelopsætninger med henholdsvis et højt og et lavt Manning-tal blev udvalgt og forskydningsspændingen blev derefter udregnet for begge opsætninger.
- Forskydningsspændingen udregnet med et friktionstal bestemt ud fra Colebrook-Whites formel samt flow parametre fra den numeriske model, viste et fint forløb af forskydningsspændingerne over kanalens længde.
- Forskydningsspændingerne udregnet med Mike Urbans ST-modul var i starten af systemet uregelmæssigt høje både for en ren ledning og med sedimentdelfyldning. Efter en vis længde, begyndte resultaterne at være tilfredsstillende.
- Anvendelse af sedimenttransport formularerne gav ikke et tilfredsstillende resultat, hvorvidt dette skyldes de fejlagtige forskydningsspændinger udregnet af ST-modulet, eller formularernes begrænsning undersøges ikke yderligere.

8. Opsamling af resultater

I dette kapitel sammenlignes resultaterne fra det praktiske forsøg med resultaterne fra de opstillede Mike Urban-modeller. Det undersøges, om de transporterede sedimentmængder fra kapitel 6, hænger sammen med de forskydningsspændinger som blev udregnet i kapitel 7

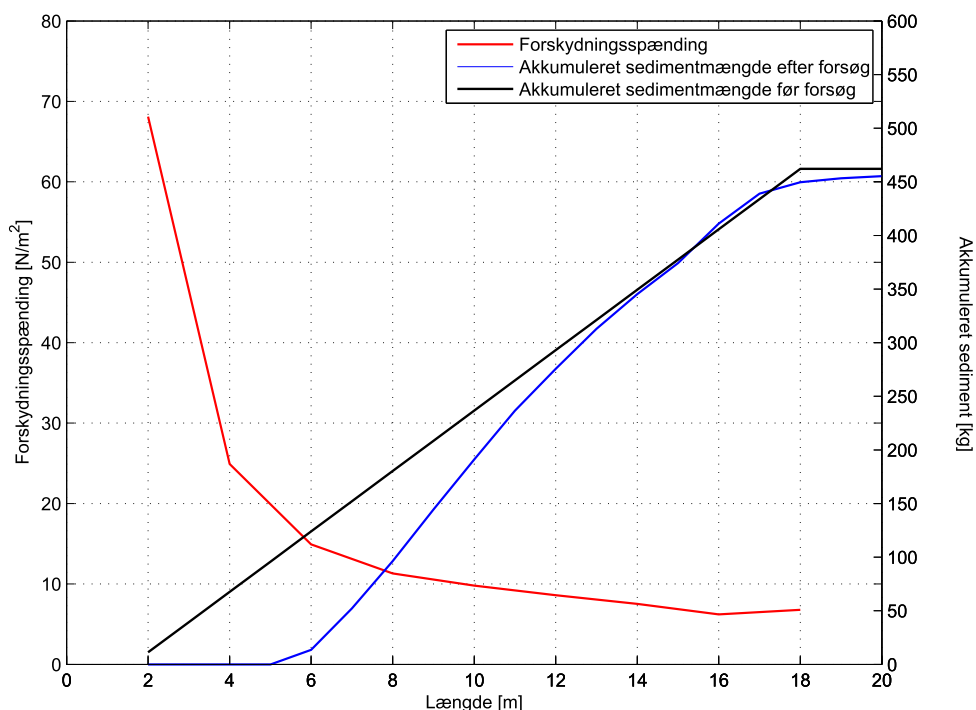
8.1 Sammenligning af transport og forskydningsspændinger

I kapitel 6 blev der lavet et sedimenttransport forsøg med ru bund bestående af sediment med en middeldkornstørrelse på 15 mm. Udviklingen i den transporterede mængde sediment blev målt efter ti gentagne skyl med et fast skyllevolumen på $1,07 \text{ m}^3$. Udgangssituation for forsøget bestod af et jævnt fordelt sedimentlag med 2 cm tykkelse, som blev placeret fra 1,4 til 18 m. Den udlagte totalmængde blev efter opvejning fundet til 465 kg, hvilket giver en jævn fordeling af sedimentet på 28 kgm^{-1} . Efter de ti skyl blev sedimentet samlet op meter for meter for at kunne analysere effekten af skyllebølgerne på sedimentlaget. Resultaterne viste, at de ti bølger have flyttet sedimentlagets start 4 m og fordelt denne mængde sediment ud på de efterfølgende ca. 8 m. I løbet af forsøget blev der skyllet 2,7% af den totale sedimentmængde ud i udløbet, og det vurderes derfor, at skyllevolumenet størrelse har været tilfredsstillende. Dette skyldes, at hensigten med forsøget ikke var at måle af hvor mange skyl, der skulle genereres før hele den udlagte mængde var skyllet ud, men nærmere at bestemme en sammenhæng mellem den transporterede mængde sediment og de forskydningsspændinger, der optræder i systemet.

Efter det praktiske forsøg blev der opstillet to numeriske modeller i Mike Urban, som blev kalibreret på baggrund af det målte data fra forsøget. Det viste sig endvidere, at der ikke kunne opstilles en numerisk model med et sedimentlag, der var sammenligneligt med laget i det udførte forsøg. Istedet for at modellere transporten igennem de numeriske modeller, blev forskydningsspændingen derfor udregnet efter to forskellige metoder. Metoderne var henholdsvis igennem friktionstallet ved iteration af Colebrook-Whites formel og Mike Urbans indbyggede beregningsmodul ST-modulet. I undersøgelsen blev det klart, at Mike Urbans ST-modul ikke kunne anvendes til at bestemme forskydningsspændingerne i den første del af skyllesystemet. Dette skyldes højst sandsynligt, at gyldighedsområdet for anvendelse af Manning-formlen ikke er overholdt i starten af skyllesystemet, hvor den hydrauliske radius er høj, samtidig med at ruheden er høj på grund af sedimentlagets indflydelse herpå. Det blev derfor konkluderet, at forskydningsspændingerne udregnet på baggrund af iteration i Colebrook-Whites formel, gav et bedre bud på forløbet igennem skyllesystemet. Afhængig af hvilken opsætning og metode der blev anvendt, var forløbet af forskydningsspændingerne i starten eksponentielt faldende, indtil ca. halvdelen af rørbassinets længde, hvorefter faldet skete lineært.

På figur 8.1 ses hovedresultaterne for henholdsvis de modellerede forskydningsspændinger, samt den akkumulerede sedimentmængde, begge som funktion af rørbassinets længde. På figuren ses at de største forskydningsspændinger opstår i starten af skyllesystemet, og ved ca 8 m begynder det

lineært faldende forløb. Undersøges den akkumulerede transportmængde i samme længdeforløb, ses at alt sediment er flyttet de første 6 m, samt at der kun ligger en lille mængde sediment mellem 6 og 8 m. Herefter stiger den akkumulerede mængde forholdvist stabilt, hvilket indikerer, at hver skyllebølge blot har ført sediment en stykke videre.



Figur 8.1. Venstre y-akse viser forskydningsspændingen udregnet for en sedimentdybde på 2 cm, ud fra friktionstallet som funktion af længden i strømningsskanalen. Højre y-akse viser den akkumulerede sedimenttransport som funktion af den samme længde.

