



Konsekvensvurdering af udledninger til vandløb

En undersøgelse af erosionspotentiale og sedimenttransport som indikator for ændringer i vandløbs økologiske tilstand

Aalborg universitet

Kandidatspeciale

Andreas Lund Jacobsen - Juni 2022

Titel

Konsekvensvurdering af udledninger til vandløb

Undertitel

En undersøgelse af erosionspotentiale og sedimenttransport som indikator for ændringer i vandløbs økologiske tilstand

Projekttype

Kandidatspeciale

Projektperiode

1. februar 2022 – 9. december 2022

Forfatter

Andreas Lund Jacobsen

Vejledere

Anja Thrane Hejselbæk Thomsen

Michael Robdrup Rasmussen

Forside

Revens Møllebæk

September 2021, Andreas Lund Jacobsen

Antal Sider: 32

Bilag: 0

Elektroniske bilag: 4

Resumé:

Dette projekt undersøger brugen af erosionspotentiale og sedimenttransport som en indikator for, hvordan vandløbs økologiske tilstand påvirkes af punktudledninger.

Det er meget vanskeligt at forudsige konsekvenserne for den økologiske tilstand i et vandløb i forbindelse med planlagte ændringer. Derfor forsøger dette projekt at anvende erosionspotentiale og sedimenttransport som en proxy for den økologiske tilstand, da der findes flere metoder til at kvantificere disse fænomener.

Projektet tager udgangspunkt i og fokuserer sine undersøgelser omkring et mindre vandløb kaldet Revens Møllebæk nær Voldum i Østjylland, hvor der inden for de seneste år er etableret et nyt regnvandsbassin med udledning til vandløbet.

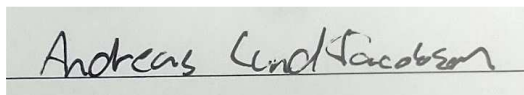
Projektet konkluderer, at der også i forbindelse med bestemmelse af erosionspotentiale og sedimenttransport er så mange usikkerheder, at det er svært at anvende disse parametre til at lave en absolut konsekvensvurdering af udledningen. Til gengæld kan en relativ sammenligning være med til at danne et stærkt og informeret grundlag til at rådgive i forhold til udledningen og dens anbefalede størrelse.

Forord

Dette projekt er udarbejdet af Andreas Lund Jacobsen i forårssemestret 2022 som afslutning på kandidatuddannelsen i Water and Environmental Engineering på Aalborg universitet. Projektet er udarbejdet i samarbejde med WSP i Aarhus, som har stillet vejledning, kontorplads, data og forskellige andre materialer til rådighed i løbet af projektperioden.

Projekt bygger videre på det arbejde Andreas Lund Jacobsen foretog i efterårssemestret 2021, som er beskrevet i (Jacobsen, 2021). I denne rapport er der anvendt nogle billeder, figurer og tekstpassager fra den tidligere rapport. Det vil være angivet de steder, hvor det er tilfældet.

Projektet består af en rapport med nummererede kapitler så vel som fire elektroniske bilag. Alle figurer og billeder er produceret i forbindelse med projektet, medmindre andet er angivet ved den enkelte figur eller billede. Alle kilder er angivet med Harvard-metoden og fremgår af litteraturlisten.

A photograph of a handwritten signature in black ink on a light-colored background. The signature reads "Andreas Lund Jacobsen" in a cursive script.

Andreas Lund Jacobsen

Indhold

1. Indledning	4
Formål og problemformulering	5
2. Projektlokation – Revens Møllebæk	6
3. Indledning til analyse af sedimenttransporten i Revens Møllebæk	8
4. Opsætning af hydrodynamisk model i MIKE Hydro River	8
Vandløbets fysiske udformning	8
Grænsebetingelser	9
Vandføringsdata	10
Simuleringsspecifikationer	11
5. Kalibrering og validering af vandløbsmodel	11
Kalibreringsprocess og resultater	11
Validering	14
6. Langtidssimulering og vandløbets naturlige variation	18
Vandstanden i Revens Møllebæk	18
Sedimenttransporten i Revens Møllebæk	19
Stream power i Revens Møllebæk	21
Vurdering af resultaterne fra langtidssimuleringen	22
7. Bassinudledningens effekt på Revens Møllebæk	23
Definition af beregningsscenarier	23
Bassinudledningens effekt på vandstanden	24
Bassinudledningens effekt på den beregnede sedimenttransport	25
Bassinudledningens effekt på vandløbets stream power	27
Samlet vurdering af udledningens effekt på Revens Møllebæk	29
8. Konklusion	30
9. Perspektivering og muligheder for videre undersøgelse	31
Bibliografi	32

1. Indledning

Der er i Danmark et stadig stigende behov for og fokus på håndtering af regnvand. Det sker i takt med, at byerne fortættes, og der kommer en stadig større mængde nedbør som følge af klimaændringer. Det betyder, at der landet over etableres nye regnvandsbassiner, hvor langt størstedelen udleder til vandløb. Størrelsen af denne udledning er defineret i en udledningstilladelse og er meget væsentlig i forhold til pladsforbrug og anlægsomkostninger. Det er væsentligt dyrere og fylder mere at anlægge bassiner, som kun udleder en lille smule fremfor bassiner med en stor udledning, hvorfor forsyningsselskaberne, som ofte er dem, der skal finansiere etableringen af bassinerne, har interesse i at få så stor en udledningstilladelse som muligt. Det er imidlertid kommunerne, som er myndighed på området, der har ansvar for at udstede udledningstilladelserne og sikre at regler og lovgivning på området overholdes. Grundlæggende set skal udledningstilladelsen sikre, at recipientens hydrauliske kapacitet overholdes, så der ikke opstår værre og hyppigere oversvømmelse som konsekvens af en bassinudledning, samtidig med at udledningen ikke må forringe vandløbets økologiske tilstand eller forhindre fremtidig målopfyldelse.

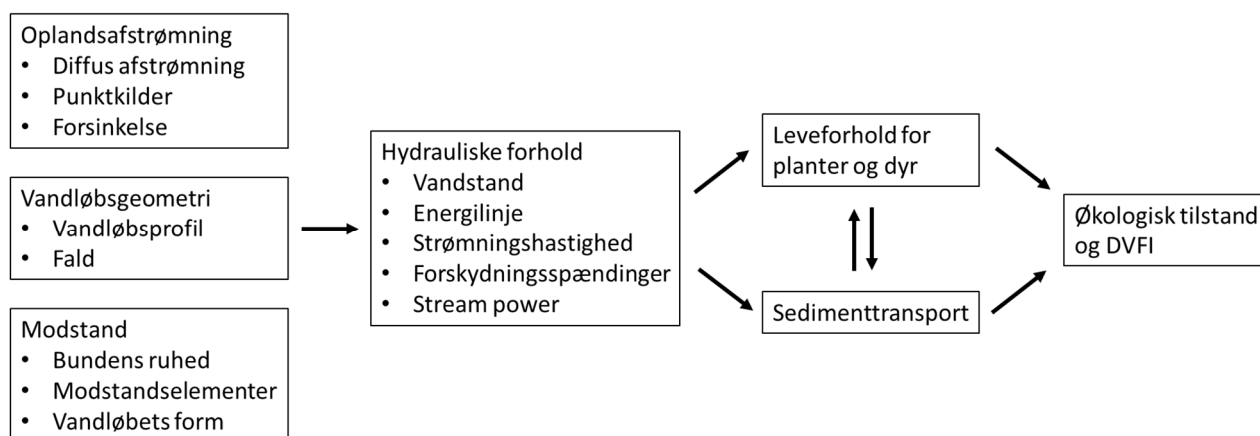
Det har givet anledning til, at udledningstilladelsen ofte gives efter et forsigtighedsprincip, hvilket pålægger forsyningsselskaberne en i nogle tilfælde unødvendig økonomisk byrde. Forsyningsselskaberne er i deres gode ret til at søge en større udledningstilladelse, såfremt de kan dokumentere at den overholder de gældende regler på området om at respektere den hydrauliske kapacitet og ikke forringe den økologiske tilstand. Især det økologiske aspekt kan være meget svært at kvantificere, og der mangler værktøjer og fælles fremgangsmetoder til at hjælpe dette på vej.

Et vandløbs økologiske tilstand vurderes i faunaklasser fra 1 til 7 efter Dansk Vandløbsfaunaindeks (DVFI) på baggrund af, hvilke smådyr, vandplanter og fisk der er til stede i vandløbet. DVFI giver et godt øjebliksbillede af tilstanden i vandløbet, men det kan være meget svært at vurdere præcis, hvilken effekt ændringer i vandløbet vil have på vandløbets faunaklasse. Det er derfor meget svært at bruge DVFI som et værktøj til på forhånd at vurdere, hvilken effekt en udledning vil have på et givent vandløb.

Den økologiske tilstand er i et eller andet omfang forbundet med erosionspotentialet og sedimenttransporten i vandløbet. Blandt andet peger flere studier på at en øget sedimenttransport hænger sammen med et fald i antallet af individer såvel som forskellige arter af invertebrater, der forekommer i et vandløb (Wilcock, 2001). Da sedimenttransporten i høj grad afgøres af de hydrauliske forhold, der er til stede i vandløbet, kan det antages, at der ved at redegøre for ændringer i dem også i nogen grad kan redegøres for ændringer i den økologiske tilstand.

Formål og problemformulering

Formålet med projektet er at udnytte korrelationen mellem sedimenttransporten og den økologiske tilstand til at skabe en metode, der kan anvendes til at vurdere, hvilken effekt en punktudledning har på den økologiske tilstand i recipienten. I Figur 1 er vist sammenhængen mellem forskellige parametre, der tilsammen skaber de hydrauliske forhold, der danner grundlag for sedimenttransporten og i forlængelse heraf den økologiske tilstand. Det er denne sammenhæng der danner grundlag for projektet.



Figur 1: Sammenhæng mellem de hydrauliske forhold i et vandløb, sedimenttransporten og de økologiske forhold.

Under antagelse af at den ovenstående sammenhæng er gældende, forsøger projektet at besvare følgende spørgsmål:

Kan de hydrauliske forhold anvendes til at kvantificere sedimenttransporten i et sådant omfang, at den kan anvendes til at skelne mellem de naturlige variationer, der forekommer i et vandløb og effekten af en punktudledning, således at de økologiske konsekvenser kan vurderes på denne baggrund?

For at besvare dette spørgsmål er der udvalgt en projektllokation, for hvilken der foretages beregninger af vandstanden, den dimensionsløse sedimenttransport og stream poweren historisk set med henblik på at forstå vandløbets naturlige variationer. Herefter foretages beregninger af de samme parametre i forskellige opstillede beregningsscenarier for at vurdere effekten af en given bassinudledning.

2. Projektlokation – Revens Møllebæk

Dette afsnit er genbrugt fra (Jacobsen, 2021).

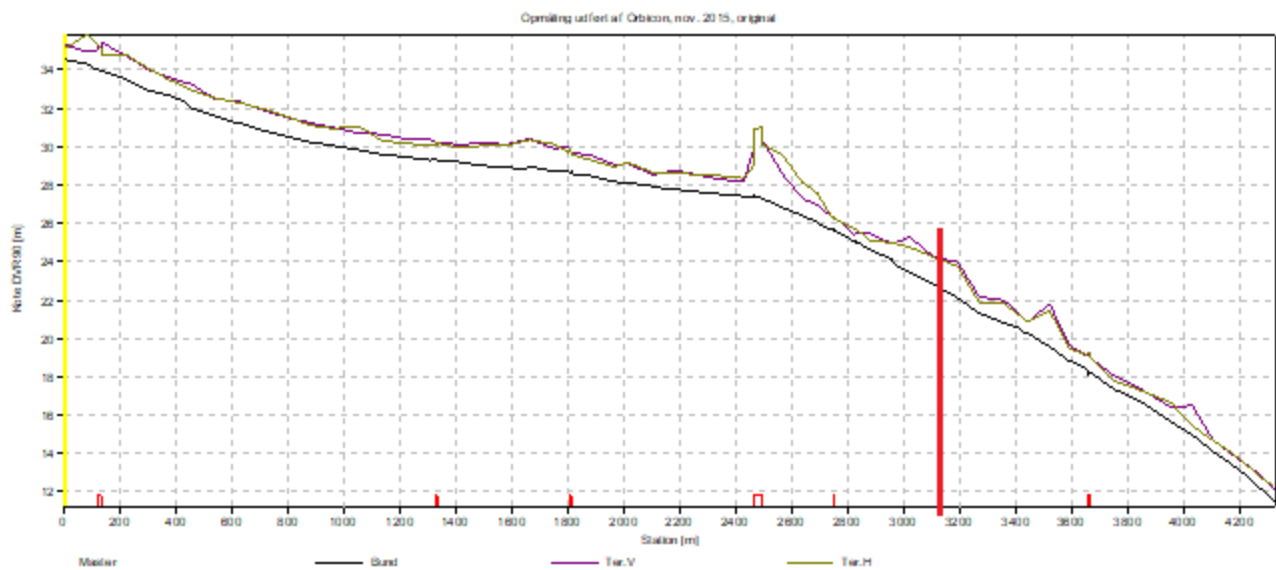
Projektet tager udgangspunkt i Revens Møllebæk. Det er et lille vandløb, beliggende ved Voldum sydøst for Randers. Revens Møllebæk har sit udspring vest for Voldum, hvorfra den løber næsten stik øst for efter sit 4327 meter lange forløb at munde ud i det større vandløb Skader Å (Figur 2).



