

# Hydraulisk undersøgelse af Gudenåen - med henblik på problemløsning

SILKEBORG LANGSØ TIL TANGE SØ



## Resumé

Dette projekt indeholder en hydraulisk undersøgelse af Gudenåen, fra Silkeborg Langsø til Tange Sø. Projektstrækningen har de seneste år været påvirket af en stigende vandstand, hvorfor stadig flere problemstillinger opstår. Der opsættes en detaljeret hydraulisk model i MIKE HYDRO River, med strækningsbaserede døgnvarierende afstrømningsværdier og Manningtal. Modellen benyttes til at simulere vandstanden på strækningen, samt undersøge løsningsmuligheder med henblik på at sænke vandstanden. Resultaterne fra flere vandstandssimuleringer, benyttes afslutningsvis til opbygning af en vandstandsmodel for Trækstien.

Rapporten indledes ved at præsentere baggrunden for projektets relevans og de problemer der er forbundet med de danske ådale. Herunder belyses de interesser og problemstillinger, der er forbundet med netop Gudenåen. Efterfølgende afklares projektstrækningens fysiske og hydrauliske forhold. Heriblandt opmålingsdata, afstrømningsværdier, vandstand, Manningtal og generel grødevækst. En trendanalyse af vandstanden de seneste 30 år, påviser en stigning på 0,5 m mellem 2008-2010. Denne kan tilknyttes en ændret grødevækst, som følge af vandremuslingens indtog.

Efter præsentation og redegørelse af projektlokaliteten, opsættes den hydrauliske Grundmodel i MIKE HYDRO River. Ved hjælp af Grundmodellen udføres både stationære og dynamiske vandløbsberegninger. På baggrund af vandløbsberegningerne udføres enkelte ådalsanalyser i VASP, med udarbejdelse af dertilhørende afvandingskort. Simulering af henholdsvis en vinter- og sommermedianmaksimumhændelse, resulterer i tilnærmelsesvis samme vandstand på projektstrækningen. Dette tilskrives grødetilvækstens påvirkning af Manningtallet, der holder vandstanden tilsvarende høj, trods mindre vandføring.

Med afsæt i Grundmodellen i MIKE HYDRO River, undersøges to scenariers påvirkning af vandstanden. Der undersøges for effekten ved fjernelse af tagrør ved en tværsnitsindsnævring, samt en udvidelse af strømrønde bredden i forbindelse med vandløbsvedligeholdelsen. Fjernes tagrørene ved indsnævringen på en delstrækning omkring st. 2.000, sænkes vandstanden 13-16 cm ved Ringvejsbroen og dermed i Silkeborg Langsø, ved en 100-årshændelse. Ved udvidelse af strømrønde bredden fra 7-10 m, sænkes vandstanden gennemsnitligt 9-10 cm fra Ringvejsbroen til Kongensbro.

Afslutningsvis udvikles en simpel vandstandsmodel for Trækstien, på baggrund af beregningsresultater fra Grundmodellen. Trækstien er projekteret efter at være farbar 10 ud af årets 12 måneder. Derfor forefindes stedvise oversvømmelser, som kan være til gene for Trækstiens brugere. Vandstandsmodellen giver et detaljeret overblik over vandstanden på Trækstien langs projektstrækningen.

## Forord

Nærværende rapport omhandler et afgangsprøveprojekt på Diplomingeniøruddannelsen i Bygningsteknik på Ingeniørhøjskolen, Aarhus Universitet. Projektet er udarbejdet af studerende på retningen Miljøteknik (Urban Water), som afslutning på kurset BT7BAC-01 Bachelorprojekt.

Projektet omhandler hydraulisk undersøgelse og modellering af Gudenåen på strækningen fra Silkeborg Langsø til Tange Sø, med henblik på problemløsning for høje vandstande.

Der er særligt anvendt viden fra kurserne BT4-01 Klima og miljø, BTEMWW-01 Waste Water Engineering, samt B5IPR1 Ingeniørpraktik med erfaringer fra henholdsvis kommune og rådgiver. Derudover er der fundet inspiration og vejledning til brug af MIKE HYDRO River fra tidligere afgangsprøveprojekter, der har anvendt programmet.

Vi vil gerne give en særlig tak til vores vejleder Kristian Vestergaard for grundig og engageret vejledning. Dernæst en stor tak til Anders Lund Jensen, Civilingeniør ved WSP, for god sparring gennem projektførelsen. Tak til Mathias Utoft Jørgensen, projektleder på Helhedsplanen ved Silkeborg Kommune, for sparring om Gudenåen.

Desuden skal der lyde en tak for udlevering af data, materiale, licenser mm:




- Silkeborg Kommune har udleveret opmåling af Gudenåen på projektstrækningen.
- WSP har stillet hydrometridata til rådighed, samt adgang til intern version af VASP.
  - o Der gøres opmærksom på at WSP i 2019/2020 ændrede navn fra Orbicon.
- DHI har udleveret internet licens til MIKE Zero-pakken

Det afleverede projekt består af:

- Hovedrapport
- Bilag
- Excel-bilag
- Mappe med udvalgte modelfiler

Referencer til bilag er angivet med afsnitsnummer og tal, som f.eks. Bilag 3.2 eller Excel-bilag 4.1.

Referencer angives med "[x]" og kan genfindes i litteraturlisten i bunden af henholdsvis Hovedrapporten og Bilag.

