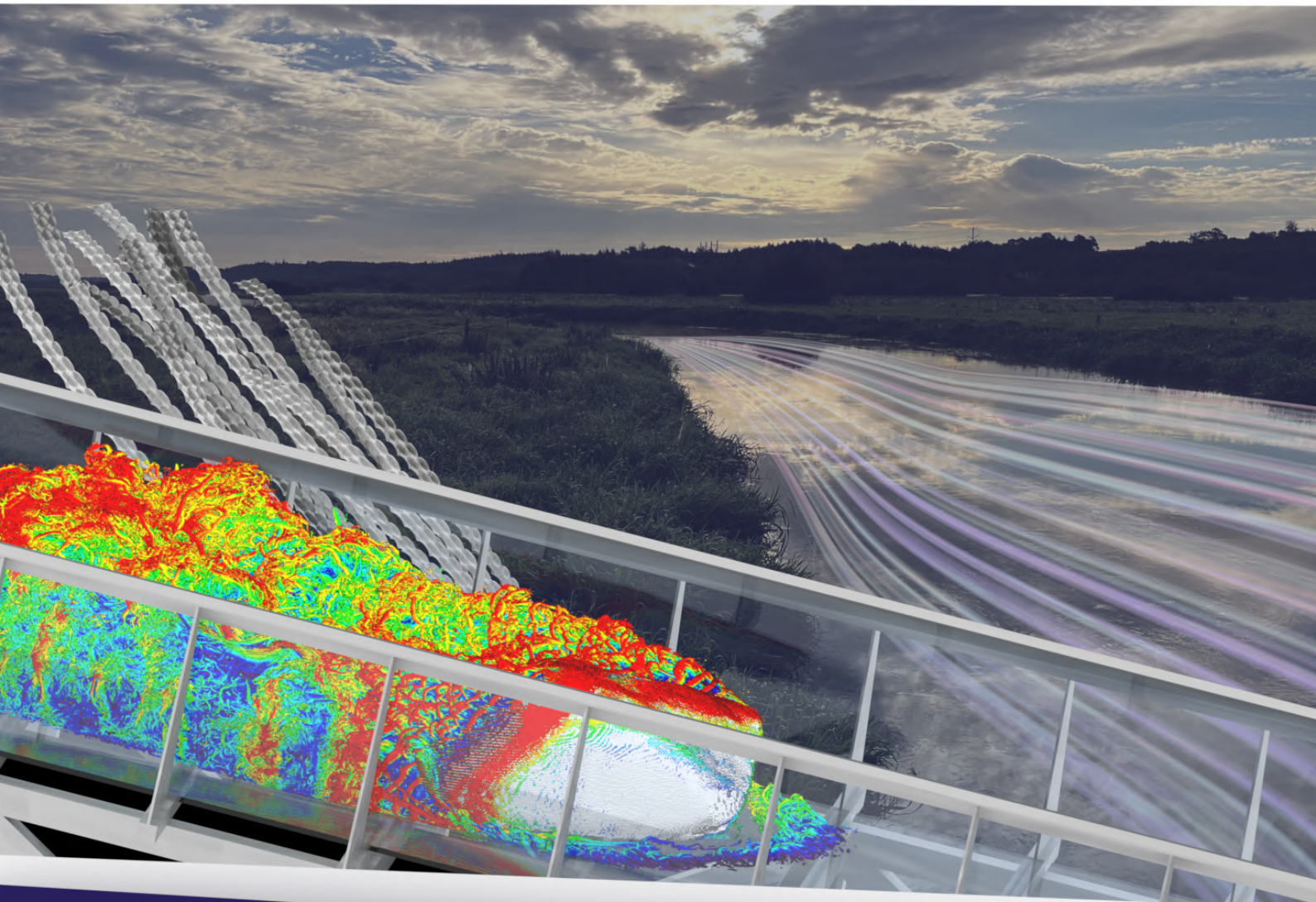


Undersøgelse af hydrauliske konsekvenser ved miljøforbedringer i Nørreå

Oliver Christian Kirkedal & Jens Kellmer Andersen



Kandidatspeciale - 2024

Civilingeniøruddannelsen i Vand og Miljø

BUILD



**AALBORG
UNIVERSITET**





AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

BUILD

Kandidatspeciale

Civilingeniøruddannelsen i Vand og miljø

Thomas Manns vej 23

9220 Aalborg Øst

<https://www.build.aau.dk>

Titel:

Undersøgelse af hydrauliske konsekvenser
ved miljøforbedringer i Nørreå

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

01/09-2023 - 06/06-2024

Gruppemedlemmer:

Jens Kellmer Andersen
Oliver Christian Kirkedal

Vejledere:

Jesper Ellerbæk Nielsen
Torben Larsen

Antal sider: 108

Antal bilag: 6

Antal ECTS: 45

Afleveringsdato: 06/06-2024

Synopsis:

Dette speciale undersøger de hydrauliske effekter af grødeskæringer og stenudlægninger i Nørreå med henblik på at dokumentere konsekvenserne på vandstand og vandføringsevne. Undersøgelsen baserer sig på en hydrologisk vandløbsmodel af Nørreå.

Projektet præsenterer en dybdegående analyse af, hvordan disse tiltag påvirker åens hydraulik. Der er gennemført to fysiske laboratorieforsøg i en strømningsrende, hvor effekten af henholdsvis grødeskæringer og stenudlægninger er undersøgt.

Som en udvidelse af stenudlægningsforsøget er der lavet en digital tvilling via en CFD-model, hvor stenene er nøjagtigt repræsenteret ved hjælp af 3D-scanninger foretaget med fotogrammetri. Dette bidrager yderligere til en mere detaljeret forståelse af de hydrauliske effekter og konsekvenser ved stenudlægninger.

Resultaterne fra forsøgene er efterfølgende integreret i en hydrologisk vandløbsmodel af Nørreå for at forudsige og analysere de potentielle effekter af disse tiltag. Disse resultater forventes at bidrage til potentielle optimeringer af vedligeholdelse og restaureringer af vandløb med særligt fokus på at forbedre vandmiljøet under hensyntagen til vandføringsevnen.

1 | Forord

Dette kandidatspeciale er udarbejdet af Oliver Christian Kirkedal og Jens Kellmer Andersen som afsluttende projekt på Vand- og Miljø uddannelsen på Aalborg Universitet 2024. Projektet har haft til formål at finde de hydrauliske konsekvenser på afvandingen i Nørreå ved grødeskæringer og stenudlægninger, hvor fokus primært har været undersøgelsen af den hydrauliske modstand af disse metoder. Projektet er udarbejdet i perioden 2023 til 2024.

Der er i dette speciale anvendt hydrometriske- og geometrisk data fra Nørreå, der er udleveret af Viborg kommune. Der skal rettes en stor tak til Viborg Kommune for at give mulighed for at anvende deres data i dette kandidatspeciale. Der er gennem rapporten også brugt frit tilgængelig kortmateriale fra kortforsyningen.

Der skal lyde et stort tak til lektor Jesper Ellerbæk Nielsen og professor Torben Larsen, for vejledning og støtte gennem hele projektforsøget. Ydermere skal der lyde tak til Niels Fræhr for hjælp til HEC-RAS modellering og Morten Stenkær for sparring til det fysiske laboratorieforsøg.

Læsevejledning

Der henvises til figurer og tabeller efter kapitel og derefter nummer [Kapitel.Nummer] i rapportteksten. Henvisningen til et kapitel eller afsnit vises i rapportteksten som [Kapitel.Afsnit]. I rapporten henvises kilder efter Harvard-metoden, med forfatterens efternavn og udgivelsesåret for materialet, hvilket vises som [Efternavn, År]. I slutningen af rapporten præsenteres en litteraturliste, hvor yderligere information er angivet, såsom; udgiver, version, titel og format. Når [ibid.] vises, er den tidligere nævnte kilde stadig relevant.

I rapporten refererer udtrykket "fysisk laboratorieforsøg" til en række forsøg, der er udført i en strømningsrende, mens udtrykket "digital tvilling" henviser til et virtuelt forsøg udført i en CFD-model.



Oliver Christian Kirkedal



Jens Kellmer Andersen

2 | Abstract

This thesis investigates the hydraulic effects of weed cutting and rock placement in Nørreå with the aim of documenting the impacts on water level and flow capacity. The study is based on a hydrological stream model of Nørreå.

The project provides a comprehensive analysis of how these interventions affect the hydraulics of the stream. Two laboratory experiments have been conducted in a flume, where the effects of weed cutting and stone placement respectively have been analyzed.

Additionally, a Computational Fluid Dynamics (CFD) model was created as a digital twin to extend the stone placement experiment, enhancing the understanding of its hydraulic implications. Here the stones are accurately represented using 3D scans obtained through photogrammetry. The results from the experiments have subsequently been integrated into the hydrological stream model of Nørreå to predict and analyze the potential effects of these interventions. The findings are expected to contribute to optimizing stream management strategies aimed at improving the water environment while considering the flow capacity in streams.

3 | Symbolliste

α	Hastighedsfordelingskoefficient
A	Areal
CFD	Computational Fluid Dynamics
C	Strømkraft-koefficient
g	Tyngdeacceleration
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
H	Energi højde
h	Trykhøjde
I	Energigradient
K_n	Kraft
M	Manningtal
n	Mannings n
P	Våde perimeter
Q	Vandføring
R	Hydraulisk radius
ρ	Densitet
Strømrrende	Type af grødeskæring
Strømningsrende	Kanal som anvendes i laboratorieforsøg
u	Horisontal hastighed
VOF	Volume Of Fluid
V	Volumen
z	Udgangsniveau
ζ	Modstandstal

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1	Forord	3
Kapitel 2	Abstract	5
Kapitel 3	Symbolliste	7
Kapitel 4	Introduktion	13
Kapitel 5	Problemformulering	17
5.1	Case område - Nørreå	18
Kapitel 6	Projektets opbygning	19
Del I - Beskrivelse og analyse af Nørreå		20
Kapitel 7	Oversigt over Nørreå og opland	21
7.1	Vedligeholdelse i Nørreå	24
7.2	Vandstand og vandføring	26
Del II - Analyse af påvirkningen på strømningsmodstanden fra grødeskæringer og stenudlægning		28
Kapitel 8	Forsøg i strømningsrende	29
8.1	Forsøgsopstilling i strømningsrende	30
Kapitel 9	Forsøg med grødescenarier	33
9.1	Kraftpåvirkning på grødestrimmel	33
9.2	Bestemmelse af Manningtal over grødescenarier	37
9.3	Hastighedsmålinger i strømrende	39
9.4	Opsummering	42
Kapitel 10	Forsøg med stenudlægning	43
10.1	Bestemmelse af enkelttab	43
10.2	Målinger af strømningshastigheder med PIV- og LDA	48
10.3	Opsummering	51
Kapitel 11	Virtuelt forsøg med CFD	53
11.1	Opsætning af numeriske stenmodeller	53
11.2	Hastighedsfordeling	54
11.3	Bestemmelse af enkelttab i CFD-model	56

11.4	Validering af CFD-model med PIV- og LDA målinger	58
11.5	Evaluering af model	60
11.6	Opsummering	61
Del III - Konsekvensvurdering af grødeskæringer og stenudlægninger i Nørreå		62
Kapitel 12	Vandløbsmodel af Nørreå	63
12.1	Modelopbygning og afgrænsning	63
12.1.1	Arealanvendelse	65
12.1.2	Modelgeometri	66
12.2	Stationær flowanalyse af grødescenarier	67
12.2.1	Manningtal	67
12.2.2	Implementering af Manningtal i flowmodel	69
12.2.3	Resultater	70
12.3	Ikke-stationær flowanalyse af stenudlægninger	71
12.3.1	Enkelttab	71
12.3.2	Implementering af modstandstal i flowanalyse	72
12.3.3	Resultater	73
12.4	Opsummering	74
Del IV - Afrunding af projekt		76
Kapitel 13	Diskussion	77
Kapitel 14	Konklusion	81
Kapitel 15	Perspektivering	83
Bilag		86
Bilag A	Elektroniske bilag	89
Bilag B	Anvendte metoder til laboratorieforsøg	91
Bilag C	Udførte målinger i laboratorie og i Nørreå	93
C.1	Vingemålinger	93
C.2	Målinger ved forsøg med grødescenarier	94
C.3	Målinger ved forsøg med stenudlægninger	95
C.4	Densitet af bobleplast strimler	96
C.5	ADCP målinger foretaget i Nørreå	97
Bilag D	Opsætning af model i Star CCM+	99
D.1	Opbygning af model mesh	99
D.2	Model fysik	100
D.3	Initial- og randbetingelser	101
D.4	Konvergens	101

Bilag E	Opsætning af model i HEC-RAS	103
E.1	Stationær flowanalyse af grødescenarier	103
E.2	Ikke-stationær flowanalyse af stenudlægninger	104
Bilag F	Besigtigelse af Nørreå og opland	107

4 | Introduktion

Vandløb er en essentiel del af det hydrologiske kredsløb og varierer i størrelse og udformning. Fælles for dem alle er, at de afleder den mængde nedbør, som ikke fordamper, ud til havet. I Danmark er der omkring 65.000 km åbne vandløb, hvoraf blot halvdelen er af naturlig oprindelse, mens den resterende del inkluderer kunstige grøfter og udgravede kanaler. Ifølge Miljøstyrelsen [2023a] er tillige 28.000 km underlagt naturbeskyttelsesloven, der har til formål at beskytte mod ændringer af tilstanden udover sædvanlige vedligeholdelser. Hertil er cirka 18.600 km underlagt Vandområdeplanerne 2021-2027, som er knyttet til yderligere miljømål. Alle vandløb er imidlertid underlagt Vandløbsloven, hvis overordnede målsætning er at imødekomme både afvandings- og miljømæssige hensyn. Jævnfør Vandløbslovens § 1 beskrives de funktioner, der er tilsigtet at sikre opfyldelsen af disse hensyn. Her skrives følgende:

"§1. Ved denne lov tilstræbes at sikre, at vandløb kan benyttes til afledning af vand, navnlig overladevand, spildevand og drænvand

Stk.2. Fastsættelse og gennemførelse af foranstaltninger efter loven skal ske under hensyntagen til de miljømæssige krav til vandløbskvaliteten, som fastsættes i henhold til anden lovgivning."[Miljøministeriet 2019]

Gennem tiden har der været et stort behov for at opdyrke vandløbsnære arealer, hvilket har medført en omfattende regulering af vandløb. Op mod 90% af vandløbene i dag anses at være påvirket af menneskelige aktiviteter, som blandt andet omfatter udretning, uddybning og fjernelse af vegetation for at tage hensyn til afvanding, som kan ses på figur 4.1.



Figur 4.1: Før- og efter billede af grønnskæring i et vandløb [Naturstyrelsen 2007].

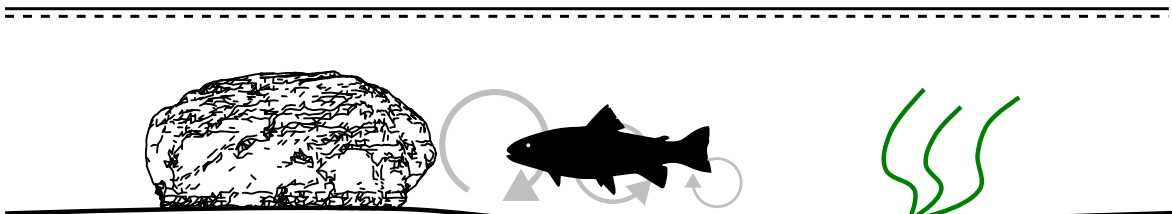
Disse omfattende reguleringer har resulteret i en markant forringelse af de fysiske- og biologiske forhold, hvorfor opdateringen af Vandløbsloven tilbage i 1982, har haft særlig betydning for vandløbene. Siden denne opdatering har der været et større fokus på forbedring af vandmiljøet, særligt gennem mere skånsom vedligeholdelse, herunder grønnskæringer. Generelt har grønnskæringer til formål at opretholde tilstrækkelig afvanding af vandløbsnære områder og udføres over sommerhalvåret. Måden hvorpå grønnskæringen udføres, og hvor hyppigt der skæres, har ændret sig gennem tiden og er underlagt flere skærpet krav til fordel for biodiversiteten. Her er det den enkelte vandløbsmyndigheds ansvar at vedligeholde vandløbene, heriblandt

grødeskæringer. [Miljøstyrelsen 2017]

Udover vedligeholdelse af vandløbene, udføres der i dag vandløbsrestaureringer, der også har til formål at tilgodese vandmiljøet. Typisk genslynges vandløbene, så de vender tilbage til deres naturlige skikkelse og medvirker til, at udviklingen sker mere naturligt, hvilket der ifølge Miljøstyrelsen [2023a] har ført til forbedringer af levevilkårene for flora og fauna. Derudover udføres også andre tiltag, såsom udlægning af gydegrus eller større sten, som kaldes skjulesten. Et eksempel på et restaureringsprojekt, hvor lignende tiltag er udført er Langvad Å i Roskilde Kommune, som er kendt for at have Danmarks længste faunapassage. Langvad Å er undergået en større restaurering, hvor genslyngning og udlægning af store skjulesten er blandt de mange tiltag der er foretaget, med det mål at skabe fri passage og skjulesteder for forskellige fiskearter [NIRAS 2023]. På billedet nedenfor i figur 4.2 ses en strækning af Langvad Å med udlagte skjulesten. Endvidere viser principskitzen i figur 4.3, hvordan en skjulesten kan give læ for fisk og fungere som habitat for smådyr og lignende.

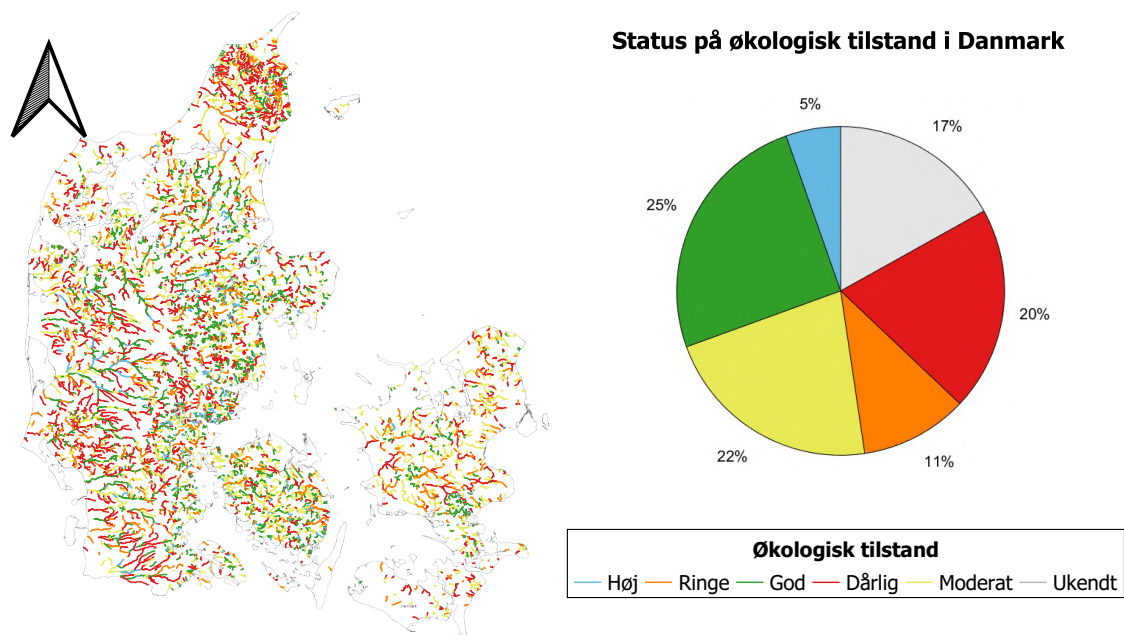


Figur 4.2: Billede af stenudlægninger i Langvad Å. [NIRAS 2023]



Figur 4.3: Principskitse af skjulesten. Stenene giver læ for forbipasserende fisk og kan virke som habitat for visse invertebrater.

Selvom der er gjort fremskridt med genopretning og vedligeholdelse af vandløb, viser undersøgelser, at kun cirka 25% af de 18.600 km vandløb, der er omfattet af Vandområdeplanerne, har opnået en god økologisk tilstand. Jævnfør målsætningerne i EU's Vandrammedirektiv, skal alle vandløb opnå god økologisk tilstand i 2027. I en oversigt på figur 4.4 ses, at en stor del af Vandløbene er i moderat til ringe tilstand, hovedsageligt på grund af begrænset fremgang i implementeringen af fysiske forbedringer i anden planperiode (VP2 2015-2021), jf. Miljøstyrelsen [2023b]. Der forventes dog øget indsats for både fysisk og vandkvalitetsmæssig forbedring i den tredje planperiode (VP3 2021-2027).



Figur 4.4: Overblik over den økologiske tilstand i danske vandløb.

Uanset om vandløb undergår restaureringer og der udføres en mere skånsom vedligeholdelse ved grødeskæringer, er behovet for afvanding af vandløbsnære arealer stadig til stede. Ændringer i vandløbets skikkelse kan påvirke både vandstand og vandføring, hvilket kan medvirke til nye udfordringer om manglende vandføringskapacitet og dermed øget risiko for oversvømmelse af vandløbsnære områder. Klimaforandringer forudsætter også, at behovet for afvanding skal være tilstrækkeligt under større mængder af nedbør. Det kan derfor være vanskeligt at finde en løsning, der tager højde for både afvandings- og miljømæssige forhold i vandløbene.

5 | Problemformulering

Menneskelige aktiviteter som udretning, uddybning og fjernelse af vegetation har gennem tiden haft betydelige indvirkninger på vandløbenes naturlige dynamik og skikkelse. Dette har skabt store udfordringer for den økologiske og fysiske kvalitet i vandløbene. I nyere tid er der dog kommet et øget fokus på at genoprette naturlige vandløb og på en mere skånsom vedligeholdelse for at tilgodese flora og fauna, selvom dette kan medføre en reduceret vandføringskapacitet. At finde en løsning der både tager højde for afvanding og miljø, kan derfor være vanskelig. Ud fra disse betragtninger kan følgende problemformulering opstilles:



Hvordan kan miljøet i vandløb forbedres og samtidigt opretholde god vandføringsevne?

Ud fra problemformuleringen er følgende underspørgsmål opstillet for at være med at besvare det overordnede spørgsmål og samtidig danne ramme om projektet:

- *Hvilke hydrauliske effekter har grødeskæringer og stenudlægninger på vandførings- evnen i vandløb?*
- *Hvordan kan eksperimentelle forsøg anvendes til at undersøge og dokumentere den hydrauliske modstand ud fra forskellige grader af grødeskæringer?*
- *Hvordan eksperimentelle forsøg anvendes til at undersøge og dokumentere den hydrauliske modstand af stenudlægninger?*
- *Hvordan kan anvendelsen af CFD-modellering bidrage til at forudsige effekten af stenudlægninger i vandløb?*
- *Hvordan kan hydrologisk modellering anvendes til at sammenligne hydrauliske konsekvenser af grødeskæringer og stenudlægninger?*

5.1 Case område - Nørreå

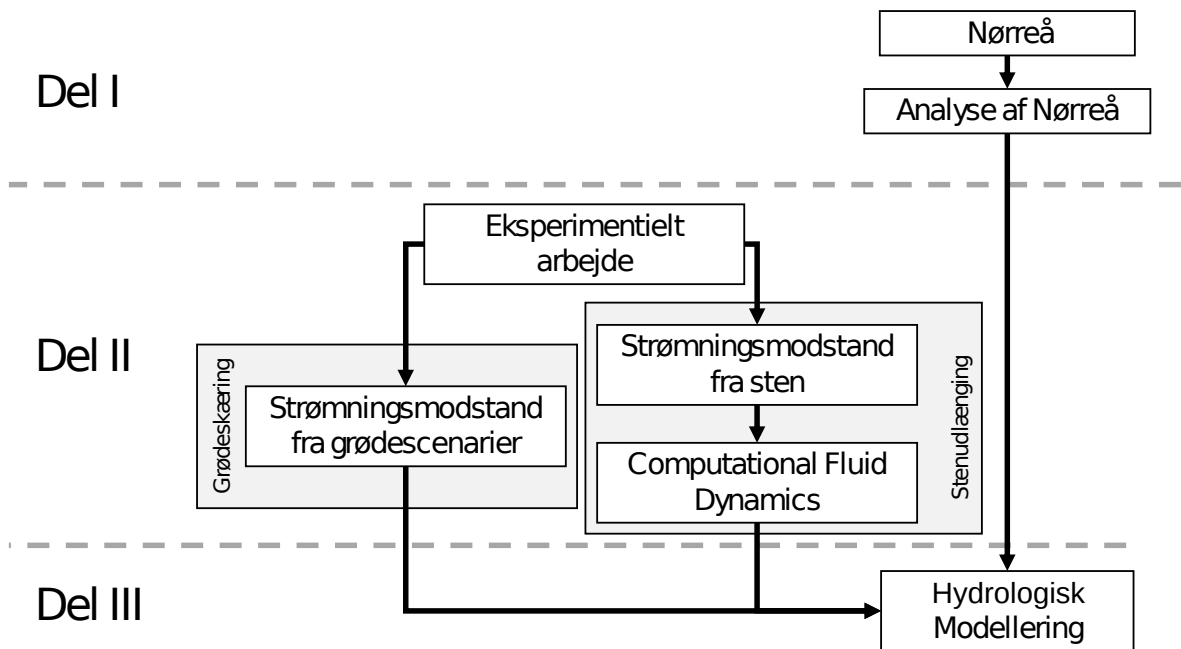
For at besvare problemformuleringen er det valgt at anvende Nørreå, beliggende i Viborg Kommune, som caseområde. Nørreå er udvalgt på blandt andet på baggrund af det omfattende datagrundlag tilgængeligt fra dets mange målestationer, som gør det muligt at nærstudere de faktiske forhold i åen. I rapporten vil der blive gennemført en detaljeret analyse af Nørreå, som vil blive nærmere introduceret og beskrevet i rapporten. Gennem laboratorieforsøg, hydrologisk modellering og evaluering af forskellige vedligeholdelsesstrategier undersøges de hydrauliske konsekvenser af **grødeskæringer** og **stenudlægninger**. Disse metoder udgør grundlaget for nærværende rapport, som vil medvirke til en dybere forståelse af, hvordan disse tiltag kan balanceres for at tilgodese både vandføringsevne og miljøforbedringer.



Figur 5.1: Udførelse af dopplermåling i Nørreå. Billedet er taget den 23. august 2023.

6 | Projektets opbygning

Projektet er struktureret i tre hoveddele der tilsammen bidrager til en omfattende forståelse af hydraulikken i Nørreå og hvordan åen påvirkes af grødeskæringer og stenudlægninger. Oversigt over projektets opbygning fremgår af nedenstående figur 6.1.



Figur 6.1: Opbygning af projektets overordnede rapportstruktur.

I del I fokuseres der på det virkelige system i Nørreå. Først gives en generel beskrivelse af Nørreå og dets placering. Dette er efterfulgt af en mere dybdegående analyse af åens skikkelse, hydrometriske målinger og de nuværende vedligeholdelsesplaner, samt inddragelse af regulativer. Denne analyse danner grundlaget for de eksperimentelle forsøg, som udgør del II.

I del II af projektet udføres eksperimentelle forsøg i en strømningsrende. Eksperimenterne involverer en serie af forsøg, hvor de hydrauliske effekter fra henholdsvis grødeskæringer og stenudlægninger vil blive undersøgt. Disse forsøg har til hensigt at opnå en konceptuel forståelse af, hvad disse tiltag har af indflydelse på strømningsforholdene. Endvidere udvikles en digital tvilling, som bygger videre på forsøget omkring stenudlægning. Den digitale tvilling udføres som en Computational Fluid Dynamics (CFD) model, der gennem simuleringer, skal give et mere detaljeret billede af de hydrauliske effekter af en stenudlægning.

I del III indsamles og anvendes de opnåede resultater fra de foregående forsøg i del II til at skabe en integreret hydrologisk vandløbsmodel. Formålet med denne model er at opskalere de eksperimentelle forsøg, for at vurdere konsekvenserne af de samlede effekter af grødeskæringer og stenudlægninger. Konsekvensvurderingerne anvendes til at forudsige og undersøge deres indflydelse på vandstanden i Nørreå.

DEL I

Beskrivelse og analyse af Nørreå

Del I

Nørreå

Analyse af Nørreå

Del II

Eksperimentielt arbejde

Grødeskæring

Strømningsmodstand
fra grødescenarier

Strømningsmodstand
fra sten

Computational Fluid
Dynamics

Stenudlænging

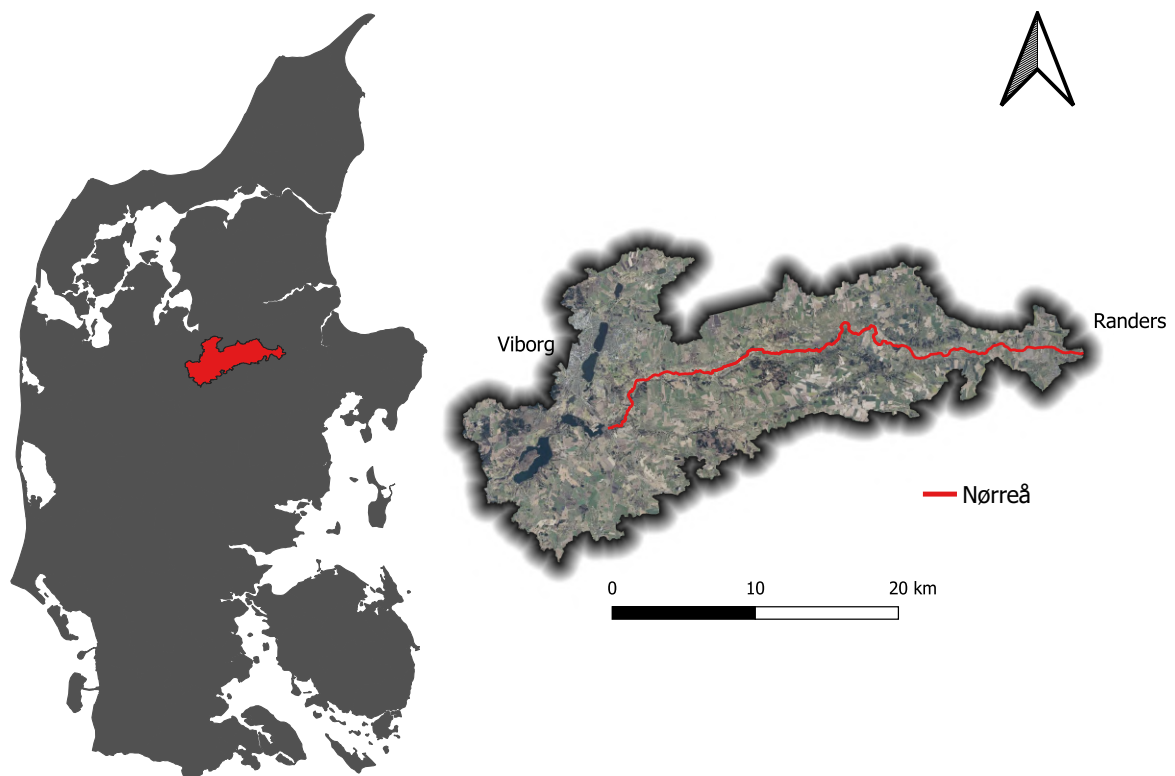
Del III

Hydrologisk
Modellering



7 | Oversigt over Nørreå og opland

Nørreå er klassificeret som et mellem til stort vandløb med en samlet længde på omkring 40 km. Åen udspringer i Vedsø sydøst for Viborg og løber sammen med Gudenåen ved Fladbro vest for Randers. Det hydrologiske opland for Nørreå udgør cirka 400 kvadratkilometer [Viborg Amt 2005]. Af disse 400 kvadratkilometer er 92% af arealet dedikeret til naturområder, herunder landbrugsarealer og skov, mens de resterende 8% er fordelt over urbane arealer. På figur 7.1 ses en oversigt over Nørreå med tilhørende oplandsareal.



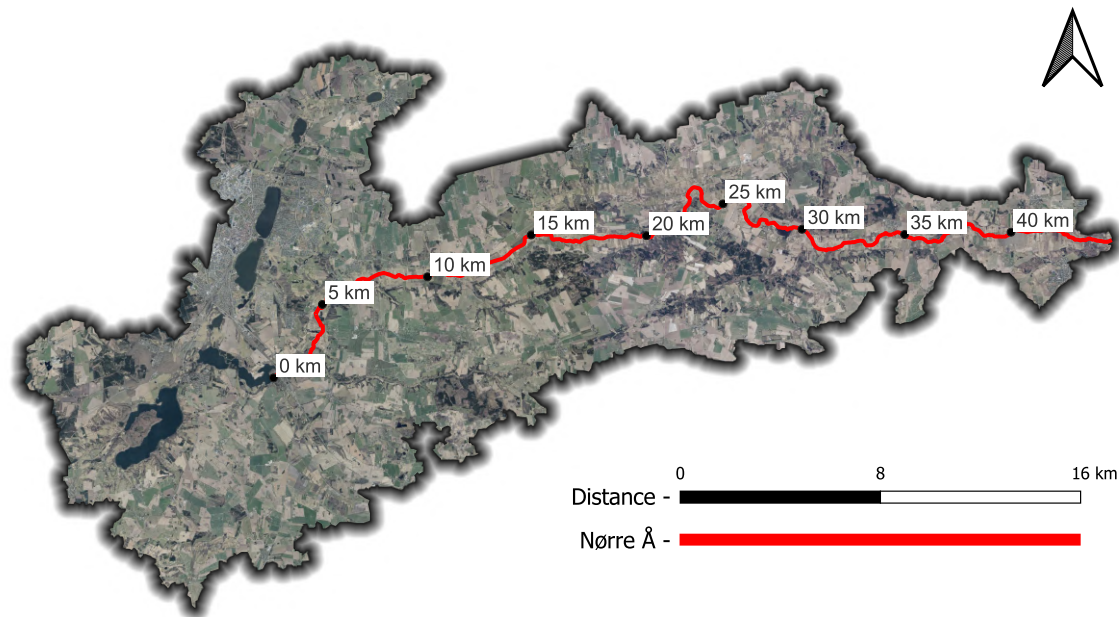
Figur 7.1: Oversigt over Nørreå med tilhørende oplandsareal.

I starten af 1900-tallet blev Nørreå underlagt en omfattende regulering, hvor åens forløb er blevet udrettet og udgravet primært for at imødekomme et større behov for afvanding i området. Efter reguleringen er åens forløb stort set forblevet uændret, hvilket er illustreret på figur 7.2. I figuren fremgår tre historiske ortofotos fra 1954 af henholdsvis udløbet fra Vedsø, Bruunshåb rensningsanlæg og Vejrumbro, som sammenlignes med ortofotos fra 2023. Ud fra de viste lokationer kan det bekræftes, at der er sket minimale ændringer i åens forløb. Det er dog dokumenteret, at åens bredde er blevet udvidet som et resultat af vedligeholdelse.

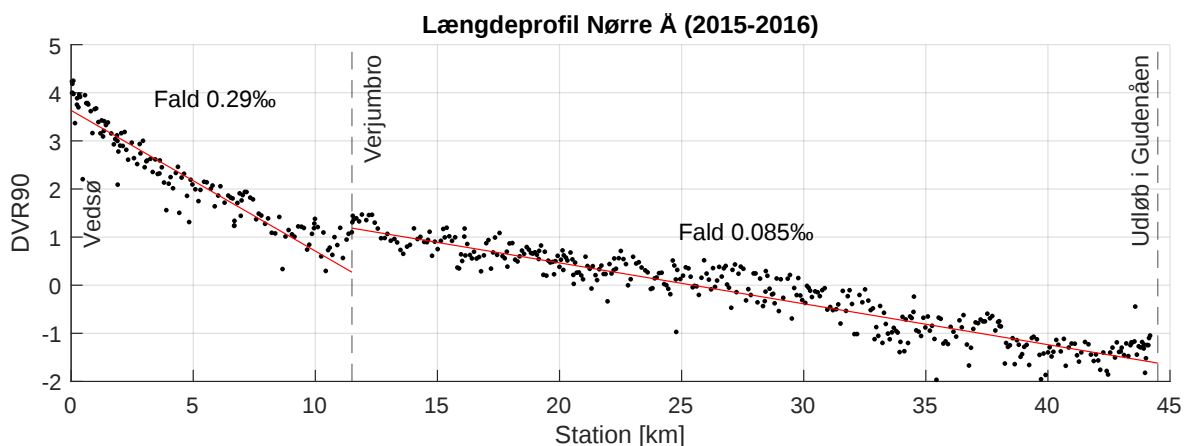


Figur 7.2: Sammenligning af udvalgte ortofotos af Nørreå fra 1954 og 2022. Billederne viser hhv. Udløbet fra Vedsø [1], Bruunshåb Rensningsanlæg [2] og Vejrumbro [3].