Figur 2: Oversigtskort over Revens Møllebæk og projektlokationen.

Revens Møllebæk løber indtil omkring station 3500 langs marker. På denne strækning er vandløbet forholdsvis lige og dybt skåret ned i det omkringliggende terræn. På den sidste strækning løber vandløbet gennem et skovområde, hvor det strømmer mere terrænnært og har et mere naturligt og mæanderende forløb. Vandløbet har indtil station 2460 et gennemsnitligt fald på 2,9 promille, hvorefter det bliver væsentligt stejlere med et gennemsnitligt fald på 8,7 promille indtil udløbet i Skader Å (Figur 3).

Revens Møllebæk er valgt som projektlokation, da der i forbindelse med vandløbet ligger et regnvandsbassin med mulighed for at regulere udledningen til vandløbet og derved skabe varieret vandføring i løbet af en kort tidsperiode. Bassinet har sit udløb i station 3118. Umiddelbart nedstrøms bassinet i station 3124 er monteret en vandstandslogger.



Figur 3: Længdeprofil over Revens Møllebæk opmålt af Orbicon i 2015. Profilet viser vandløbsbunden og terrænet på begge sider af vandløbet. Basinudløbets placering er markeret med rødt i station 3118.

3. Indledning til analyse af sedimenttransporten i Revens Møllebæk

I dette kapitel undersøges den hydrauliske belastning i Revens Møllebæk under forskellige scenarier og situationer. Den hydrauliske belastning vurderes på tre parametre. Vandstand, dimensionsløs sedimenttransport og stream power. Først etableres en vandløbsmodel for Revens Møllebæk. Dernæst anvendes modellen til at foretage en langtidssimulering, med henblik på at bestemme vandløbets naturlige spænd for de forskellige parametre. Til sidst implementeres bassinudledningen på en række beregningsscenarier med henblik på at vurdere effekten af udledningen på de tre udvalgte parametre.

Til analysen er anvendt forskellige metoder. Det gælder hovedsageligt hydraulisk modellering, dataanalyse samt prøvetagning ved projektlوکationen.

4. Opsætning af hydrodynamisk model i MIKE Hydro River

Det er de hydrologiske forhold i et vandløb, der primært er bestemmende for størrelsen af sedimenttransporten. For at analysere på sedimenttransporten er det derfor vigtigt først at have de hydrologiske forhold grundigt beskrevet. Et effektivt værktøj til at beskrive hydrologien i vandløb og teste effekten forskellige opstillede scenarier er at konstruere en hydrodynamisk model.

I dette afsnit beskrives opsætning af en hydrodynamisk model over Revens Møllebæk foretaget i MIKE Hydro River.

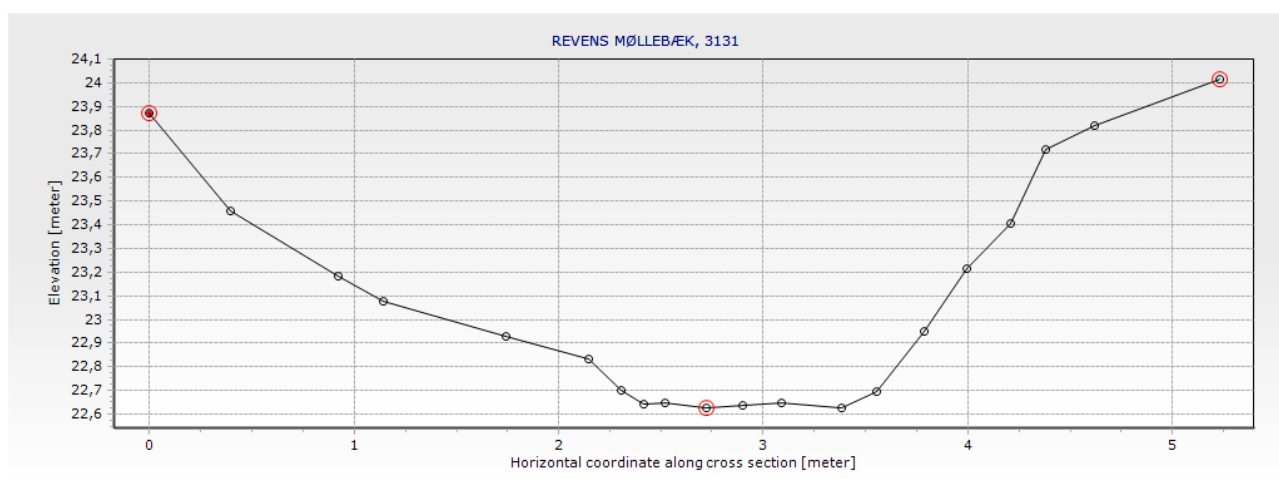
Vandløbets fysiske udformning

For at kunne bestemme de hydrologiske forhold i Revens Møllebæk skal vandløbets fysiske skikkelse defineres. Det gøres i praksis ved hjælp af en vandløbslinje, som beskriver vandløbets geografiske placering og længde samt en række tværprofiler placeret langs denne linje. Både vandløbslinjen og tværprofilerne anvendt i modellen er fra en opmåling foretaget af Orbicon i 2015. Der er målt 64 tværprofiler jævnt fordelt ned gennem det 4327 meter lange vandløb, hvilket svarer til ca. et tværprofil pr. 70 meter vandløb.

For at forbedre præcisionen omkring regnvandsbassinets udløb er der i forbindelse med projektet foretaget en ekstra tværsnitsopmåling i et profil i station 3131. Opmålingen er udført med GPS i oktober 2021 efter anvisningerne beskrevet i (Andersen, et al., 2013). På Figur 4 ses et billede fra Revens Møllebæk, hvor kontrolopmålingen er foretaget. Resultatet af opmålingen ses på Figur 5.



Figur 4: På billedet ses stedet, hvor der er foretaget kontrolopmåling af tværprofilet. Umiddelbart opstrøms kan målestationen placeret få meter efter bassinets udløb ses.



Figur 5: Målt tværprofil i Revens Møllebæk station 3131. Figuren er også brugt i (Jacobsen, 2021).

Grænsebetingelser

Grænsebetingelserne definerer, hvordan vandet løber ind og ud af modellens domæne. I modellen er indsat en lukket grænse ved vandløbets start, som forhindrer vandet i at løbe baglæns ud af modellen. I vandløbets nedstrøms ende, hvor Revens Møllebæk løber ud i Skader Å, er indsat en åben grænse med et fikseret vandspejl. Den åbne grænse, tillader vandet at løbe ud af modellen netop der. At grænsen er implementeret med et fikseret vandspejl, øger modellens stabilitet, men det har den konsekvens, at modellen kan være upræcis på en kort strækning umiddelbart opstrøms fra denne grænsebetingelse afhængigt af, hvor meget den simulerede vandstand afviger fra den angivne værdi.

Tilstrømningen til modellen er styret af en række grænsebetingelser i form af punktkilder og diffus tilstrømning jævnt fordelt over en strækning. Der er indsat punktkilder for alle tilløb med et opland større end 0,2 km² som bestemt ved brug af Scalgo (Scalgo, 2022). Alle tilløb mindre end 0,2 km² er inkluderet som diffus tilstrømning. Fælles for begge typer af grænsebetingelser er, at de er implementeret, så inputtet er en

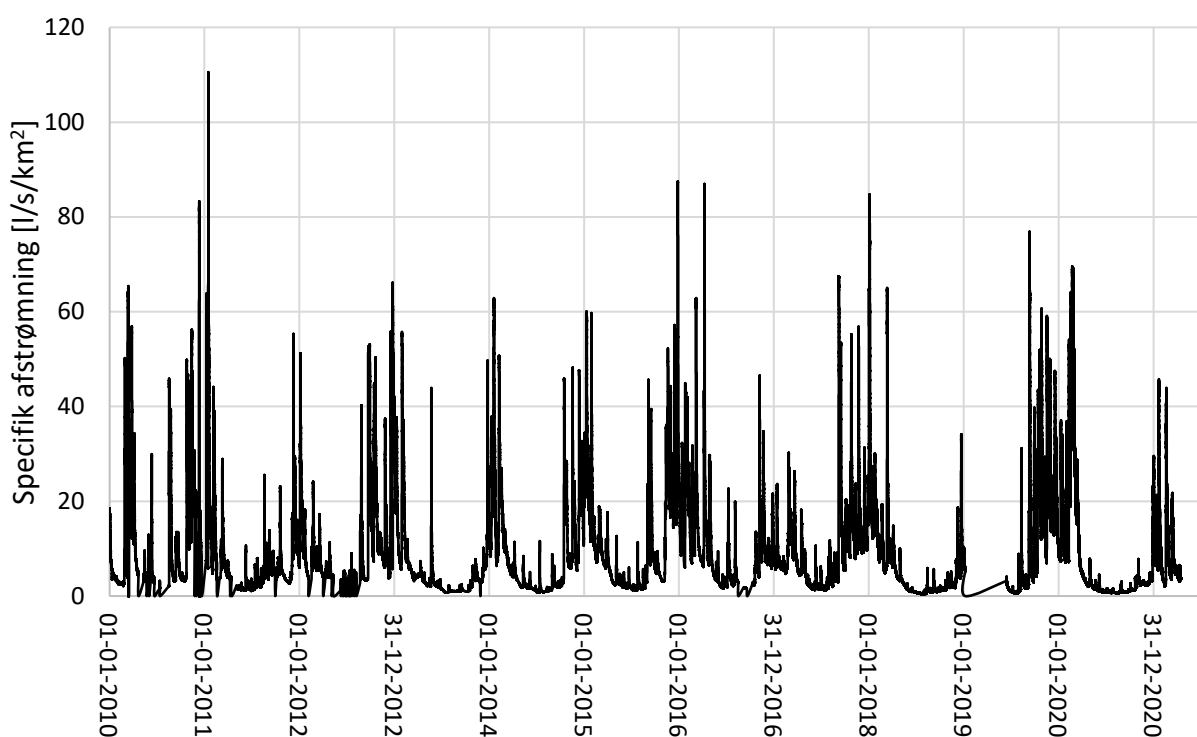
specifik afstrømning, der for den enkelte grænsebetingelse skaleres efter oplandsstørrelse. Det tillader, at den samme konstante værdi eller tidsserie kan anvendes som input til alle grænsebetingelserne.

Vandføringsdata

Der findes ikke historiske vandføringsdata fra Revens Møllebæk, hvorfor der er anvendt data fra målestation 21.113 Spørring å, Ejvad bro. Målestationen i Spørring å ligger umiddelbart syd for Revens Møllebæk og har et opland på 42,72 km², hvilket er større end oplandet til vandstandsloggeren i Revens Møllebæk, som er 7,61 km². Dataene fra målestationen i Spørring å er valgt på den baggrund, at der findes vandføringsdata for de seneste 10 år samt dens geografiske lokation nær Revens Møllebæk.

Det forventes, at timingen af forskellige afstrømningshændelser til de to vandløb stemmer meget godt overens, i og med målestationen i Spørring å ligger så forholdsvis tæt på Revens Møllebæk. Dog er det rimeligt at formode, at der er en vis forsinkelse og mere udjævnede peaks på afstrømningen til Spørring å i forhold til Revens Møllebæk grundet oplandets størrelse.

Datasættet går fra 1-1-2010 til 16-4-2021 med en opløsning på et kvarter. Det bemærkes, at der er flere huller i datasættet, hvor der mangler målinger fra en eller flere dage. Det gælder især i de tidlige år. Der er ligeledes et stort hul på flere måneder i starten af 2019. Tidsserien er afbildet på Figur 6.



Figur 6: Specifik afstrømning til målestation 21.113 i Spørring å.

For tidsserien er udregnet forskellige karakteristiske værdier af den specifikke afstrømning. Beregningerne er foretaget på baggrund af hele datasættet med undtagelse af målingerne fra 2021, da der ikke er målinger for hele året. De karakteristiske værdier er angivet i Tabel 1.

Tabel 1: Karakteristiske værdier for afstrømningen til Spørring å

	Specifik afstrømning [l/s/km ²]
Middel	9,59
Maksimum	110,61
Minimum	0,39
Median maksimum	76,90
Sommer median maksimum	43,94

Simuleringsspecifikationer

Før modellen kan køres, angives beregningens opløsning i forhold til beregningsnet og tidsskridt. Finere opløsning af disse parametre giver anledning til længere beregningstider, hvorimod en for grov opløsning kan resultere i en upræcis beregning og i værste fald at modellen bliver ustabil og slet ikke kan køre.

Som udgangspunkt er der et beregningspunkt alle steder, hvor der er defineret et tværprofil. Herudover er modellen sat til at indsætte ekstra punkter, så afstanden mellem to punkter aldrig overstiger 50 meter.