Projektet er udarbejdet af:	Omfang:	Underskrifter
Kristian Dürr Jensen - 201705611	20 ECTS point	 Dato: 15-12-2020
Helene Enevoldsen - 201709290	20 ECTS point	 Dato: 15-12-2020
Mikkel Honoré Vesten - 201605687	20 ECTS point	 Dato: 15-12-2020

## Indhold

1	Indledning.....	6
2	Baggrund.....	7
2.1	Interesser og konflikter i ådale.....	7
2.2	Klimaforandringer.....	7
3	Præsentation af projektlokalitet .....	8
3.1	Gudenåen .....	8
3.2	Gudenåen fra Silkeborg Langsø til Tange sø.....	8
3.2.1	Ådalen.....	9
3.2.2	Vandløbsstrækningens tilstand og målsætning .....	10
3.2.3	Målestationer .....	10
3.2.4	Regulativ .....	10
3.3	Interessenter .....	10
3.3.1	Silkeborg Kommune.....	11
3.3.2	Lodsejere, foreninger og organisationer .....	11
3.4	Helhedsplan.....	11
3.4.1	C2C CC: Coast to Coast Climate Challenge .....	11
4	Datagrundlag.....	12
4.1	Længdeprofil og tværsnit .....	12
4.2	Tilløb og oplande .....	13
4.3	Hydrometri .....	13
4.3.1	Karakteristisk afstrømning.....	13
4.3.2	Trendanalyse af vandstand og vandføring .....	14
4.3.3	Q/h relation .....	15
4.4	Manningtal .....	15
4.4.1	Manningformlen.....	15
4.4.2	Manningtal bestemmelse.....	16
4.4.3	Manningtal bestemmelse på projektstrækningen .....	16
4.4.4	Vandløbsvegetationens indvirkning på den hydrauliske modstand i Gudenåen .....	18
5	Modelgrundlag.....	21
5.1	VASP.....	21
5.2	Mike Hydro .....	21
5.3	Excel.....	22
6	Vandløbsberegninger .....	23



6.1	Stationære beregninger .....	23
6.1.1	Opsætning .....	23
6.1.2	Analyse.....	24
6.1.3	Delkonklusion .....	25
6.2	Dynamiske vandløbsberegninger .....	26
6.2.1	Opsætning .....	26
6.2.2	Analyse.....	26
6.2.3	Vurdering af nøjagtighed på modeloutput.....	34
6.2.4	Delkonklusion .....	34
6.3	Sammenligning af dynamiske og stationære vandløbsberegninger .....	34
6.3.1	Sammenligning .....	34
6.3.2	Vurdering .....	36
7	Scenarieberegninger.....	37
7.1	Scenarie 1 – Fjernelse af Tagrør .....	37
7.1.1	Effekt ved fjernelse af tagrør på område 2 (station 1789 til 2281).....	39
7.1.2	Delkonklusion .....	43
7.2	Scenarie 2 – Strømrrende .....	43
7.2.1	Opsætning .....	43
7.2.2	Resultat.....	44
7.2.3	Følsomhedsanalyse .....	46
7.2.4	Delkonklusion .....	47
8	Vandstandsmodel for Trækstien .....	48
8.1	Opsætning .....	48
8.2	Resultat.....	49
8.3	Optimering.....	50
8.3.1	Kontrol .....	50
8.3.2	Varslingsmodul .....	50
9	Diskussion .....	52
10	Konklusion .....	54
11	Perspektivering.....	55
12	Litteraturliste .....	56

## Bilagsfortegnelse

### Bilag

- Bilag 1 Projektbeskrivelse
- Bilag 3.1 Målebordsblade
- Bilag 3.2 Natura 2000
- Bilag 3.3 §3 Natur
- Bilag 3.4 Målestationer
- Bilag 4.1 Længdeprofil
- Bilag 4.2 Trendanalyse
- Bilag 4.3 Q\_h relation
- Bilag 4.4 Manningtal bestemmelse i VASP
- Bilag 4.5 Manningtal
- Bilag 4.6 Vandløbsvegetation
- Bilag 6.1 MIKE Grundmodel
- Bilag 6.2 MIKE HYDRO Guide
- Bilag 6.3 Følsomhed dyn Grundmodel
- Bilag 7.1 Scenarie 1
- Bilag 7.2 Scenarie 2
- Bilag 8.2 Respons på nedbør

### Excel-Bilag

- Excel-Bilag 6.1 Resultat stationær Grundmodel
- Excel-Bilag 6.2 Resultat dynamisk Grundmodel
- Excel-Bilag 6.3 Manningtal MIKE
- Excel-Bilag 6.4 Følsomhed dyn Grundmodel
- Excel-Bilag 6.5 Sammenligning stationær og dynamisk Grundmodel
- Excel-Bilag 7.1 Scenarie 1 Indledende undersøgelse
- Excel-Bilag 7.2 Scenarie 1 100års
- Excel-Bilag 8.1 Vandstandsmodel
- Excel-Bilag 8.2 Respons på nedbør

### Model-Bilag

- Filer til opsætning af årsmiddel simulering
- Resultatfil

## 1 Indledning

Projektet omhandler de hydrauliske forhold i Gudenåen på projektstrækningen fra Silkeborg Langsø til Tange Sø. Gudenåens stigende vandstand, har bidraget til, at den i dag er en af de mest politisk betændte ådale i Danmark. Landbrugs-, fiskeri-, lodsejer- og naturfredningsforeninger er i åben kamp om de mulige løsningstiltag. Den samlede projektbeskrivelse, som ligger til grund for projektet, kan findes under Bilag 1. Bilaget uddyber projektets baggrund, problemformulering, afgrænsning og metode.

Projektets formål er at undersøge de hydrauliske forhold i Gudenåen, på projektstrækningen. Der opbygges en stationær og en dynamisk model, til at udføre vandløbsberegninger. Modellerne opbygges på baggrund af døgnvarierende Manningtal og karakteristiske afstrømningsværdier. Hermed opnås et særdeles godt modelgrundlag, hvilket muliggør kvalificerede undersøgelser af vandstanden på projektstrækningen. Herunder udokumenterede problemstillinger og enkelte løsningsmuligheder. Med afsæt i den hydrauliske model, udføres en dybdegående analyse af to scenarier med mulige virkemidler. Disse har til formål at sænke vandstanden i Gudenåen på projektstrækningen. Projektet er afgrænset til udelukkende at undersøge de hydrauliske forhold, hvorfor de miljømæssige problemstillinger ikke nævnes indgående.