Ved 14 m er den akkumulerede mængde sediment ens før og efter forsøget, og forskydningsspændingen i dette område er ca. 8 Pa. Det forventes derfor, at der kræves en forskydningsspænding på omkring denne værdi, for at flytte de grove sedimenter der anvendes i forsøget. Sedimentlagets start flyttes mellem hver eneste skyllebølge i forsøget, og hver bølge vil således have en reduceret forskydningsspænding ved sammenstød med sedimentlaget, på grund af tabet til ruheden på væg og bundelementerne. Den beregnede forskydningsspænding er fundet ud fra forudsætning om en komplet ru bund med et sedimentlag på 2 cm, derudover er bundniveauet fastholdt, således at ruheden kun varieres igennem Manning-tallet.

9. Casestudie: Damhusledningen

I dette kapitel undersøges rørbassinet, Damhusledningen. Indledende undersøges resultater fra et udleveret udkast til projektet af NIRAS. Projektet analyseres derefter igennem anvendelse af de opstillede Mike Urban-modeller samt resultater og erfaringer fra skyllensystems forsøget.

9.1 Introduktion til casen

I forbindelse med klimasikringen af boligområder og strengere kvalitetskrav til recipienter er det blevet besluttet, at etablere et stort bassin anlæg til opsamling af vand fra overløbsbygværker langs Damhusåen i København. Bassin anlægget udføres som et rørbassin og en skitseplan for projektet er vist på figur 9.1. NIRAS (2012)



Figur 9.1. Skitseplan af bassinledningen og bygværkerne. NIRAS (2012)

Ledningen løber i sydgående retning mod rensningsanlægget, hvor vandet efter tilbageholdelse skal pumpes til rensning. Til at sikre renholdelsen af bassinledningen skal der projekteres et skyllesystem. Dimensioneringen af skyllesystemet undersøges nærmere, med hensyn til beregning af forskydningsspændingerne. Forskydningsspændingerne er udregnet ved bundforskydningsformlen præsenteret i kapitel 3, med vanddybder fundet ud fra en numerisk model i Mike Urban.

9.1.1 Dimensionerings parametre

I det udleverede udkast til projektet er dimensionerings parametrene for rørbassinet givet i tabel 9.1.1. De anførte værdier er ikke endegyldige, men disse anvendes indledningsvist til at analysere systemet.

Længde	Diameter	Hældning	Skyllervolumen
[m]	[m]	[‰]	[m ³]
3400	3	1	1500

Tabel 9.1. Dimensionerings parametre for Damhusledningen jævnfør NIRAS (2012).

Skyllervolumenet er bestemt ud fra den mængde vand, der forventes at blive tilført systemet i start bygværket, og det vil derfor være ideelt, hvis dette skyllervolumen er tilstrækkeligt til renholdelse af hele ledningen.

9.2 Resultater fra indledende simulering

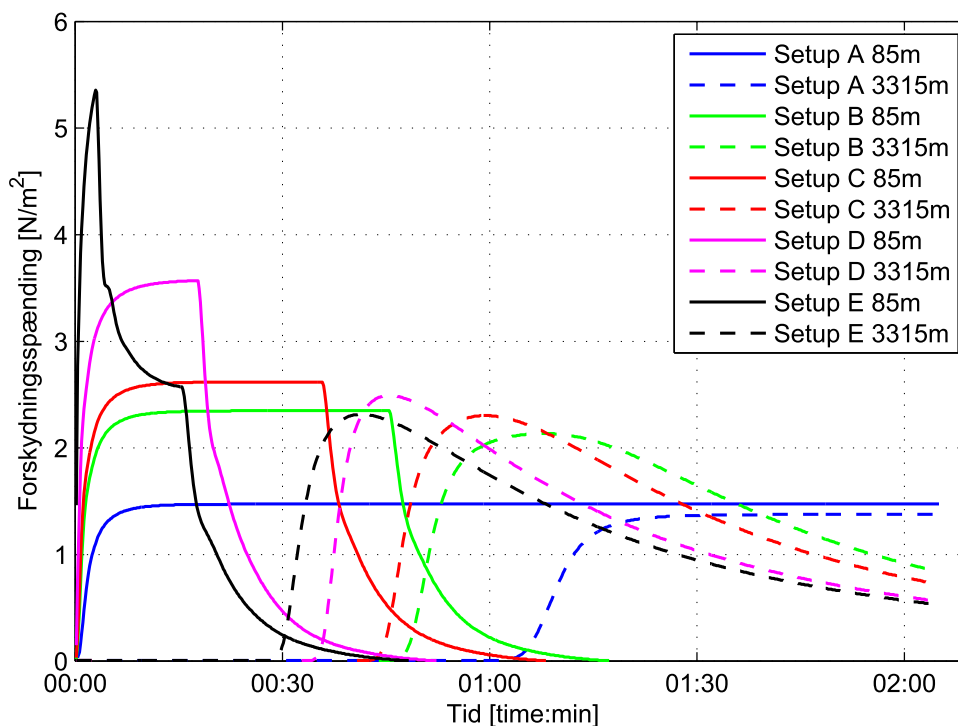
Forskydningsspændingen beregnes i to punkter, henholdsvis 85 m og 3315 m. Punkterne angiver det første beregningspunkt efter ledningsstart og det sidste punkt før slut. I udkastet opstilles fem forskellige flowscenarier, som består af fire konstante inputflows samt en model med varieret flow, med henblik på at lave en bølgeeffekt. Scenarierne fremgår af tabel 9.2.

Setup	Beskrivelse
A	Konstant 200 ls ⁻¹
B	Konstant 550 ls ⁻¹
C	Konstant 700 ls ⁻¹
D	Konstant 1400 ls ⁻¹
E	Varieret flow

Tabel 9.2. Forskellige flow scenarier der analyseres i Mike Urban.

Tidsserien til de forskellige setups er tilpasset således, at den samlede vandmængde bliver 1500 m³ i alle tilfælde.

Mike Urban-modellen, der anvendes til analysen, er opbygget på samme måde som standard modellen beskrevet i kapitel 7. Dette betyder, at bygværkerne langs ledningen ikke er medtaget, da disse kan give anledning til problemer, hvis de ikke er beskrevet præcist med hensyn til enkelttab. Yderligere er forskydningsspændingen beregnet for en ren ledning og ruheden vil derfor kunne være ændret i en situation med sediment på bunden. Resultater for forskydningsspændingen i de forskellige scenarier er illustreret på figur 9.2. Udover dette er specifikke talresultater for beregningspunktet ved 3315 m fremhævet i tabel 9.3.



Figur 9.2. Beregnede forskydningspændinger som funktion af tiden i stationering 85m og 3315m for forskellige flow scenarier. Lavet ud fra NIRAS (2012)

Ud fra resultaterne fremgår det, at der er en synlig forskel i forskydningspændingen i det første beregningspunkt, hvorimod forskellen er mindre i slutningen af ledningen. Desuden virker en høj konstant vandføring til at give det bedste resultat, hvis det sidste beregningspunkt er mest kritisk.