Tidsskridtet er sat til fem sekunder. Der foretages altså en beregning i alle punkterne hvert femte sekund. Det er imidlertid udelukkende for, at modellen kører stabilt at så fin en opløsning er nødvendig, hvorfor modellen er indstillet til kun at gemme resultaterne med en opløsning på 15 minutter med henblik på at reducere størrelsen af resultatfilen.

5. Kalibrering og validering af vandløbsmodel

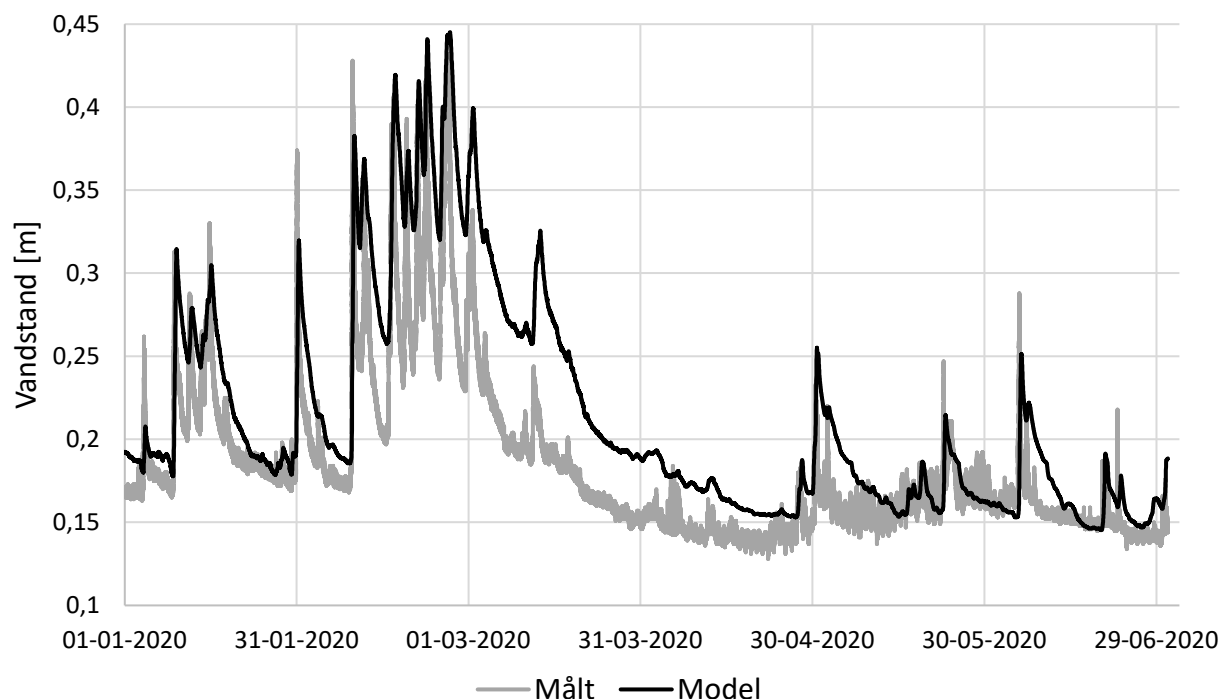
For at sikre at modellen fungerer efter hensigten og kan producere troværdige resultater, er der foretaget en kalibrering og efterfølgende validering. Det er særligt vigtigt for denne model, da der er anvendt vandførselsdata fra et andet vandløb, hvilket må antages at skabe en vis unøjagtighed i modelberegningerne.

Det er altid at foretrække, hvis der findes data fra flere punkter ned gennem det modellerede vandløb til at kalibrere og validere modellen, men i Revens Møllebæk er der kun vandstandsmålinger fra et enkelt punkt i station 3124, for hvilket kalibreringen er udført. Det gør det svært at kontrollere modellens præcision andre steder i vandløbet. Vandstandsloggeren er dog placeret umiddelbart nedstrøms bassinudledningen i station 3118, som udgør de fremadrettede undersøgelers primære fokus.

Kalibreringsprocessen og resultater

Kalibreringen er foretaget ved justering af manningtallet. Det er antaget, at manningtallet varierer hen over året, og at denne variation følger en sinuskurve, som antager sin største værdi den 1. januar og laveste værdi 1. juli. Der er kalibreret efter et halvt år fra den 1-1-2020 til den 1-7-2020, som dækker hele spændet, hvori manningtallet varierer. De bedste resultater fandtes ved at lade Manningtallet variere mellem 4 og 35. Det er et større spænd end forventet, og det kan muligvis være relateret til, at det er vandføring fra et andet

vandløb, der gennem kalibreringen søges transformeret om til at passe Revens Møllebæk. Den modellerede vandstand efter kalibrering er plottet med de målte vandstande for hele kalibreringsperioden på Figur 7.



Figur 7: Målte og modellerede vandstande i Revens Møllebæk station 3124 i perioden 1-1-2020 til 1-7-2020

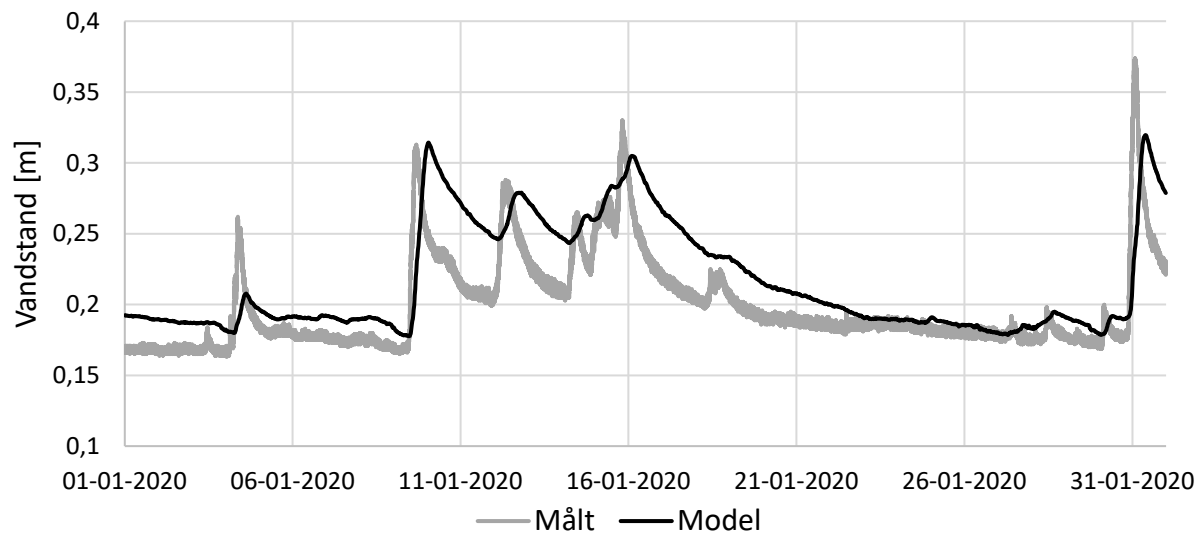
Da modellens primære formål er at analysere på peak-hændelser, er kalibreringen foretaget med det i mente. Det fremgår derfor også af Figur 7, at modellen generelt overestimerer vandstanden i situationer med lavere vandstand, men til gengæld for det meste matcher de målte værdier med højere vandstande. Det er også reflekteret i Tabel 2, hvor det fremgår at den modellerede vandstand gennemsnitligt er 3 cm højere end den målte, men at både minimum og maksimum vandstand kun afviger med 2 cm. Der er dog stadig en tendens til, at modellen underestimerer vandstanden, når den stiger kraftigt efter en periode med lavere vandstand. Det skyldes med stor sandsynlighed, at der i modellen er anvendt vandføringsdata fra et vandløb med større opland, som må forventes at reagere langsommere og mindre volatilt på pludselige regnhændelser.

De største afvigelser, hvor både de modellerede peak-hændelser og middelvandstande er forskudt fra de målte, findes omkring marts måned. Det kan tyde på at manningtallet anvendt i modellen falder for tidligt på året og dermed giver anledning til en for høj vandstand. Det er et argument for, at manningtalsvariationen burde forskubbes en måned, således at manningtallet topper 1. februar i stedet for 1. januar. På den måde ville modstanden i vandløbet være lavere i forårmånederne og vandstanden tilsvarende lavere.

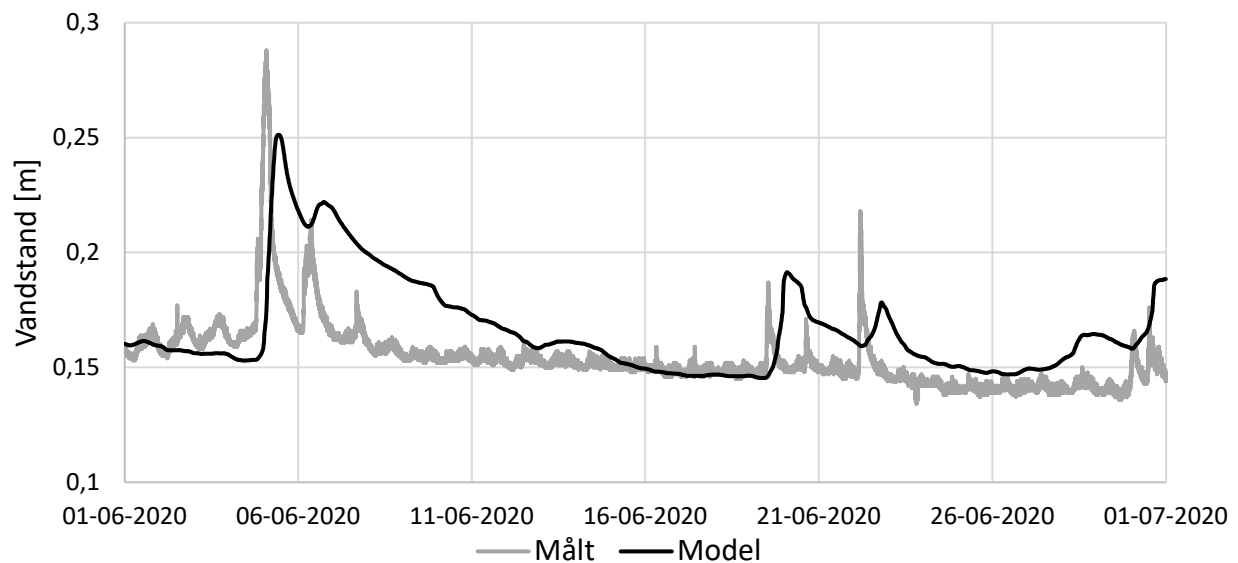
Tabel 2: Karakteristiske værdier for den målte og den modellerede vandstand i Revens Møllebæk i kalibreringsperioden

	Målt vandstand [m]	Modelleret vandstand [m]
Middel	0,18	0,21
Minimum	0,13	0,15
Maksimum	0,43	0,45

For at tage et lidt nærmere kig på, hvordan modellen reagerer i forhold til den målte vandstand, er der på Figur 8 og Figur 9 zoomet in på henholdsvis den første måned og sidste måned af kalibreringsperioden for at give et indtryk af, hvordan modellen præsterer ved både lav og høj modstand.



Figur 8: Målte og modellerede vandstande i Revens Møllebæk station 3124 i perioden 1-1-2020 til 1-2-2020



Figur 9: Målte og modellerede vandstande i Revens Møllebæk station 3124 i perioden 1-6-2020 til 1-7-2020

Konsekvenserne ved at anvende data fra et vandløb med et større opland i modellen, bliver endnu tydeligere på Figur 8. Her ses det for alvor, hvordan perioder med højere vandstand er trukket længere ud i de modellerede resultater. Ud over at hændelserne har længere varighed, kan det også ses, at de er forsinkede i forhold til de målte. Det er igen en konsekvens af, at vandet er længere undervejs, inden det når vandløbet, det større oplandet er.

Der tegner sig også et billede af, at modellen underestimerer vandstanden ved enkeltstående hændelser med kort varighed. Det skyldes med stor sandsynlighed, at et større opland under disse hændelser ikke når at blive vandmættet i en sådan grad, at afstrømningen til vandløbet opnår sit potentiale.