Langs projektstrækningen findes en nyrenoveret træksti, der udmærker sig ved at følge Gudenåen på helt nært hold. Trækstien er hyppigt brugt af motionister og naturinteresserede. Den er én af mange tiltag, der er med til at gøre Silkeborg til Danmarks outdoor hovedstad. På baggrund af udførte vandløbsberegninger opsættes en vandstandsmodel. Denne skal videregive information om Trækstiens tilstand, til stiens brugere.

Projektet vurderes at have samfundsmæssig relevans, eftersom følgende af FN's verdensmål indgår i projektet: 6. Rent vand og sanitet, 13. Klimainsats, 14. Livet i havet, 15. Livet på land og 17. Partnerskaber for handling.

## 2 Baggrund

I dette afsnit vil problemstillinger og relevante forhold for projektet belyses.

### 2.1 Interesser og konflikter i ådale

Miljø- og fødevareudvalget opgjorde i en rapport tilbage i 2016-17, hvor stort arealbehovet vil være for at opnå diverse miljømål, klimatilpasningsplaner, landbrugsbehov mm. Det blev vurderet til at kræve 130-140% af Danmarks areal. Hermed opstår en nødvendighed om kombinerede arealer, der opfylder flere behov samt prioriteringer, hvor sammenspil ikke er muligt.[2]

I mange af de danske ådale mærkes konflikterne i forhold til arealanvendelse. Der findes gode kombineringsmuligheder for naturbeskyttelse, miljømål for den økologiske tilstand i vandløb, rekreative- og naturmæssige interesser. Det er derimod svært at forene de øvrige interesser med landbrugsinteresser og klimatilpasning, hvor der i stedet skal prioriteres. Konflikterne kommer bl.a. til udtryk imellem vandløbslovens §1, som skal sikre at et vandløb kan benyttes til afvanding og naturbeskyttelseslovens §3, som sikrer tilstanden af beskyttede naturtyper, herunder vandløb.

### 2.2 Klimaforandringer

Klimaforandringer bliver verden over gradvist mere markante, for hver dag der går. Der kommer mere nedbør, hvilket medfører mere vand i åerne, der i mange tilfælde resulterer i hyppigere og større oversvømmelser. Det viser en fagligrapport om afstrømningsforhold i danske vandløb tilbage i år 2000. [3]

Resultaterne af klimaforandringerne kommer til udtryk i Spildevandskomiteens Skrift 30. Der er en klar formodning om, at intensiteten af store regnhændelser vil stige i fremtiden. En nutidig 100-års hændelse forventes at være 1,2 gange så stor om 50 år, og 1,4 gange større om 100 år[4]. Det er derfor vigtigt at medregne klimaforandringer ved fx klimafaktorer i klimatilpasningsprojekter, så løsningerne tilpasses fremtidens klima. De øgede nedbørsmængder betyder at åerne i fremtiden skal kunne transportere større vandmængder eller forsinke mere vand i ådalene. [5]

I Gudenåen slog klimaforandringerne blandt andet igennem i foråret 2020. Her indtraf en +100-årshændelse, hvilket medførte den højest målte vandføring samt vandstand nogensinde. Se Figur 1 og Figur 2 nedenfor.



Figur 2 - Oversvømmelse i Silkeborg.  
Foto: Silkeborg kommune



Figur 2 - Oversvømmelse langs Gudenåen d. 23. februar 2020.  
Foto: Silkeborg kommune



### 3 Præsentation af projektlokalitet

#### 3.1 Gudenåen

Gudenåen er med dens 160 km lange forløb Danmarks længste å. Den udspringer i Tinnets Krat, hvorfra den løber op gennem det midtjyske Søhøjland til Randers Fjord. [6] Den har et samlet vandopland på  $2600 \text{ km}^2$ , hvormed den bliver Danmarks anden mest vandrige å, næst efter Skjern Å.[7]

Gudenåen har fra begyndelsen af 1800-tallet og mange år frem været en vigtig transportvej. Desuden har vandkraften i åen været udnyttet af møller og industrielle anlæg. Heriblandt landets største vandkraftsanlæg, Gudenåcentralen ved Tange, der åbnede i 1921 og har kørt frem til 2020. Naturen i og omkring Gudenåen indbyder til mange rekreative udfoldelser som lystfiskeri, vandring og kanosejls. Siden 1930'erne har åen fragtet utallige kanoer fra udspringet i syd, nordpå mod Randers.[8]