Setup	Varighed tau > 2	Maks. tau
	[min]	[Nm ⁻²]
A	0	1,37
B	19	2,13
C	21	2,30
D	21	2,50
E	17	2,32

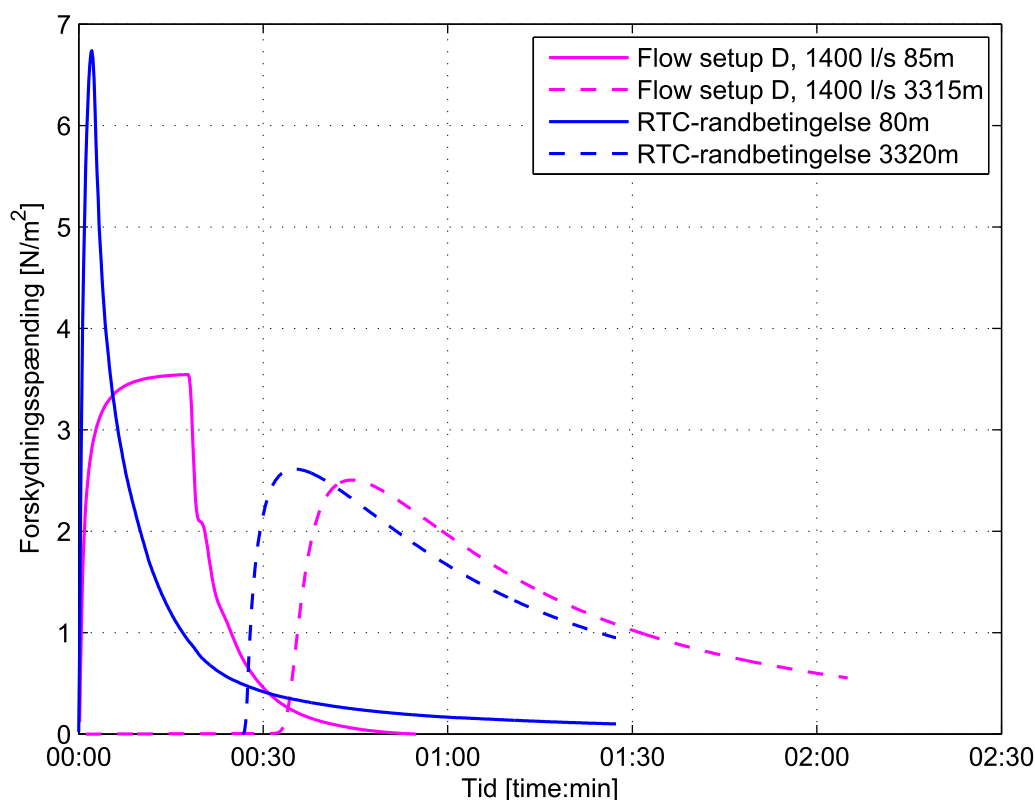
Tabel 9.3. Varighed af forskydningspænding over 2Pa og maksimal forskydningspænding ved 3315m for forskellige flow scenarier.

I den videre analyse af systemet forsøges det at opstille en model, der skaber en bølge, som er afhængig af vandspejlet. Dette gøres ved hjælp af RTC-modulet i Mike Urban, som bruges til at lave en randbetingelse for starttilstanden af skyllevolumenet. I den videre undersøgelse sammenlignes der med resultatet fra flow setup D, eftersom dette setup gav de bedste resultater for forskydningspændingen.

9.3 Resultater ved ændret randbetingelse

Til at analysere forskellen mellem forskydningsspændingerne fra en konstant vandføring og en bølge, som er afhængig af vandspejlet, opsættes en model efter metoden angivet i kapitel 7. Bassinet, der skal tilbageholde 1500 m^3 vand, har dimensionerne $20 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 7,5 \text{ m}$ i forholdet LxBxH. Bassinet er udformet uden hensyn til de aktuelle praktiske muligheder på projekt lokaliteten. Skylleklappens bredde sættes til 2 m og højden til 1 m.

På figur 9.3 er forskydningsspændingerne vist for henholdsvis flowsetup D og modellen med en vandspejlsafhængig bølge. Det er tydeligt, at den vandspejls afhængige bølge har et langt større peak, hvilket måtte forventes eftersom vandføringen er kortvarigt højere efter åbning af skylleklappen. Forskellen i beregningspunkterne mellem de to modeller skyldes endvidere en ændret grid størrelse i modellen med RTC-randbetingelse.



Figur 9.3. Forskydningsspændinger udregnet efter bundforskydningsformlen med vanddybder fra henholdsvis flow setup D, og en model med vandspejlsafhængig bølge.

De to modelopsætninger kan sammenlignes ud fra varigheden af en forskydningsspænding over 2 Pa og de maksimalt forekomne forskydningsspændinger, resultaterne findes i tabel 9.4.

		Flow setup D		RTC setup	
		85 m	3315 m	80 m	3320 m
Varighed tau > 2	[min]	20	21	10	22
Maks. tau	[Nm ⁻²]	3,55	2,50	6,74	2,61

Tabel 9.4. Varighed af forskydningsspænding over 2 Pa samt maksimal forskydningsspænding i to beregningspunkter, for flow setup D og RTC setup.

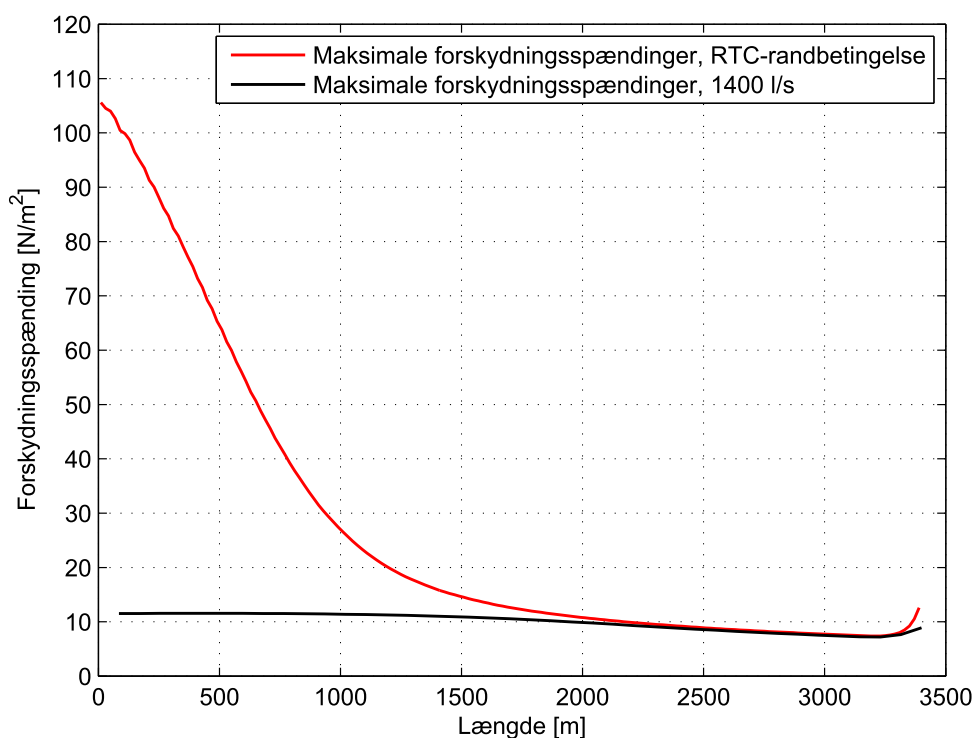
Ved en konstant vandføring på 1400 l s^{-1} opretholdes en forskydningsspænding over 2 Pa i starten af ledningen, dobbelt så lang tid, som ved en vandspejlsafhængig bølge. I slutningen af ledningen er bølgerne fladet ud og har næsten de samme varigheder og forskydningsspændinger. Den maksimale forskydningsspænding er desuden højere i starten af ledningen ved en skyllebølge.