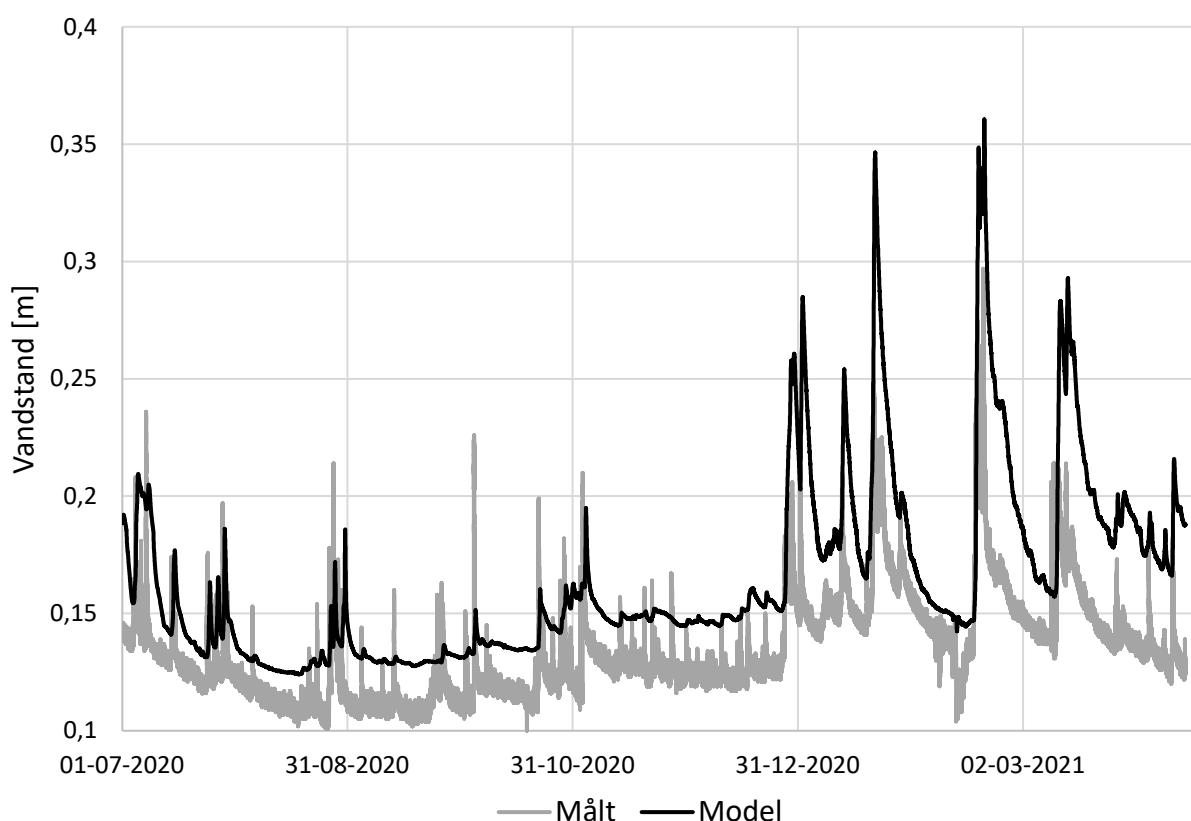
De samme observationer gælder også for sommerperioden med højere modstand i vandløbet som set på Figur 9. Det bemærkes dog, at forsinkelsen af hændelserne her er endnu mere udpræget.

Validering

Valideringen foretages for at sikre at kalibreringen har bidraget til at modellen generelt regner rigtigt, og at den ikke udelukkende fungerer på den periode, for hvilken kalibreringen er udført. I praksis udføres valideringen ved at køre modellen for en tidsperiode uafhængig af kalibreringen og sammenligne resultaterne med måledata fra samme periode. Herudover er modelresultaterne også sammenholdt med flere forskellige Qh-relationer, som er opstillet for Revens Møllebæk.

Valideringen er udført for en tidsperiode umiddelbart efter kalibreringen løbende fra den 1-7-2020 til den 14-4-2021. Optimalt havde valideringen været udført på minimum et helt år og for en periode adskilt fra kalibreringen, men grundet en begrænset mængde måledata er valideringen udført som beskrevet.

Den modellerede samt den målte vandstand i valideringsperioden kan ses på Figur 10.



Figur 10: Målte og modellerede vandstande i Revens Møllebæk station 3124 i perioden 1-7-2020 til 14-4-2021

Valideringen viser mange af de samme trends, som også fremgik af kalibreringen. Vandstanden er generelt overestimeret i situationer med lav vandstand, men underestimeret ved hændelser af kort varighed, som det

især ses i sommerperioden. Som det også blev kommenteret i forbindelse med kalibreringen, tyder resultaterne af valideringen også på, at modellen anvender et for lavt manningstal om foråret, da vandstanden her igen er overestimeret.

Valideringen tyder på, at modellen betydeligt overestimerer vandstanden under længerevarende hændelser som typisk forekommer i vinterperioden. Det fremgår af Tabel 3, hvor det ses at den maksimale modellerede vandstand i valideringsperioden er 6 cm højere end den målte. Forskellen mellem modelleret og målt minimum- samt middelvandstand er den samme som for kalibreringen.

Tabel 3: Karakteristiske værdier for den målte og den modellerede vandstand i Revens Møllebæk i valideringsperioden

	Målt vandstand [m]	Modelleret vandstand [m]
Middel	0,13	0,16
Minimum	0,10	0,12
Maksimum	0,30	0,36

At der er forskel på, hvordan modellen præsterer i forhold til korte og lange hændelser, skyldes med al sandsynlighed, at vandføringsdataene anvendt i modellen stammer fra et vandløb med et større opland. Med et større opland vil korte regnhændelser blive forsinket i en sådan grad i oplandet, at de i meget mindre grad kommer til udtryk i vandstanden i det modtagende vandløb. Modsat kan et vandløb med et lille opland reagere hurtigt og kraftigt på selv meget korte men intense regnhændelser.

I kalibreringen er det forsøgt at kompensere for denne effekt ved at øge modstanden i vandløbet hen over sommerperioden, således at vandstanden reagerer på selv de korte regnhændelser, der er typisk for netop den årstid. Det synes rimeligt at forestille sig, det er resultatet af denne proces, der ender i et kompromis, hvor modellen har tendens til at underestimere vandstanden for hændelser af kort varighed for til gengæld at overestimere vandstanden ved længerevarende hændelser.

I et forsøg på at vurdere konsekvenserne ved at anvende vandføringsdata fra et andet vandløb til modelleringen er der foretaget en sammenligning af modelberegningerne og forskellige Qh-relationer, der er etableret for Revens Møllebæk tæt ved bassinudløbet. Sammenligningen er lavet ved anvende Qh-relationerne til at beregne vandføringen på baggrund af den modelberegnete vandstand og så sammenholde disse med den vandføring, modellen anvender til sin beregning.

Ved variationer mellem den i modellen anvendte vandføring og den der er udregnet med Qh-relationerne, er det et tegn på at vandføringen anvendt i modellen ikke stemmer overens med den faktiske vandføring i Revens Møllebæk. I så tilfælde vil der også kunne sættes spørgsmålstejn ved kalibreringsprocessen, da der her udelukkende er taget hensyn til vandstanden. Reguleres vandstanden til et bestemt niveau på baggrund af en ukorrekt vandføring, vil det medføre, at manningtallet og strømningshastigheden heller ikke stemmer overens med de faktiske forhold. Det kan have konsekvenser for den videre brug af modelresultaterne.

Sammenligningen er foretaget over en periode svarende til valideringsperioden den 1-7-2020 til den 16-4-2021. Den er foretaget ved brug af tre forskellige Qh-relationer. Den første relation stammer fra (Jacobsen, 2021) og er baseret på målinger primært foretaget i vinterhalvåret. Relationen er givet ved:

$$Q = 1,70 \cdot (h - 0,1)^{1,38}$$

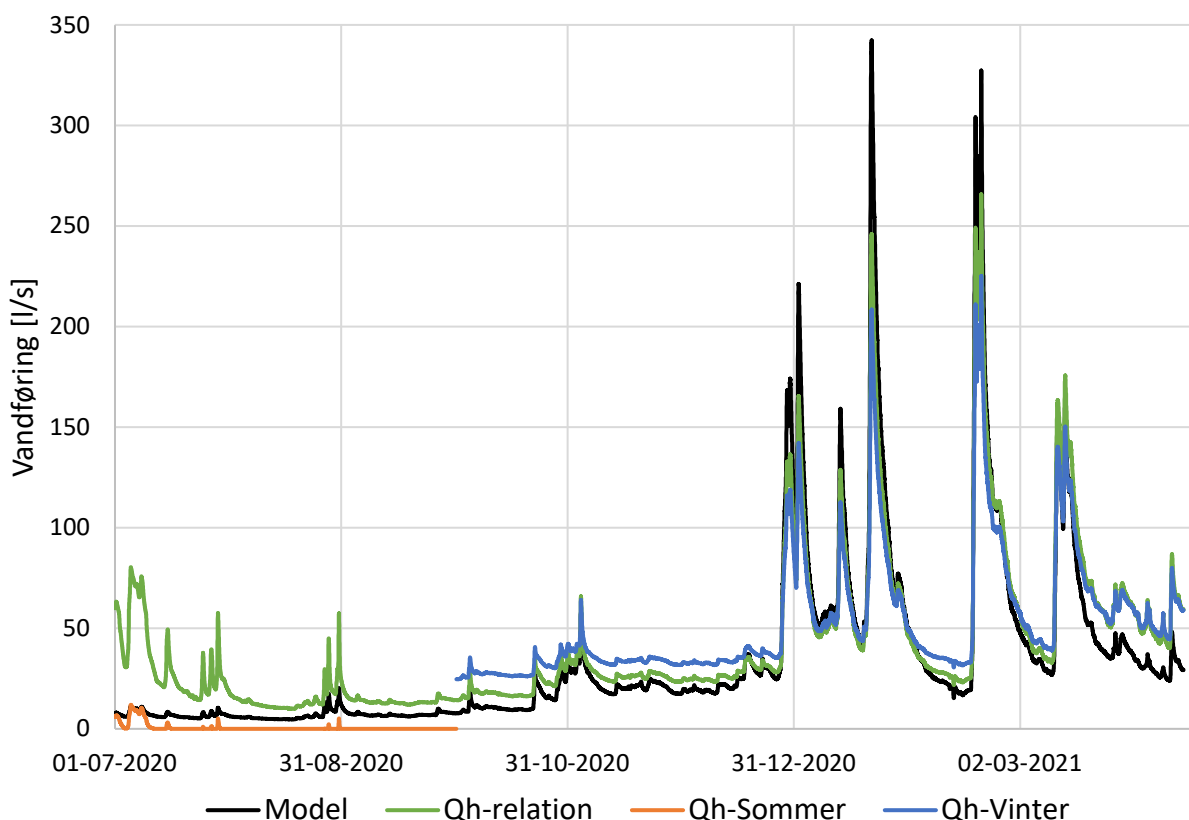
Hvor Q er vandføringen, og h er vandstanden.

De to andre Qh-relationer findes i (Fink & Hørup, 2020) og er delt op i en sommer og en vinter relation, der hver især er udarbejdet på baggrund af målinger foretaget i den respektive periode. Disse relationer er givet ved:

$$Q_{vinter} = 1,550 \cdot (h - 0,05)^{1,65}$$

$$Q_{sommer} = 1,252 \cdot (h - 0,15)^{1,65}$$

Resultaterne kan ses på Figur 11.



Figur 11: Vandføring i Revens Møllebæk station 3124 som anvendt af modellen og beregnet ved brug af forskellige Qh-relationer. Den grønne graf er beregnet med relationen fra (Jacobsen, 2021), og den orange og den blå graf er beregnet med relationerne fra (Fink & Hørup, 2020).

Af Figur 11 er det tydeligt at den generelle Qh-relation for hele året (grøn) primært er udarbejdet med målinger fra vinterperioden. I sommerperioden svinger den nemlig betydeligt kraftigere end både sommerrelationen (orange) og den modellerede vandføring. Det er et tegn på at relationen er fundet ved forhold med lavere modstand i vandløbet, hvor vandstandsændringer er synonym med store ændringer i vandføringen. På den anden side er sommerrelationen udfordret af en så høj værdi for den beregningsmæssige vandløbsbund, 0,15 m, at der i største delen af sommerperioden er for lav vandstand til, at der ifølge relationen overhovedet løber vand i vandløbet. Disse udfordringer gør det svært at konkludere noget entydigt for sommerperioden.

For vinterperioden tegner der sig imidlertid et tydeligt billede. Den modellerede vandføring arbejder i et større interval end begge Qh-relationerne for denne periode. Det kan være en indikator for, at der i modellen er anvendt for højt et manningstal, da det vil give anledning til at vandføringen reagerer kraftigere på ændringer i vandstanden. At manningstallet i vinterperioden måske er for højt i modellen, er der i sig selv ikke noget

mærkeligt ved, men sammenholder vi det faktum med resultaterne af valideringen i forhold til vandstanden, peger det i modsat retning end forventningerne til konsekvenserne af at anvende vandføringsdata fra et større vandløb. Ved en reduktion af modellens manningstal vil der opleves en højere modelleret vandstand, men i og med modellen allerede overestimerer vandstanden ved højvandssituationer i vinterperioden jævnfør Figur 10, tyder det på, at vandføringen i det anvendte datasæt er højere end den faktiske vandføring i Revens Møllebæk. Det er mod forventningen om, at afstrømningen fra det mindre opland til Revens Møllebæk er højere end afstrømningen til Spørring å, hvorfra der er hentet data. En forklaring kan være, at der ikke er foretaget målinger til Qh-relationerne ved ekstrem vandføring, og at de derfor kan være dårlige til at reflektere disse situationer.

Overordnet set er det lykkedes at kalibrere en model, så den er i stand til at simulere peak-situationer i Revens Møllebæk med en nøjagtighed, der kun sjældent overskrider ± 3 cm i forhold til den målte vandstand. Der er en tendens til at modellen underestimerer vandstanden ved hændelser af kort varighed og overestimerer vandstanden ved hændelser af længere varighed. Det betyder at modellen generelt underestimerer vandstanden i sommerperioden og overestimerer den i vinterperioden. Disse tendenser kan sandsynligvis attribueres, at det gennem kalibreringen er søgt at tilpasse modellen, så vandføringsdata fra et større vandløb kan simulere den faktiske vandstand i Revens Møllebæk.