I henhold til EnviDan [2020], et restaureringsprojekt i Nørreå, har faldet i vandniveauet i åen aldrig været betydeligt stort. På figur 7.3 er Nørreå kortlagt med 5 km stationer, som starter ved udløbet fra Vedsø (0 km) og slutter ved udløbet til Gudenåen. Hertil er der optegnet et længdeprofil hvor tværsnitsopmålinger fra perioden 2015-2016 er anvendt til at beregne faldet på de angivne strækninger. Tværsnitsopmålingerne, der er blevet anvendt, er udleveret af Viborg Kommune. Længdeprofilet kan ses på figur 7.4, hvor de sorte prikker indikerer de anvendte tværsnitsopmålinger og det gennemsnitlige fald med rød streg.



Figur 7.3: Stationer langs Nørreå. Station 0 km er ved udløbet fra Vedsø.



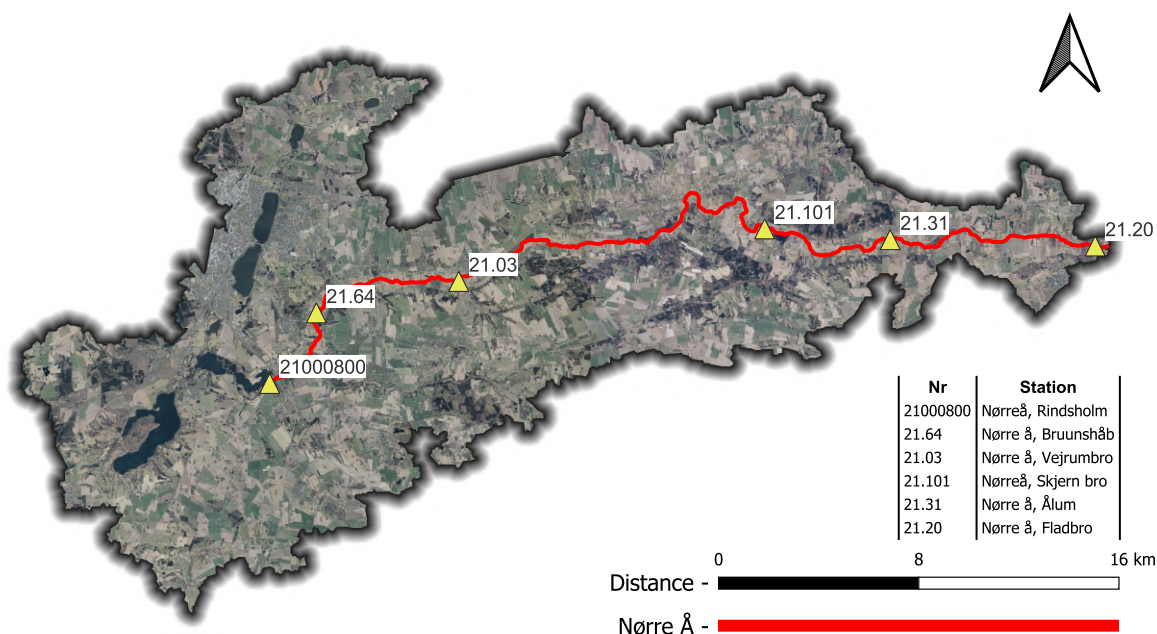
Figur 7.4: Længdeprofil fra opmåling af Nørreå fra 2015-2016. Det gennemsnitlige fald er beregnet mellem Vedsø og Vejrumbro og fra Vejrumbro til udløbet ved Gudenåen.

Det bemærkes ud fra længdeprofilet at faldet er koncentreret opstrøms ved udløbet fra Vedsø, hvor bunden hovedsageligt består af grus og sten. Faldet reduceres dog markant omkring Vejrumbro station og længere nedstrøms, hvor bunden er domineret af sand og andet aflejret sediment. Disse variationer af faldet kan relateres til åens fysiske forhold. Her er forskellige lokaliteter i åen registreret med fysiske indeksværdier, som er med til at indikere åens fysiske tilstand. I tabel 7.1 ses registrerede indeksværdier for tre lokaliteter i den øvre del af Nørreå. Den højere indeksværdi ved Rindsholm skyldes primært at faldet er højere, som vist på figur 7.4, men samtidig at strømningforholdene generelt er bedre opstrøms end nedstrøms. De lavere indeksværdier ved Bruunshåb renseanlæg (ca. st. 5 km) og Vejrumbro (ca. st. 10 km) skyldes delvist et lavere fald men også en indikation på påvirkning af menneskelige aktiviteter i form af udledning fra renseanlægget. I nærværende rapport vil disse indeksværdier ikke beskrives yderligere. [ibid.]

Lokalitet	Fysisk indeks-værdi
Rindsholm, st. ca. 300	33-38
Bruunshåb renseanlæg	11-19
Vejrumbro	8-14

Tabel 7.1: Fysisk indekssværdier for bestemte lokaliteter i Nørreå. [EnviDan 2020]

Der er i alt seks hydrometrystationer langs Nørreå der måler henholdsvis vandstand og vandføring. Figur 7.5 viser en oversigt over de seks målestationer med henvisning til stationsnummer og navn. Alle stationer er i stand til at monitorere vandstanden, men kun st.21.03 (Vejrumbro) kan foretage dynamiske målinger af vandføringen. Denne station er udstyret med en doppler, der kan måle hastigheden i seks forskellige celle-dybder, hvilket betyder, at vandføringen måles direkte og er derfor ikke baseret på en Qh-kurve. Perioden, hvor stationerne er begyndt at overvåge, varierer fra station til station, men der foreligger dog tilstrækkeligt med data til videre anvendelse i beregninger, som vil blive dokumenteret senere i rapporten. Særligt st.21.03 vil blive anvendt, da både vandstand og vandføring, som tidligere nævnt, overvåges ved denne station.



Figur 7.5: Hydrometrystationer langs Nørreå.

7.1 Vedligeholdelse i Nørreå

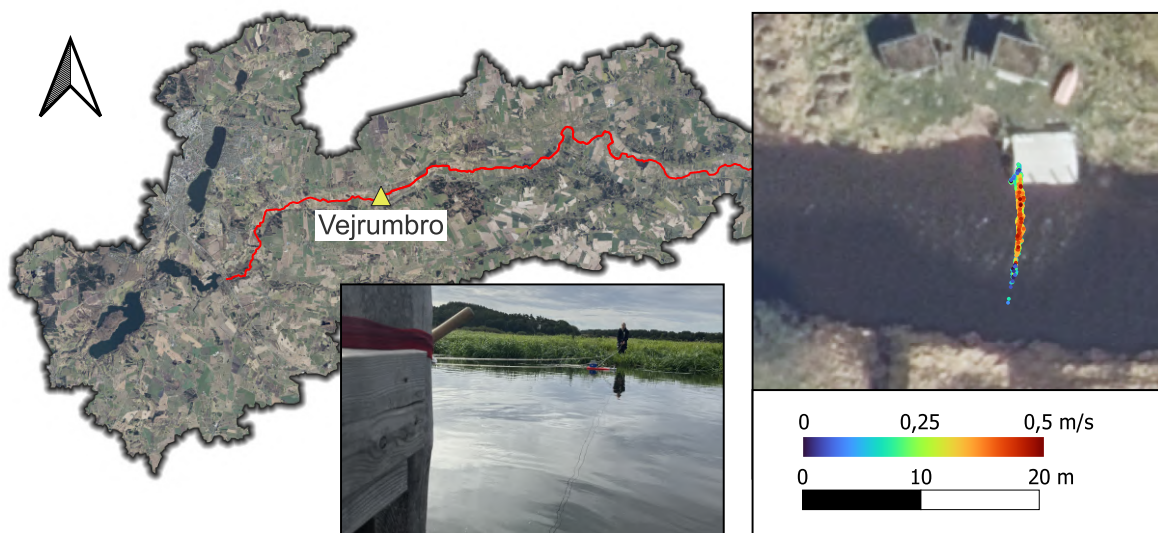
Som det nævnes i kapitel 4 vedligeholdes vandløb primært med grødeskæringer. I Nørreå er der udarbejdet et regulativ i 2005, der danner nuværende grundlag for vedligeholdelser, herunder grødeskæringer. Gennem tiden har Nørreå været under omfattende vedligeholdelse, hvor grødeskæringer blev foretaget i vandløbets fulde bundbredde op mod otte gange om året. Hyppigheden for grødeskæringerne er dog reduceret markant, da målet i regulativet var, at skære ned på antallet af grødeskæringer i perioden 2006 til 2011, for at forbedre vandmiljøet i overensstemmelse med Vandløbsloven. I dag udføres i alt tre grødeskæringer i perioden mellem 1.

juni til og med 30. september, hvor grøden fjernes i vandløbets naturlige strømrønde, som udgør den dybeste del af vandløbets tværsnit. Ved at foretage grødeskæringer i strømrønden, forbeholdes vegetationen i åens banker intakt, medmindre vandløbsmyndigheden finder det nødvendigt at foretage grødeskæring af hensyn til afvandingen [Viborg Amt 2005]. På nedenstående figur 7.6 fremgår en tidsserie af Manningtallet, målt ved Vejrumbro st.21.03, i år 2022. Manningtallet er en parameter, som benyttes til at beskrive den hydrauliske modstand, og kan derfor være en god indikator for, hvornår modstanden er størst. De lodrette stiplede markeringer indikerer forekomsten af grødeskæringer, som er foretaget i løbet af sommerhalvåret. Ud fra tidsserien ses det, at Manningtallet falder drastisk i løbet af sommerhalvåret, som følge af øget modstand fra grøden, men stiger relativt lidt i takt med grødeskæringerne.



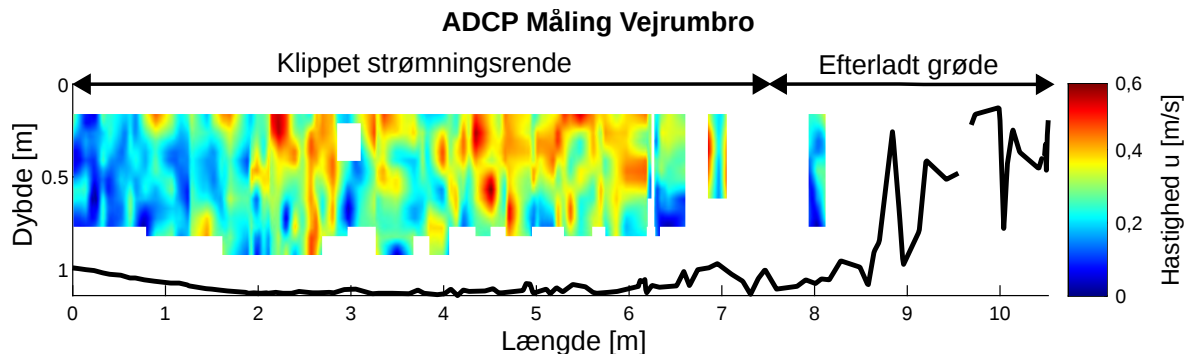
Figur 7.6: Tidsserie af Manningtallet fra Vejrumbro st.21.03 i år 2022, med tilhørende tidspunkter for grødeskæringer anvist med lodrette linjer.

Den 23. august 2023 er der udført en måling med en Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) ved Vejrumbro for at danne et hastighedsprofil af Nørreå om sommeren, for at se effekten af grøde umiddelbart efter en grødeskæring i åen. Lokation og billede af udførelsen af måling kan ses på figur 7.7.



Figur 7.7: Lokation af ADCP måling samt billede af udførelse af ADCP måling.

I tværsnittet på figur 7.8, kan der ses en større hastighed i midten af profilet, hvor der har været foretaget en grødeskæring. Det har dog ikke været muligt at bestemme hastigheden i den efterladte grøde, da det blokerer dopplersignalet og derfor kan hastigheden ikke præcist bestemmes i selve grøden. I bilag F foreligger billedokumentation af ADCP-målinger samt besigtigelse af Nørreå opland.

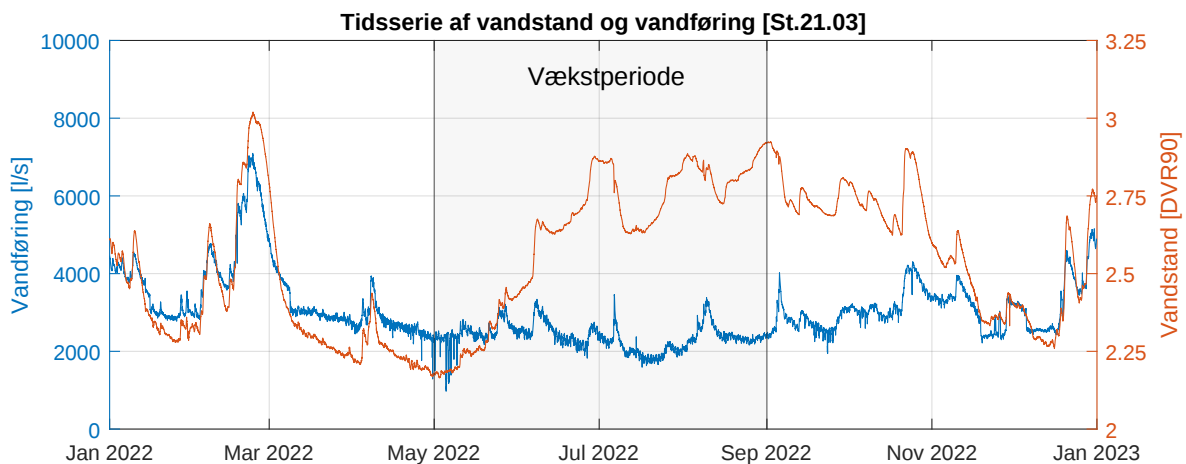


Figur 7.8: Hastigheder i tværsnittet ved shelterplads ved Vejrumbro.

7.2 Vandstand og vandføring

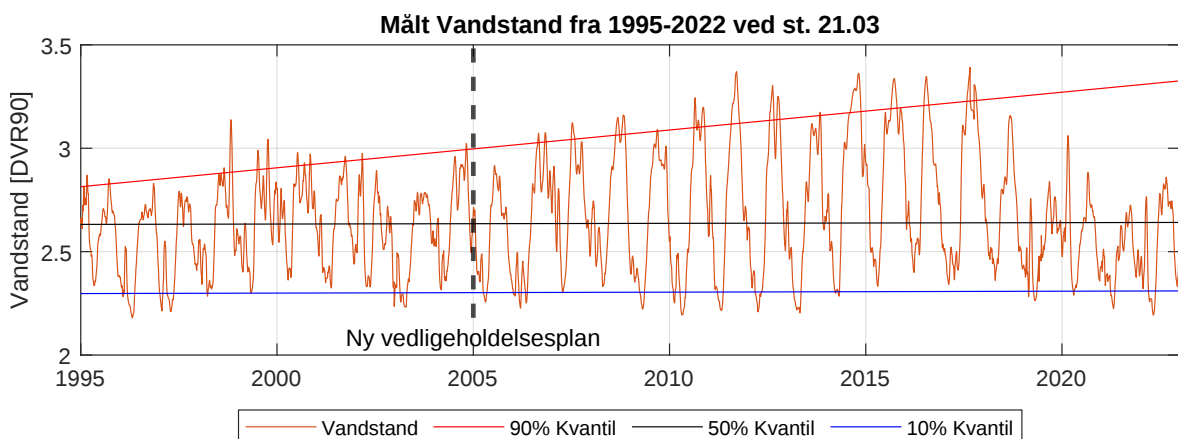
Vandstanden og vandføringen i vandløb undergår årlige variationer, primært på grund af sæsonmæssige afstrømningsmønstre og den vegetation, der udvikler sig i takt med vækstperioden. Vandføring er i et specifikt tidspunkt og sted, styret af den mængde vand som kommer opstrøms fra, hvor bidraget blandt andet inkludere nettonedbøren, topografien, vandløbsnære arealer, samt grundvandsstanden i området.

Figur 7.9 viser en tidsserie over vandstand og vandføring i løbet af år 2022 ved Vejrumbro station (st.21.03). Tidsserien fremhæver en proportional stigning mellem vandstand og vandføring i begyndelsen af året op til foråret, hvorefter vandføringen aftager samtidig med, at vandstanden fortsat stiger. Disse observationer er i overensstemmelse med vækstperioden for grøden, der strækker sig over sommerhalvåret. De enkelte "dyk" hvor vandstanden falder, som observeres mellem juli og september, kan antyde forekomsten af grødeskæringer. Det kan dog diskuteres, hvorvidt disse grødeskæringer i det pågældende år har haft en signifikant indvirkning, da vandstanden relativt kun falder med få centimeter. Denne lille ændring kan skabe komplikationer for afvandingen, især hvis der sker en stigning i afstrømningen i løbet af vækstperioden.



Figur 7.9: Tidsserie af vandstand og vandføring ved fra 2022 ved Vejrumbro st.21.03.

For at foretage en nærmere undersøgelse af vandstandens udvikling er der i figur 7.10 lavet en tidsserie, der omfatter registrerede vandstande fra 1995 til 2022. På figuren er der ved hjælp af kvantil regression lavet tre tendenslinjer ud fra 10-, 50- og 90%-kvantilen af vandstanden.



Figur 7.10: Registrerede vandstandsmålinger fra 1995 til 2022 ved Vejrumbro st. 21.03 med kvantil regressions linjer.

Det ses på figuren, at der grundlæggende ikke er en nogen tydelig stigende eller faldende tendens for hverken 10- og 50%-kvantilen. Ved 90%-kvantilen observeres en tydelig stigende tendens ved højere målte vandstande, især fra 2005 og fremefter, hvilket kan skyldes ændringerne i vedligeholdelsesplanerne i regulativet for Nørreå fra 2005. Disse planer inkluderer blandt andet en reduktion i antallet af grødeskæringer, der foretages inden for vækstperioden [Viborg Amt 2005]. Som konsekvens af en mindre reguleret grødeskæring øges den hydrauliske modstand i vandløbet, hvilket kan få vandstanden til at stige og skabe problemer for afvandingen. Derfor kan denne stigende tendens i ovenstående graf, skyldes en øget hydraulisk modstand, forårsaget af grøden. Af denne grund vil der i nærværende rapport undersøges nærmere, hvilke konsekvenser en mindre reguleret grødeskæring har på vandføringen og afvandingen i Nørreå. Dette vil blive nærmere undersøgt i del II.

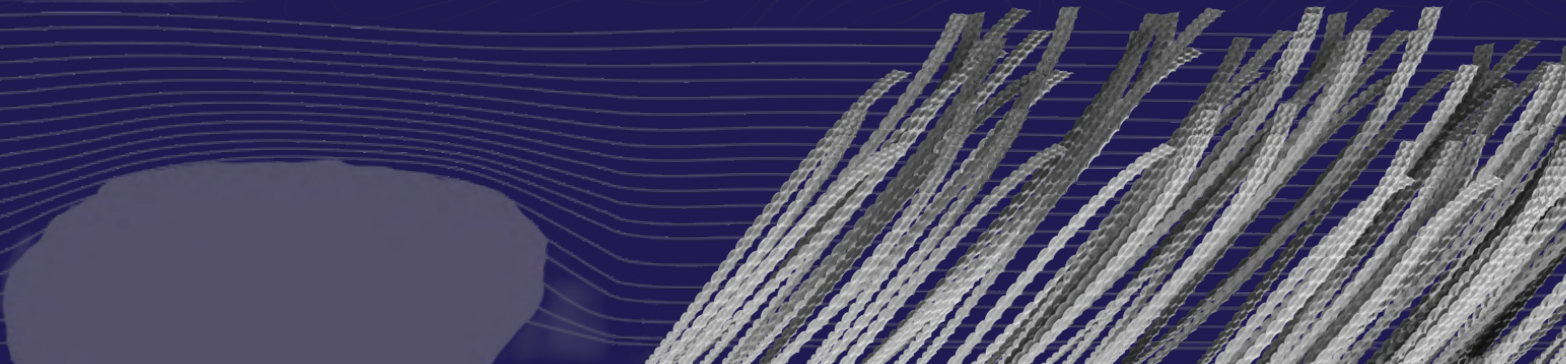
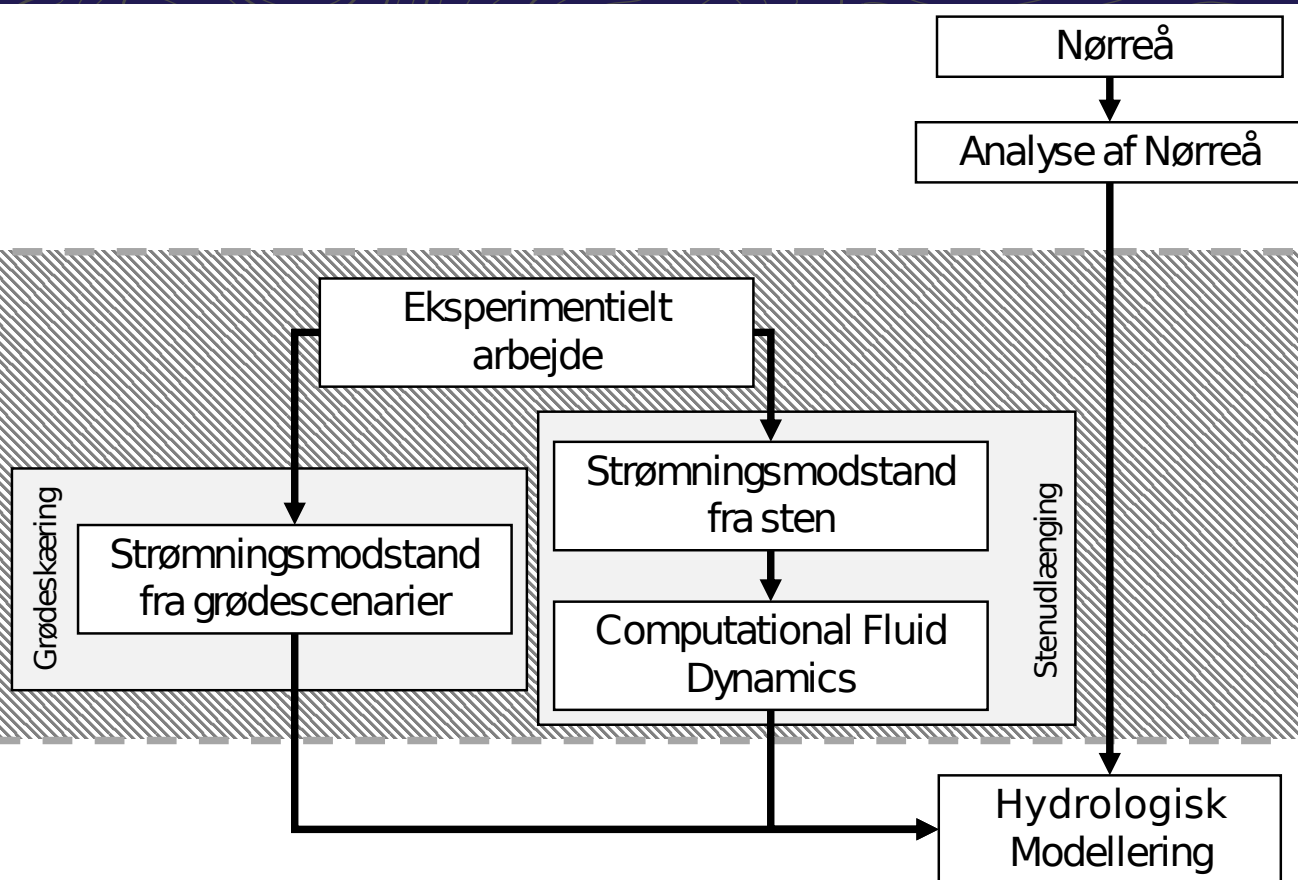
DEL II

Analyse af påvirkningen på strømningsmodstanden
fra grødeskæringer og stenudlægning

Del I

Del II

Del III

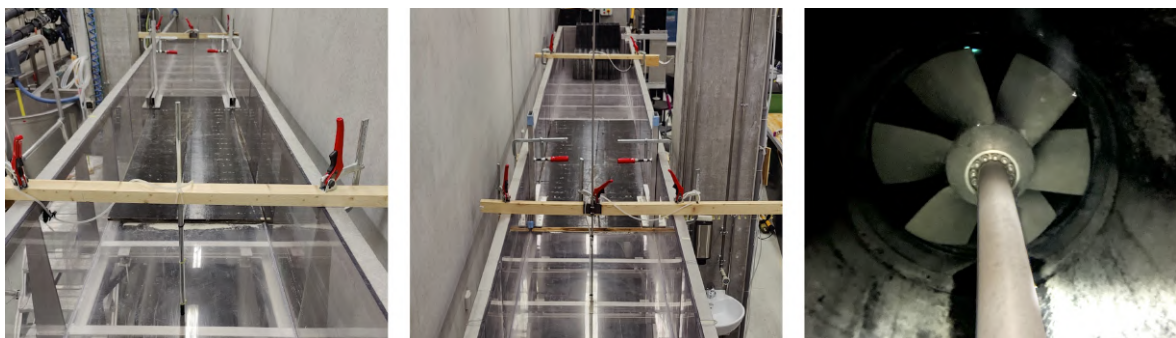


8 | Forsøg i strømningsrende

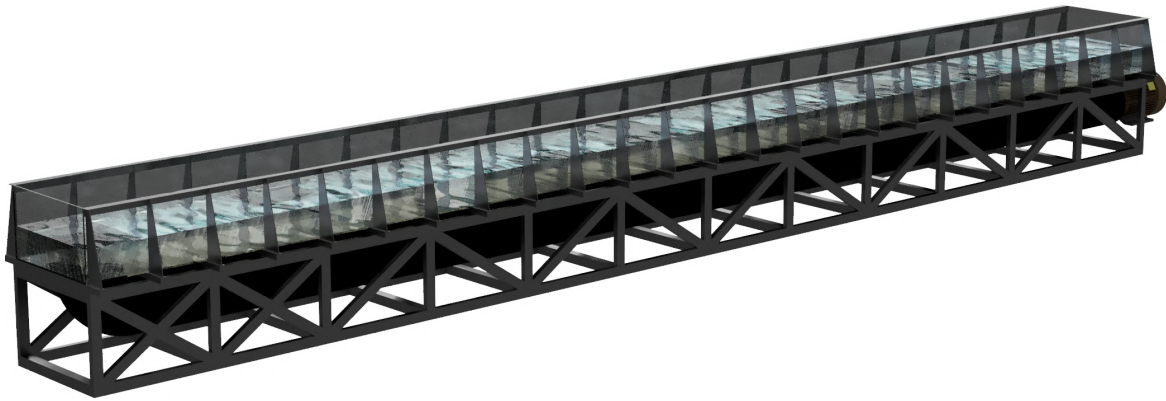
I denne del af rapporten vil der blive gennemgået et fysisk laboratorieforsøg, som omfatter eksperimenter med grødeskæringer og stenudlægninger. Eksperimenterne udføres i en strømningsrende, som vist på billederne i figur 8.1, og derudover visualiseret som en 3D-rendering på figur 8.2. Formålet med disse forsøg er at opnå en konceptuel forståelse af de hydrauliske modstande, som begge metoder medfører. De eksperimentelle forsøg skal ende med at kunne kvantificere disse modstande til en reel hydraulisk modstand, udtrykt ved henholdsvis et Manningtal for grøde og et modstands tal for sten, som vist formlerne nedenfor. Disse værdier kan derefter anvendes i en hydrologisk model med det formål at undersøge, hvordan eksperimentelle forsøg kan integreres som en del af et større system.

$\overbrace{Q = M A R^{2/3} \sqrt{I}}^{\text{Manningformlen}}$ ↑ Manningtal	$\overbrace{\Delta H = \zeta \frac{u^2}{2g}}^{\text{Carnots formel}}$ ↑ Modstandstal
--	---

I forsøgene med grødeskæringer opstilles der forskellige scenarier, hvorfra den hydrauliske modstand bestemmes og analyseres i forhold til forskellige grader af grødeskæringer. Som alternativ for rigtig grøde, anvendes der strimler af bobleplast som den modstandsbevirkende faktor, idet det vurderes at have lignende egenskaber som rigtig grøde. I nærværende rapport beskrives strimlerne af bobleplast som kunstig grøde. I forsøgene med stenudlægninger, udvælges sten i varierende størrelser, hvor formålet her er at bestemme, i hvilket omfang de udlagte sten yder en modstand i forhold til resten af systemet. Disse forsøg udføres, idet grødeskæringer og stenudlægninger udgør en betydelig del af vedligeholdelsen, samt restaureringen af vandløb. Af denne grund vurderes det, at netop disse forsøg kan bidrage til at demonstrere påvirkningen af de hydrauliske forhold mere præcist.



Figur 8.1: Billeder af strømningsrende og propelpumpe.

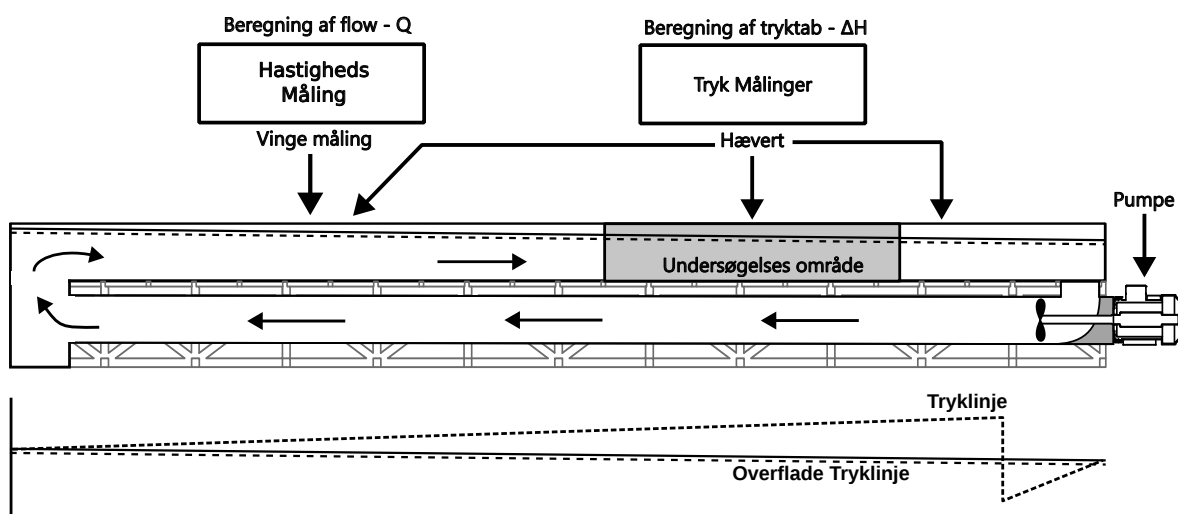


Figur 8.2: 3D-rendering af strømningsrende.

8.1 Forsøgsopstilling i strømningsrende

På figur 8.3 fremgår et diagram over forsøgsopstillingen i strømningsrenden. Strømningsrenden har en længde på 10 m, en bredde på 78 cm og en højde på 48 cm. Strømningsrenden er drevet af en propelpumpe der cirkulere vandet i systemet i pilenes retning. Pumpen øger trykhøjden af vandet, hvilket øger energihældningen i renden ved den frie overflade og får vandet til at løbe rundt, som kan ses på figur 8.3. Systemet er derfor drevet af pumpeydelsen som skaber en hældning på overfladen som driver strømningen frem for bundhældningen, som det ville være i virkeligheden.

Området som er markeret med gråt, repræsenterer undersøgelsesområdet som forsøgene udføres i. I undersøgelsesområdet er der udlagt en filmbelagt krydsfinerplade med dimensionerne 244x77 cm, som forsøgene udføres på. Opstrøms for undersøgelsesområdet placeres en vingemåler, model OTT C2, som bruges til at tage løbende hastighedsmålinger til bestemmelse af vandføringen. Endvidere udføres trykmålinger før, i og efter undersøgelsesområdet, til at kortlægge tryktabet, som gøres ved hjælp af en hævert. På figur 8.3 ses et diagram af hele opstillingen og på figur 8.4 fremgår billeder af det anvendte udstyr. Alle de udførte målinger fremgår i bilag C.



Figur 8.3: Diagram af forsøgsopstilling i strømningsrende, med tryklinjer.



Figur 8.4: Billede af vingemåler (model OTT C2), tryktabsmanometer og hævert slange.

Da der er en grundlæggende interesse for at anvende forskellige typer af måleudstyr og metoder, benyttes der billed- og videomateriale til at undersøge stenens og grødens indflydelse på vandets strømning, ved forskellige steder inden for undersøgelsesområdet. Videomaterialet vil blive behandlet og analyseret med Particle Image Velocimetry (PIV). I tillæg til dette, udstyres forsøgene med et Laser Doppler Anemometer (LDA) som kan måle partikelhastigheden i et givet punkt.

Fordelene ved at anvende PIV er, at det er en kontaktfri målemetode, som betyder at vandstrømmen ikke påvirkes i forsøget. Derudover er metoden i stand til at danne hastighedsfelter, som kan give en bedre forståelse af strømmingen omkring et objekt. Samtidigt kan en god PIV-opsætning kvantificere eksempelvis turbulens og hvirveldannelse. For en mere grundig beskrivelse af de anvendte målemetoder henvises der til bilag B.

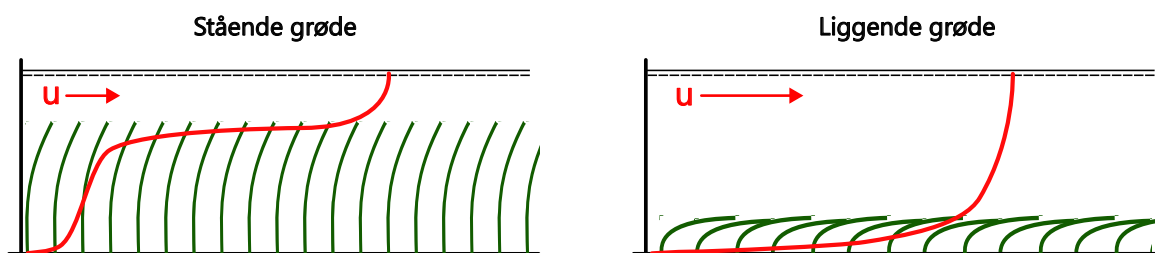
9 | Forsøg med grødescenarier

I dette kapitel afdækkes forsøg med grødescenarier. Disse grødescenarier tager udgangspunkt i forskellige grader af grødeskæringer. Den type af grødeskæring, som vil blive undersøgt, er en strømrødeskæring. En strømrødeskæring er en udbredt metode, som indgår i mange vandløbsregulativer, herunder regulativet for Nørreå.

I afsnit 9.1 foretages en undersøgelse af kraftpåvirkningen på en enkelt grødestrimmel, for at kortlægge grødens afbøjning ved varierende hastigheder og bestemme de kræfter som influerer afbøjningen. I afsnit 9.2 gennemgås forsøgene med grødescenarierne, hvor den hydrauliske modstand bestemmes og analyseres. Herefter vil der i afsnit 9.3 foretages en analyse af hastighedsmålinger, hvor Laser Doppler Anemometeret (LDA) benyttes. Analysen skal, i sammenhæng med grødescenarierne, bidrage til at give et overblik over strømningshastigheden og hvordan den samlede strøm fordeler sig i strømrøden. Det hele er med henblik på at bestemme vandføringsevnen ved forskellige grødeskæringer. Afslutningsvis opsummeres de væsentligste punkter fra resultaterne opnået gennem forsøgene.