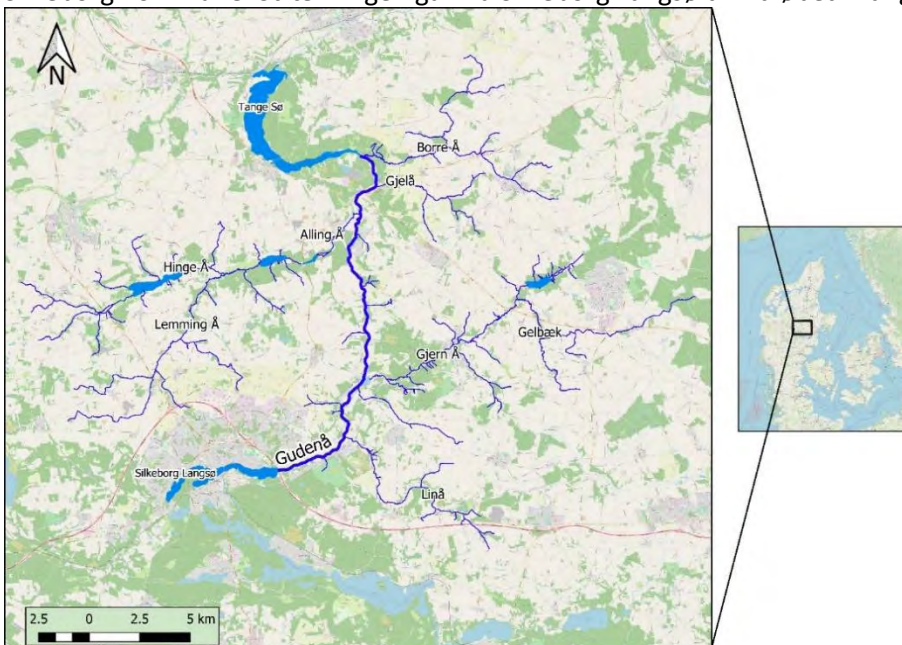
Oplandet til Randers Fjord spreder sig over 13 kommuner, der alle har mulighed for at være repræsenteret i Gudenåkomitéen. Komitéen er et frivilligt, formaliseret samarbejde om Gudenåens benyttelse og beskyttelse. Ud af de 13 kommuner indgår 7 kommuner i fællesskabet med hver deres kommunale bestyrelsesmedlem, her i blandt Silkeborg Kommune. Gudenåkomitéen er etableret for at koordinere indsatser for forbedring af vandmiljøet, rekreative tiltag mm, der foregår på tværs af kommunegrænserne.[9]



Figur 3.1 - Kort over Gudenåen med tilhørende vandopland og de 7 kommuner i Gudenåkomitéen.

#### 3.2 Gudenåen fra Silkeborg Langsø til Tange sø

Nærværende projekt omhandler en 21 km lang strækning af Gudenåen og de omkringliggende arealer i Silkeborg Kommune. Strækningen går fra Silkeborg Langsø til indløbet i Tange Sø.



Figur 3.2 - Projektstrækning i Gudenåen fra Silkeborg Langsø til Tange Sø, vist med tilløb.

Årsmiddel vandføringen er  $14,3 \text{ m}^3/\text{s}$  ved Ringvejen i starten af projektstrækningen. Se Excel-Bilag 4.1 Vandføringsdata. Vandløbets trace på strækningen er tilnærmelsesvist uændret siden midten af 1800'tallet, hvis man sammenligner med de gamle målebordskort. Se bilag 3.1 Målebordsblade. Strækningen er præget af store meanderbuer og har et samlet fald på 5,5 m. Faldet er størst midt på strækningen og mindst fra Resenbro til Svostrup. Se Tabel 3-1.

Tabel 3-1 - Fald på strækningen. Se bilag 4.1.

Strækning	Station	Fald [ ‰ ]
Ringvejsbro - Resenbro	144 - 3046	0,23
Resenbro - Svostrup	3046 - 8714	0,05
Svostrup - Tvilumbro	8714 - 10.810	0,39
Tvilumbro - Nebelgårde	10.810 - 13.500	0,46
Nebelgårde - Kongensbro	13.500 - 18.411	0,39
Kongensbro - Borre å	18.411 - 20.849	0,24

Vandløbet har et opland på ca.  $1086 \text{ km}^2$  målt ved Ringvejsbroen i starten af projektstrækningen og  $1561 \text{ km}^2$  i slutningen målt ved Borre Å/Tange Sø. På strækningen løber Gudenåen gennem Sminge Sø på godt 22 ha. Af større tilløb er der Linå, Gjern Å, Alling Å, Gjelå og Borre å. Se Figur 3.2 **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet..**

### 3.2.1 Ådalen

Gudenådalen er Danmarks længste smeltevandsdal. Flere landskaber i ådalen på projektstrækningen er klassificeret som værende af national geologisk interesse. Her ses terrasser i forskellige niveauer, der afspejler faser af afsmeltningen efter istiden. Terrasserne udgjorde flodbunden for Gudenåen, der langsomt eroderede sig ned til det niveau, hvor Gudenåen ligger i dag. Desuden er Gudenådalen på hele strækningen udpeget som Natura2000 habitat område. Se bilag 3.2. Formålet med NATURA 2000 områder er at beskytte og bevare bestemte naturtyper og arter af dyr og planter, som er af betydning indenfor EU. Der er flere områder med naturtyperne eng, hede, mose, overdrev og sø, der alle er beskyttet under §3 beskyttelsesloven for særlige naturtyper. I disse områder må der ikke ændres på naturtilstanden. Se bilag 3.3. [10]

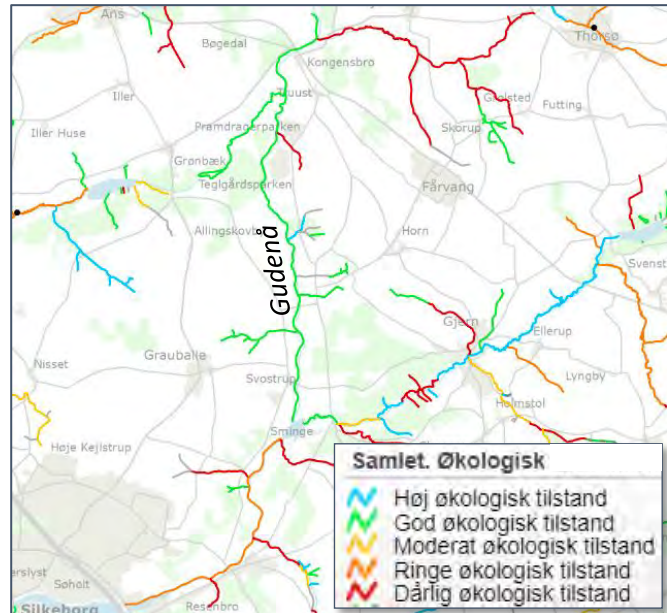
Selve ådalen er overvejende flad med terræn kote nær vandspejlskote. Terrænet stiger markant, når man bevæger sig udenfor Gudenådalen. Bredden af ådalen varierer.