Ved sammenligning med flere Qh-relationer stod det også klart, at kalibrering efter vandstand udelukkende ved at justere manningtallet medfører en risiko for at andre beregningsparametre som strømningshastigheden kan påvirkes u hensigtsmæssigt, når der er usikkerhed i forhold til det anvendte vandføringsdata.

Det bemærkes også at kalibreringen udelukkende er udført i forhold til et enkelt punkt i Revens Møllebæk, og at det er uvist, hvor godt modellen fungerer andre steder i vandløbet. Det er for eksempel nemt at forestille sig, at modstandsforholdene ændrer karakter længere nedstrøms i vandløbet, hvor det løber meget mere overfladenært og mindre kanaliseret.

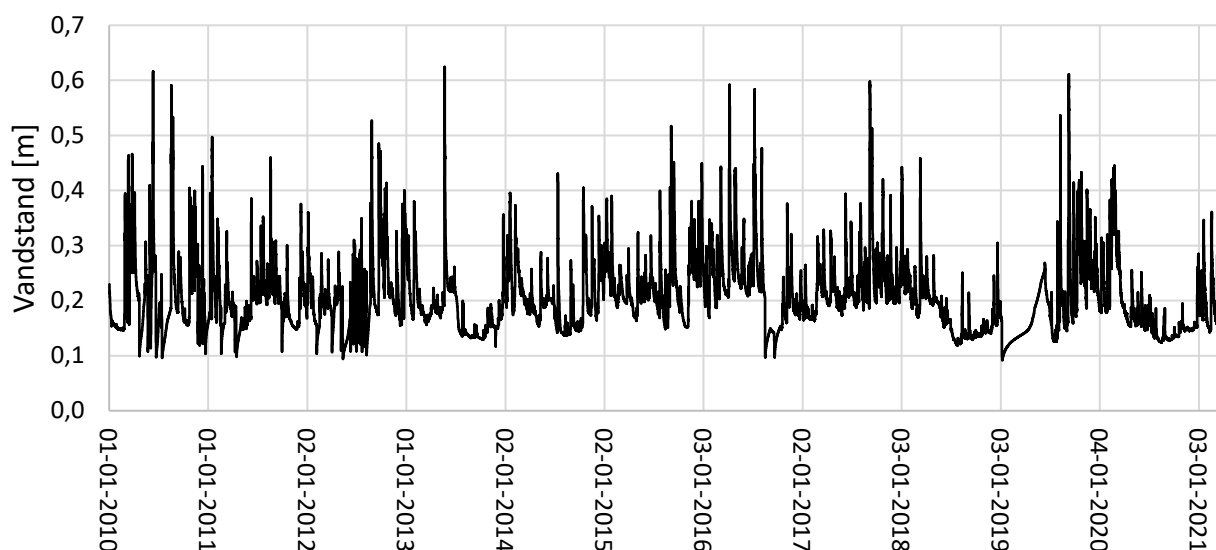
6. Langtidssimulering og vandløbets naturlige variation

Der kan være stor forskel på, hvor stor en hydraulisk belastning der er på et vandløb fra år til år og årstiderne imellem. For at kunne vurdere effekten af en given udledning til vandløbet er det derfor nødvendigt først at skabe et overblik over de variationer, der helt naturligt vil forekomme i vandløbet.

I dette afsnit undersøges hvordan vandstanden, sedimenttransporten og stream power indekset varierer i Revens Møllebæk over en 10 år lang periode fra den 1-1-2010 til den 14-4-2021. Undersøgelsen er foretaget for station 3124, som er det punkt, modellen er kalibreret efter.

Vandstanden i Revens Møllebæk

Vandstanden er fundet som direkte output fra modellen i hele simuleringsperioden. Resultaterne er vist på Figur 12.



Figur 12: Modelleret vandstand i Revens Møllebæk station 3124 i perioden 1-1-2010 til 14-4-2021.

Af Figur 12 ses det at vandstanden i Revens Møllebæk over simuleringsperioden bevæger sig i et stort spænd mellem 9 og 62 cm. En anden væsentlig opdagelse er, at vandstanden generelt når de højeste værdier i sommerperioden, hvilket er noget atypisk, da vandføringen i vandløbet er betydeligt større om vinteren. I Tabel 4 vises de karakteristiske værdier for vandstanden i Revens Møllebæk, og her fremgår det også, at både det absolutte maksimum såvel som median maksimum er ens, uanset om det beregnes for hele året eller kun sommerperioden. Det bekræfter betragtningen om, at de højeste vandstande forekommer om sommeren.

Det skal dog bemærkes, at vandstanden i den periode, som er anvendt til kalibrering og validering af modellen, maksimalt når omkring 45 cm, hvilket er i den lave ende i forhold til de maksimumsværdier, der generelt ses for de andre år. Ligeledes er vandstanden om sommeren i kalibrerings- og valideringsperioden lav sammenlignet med andre år. Det kan tyde på, at modellen er kalibreret efter en særligt tør periode, hvilket kan have konsekvenser modellens evne til præcist at simulere vådere år. Under kalibreringen fandtes de bedste resultater ved at lade manningtallet variere mellem 4 og 35. Det er et meget stor spænd, og resultaterne af langtidssimuleringen peger også i retning af, det muligvis burde være mere snævert, hvilket ville resultere i højere vandstande om vinteren og lavere om sommeren, som det typisk forekommer i andre vandløb. Efter- som der ikke findes måledata til at sammenligne med resultaterne for de tidligere år, er det dog svært at

vurdere, om der reelt set er hold i spekulationerne, eller om Revens Møllebæk er et særtilfælde, hvor modstandsforholdene giver anledning til, at de højeste vandstande opstår om sommeren.

Antages det at modellen passer på hele simuleringsperioden med de samme tendenser, som kom til udtryk under valideringen, må det forventes at de høje sommervandstande rent faktisk er underestimeret, og at vandstanden om vinteren er overestimeret.

Tabel 4: Karakteristiske værdier for vandstanden i Revens Møllebæk station 3124 og deres relative afvigelse fra middelvandstanden. Værdierne er beregnet på baggrund af den modellerede vandstand i perioden 1-1-2010 til 1-1-2021.

	Vandstand [m]	Relativ afvigelse fra middelvandstand [%]
Middel	0,20	-
Maksimum	0,62	206,28
Median maksimum	0,53	158,63
Sommer maksimum	0,62	206,28
Sommer median maksimum	0,53	158,63

Den relative afvigelse fra middelvandstanden angivet i Tabel 4 udtrykker, i hvor stort et omfang vandstanden påvirkes af naturligt forekommende variationer i vandføring.

Sedimenttransporten i Revens Møllebæk

Sedimenttransporten er beregnet på baggrund af resultater fra langtidssimuleringen og feltundersøgelser af bundsedimentet i Revens Møllebæk. Der er anvendt Meyer-Peter & Müllers formel for bundtransport, som bygger på Shields parameter og er givet ved:

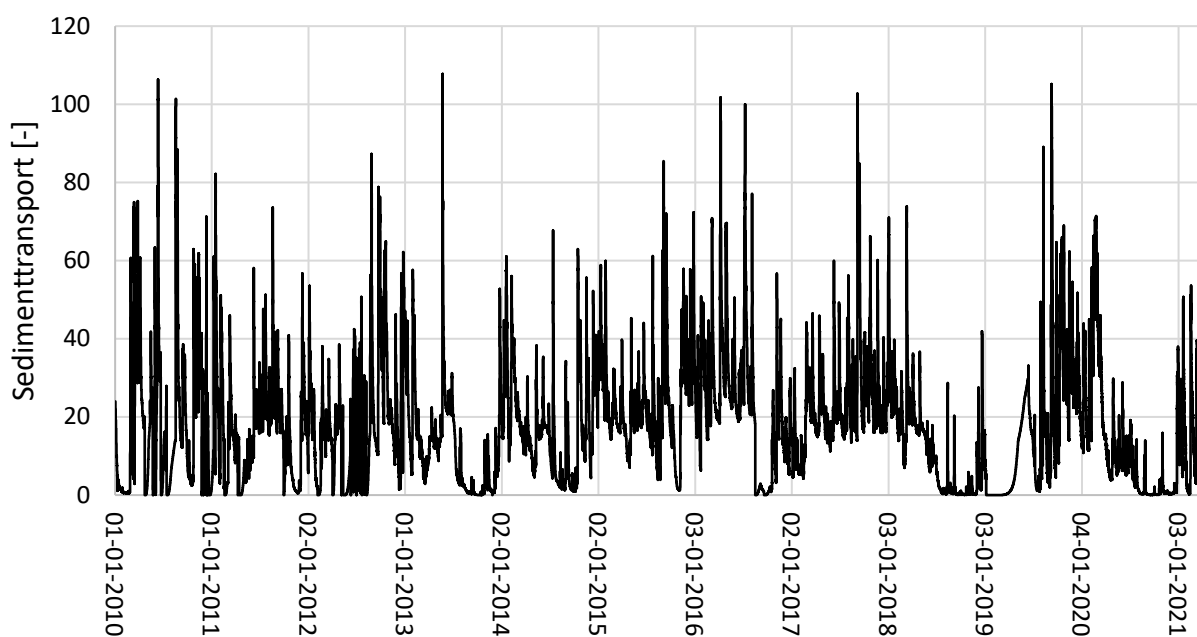
$$\phi = 8(\theta - \theta_c)^{1,5}$$

Hvor ϕ er den dimensionsløse sedimenttransport, θ er Shields parameter, og θ_c er det kritiske Shields parameter antaget til en værdi på 0,045. Shields parameter er i høj grad afhængig af bundforskydningsspændingen og betegnes også som den dimensionsløse forskydningsspænding. Shields parameter er givet ved:

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_k - \rho_w)gd}$$

Hvor τ er bundforskydningsspændingen, der findes som output fra langtidssimuleringen, ρ_k er densiteten af kornene antaget til en værdi på 2650 kg/m³, ρ_w er densiteten af vandet antaget til en værdi på 1000 kg/m³, g er tyngdeaccelerationen antaget til en værdi på 9,82 m/s², og d er korndiameteren antaget til 0,26 mm. Den anvendte korndiameter svarer til d_{50} i en sedimentprøve udtaget på bunden af Revens Møllebæk nogle meter nedstrøms bassinudledningen.

Sedimenttransporten for hele simuleringsperioden er vist på Figur 13.



Figur 13: Modelleret sedimenttransport i Revens Møllebæk station 3124 i perioden 1-1-2010 til 14-4-2021.

Af Figur 13 og Tabel 5 fremgår det at den dimensionsløse sedimenttransport bevæger sig i et interval mellem 0 og 108. Transporten følger stort set samme udvikling som vandstanden, hvilket skyldes, at den valgte transportformel er bygget op omkring Shields parameter og derigennem bundforskydningsspændingen, som primært er afhængig af vandstanden. Det betyder også, at det på trods af en generelt lavere vandføring om sommeren alligevel er her, der observeres de største værdier af sedimenttransporten.

Ser man bort fra grøde i vandløbet, og forestiller sig et scenarie, hvor al modstanden i vandløbet opstår som følge af variationer på vandløbsbunden og i vandløbsprofilet samt vandløbets forløb, synes det fornuftigt, at hele forskydningsspændingen afsættes i bundsedimentet og derved giver anledning til sedimenttransport. I Revens Møllebæk og for den vandløbsmodel der er sat i forbindelse med projektet, er det dog ikke tilfældet. Her skyldes sæsonforskellen på modstanden i vandløbet næsten, hvis ikke helt, udelukkende en øget grødevækst. Det virker derfor også som en logisk slutning, at den høje bundforskydningsspænding i sommerperioden, der opstår som følge af større modstand og derved øget vandstand, i et eller andet omfang afsættes i grøden, der vokser i vandløbet og ikke i bundsedimentet. Den beregnede sedimenttransport er altså forbundet med nogen usikkerhed især for sommerperioden.

Tabel 5: Karakteristiske værdier for sedimenttransporten i Revens Møllebæk station 3124 og deres relative afvigelse fra middeltransporten. Værdierne er beregnet på baggrund af den modellerede sedimenttransport i perioden 1-1-2010 til 1-1-2021

	Sedimenttransport [-]	Relativ afvigelse fra middeltransport [%]
Middel	17,30	-
Maksimum	107,76	522,85
Median maksimum	87,29	404,55
Sommer maksimum	107,76	522,85
Sommer median maksimum	87,29	404,55

I og med at sedimenttransporten er forbundet med en tærskelværdi i det kritiske Shields parameter, som skal overstiges, inden der opstår transport, ses det også i Tabel 5, at den relative afvigelse fra middeltransporten er betydeligt større for alle scenarier, end det var tilfældet med vandstanden.