De udregnede forskydningsspændinger må forventes at give et konservativt bud på de reelle forskydningsspændinger. Dette skyldes, at det tidligere blev vist at hastigheden og dermed energien er langt større ved en bølge lavet med RTC-randbetingelse. I det næste afsnit udregnes forskydningsspændingerne derfor ud fra friktionstallet, med vanddybder og vandføringer fra den numeriske model.

9.4 Beregning af forskydningsspænding ud fra friktionstallet

Ved undersøgelse af transporten i strømningskanalen var der en god relation mellem størrelsen af forskydningsspændingerne udregnet ved friktionstallet og den observerede transport. Beregningsmetoden anvendes derfor til at analysere forskydningsspændingerne i Damhusledningen. Forskydningsspændingerne undersøges for begge de opstillede modeller.

Der antages en værdi for den ækvivalente sandruhed på $0,7 \text{ mm}$, hvilket svarer til det Manning-tal modellen normalt anvender, hvis ikke andet er valgt. På figur 9.4 er forskydningsspændingen sammenlignet for de to forskellige randbetingelser, RTC-randbetingelse og konstant vandføring på 1400 l s^{-1} .



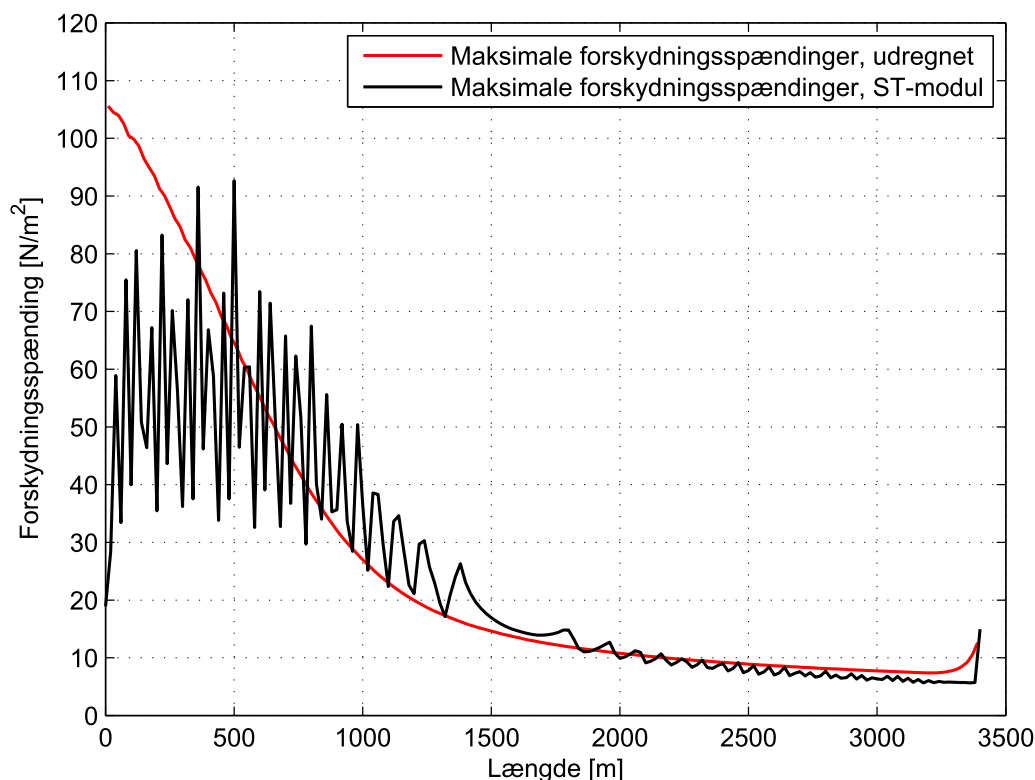
Figur 9.4. Forskydningsspænding over rørbassinets længde beregnet ud fra friktionstallet. Input data er hentet fra modellen med RTC-randbetingelse og modellen med en konstant vandføring på 1400 l s^{-1} .

På figuren ses, at forskydningsspændingen ved at opsætte den numeriske model med en RTC-

randbetingelse er ca. en faktor 10 højere end ved en standard modelopsætning med en konstant vandføring på 1400 l s^{-1} . Dette skyldes, at hastigheden og vandføringen i starten er større i den vandspejlsafhængige model. Forløbet i starten adskiller sig dermed meget fra hinanden, men efter ca. 2000 m begynder forløbene at følge hinanden. Selvom RTC-modellen estimerer en langt højere forskydningsspænding i starten, er den kritiske forskydningsspænding i slutningen sammenfaldende for de to opsætninger. Størrelsen af forskydningsspændingen i slutningen af ledningen er tilgængelig langt større ved udregning med friktionstallet, end ved den simple bundforskydningsformel. I en dimensioneringsammenhæng konkluderes det, at anvendelse af den simple formel giver et konservativt bud på de forskydningsspændinger, der opstår i systemet.

9.5 Udregning af forskydningsspændinger i Mike Urban

I kapitel 7 blev det undersøgt, om Mike Urbans ST-modul kunne anvendes til at bestemme forskydningsspændingerne i et skyllesystem. Resultaterne viste, at modellen havde svært ved at beskrive forskydningsspændingen i den første del af skyllesystemet. Dette skyldes, sandsynligvis de høje hastighedsgradienter, der er tilstede, i dette flowområde. Det undersøges nærmere, om dette igen kan være et problem. På figur 9.5 fremgår forskydningsspændingerne udregnet med henholdsvis friktionstallet og ST-modulet. Ud fra figuren ses at forskydningsspændingerne fluktuerer i den første del af rørbassinet, og efter ca. 2000 m begynder forskydningsspændingerne at se normale ud.



Figur 9.5. Forskydningsspænding over rørbassinet længde beregnet ud fra friktionstallet, samt Mike Urbans ST-modul. Input data er hentet fra modellen med RTC-randbetingelse.

I den sidste del af rørbassinet er forskydningsspændingerne næsten ens for de to beregningsmetoder, og ud fra sammenligningen mellem den numeriske model og det praktiske forsøg, må det konkluderes, at disse resultater er holdbare. Ifølge figuren ligger alle de udregnede forskydningsspændinger over 5 Pa, dette er imidlertid langt højere end hidtil beregnet, og hvorvidt de udregnede forskydningsspændinger er realistiske kan diskuteres. Forskydningsspændingernes længdeforløb stemmer godt overens med forløbet fundet i de numeriske modeller til afbildning af forsøget. Dette ses ud fra det eksponentielt faldende forløb fra starten af rørbassinet til omkring halvvejs, hvorefter der sker et lineært fald.

10. Diskussion

I dette kapitel diskuteres kort valgene foretaget i projektet med hensyn til opstilling af de numeriske modeller og det praktiske forsøg. Herudover diskuteres forudsætningerne for beregningerne og valget af metoder.