Ådalen er primært udlagt som marker med intensivt landbrug, græsningsarealer, enge og moser.[10]

### 3.2.2 Vandløbsstrækningens tilstand og målsætning

Gudenåen er hjemsted for mere end 80 plantearter, heraf 44 vandplantearter. De primære vandplanter er pindsvineknop, frøbid og flere arter af vandaks. Ved vandkanten dominerer tagrør, dunhammer, rørgræs og sødgræs. Fiskebestanden er artsrig og indeholder en god bestand af laks og ørred. Der findes også ål, stalling, brasen, skalle, gedde, aborre, lampretter, smerling m.v.. Siden 2006 har vandremuslingen spillet en stor rolle i Gudenåen. Den filtrerer alger og andre små partikler, hvilket gør vandet mere klart. Det klare vand kan øge mængden af vandplanter grundet mere lys, hvilket kan påvirke vandføringsevnen. Gudenåen er også hjem for mange fugle, dyr og insekter heriblandt fiskehejre, lappedykkere, knopsvane, oddere og pragtvandnymfer.[11]

Ifølge Miljøstyrelsens basianalyse for vandområdeplaner 2021-2027 er den første tredjedel af strækningen i ringe samlet økologisk tilstand og den resterende del i god økologisk tilstand. Se Figur 3.3. Den kemiske tilstand er for hele strækningen ukendt. Miljømålet på strækningen er at den økologiske og kemiske tilstand skal forbedres til god.[1]



Figur 3.3 - Samlet økologisk tilstand i Gudenåen fra Silkeborg Langsø til Tange Sø. MiljøGIS [1]

### 3.2.3 Målestationer

Der findes i alt 6 tilgængelige målestationer på projektstrækningen. For målestation 21.01 Tvilumbro findes både vandstandskote og vandføring. De resterende fem målestationer registrerer kun vandstandskoten. Derudover findes to målestationer i umiddelbar nærhed af projektstrækningen, én ved Papirfabrikken opstrøms Silkeborg Langsø og én i Tange Sø. Se bilag 3.4 Målestationer, for placering af de førnævnte stationer. Den ældste målestation er 21.01 Tvilumbro, som har data helt tilbage fra år 1921.

### 3.2.4 Regulativ

Projektstrækningen går under regulativet Silkeborg-Randers, strækning 1: Silkeborg Langsø til Tange Sø (st. 0 til st. 20.849), der varetages af Silkeborg Kommune. Regulativet er fra 2000 og reguleres efter Q/h relationer. Det er bestemt, at grøden skal slås én gang om året i perioden fra 15. juni til 1. august i en 7 m bred strømrønde. Strømrøndens forløb skal gerne slynge sig for at bibeholde eller skabe flere strømrønder. Der kan også foretages kantskæring, hvis nødvendigt for at vedligeholde strømrønden. Grøden skæres så vidt muligt helt i bund, uden at forstyrre bundforholdene. Ekstra grødeskæring eller oprensning er påkrævet, hvis vandspejl overstiger de i regulativet angivne vandspejlskoter ved medianmaksimumvandføring. Vandløbsmyndigheder fører årligt tilsyn af vandløbet i efterårsperioden. [12]

## 3.3 Interessenter

Der knytter sig mange interessenter til Gudenåen med hver deres position og interesse. Her i blandt findes kommuner, lodsejere, lokale borgere, turister, virksomheder, foreninger og organisationer. Interessenterne inddrages i projektet med Helhedsplanen til interesse-gruppemøder for opdelte strækninger, hvor interesser og løsningsforslag diskuteres.

### 3.3.1 Silkeborg Kommune

Gudenåen og dens naturrige ådal slynger sig igennem Silkeborg Kommune. I 2017 blev Kommunen udnævnt som Danmarks Outdoor hovedstad. Positionen som Danmarks outdoor hovedstad spiller en central rolle i kommunens vision, udviklings- og friluftstrategi. Det har medført stort fokus på naturen samt adgangen dertil, for naturinteresserede. Et særligt attraktivt område i Silkeborg Kommune er Gudenåen og naturen omkring. En renovering i 2018 af den gamle træksti fra Silkeborg til Kongensbro, giver adgang til naturområdet helt tæt på Gudenåens vandspejl. Kote på trækstien er bestemt efter, at stien skal være farbar mindst 10 måneder om året og er derfor oversvømmet flere gange om året. For at undgå, at brugere går forgæves når stien er oversvømmet, oplyser kommunen om vandstanden, i forhold til stikote ved tre punkter på strækningen.

### 3.3.2 Lodsejere, foreninger og organisationer

Lodsejerne med landbrugsjord eller græsning ned til Gudenåen er bekymrede for forringede afvandringsforhold og dertilhørende oversvømmelser. Husejerne ned til vandet frygter for oversvømmelser af deres have og hus. Sportsfiskerforeningerne ønsker gode leve og yngleforskel for laks og andre vandrefisk, samt sikring af biodiversiteten. Kajakklubben er fint tilfreds, så længe de har adgang. Danmarks Naturfredningsforening er særligt opmærksomme på offentlighedens adgang til naturen samt konsekvenser for naturen ved forskellige tiltag i C12 projektet. Gudenåkomitéen og gudenåsamrådet hører også under interessenter til Gudenåen. [13]