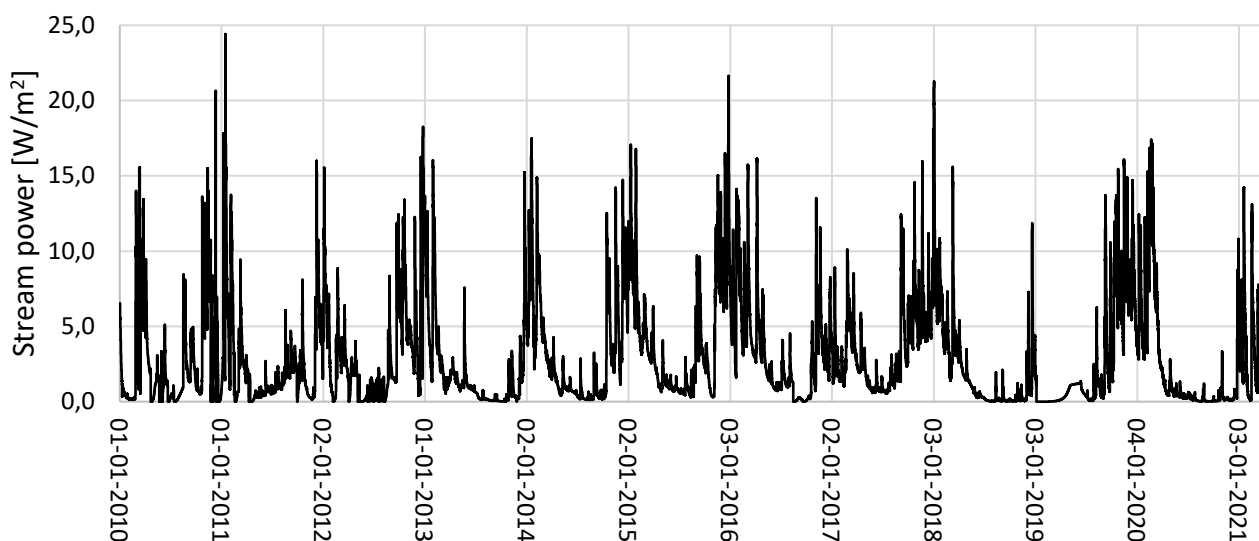
Stream power i Revens Møllebæk

Stream power blev defineret af R. A. Bagnold i (Bagnold, 1960) som et udtryk for den energi et vandløb udøver på dets bund og sider. Andrew Brookes har siden hen fundet, at vandløb generelt set begynder at erodere og mæandere, hvis de udsættes for en specifik stream power på 35 W/m^2 , hvorfor denne værdi populært har været anvendt som grænseværdi i robusthedsanalyser.

Hvor den transportformel, der er anvendt til at bestemme sedimenttransporten, udelukkende afhænger af bundforskydningsspændingen, inddrages vandløbets strømningshastighed også i beregningen af stream power. Den specifikke stream power beregnes efter følgende formel:

$$\omega = \tau V$$

Hvor ω er den specifikke stream power, τ er bundforskydningsspændingen, og V er vandløbets strømningshastighed. Til beregning findes både bundforskydningsspændingen og strømningshastigheden som resultater fra langtidssimuleringen. Resultaterne kan ses på Figur 14.



Figur 14: Modelleret stream power i Revens Møllebæk station 3124 i perioden 1-1-2010 til 14-4-2021.

Modsat den beregnede sedimenttransport findes de højeste værdier af stream power i vinterperioden. Det svarer i højere grad til forventningerne og skyldes i høj grad, at den resulterende stream power i meget høj grad følger vandføringen. Når vandstanden om sommeren stiger som følge af større modstand i vandløbet, hvilket giver anledning til en større forskydningsspænding, betyder det til gengæld at strømningshastigheden falder markant.

Af Figur 14 og Tabel 6 fremgår det, at stream power i Revens Møllebæk varierer mellem 0 og 24. Det er væsentligt under den etablerede grænseværdi på 35 W/m^2 selv ved det absolutte maksimum, hvilket indikerer, at vandløbet umiddelbart ikke er påvirket af nogen særlig erosions risiko. I hvert fald ikke i det analyse-rede punkt lige nedstrøms bassinudledningen.

Middel værdien for stream power er meget lav på ca. 3 W/m². Der er også en væsentlig forskel på median maksimum og sommer median maksimum, hvor den relative afvigelse er omkring tre gange større for median maksimum. Det kan tyde på flere ting. Først og fremmest peger det på, at stream poweren i høj grad påvirkes af højere vandføring, hvorfor størrelsen af bassinudledningen potentielt kan få stor indflydelse. Samtidig indikerer det også, at en højere vandstand som følge af øget modstand betyder mindre for den resulterende stream power, end den tilsvarende reducerede strømningshastighed gør. Det betyder at øget modstand i vandløbet resulterer i en lavere stream power, hvilket står i kontrast til den beregnede sedimenttransport, hvor det modsatte var tilfældet.

Tabel 6: Karakteristiske værdier for stream power i Revens Møllebæk station 3124 og deres relative afvigelse fra middel stream power. Værdierne er beregnet på baggrund af den modellerede stream power i perioden 1-1-2010 til 1-1-2021

	Stream power [-]	Relativ afvigelse fra middel stream power [%]
Middel	2,79	-
Maksimum	24,41	775,52
Median maksimum	17,48	527,01
Sommer maksimum	13,71	391,61
Sommer median maksimum	7,56	171,12

Vurdering af resultaterne fra langtidssimuleringen

Langtidssimuleringen skabte opmærksomhed på nogle potentielle problemer med vandløbsmodellen, som ikke kom til udtryk under kalibreringen og valideringen. Det blev tydeligt at kalibreringen er foretaget på baggrund af et tørt år, hvilket sandsynligvis påvirker modellens evne til præcist at simulere de hydrodynamiske forhold i år med mere vand. Den umiddelbare konsekvens er, at modellen simulerer meget høje vandstande i somre med mere vand som følge af et lavt manningtal i denne periode. Høj vandstand giver høj bundforskydningsspænding, hvilket betyder, at den beregnede sedimenttransport også bliver meget høj om sommeren. Grundet et begrænset datagrundlag er det dog svært at estimere indflydelsen af denne potentielle fejlkilde.

Resultaterne lægger også op til en diskussion af den valgte sedimenttransportformel. Det virker ulogisk, at en forhøjet vandstand forårsaget af højere modstand som følge af grødevækst skulle give anledning til en større sedimenttransport. Til gengæld reflekterer den beregnede stream power i højere grad forventningerne. Det giver anledning til at tro at en sedimenttransportformel, der bygger på stream power, muligvis ville give bedre resultater. Dog er det svært at skelne, i hvor høj grad de atypiske resultater for sedimenttransporten skyldes valget af transportformel, eller om det nærmere er en konsekvens af en dårligt kalibreret model. En måde til at finde ud af det, om end en smule omfattende, ville være at måle sedimenttransporten over de forskellige årstider for at danne et billede af, hvordan den påvirkes af forskellige grødevækst.

7. Bassinudledningens effekt på Revens Møllebæk

Efter at have etableret en reference i forhold til de naturlige variationer, der forekommer i Revens Møllebæk, kan bassinudledningens effekt på vandløbet analyseres. I dette afsnit testes en stadig stigende udledning fra bassinet i station 3118 i tre forskellige scenarier. Den primære vurdering bygges på resultater fra umiddelbart nedstrøms bassinudledningen, da det er dette punkt modellen er kalibreret efter, og her hvor der er resultater fra langtidssimuleringen at sammenligne med. Der er udført supplerende beregninger for et enkelt punkt lige opstrøms udledningen og to punkter længere nedstrøms, i et forsøg på at tegne et mere komplet billede af udledningens effekt på Revens Møllebæk. Effekten bliver ligesom med lagtidssimuleringen vurderet på tre parametre. Vandstand, beregnet sedimenttransport og stream power.

Definition af beregningsscenarier

Et vigtigt skridt i vurderingen af udledningens effekt er at udvælge nogle beregningsscenarier, der bedst muligt reflekterer de situationer i vandløbet, hvor udledningen forventes at være mest kritisk for sedimenttransporten i vandløbet. Resultaterne fra langtidssimulering giver en klar forventning om, at bassinudledningen er mest kritisk i forhold til den beregnede sedimenttransport i situationer, hvor der er høj vandstand i vandløbet. I forhold til stream power viste langtidssimuleringen, at det var tidspunkter med høj vandføring, der gav anledning til de højeste værdier. For at tage højde for begge disse situationer, er der valgt tre scenarier til analysen (Tabel 7).

Det første scenarie der analyseres, er en median maksimum afstrømning svarende til en vandføring på 585 l/s ved bassinudløbet kombineret med et manningtal på 4, som er den højeste modstand, der optræder i modellen midt sommer. Dette scenarie er opstillet med henblik på at simulere det værste tilfælde, der kunne forestilles at forekomme i vandløbet i forhold til den beregnede sedimenttransport. Det er dog stadig usandsynligt, at der opstår en situation, hvor så stor en vandføring forekommer i vandløbet, samtidig med at modstanden er så stor.

I det næste scenarie er der anvendt en sommer median maksimum afstrømning svarende til en vandføring på 334 l/s ved bassinudløbet. Manningtallet er fastholdt på 4. Dette scenarie er opstillet for at teste den beregnede sedimenttransport i en situation, som der realistisk set vil optræde med få års mellemrum.

Det sidste scenarie søger at presse vandløbet i forhold til stream power. Her er igen anvendt median maksimum afstrømning, men i dette scenarie er den kombineret med et manningtal på 35, hvilket er den laveste modstand der optræder i vandløbet. Det vil resultere i en forholdsvis høj vandstand og de højeste strømningshastigheder vandløbet oplever. Begge dele påvirker stream power beregningen i retning af højere værdier. Dette scenarie forventes også at optræde med få års mellemrum.

Tabel 7: Karakteristika for de tre beregningsscenarier anvendt i analysen af bassinudledningens effekt på Revens Møllebæk.

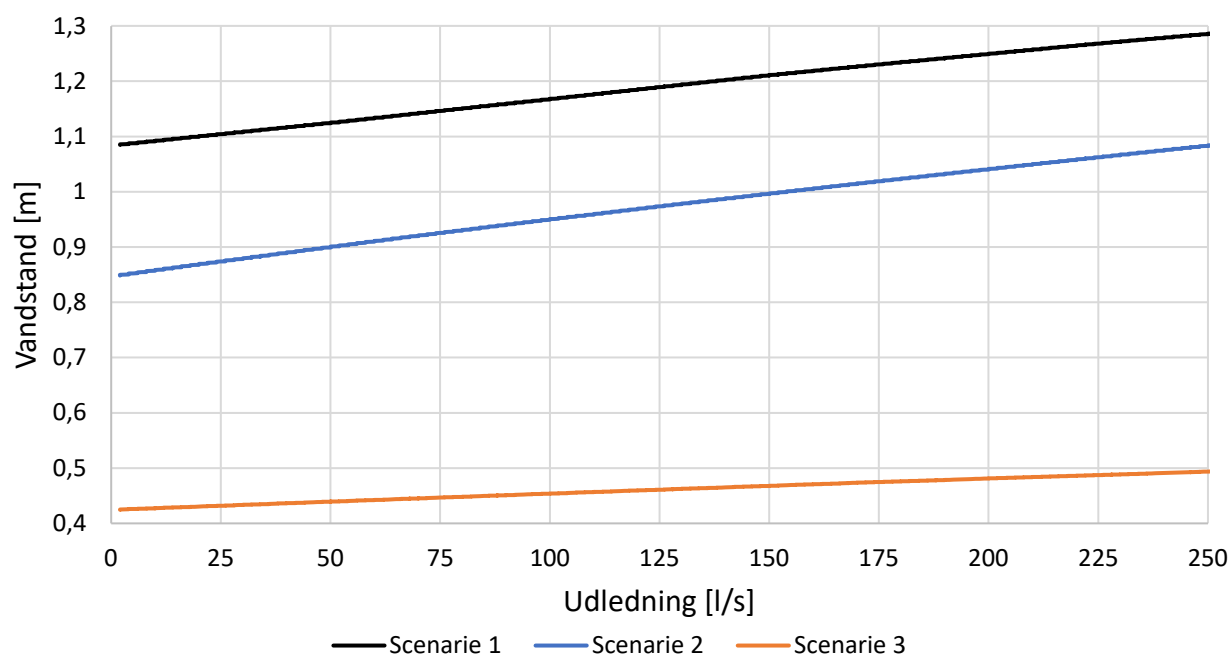
Scenarie	Vandføring ved bassinudløb [l/s]	Manningtal [m ^{1/3} /s]
1	585	4
2	334	4
3	585	35

Vandløbsmodellen er kørt som en stationær model for alle tre scenarier med den undtagelse, at der i station 3118 er indsat en punktkilde, der fungerer som bassinudløb. Denne punktkilde leder gradvis mere og mere vand ud startende fra ingen udledning og op til en udledning på 250 l/s. Udledningen øges trinvis med 2 l/s for hvert trin, hvor der gives nok tid til at modellen stabiliseres og bliver stationær mellem hvert trin.