I projektet blev der opstillet et praktisk forsøg, formålet med forsøget var, at analysere de forskydningsspændingerne der opstår i et skyllesystem til rørbassiner. Indledningsvist blev der foretaget forsøg med stationær strømning, for at validere beregningsevnen af de numeriske modeller. I den indledende undersøgelse blev det klart, at vanddybden målt manuelt, ikke var anvendelig på grund af små udsving i pumpens ydelse. Kort efter blev der opsat ti bølgemålere, og disse blev kalibreret ud fra en tætnet kanal. Ud fra forsøgsdataene er der ikke en tydelig variation mellem de sidste to målinger ved henholdsvis 15 og 18 m fra indløb. Dette virker unormalt, eftersom der imellem alle de andre målere sker en ændring i bølgens udformning og middelhastighed. Derudover er den relative svingning høj i forhold til de modellerede vanddybder fra de numeriske modeller. Det må forventes, at bølgen efter en vis længde dæmpes, og at forstyrrelserne introduceret af turbulensen i starten mindskes. Ved sammenligning af de numeriske modeller, blev det konkluderet, at det ikke var muligt, at lave en passende kalibrering for både middelhastigheden af bølgen til et specifikt punkt og de maksimale vanddybder. Hvis målingerne fra det praktiske forsøg i de sidste målepunkter, har været ustabile eller misledende, er beregningsevnen af de numeriske modeller blevet fejlagtigt vurderet.

Opsætningen af det praktiske forsøg har endvidere introduceret en række usikkerheder i de numeriske modeller. Disse kan bedst opsummeres ved følgende punkter:

- Indløbet til strømningskanalen er forskudt for midten af opstuvningsbassinet, hvilket introducerer en forstyrrelse i flowet ved indløbet.
- Størrelsen af enkelttabet ved indløbet er ikke blevet vurderet nærmere, eftersom forstyrrelserne i flowet ved indløb er store.
- Strømningskanalens ene side består af glas, mens bunden samt den anden side består af træplader. Dette medfører, at ruheden er lavere i den ene side af kanalen, og vandet vil derfor flyde hurtigere langs denne væg. Kombineret med den fysiske forskydning af indløbet i forhold til bassinets midte, giver dette en ændring i flowet.
- Strømningskanalen har ingen hældning, hvilket i mange tilfælde gjorde de numeriske modeller ustabile, på grund af negativt flow i den sidste del af simuleringsperioden.

Materiale opbygningen af strømningsranden har en indflydelse på de forskydningsspændingerne, der reelt opstår under de enkelte skyl. Forskydningsspændingerne udregnes indledningsvist, som jævnt fordelt over tværsnittet, ud fra to opsætninger af Manning-tallet. I en praktisk situation, vil de forskellige dele af den våde perimenter bidrage med forskellige ruheder. Glasset, træpladen og sedimentet har alle forskellige ruheder, og flowet er derfor påvirket af mange forskellige kræfter. Beregning af forskydningsspændingerne i en sediment fyldt ledning viste endvidere, at de grove sedimenter på bunden blev styrende for den totale ruhed på flowet. Det kunne

derfor have været interessant, at undersøge flowet igennem anvendelse af en 3D-model med flere opsætningsmuligheder. Brugen af 1D-modeller er udbredt, fordi beregningstiden er lav, og ved passende kalibrering giver modellerne ofte et tilfredsstillende resultat.

I projektet er forskydningsspændingerne udregnet ud fra friktionstallet på to forskellige måder herunder:

- Iteration i Colebrook-Whites formel
- Udledning af friktionstallet igennem Manning-formlen ved anvendelse af modstandsformlen til beskrivelse af energilinjegradienten.

Colebrook-Whites formel forudsætter en jævn fordeling af vægforskydningsspændingerne, hvorvidt dette er korrekt under ikke-stationære forhold ved skyllebølger er uvist. Resultaterne fundet ved anvendelse af friktionstallet virker dog realistiske, når de sammenlignes med transporten fra det praktiske forsøg. Manning-formlen har et gyldighedsområde, som afhænger af forholdet mellem den ækvivalente sandruhed og den hydrauliske radius. Dette forhold er ikke overholdt i den første del af skyllesystemerne, hvilket besværliggør sammenligningen af de udregnede forskydningsspændinger. Anvendelse af ST-modulet kan derfor afgrænses til de mere dæmpede forhold i et skyllesystem, hvilke opstår ca. halvvejs af ledningens længde.

Da forskydningsspændingerne bestemt ud fra Mike Urbans ST-modul ikke var tilfredsstillende i den første del af skyllesystemet, blev det fravalgt at foretage simuleringer for at vurdere transporten, hvilket ellers var hensigten fra starten. En kort undersøgelse viste dog, at sedimentet ikke blev flyttet tilstrækkeligt i den numeriske model ved ti gentagne skyl. Et litteratur studie viste desuden, at de almindelige sedimenttransport formularer ikke er udstyrede til at beregne transporten ved høje forskydningsspændinger hvilke der opstår i skyllesystemets start. En mere dybdegående analyse af sammenhængen mellem det anvendte skyllevolumen og den transporterede mængde sediment ved forskellige kornstørrelser kunne have forstærket beregningsgrundlaget.

11. Konklusion

Med udgangspunkt i de opstillede problemstillinger fra kapitel 4 kan det efter undersøgelse af forskydningsspændingerne i det opstillede skyllesystem konkluderes, at teorien ikke direkte kan anvendes til at beskrive alle flowområder i systemet. Dette var mest tydeligt ved udregning af forskydningsspændingerne langs Damhusledningens startforløb, som viste store udsving i forskydningsspændingen mellem beregningspunkterne. Efter en vis dæmpningsperiode kunne teorien anvendes uden nogen form for instabilitet betinget af, at gyldighedsområdet for teorien nu var overholdt. Formålet med projektet var at undersøge forskydningsspændingerne i et skyllesystem lavet til rørbassiner. I rørbassinerne vil det almindeligtvis være forskydningsspændingen i den sidste del af røret, der er den mest kritiske. Det må derfor konkluderes, at denne godt kan udregnes med almindelig teori udledt for stationære forhold, fordi bølgen i dette område er dæmpet i et omfang, hvor teorien leverer tilfredsstillende resultater. Endvidere var der en god sammenhæng mellem de beregnede forskydningsspændinger og den observerede transport i det praktiske forsøg. Det konkluderes derfor at hele forløbet af den maksimale forskydningsspænding kan beskrives ud fra teori udledt for stationære strømninger hvis friktionstallet bestemmes ud fra Colebrook-Whites formel.

I projektet blev transporten af sediment vurderet ud fra et forsøg med ti gentagne skyl, og den akkumulerede sedimentmængde blev derefter sammenlignet med de udregnede forskydningsspændinger over kanalens længde. Transporten blev dermed ikke direkte analyseret ved hjælp af Mike Urbans ST-modul, men ud fra forskydningsspændingerne udregnet på baggrund af flowparametrene fra den numeriske model. En kort undersøgelse af ændringen i bundniveau viste ikke tilfredsstillende resultater. I det undersøgte punkt burde alt sedimentet være flyttet efter ti skyl, men modellerne estimerede kun en minimal ændring. Forskydningsspændingerne blev fejlagtigt bestemt i den første del af skyllesystemet, og det kan derfor ikke direkte konkluderes, hvorledes valget af bestemte transportformularer har en indflydelse på den beregnede transport.

Ud fra undersøgelsen af forskydningsspændingerne i det opstillede skyllesystem må det konkluderes, at 1D-modellen giver tilfredsstillende resultater. Dette begrundes med, at forskydningsspændingerne i den sidste del af systemet var af en størrelsesorden, der virker realistisk. Derudover var der en god sammenhæng mellem de beregnede forskydningsspændinger og den transporterede sedimentmængde observeret i forsøget.