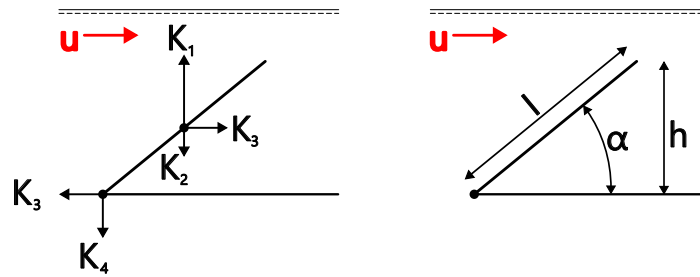
9.1 Kraftpåvirkning på grødestrimmel

Det forudsættes at grøden bliver presset mod bunden i takt med at strømningshastigheden øges. Derved reduceres den hydrauliske modstand, hvilket resulterer i et strømningsmønster, der ligner det i et grødefrit vandløb. Figur 9.1 præsenterer en principskitse, der illustrerer indflydelsen af strømningshastighed på grøden. Hertil vil opdrift, strømkræfter, tyngdekraft og reaktionskræfter være betydelige faktorer for grødens afbøjning i vandet. I forsøget forventes lignende tendenser for den kunstige grøde, idet det antages at opføre sig tilnærmelsesvis som autentisk grøde. Derfor beregnes ikke kun modstanden som den kunstige grøde yder, men også de kræfter som påvirker den enkelte strimmel.



Figur 9.1: Hastighedsprofil i stående- og liggende grøde ved lav og høj strømningshastighed.

Figur 9.2 illustrerer to skitser: et kraftdiagram for en enkelt plante og den effektive højde (h) ved en given hastighed (u) og vinkel (α).



Figur 9.2: Kraftdiagram for en enkelt plante.

Ud fra foregående figur kan der, jf. Mikkelsen [1989], opstilles følgende ligninger for de kræfter, der påvirker grøden. Kraften K_1 beskriver opdriften og bestemmes ved at beregne forholdet mellem grødens densitet, ρ_g og vandets densitet, ρ_v . V er volumen og g er tyngdeaccelerationen. I bilag C fremgår måling og beregning af grødestrimlens densitet.

$$K_1 = V \cdot (\rho_v - \rho_g) \cdot g \quad (9.1)$$

K_2 beskriver den lodrette strømkræft-komponent som fremgår i ligning 9.2. Her beregnes der med den horisontale middelhastighed u .

$$K_2 = C_L \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot u^2 \cdot A \quad (9.2)$$

Hvor C_L er den lodrette strømkræft-koefficient som beregnes ud fra nedenstående ligning (9.3).

$$C_L = 1,1 \cdot \sin^2 \alpha \cos \alpha \quad (9.3)$$

Den vandrette strømkræft-komponent K_3 beregnes på samme måde som K_2 .

$$K_3 = C_v \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot u^2 \cdot A \quad (9.4)$$

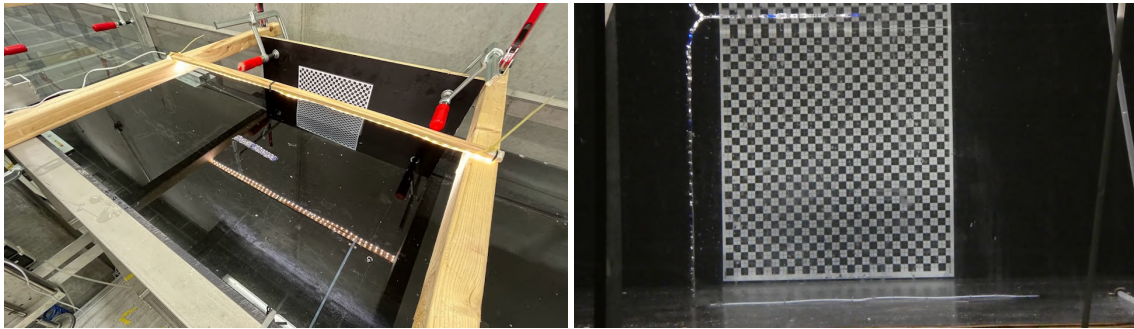
C_v er den vandrette strømkræft-koefficient som bestemmes ud fra ligning 9.5.

$$C_v = 1,1 \cdot \sin^3 \alpha \quad (9.5)$$

Reaktionskraften K_4 repræsenterer den resulterende kraft af K_1 og K_2 , som bestemmes på følgende måde.

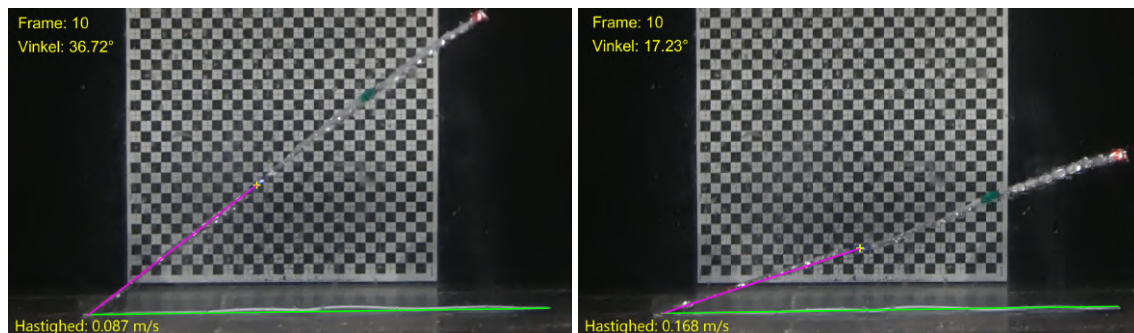
$$K_4 = K_1 - K_2 \quad (9.6)$$

Grødens vinkel, der bruges til beregning af C_L og C_v , måles i forsøget ved hjælp af Motion Tracking der kan fange en række farvede afmærkninger på grødestrimlen, hvor vinklen af grøden måles relativt til bundpladen. Hele opsætningen kan ses på figur 9.3. På figuren kan der også ses et skakbræt i baggrunden, som kan bruges til visuel manuel verificering af den målte vinkel.



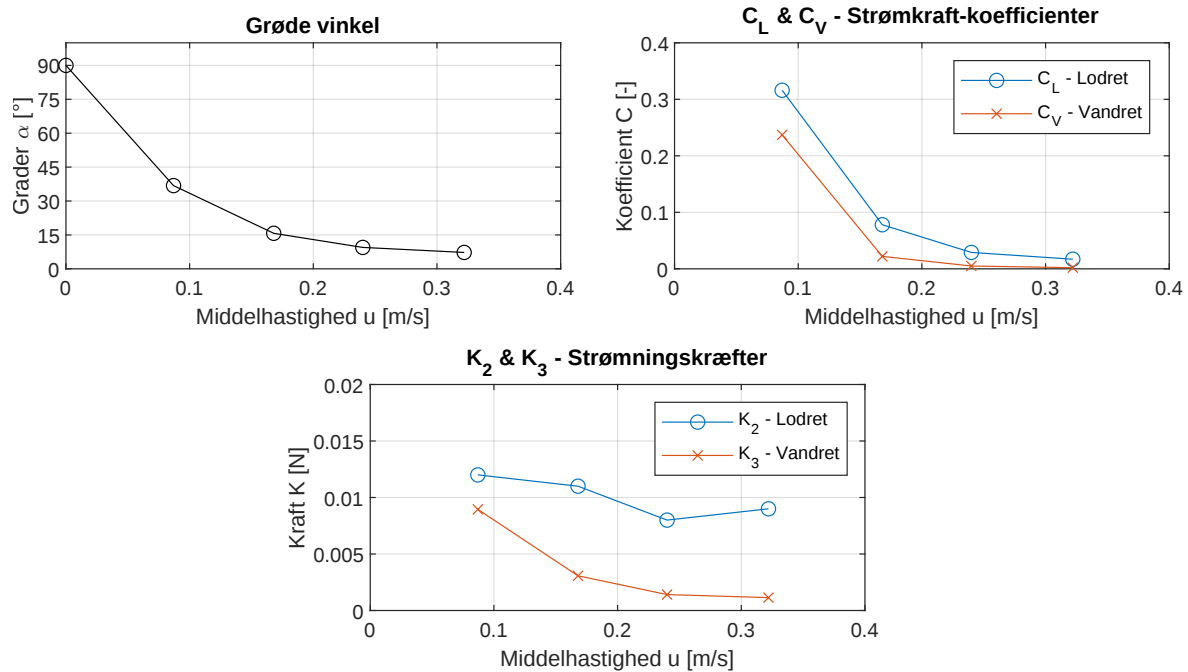
Figur 9.3: Forsøgsopsætning og billede af strimmel i stillestående tilstand, dvs ved ingen kraftpåvirkning. Strimlens dimensioner er 2X50 cm.

På nedenstående billeder demonstreres, hvordan grødens vinkel måles ved hjælp af Motion Tracking baseret på en given hastighed. Den grønne linje indikerer vinklens udgangspunkt på bundpladen, mens den lilla linje viser grødens placering i forhold til bundpladen.



Figur 9.4: Kraftpåvirkning på grødestrimmel ved hastigheder på hhv. 0,087- & 0,168 m/s.

I figur 9.5 fremgår de opnåede resultater for bestemmelse af kraftpåvirkningen på en enkelt grødestrimmel. Den første graf viser grødens vinkel som funktion af hastigheden. I stillestående tilstand er grødestrimlen vinkelret på bundpladen, hvorefter den aftager eksponentielt i takt med at hastigheden tiltager. Den næste graf viser de vertikale og horisontale strømkræft-koefficienter (C_L og C_V), beregnet ud fra ligning 9.3 og 9.5. Det fremgår tydeligt, at den maksimale strømkræft opstår ved en strømningshastighed på ca. 0,09 m/s, mens der sker en drastisk reduktion ved blot en stigning på 0,08 m/s. Af den nederste graf i den pågældende figur illustreres K_2 og K_3 , hvilket repræsenterer henholdsvis de vertikale og horisontale strømkræft-komponenter, beregnet ud fra ligning 9.2 og 9.4.



Figur 9.5: Kraftpåvirkning på en enkelt grødestrimmel ved forskellige strømningshastigheder, baseret på ligning 9.3 og 9.5.

Her kan det ses at lodrette kraft K_2 aftager lineært proportionalt med hastigheden, hvorimod K_3 aftager med en potens lignende relation med hastigheden. Der sker også en tydelig reaktion fra grøden, selv ved lave hastigheder, hvilket kan være en konsekvens af den lave rigiditet som bobleplast besidder, samt at opdriften af hele strimlen kun er svarende til 0,076 Newton. Ud fra dette kan der forklare at der er god sammenhæng mellem hastigheden af vandstrømmen og den modstand som grøden påvirker strømmen med.

9.2 Bestemmelse af Manningtal over grødescenarier

For at beskrive variationerne af den hydrauliske modstand, som påvirkes af mængden af vegetation i vandløb, kan det empiriske udtryk, Manningformlen, introduceres. Manningformlen anvendes til at beregne vandføringen baseret på forskellige parametre for et givet vandløb, herunder Manningtallet. Dette tal er en empirisk bestemt parameter, der karakteriserer modstanden i vandløbet. I ligning 9.7 fremgår Manningformlen som benyttes til at bestemme Manningtallet.

$$u = M \cdot R^{2/3} \sqrt{I} \quad (9.7)$$

Hvor:

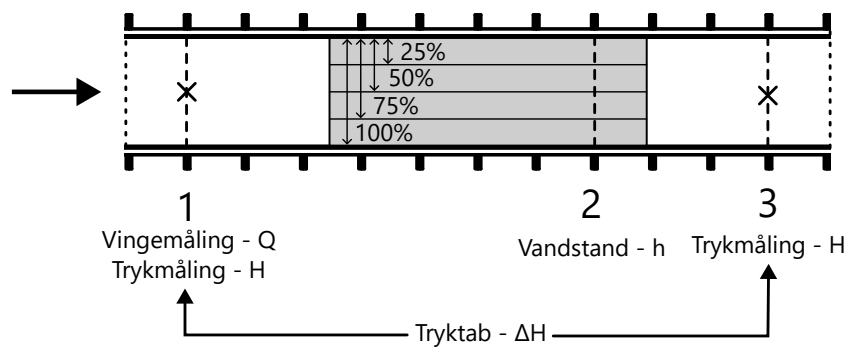
u	Middelstrømhastighed [m/s]
M	Manningtal [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]
R	Hydraulisk radius [m]
I	Vandspejlshældning [m/m]

Ved at introducere vandføringen Q gennem kontinuitetsligningen, som beskrevet i ligning 9.8, opnås udtrykket for Manningformlen, som vist i ligning 9.9, hvor A er det gennemstrømmende tværsnitsareal i m^2 .

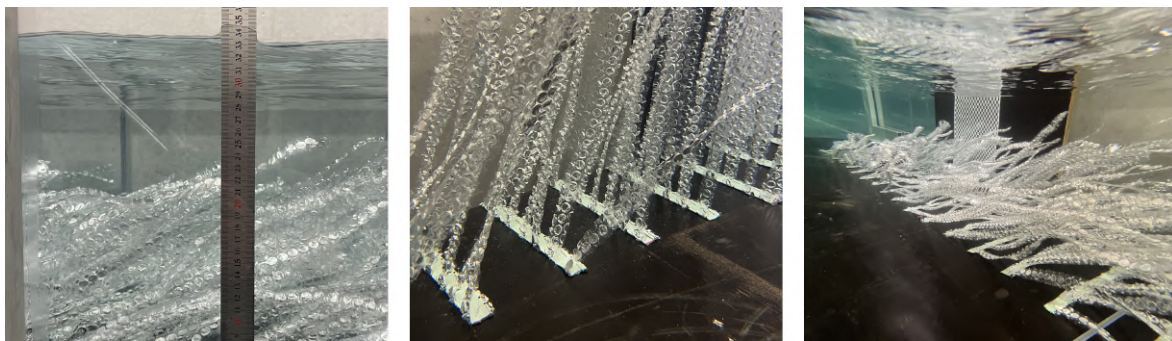
$$Q = A \cdot u \quad (9.8)$$

$$Q = A \cdot M \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I} \quad (9.9)$$

Med udgangspunkt i ovenstående teori er dette forsøg designet til at simulere forskellige grader af grødeskæringer med det formål at analysere, hvordan vegetationen og dens fordeling påvirker den hydrauliske modstand i et vandløbssystem. Forsøget testes på fire forskellige strømløbdebredder, hvor grøden gradvist reduceres fra at dække hele bundbredden (100%) til at dække 75%, 50% og til sidst 25% af bundbredden. På figur 9.10 vises en skitse af forsøgsopstillingen, som giver et overblik over grødescenarierne samt de målinger, der udføres for at bestemme Manningtallet. Billeder fra forsøget kan ses på efterfølgende figur 9.7. Fra ligning 9.9 bestemmes vandføringen Q ud fra vingemålinger som foretages i opstrøms fra undersøgelsesområdet (punkt 1). Endvidere udføres der løbende vandstandsmålinger i punkt 2 for at tage højde for variationer i det gennemstrømmende tværsnitsareal, A , og den hydrauliske radius, R , som følge af ændringer i strømningshastigheden. Vandspejlshældningen, I , bestemmes ved hjælp af målinger af trykforskellen mellem punkt 1 og punkt 3, henholdsvis opstrøms og nedstrøms for undersøgelsesområdet.



Figur 9.6: Skitse af grødescenarier inden for undersøgelsesområdet (markeret med gråt) og de steder hvor der udføres målinger. Pilen angiver vandets strømretning og kryds markere trykudtag ved strømrendens bund.



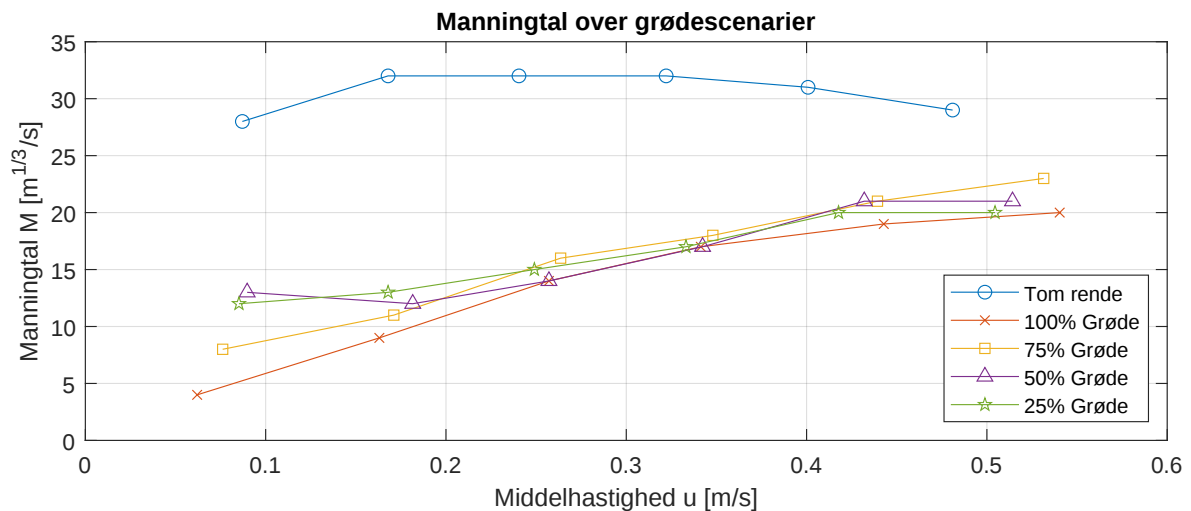
Figur 9.7: Billeder af måling af vandstand og forskellige grødescenarier.

På figur 9.8 fremgår Manningtallet beregnet ud fra de forskellige grødescenarier som funktion af hastigheden. Den blå linje, der indikerer den tomme rende uden grøde, viser, at Manningtallet forbliver relativt konstant uafhængigt af hastigheden, hvilket betyder, at der stort set ikke blev målt nogen ændring i modstanden.

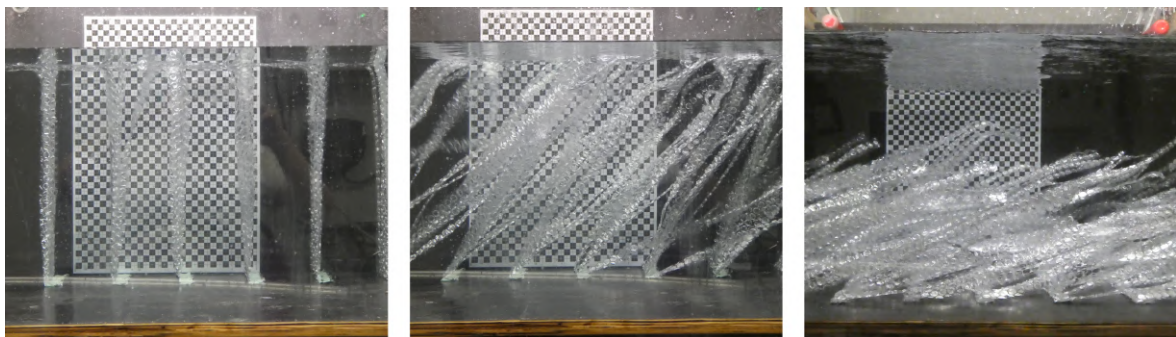
Betragtes derimod grødescenarierne, observeres de største variationer af Manningtallet ved lave hastigheder. Dog ses der ikke en betydelig variation, når resultaterne sammenlignes, hvilket kan skyldes flere forskellige årsager. En af disse årsager kan relateres til de næsten ensartede tryktab der løbende blev målt, uanset mængden af vegetation. Dette antages at være en faktor, der bidrager til, at Manningtallet ikke afviger betydeligt fra hinanden. I figur 9.9 demonstreres tydeligt hvordan grøden afbøjer i takt med at strømningshastigheden øges, hvilket er i klar overensstemmelse med observationerne fra forsøget med den enkelte grødestrimmel. Det antages derfor ikke at være usandsynligt, at denne tendens også bidrager til, at Manningtallet bliver mere ensartet for alle scenarier ved høje strømningshastigheder. Udover dette, var der en generel tendens til vandstanden fluktuerede meget, hvilket førte til unøjagtige vandstandsmålinger. Dog er der ved nærmere betragtning af de beregnede gennemstrømsarealer og hydraulisk radius ikke observeret betydelige afvigelser, hvilket tyder på, at disse måleusikkerheder ikke har en nævneværdig indflydelse på det endelige resultat.

En væsentlig ting der skal noteres er, at Manningformlen umiddelbart kun gælder for ru vægge. Dette er ikke tilfældet med strømningsrenden, som er fremstillet af glat akrylglas, hvor ruheden er meget lav. Derfor kan Manningtallet, især for den tomme rende, være usikker, da det kan ligge uden for gyldighedsområdet for Manningformlen. For at kunne tage højde for den lave ruhed

bør eksempelvis Colebrook og Whites formel anvendes. Men idet Manningtallet for den tomme rende ligger på omkring $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, vurderes det ikke at være urealistisk højt sammenlignet med tabelværdier for grødefri vandløb, hvor spændet ligger mellem 33 og $55 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Dog er dette relativt lavt set i forhold til retlinede kanaler, som strømningsrenden, hvor Manningtallet typisk ligger mellem 61 og $80 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Betragtes de resterende grødescenarier, ligger Manningtallet mellem 4 og $23 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, hvilket vurderes at ligge i et acceptabelt spænd sammenlignet med tabelværdier for grødefyldte vandløb, som typisk varierer mellem 8 og $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. [Brorsen og Larsen 2009]



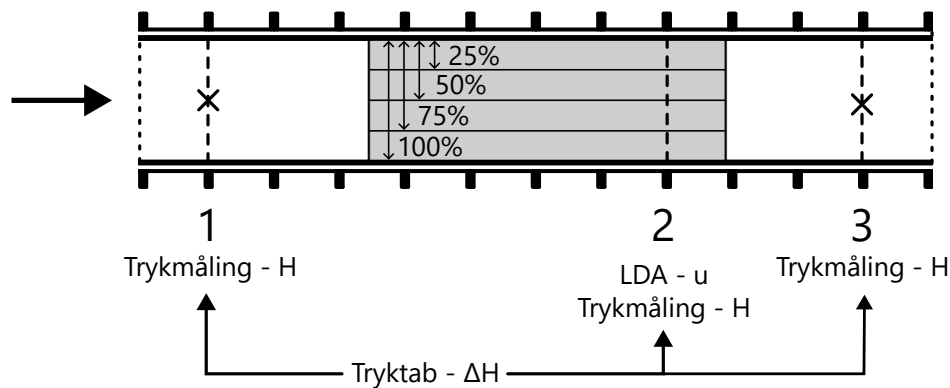
Figur 9.8: Manningtal over grødescenarier som funktion af middelhastigheden.



Figur 9.9: Billede af grødens afbøjning ved tiltagende strømningshastigheder.

9.3 Hastighedsmålinger i strømrrende

For hvert grødescenarie er der foretaget løbende hastighedsmålinger med Laser Doppler Anemometeret (LDA) for at undersøge, hvordan hastigheden fordeles sig i forhold til strømrrendens bredde. I modsætning til vingemålingerne udføres LDA-målingerne direkte i strømrrenden under forsøget, som angivet i punkt 2 på figur 9.10. LDA-hastigheden, u , måles i m/s. Derudover måles tryktabet både før, i og efter strømrrenden (punkt 1, 2 og 3) for at undersøge eventuelle sammenhænge mellem hastighed og tryk. Tryktabet i strømrrenden betegnes som ΔH_{12} , mens tryktabet efter strømrrenden betegnes som ΔH_{13} . Billeder fra forsøget kan ses på figur 9.11.

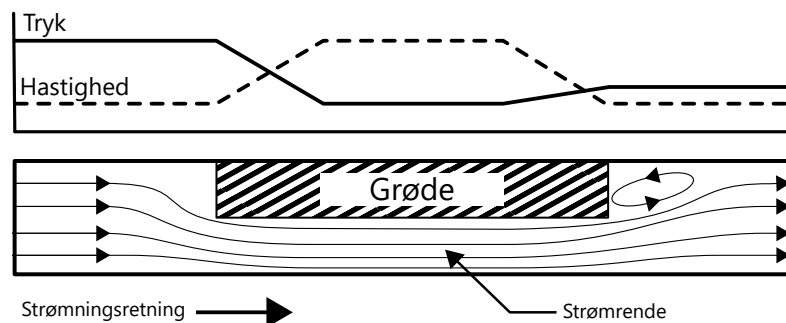


Figur 9.10: Vandret tværsnit over målinger af tryk og hastighed med Laser Doppler Anemometer (LDA) udført over grødescenarier. Kryds markere trykudtag ved bund.



Figur 9.11: Billede af LDA måler og forsøg med grødescenarie.

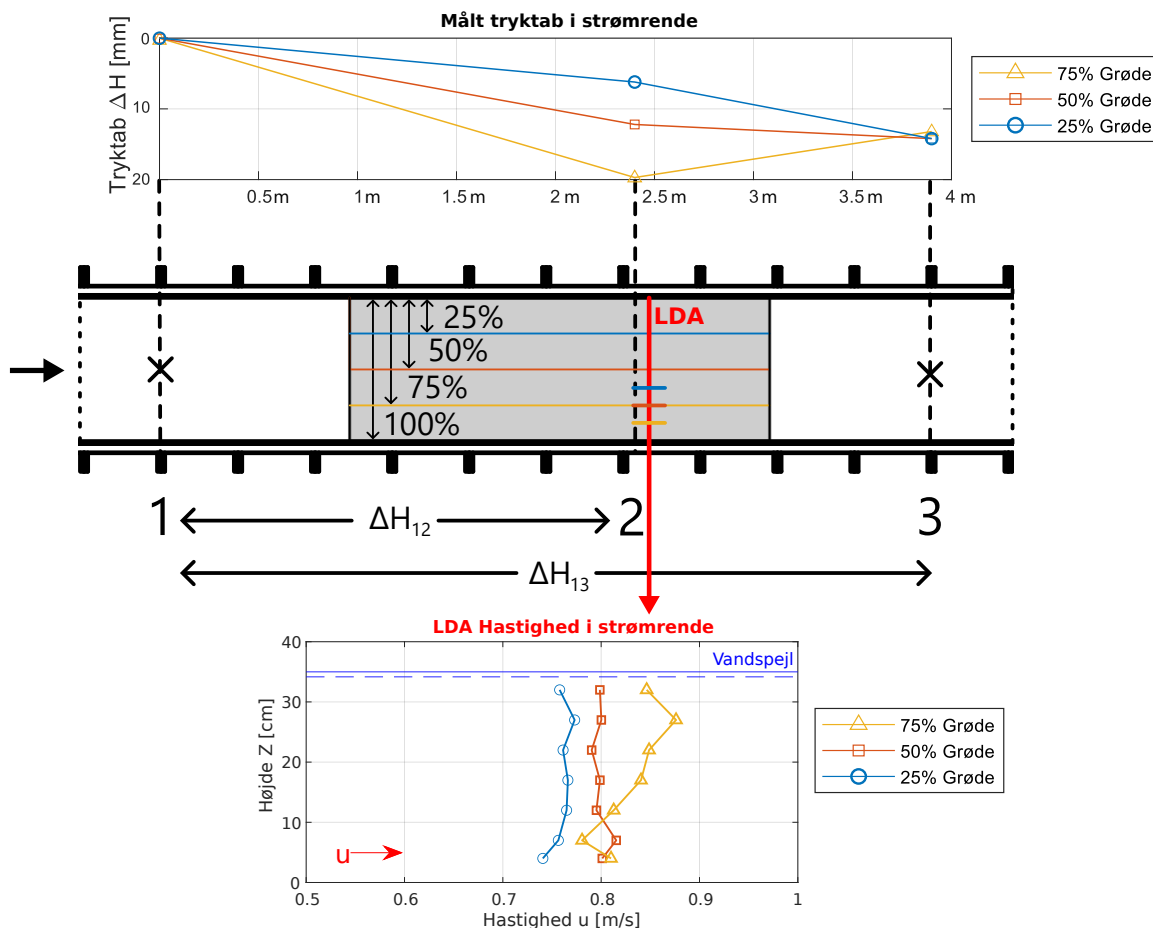
I forlængelse af foregående diagram på figur 9.10 er der på figur 9.12 skitseret, hvordan hastigheden og trykket forventes at fordele sig inden for undersøgelsesområdet (skraveret område). Det antages umiddelbart, at strømningshastigheden accelererer i strømrønden, da tværsnittet bliver mindre, hvilket fører til et fald i trykket. Ved udgangen af undersøgelsesområdet forventes hastigheden at aftage, da tværsnittet øges, men trykket vil forblive lavt. Dette skyldes, at når strømlinjerne divergerer, som vist på figuren, dannes der hvirvler, hvilket resulterer i et betydeligt energitab og forhindrer trykket i at stige igen [Brorsen og Larsen 2009].



Figur 9.12: Øverst på figuren ses et længdeprofil af hastigheden og trykket. Under længdeprofilet ses et snit af strømningsrønden med strømlinjer set oppefra.

På figur 9.13 fremgår resultaterne trykmålingerne i- og efter grøden, samt LDA hastighedsmålingerne. Ydermere omfatter resultaterne kun scenarierne med henholdsvis 75%, 50% og 25%

vegetation. Dette skyldes, at LDA-måleren kræver tilstrækkeligt med partikler for at kunne opfange hastigheden. Derfor har det ikke været muligt at måle ved lavere hastigheder, da hastigheden skal være tilstrækkelig for at kunne resuspendere partiklerne i renden. Af samme årsag har det heller ikke været muligt at måle hastigheden inde i selve grøden, da grøden blokerer partiklerne.



Figur 9.13: Vandret snit med målt tryktab og LDA-hastigheder ved forskellige grødescenarier.

Ved de målte tryktab ses der i takt med at mængden af grøde stiger, forekommer der et øget tryktab i snit 2 ved selve strømrønden relativt til det samlede tryktab i snit 3. Dette tyder på at strømmen bliver indskrænket som følge af den øgede mængde grøde, og som forventet sker der et tryktab som forklaret i figur 9.12. Det kan dog ses at det samlede tryktab bliver relativt lidt påvirket af dette fænomen.

Fra hvert enkelt af de betragtede scenarier observeres det også, at hastighedsfordelingen i højere grad forbliver konstant i hele vandsøjlen. Dog bemærkes en tendens til en aftagende hastighed ved 20 cm og derunder i scenariet med 75% vegetation. Erfaringen viste, at LDA'en havde vanskeligheder med at måle hastigheden jo tættere mod bunden den var placeret. Det vurderes derfor at potentielle målefejl kan være opstået under dette forsøg.

Ved nærmere iagttagelse af scenarierne bemærkes en sammenhæng mellem størrelsen af strømrønden og de målte hastigheder. Ved 25% vegetation, hvor strømrønden er bredest, observeres de laveste hastigheder, hvorefter hastigheden tiltager gradvist i takt med, at strømrønden bliver smallere. Sammenlignes LDA-målingerne med hastighederne fra vingemåleren, betragtes en klar forskel. De foretagne vingemålinger fra alle grødescenarier

giver et hastighedsspænd på ca. 0,01 - 0,5 m/s, mens LDA-målingerne viser hastigheder mellem 0,75 - 0,9 m/s. Dette bekræfter hermed den forventede acceleration af hastigheden i strømrønden.

9.4 Opsummering

Ud fra dette kapitel kan følgende opsummeres:

1. I den første del af forsøget kunne kraftpåvirkningen på en enkelt grødestrimmel bestemmes ved anvendelse af Motion Tracking. Her blev det fundet frem til at grødestrimlen afbøjede relativt let ved blot små hastighedsændringer.
2. Forsøget med grødescenarierne påviste et variabelt Manningtal afhængigt af strømningshastigheden. Samtidigt er der en relativ lille forskel på Manningtallet som følge af grødens dækningsgrad, som var på 25%, 50%, 75% og 100%.
3. Det blev påvist, at grøden medvirker til at øge strømningshastigheden i strømrønden, på bekostning af et større tryktab, som blev målt i strømrønden. Dog havde dette kun minimal indflydelse på det samlede tryktab over grøden.

10 | Forsøg med stenudlægning

I dette kapitel gennemgås forsøg med stenudlægninger, som også bliver udført i strømningsrenden. Stenudlægninger udgør, som førnævnt, en betydelig del af vandløbsrestaureringer, for at tilgodese biodiversiteten og skabe flere naturlige variationer i et vandløbssystem.

Til de eksperimentelle forsøg er der udvalgt fire sten i varierende størrelser og form, hvor den hydrauliske modstand ønskes kvantificeret gennem enkelttab, som vil blive præsenteret i afsnit 10.1. De udvalgte sten er vist som 3D-renderinger i figur 10.1 og deres tilhørende vægt og dimensioner er angivet i tabel 10.1. Endvidere vil der i afsnit 10.2 foretages forsøg med Particle Image Velocimetry (PIV) og LDA med henblik på at kortlægge strømningsmønsteret efter hver sten. I den sidste del af kapitlet laves en kort opsummering, hvor de væsentligste iagttagelser, fejlkilder og forbedringer vil blive gennemgået.



Figur 10.1: 3D-renderinger af de udvalgte sten.

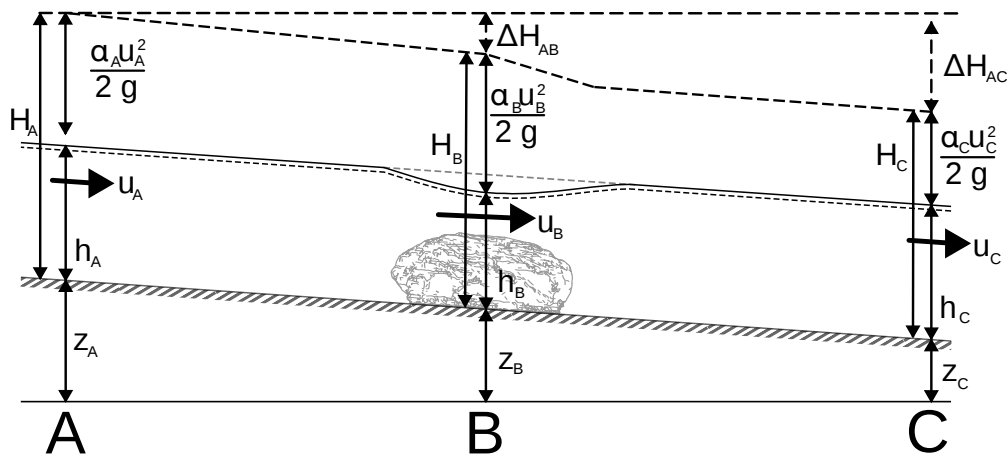
	Længde [cm]	Bredde [cm]	Højde [cm]	Vægt [kg]	Volumen [m ³]	Diameter [mm]
Sten 1	29	23	13	5	0,004	Ø197
Sten 2	40	30	23	22	0,016	Ø313
Sten 3	42	35	20	22	0,013	Ø292
Sten 4	50	35	21,5	38	0,021	Ø342

Tabel 10.1: Tabel over dimensioner og vægt af de udvalgte sten.

10.1 Bestemmelse af enkelttab

Udlægning af sten er blandt mange af de tiltag, der foretages i restaureringsprojekter i vandløb. Ligegyldigt om det er grøde eller sten, udgør begge dele modstand, hvilket påvirker strømningsmønsteret og vandføringsevnen. Når større sten placeres i vandløb, reduceres strømningsarealet, hvilket får trykket til at falde og accelererer vandet over stenen. Dette vil resultere i et energitab, som skyldes dannelsen af ekstra turbulens i slipstrømmen af stenen. Et sådan energitab betragtes også som et enkelttab, da der opstår en lokal indsnævring [Brorsen og Larsen 2009]. I dette forsøg vil det derfor ikke være korrekt at anvende et Manningtal, da Manningtallet er en betragtning af den hydrauliske modstand over en længere strækning. For at illustrere, hvordan enkelttabet betragtes, viser figur 10.2 et længdeprofil med en udlagt sten, hvor

tre snit (A, B og C) er indsat. Derudover er der skitseret energilinje med en stiplede linje mellem snit A og C som beskriver energitabet i længdeprofilet.



Figur 10.2: Endimensional betragtning af energitabet af en enkelt sten. Energitabet betragtes i snit A, B og C.