## 3.4 Helhedsplan

Der blev målt rekordhøje vandstande i Gudenåen hen over vinteren 2019-2020, hvilket medførte rekordstore oversvømmelser. Det fik de 7 Gudenåkommuner til sammen at lægge en plan for, hvordan de skal imødegå konsekvenserne af højere vandstande i Gudenåen. Konkret vil de have kortlagt omfanget af generne ved de højere vandstande i Gudenåen og anviser løsningsmuligheder og handlinger på forskellige strækninger. Oversvømmelseskort af årlige samt ekstreme forhold, skal bl.a. være med til at kortlægge problemerne. Der er fokus på både at tage hensyn til klimatilpasning, afvanding, natur og miljø.[14] Helhedsplanen forventes at være klar i 2021.[15]

### 3.4.1 C2C CC: Coast to Coast Climate Challenge

I 2017 startede et 6-årigt klimatilpasningsprojekt af Region Midtjylland, med det formål at få formuleret en fælles langsigtet strategi for kommuner, forsyningsselskaber og virksomheder i vandbranchen imellem. Budgettet lyder på 90 mio. kr., der fordeler sig ud på 24 "delprojekter". Her i blandt C12 - Gudenåen. C12 har til formål at skabe fælles vision og målsætning for klimatilpasning omkring Gudenåen.[16] Der bliver udviklet en model for vandløbet, der skal ligge til grund for klimatilpasningsplanlægningen på tværs af de 7 involverede kommuner. [16] Arbejdet med C12 indgår også i Helhedsplanen.

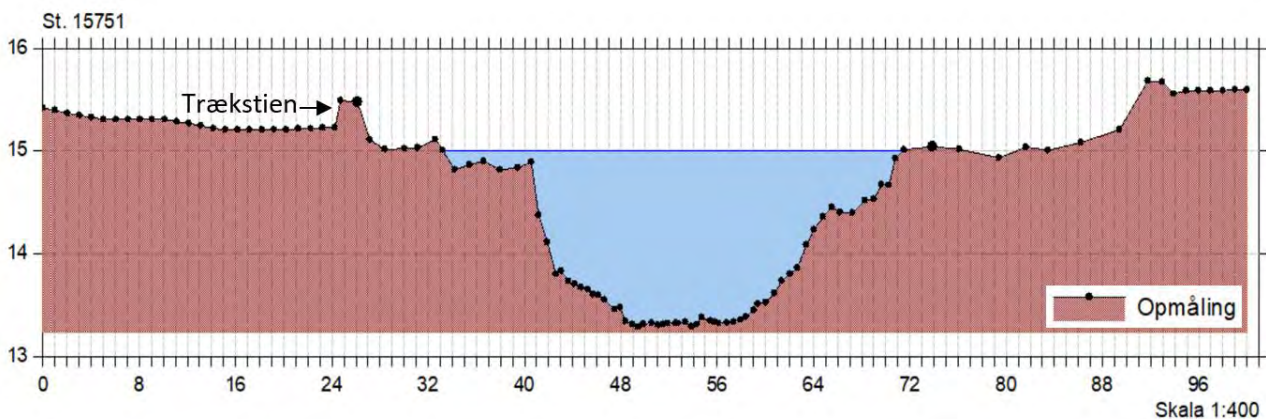


## 4 Datagrundlag

Følgende afsnit beskriver det i projektet anvendte datagrundlag. Herunder udleveret data fra Silkeborg Kommune og WSP.

### 4.1 Længdeprofil og tværsnit

I projektet anvendes en ny vandløbsopmåling fra maj 2020 på i alt ca. 21 km, udført af WSP for Silkeborg Kommune. Opmålingen er udført med håndholdt GPS-udstyr, vha. en mindre båd spændt på tværs af åen. Opmålingen har start ved Ringvejsbroen i udløbet fra Silkeborg Langsø i st. 144, og slutter ved indløbet til Tange Sø i st. 20.837. Tværprofilerne er placeret med en afstand på op til 300 m, hvor topkoten på Trækstien er inkluderet i venstre side af profilerne. Trækstien er enkelte steder hævet til en træbro på pæle, hvorfor den her ikke indgår i vandløbsopmålingen. Derfor anvendes en særskilt opmåling af trækstiens koter, til udarbejdelsen af vandstandsmodellen i afsnit 8. WSP har efterfølgende udvidet tværsnitsprofilerne op til 100 meters bredde, med Danmarks Terrænmodel fra 2015 (DTM 2015). Nedenstående Figur 4.1 viser et tværsnitsprofil, hvor profilet er udvidet op til 100 m med DTM 2015. Som det fremgår på Figur 4.1 ligger Trækstien principielt som et dige langs venstre brink, men der findes fri hydraulisk forbindelse til oplandet i form af adskillige rørunderføringer på strækningen.



Figur 4.1 - Eksempel på Tværsnitsprofil fra st. 15.751 udklippet i VASP, med anvisning af Trækstien på venstre brink. Profilet er udvidet til 100 meters bredde med DTM 2015.

Eftersom opmålingen af strækningen forløb over flere dage, ses en del spring i vandstanden på det opmålte længdeprofil. Derfor er der udført en opmåling af vandspejlet, ved hjælp af en drone. Dronen kan overflyve hele strækningen på mindre end én dag, og dermed måle et sammenhængende og anvendeligt vandspejl.

Dronen har udført en vandspejlsopmåling fra Ringvejen til Kongensbro d. 7. maj 2020. Det fulde længdeprofil med droneopmålt vandspejl, kan ses under Bilag 4.1.



## 4.2 Tilløb og oplande

På strækningen findes flere større og mindre tilløb til Gudenåen, som hver giver et spring i oplandsarealet. Det er derfor vigtigt for modelarbejdet i projektet, at de væsentligste tilløb tilføjes. For hvert tilløb bestemmes en station umiddelbart opstrøms, samt en station for udløbet af tilløbet. Herefter benyttes SCALGO[17] til at bestemme oplandet for Gudenåen, før og efter tilløbet. Tabel 4-1 viser de fem væsentligste tilløb på projektstrækningen og dertilhørende spring i opland. Derudover er oplandet ved målestation 21.01 Tvilumbro og Ringvejen bestemt.