Litteratur

- Ackers, 1973.** Peter Ackers and William Rodney White. *Sediment Transport: New Approach*. Journal of the Hydraulics Division Vol. 99 No. HY11, side 2041–2060, 1973.
- AgriInfo.in, 2011.** AgriInfo.in. *Density of Soil: Bulk Density and Particle Density*. URL: <http://kortlink.dk/agriinfo/gexr>, 2011. Besøgt 8 April 2015.
- Asst. Prof. Dr. Orhan Gündüz.** Asst. Prof. Dr. Orhan Gündüz. *Derivation of Flow Equations*. URL: <http://kortlink.dk/edu/g9sf>. Powerpoint præsentation.
- Bentzen, 2006.** Thomas Ruby Bentzen. *Introduktion til sedimenttransport*. Lecture Slides 28.10.2006, 2006.
- Brorsen, 2009.** Michael Brorsen and Torben Larsen. *Lærebog i hydraulik*. 2009.
- Celestini, 2007.** R. Celestini, G. Silvagni, M. Spizzirri, and F. Volpi. *Sediment transport in sewers*. WIT Transactions on Ecology and the Environment Vol. 103, 2007.
- DHI, 2015a.** DHI. *MOUSE TRAP - Technical Reference Sediment Transport Module*. URL: <http://kortlink.dk/hydroasia/g7cp>, 2015. Dansk Hydraulisk Institut.
- DHI, 2015b.** DHI. *MOUSE TRAP - User Manual*. URL: <http://kortlink.dk/hydroasia/g7cq>, 2015. Dansk Hydraulisk Institut.
- DHI, 2015c.** DHI. *MOUSE Pipe flow*. URL: <http://kortlink.dk/hydroasia/g9q2>, 2015. Dansk Hydraulisk Institut.
- Einstein, 1941.** Hans Albert Einstein. *Formulas for the transportation of bed load*. 1941.
- Engelund, 1976.** Frank Engelund and Jørgen Fredsøe. *A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels*. Nordic Hydrology Vol. 7 No. 5, side 293–306, 1976.
- Engelund, 1967.** Frank Engelund and Eggert Hansen. *a monograph on sediment transport In alluvial streams*. Teknisk forlag, 1967.
- Grande - Water management systems, 2015a.** Grande - Water management systems. *Tank and Sewer Flushing - Pivoting Drum*. URL: <http://www.grandeinc.com/en/products/tank-a-sewer-flushing/acu-drum>, 2015. Besøgt 05 Januar 2015.
- Grande - Water management systems, 2015b.** Grande - Water management systems. *Tank and Sewer Flushing - Flushing Gate*. URL: <http://www.grandeinc.com/en/products/tank-a-sewer-flushing/acu-gate>, 2015. Besøgt 05 Januar 2015.
- HydroSystems ApS, 2014.** HydroSystems ApS. *Skyllesystem til rundt bassin*. URL: <http://kortlink.dk/hydrosystems/g9s2>, 2014. Besøgt 17 December 2014.

- HydroSystems ApS, 2012.** HydroSystems ApS. *Skyllesystemer til rørbassin - HydroSelf*. URL: <http://kortlink.dk/hydrosystems/g9ry>, 2012. Besøgt 17 December 2014.
- Mark, 1995.** Ole Mark. *Numerical Modelling Approaches for Sediment Transport in Sewer Systems*. Series Paper No. 10. The Hydraulics and Coastal Engineering Group, Dept. of Civil Engineering, Aalborg University, 1995.
- Mark, 1995.** Ole Mark, Cecilia Appelgren, and Torben Larsen. *Principles and approaches for numerical modelling of sediment transport in sewers*. Water Science and Technology Vol. 31. No. 7., side 107–115, 1995.
- NIRAS, 2012.** NIRAS. *Damhusåen Bassinanlæg - Indledende betragtninger vedrørende skylning*. Udkast udleveret d. 1/10-2014, 2012.
- NIRAS, 2014.** NIRAS. *Danmarks største afløbstunnel skal sikre miljø og klima i København*. URL: <http://kortlink.dk/niras/gexw>, 2014. Besøgt 18 December 2014.
- Perrusquía, 1995.** Gustavo Perrusquía, Ole Petersen, and Torben Larsen. *Influence of sewer sediments on flow friction and shear stress distribution*. Water Science and Technology Vol. 31. No. 7., side 117–126, 1995.
- PH-Consult, 2009.** PH-Consult. *Praktiske forekommende ruheder i afløbssystemer*. URL: <http://kortlink.dk/basal/guay>, 2009.
- Schaffner, 2008.** Jörg Schaffner. *Numerical Investigations on the Function of Flush Waves in a Reservoir Sewer*. Ph.D thesis. 2008.
- Schlütter, 1999.** Flemming Schlütter. *Numerical Modelling of Sediment Transport in Combined Sewer Systems*. Series Paper No. 19. The Hydraulics and Coastal Engineering Group, Dept. of Civil Engineering, Aalborg University, 1999.
- Shirazi, 2014.** R. H. S. M. Shirazi, A. Campisano, C. Modica, and P. Willems. *Modelling the erosive effects of sewer flushing using different sediment transport formulae*. Water Science and Technology Vol. 69. No. 6., 2014.
- Southard, 2006.** John Southard. *An Introduction to Fluid Motions, Sediment Transport, and Current-generated Sedimentary Structures*. URL: kortlink.dk/ec2e, 2006. Visited 16 April 2015.
- van Rijn, 1984a.** Leo C. van Rijn. *Sediment Transport, Part 1: Bed Load Transport*. Journal of Hydraulic Engineering Vol. 10 No. 10, side 1431–1456, 1984.
- van Rijn, 1984b.** Leo C. van Rijn. *Sediment Transport, Part 2: Suspended Load Transport*. Journal of Hydraulic Engineering Vol. 10 No. 11, side 1613–1641, 1984.
- Winther, 2011.** Leif Winther, Jens Jørgen Linde, H. Thorkild Jensen, Leo Lund Mathiasen, and Niels Bent Johansen. *Afløbsteknik*. Polyteknisk Forlag, 2011.

A. Indhold af bilags cd

- A.1 Data fra stationære forsøg
- A.2 Data fra bølgeforsøg uden sediment
- A.3 Data fra bølgeforsøg med sedimentlag
- A.4 Data fra bølgeforsøg med jævnt fordelt sedimentlag
- A.5 Standard Mike Urban model
- A.6 Mike Urban model med RTC-randbetingelse