Det ses at energilinjen falder i snit B, hvilket skyldes at tværsnittet indsnævres på grund af den udlagte sten. Med andre ord opstår der et såkaldt enkelttab, som kan udtrykkes ved ligning 10.1, kendt som enkeltabsformlen eller *Carnots formel*.

$$\Delta H_{AC} = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (10.1)$$

I ovenstående formel indgår blandt andet modstandstallet ζ , som er en dimensionsløs parameter, der beskriver den energi som går tabt under pludselige ændringer i et system. Målet med dette forsøg er at bestemme modstandstallet, da denne parameter kan anvendes til at beskrive pludselige ændringer i et større system, hvilket vil blive gjort gennem en hydrologisk vandløbsmodel i nærværende rapport. For at korrekt bestemme enkelttabet, som beskrevet ved indsnævringen i snit B, kræves det ifølge Larsen [2017], at den fulde energiligning anvendes som angivet i ligning 10.2, svarende til en endimensional betragtning.

$$z_A + h_A + \frac{\alpha_A u_A^2}{2g} = z_C + h_C + \frac{\alpha_C u_C^2}{2g} + \Delta H_{AC} \quad (10.2)$$

Hvor:

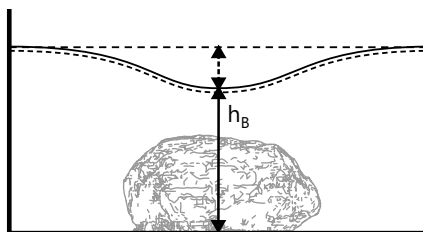
ΔH_{AC}	Energitab mellem A og C [m]
H	Energi højde [m]
h	Trykhøjde [m]
u	Middel hastighed [m/s]
z	Udgangsniveau [m]
α	Hastighedsfordelingskoefficient [-]
g	Tyngdeacceleration [m/s ²]

Baseret på ovenstående formel bestemmes middelhastigheden, V_A , og højden, H_A , ved brug af vingemåler og lineal. Middelhastigheden i snit B, V_B , beregnes ved at dividere vandføringen Q ,

målt i snit A med det våde areal omkring stenen, svarende til areal i snit A fratrasket tværsnits arealet af stenen i snit B, således som i følgende ligning 10.3.

$$u_B = \frac{Q}{A_A - A_{Sten}} \quad (10.3)$$

Det forventes umiddelbart at der, afhængigt af stenens størrelse, skabes en strømmende bevægelse over stenen, hvilket resulterer i en lavere vandstand i snit B. Denne tendens er også illustreret i figur 10.2 samt figur 10.3. For at gøre beregningerne mindre komplekse, vælges der at se bort fra at vandspejlet påvirkes over stenen, hvorfor der tages udgangspunkt i den lige stiplede linje, som også fremgår af samme figurer. Middelhastigheden i snit C, V_C , beregnes på samme måde som i snit B. Her anvendes målinger med lineal af højden, H_C , til at tage højde for det varierende gennemstrømningsareal og dermed varierende V_C . Forinden forsøgene måles udgangsniveauet z . Billederne i figur 10.4 viser hvordan stenene er udlagt i strømningsrenden.



Figur 10.3: Betragtning af stenens indflydelse på vandspejlet i snit B, illustreret i et tværsnit.

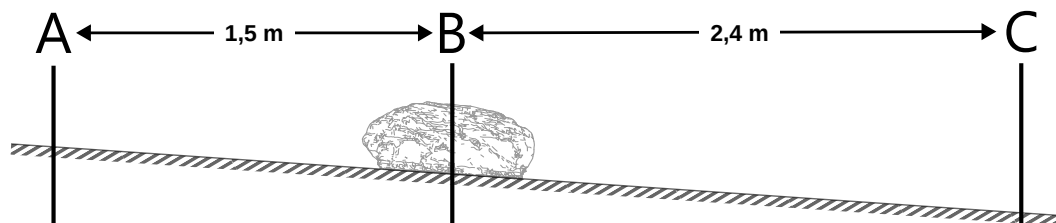


Figur 10.4: Billede af alle sten samlet på en palle, samt sten 3 og 2 i strømningsrenden.

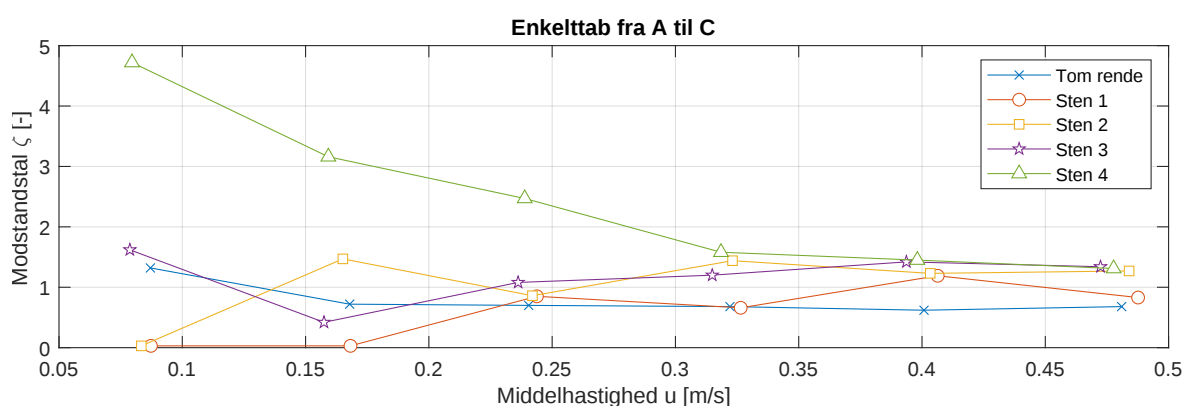
Hastighedsfordelingskoefficienten, α , kan beregnes, men der eksistere også forudbestemte værdier for kanaler og vandløb. Som udgangspunkt antages α at være 1 i alle snit, der ifølge Brorsen og Larsen [2009] svarer til at hastigheden er næsten ens i alle punkter i tværsnittet. Denne antagelse er en simpel betragtning, hvorfor det undersøges hvorvidt denne antagelse er repræsentativ gennem hastighedsmålinger foretaget med vingemåler. Men da sten kan betragtes som et geometrisk komplekst objekt, er det nødvendigt at udføre modellforsøg, hvis α skal tilnærmes mere præcist. Derfor vil der blive udført et forsøg med en tredimensional numerisk CFD-model (Computational Fluid Dynamics) senere i denne rapport.

Baseret på ligning 10.1 er modstandstallet mellem snit A og C samt B og C beregnet, se figur 10.5. Resultaterne af dette fremgår af 10.6 og 10.7. Betragtes resultaterne fra snit A til C, ligger modstandstallet for Sten 4 særligt højt ved omkring 0,08-0,3 m/s, hvorefter det aftager og bliver

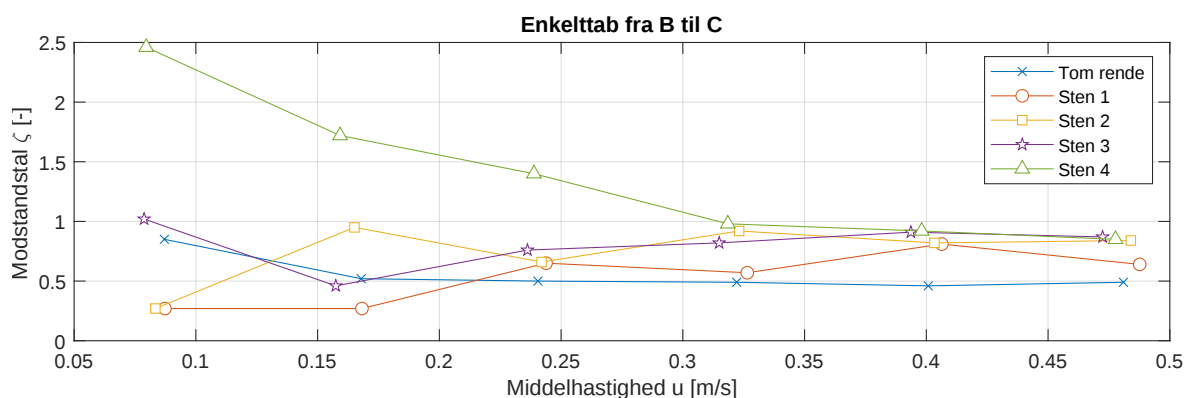
mere konstant. Generelt kan der observeres en tendens til, at modstandstallet varierer mere ved lave hastigheder end ved høje hastigheder, hvor det stabiliserer sig. Sammenlignes dette med resultaterne fra snit B til C i figur 10.7, er de visuelt identiske. Dog er modstandstallene betydeligt lavere i disse snit i forhold til snit A og C. Årsagen til de betydelige variationer ved lave hastigheder kan tilskrives måleusikkerheder.



Figur 10.5: Lokation af snit A,B og C.



Figur 10.6: Beregnede modstandstal for Sten 1-4 fra snit A til C.



Figur 10.7: Beregnede modstandstal for Sten 1-4 fra snit B til C.

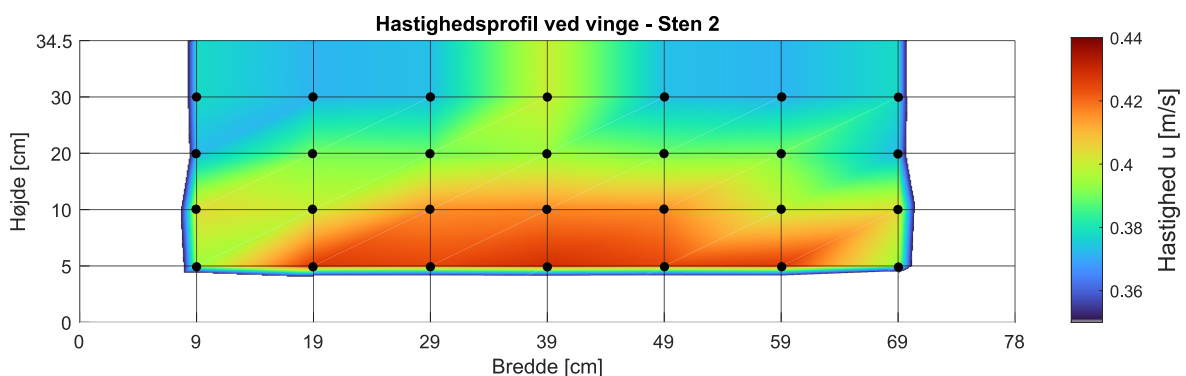
Der kan være forskellige årsager til, at resultaterne fra figur 10.6 og 10.7 varierer, når de sammenlignes. Blandt andet er det vigtigt at notere, at enkelttabet er beregnet over to forskellige afstande. Fra figur 10.5 vides det at snit A og C ligger hhv. opstrøms og nedstrøms for undersøgelsesområdet, hvor snit B er placeret ved stenen. Sandsynligvis vil effekten af stenens enkelttab være mindre mellem A og C, hvor den er større mellem B og C. Dette indikerer, at strækningen mellem snit A og C giver et mere overordnet billede af energitabet, men at enkelttabet ved den bratte indsnævring, forårsaget af stenen, bliver mindre betydelig. Derfor vurderes det,

at de beregnede modstandstal mellem snit B og C er mere repræsentative, da enkelttabet er målt ved stenen. I tabel 10.2, er gennemsnittet af værdierne over 0,3 m/s beregnet. Dette er gjort med den betragtning, at modstandstallene er mere stabile ved hastigheder over 0,3 m/s. På dette grundlag vurderes det, at danne et mere repræsentativt værdisæt, som vil blive anvendt videre i rapporten.

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4
ζ [-]	0,67	0,86	0,86	0,92

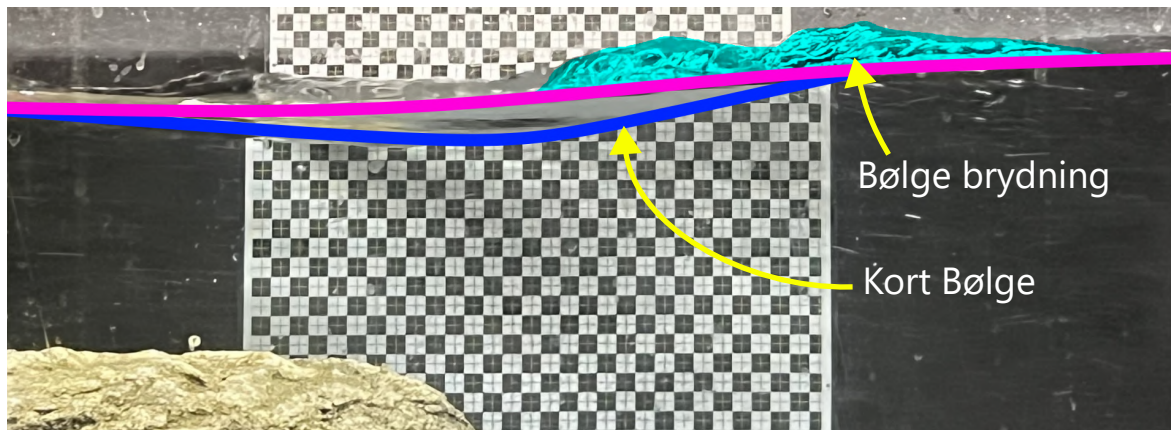
Tabel 10.2: Beregnede gennemsnits ζ -værdier for alle sten ved hastigheder over 0,3 m/s.

Ydermere er det vigtigt at påpege de antagelser der er foretaget ved hastighedsfordelingskoefficienten α . Under forsøgene blev det undersøgt, hvordan hastigheden varierede i tværsnittet ved hjælp af vingemålinger, der eksempelvis kan ses på figur 10.8. Det blev fundet frem til, at målinger gav en meget ensartet hastighedsfordeling i hele snittet, hvilket er i overensstemmelse med værdien af α , der blev bestemt til at være 1. Af denne grund blev der ikke foretaget yderligere ændringer af denne parameter i beregningerne under dette forsøg.



Figur 10.8: Eksempel på et hastighedsprofil fra vingemåling ved snit A med sten 2 i renden.

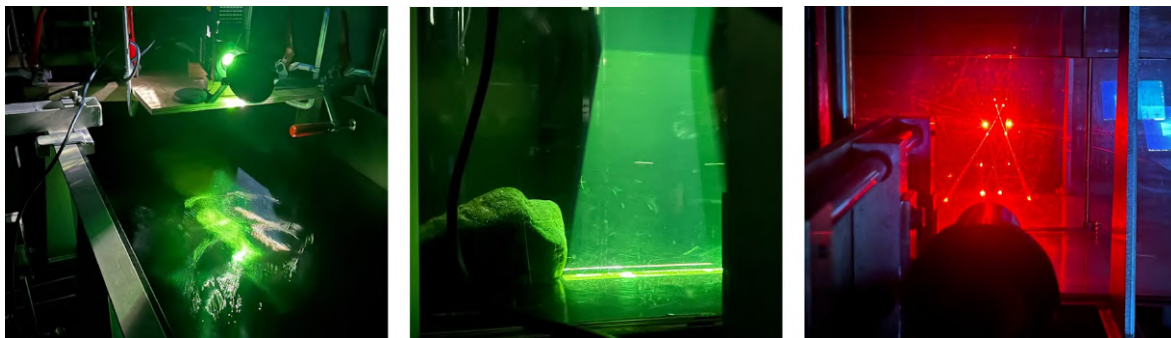
Udover antagelserne, blev det valgt at negligere de komplekse strømningsmønstre, forårsaget af stenen i snit B, for at gøre beregningerne mere overkommelige. Det vurderes at disse forsimplinger har en indflydelse på det endelige resultat. Blandt andet kan det observeres i figur 10.9, hvordan vandet i renden går fra at være i en strømmende tilstand til at danne en kort bølge, hvilket fører til en såkaldt bølgebrydning. Dette fænomen opstår som følge af en pludselig ændring i vanddybden. Teoretisk set medfører dette et markant øget tryktab på grund af øget turbulens og friktion.



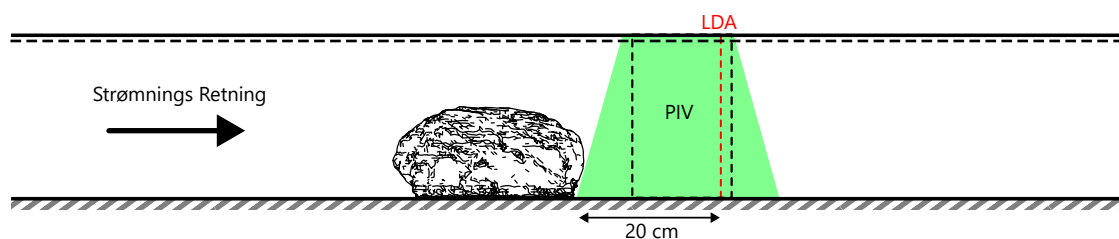
Figur 10.9: Ved højere hastigheder opstår bølgebrydning, hvilket fører til forøget energitab.

10.2 Målinger af strømningshastigheder med PIV- og LDA

I forbindelse med forsøget med stenudlægninger er der løbende blevet udført målinger med LDA-udstyret og optaget videomateriale til databehandling i PIV-lab, med henblik på at undersøge strømningshastigheden bag stenen. Opsætningen kan ses på figur 10.10, hvor det venstre og midterste billede viser PIV-opsætningen, mens det sidste billede viser LDA-opsætningen. Til PIV-opsætningen anvendes en projektor, der danner en stribe af lys på et spejl. Herfra reflekteres lyskeglen og oplyser partiklerne i vandet, hvormed de opfanges gennem et spejlreflekskamera. Partiklerne er filmet med en shutterspeed på $1/100$ af et sekund og med en framerate på 60 billeder i sekundet i ca. fem sekunder. På figur 10.11 fremgår en skitse over det område, hvor PIV- og LDA målinger er udført.

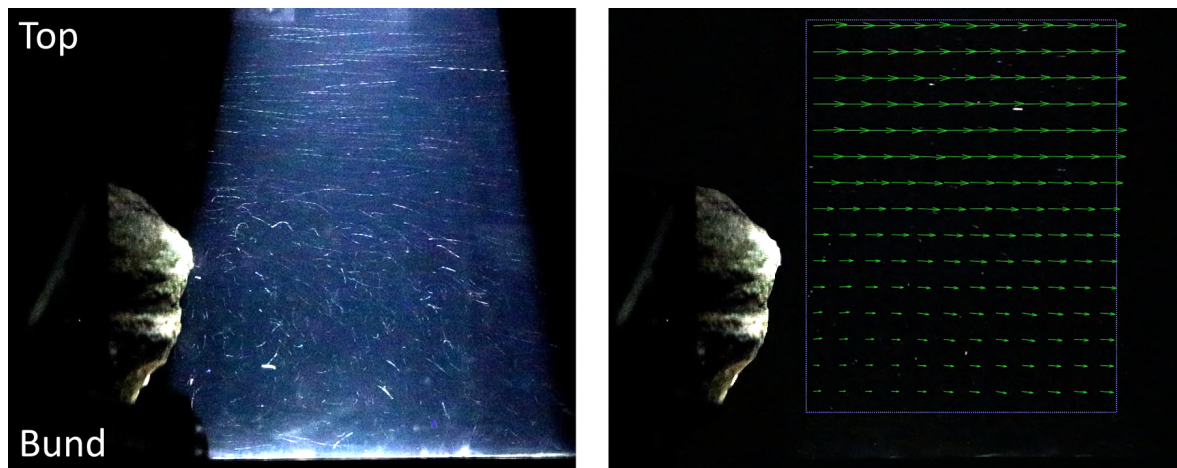


Figur 10.10: Billeder fra forsøg med PIV- og LDA målinger.



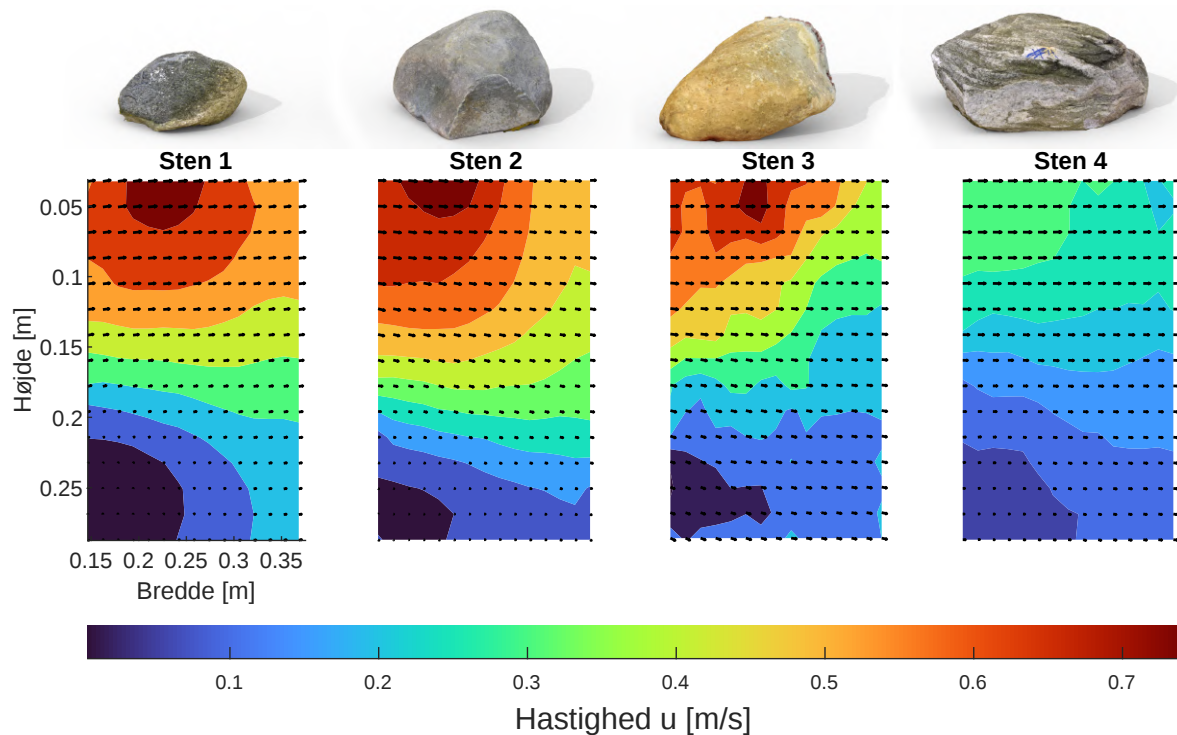
Figur 10.11: Diagram der viser område hvori LDA- og PIV målinger udføres.

På figur 10.12 gives et eksempel på, hvordan videomaterialet er blevet brugt til at generere et vektorfelt gennem PIV-lab. Her er det tydeligt at se, hvordan hastigheden er fordelt i vandsøjlen ud fra vektorpilenes størrelse.



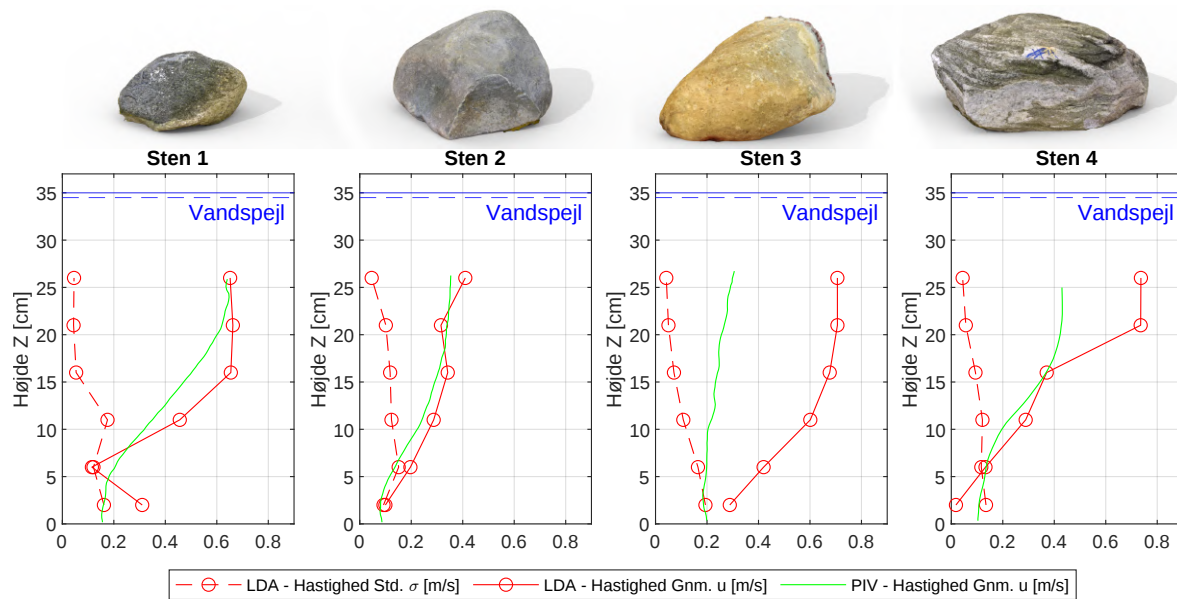
Figur 10.12: Billede med lang shutterspeed og generering af vektorfelt for Sten 4 gennem PIV-lab.

Med udgangspunkt i ovenstående, er der genereret vektorfelter for alle fire sten, som vist på figur 10.13. Det bemærkes, at de målte hastigheder varierer fra sten til sten, hvilket tyder på at størrelsen og formen på stenen har en effekt på hastighedsfordelingen. Ved Sten 1 og 2 observeres de højeste hastigheder, hvorefter det gradvist aftager ved Sten 3 og 4. Resultatet for Sten 1 vurderes at stemme godt overens med stenens størrelse, da Sten 1 er den mindste af de fire sten og derfor ikke yder lige så stor modstand som de resterende. Sten 2 og 3 er størrelsesmæssigt meget ens, men der observeres alligevel en variation i hastigheden, hvilket kan skyldes forskelle i stenenes form og deres orientering i forhold til strømretningen. For Sten 4 måles de laveste hastigheder, hvilket giver god mening, da Sten 4 er den største af de fire sten og derfor forventes at have den største modstand.



Figur 10.13: Resultat af PIV målinger vist som 2-Dimensionel hastigheds-vektorfelter for sten 1, 2, 3 og 4.

For at vurdere om de genererede hastighedsprofiler fra PIV-målingerne er repræsentative, er der lavet en sammenligning med målingerne fra LDA'en, som er præsenteret på figur 10.14. Her er middelhastigheden og standardafvigelsen fra LDA-målingerne blevet plottet sammen med middelhastighederne fra PIV-analysen. Standardafvigelsen giver et godt indblik i, hvor turbulent strømmen er, da hastigheden vil fluktuere meget ved turbulente strømme, og kan dermed vise, hvor meget stenene påvirker strømmen omkring sig. Det har dog ikke været muligt at sammenligne med PIV-turbulens, da opsætningen ikke havde tilstrækkeligt opløsning til at fange fluktuerende hastigheder i partiklerne. Det skal bemærkes, at hastighedsmålingerne kun er sammenlignet ved en middelhøj hastighed, svarende til ca. 0,32 m/s. Dette skyldes primært, at LDA-udstyret havde vanskeligheder med at opfange partikelbevægelsen ved lave hastigheder, da det kræver en tilstrækkelig hastighed for at resuspendere partiklerne op i strømmen, således at de kan opfanges af LDA-udstyret.



Figur 10.14: Sammenligning af hastigheder i tværsnit 20 cm bag sten 1, 2, 3 og 4.

På de to første grafer, som viser målinger for hhv. Sten 1- og 2, bemærkes det, at hastighedsprofilerne fra PIV-lab og LDA'en har en tydelig korrelation, hvor de gennemsnitlige hastigheder ikke afviger signifikant fra hinanden. Betragtes derimod Sten 3- og 4 er stort set ingen synlig sammenhæng mellem målingerne fra PIV-lab og LDA'en. Dette kan tyde på, at det anvendte videomateriale fra Sten 3- og 4 har været af ringe kvalitet, dvs. at ikke nok partikler har kunnet spores, hvilket kan være årsagen til, at hastighederne har en markant større afvigelse end ved Sten 1- og 2. Erfaringen viste, at der først og fremmest skal være tilstrækkeligt videomateriale i forskellig opløsning for at opnå det bedste grundlag for repræsentative målinger. Endvidere kan potentielle fejlkilder også være behæftet med det anvendte udstyr.

10.3 Opsummering

Ud fra forsøgene med stenudlægninger kan følgende opsummeres:

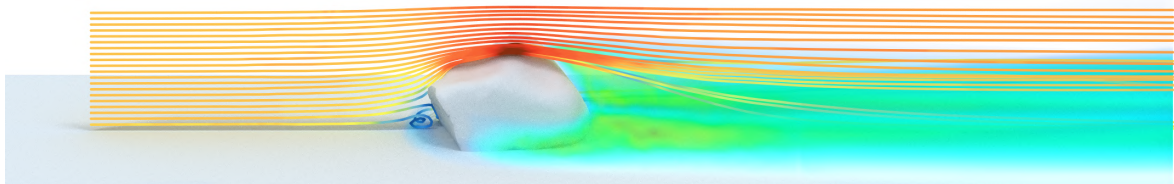
1. I første del af forsøget blev enkelttabet over de fire udlagte sten beregnet, med det mål at kunne bestemme et modstandstal, ζ . På baggrund af de beregnede modstandstal, var der observeret en relativ stor forskel i forhold til om enkelttabet blev betragtet fra snit A til C end fra B til C. Det blev vurderet, at de målte enkelttab mellem snit B og C var mest repræsentative.
2. Det blev antaget at hastighedsfordelingskoefficienten, α , var lig med 1. Her blev det dog undersøgt, hvorvidt denne antagelse var repræsentativ i beregningerne. Vingemålingerne i snit A kunne påvise en meget ensartet hastighedsfordeling i hele tværsnittet, hvilket bekræftede, at den antagne værdi for α var repræsentativ.
3. Det kunne påvises, at det med begrænsede ressourcer var muligt at lave en PIV-opsætning, der kan bruges til bestemmelse af gennemsnitshastigheder i et vektorfelt bag de udvalgte sten, men ikke til bestemmelse af turbulens i disse hastighedsfelter.

4. LDA-målinger blev anvendt til at evaluere validiteten af PIV-målingerne. Ved sammenligning mellem begge målemetoder, var den bedste korrelation observeret ved Sten 1 og 2, mens den var ringere ved Sten 3 og 4. Desuden gjorde LDA-målingerne det muligt at vurdere strømmens turbulens ved hjælp af standardafvigelsen, hvilket gav indsigt i, hvordan strømmen omkring stenene påvirkes.

11 | Virtuelt forsøg med CFD

I dette kapitel præsenteres et virtuelt forsøg, der videreudvikler stenudlægningsforsøget ved hjælp af Computational Fluid Dynamics (CFD). Forsøget bygger på hypotesen om, at brugen af CFD kan supplere fysiske forsøg, såsom det i strømningsrenden. Hvis dette viser sig at være gennemførligt, vil det tillade udførelsen af et bredere spektrum af forsøg med forskellige konfigurationer af sten. Baseret på eksperimenterne i strømningsrenden vil enkelttabet og hastighedsfordelingskoefficienten, α , over stenene blive yderligere undersøgt gennem CFD, der medvirker til en mere detaljeret forståelse af den hydrauliske modstand fra stenudlægninger.

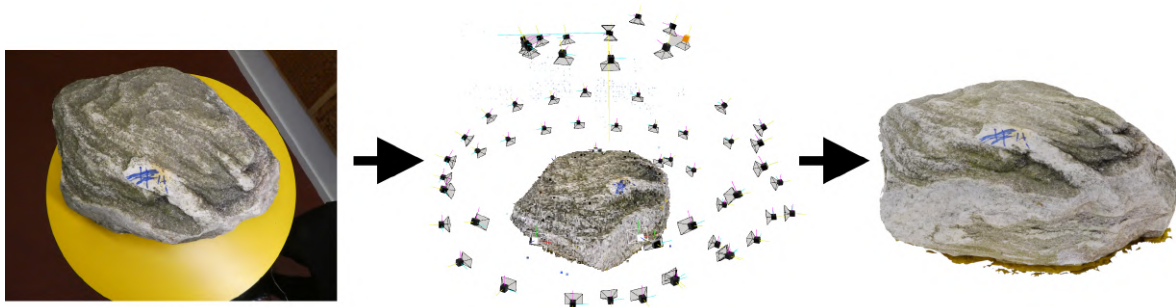
Afslutningsvis gives en overordnet opsummering af modellen, resultaterne og eventuelle fejlkilder. Modellen, som anvendes i dette forsøg, er visualiseret som en rendering i figur 11.1.



Figur 11.1: Rendering af sten 2 i en Computational Fluid Dynamics model.

11.1 Opsætning af numeriske stenmodeller

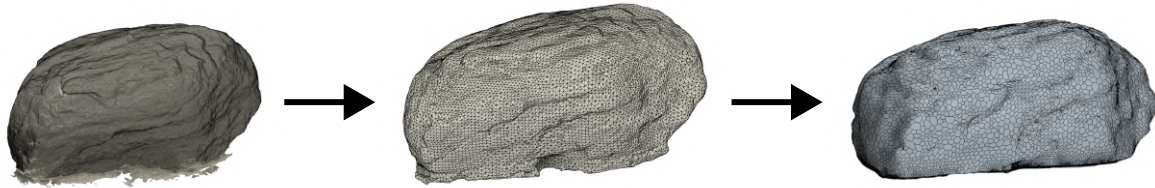
Til simuleringerne af strømningsrenden bliver det kommercielle program Star CCM+ af Siemens brugt, da dette tilbyder en lang række beregningsmodeller og analysemuligheder for simuleringerne. Opsætningen af CFD-modellen er sat op til at afspejle forsøget i strømningsrenden så vidt muligt og danne en digital tvilling. Dette vil sige at CFD-modellen bruger samme dimensioner som i strømningsrenden. Yderligere er der lavet 3D-scanninger af de fire sten fra laboratorieforsøget ved hjælp af fotogrammetri. På nedenstående figur 11.2 kan fremgangsmåden for fotogrammetri ses.



Figur 11.2: Der tages billeder af hver sten fra forskellige vinkler. Med billederne dannes der en punktsky, som er med til at danne en 3D model.

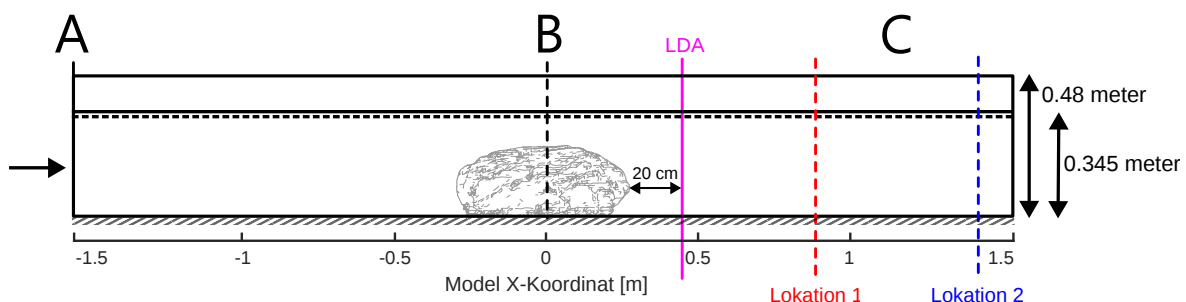
Til fotogrammetri-processen blev der anvendt mellem 80-100 billeder taget fra forskellige retninger for at danne en detaljeret punktsky ved hjælp af programmet Meshroom. Denne punktsky blev derefter brugt til at skabe en præcis 3D-geometri af de scannede objekter.

Geometrien, som fotogrammetri genererer, er ikke særligt velegnet til brug i CFD, da den dannede geometri kun er en overflade og ikke en lukket geometri. Derudover kan mængden af polygoner være for stor, hvilket kan gøre det vanskeligt at håndtere i CFD-simuleringer. Derfor bliver de genererede 3D-scanninger "remeshet", således at geometrien bliver lukket og vertexer bliver ligeligt fordelt over geometrien. Denne geometri bliver da importeret og remeshet endnu en gang i Star CCM+ for at virke med meshet i simuleringen.



Figur 11.3: Geometrien af stenene bliver remeshet for at danne en lukket geometri til CFD-simuleringerne. Disse bliver remeshet igen i Star CCM+.

Ligesom ved det fysiske laboratorieforsøg, betragtes tre snit som vist i figur 11.4. På samme figur er der markeret to lokationer med blå og rødt, som er svarende til de lokationer, hvor der er målt tryk. Opsætning og indstillinger af CFD-modellerne i Star CCM+ kan findes i bilag D.