Bassinudledningens effekt på vandstanden

Udledningens effekt på vandstanden i station 3124 er vist på Figur 15, hvor det som forventet er scenarie 1, der giver anledning til den højeste vandstand. Det bliver helt tydeligt, hvor stor en indflydelse modstanden i vandløbet har på vandstanden. Selv i scenarie 2, hvor vandføring kun er godt og vel halvt så stor som i scenarie 3, er udgangspunktet allerede uden nogen udledning en vandstand, der er ca. dobbelt så høj som i scenarie 3. Det tyder også på, at både scenarie 1 og 2 ligger noget over, den belastning vandløbet naturligt udsættes for, i og med at start vandstanden selv i scenarie 2 er mere end 20cm højere end den højeste vandstand der opstod i forbindelse med langtidssimuleringen. Det er tegn på, at alle højvandshændelserne i sommerhalvåret generelt finder sted i enten efteråret eller foråret, hvor modstanden ikke er på sit højeste.

Scenarie 1 og 2 løber stort set parallelt, hvilket er meget godt i tråd med, at den eneste forskel på de to scenarier er en højere start vandføring i scenarie 1. I scenarie 3, hvor modstanden er meget lavere, stiger vandstanden som forventet meget langsommere, end det er tilfældet i de to andre scenarier.



Figur 15: Vandstandens udvikling i station 3124 i de tre beregningsscenarier for en stigende udledning fra bassinet.

I Tabel 8 er vandstanden angivet for forskellige størrelser af udledningen, sammen med udledningens relative betydning for vandstanden. Der findes værdier både for station 3124 umiddelbart nedstrøms udledningen (fed), et punkt et kort stykke opstrøms udledningen og to punkter længere nedstrøms, hvor vandløbet løber ind i skoven og i antager en mere overfladenær skikkelse. Udledningen på 18 l/s er vist, da det er tilsvarende den eksisterende udledningstilladelse.

Tabel 8: Vandstand beregnet i de tre scenarier ved forskellig bassinudledning i fire forskellige stationer ned gennem Revens Møllebæk.

		Udledning [l/s]								
		0	18	50	100	250	18	50	100	250
	Scenarie	Vandstand [m]					Relativ afvigelse fra scenarie uden udledning [%]			
Station 3124	1	1,08	1,10	1,12	1,17	1,29	1,22	3,63	7,59	18,48
	2	0,85	0,87	0,90	0,95	1,08	2,07	6,04	11,90	27,67
	3	0,43	0,43	0,44	0,45	0,49	1,12	3,37	6,79	16,16
Station 3023	1	1,15	1,15	1,15	1,16	1,17	0,14	0,40	0,83	2,20
	2	0,87	0,87	0,88	0,88	0,90	0,19	0,55	1,11	3,05
	3	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,07	0,20	0,43	1,16
Station 3662	1	0,88	0,89	0,90	0,92	0,98	0,76	2,25	4,56	10,77
	2	0,69	0,70	0,73	0,78	0,87	2,06	5,95	13,40	27,47
	3	0,27	0,27	0,28	0,29	0,33	1,48	4,39	8,87	21,78
Station 4106	1	0,73	0,73	0,74	0,76	0,80	0,70	2,18	4,50	10,61
	2	0,62	0,63	0,65	0,67	0,72	1,49	4,41	7,71	16,25
	3	0,27	0,27	0,28	0,29	0,31	1,29	3,76	7,52	18,12

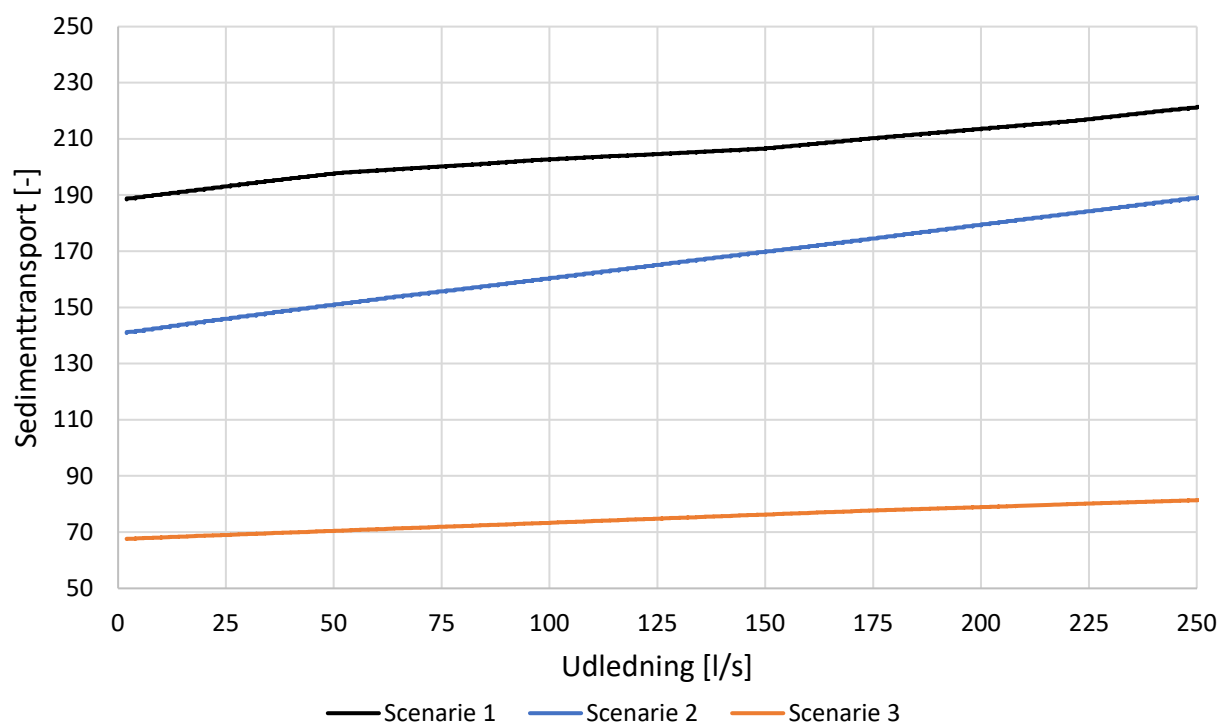
Af resultaterne i Tabel 8 fremgår det, at udledningen relativt set har størst indflydelse i scenarie 2 hvor modstanden er høj, men vandføringen er lavere, hvilket betyder, at udledningen kommer til at udgøre en større del af den samlede vandføring, og derved også har større relativ indflydelse på vandstanden. I de to punkter længere nedstrøms optræder der en større relativ afvigelse i scenarie 3 end ellers. I disse punkter er udgangspunktet for vandstanden dog også meget lavt og i begge tilfælde mindre end halv så højt som for scenarie 2. Det betyder, at den relative tilvækst i vandstanden meget hurtigt bliver større selv med små stigninger i vandstanden.

Vandstanden i station 3023 opstrøms udledningen oplever kun meget små ændringer i vandstanden. Det sker som følge af en tilbagestuvning, når vandløbet nedstrøms belastes hårdere.

Generelt for alle scenarier ses det, at vandstanden påvirkes mest oppe omkring udløbet. Det skyldes sandsynligvis, at vandløbet på denne strækning er smallere og dybere skåret, hvorfor en større vandføring nødvendigvis må give højere vandstand, end i et bredere profil, som det er tilfældet længere nedstrøms.

Bassinudledningens effekt på den beregnede sedimenttransport

Som tidligere beskrevet hænger den beregnede sedimenttransport i meget høj grad sammen med vandstanden i vandløbet. Det forventes derfor at transporten nogenlunde følger de samme trends, som gjorde sig gældende for vandstanden. Af Figur 16 kan det ses, at det også er tilfældet langt henad vejen.



Figur 16: Den beregnede sedimenttransports udvikling i station 3124 i de tre beregningsscenarier for en stigende udledning fra bassinet.

Mange af de observationer, der blev gjort i forhold til vandstanden, går igen. Scenarie 1 giver den højeste beregnede sedimenttransport med scenarie 2 relativt tæt efter sig. Betydeligt lavere findes scenarie 3, som også stiger væsentligt mindre end de to andre scenarier i takt med, at udledningen stiger. Dog bemærkes det, at udviklingen af den beregnede sedimenttransport er langt mindre lineær.

Tabel 9: Beregnet sedimenttransport i de tre scenarier ved forskellig bassinudledning i fire forskellige stationer ned gennem Revens Møllebæk.

		Udledning [l/s]									
		0	18	50	100	250	18	50	100	250	
	Scenarie	Beregnet sedimenttransport [-]					Relativ afvigelse fra scenarie uden udledning [%]				
Station 3124	1	188,49	191,59	197,49	202,60	221,10	1,64	4,78	7,49	17,30	
	2	140,93	144,32	150,75	160,19	188,89	2,41	6,97	13,67	34,03	
	3	67,59	68,58	70,44	73,32	81,39	1,46	4,21	8,47	20,42	
Station 3023	1	270,20	268,13	264,18	257,94	239,29	-0,77	-2,23	-4,54	-11,44	
	2	208,47	206,51	202,85	197,37	179,64	-0,94	-2,70	-5,33	-13,83	
	3	70,85	70,62	70,15	69,40	67,05	-0,32	-0,98	-2,05	-5,35	
Station 3662	1	228,08	232,11	240,11	250,99	287,32	1,77	5,28	10,04	25,97	
	2	197,34	201,93	211,23	209,53	223,40	2,33	7,04	6,18	13,21	
	3	83,50	84,97	87,65	91,71	103,10	1,76	4,97	9,83	23,47	
Station 4106	1	221,95	226,96	235,30	247,38	291,18	2,26	6,02	11,46	31,20	
	2	147,85	150,22	154,99	169,20	214,52	1,60	4,83	14,44	45,09	
	3	83,51	85,00	87,77	92,03	104,46	1,78	5,09	10,20	25,09	

Af Tabel 8 bekræftes det også, at det ligesom for vandstanden er scenarie 2 med den lavere vandføring, hvor den største relative vækst i den beregnede sedimenttransport finder sted. En undtagelse er scenarie 2 ved station 3662, hvor udviklingen opfører sig meget atypisk. Her aftager transporten ligefrem fra en udledning på 50 l/s til 100 l/s. Det synes ukorrekt, og der kan mistænkes en regne fejl. Alternativt kan udviklingen skyldes en pludselig ændring i vandløbets tværprofil i dette punkt, efterhånden som vandstanden stiger, men det ville forventes at være reflekteret i resultaterne for vandstanden også.

En væsentlig detalje er, at tilvæksten i den beregnede sedimenttransport er større, end det var tilfældet for vandstanden. Helt fra en udledning på 18 l/s er tilvæksten helt generelt en anelse højere for den beregnede sedimenttransport, men efterhånden som udledningen bliver større, bliver forskellen på den relative tilvækst mellem vandstand og transport større. Det gælder især for de to punkter længere nedstrøms i vandløbet, hvilket formodes at skyldes en større energilinje gradient på den strækning. Det stemmer meget godt overens med resultaterne fra langtidssimuleringen, at den beregnede sedimenttransport reagerer kraftigere på en stigende vandføring, end vandstanden gør.

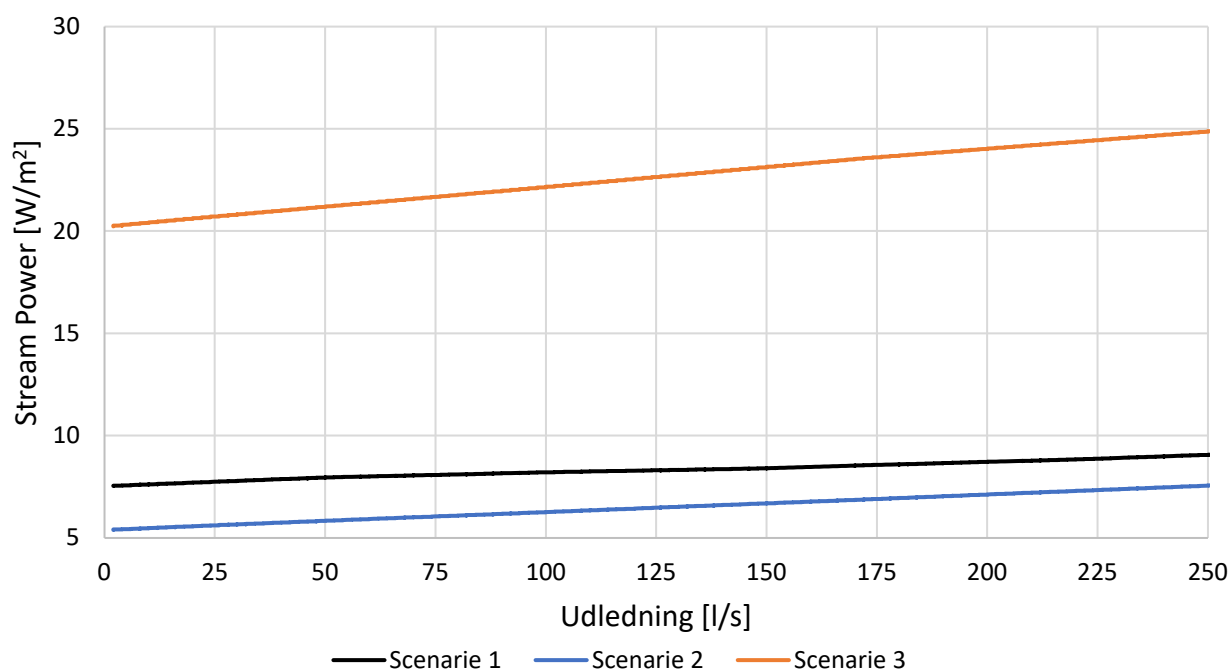
Det bemærkes, at den beregnede sedimenttransport falder i punktet opstrøms udledningen, efterhånden som udledningen vokser. Det sker i takt med at vandstanden stiger nedstrøms, og at energilinjegradienten dermed bliver mindre, hvilket resulterer i en lavere bundforskydningsspænding og dermed lavere sedimenttransport til følge.