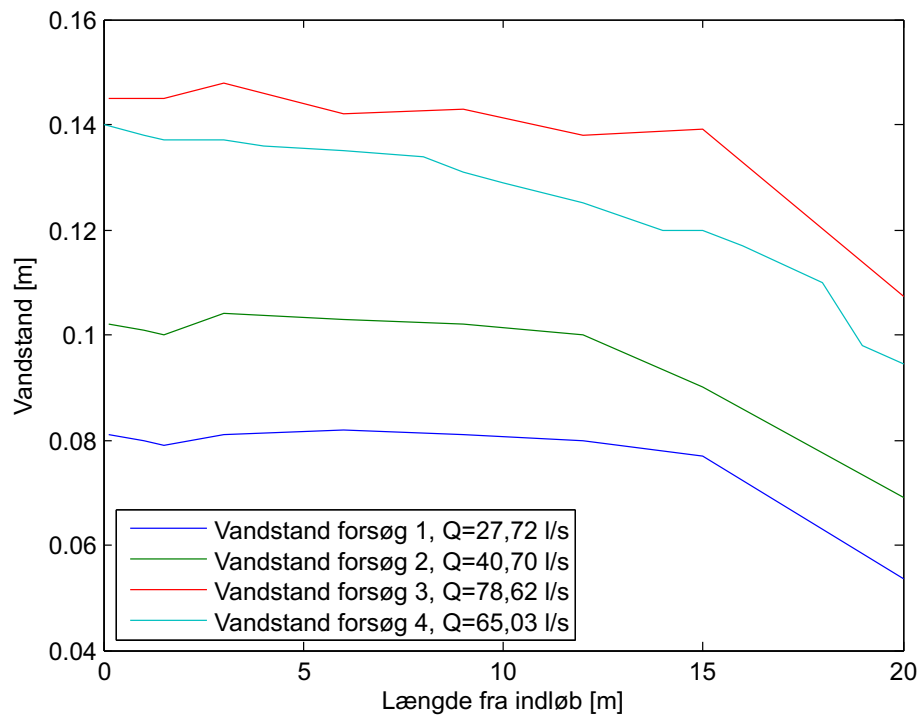
B. Målinger fra skyllesystem forsøg

Indledningsvist er der foretaget manuelle vandstandsmålinger i strømningskanalen ved forskellige vandføringer. Det sidste punkt i måleserien er sat til at være kritisk dybde udregnet efter formel (B.1) ifølge (Brorsen and Larsen, 2009). Dette er et acceptabelt endepunkt, fordi udløbet er udformet som et skarpkantet overløb. Målingerne på figur B.1 viser længdeprofilen af vanddybden ved manuelle målinger. Målingerne blev lavet manuelt og efter få opmålinger blev det klart, at udsving i pumpens ydelse gjorde det svært at foretage en korrekt opmåling.

$$y_c = \left(\frac{\alpha \cdot q^2}{g} \right)^{1/3} \quad (\text{B.1})$$

hvor

y_c	Kritisk dybde	[m]
α	Hastigheds fordelingskoefficient	[-]
q	Breddevægtet vandføring	[m ² s ⁻¹]
g	Tyngdeacceleration	[ms ⁻²]

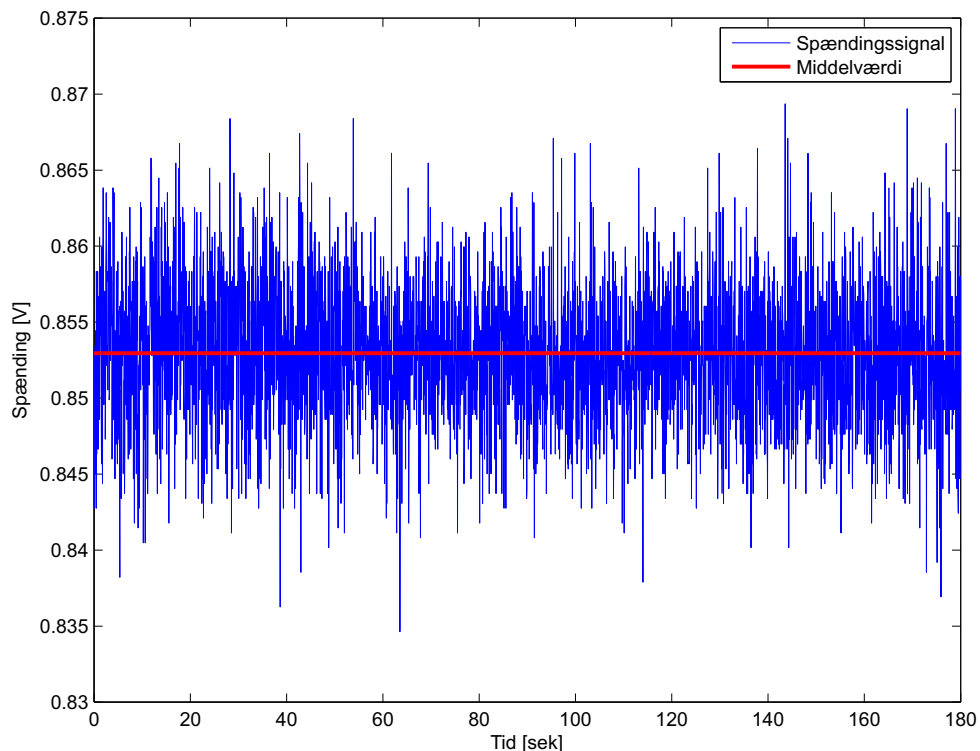


Figur B.1. Vandstands målinger fra forsøg med stationær strømning i strømningsranden

C. Kalibrering af tryk transducer

Efter flere forsøg på at modellere en stationær strømning i strømningsranden blev det klart at pumpen har en vis opstartstid, hvilket gør det umuligt at finde en korrekt vandføring ud fra volumetriske beregninger. Dermed er vandføringen stadig ukendt, hvilket gør det umuligt at opstille en model uden en randbetingelse for vandføringen. Problemet afhjælpes ved at opsætte en tryk transducer inde i opstuvningsboksen, hvilket giver en sammenhæng mellem den faldende vanddybde og tiden. Dette anvendes derefter til at lave en tidsserie for vandføringen, for hver enkelt bølge der laves i forsøget. Denne tidsserie anvendes desuden som randbetingelse i modellen og de modellerede vandniveauer gennem systemet kan hermed sammenlignes med bølgemålerens målinger.

Tryk transduceren sænkes i et kalibreringstårn, og afstanden til vandspejlet måles, herefter logges der et signal over tre minutter, hvor middelværdien anvendes. Et eksempel på et målt signal samt dennes middelværdi er vist på figur C.1.

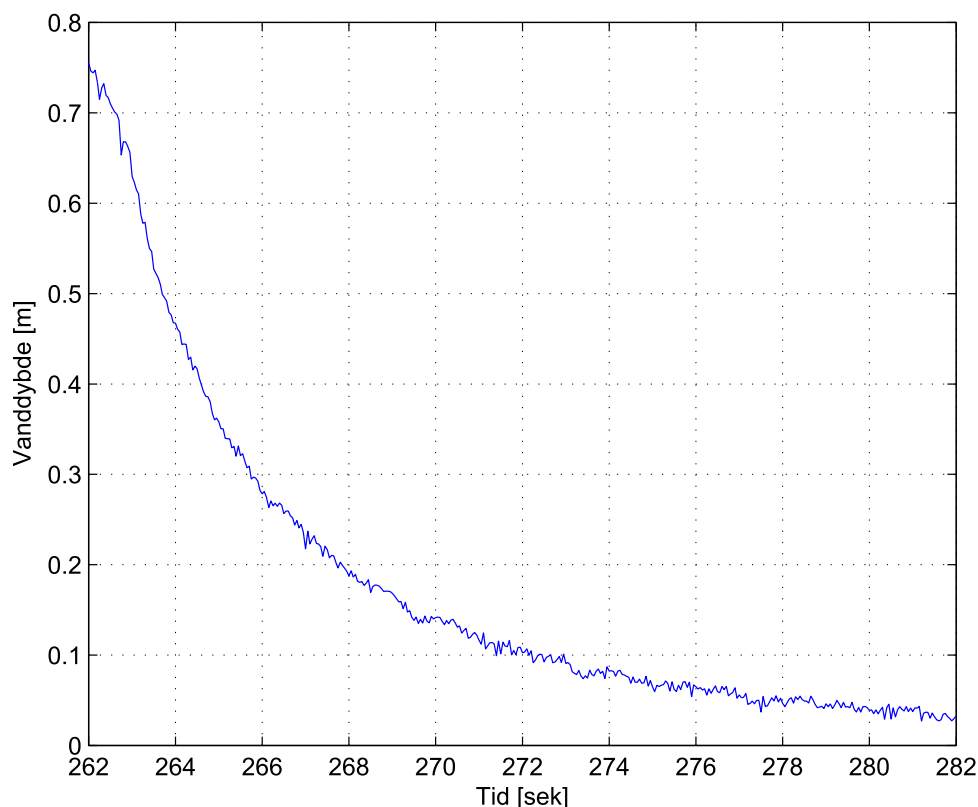


Figur C.1. Eksempel på spændingssignal målt over tre minutter samt middelværdien.