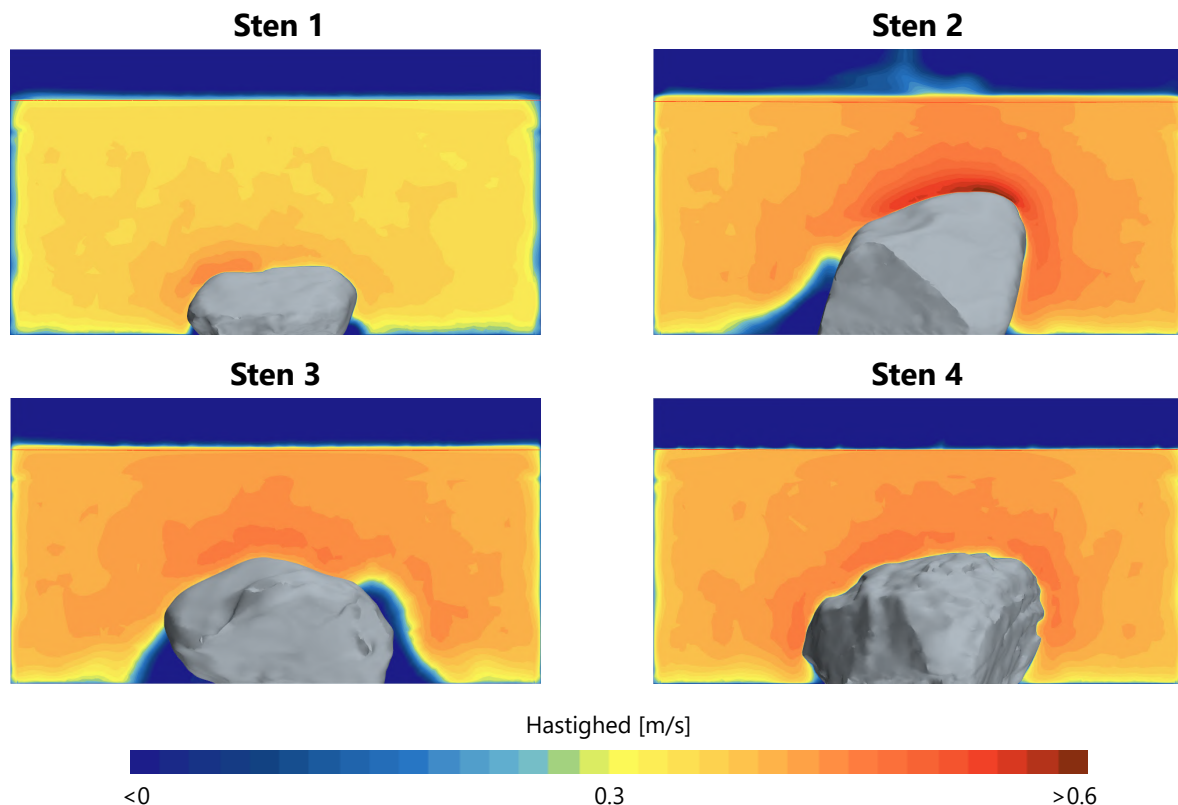


Figur 11.4: Skitse af CFD model med lokationer for trykmålinger markeret med rød og blå, lokation for LDA målinger med pink og lokationer for snit A, B og C.

Modellerne er som udgangspunkt udført med en middelstrømningshastighed på 0,32 m/s, da dette er ved den hastighed, hvor der er udført flest målinger såsom vingeforsøg, LDA, PIV og tryk. Dette er fordelagtigt når modellen skal kalibreres efter virkeligheden, at der er flere målinger at holde modellen op imod.

11.2 Hastighedsfordeling

I modellen er hastighedsfordelingskoefficienten, α , blevet analyseret for at give et mere nøjagtigt billede af strømningsforholdene omkring stenen, svarende til snit B i figur 11.4. Sammenlignet med forsøget i strømningsrenden, hvor α blev antaget at være 1, er CFD mere fordelagtig, da det tillader beregning af alle hastigheder i tværsnittet, hvilket gør det relativt simpelt at bestemme hastighedsfordelingen.



Figur 11.5: Visuel skikkelse af hastighedsfordelingen over alle sten i snit B.

På forrige figur 11.5 fremgår en visuel repræsentation af hastighedsfordelingen for alle sten i snit B. Det kan ses ud fra hastighedsskalaen, at der observeres en meget uniform hastighed i hele snittet, med undtagelse af Sten 2 og 3, hvor hastigheden varierer signifikant ved stenens sider. Som det også omtales i afsnit 10.2 på side 48, har størrelse og form en stor betydning for strømningsmønsteret, hvorfor det antages at være en af årsagerne til at strømningsmønsteret varierer fra sten til sten.

For at kunne bestemme hastighedsfordelingen, anvendes ligning 11.1. Her er α -værdien defineret som integralet af hastighedsfelterne i tværsnittet, v , divideret med middelhastigheden, V , og tværsnitsarealet A . [Brorsen og Larsen 2009]

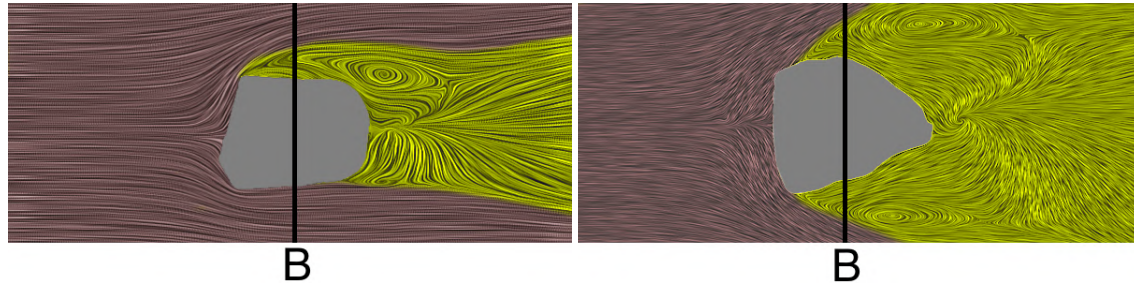
$$\alpha_B \equiv \frac{\int_{A_B} v_B^3 dA_B}{V_B^3 A_B} \quad (11.1)$$

I nedenstående tabel fremgår de beregnede α -værdier for alle sten. Her kan det ses, at hastighedsfordelingen generelt ligger tæt på 1, hvilket betyder, at der teoretisk set er en næsten perfekt homogen hastighedsfordeling.

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4
α [-]	1,00005	1,00003	1,00004	1,00003

Tabel 11.1: Beregnede α -værdier for alle sten i snit B.

Dog kunne hastighedsfordelingen fortolkes anderledes ud fra figur 11.5, da der er tydelige områder omkring stenen med markant lavere hastigheder. En forklaring kan være, at på grund af stenenes udformning, dannes der recirkulerende strømme der sender noget af strømmen i modsatte retning i det pågældende tværsnit, som kan ses i figur 11.6. Dette fænomen kan være med til at give en lavere α -værdi.



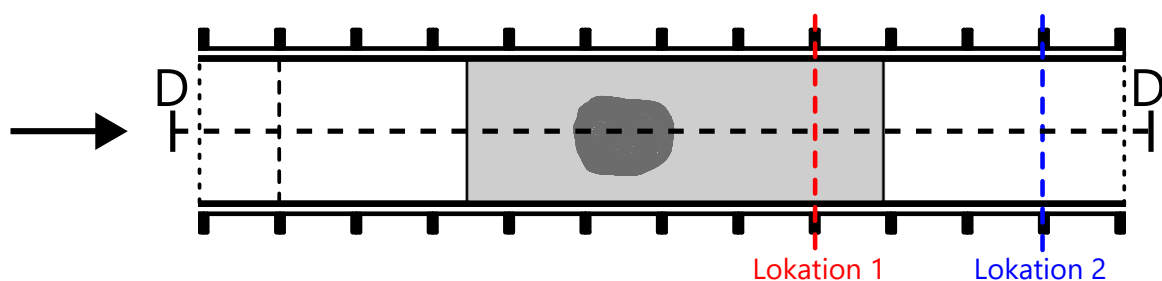
Figur 11.6: Stenene kan være med til at danne en cirkulerende strøm på grund af divergerende strømninger. Billederne repræsenterer en simulering af henholdsvis Sten 2 og 3, set oppefra med markering af snit B.

Udover at cirkulerende strømme kan give en mindre α -værdi, så er stenenes relative størrelse også en afgørende faktor i størrelsen af α -værdien. Dette skyldes at mindre sten har en mindre effekt på hastigheden i et tværsnit, set i forhold til en stor sten, som ville kunne give en større effekt i et tværsnit.

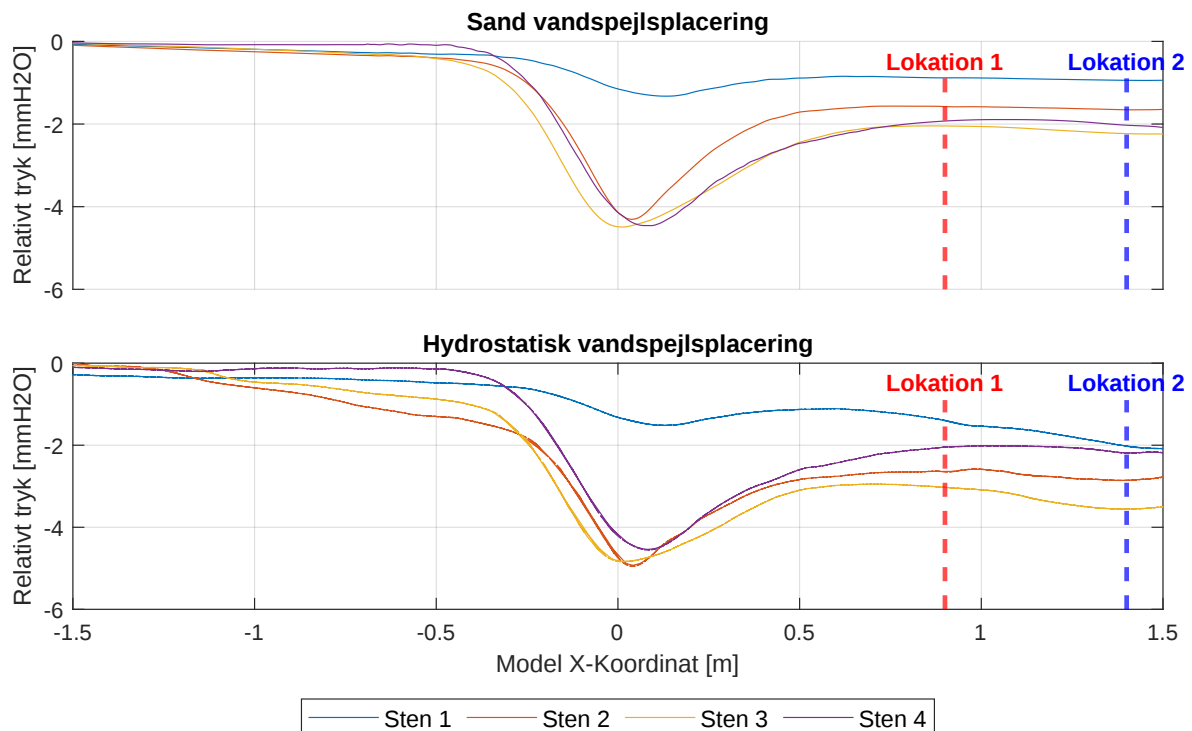
11.3 Bestemmelse af enkelttab i CFD-model

Ligesom ved forsøget i strømningsrenden, er det undersøgt hvordan stenene påvirker energitabet. I strømningsrenden var den vertikale acceleration af vandet negligeret, hvilket betyder, at der teoretisk set er antaget en hydrostatisk trykfordeling. Da dette ikke nødvendigvis er tilfældet, er det også blevet undersøgt med CFD-modellen.

I figur 11.7 ses modellen oppefra, hvor et snit (D), svarende til rendens midte, samt lokation 1 og 2 skitseret. Ud fra snit D er der i figur 11.8 optegnet længdeprofiler, som viser vandspejlsplaceringen under sand- og hydrostatisk trykfordeling.

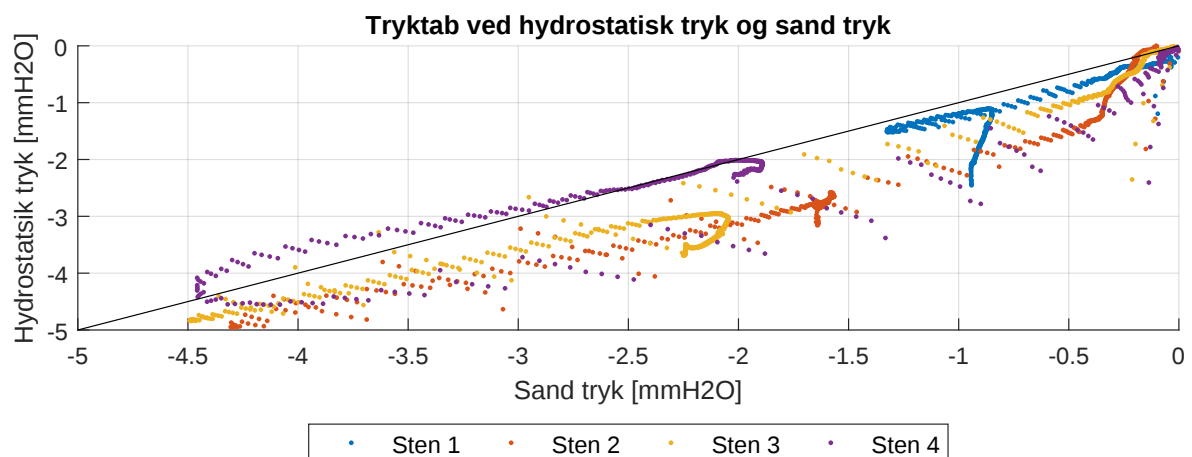


Figur 11.7: Placering af snit D i CFD model, samt placering af lokation 1 og 2 relativt til stenen.



Figur 11.8: Vandspejlsplacering i snit D over de forskellige sten med antaget hydrostatisk- og ikke hydrostatisk trykfordeling. Sten 1 til 4 er placeret i X-Koordinat = 0.

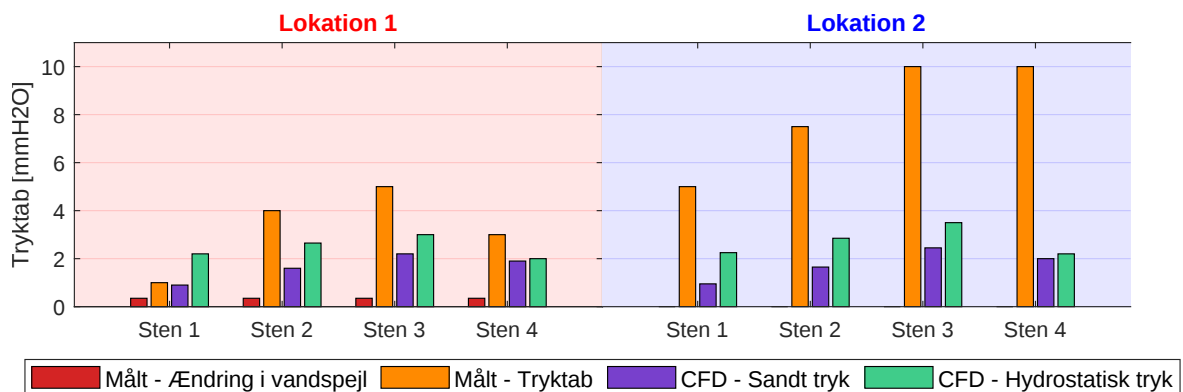
Ud fra ovenstående figur 11.8 kan det ses, at der generelt beregnes et højere tryktab ved antagelsen om en hydrostatisk trykfordeling end ved den sande trykfordeling. Dette indebærer en risiko for at over- eller underestimere tryktabet ved at antage en hydrostatisk trykfordeling, især når flowet også er dynamisk. Når figur 11.9 betragtes, kan det noteres, at det sande tryk og det hydrostatiske tryk ikke er ens, hvilket antyder, at det hydrostatiske tryk alene ikke er den dominerende faktor ved beregning af tryktab.



Figur 11.9: Sammenligning mellem sand- og hydrostatisk trykfordeling langs hele profilet.

På figur 11.10 ses der en sammenligning med det fysiske laboratorieforsøg og resultaterne fra CFD-modellen. Det bemærkes, at CFD-modellen beregner et betydeligt lavere tryktab end ved målingerne i strømningsrenden, særligt ved lokation 2. Dette kan skyldes pumpens indflydelse,

som der også var diskuteret i kapitel 10.



Figur 11.10: Sammenligning med fysisk måling, hydrostatisk og ikke hydrostatisk trykfordeling. For lokationer se figur 11.8.

Ud fra CFD modellen er der da beregnet tilsvarende modstandstal vha. Carnots formel, som angivet i ligning 11.2. Dette gør det muligt direkte at sammenligne med forsøgene i strømningsrenden og vurdere forskellen heraf.

$$\Delta H_{AC} = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (11.2)$$

Resultaterne kan ses i tabel 11.2 nedenfor. Modstandstallene i CFD-modellen ligger væsentligt lavere end ved de fysiske laboratorieforsøg, men da hastigheden er den samme i begge forsøg, vurderes tryktabet at være den afgørende faktor, som bidrager til forskellen mellem de to forsøg. Derudover er α -værdierne regnet til at være lig 1, hvilket betyder, at denne værdi ikke har medvirket til en nævneværdig forskel på det endelige modstandstal.

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4
Fysisk forsøg - ζ [-]	0,67	0,86	0,86	0,92
CFD - ζ [-]	0,182	0,316	0,469	0,384

Tabel 11.2: Beregnede ζ -værdier for alle sten ved brug af CFD

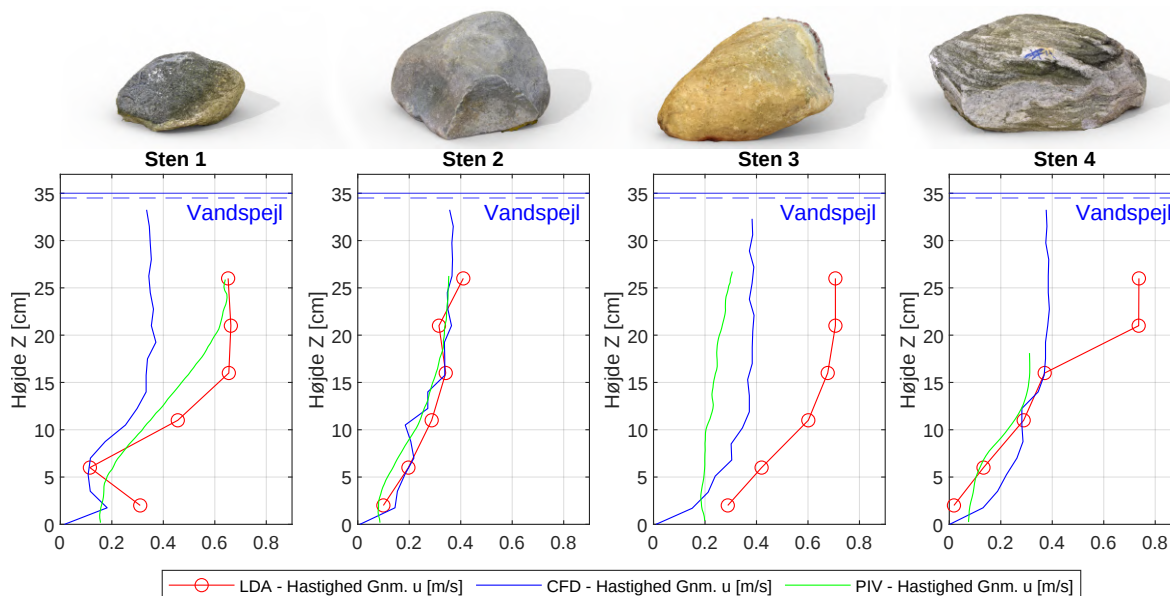
Det ses også, at der er forskel på den relative størrelse af modstandstallet mellem stenene. Sten 4 har eksempelvis det største modstandstal ved det fysiske forsøg, hvorimod i CFD-modellen er det Sten 3. Dette kan skyldes en lang række faktorer som fejl i 3D-geometrien, orientering af stenene, skalering af sten og relativ placering i renden, i forhold til væggene. Alt sammen kan have haft indflydelse i det endelige resultat.

11.4 Validering af CFD-model med PIV- og LDA målinger

For at vurdere modellens nøjagtighed, er der foretaget en validering af PIV- og LDA målinger fra forsøget i strømningsrenden med de målte hastigheder i CFD-modellen. Figur 11.11 viser hastighedsprofilerne af de anvendte målemetoder, hvor der er målt ca. 20 cm bag stenenes

bagkant som vist på figur 11.4. Det observeres, at CFD-modellens hastighedsmålinger er generelt lavere end LDA-målingerne, hvorimod PIV-målingerne som ligger delvist midt imellem eller lavere. Dog bemærkes det for Sten 2, at alle målinger er meget ens, hvilket kan tyde på at netop denne CFD-simulering afspejler de virkelige målinger mere nøjagtigt.

Ved alle stenene stiger hastigheden relativt hurtigt fra bunden, men bliver tilnærmelsesvis konstant ved en højde på 15 cm og op efter. Den maksimale hastighed, der er målt til cirka 0,4 m/s, er tæt på det halve af hastigheden målt af LDA'en. Da LDA-målingerne vurderes at være de mest præcise af de anvendte målemetoder, kan der være forskellige faktorer, som bevirker, at hastigheden underestimeres i CFD-modellen.

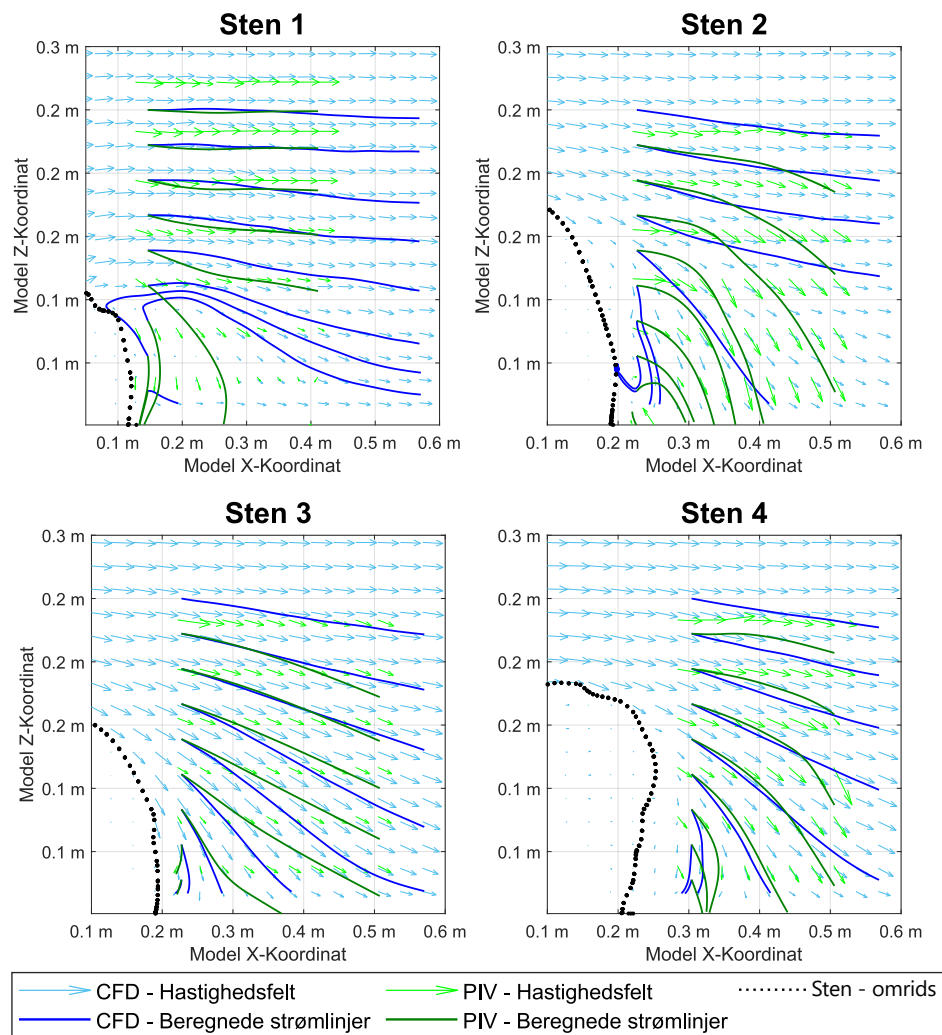


Figur 11.11: Validering af CFD-modellens hastighedsmålinger med PIV og LDA.

En typisk faktor, der kan påvirke resultaterne i en CFD-model er, at meshet kan være for groft, hvilket kan resultere i, at visse strømningsfænomener ikke beregnes korrekt i modellen.

Dette er særligt tilfældet ved beregning med geometrisk komplicerede objekter. Ellers er der andre faktorer som randbetingelser og valg af turbulens model, som kan have indflydelse på resultaterne af CFD-modellen.

I nedenstående figur 11.12, ses en sammenligning af strømningsmønstret fra PIV-målingerne og CFD-modellen, begge visualiseret som et hastighedsfelt. Det grønne felt repræsenterer PIV-målingerne, mens det blå felt er fra CFD-modellen. I hastighedsfelterne er der indsat strømningslinjer, for nemmere visuelt at kunne sammenligne målingerne. Ud fra hver sten, kan der observeres en relativ god korrelation mellem målingerne, da begge hastighedsfelter for alle sten følger nogenlunde det samme strømningsmønster. Der kan dog ses en større forskel i strømlinjerne i selve slipstrømmen af stenene. Da slipstrømme generelt er meget komplekse i forhold strømningsmønstre og høj turbulens, vil det være vanskeligt at danne et perfekt match. Dog har strømmene generelt samme retning i PIV- og CFD resultaterne og det vurderes derfor at stemme nogenlunde overens.



Figur 11.12: Sammenligning af hastighedsfelt og strømmlinjer mellem PIV målinger og CFD simulering.

11.5 Evaluering af model

CFD-modellering kan generelt være meget komplekst og det er vanskeligt at lave en model der kan det hele. På trods af dette, har erfaringerne fra forrige simuleringer givet overvejelser om hvordan modellen kunne forbedres.

Der kunne med fordel være brugt et "adaptive mesh" ved vandoverfladen, da dette kunne være med til at mindske antallet af celler i modellen. I den nuværende model bliver der brugt mange celler ved vandoverfladen, som kunne være undgået, hvis der kun var et forfinet mesh, hvor det var nødvendigt. Samtidigt kunne det være ønsket at meshet omkring selve stenen blev finere, så komplekse strømme omkring sten geometrien bedre kunne blive opfanget. For at bedre kunne beregne komplekse turbulente strømme, kunne en alternativ K-omega model også være brugt, da denne model er bedre til at beregne strømhvirvler i væsker.

VOF-modellering er typisk meget beregningstungt og beregningstiden for den nuværende model har været betydelig med en simuleringstid på 3-4 dage, før modellerne har konvergeret. Ved at simplificere modellerne til kun én væskefase i stedet for to væskefaser, ville det være muligt at

mindske beregningstiden betydeligt.

For at forstå, hvorfor CFD-modellen viser præcise resultater i nogle målinger, men afviger betydeligt i andre, kan det skyldes diverse måleusikkerheder i forsøgsopstillingen. Disse usikkerheder kan stamme fra fejl i opstillingen, variationskilder i miljøet og begrænsninger i målingerne, hvilket kan påvirke nøjagtigheden af de indsamlede data. For bedre resultater, vil det være fordelagtigt at have et større datagrundlag, for bedre at kunne verificere CFD modellen.

11.6 Opsummering

Ud fra de udførte forsøg i CFD-modellen kan følgende opsummeres:

1. Der er generelt en betydelig forskel om det antages at der hydrostatisk- eller ikke hydrostatisk trykfordeling. Det vurderes at den bedste antagelse vil være at systemet ikke er hydrostatisk fordelt.
2. Modstandstallet, beregnet ud fra CFD-modellen, er betydeligt lavere end ved de eksperimentelle forsøg.
3. For Sten 1 til 4 er den beregnede hastighedsfordeling, α , ca. lig med 1, på trods af en inhomogen hastighedsfordeling i de undersøgte tværsnit.
4. Der er varierende korrelation mellem de målte hastigheder i CFD-modellen og de målte hastigheder fra forsøget i strømningsrenden. En bedre sammenhæng observeres mellem CFD-modellen og PIV-målingerne, mens korrelationen er ringere med LDA-målingerne. Desuden er der næsten ingen lighed mellem trykmålingerne fra det fysiske forsøg og CFD-modellen, hvor modellen underestimerer tryktabet betydeligt.
5. Det kan konkluderes at CFD ikke kan erstatte fysiske forsøg, da dette ville kræve flere fysiske målinger at verificere med.

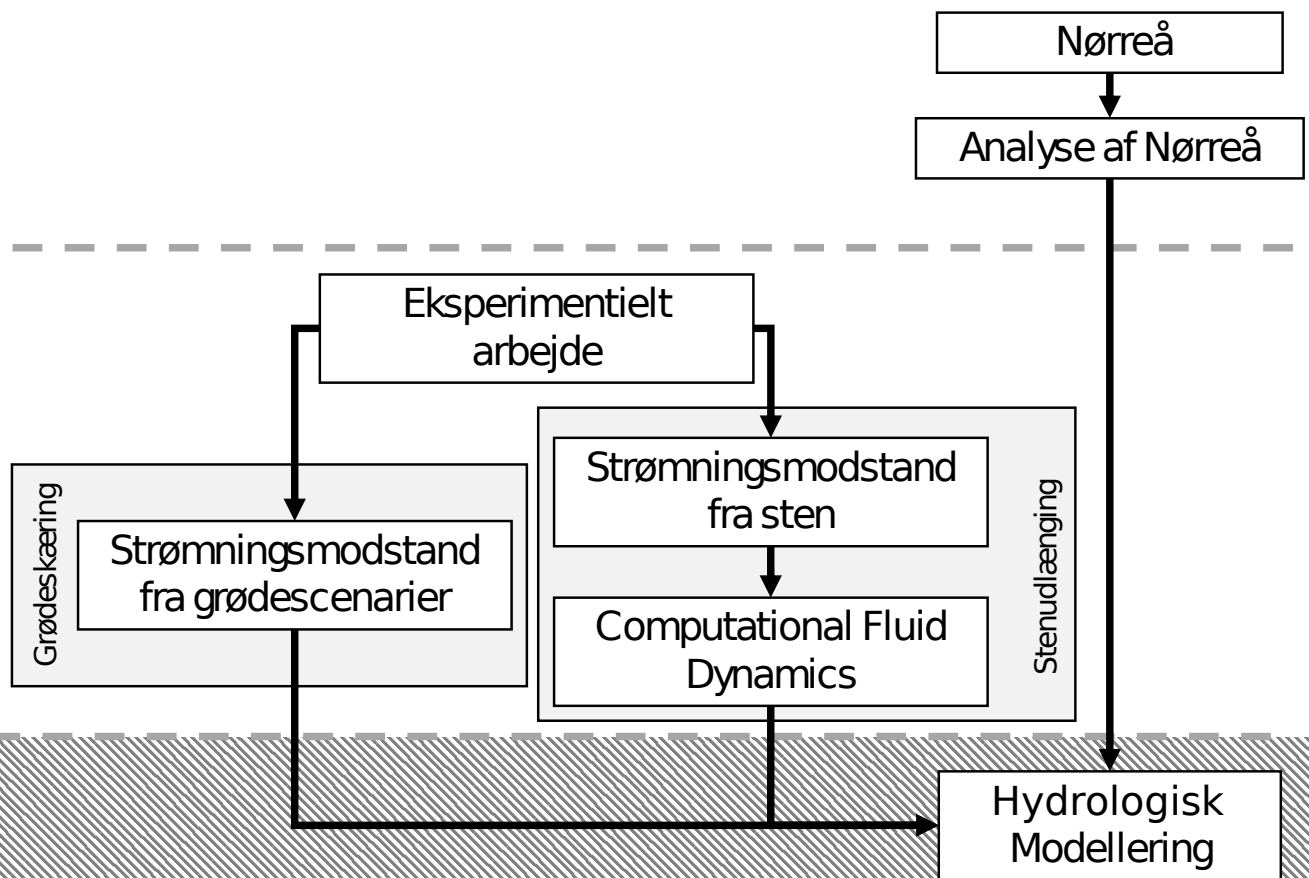
DEL III

Konsekvensvurdering af grødeskæring og stenudlægning i Nørreå

Del I

Del II

Del III



12 | Vandløbsmodel af Nørreå

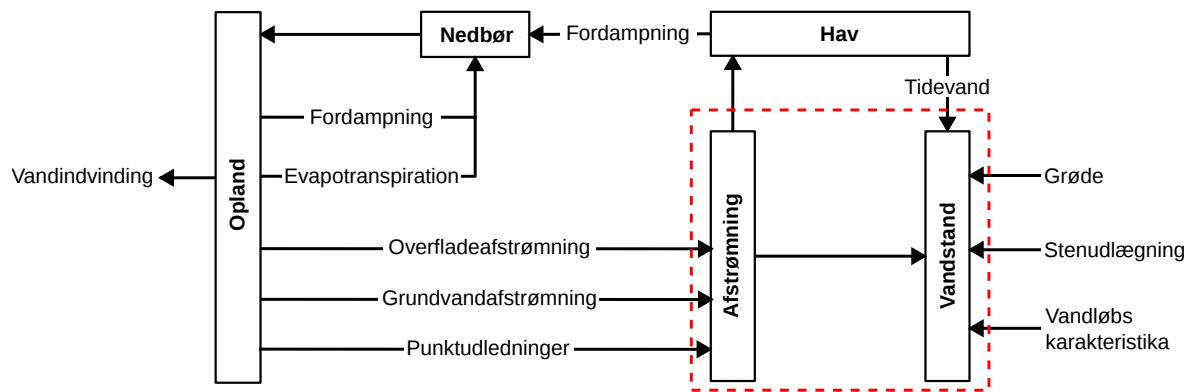
I følgende kapitel vil det blive undersøgt hvordan forskellige scenarier af grødeskæringer og stenudlægninger vil kunne påvirke de hydrauliske forhold i Nørreå. Dette gøres i form af en hydrodynamisk vandløbsmodel, som foretages i programmet HEC-RAS. HEC-RAS er en simulerings-software, udviklet af U.S. Army Corps of Engineers, som er designet til at udføre endimensionelle og todimensionelle simuleringer i både stationære og ikke-stationære forhold. Programmet tilbyder en bred vifte af værktøjer, der gør det muligt at skræddersy en model, der med stor nøjagtighed kan simulere de hydrauliske forhold i vandløbet. I dette tilfælde baseres modellen på resultaterne fra hhv. forsøget i strømningsrenden og CFD-modellerne. Her er det grundlæggende mål at lave en såkaldt "Proof Of Concept" -model, en simpel model, der skal være med til at danne et billede af den hydrauliske påvirkning fra forskellige grader af grødeskæringer og stenudlægninger. Modellen er opbygget således, at grødescenarier og stenudlægninger bliver undersøgt hver for sig, for at kunne afdække den hydrauliske påvirkning, fra den enkelte metode.

Modellen sættes op som endimensionel model. Fordelene her er, at modellen kan holdes forholdsvis simpel og beregningstiden kan mindskes betydeligt.

Den første del af kapitlet indledes med gennemgang af modellen, som danner grundlag for forsøgene. Her beskrives blandt andet modelområdet, arealanvendelse og vandløbsgeometri. Efterfølgende gennemgås flowmodellerne for henholdsvis grødescenarierne og stenudlægningerne, hvortil de opnåede resultater vil blive dokumenteret og diskuteret. Afslutningsvis gives en kort evaluering af modellerne som helhed samt hvilke faktorer, der potentielt kan forbedre dem.