Bassinudledningens effekt på vandløbets stream power

I forbindelse med langtidssimuleringen fandtes det, at stream poweren var meget stærkt korreleret til vandføringen, og at øget modstand i vandløbet i modsætning til den beregnede sedimenttransport reducerer stream poweren. Med dette i mente er der en klar forventning om, at scenarie 3 er det scenarie, hvor den største stream power optræder. Dette bekræftes af resultaterne vist på Figur 17 og i Tabel 10.

I kontrast til både vandstanden og den beregnede sedimenttransport, falder resultaterne af alle tre scenarier inden for de maksimumværdier for stream poweren, der blev fundet ved langtidssimuleringen. Det skyldes formentlig, at scenarie 1 og 2, som giver høj vandstand og beregnet sedimenttransport, forudsætter, at der forekommer en statistisk meget usandsynlig afstrømningshændelse midt om sommeren, hvor modstanden er højest. Det er mere sandsynligt at en sådan afstrømningshændelse rammer midt vinter hvor modstanden er lavest.

En ting, som resultaterne af stream power beregningerne har til fælles med vandstand og beregnet sedimenttransport, er at også stream poweren ser den største relative tilvækst i scenarie 2, hvor vandføringen er lavere end i de andre to scenarier.



Figur 17: Stream powerens udvikling i station 3124 i de tre beregningsscenarier for en stigende udledning fra bassinet.

Den relative tilvækst i stream power for de forskellige scenarier og lokationer i vandløbet er overraskende nok meget lig den relative tilvækst, der forekom for den beregnede stream power. Det er på trods af, at de to parametre ud fra en absolut betragtning er helt modsat. Dog er der en lille tendens til at stream poweren reagerer en anelse kraftigere på den stigende udledning.

Ligesom for den beregnede sedimenttransport er der et udfald for scenarie 2 ved station 2662, hvor stream poweren udvikler sig meget atypisk.

Tabel 10: Stream power i de tre scenarier ved forskellig bassinudledning i fire forskellige stationer ned gennem Revens Møllebæk.

		Udledning [l/s]								
		0	18	50	100	250	18	50	100	250
	Scenarie	Stream power [W/m²]					Relativ afvigelse fra scenarie uden udledning [%]			
Station 3124	1	7,54	7,68	7,95	8,20	9,05	1,85	5,40	8,81	20,09
	2	5,40	5,55	5,83	6,26	7,55	2,74	7,99	15,88	39,86
	3	20,24	20,56	21,18	22,14	24,86	1,61	4,66	9,41	22,82
Station 3023	1	10,67	10,59	10,44	10,20	9,48	-0,74	-2,17	-4,42	-11,17
	2	8,03	7,95	7,82	7,61	6,94	-0,93	-2,64	-5,22	-13,55
	3	21,55	21,49	21,35	21,13	20,45	-0,31	-0,94	-1,95	-5,11
Station 3662	1	8,47	8,63	8,96	9,42	10,93	1,96	5,86	11,25	29,07
	2	7,37	7,55	7,91	7,77	8,27	2,41	7,30	5,41	12,18
	3	24,96	25,45	26,35	27,71	31,59	1,95	5,54	10,99	26,54
Station 4106	1	8,15	8,35	8,70	9,22	11,05	2,50	6,79	13,12	35,59
	2	5,18	5,27	5,46	6,01	7,84	1,74	5,23	16,02	51,23
	3	24,49	24,97	25,86	27,24	31,30	1,95	5,60	11,24	27,81

Samlet vurdering af udledningens effekt på Revens Møllebæk

Scenarie 1 og 2, der var inkluderet med henblik at undersøge Revens Møllebæk i situationer med høj vandstand og høj beregnet sedimenttransport, gav begge anledning til værdier af disse to parametre, som lå uden for det naturlige spænd defineret af langtidssimuleringen allerede inden, der blev koblet en udledning på. Det gør det svært at foretage en egentlig vurdering af de absolutte værdier. Til gengæld fandtes det i resultaterne fra scenarie 3, at der, ved de værste mulige modstandsforhold i relation til at begrænse stream poweren, skulle en udledning på op i mod 250 l/s til for at matche den maksimale stream power, der blev fundet under langtidssimuleringen. Det tyder på, at de naturlige peaksituationer der opstår i vandløbet er så kraftige, at selv en meget stor udledning i kombination med en median maksimum afstrømning ikke giver anledning til yderligere erosionsfare i vandløbet. Her er det dog vigtigt at bemærke, at der ved afstrømningshændelser større end median maksimum med al sandsynlighed også vil være vand i bassinet, som skal ledes ud. I det perspektiv giver det mening at undersøge den relative tilvækst af henholdsvis beregnet sedimenttransport og stream power under forskellige udledninger.

Ud fra en betragtning af den relative tilvækst havde den beregnede sedimenttransport og stream poweren nærmest identiske tendenser. Ved en udledning svarende til den nuværende tilladelse på 18 l/s var tilvæksten for begge parametre i alle tre scenarier og i alle punkter med undtagelse af punktet opstrøms udledningen i omegnen af 1,5-2,5 %. Skrues udledningen op til 50 l/s, stiger dette interval til ca. 4,5-8 %, og øges udledningen yderligere op til 100 l/s, optræder værdier over 15%, og der opstår større spredning scenarierne og stationerne imellem.

En anden observation var, at der i scenarie 2, hvor der blev anvendt en lavere vandføring end i de andre to scenarier, generelt set var en højere relativ tilvækst i både den beregnede sedimenttransport og stream power. Det giver meget god mening i og med, at en given udledning nødvendigvis udgør en større andel af det samlede flow ved en lavere vandføring.

8. Konklusion

Det er lykkedes at anvende den beregnede sedimenttransport og stream power til at identificere en række trends i de forskellige beregningsscenarier. Disse trends kan være med til at danne et stærkt grundlag for vandløbsmyndigheden i forhold til at træffe en beslutning angående en udledningstilladelse. Dog er de forskellige beregninger og modelresultater helt fra bunden udfordret af flere fejlkilder og usikkerheder, som forhindrer en absolut vurdering af, hvilken udledning der kan forsvares.

Der er en generel betragtning, som besværliggør hele vurderingen af, hvilken udledningstilladelse der kan anbefales. Når der regnes på scenarier, vil udledningen altid komme oveni en eksisterende hændelse og på den måde bidrage med ekstra vand i systemet. Det giver i sidste ende anledning til højere sedimenttransport og, per den definition dette projekt arbejder efter, dårligere økologisk tilstand. Tolkes lovgivningen som om, der ingen ting må gøres, der kan have negativ effekt på den økologiske tilstand, er det svært at argumentere for at tillade en udledning større end den naturlige afstrømning. I hvert fald uden at spekulere i en mere dynamisk styring af udledningen, hvor det er muligt helt at lukke for udledningen ved maksimum hændelser i vandløbet.

Løsningen med at foretage en relativ vurdering af udledningens effekt synes at have noget potentiale. På trods af at den ikke er fri af problemet med, at en udledning i kombination med en maksimumhændelse altid vil skabe højere transport, giver det en mulighed for at gøre forskel på vandløb med en sårbar økologi og mere robuste vandløb i forhold til, hvor høj en relativ tilvækst, der kan tillades. Det giver også en mulighed for at differentiere udledningstilladelsen og have en form for semidynamisk styring. Resultaterne af dette projekt tyder for eksempel på, at effekten af udledningen relativt set generelt er størst om sommeren, hvor der er mindre vand i vandløbet. I det perspektiv vil det give mening at have en mindre udledningstilladelse i sommerperioden, for at den flora og fauna der eksisterer i vandløbet på denne årstid, ikke pludseligt påvirkes af en udledning designet efter en års maksimum.

Relativt set viste resultaterne af den beregnede sedimenttransport og stream poweren sig at stemme meget godt overens. Om det er tilfældigt, eller om det er en konsekvens af, de to beregninger på trods af væsentlige forskelle trods alt afhænger af mange af de samme hydrauliske parametre, er uklart. Under alle omstændigheder er det værd at diskutere, hvor de to beregninger adskiller sig fra hinanden. Sedimenttransporten kan beregnes med en lang række forskellige transportformler, hvor der til dette projekt blev anvendt, en der primært afhang af bundforskydningsspændingen. Det havde den konsekvens, at den beregnede sedimenttransport stort set udelukkende afhang af vandstanden, hvilket resulterede i meget høje værdier for sommersituationer, hvor modstanden i vandløbet er stor som følge af grøde. I en større kanal uden nogen særlig grøde påvirkning virker det logisk, at bundforskydningsspændingen og vandstanden er de primært styrende parametre i forhold til sedimenttransporten. I et lille vandløb som Revens Møllebæk, hvor det udelukkende er grødvækst, der forårsager større modstand hen over sommeren, virker det mod alt logik, at det skulle give anledning til en højere sedimenttransport. Af denne årsag virker stream power som en bedre indikator for sedimenttransporten, da den kompenserer for højere vandstand som følge af grøde vækst ved at inkludere strømningshastigheden, der i disse situationer falder tilsvarende. Med den betragtning i mente burde sedimenttransporten eventuelt have været udregnet med en transportformel, der byggede på stream power.

9. Perspektivering og muligheder for videre undersøgelse

Der er mange muligheder for at forbedre og arbejde videre på projektet. Først og fremmest kan der inddrages flere transportformler til at bestemme sedimenttransporten. Som nævnt findes der mange forskellige form-
ler til dette formål, som bygger på forskellige parametre og giver vidt forskellige resultater. Ved at sammen-
ligne resultater fra flere forskellige transportformler vil tiltroen til resultaterne kunne forbedres enormt. Det
ville måske muliggøre at vurdere resultaterne på absolutte værdier fremfor at anvende relative sammenlig-
ninger.

En anden mulighed for at reducerer usikkerheden omkring resultaterne, ville være at udtage en række sedi-
mentprøver under forskellige forhold. Det ville for eksempel kunne give et bedre billede af grødens indvirk-
ning på sedimenttransporten. Sedimentprøver ned gennem vandløbet ville også kunne styrke modellens tro-
værdighed for de punkter, den ikke er kalibreret efter.

Analysen kunne med fordel gentages på flere både forskellige og lignende vandløb for at få en bedre idé og
noget erfaring i forhold til, hvordan resultaterne typisk vil se ud. Det ville i høj grad være med til at reducerer
usikkerheder og ikke mindst vurdere indflydelsen af forskellige fejlkilder, hvis der fandtes et større sammen-
ligningsgrundlag for denne type af analyser.

Havde der været kørt flere scenarier, ville det også give bedre mulighed for at fremhæve dem, der bedst
reflekterede det naturlige spænd for de forskellige parametre, som de blev bestemt via langtidssimuleringen.

Projektlokationen havde også sine begrænsninger i forhold til manglende vandføringsdata. Selvom det er en
spændende udfordring at arbejde med ufuldkommene data, havde det reduceret nogle af de forholdsvis
store usikkerheder, der blev introduceret i analysen helt fra start, i forbindelse med at skulle transformere
vandføringsdata fra et andet vandløb. Det gjorde udfordringen endnu større, at der også kun var datagrund-
lag til at kalibrere og validere efter en forholdsvis kort periode.

Resultaterne af dette projekt kunne optimalt set kombineres med en mere biologisk vurdering af økologien
i vandløbet og vandløbets sårbarhed over for ændringer. Det ville give en baggrund for at foretage et valg
om, hvor stor en tilvækst i sedimenttransporten der kan tillades.

Bibliografi

Andersen, M. M. et al., 2013. *Guideline til opmåling af vandløb*, s.l.: s.n.

Bagnold, R. A., 1960. *Sediment Discharge and Stream Power - A Preliminary announcement*, Washington: United States Department of the Interior - Geological Survey.

DHI, 2017. *MIKE 1D - DHI Simulation Engine for 1D river and urban modelling*, Hørsholm: DHI.

DHI, 2021. *MIKE 1D Sediment Transport*, Hørsholm: DHI.

Fink, M. S. & Hørup, L. K., 2020. *Recipienteffekter som konsekvens af udledning fra våde regnvandsbassiner*, Aalborg: Aalborg Universitet.

Jacobsen, A. L., 2021. *Sedimenttransport i Revens Møllebæk*, Aalborg: Aalborg Universitet.

Scalgo, 2022. *Scalgo Live*. [Online]
Available at: <https://scalgo.com/live/>

Thomsen, A. T. H., 2019. *Quantification of the hydraulic effects of discharge from stormwater detention ponds into streams*, Aalborg: Aalborg Universitet.

Wilcock, P. R., 2001. Toward a practical method for estimating sediment-transport rates in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(13), pp. 1395-1408.