Denne proces gentages for tre forskellige afstande og der laves derefter en lineær regression ud fra de fundne data. Den lineære ligning anvendes derefter i WaveLab til at omsætte de målte spændingerne til vanddybder.

D. Beregning af vandføring

For at kunne anvende programmer til beregning er det vigtigt at opsætte randbetingelser. I dette projekt består randbetingelsen til standard-modellen af en tidsserie for vandføringen som påføres indløbsbrønden. Tidsserien findes ud fra trykket målt af tryktransducere hver gang der laves en bølge i forsøget. På figur D.1 er tryk forløbet, omdannet til en vanddybde, vist efter spjældets åbning ved forsøg foretaget d. 19. marts med et skyllevolumen på $1,6 \text{ m}^3$.



Figur D.1. Vanddybden som funktion af tiden efter at skottet åbnes ved et forsøg med 75 cm opstuvet vand, svarende til et skyllevolumen på $1,6 \text{ m}^3$

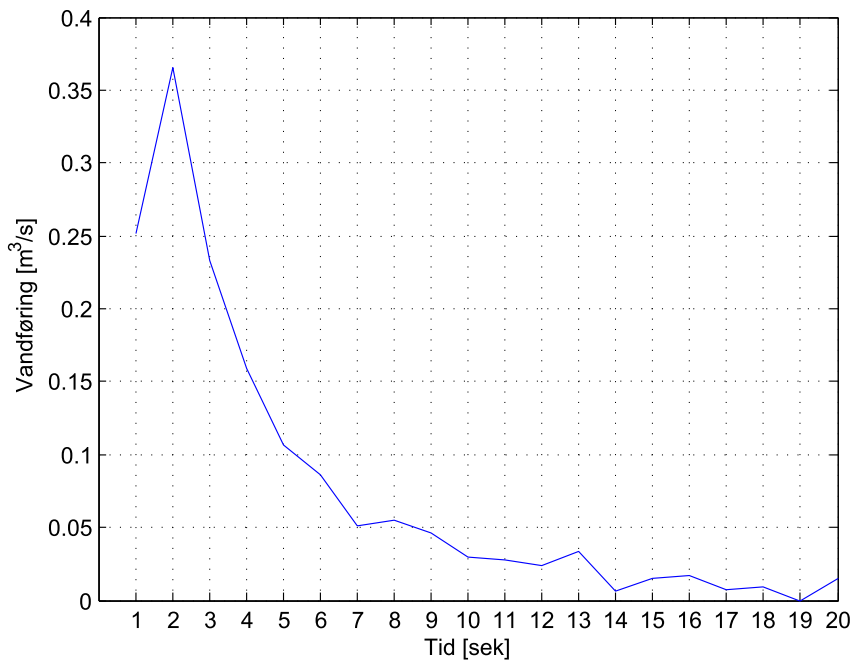
Ved at anvende kontinuitetsligningen, (D.1), kan vandføringen findes ved at opdele kurven i små stykker og finde vandføringen for hvert enkelt sekund.

$$Q = \frac{\Delta H}{\Delta t} A \tag{D.1}$$

hvor

Q	Vandføring	$m^3 s^{-1}$
ΔH	Ændring i vanddybde	m
Δt	Ændring i tid	s
A	Overflade areal i kassen	m^2

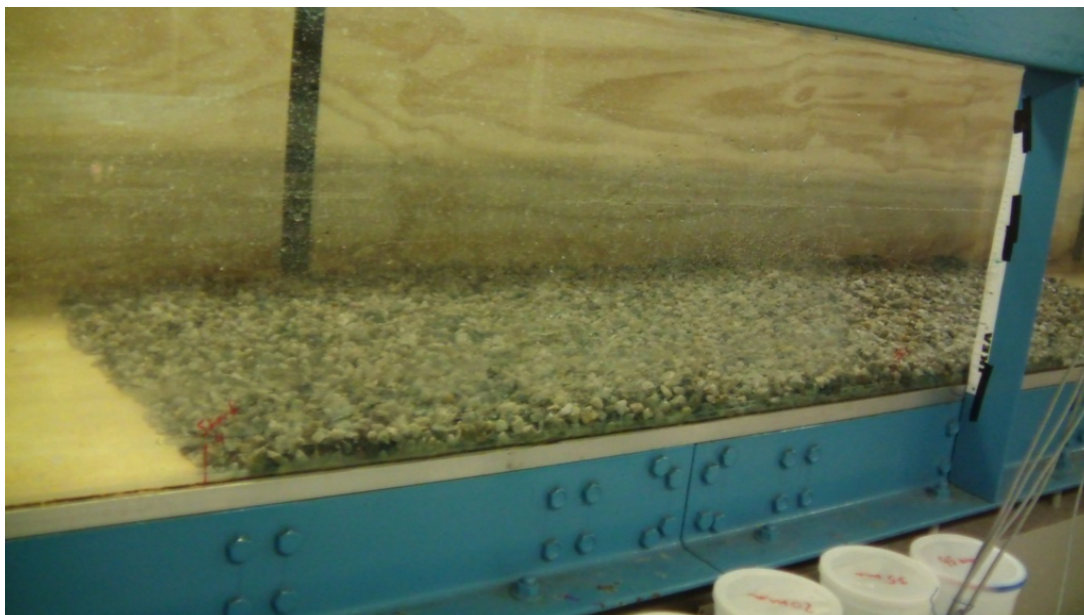
Da der måles med 20 Hz er det vigtigt at få udjævnet kurven inden beregning af vandføringen, ellers vil der opstå mange negative vandføringer i den sidste ende af måleserien hvor næsten alt vandet er løbet ud. Der laves derfor et glidende gennemsnit med et spænd på fem data punkter inden vandføringen udregnes. På figur D.2 ses vandføringen fundet ud fra tryk forløbet som blev vist tidligere.



Figur D.2. Vandføring fundet ud fra bølge forsøg lavet d. 19. marts med skyllevolumen på $1,6 m^3$

Den højeste vandføring findes således 2 sekunder efter at spjældet åbnes, og falder derefter indtil at opstuvningskassen næsten er tom. Grunden til at vandføringen ikke er højest lige efter åbning kan skyldes åbningstiden af spjældet, hvilket gør at de første målinger af vanddybdes fald ikke reflekterer en situation med fuld åbning af gennemstrømningsarealet.

E. Billeder fra forsøg



Figur E.1. Starten af sediment laget set fra siden, inden skyllebølgen aktiveres.



Figur E.2. Slutningen af sediment laget set fra siden, inden skyllebølgen aktiveres.



Figur E.3. Udlagt sediment lag tæt på indløbet, ud fra målerens placering, findes starten af laget til 5,4 m fra indløb



Figur E.4. Sediment lagets fordeling efter få skyllebølger.



Figur E.5. Billede af reservoiret under skyllesystemet.