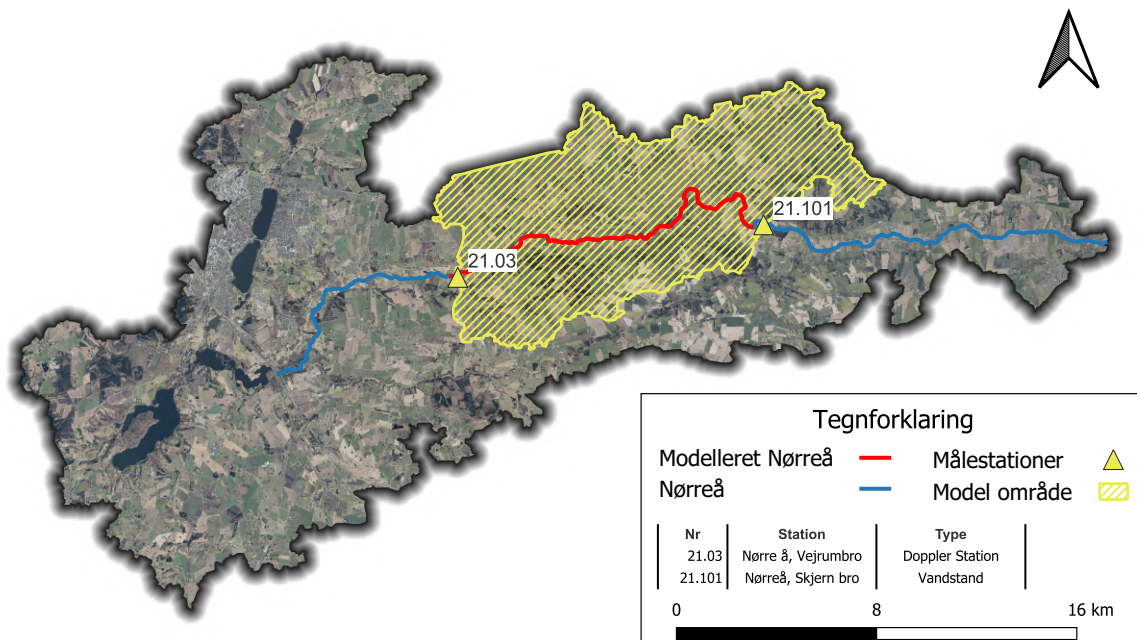
12.1 Modelopbygning og afgrænsning

På figur 12.1 kan hele det hydrologiske kredsløb ses. Der er her lagt fokus på hvilke faktorer det spiller ind i vandstanden i Nørreå. Til modellen er der valgt at se bort fra visse dele af det hydrologiske kredsløb for at simplificere modellen. I modellen er der udelukkende anvendt flowdata, hvilket betyder, at tilstrømningen langs åen ikke er inkluderet.



Figur 12.1: Diagram over det hydrologiske kredsløb og hvilke faktorer der spiller ind i Nørreå's vandstand. Markeret med rødt kan det ses hvad der er inkluderet i vandløbsmodellen [USGS 2017].

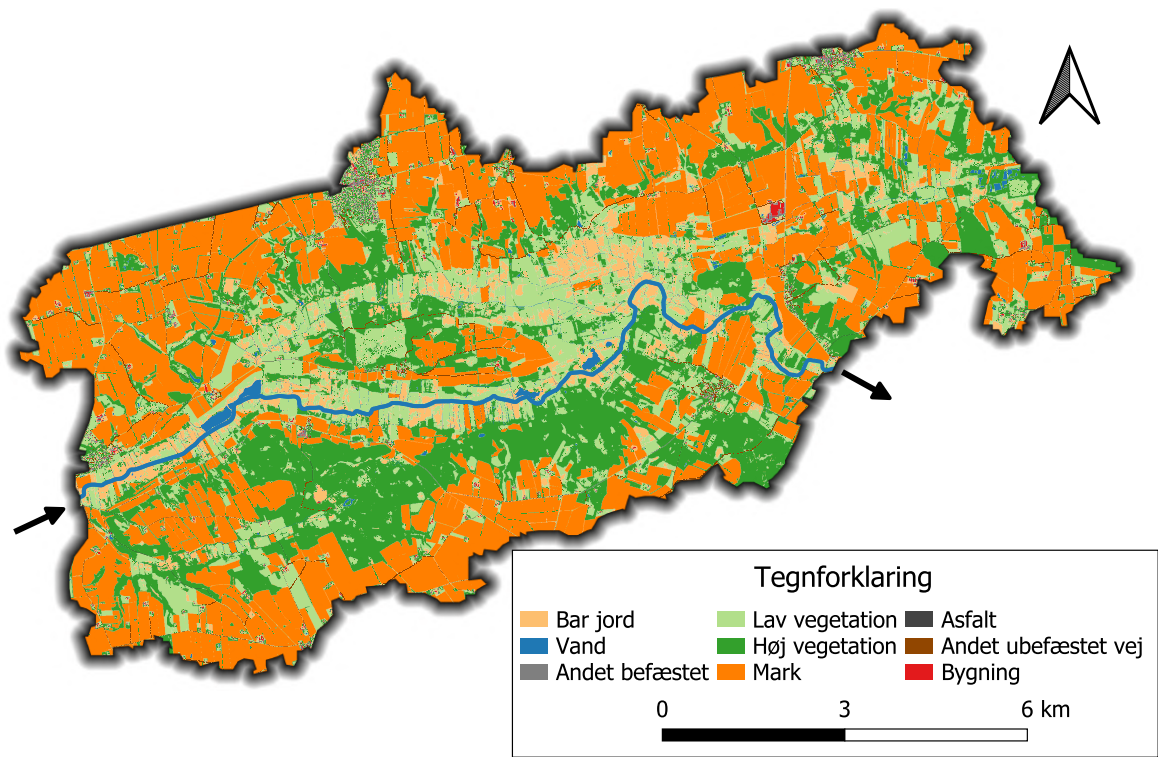
På figur 12.2 fremgår det hydrologiske opland for hele Nørreå. Den gule skravering markerer det område, som modellen udføres på, da det vurderes at være for omfattende og unødvendigt at modellere hele Nørreå. Derfor er modellen afgrænset til en mindre del af Nørreå, hvor kun strækningen mellem st.21.03 ved Vejrumbro og st.21.101 ved Skjernbro medtages. Her er det tiltænkt at anvende målestationer som randbetingelser for modellen. Modellen er yderligere afgrænset ud fra det hydrologiske opland baseret på Danmarks højdemodel (DHM) [Dataforsyning og Infrastruktur 2024]. Der er kun medtaget det opland der ville strømme ind i Nørreå mellem Vejrumbro og Skjern bro. Alt dette kan ses i samme figur 12.2.



Figur 12.2: Hydrologisk opland og modelområde afgrænset af oplandet til mellem st.21.03 og st.21.101.

12.1.1 Arealanvendelse

Inden for modelområdet er arealanvendelsen angivet for at kunne estimere oplandets ruhed. Her er Scalgos oversigt af arealanvendelsen blevet anvendt, som kan ses på figur 12.3. I HEC-RAS angives Mannings n-værdier for de pågældende typer af arealanvendelse. I tabel 12.1 kan de anvendte Mannings n-værdier ses, baseret på det amerikanske "National Land Cover Database"(NLCD) [USACE 2024]. Fordelen ved at bruge oplandets arealanvendelse er, at det kan give et mere detaljeret billede af, hvordan og i hvilken hastighed vandet strømmer på terrænen under en oversvømmelse.



Figur 12.3: Arealanvendelsen inden for modelområdet.

Indeks værdier	NLCD arealdække	Scalgo	Mannings n
23	Developed, Medium Intensity	Asfalt	0,12
24	Developed High Intensity	Bygning	0,16
11	Open water	Vand	0,0375
31	Barren Land (Rock/Sand/Clay)	Bar jord	0,0265
21	Developed, Open space	Andet befæstet	0,04
52	Shrub/Scrub	Lav vegetation	0,0115
82	Cultivated Crops	Mark	0,05
43	Mixed Forest	Høj vegetation	0,2
22	Developed, Low Intensity	Andet ubefæstet vej	0,09

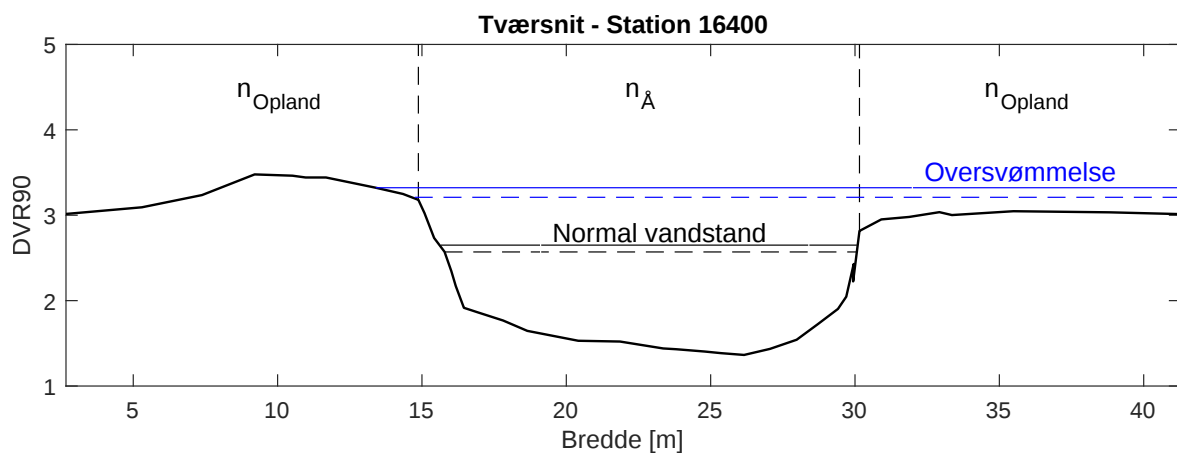
Tabel 12.1: NLCD areal anvendelse (fra HEC-RAS), Scalgo arealanvendelse og Mannings n. [USACE 2024]

12.1.2 Modelgeometri

Modellen er opbygget af følgende geometrier:

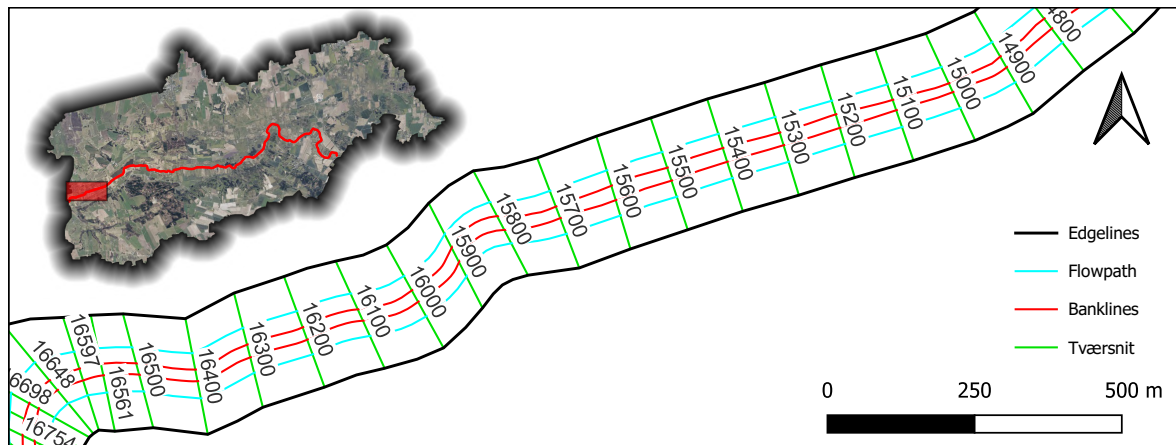
- Vandløbsmidte
- Vandløbskant
- Tværsnit
- Strømningsveje

Ligesom ved den anvendte terrænmodel, har det været muligt at lave udtræk af vandløbsmidte og vandløbskant i Scalgo, som begge skal være med til at danne åens skikkelse og diktere åens strømretning. Ydermere anvendes i alt 189 reelle tværsnitsopmålinger for at kortlægge Nørreås faktiske batymetri. Gennem disse tværnsnit kan terrænet i HEC-RAS tilpasses, således at åens batymetri inkluderes. I figur 12.4 er et af de anvendte tværnsnit vist, som illustrerer den horisontale variation af Manningtallet. $n_{\bar{A}}$ indikere åens Manningtal, mens n_{opland} er Manningtallet for oplandet, baseret oplandets arealanvendelse, som beskrevet i forrige afsnit.



Figur 12.4: Illustration af tværsnit med horisontal fordeling af Manningtal.

For mere præcist at kunne simulere, hvordan vandet bevæger sig på terrænet, når åen opnår bredfyldning i forbindelse med forhøjet vandstand, tilføjes såkaldte strømningsveje. Denne geometri er med til at definere de retninger, som vandet bevæger sig i inden for et defineret oversvømmelsesområde. I en endimensionel model defineres oversvømmelsesområdet gennem tværnsittene. Figur 12.5 illustrere et udsnit af modellen, hvor de respektive geometrier er indtegnet. De røde afmærkninger indikere vandløbskanten (banklines), de blå er strømningsveje (flow path), de grønne er stationeringen af tværnsittene mens de sorte afmærkninger er kantlinjer (edgelines), som indkredser oversvømmelsesområdet.



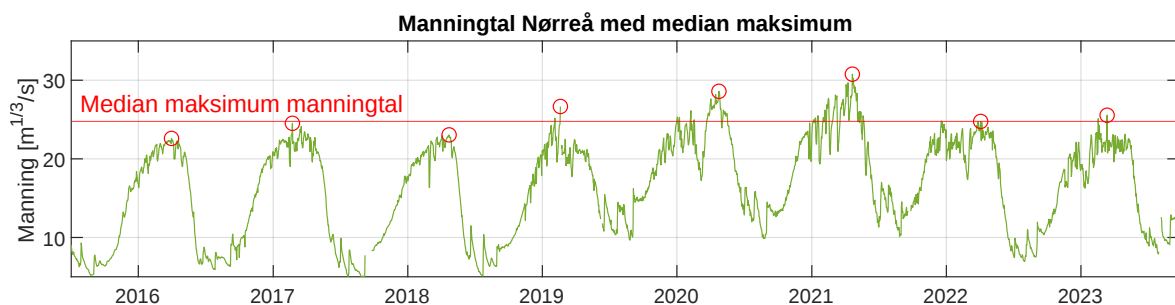
Figur 12.5: Udsnit af 1D model med indtegnede geometrier.

12.2 Stationær flowanalyse af grødescenarier

I dette afsnit gennemgås en flowanalyse baseret på forsøgene med grødescenarier fra kapitel 9. Det primære mål er at dokumentere den hydrauliske påvirkning i Nørreå, når modellen simuleres med forskellige Manningtal opnået gennem grødescenarierne. Da HEC-RAS ikke kan foretage simuleringer med et hastigheds afhængigt Manningtal, er det valgt at simulere grødescenarierne i en flowmodel under stationære forhold, hvilket vil sige, at modellen er uafhængig af tidslige ændringer. Dermed opnås kun et øjeblicsbillede af, hvordan Nørreå påvirkes ud fra en bestemt vandføring og et specifikt grødescenarie.

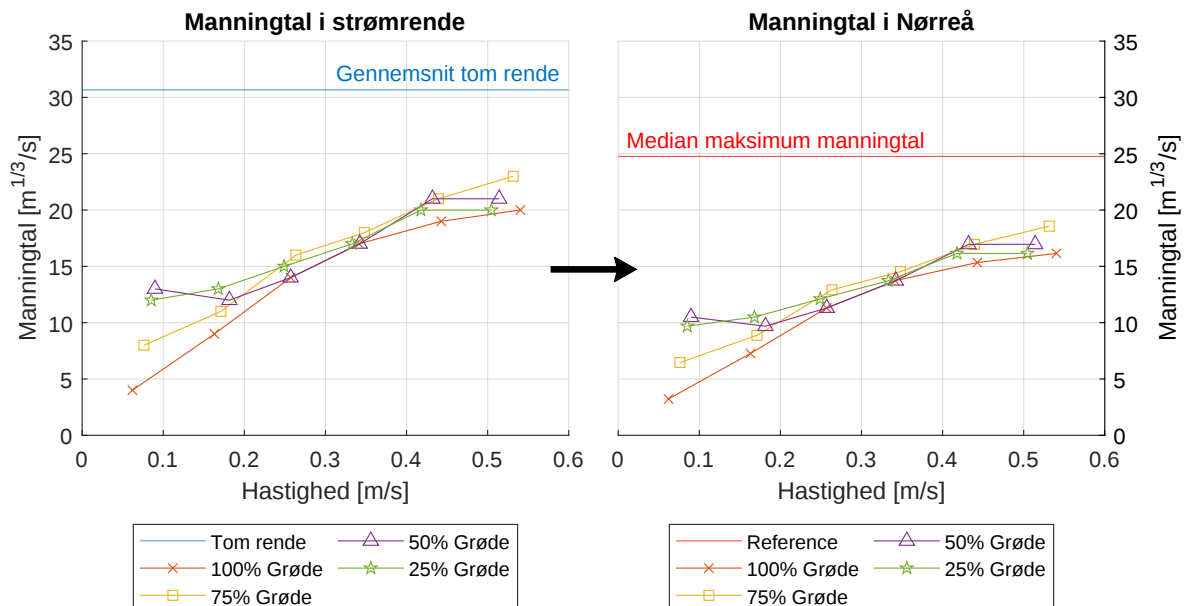
12.2.1 Manningtal

For at overføre Manningtallet fra forsøget i strømningsrenden til Nørreå, er det valgt at beregne den relative sammenhæng mellem Manningtallet i den tomme rende og Manningtallet fra de forskellige grødescenarier og dermed bruge denne relation i Nørreå. Grundlæggende overføres relationen direkte til Nørreå ved at betragte medianen af de årlige maksimum Manningtal i Nørreå, som kan ses på figur 12.6.



Figur 12.6: Tidsserie af Manningtallet med linje der markere det årlige median maksimum. Tidsserien er fra perioden 2016-2023.

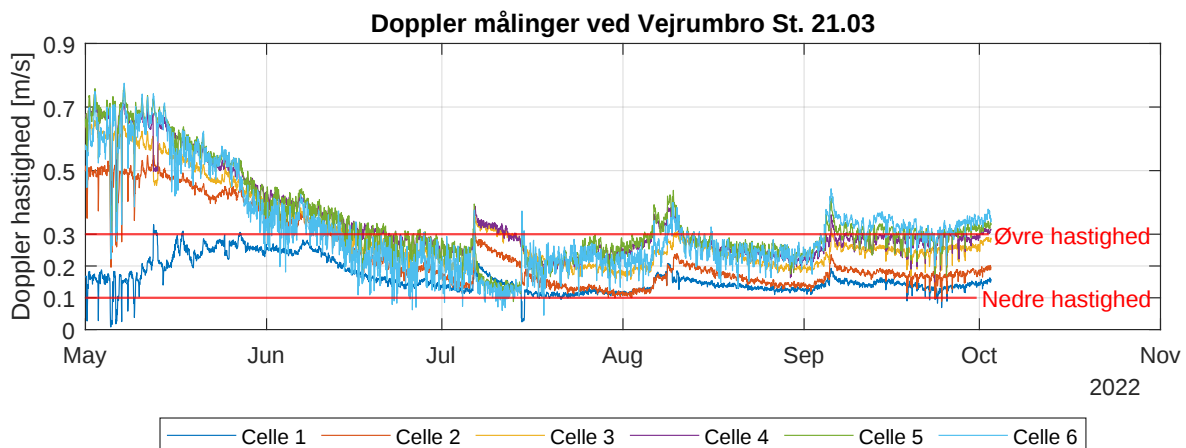
Herefter multipliceres det relative forhold fra forsøget i strømningsrenden med den årlige maksimale medianværdi af Manningtallet, hvilket gør det muligt at anvende de observerede sammenhænge på de faktiske forhold i Nørreå, som er illustreret i nedenstående figur 12.7. Denne sammenhæng vil danne grundlag for flowanalysen af grødescenarierne.



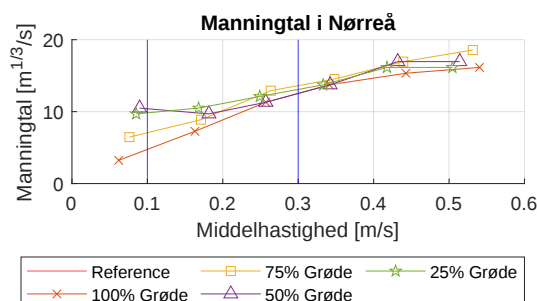
Figur 12.7: Overførsel af Manningtal fra forsøg i strømningsrende til Nørreå.

Fra det fysiske laboratorieforsøg blev det bekræftet, at Manningtallet er hastighedsafhængigt, med den største variation observeret ved lave hastigheder, som også kan ses i ovenstående figur 12.7. Dog kan HEC-RAS, som før nævnt, ikke simulere et hastighedsafhængigt Manningtal, hvorfor der som alternativ er valgt at opstille forskellige stationære flowsituationer, som grødescenarierne testes på. Flowsituationerne er baseret på dopplerhastigheder målt i seks forskellige celledybder fra Vejrumbro st.21.03 i perioden maj til oktober 2022, som vist i figur 12.8.

Det kan ses, at hastigheden falder drastisk omkring juli måned og forbliver lav frem mod oktober, hvilket også er forventeligt, da grødens vækst er størst i denne periode og dermed yder den største modstand. Derfor afgrænses flowanalysen til kun at inkludere hastighedsspændet inden for denne periode, hvor den maksimale hastighed vil være omkring 0,3 m/s og den mindste 0,1 m/s. I figuren er dette markeret som den øvre og nedre grænse. Sammenlignes dette hastighedsspænd med de opnåede Manningtal fra grødescenarierne, kan tilsvarende grænser indsættes, som er illustreret i figur 12.9. I tabel 12.2 fremgår de Manningtal som svarer til hastigheder på hhv. 0,1, 0,2 og 0,3 m/s, som vil blive benyttet i flowanalysen.



Figur 12.8: Doppler målinger ved Vejrumbro. Det afgrænses kun til at undersøge ved hastigheder med en nedre grænse på 0,1 og en øvre på 0,3 m/s.



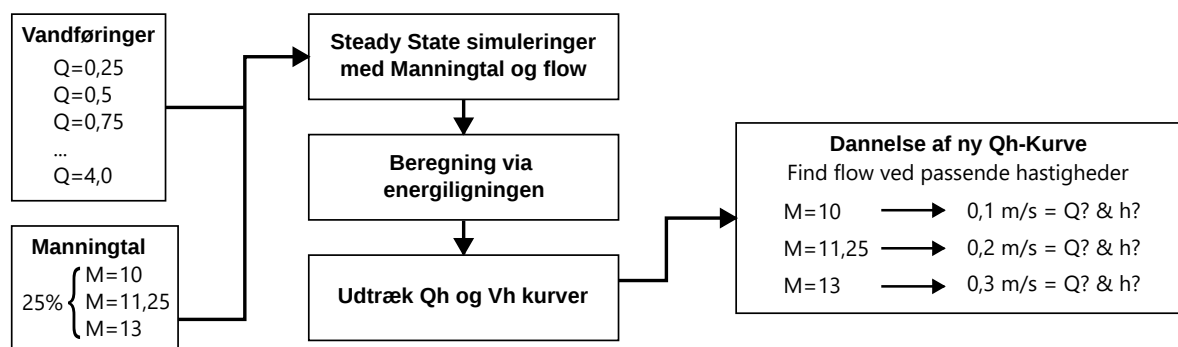
Figur 12.9: Manningtal og hastighed med blå markering, der indikerer min og maks.

	0,1 m/s	0,2 m/s	0,3 m/s
25%	10	11,25	13
50%	11	10,25	12,5
75%	7	10,1	13,75
100%	5	8,75	12,5

Tabel 12.2: Interpolerede Manningtal fra forsøg i strømningsrende ved hastigheder på 0,1-, 0,2- og 0,3 m/s.

12.2.2 Implementering af Manningtal i flowmodel

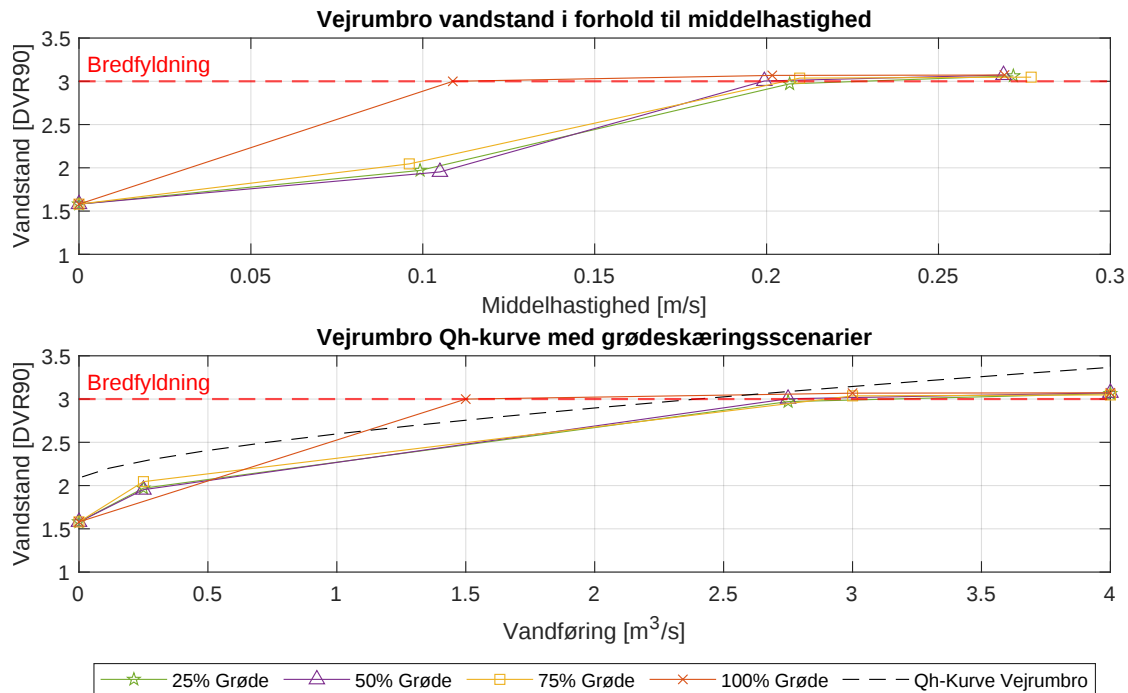
For at værdierne fra ovenstående tabel kan overføres til flowmodellen i HEC-RAS, oprettes en serie af vandføringer fra lave til høje, som Manningtallene fra hvert grødescenarie simuleres med. Fra hver simulering beregnes Qh-relationer og tilhørende middelhastigheder, hvor målet er at finde de middelhastigheder, som svarer til dem i tabel 12.2. På den måde kan der fremstilles Qh-relationer, der passer til hvert grødescenarie, hvormed den hydrauliske påvirkning kan analyseres. I figur 12.10 er fremgangsmåden for flowanalysen illustreret.



Figur 12.10: Fremgangsmåde for stationær flowanalyse af grødescenarier.

12.2.3 Resultater

Ud fra den stationære flowanalyse af de forskellige grødescenarier, er der opstillet en sammenhæng mellem vandføring og vandstand samt middelhastighed og vandstand, som ses på figur 12.11. I det første plot vises forholdet mellem middelhastighed og vandstand, hvor afmærkningerne indikerer de middelhastigheder som er tilsvarende dem fra tabel 12.2. I det efterfølgende plot vises Qh-kurverne for hvert grødescenarie sammenlignet med den faktiske grundkurve for Vejrumbro målestation, som angivet af Viborg Kommune [2023]. Den røde stiplede markering angiver det punkt, hvor tværsnittet når sin maksimale kapacitet, dvs. ved bredfyldning.



Figur 12.11: Hastighed i forhold til vandstand og dannede Qh-kurver for forskellige grødeskærings-scenarier sammenlignet med Qh-kurven for station 21.03 ved Vejrumbro [Viborg Kommune 2023].

På den øverste del af figur 12.11 ses, at middelhastigheden medfører en stigning i vandstanden indtil ca. 0,2 m/s, hvorefter vandstanden flader ud. Det samme mønster observeres for Qh-kurverne, hvor kurven afbøjer ved stigende vandføring, indtil bredfyldning opnås. Herefter flader kurven ud, og grødescenarierne bliver ensartede, hvor mængden af vegetation bliver mindre betydelig.

Der noteres kun en bemærkelsesværdig forskel ved scenariet med 100% grøde, hvor vandstanden allerede stiger til bredfyldning ved ca. 0,1 m/s, svarende til et Manningtal på $5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (se tabel 12.2). Dette vurderes at give god mening, da den hydrauliske modstand er meget høj, hvilket får vandstanden til at stige relativt hurtigt sammenlignet med de andre scenarier, som yder mindre modstand.

Ved umiddelbar betragtning af figur 12.11 er der en vis sammenhæng mellem grødescenarierne og grundkurven fra Vejrumbro, men den er ikke stærk. De væsentligste forskelle i kurvernes forløb ved højere vandføringer indikerer, at der er betydelige variationer i, hvordan vandstanden påvirkes under de forskellige forhold. Grødescenarierne har en umiddelbart dæmpende effekt på vandstandens stigning ved højere flow, hvilket ikke er lige så udtalt for Qh-kurven fra Vejrumbro.

12.3 Ikke-stationær flowanalyse af stenudlægninger

I følgende afsnit undersøges stenudlægninger ved hjælp af en ikke-stationær flowanalyse i HEC-RAS. Undersøgelsen bygger på tidligere laboratorieforsøg og CFD-modellering, hvorfra den hydrauliske effekt af stenudlægninger undersøges og analyseres over perioden maj til oktober i 2022.

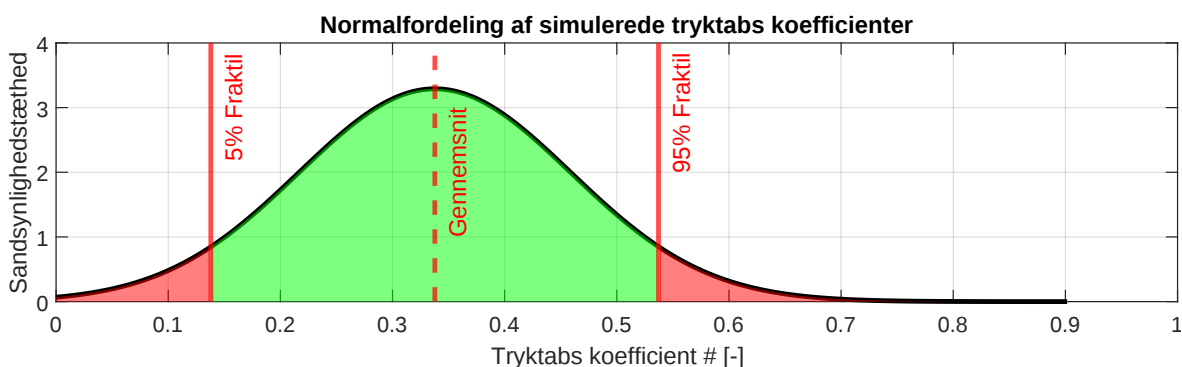
12.3.1 Enkelttab

I flowmodellen over Nørreå medregnes enkelttabet fra stenudlægningerne baseret på de eksperimentelle forsøg der udført gennem projektet. Der vil blive taget udgangspunkt i modstandstallene fra den digitale tvilling, da disse resultater er de mest konsekvente som følge af, at der i CFD-modeller er langt bedre kontrol over flere parametre, samtidigt med at der kan udføres en langt mere omfattende analyse af de betingelser der ligger for modstandstallet. De valgte modstandstal kan ses i nedenstående tabel 12.3.

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4
ζ [-]	0,182	0,316	0,469	0,384

Tabel 12.3: Beregnede ζ -værdier for alle sten ved brug af CFD.

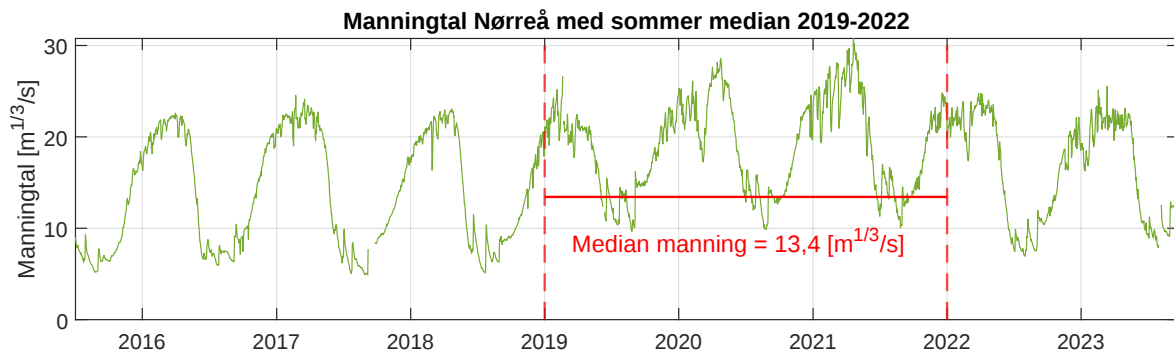
Da det er uhensigtsmæssigt kun at bruge de samme fire sten i en så stor model, er det valgt at danne en serie modstandstal baseret på ovenstående modstandstal. Dette skal være med til at tage højde for stenenes variation i form og størrelse. Til dette formål er der anvendt Monte Carlo-simuleringer til at danne et nyt datasæt baseret på gennemsnittet og standardafvigelsen af de fire modstandstal fra CFD-modellen. Simuleringen er kørt 1.000.000 gange, hvilket vurderes at kunne dække alle tænkelige udfald på trods af et begrænset datasæt. En normalfordeling af Monte Carlo simuleringen kan ses på nedenstående figur 12.12. For at undgå ekstremværdier er der frasorteret alt uden for 5- og 95% fraktilen. Dette vurderes at kunne give et godt udgangspunkt for det kunstige datasæt til flowanalysen.



Figur 12.12: Normalfordeling baseret på Monte Carlo simulering af modstandstal.

Da disse værdier ikke er hastighedsafhængige, vil alle scenarier med stenudlægning blive simuleret i en dynamisk model, da en dynamisk model også ville kunne fortælle noget om hyppighederne af forskellige vandstande ved de forskellige scenarier. For at stenene er den eneste variabel i de

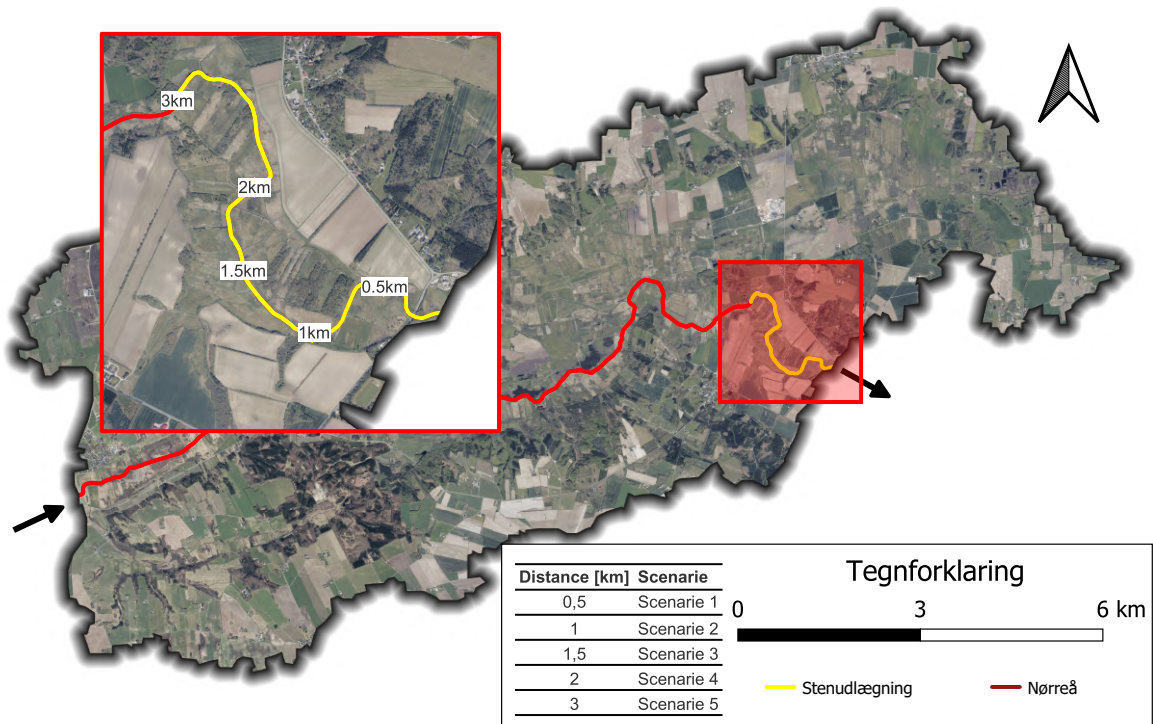
forskellige scenarier er det valgt at bruge medianen af Manningtallet i juni til august fra 2019 til 2022, som input i HEC-RAS Modellen, se figur 12.13. 2019 til 2022 er valgt da der i denne periode er sket en stigning af Manningtallet i forhold til tidligere år, men da det er 2022 der skal simuleres giver det bedst mening at bruge Manningtallet for samme periode.