Tabel 4-1 - Tilløb og dertilhørende oplande, bestemt med det digitale værktøj SCALGO.

<b>Tilløb/Bemærkning</b>	<b>Station</b>	<b>Opland tilløb [km<sup>2</sup>]</b>	<b>Opland Gudenå [km<sup>2</sup>]</b>
Ringvejen	144		1.085,67
	4.049		1.101,70
Linå	4.050	35,37	1.137,07
OS Sminge Sø	7.243		1.148,41
Gjern å	7.813	133,41	1.281,82
Tvilumbro	10.810		1.294,52
	16.887		1.319,77
Alling å	16.982	142,87	1.462,64
	18.932		1.465,50
Gjelå	18.950	25,18	1.490,68
	20.849		1.492,07
Borre å	20.850	69,18	1.561,25

## 4.3 Hydrometri

Der er som nævnt tidligere 6 målestationer tilknyttet projektstrækningen. Målestationen 21.01 Tvilumbro er udvalgt til bestemmelse af specifikke afstrømningsværdier, da denne indeholder den længste dataserie.

### 4.3.1 Karakteristisk afstrømning

De karakteristiske afstrømninger for Gudenåen, bestemmes ud fra den tilgængelige dataserie med døgnmiddel vandføring ved Tvilumbro. Vandføringen konverteres til specifikke afstrømningsværdier ved at dele med oplandsarealet. Oplandet ved Tvilumbro er bestemt til 1.295 km<sup>2</sup>. Se afsnit 4.2. Til bestemmelse af middel- og medianmaksimumværdier benyttes data fra de seneste 30 år, fra 1990-2020[3]. Ved mere ekstreme hændelser som 5-års, 10-års mfl. benyttes al tilgængeligt data tilbage til 1921, altså næsten 100år. Tabel 4-2 viser beregnede karakteristiske afstrømningsværdier, for Gudenåen ved målestation 21.01 Tvilumbro i st. 10.810. Det vurderes at afstrømningsværdierne kan anvendes på hele projektstrækningen.

Der findes ikke 100 års data for vandføringen, da der er huller i datasættet fra 1925-1934. På trods af dette antages det, at den andenstørste observerede afstrømningshændelse i hele dataserien svarer til en 50-års hændelse. Fremskrivning af vandføringsdataet vurderes at indeholde store usikkerheder, hvorfor der ikke beregnes afstrømningshændelser større end en 50-års i dette projekt.

Se Excel-bilag 4.1 for hele datagrundlaget for udregning af afstrømningsværdier og bestemmelse af ekstremhændelser/gentagelsesperioder.

Tabel 4-2 - Beregnede karakteristiske afstrømningsværdier for målestation 21.01 Tvilumbro. Afstrømningsværdierne er benyttet til beregninger i MIKE HYDRO.

Hændelse	Afstrømningsværdi [L/s/km <sup>2</sup> ]
Årsmiddel	13,2
Sommermiddel	9,3
Vintermiddel	16,0
Abs. min.	4,1
Medianmin.	6,6
Vintermedianmaks.	24,5
Sommermedianmaks.	14,2
7. døgn glid. maks.	25,7
5-årsmaks.	30,8
10-årsmaks.	32,8
20-årsmaks.	36,8
50-årsmaks.	40,6

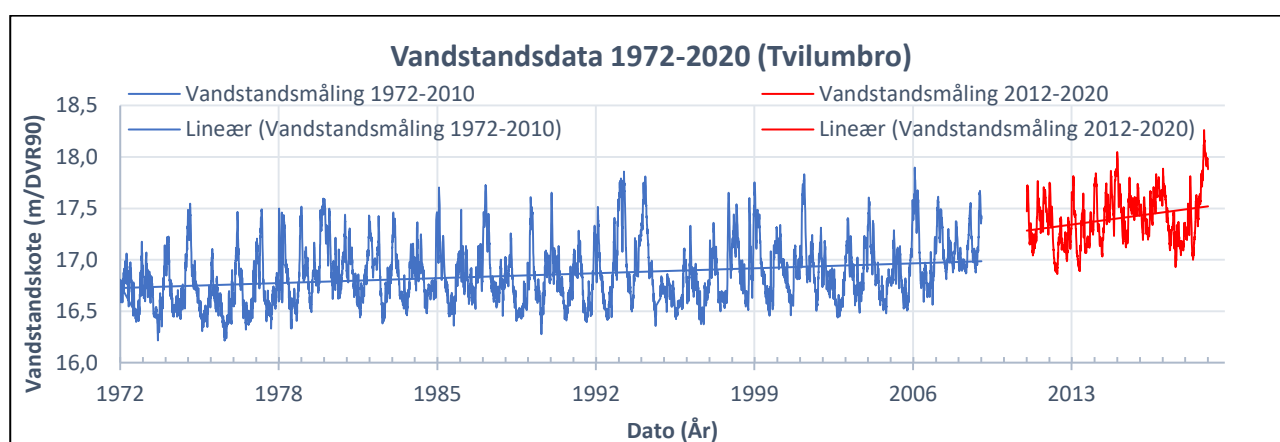
#### 4.3.2 Trendanalyse af vandstand og vandføring

Den lange dataserie for vandstand og vandføring fra målestation 21.01 Tvilumbro, anvendes til en trendanalyse. Der benyttes tilgængelige vandføringsdata fra 1934-2020, mens vandstandsdata findes fra 1972-2020. I dette afsnit refereres der til udvalgte grafer som alle findes i Bilag 4.2 Trendanalyse.