Figur 12.13: Tidsserie for Manningtal, med markering af medianen af sommerperioderne fra 2019 til 2022.

12.3.2 Implementering af modstandstal i flowanalyse

En strækning på 3 km opstrøms fra modellens udløb ved Skjern bro målestation er udvalgt til analysen. Flowanalysen omfatter fem scenarier med stenudlægninger, hvor antallet af udlagte sten gradvist øges ved at forlænge strækningen. I HEC-RAS implementeres ζ -værdierne i tværsnittene, hvor afstandene mellem tværsnittene varierer fra 25 meter til 100 meter. Scenarierne dækker strækninger fra 0,5 km til 3 km. Lokationerne af stenudlægningerne og dertilhørende scenarier kan ses på figur 12.14.



Figur 12.14: Kort over Nørreå med lokation af stenudlægninger.

I følgende tabel 12.4 ses antallet af udlagte sten over strækningerne for hvert scenarie.

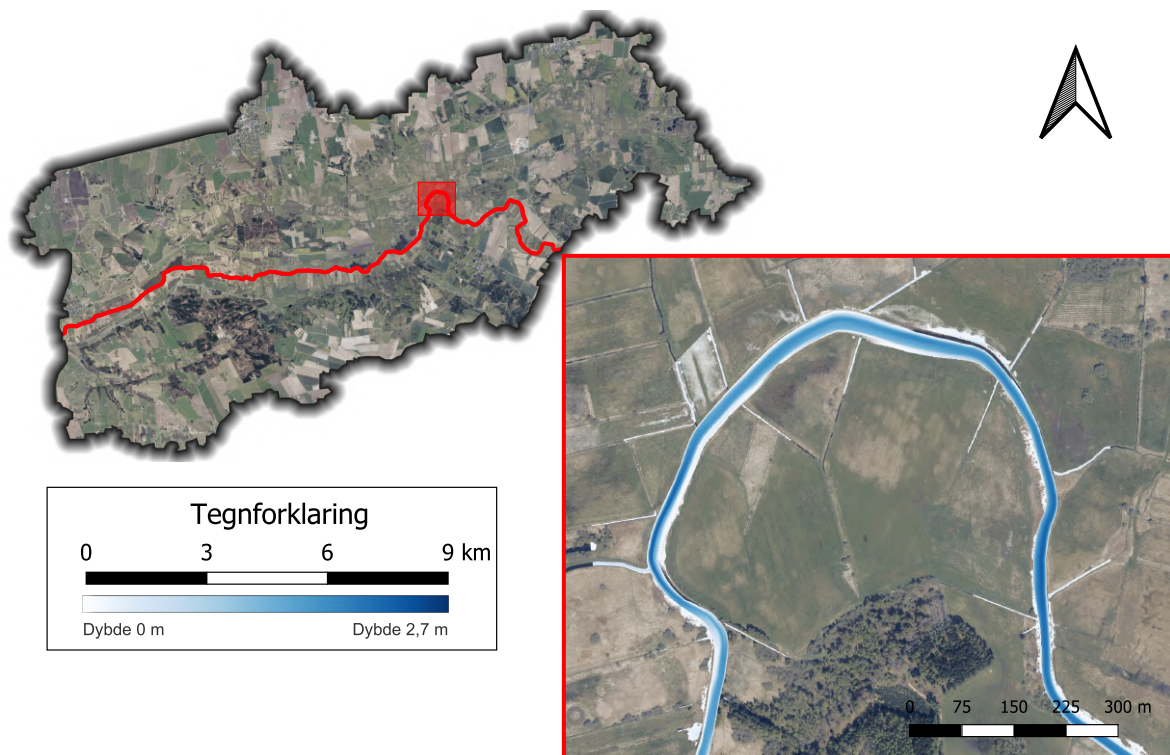
	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3	Scenarie 4	Scenarie 5
Antal sten	14	24	35	46	58

Tabel 12.4: Antal udlagte sten ved de forskellige scenarier.

I HEC-RAS baseres ikke-stationære 1D-modeller på den fulde Saint-Venant-ligning, som omfatter kontinuitetsligningen (massebevarelse) og impuls-ligningen. ζ -værdierne medregnes i modellen ved at multiplicere dem med hastighedshøjden, som i Carnots formel (se evt. ligning 10.1 på side 44), hvorefter enkelttabet i det pågældende tværsnit beregnes. I ikke-stationære tilfælde konverteres enkelttabet til en ækvivalent kraft, som indsættes i impuls-ligningen. Generelt set vil enkelttabet virke som en kraft opstrøms for tværsnittet, hvilket får vandføringen til at aftage.[USACE 2024]. For yderligere informationer om modelopsætning, herunder valg af randbetingelser, henvises til bilag E.

12.3.3 Resultater

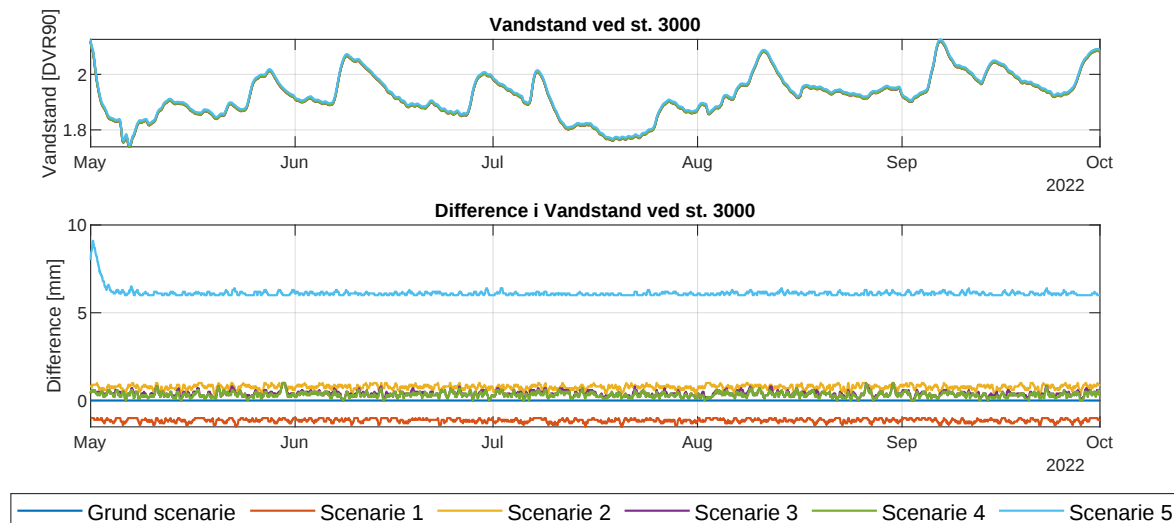
Det første resultat fra flowanalysen af stenudlægningerne viser den maksimale udbredelse af Nørreå under scenarie 5, som fremgår af figur 12.15. Kortet illustrerer, hvor langt vandet breder sig ud fra åens naturlige løb under disse forhold.



Figur 12.15: Kort over Nørreå ved maksimal oversvømmelse i scenarie 5.

Da det kan være vanskeligt at drage konklusioner om de hydrauliske effekter af stenudlægninger alene ud fra et oversvømmelseskort, fordi effekten har vist sig at være minimal, er der i

nedenstående figur 12.16 lavet et plot over vandstanden for hvert scenarie samt grundscenariet som funktion af tiden. Her kan effekten af stenudlægninger observeres ud fra de fem scenarier.



Figur 12.16: Tidsserie af vandstand ved 3 km opstrøms fra Skjern målestation.

Det bemærkes, at der kun sker en ændring i vandstanden på 6 mm fra grundscenariet uden sten til scenarie 5 med flest sten. Ved nærmere betragtning observeres ingen betydelige udsving, og vandstanden er mere eller mindre konstant uafhængigt af tidsperioden. Der kan være forskellige årsager til, hvorfor disse stenudlægninger har en minimal effekt på vandstanden i Nørreå. Den mest sandsynlige årsag, er mængden af de udlagte sten. Da der kun kan indsættes et modstandstal i selve tværsnittet, har effekten af stenudlægningen været dikteret af afstandene mellem tværsnittene, som variere mellem 25 til 100 meter. Når afstanden mellem hver sten er stor, kan det være vanskeligt at kortlægge det reelle enkelttab over stenen, hvilket også var tilfældet ved forsøget i strømningsrenden, hvor det blev konkluderet at afstanden fra hvor enkelttabet måles havde en indflydelse på det endelige resultat. Ved optimale forhold, burde stenene være udlagt med en meget kortere afstand. Under flowanalysen blev det også forsøgt at øge antallet af tværsnit inden for den angivne strækning, hvormed flere modstandstal kunne indsættes, men uforudsete fejl gjorde at modellen ikke kunne køre optimalt, hvorfor det blev besluttet at arbejde videre med den originale model.

12.4 Opsummering

Efter at have udført flowanalyser for hhv. grødescenarier og stenudlægninger i HEC-RAS, kan følgende observationer opsummeres:

1. Under de forskellige grødescenarier blev der observeret en kraftig afbøjning af Qh-kurven i takt med en stigende vandføring indtil bredfyldning, hvorfra scenarierne blev mere sammenfaldende og ensartede.
2. Grødescenarierne har generelt ingen betydelig effekt på vandstanden. Dog opnås bredfyldning hurtigere ved 100% grøde, end ved de resterende scenarier.
3. Det kan generelt konkluderes, at den dokumenterede effekt fra de forskellige scenarier af stenudlægninger, ikke har en signifikant betydning for vandstanden i Nørreå.

4. Det forventes, at en større forskel i vandstanden kan dokumenteres, hvis antallet af tværsnit, hvori modstandstal indsættes, øges.

DEL IV

Afrunding af projekt



13 | Diskussion

I det følgende kapitel vil de opnåede resultater fra denne rapport blive beskrevet og diskuteret. Formålet er at sammenkæde de væsentligste pointer, hvor måleusikkerheder, fejl og muligheder for forbedringer vil blive fremhævet. Kapitlet indledes med en diskussion af Del II, som inkluderer de fysiske laboratorieforsøg og den digitale tvilling af stenudlægningsforsøget i CFD-modellen. Dette efterfølges af en diskussion af vandløbsmodellen i Del III.

Forsøg med grødescenarier

I denne rapport blev der udført et forsøg med afbøjning af én grødestrimmel fremstillet af bobleplast. En kraft blev beregnet ved hjælp af en empirisk formel, der oprindeligt er udviklet til naturlig grøde. Da bobleplast og naturlig grøde har forskellige fysiske egenskaber, vil den anvendte formel ikke præcist kunne modellere kraften i dette eksperiment. Derfor er det nødvendigt at overveje, hvordan materialevalget kan have påvirket resultaterne, samt at overveje et nyt forsøg med henblik på at måle den reelle kraft påført på grødestrimlen.

Forsøget blev derefter opskaleret, så hele bredden af strømningsrenden blev testet med forskellige grødeskæringsscenarier, hvor den hydrauliske modstand i form af Manningtallet blev bestemt. Resultaterne viste, at grødescenarierne lå tæt op ad hinanden, hvilket skyldtes, at grøden let afbøjede ved små hastighedsændringer, som medvirkede til, at den hydrauliske modstand blev reduceret markant. For at forbedre nøjagtigheden af forsøget, kunne afstivet grøde have været anvendt, hvilket ville medføre en mere realistisk repræsentation af naturlig grøde og variationerne heraf. Dette kunne potentielt have givet mere varierende resultater med de forskellige grødeskæringsscenarier og samtidig en bedre forståelse af de faktiske forhold i vandløb.

Forsøg med stenudlægning

Et nyt sæt forsøg blev udført i samme strømningsrende for at undersøge enkelttabet over sten. Formålet med disse forsøg var at dokumentere de hydrauliske effekter som følge af stenudlægninger. Her var der udvalgt fire forskellige sten, hvor enkelttabet for hver sten blev bestemt. Også her blev der konstateret måleusikkerheder i enkelttabet, hvilket kan skyldes flere faktorer. Der var en generel tendens til, at de målte tryktab i strømningsrenden var unøjagtige, da vandstanden fluktuerede meget. Det antages, at det anvendte udstyr udgjorde den største usikkerhed, da selv de mindste forstyrrelser eller rystelser i tryktabs-slangerne, gjorde det vanskeligt at aflæse tryktabet. Det vurderes, at måleusikkerhederne kunne være undgået ved brug af større og mere robuste slanger, hvilket sandsynligvis ville have givet mere stabile målinger.

Trykmålingerne har også været påvirket af pumpen der driver systemet, da vandstanden har været højere ved rendens indløb og lavere ved rendens udløb som en konsekvens af at pumpen suger vand i udløbet og øger trykhøjden, hvilket giver en forhøjet vandstand ved indløbet.

Desuden har størrelsen og formen af stenene i forhold til strømningsområdet en væsentlig betydning for størrelsen af enkelttabet. Større sten skaber større forhindringer i vandstrømmen, hvilket øger enkelttabet.

Digital tvilling af strømningsrende

Efterfølgende blev der udviklet en CFD-model (Computational Fluid Dynamics) for at genskabe laboratorieforsøget med stenudlægninger. Formålet var at kunne udføre yderligere forsøg i CFD i stedet for eksperimentelle forsøg, hvilket ville spare tid og ressourcer. Til validering af CFD-modellen blev der anvendt tryktabsmålinger, PIV (Particle Image Velocimetry) og LDA (Laser Doppler Anemometry), som viste varierende succes. Denne variation i succes kan sandsynligvis tilskrives måleusikkerheder, der gjorde det vanskeligt at opnå perfekt overensstemmelse mellem de eksperimentelle data og CFD-modellen. Det understreger betydningen af præcise målinger og kalibrering for at sikre nøjagtige resultater i både eksperimentelle og simulerede forsøg.

Det er også vigtigt at bemærke, at CFD-modeller har mange variabler, der påvirker resultaterne. Disse inkluderer mesh, randbetingelser, turbulensmodeller og numeriske skemaer. Korrekt valg og justering af disse parametre er afgørende for modellens nøjagtighed og pålidelighed.

Opskalering til vandløbsmodel

Når data fra et laboratorieforsøg skaleres op til brug i en vandløbsmodel, opstår der flere potentielle udfordringer. For det første kan skaleringsproblemer opstå, da laboratorieforsøg ofte udføres i en mindre skala end det faktiske miljø. De fysiske processer, som er lette at styre i et kontrolleret laboratoriemiljø, kan ændre sig markant i en naturlig, stor skala. Eksempelvis kan turbulens, sedimenttransport og grødebevægelse opføre sig anderledes ved større skalaer. Hydraulikken i vandløb er også ofte mere kompleks end hvad der kan simuleres i laboratoriet. Faktorer som varierende vanddybder, breddeændringer og naturlige forhindringer som træstammer og vegetation kan alle påvirke vandstrømmen og er svære at genskabe nøjagtigt i et kontrolleret forsøg. Endelig kan der opstå usikkerheder ved ekstrapolering. Når laboratoriedata ekstrapoleres til større skalaer, er det vanskeligt at forudsige, hvordan systemet vil opføre sig under forskellige forhold, som ikke blev testet i laboratoriet. Dette kan påvirke modellens præcision og de beslutninger, der træffes baseret på modelresultaterne.

Resultater fra vandløbsmodeller

Målet med vandløbsmodellen var at udvikle en såkaldt "proof of concept-model, der skulle give et overblik over, hvordan resultaterne fra forsøgene i Del II ville påvirke vandstanden i større skala.

I den stationære flowanalyse af grødescenarierne viste, at den hydrauliske påvirkning af vandstanden i Nørreå er markant ved 100% grøde, men minimal ved de andre scenarier. Modellens præcision kunne forbedres ved at inkorporere variable Manningtal, da HEC-RAS modellen var begrænset af faste værdier, hvilket påvirker nøjagtigheden af resultaterne.

I den ikke-stationære flowanalyse af stenudlægninger og dertilhørende scenarier blev der observeret en minimal effekt på vandstanden i Nørreå. Dette kan tilskrives den relativt lave tæthed af sten i modellerne samt begrænsningerne i HEC-RAS-modellens evne til at repræsentere små skala variationer i strømningmønstre. En højere tæthed af sten kunne have en mere mærkbar effekt, hvilket bør undersøges i fremtidige studier. Det var også valgt at bruge modstandstallene fra CFD-modellen frem for det fysiske laboratorieforsøg, hvor modstandstallene var væsentligt lavere. Havde flowanalysen taget udgangspunkt i modstandstallene fra forsøget i det fysiske laboratorieforsøg, havde der formentlig været en større effekt fra stenudlægningerne.

Da modellen var meget simpel, blev den hverken kalibreret eller valideret, hvilket medfører en stor usikkerhed i det endelige resultat. Manglen på kalibrering og validering kan resultere i betydelige afvigelser fra de faktiske forhold i Nørreå, da modellens præcision og pålidelighed ikke er blevet verificeret ved hjælp af virkelige data. For at forbedre modellen ville det være foretrukket at kalibrere modelparametrene, hvilket ville bidrage til en bedre repræsentation af faktiske forhold i Nørreå.

14 | Konklusion

Undersøgelsen af Nørreå gennem laboratorieforsøg og vandløbsmodeller viser, at både grødeskæringer og stenudlægninger har påvist varierende effekter på vandløbets hydraulik.

Gennem eksperimentelle forsøg, udført i strømningsrenden, har det været muligt at dokumentere den hydrauliske modstand fra henholdsvis grødeskæringer og stenudlægninger. For de opstillede grødescenarier kan det konkluderes, at den hydrauliske modstand er hastighedsafhængig, hvilket betyder, at modstanden bliver mindre i takt med, at hastigheden øges, uanset mængden af grøde. Ved forsøgene med stenudlægninger kan det bekræftes, at enkelttabet kan bestemmes på bekostning af antagelser og simplificeringer i beregningerne.

Det har delvist kunnet påvises, at CFD kan bidrage til forudsigelse af effekten af stenudlægninger, men udførelse af flere forsøg er nødvendig, for at kunne validere resultaterne heraf.

Ved hjælp af hydrologisk vandløbsmodellering, kan det konkluderes, at grødeskæringer har en effekt på vandstanden, men at mængden af grøde er mindre betydelig, da det påvirkes let af strømningshastigheden. Effekten af stenudlægninger har dog vist sig at være mindre prominent, da vandstanden i højere grad ikke påvirkes.

Jævnfør problemformuleringen kan det i nærværende rapport konkluderes, at vandmiljøet kan forbedres med det udgangspunkt, at der bliver foretaget en mindre reguleret grødeskæring, samt at der udlægges skjulesten til fordel for faunaen. Vandføringsevnen kan dog ikke nødvendigvis blive forbedret ved disse tiltag, da de yder større modstand og derfor må forventes at reducere vandføringsevnen.

15 | Perspektivering

For at perspektivere projektets anvendelsesmuligheder kan det overvejes, hvordan kendskabet til ændringer i vandløbenes vandføringsevnen som følge af miljøforbedringer som stenudlægninger og mindre regulerede grødeskæringer kan anvendes i forskellige sammenhænge.

Udtagning af lavbundslande

Ved at undersøge, hvordan grødeskæringer og stenudlægninger påvirker vandløbenes kapacitet, kan disse hydrauliske analyser give vigtig indsigt i, hvor vandstanden kan hæves mest effektivt. Dette kan benyttes til at identificere områder, hvor det er fordelagtigt at tage landbrugsjord ud af drift, da en forhøjet vandstand kan fremme naturlig kvælstoffjernelse og kulstofbinding ved at skabe vådområder.

Miljøforbedrende tiltag kan føre til etableringen af vådområder og andre økosystemer, som kan fungere som effektive filtre for kvælstof og lagre for kulstof. Ved at identificere de bedste områder til at hæve vandstanden og gennemføre sådanne tiltag, kan projektet bidrage til at øge de miljømæssige fordele i vandløb samtidig med at reducere landbrugets klimabelastning. Ved at kombinere oversvømmelseskort med information om jordbundsforhold og nuværende landbrugspraksis, kan der udvikles strategier, som både understøtter miljømål og reducerer negative økonomiske virkninger for landbrug.

Videreudvikling af forsøg

Forsøgene, der er udført i dette projekt, har potentiale til at blive videreudviklet, så der kan foretages flere forskellige undersøgelser inden for stenudlægning og grødeskæring. Der kunne eksempelvis udføres nye forsøg med stenudlægninger, hvor der testes med flere sten ad gangen og eventuelt i forskellige udlægningsmønstre. På den måde inkluderes en mere varieret betragtning af disse tiltags indvirkning på vandløbssystemet. Ligeledes kan ny grødescenarier opstilles, hvor ikke kun strømrødeskæringer undersøges, men også andre skæringsmønstre, grødetæthed og grødetyper.

Projektet har derfor potentiale til verificering af forskellige designs af habitater. Fremgangsmåden ved at designe et habitat i CFD og derefter eftertjekke med en hydrologisk model, gør det muligt at undersøge de hydrauliske effekter lokalt i selve habitatet og derefter regionalt i en større vandløbsmodel. Dette kan bidrage til at afdække en lang række aspekter ved design af habitater, hvor virkningerne og konsekvenserne ellers først ville kunne observeres ved færdig udførelse.

Bibliografi

- Brorsen, Michael og Torben Larsen (2009). *Lærebog i hydraulik*. ISBN: 978-87-7307-978-2. Aalborg Universitetsforlag.
- Dataforsyning og Infrastruktur, Styrelsen for (2024). *Danmarks Højdemodel*. Downloadet: 28-05-2024. <https://sdfi.dk/data-om-danmark/vores-data/danmarks-hoejdemodel>.
- Dynamics, DANTEC (2023). *Laser Doppler Anemometry (LDA)*. <https://www.dantecdynamics.com/solutions/fluid-mechanics/laser-doppler-anemometry-lda/>.
- EnviDan (2020). *VANDLØBSRESTAURERING I NØRREÅ*. Downloadet: 20-11-2023. <https://viborg.dk/media/kspnjudr/vandlobsrestauration-noerreaa-forundersoegelse-final.pdf>.
- Larsen, Torben (2017). *Kompendium i Vandløbshydraulik*. Downloadet: 13-12-2023. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/268459042/Kompendium_i_Vandl_bshydraulik.pdf.
- Mikkelsen, Lars (1989). *Grødens indflydelse på de hydrauliske forhold*. Dansk Vandbygningsteknisk Selskab.
- Miljøministeriet (2019). *Bekendtgørelse af lov om vandløb*. Downloadet: 30-10-2023. <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2019/1217>.
- Miljøstyrelsen (2023a). *Beskyttede vandløb*. Downloadet: 27-10-2023. <https://mst.dk/erhverv/rig-natur/naturbeskyttelse/3-beskyttede-naturtyper/beskyttelse-af-3-naturtyper/vandloeb>.
- (2017). *Grødeskæringsvejledning - Vejledning om grødeskæring i danske vandløb*. Downloadet: 04-12-2023. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2017/12/978-87-7175-604-3.pdf>.
- (2023b). *Vandområdeplanerne 2021-2027*. Downloadet: 27-10-2023. <https://mim.dk/media/p1shqdm4/faktaark-vp3-vandloeb-juni.pdf>.
- Naturstyrelsen, Skov- og (2007). *Grødeskæring i vandløb - Erfaringsopsamling af metoder, praksis og effekter*. Downloadet: 28-05-2024. https://www.klimatilpasning.dk/media/360341/gr_desk_ring.pdf.
- NIRAS (2023). *Langvad Å blev til Danmarks længste faunapassage*. Downloadet: 05-05-2024. <https://www.niras.dk/projekter/langvad-aa/>.
- USACE (2024). *HEC-RAS User's Manual*. US Army Corps of Engineering - Hydrologic Engineering Center.
- USGS (2017). *Vandkredsløbet - The Water Cycle, Danish*. Downloadet: 28-05-2024. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/vandkredslobet-water-cycle-danish1>.

Viborg Amt (2005). *REGULATIV FOR NØRREÅ*. Downloadet: 23-11-2023. <https://www.gudenaakomiteen.dk/media/175748/2005-noerreaa-samt-non-moelle-%C3%A5-og-vedsoe-med-spangsund.pdf>.

Viborg Kommune (2023). *Vandstanden i Nørreå - Vejrumbro*. Downloadet: 01-12-2023. <https://viborg.dk/service-og-selvbetjening/klima-og-naturbeskyttelse/soeer-vandloeb-og-vaadomraader/vandloeb/vandstanden-i-vandloeb/vandstanden-i-noerreaa-vejrumbro/>.

Bilag

BILAG A - Elektroniske bilag

BILAG B - Anvendt metoder til laboratorieforsøg

BILAG C - Udførte målinger i laboratorie og i Nørreå

BILAG D - Opsætning af model i Star CCM+

BILAG E - Opsætning af model i HEC-RAS

BILAG F - Besigtigelse af Nørreå og opland

A | Elektroniske bilag

I forbindelse med projektet, er der udarbejdet elektroniske bilag. Bilagene inkluderer excel-filer samt Matlab kode. De vedlagte filer er struktureret i en zip-fil ved navn "Elektroniske bilag", hvor navngivning af filerne referere til det specifikke forsøg. Følgende bilag er inkluderet:

- Grødeforsøg i strømningsrende (excel)
- Stenforsøg i strømningsrende (excel)
- Kraftpåvirkning af grødestrimmel (Matlab)

B | Anvendte metoder til laboratorieforsøg

Dette bilag introducerer de metoder, der anvendes til at undersøge, hvordan sten og grøde påvirker strømningen i vandløb. Tilsammen skal metoderne give et omfattende billede af, hvordan fysiske elementer influerer vandets bevægelse, og understøtte en mere nøjagtig forståelse af de komplekse dynamikker i vandløb.

Kunstig grøde

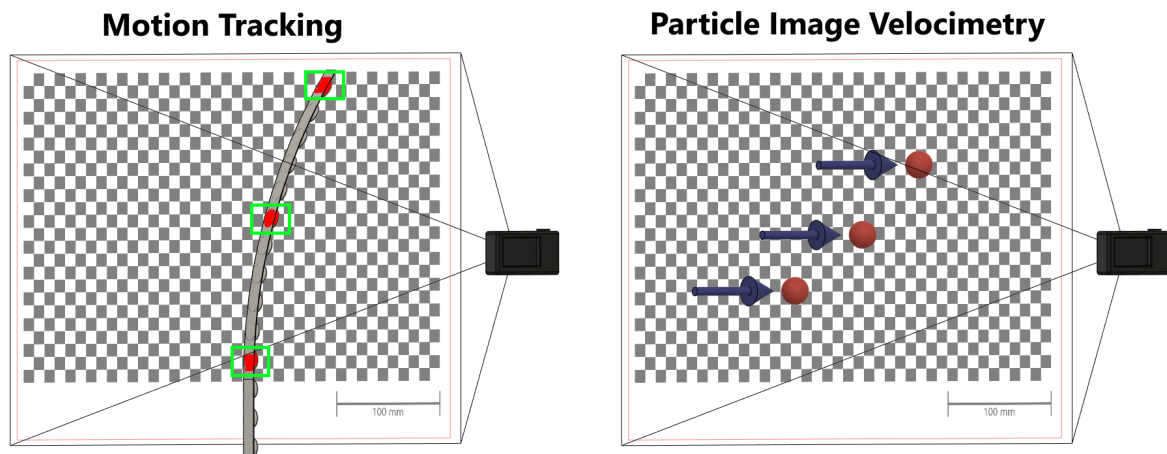
For at analysere effekten af vegetation på vandstrømmen, er der anvendt en kunstig vegetation fremstillet af bobleplast. Fordelen ved bobleplast i dette tilfælde er, at det er fleksibelt, og luftboblerne sikrer effektiv opdrift i vandet. Desuden er en vigtig fordel ved kunstig vegetation, at dens parametre såsom luftindhold og materialets densitet forbliver stabile over tid, i modsætning til naturlige vandplanter.

Kontaktfri målemetoder

For at få et dybere indblik i, hvordan både væsken og grøden opfører sig i strømningsrenden, vil Motion Tracking blive benyttet til at assistere analysen af, hvordan grøden afbøjer ved forskellige strømnings hastigheder. Her vil der primært blive brugt motion tracking og Particle Image Velocimetry (PIV).

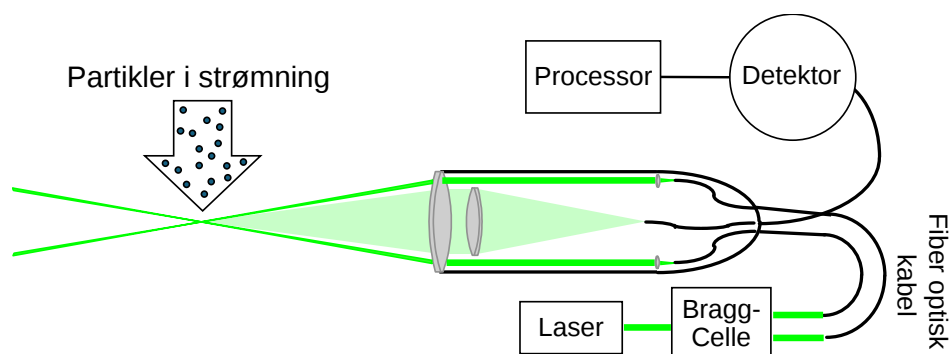
Motion tracking er en måde at følge bevægelsen af nogle punkter fra en computer. Denne metode vil blive anvendt i en strømningsrende til at analysere grødens afbøjning. Når grødestrimlen afbøjer, kan disse punkters positioner overvåges ved hjælp af kameraer. Dataene, der indsamles, kan bruges til at analysere af strimlen i forhold til strømningshastigheden.

Particle Image Velocimetry (PIV) er en optisk målemetode, der bruges til at visualisere og måle strømningsfelter. Metoden er baseret på at følge bevægelsen af strømmende partikler i vandet. Ved hjælp af et kamera der filmer partiklernes position over tid, kan partiklernes hastighed og retning efterfølgende beregnes. Dette er særligt nyttigt da den giver et detaljeret og fuldt billede af strømningsmønstret, uden direkte at forstyrre strømningen.



Figur B.1: Venstre ses hvordan Motion tracking følger de røde punkter markeret på grøden. Højre ses hvordan kameraet tracker partikler i væsken.

For at validere de resultater, der opnås gennem PIV, vil der samtidig blive udført målinger med Laser Doppler Anemometry (LDA). Metoden anvender laserlys, som rettes mod partiklerne i strømmen, hvorefter laseren reflekteres af de bevægende partikler, som sendes ind i en detektor der måler dopplerforskydningen i lyset for at bestemme hastigheden i ét punkt. Denne metode er meget nøjagtig og kontaktfri, hvilket gør den ideel til strømningsanalyser. Principdiagram kan ses i figur B.2 [Dynamics 2023]



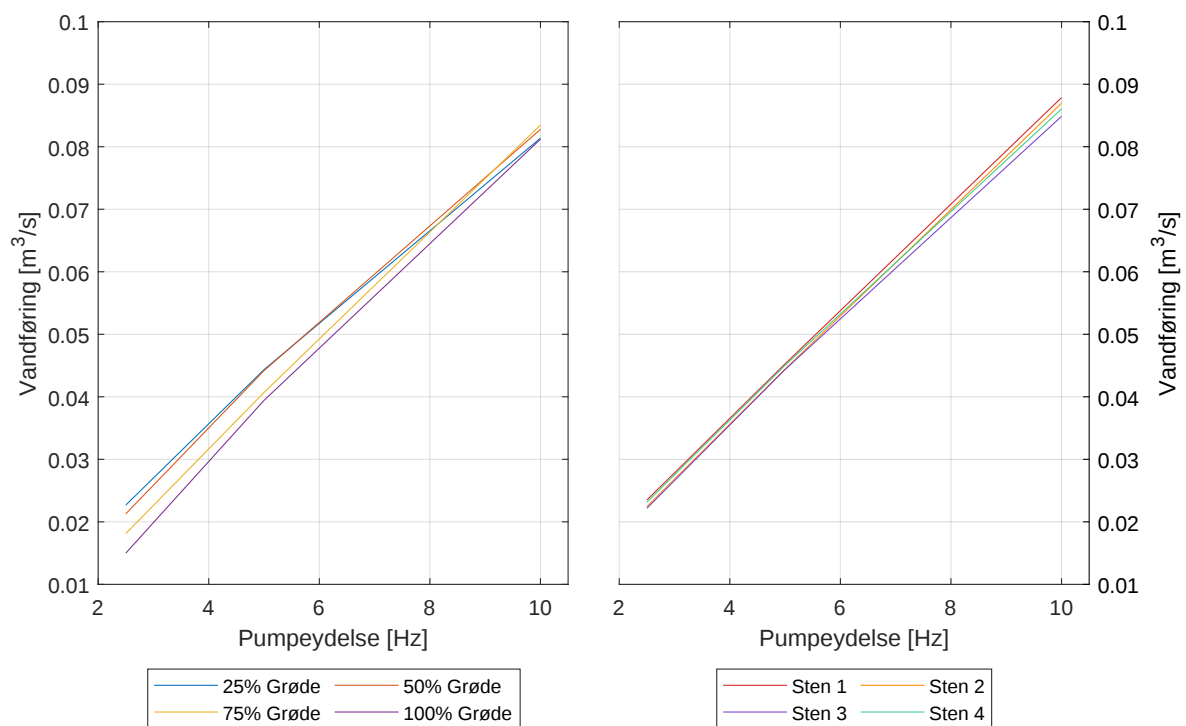
Figur B.2: LDA bruger 2 laser som er fokuseret i ét punkt for at finde en hastighed i det given punkt. [Dynamics 2023]

C | Udførte målinger i laboratorie og i Nørreå

I det følgende bilag vil målingerne fra strømningsrenden og Nørreå, der ikke indgår i selve rapporten, blive præsenteret. Bilaget inkluderer vingemålinger, tryktabsmålinger og beregning af densitet på kunstig grød, samt ADCP målinger.

C.1 Vingemålinger

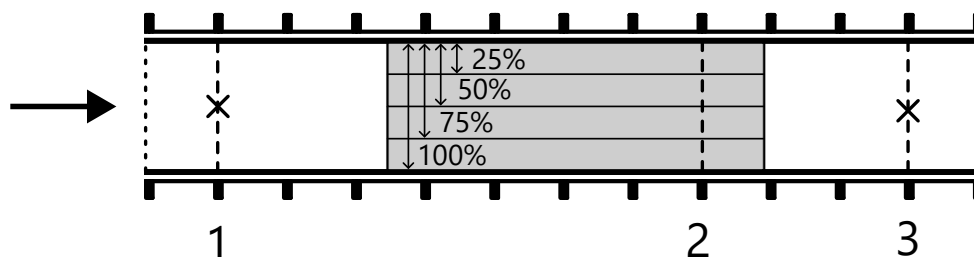
Følgende figur C.1 viser den beregnede vandføring fra vingemålingerne set i forhold til pumpeydelsen. Der observeres en pæn lineær relation mellem pumpeydelse og vandføring.



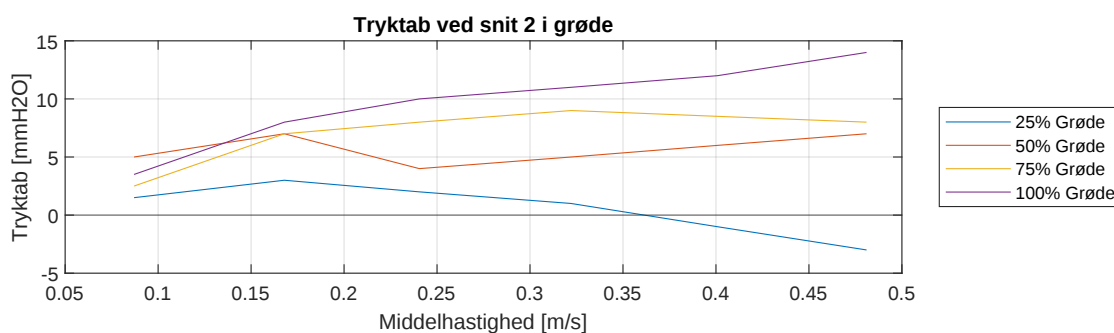
Figur C.1: Graf over vandføring set i forhold til pumpeydelse.

C.2 Målinger ved forsøg med grødescenarier

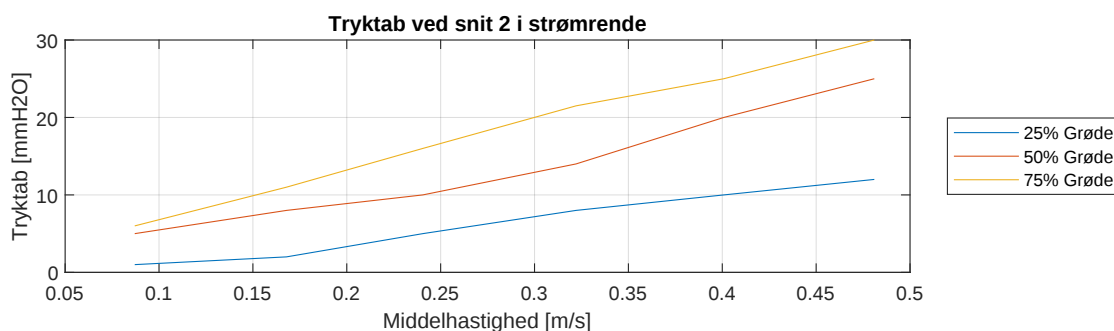
Følgende figurer C.3, C.4 og C.5, viser trykmålinger fra grødeforsøg i snit 2 og 3, som set i nedenstående figur C.2.



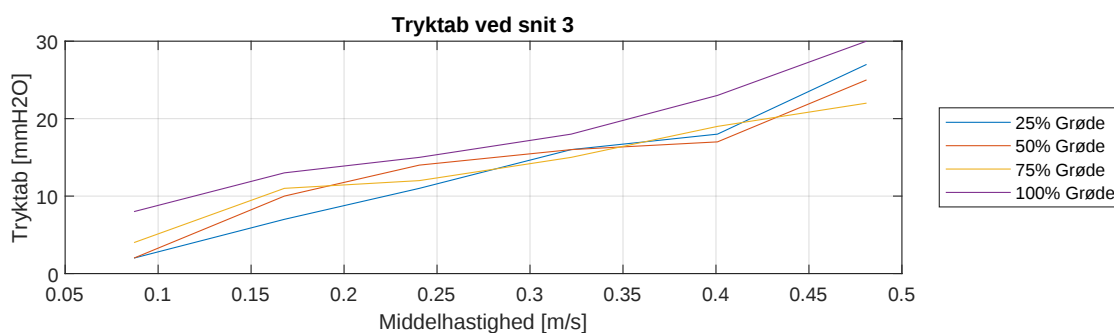
Figur C.2: Vnderet snit med lokationer for målinger. Kryds markerer, at der kun er målt i centrum af renden.



Figur C.3: Målte trykforskelle ind mellem grøden ved snit 2.

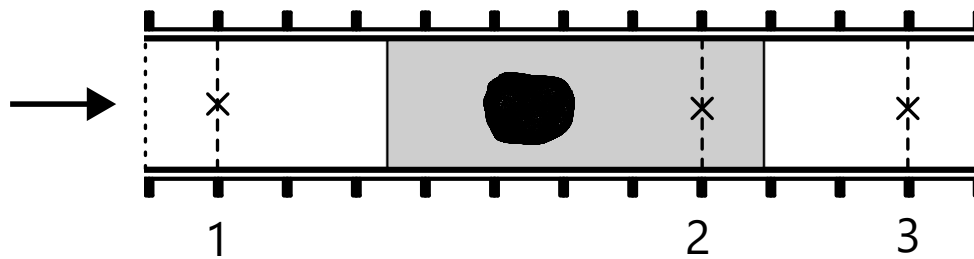


Figur C.4: Målte trykforskelle ude i den frie strøm ved snit 2.

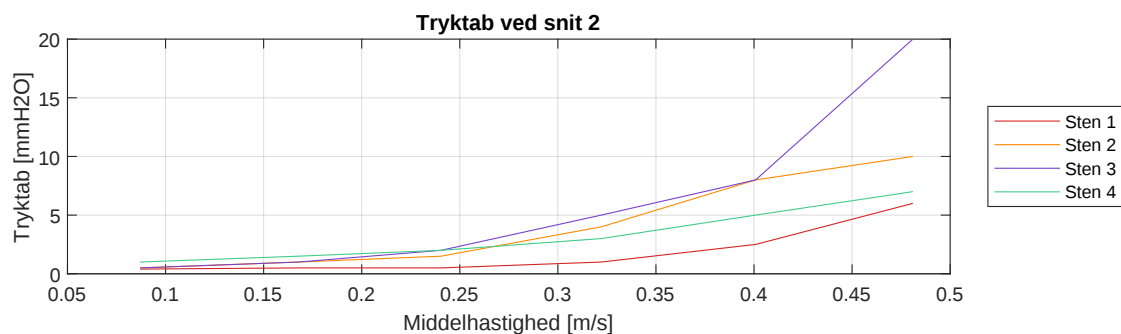


Figur C.5: Målte trykforskelle ved snit 3.

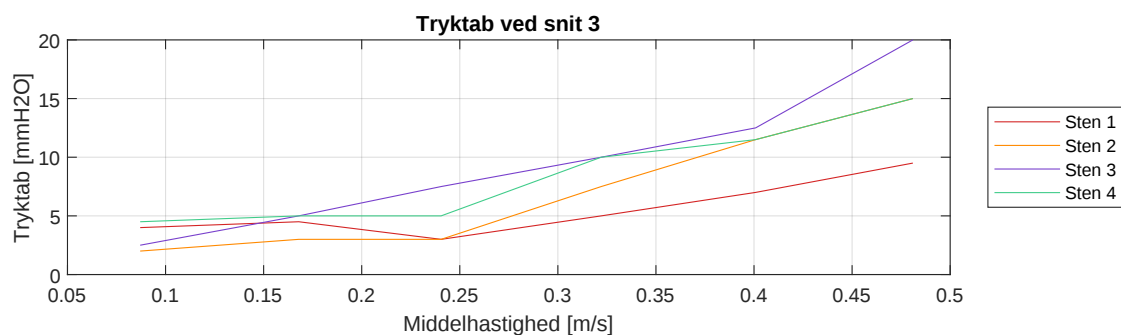
C.3 Målinger ved forsøg med stenudlægninger



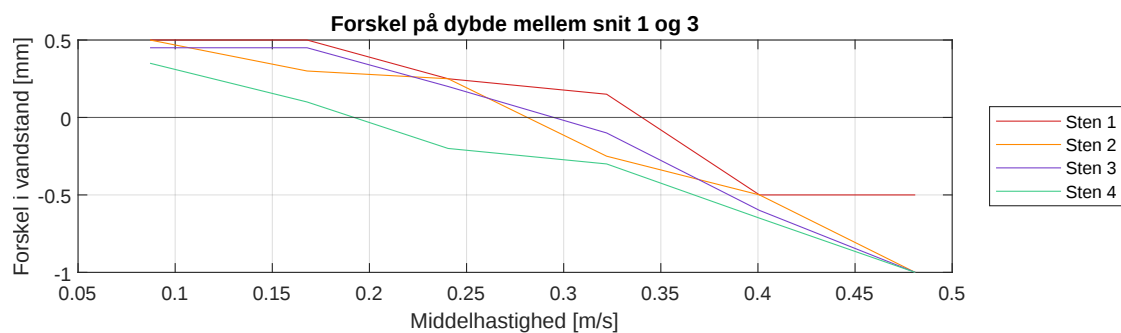
Figur C.6: Vanderet snit med lokationer over udførte målinger. De angivne kryds indikerer, at der kun er målt i midten af strømningssrenden.



Figur C.7: Målte trykforskelle ved snit 2.



Figur C.8: Målte trykforskelle ved snit 3.



Figur C.9: Målte dybdeforskelle i vandsøjlen mellem snit 1 og 3.

C.4 Densitet af bobleplast strimler

Til beregning af opdriften K_1 i ligning 9.1 på side 34, skal densiteten af den kunstige grøde findes. Dette er gjort ud fra vægten og volumenet af den enkelte strimmel. Der er anvendt 10 grødestrimler med dimensionerne 2X50 cm, hvor volumenet er beregnet ved at sænke hver strimmel i en beholder med en kendt mængde vand. Herefter måles den totale volumen af vandet med og uden grøde. Vægten er fundet ved almindelig vejning. I følgende tabel C.1 ses målingerne heraf. Vandet betegnes med sin kemiske formel (H_2O) og grøden som polyethylen (PE).

Prøve	Vægt (g)	H ₂ O Volumen (ml)	H ₂ O + PE Volumen (ml)	PE Volumen (ml)	PE Densitet (kg/m ³)
1	0,535	78	87	9	59,444
2	0,550	76	84	8	68,750
3	0,570	74	82	8	71,250
4	0,540	70	78	8	67,500
5	0,545	67	74	7	77,857
6	0,520	62	69	7	74,286
7	0,560	59	68	9	62,222
8	0,570	56	64	8	71,250
9	0,590	53	62	9	65,556
10	0,555	46	56	10	55,500
GNM	0,554	64,100	72,400	8,300	67,362

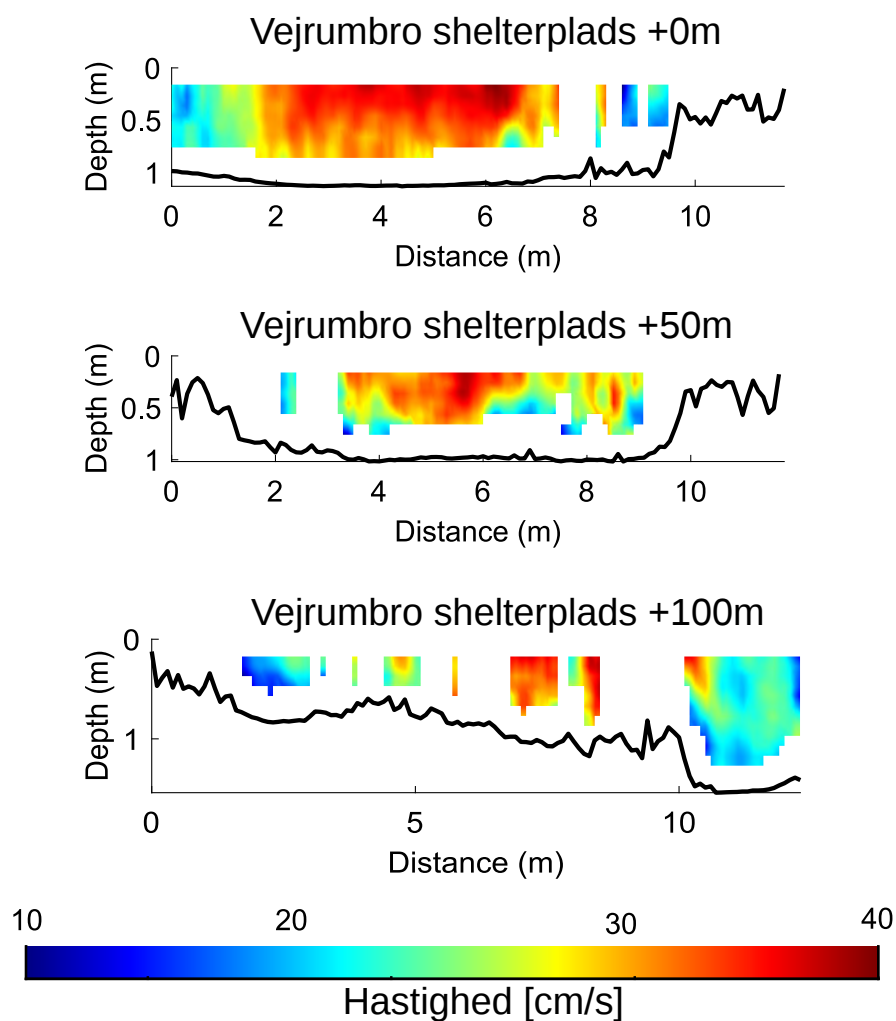
Tabel C.1: Bestemmelse af densitet af kunstig grøde. Vand er betegnet H_2O og grøde PE.

C.5 ADCP målinger foretaget i Nørreå

Den 23. august 2023 blev der foretaget 3 akkustiske doppler målinger i Nørreå ved Vejrumbro. På figur C.10 ses lokationer for de udførte ADCP målinger og på figur C.11 ses de resulterende profiler heraf.



Figur C.10: Kort over målelokationer for ADCP ved Vejrumbro.



Figur C.11: ADCP målinger udført den 23. august 2023.

D | Opsætning af model i Star CCM+

I dette bilag vil der blive gennemgået de valg, der er truffet under opsætningen af den tredimensionelle numeriske løsning af stenudlægnings i strømningsrenden i programmet STAR CCM+, udviklet af Siemens Digital Industries Software. Logo kan ses i figur D.1 nedenfor.



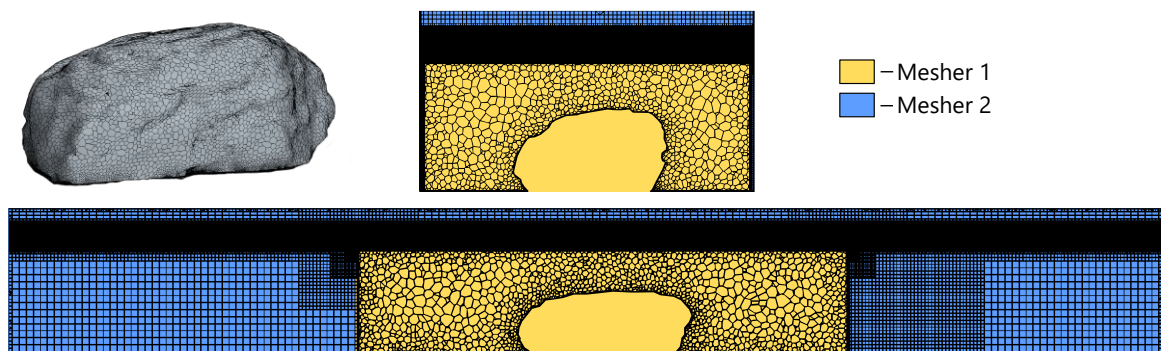
Figur D.1: STAR-CCM+ af Siemens Digital Industries Software

D.1 Opbygning af model mesh

Modellen er ligesom den rigtige strømningsrende 78 cm bred og en højde på 48 cm. Modellen er blevet afkortet i længden, da det er væsentligt at gøre modellen så lille som mulig, af hensyn til beregningstiden. Modellen er da kun 3,2 m lang i stedet for de 10 m renden er i virkeligheden. Det vurderes at der på den afstand stadig kan opnås et fuldt udviklet flow inden strømmen rammer stenen i CFD modellen.

Modellen er sat op med hexahedral og polyhedral mesh der er forbundet med et interface. Der er brugt to typer mesh, da hexahedral mesh let danner god celle kvalitet og simulere strømninger i én retning, men er svag ved detaljerede geometrier. Derfor bruges der også et polyhedral mesh omkring stenen, da denne type mesh er god til detaljerende geometrier og strømninger i flere retninger. De to mesh er da forbundet med et interface, så de kan virke sammen i en samlet model.

Det trimmede mesh i Mesher 2 umiddelbart bag stenene er også forfinet af hensyn til den forventning at strømmene bag stenene er mere komplicerede og der bør derfor være tilstrækkelige celler for at kunne beregne strømmene korrekt.



Figur D.2: Overflade mesh på Sten 4, samt mesh i hele renden og omkring stenen. Modellen er delt i to typer mesh.

Gruppe	Mesher 1	Mesher 2
Overflade mesh	Surface Remesher	Surface Remesher
Kerne volume mesh	Polyhedral Mesher	Trimmed Mesher
Valgfrie Layer Meshers	Prism Layer Mesher	Prism Layer Mesher

Tabel D.1: Valgte modeller for automated mesh i Star CCM+.

Gruppe	Mesher 1	Mesher 2	Enhed
Base size	0,01	0,01	[m]
Number of prism layers	8	8	[-]
Prism layer total thickness	33	20	[%]
Maximum cell size	200	500	[%]

Tabel D.2: Overblik over hvilke indstillinger der er ændret i forhold til standard indstillingerne i Star CCM+.

D.2 Model fysik

Modellen er sat op som en Volume Of Fluid (VOF) model. Dette er valgt da ændringen i vandspejlet er en vigtig del af undersøgelsen i forhold til at finde de ukendte parametre i energiligningen. Dette indebærer også, at modellen skal køres som en transient, tidsafhængig simulering, da denne type flerfase-modeller er meget følsomme over for små ændringer i randbetingelser og initialbetingelser. Dette kan føre til oscillationer eller divergens i løsningen. Denne type flerfase model øger mængden af beregninger der skal udføres og derfor beregningstiden, men det vurderes at dette er den bedste løsning. Et generelt overblik over de valgte modeller kan ses i tabel D.3.

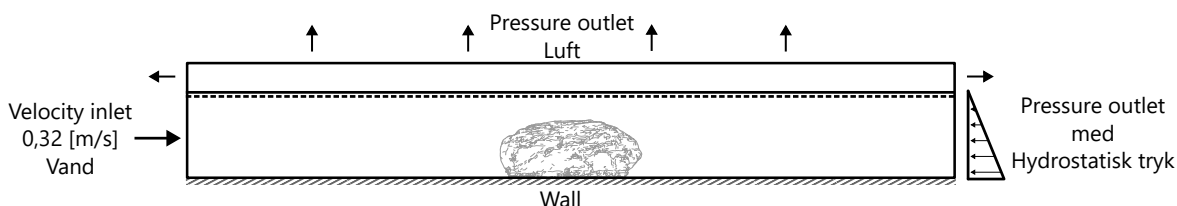
Gruppe	Model
Aktiverede modeller	Three Dimensional
Tid	Implicit-Unsteady
Materiale	Multiphase Multiphase Interaction
Flerfase model	Volume of Fluid (VOF) VOF Waves (Flat Wave) Gradients Segregated Flow
Viskøst regime	Turbulent Reynolds-Averaged Navier-Stokes
Reynolds-gennemsnit Navier-Stokes	K-Epsilon Turbulence Wall Distance Realizable K-Epsilon Two-Layer Two-Layer All y+ Wall Treatment
Ekstra valgfrie modeller	Gravity

Tabel D.3: Oversigt af valgte modeller.

Det er forventet at strømmen er turbulent i strømningsrenden og det er derfor nødvendigt at køre modellen med turbulens inkluderet. Her bruges Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) model til at simulere turbulens, med en realiserbar K-epsilon turbulens model. Dette er nødvendigt, da modellen ellers ikke er i stand til at beskrive hvirvler, der er mindre end diskretiseringen. Ved brug af K-epsilon modellen reduceres beregningstiden i forhold til en K-omega model, men til gengæld beregner K-epsilon ikke roterende strømme ligeså præcist som en K-omega model. Dette vurderes dog ikke at have stor betydning for resultaterne i simuleringen.

D.3 Initial- og randbetingelser

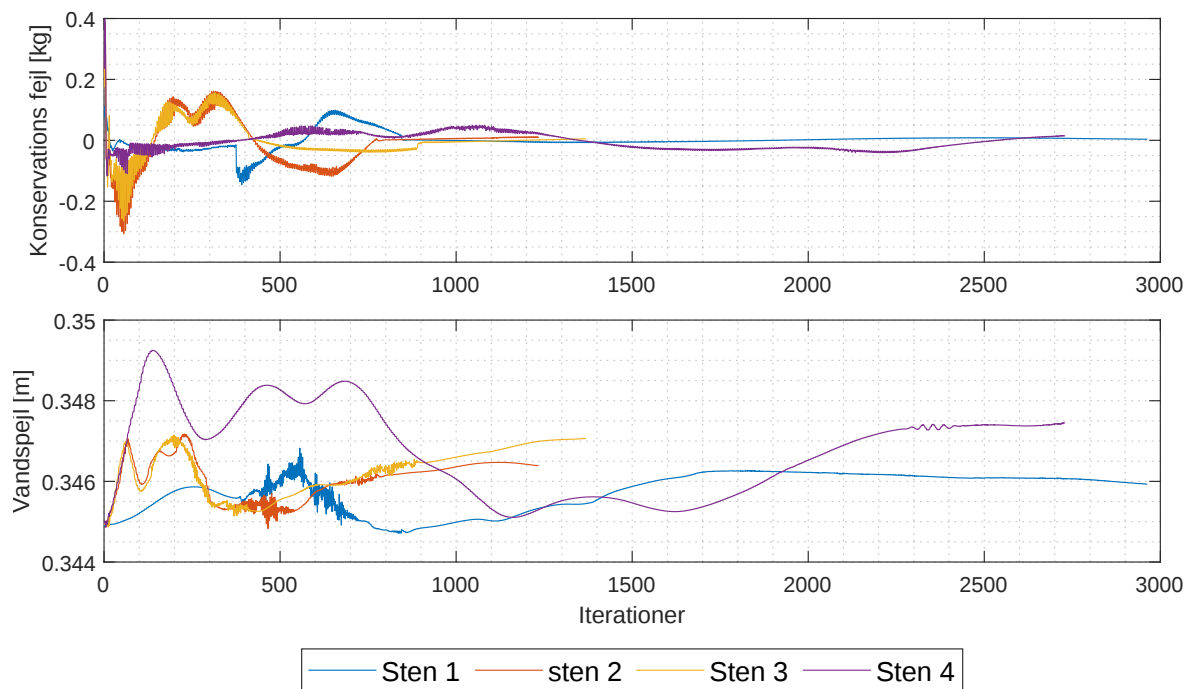
VOF-modellen er delt i vand og luft, hvor der i modellen er en vanddybde på 0,345 meter. Vandet har en middelhastighed på 0,32 m/s i indløbet, svarende til en pumpeydelse på 10 Hz i strømningsrenden. Hastigheden er valgt med henblik på, at der er indsamlet mest data fra strømningsrenden i virkeligheden ved denne hastighed. Luften er indledningsvis stillestående. For ikke at "punktere" modellen er der sat et modvirkende hydrostatisk tryk ved modellens udløb, som modvirker at vandet kan strømme ud uden modstand. Et overblik over de ydre randbetingelser kan ses på figur D.3. Da væggene i strømningsrenden er glatte vægge er dette også tilfældet i selve CFD-modellen.



Figur D.3: Randbetingelser for CFD-model.

D.4 Konvergens

Da residuals ikke kan bruges som en indikator for konvergens ved transient tidsafhængig simulering, er det valgt at kigge på massebevarelse i modellen. Ved start af simuleringen vil fejl i massen svinge meget ud, men efterhånden indstille sig omkring nul når modellen er ved at være konvergeret. På figur D.4 ses størrelsen af konserveringsfejlen for hver iteration for de fire modeller. Samtidigt er der også kigget på, hvordan vandspejlet ændre sig, men her er det ikke forventeligt at vandspejlet vil indstille sig, men blot for at se om der opstår numeriske svingninger i vandstanden.



Figur D.4: Sammenligning af LDA målinger med CFD-modellens hastighedsmålinger.

Simuleringstiden har i gennemsnit været 60-70 timer for hver sten, på trods af ønsket om at minimere beregningstiden så meget som muligt. Det vurderes, at det er muligt at optimere meshet for at reducere beregningstiden. Dog har det nuværende mesh været tilfredsstillende og er derfor ikke undergået yderligere optimeringer.

E | Opsætning af model i HEC-RAS

I dette bilag vil opsætningen af den endimensionelle flowmodel i HEC-RAS blive gennemgået, samt de valg, der er truffet under flowanalysen af henholdsvis grødescenarier og stenudlægninger.

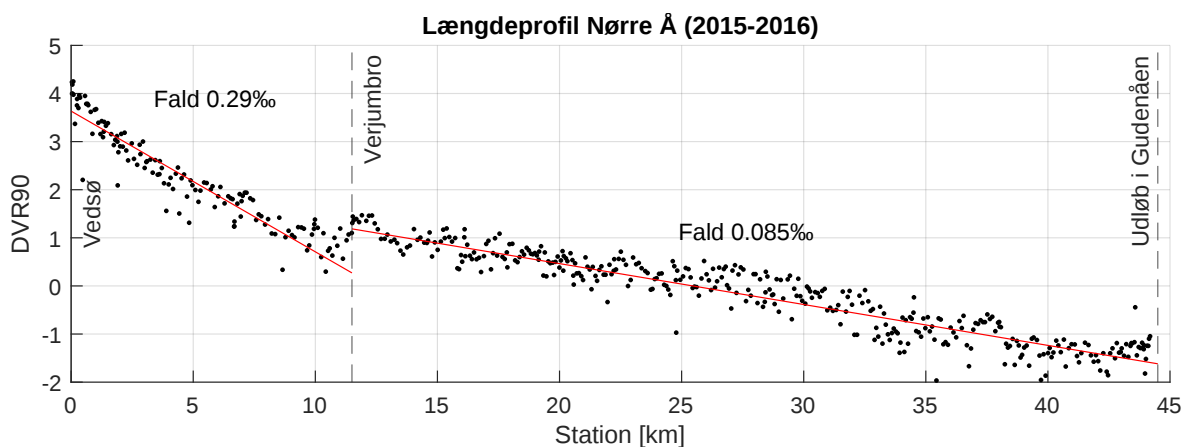
E.1 Stationær flowanalyse af grødescenarier

I tabel E.1 vises de indstillinger, som er anvendt i forbindelse med den stationære flowanalyse af grødescenarierne.

Stationær flow indstillinger	Værdi	Enhed
Generelt		
Beregningsmetode	Energiligningen	[-]
Flow regime	Subkritisk	[-]
Randbetingelser		
Nedstrøms	Normal dybde	[m/m]

Tabel E.1: Overblik over hvilke indstillinger der er ændret i forhold til standardindstillingerne i HEC-RAS' stationære flowanalyse.

HEC-RAS udfører stationære beregninger ved hjælp af energiligningen, der gennem en iterativ procedure beregner vandstanden fra et tværsnit til et andet. I modellen skal også strømningsmønsteret angives, og i dette tilfælde er subkritisk strømning valgt, hvilket er typisk for de fleste danske vandløb [Larsen 2017]. Fordi strømningen antages at være subkritisk, kræves kun en nedstrøms randbetingelse ifølge USACE [2024]. Her er "Normal depth" valgt. Under denne randbetingelse skal en energihældning angives, hvilket kan approximeres ud fra vandløbets gennemsnitlige hældning, som kan ses på figur E.1.



Figur E.1: Længdeprofil fra opmåling af Nørreå i perioden 2015-2016.

E.2 Ikke-stationær flowanalyse af stenudlægninger

I nedenstående tabel E.2 fremgår de indstillinger, der er anvendt under den ikke-stationære flowanalyse af stenudlægninger. De angivne værdier og indstillinger er justeret undervejs for at opnå numerisk stabilitet og større nøjagtighed i modellen, hvilket betyder, at de ikke er standardværdier. For at kunne undersøge, om modellen er numerisk stabil, er parametrene 'Overall Volume Accounting Error in 1000 m³' og 'Overall Volume Accounting Error as percentage' blevet anvendt.

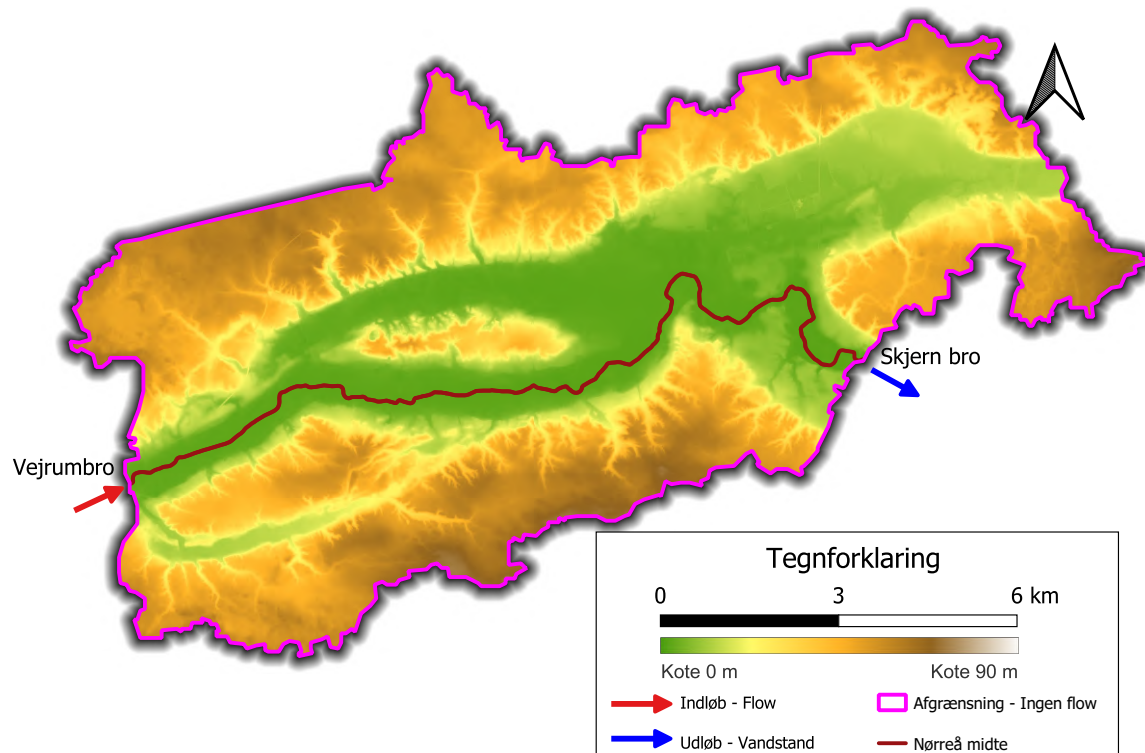
Ikke-stationær flow indstillinger	Værdi	Enhed
General		
1D Numerical Solution	Finite Difference	[-]
Water surface tolerance	0,055	[m]
Storage Area elevation tolerance	0,055	[m]
Advanced Time Step Control		
Maximum Courant	1	[-]
Minimum Courant	0,2	[-]
Number of steps below Minimum before doubling	4	[-]
Maximum number of doubling base time step	4	[-]
Maximum number of halving base time step	4	[-]
Computation settings		
Computation interval	30	[sek]
Rand- og initialbetingelser		
Opstrøms randbetingelse	Q	[m ³ /s]
Nedstrøms randbetingelse	h	[m]
Initial vandføring	Baseret på forrige simulering	[m ³ /s]
Initial vandstand	Baseret på forrige simulering	[m]

Tabel E.2: Overblik over hvilke indstillinger der er ændret i forhold til standardindstillingerne i HEC-RAS' ikke-stationære flowanalyse.

For de generelle indstillinger i flowanalysen bliver de numeriske løsninger for 1D-modellen beregnet vha. Finite Difference-metoden. Ydermere er "Water surface tolerance" og "Storage Area elevation tolerance" sat til 0,055 meter, hvilket angiver at der er en tolerancen på et fejlmargen på op til 0,055 meter.

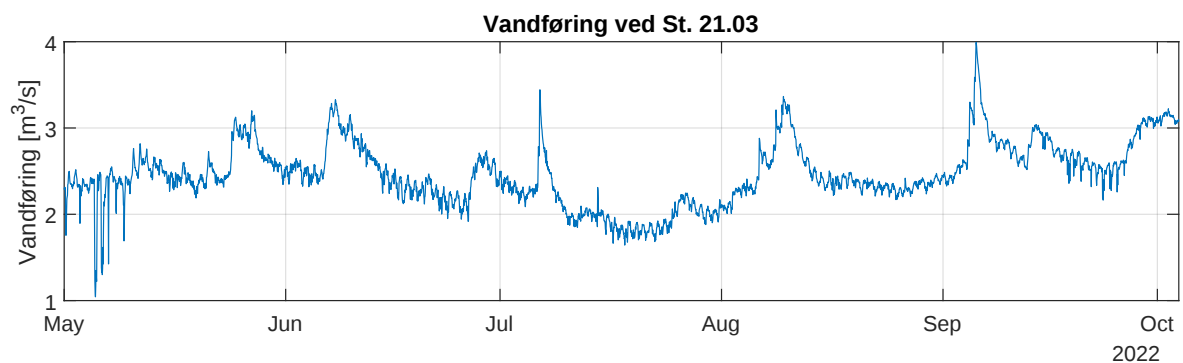
I forhold til hvordan tidskridtene styres, er det valgt at justere tidskridtene baseret på Courant-tallet. Generelt bestemmer Courant-tallet, hvor langt en strømning bevæger sig i forhold til celledørrelsen over tid. Her er det maksimale Courant sat til 1 og det minimale til 0,2. De resterende indstillinger af tidskridt, er blot med til at simuleringen tilpasses og justeres, hvilket er med til at sikre nøjagtighed og stabilitet.

Randbetingelserne er sat op således, at der ved den opstrøms randbetingelse er en flow-rand (Q), mens der ved den nedstrøms randbetingelse er en vandstands-rand (h). Disse randbetingelser er placeret ved hhv. Vejrumbro målestation (St.21.03) og Skjern bro målestation (St.21.101), hvilket er angivet i figur E.2.



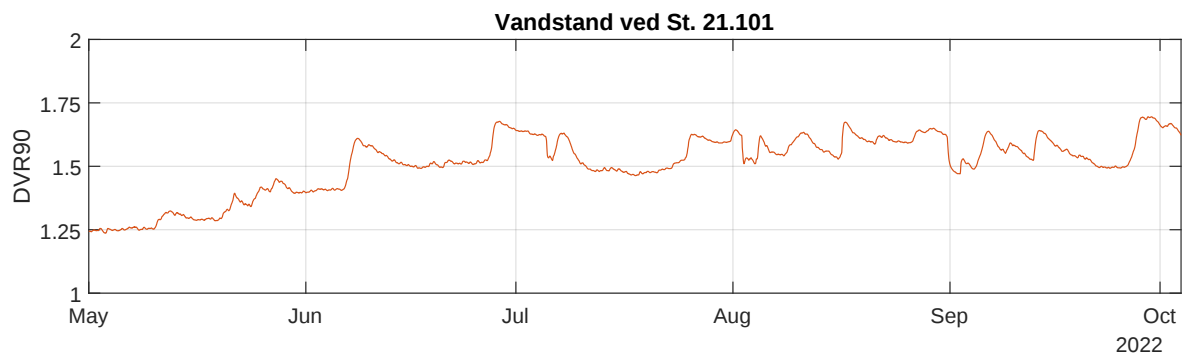
Figur E.2: Overblik over randbetingelser, som er anvendt i forbindelse med den ikke-stationære flowanalyse af stenudlægninger.

I den opstrøms randbetingelse er der anvendt vandføringsdata fra Vejrumbro St.21.03 i perioden 1.maj til 1.oktober i 2022. På figur E.3 fremgår en tidsserie for det anvendte vandføringsdata. Vandføringen er angivet per. time, hvilket gør opløsningen af dataene høj.



Figur E.3: Tidsserie af vandføring fra 1. maj til 1. oktober 2022.

Ligeledes vandføringsdataene fra Vejrumbro, er der valgt vandstandsdata fra Skjern bro St.21.101 inden for samme tidsperiode, hvilket fremgår af figur E.4.



Figur E.4: Tidsserie af vandstand fra 1. maj til 1. oktober 2022.

Initialbetingelserne er, som angivet i ovenstående tabel, baseret på tidligere simuleringer. Ved den første simulering blev der ikke valgt nogle initialbetingelser, men disse blev først anvendt i de efterfølgende simuleringer. I HEC-RAS kan initialbetingelserne for vandføring og vandstand indstilles ud fra foregående simuleringer, hvilket er gjort for alle stenudlægning scenarier. Dette bidrager til at sikre numerisk stabilitet ved de efterfølgende simuleringer.

I nedenstående tabel E.3 vises den samlede volumenfejl pr. 1000 m³ og i procent, baseret på de ovenstående indstillinger. Disse tal indikerer, at forskellen mellem det beregnede volumen og den faktiske volumen i systemet er forholdsvis lille, hvilket betyder, at simuleringens nøjagtighed er acceptabel.

Volumenfejl per. 1000 m ³	0,4987 m³
Volumenfejl i procent	0,001516 %

Tabel E.3: Overblik over den samlede volumenfejl i flowmodellen.

F | Besigtigelse af Nørreå og opland

Følgende bilag indeholder en række billeder af og omkring Nørreå samt billeder af udførelsen af ADCP målinger i Nørreå ved Vejrumbro.



Figur F.1: Billeder af Nørreå ved Vedsø, Rindsholm og Vinkelvej i august 2023.



Figur F.2: Billede af Mølleå uden for Brunshaab Rensningsanlæg samt billede af Nørreå dalen uden for Tapdrup og af Nørreå ved Vejrumbro (august 2023).



Figur F.3: Billeder af Nørreå uden for Vejrumbro i december 2023.



Figur F.4: Billeder af udførelse ADCP målinger ude for Vejrumbro (august 2023).



Figur F.5: Opsætning af ADCP ved Vejrumbro (august 2023).