Vandføringen har en svagt faldende tendens for hele målestationens dataserie, modsat er vandføringen de seneste 30 år svagt stigende. Derfor udtages de seneste 30 års hydrometridata, til brug i den videre analyse, samt som datagrundlag til udregning af middelaflstrømningsværdier i ovenstående afsnit 4.3.1.

På trods af førnævnte klimaforandringer er tendensen for vintermiddel og årsmaksimumværdier faldende. Modsat er tendensen for sommermiddel og årsminimum stigende.

Vandstanden er generelt støt stigende gennem hele måleperioden, hvor vintermiddel, sommermiddel, årsmaksimum og årsminimum alle har stigende tendenser. Specielt i perioden omkring 2009, sker der en voldsom vandstandsstigning.

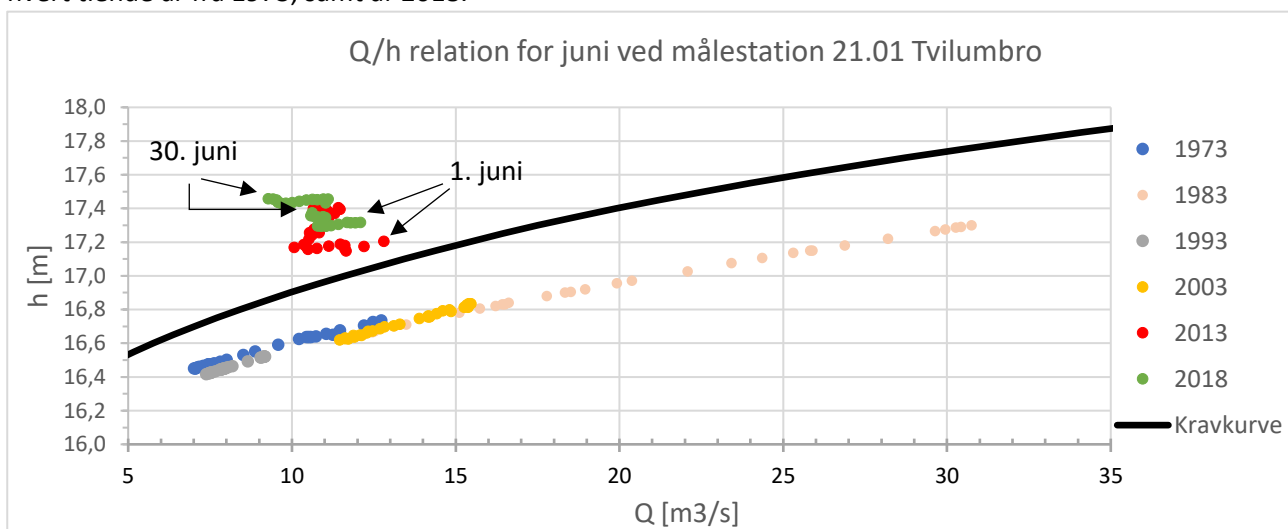


Figur 4.1 - Vandstandsdata for målestation 21.01 Tvilumbro. Data er hentet fra ODA[18]

Det er værd at bemærke på Figur 4.1, at der er målt flere rekordhøje vandstande i perioden 2012-2020. Som nævnt tidligere tager vandstanden omkring år 2009 et stort spring, med en gennemsnitlig stigning på op mod 0,5 m. Sammenhængen mellem ændring i vandføring og vandstand, belyses yderligere i afsnit 4.3.3.

#### 4.3.3 Q/h relation

Den i afsnit 4.3.2 benævnte vandstandsstigning på omkring 0,5 m, ses ligeledes i Q/h relationen for målestation 21.01 Tvilumbro. Den store vandstandsstigning vurderes at skyldes indvandringen af vandremuslingen, da der ikke findes nogle fysiske ændringer i Gudenåens skikkelse. Vandremuslingens vandfiltrering giver bedre grobund til åens vandplanter, hvorfor den store vandstandsstigning tilskrives ændret grødevækst.[7] Derfor benyttes udelukkende vandførings- og vandstandsdata for de seneste 8 år til den videre bestemmelse af Manningtallet, se afsnit 4.4. Nedenstående Figur 4.2 viser Q/h relationen for juni måned i udvalgte år. Se Bilag 4.3 for større grafer med Q/h relationer for juni og februar måned for hvert tiende år fra 1973, samt år 2018.



Figur 4.2 - Q/h relation for juni ved målestation 21.01 Tvilumbro. Kravkurve er indtegnet med sort.

Den forøgede grødetilvækst i 2013 og 2018 fremgår af ovenstående Figur 4.2. Vandføringen, "Q", er faldende fra 1. juni og frem, mens vandstanden forbliver stort set konstant. Dermed er grødetilvæksten i juni måned i 2013 og 2018 så stor, at denne kan modsvare det naturlige fald i vandføringen. Stiger vandføringen igen herefter, bemærkes en væsentlig større vandstandsstigning idet modstanden i Gudenåen er steget markant. Modsat er kurven aftagende og sammenhængende før 2013, hvilket tyder på stort set uændret modstand, og dermed ringe grødetilvækst.

## 4.4 Manningtal

I følgende afsnit vil Manningformlen samt bestemmelse af Manningtal, både generelt og for dette projekt, blive beskrevet. Vandplanters indflydelse på Manningtallet på projektstrækningen vil desuden blive omtalt.

### 4.4.1 Manningformlen

Manningtallet,  $M$  er en koefficient, der beskriver den hydrauliske modstand i et vandløbstværsnit. En lav værdi beskriver en høj modstand og dårlig vandføringsevne, imens en høj værdi beskriver en god vandføringsevne. Manningtallet bestemmes for at kunne beregne vandstanden ved forskellige vandføringer. Det kan bl.a. bruges ved klimatilpasningsprojekter, hvor der kigges på scenarier ved øget vandføring.

Manningtallet indgår i Manningformlen, der blev udtænkt og fremlagt af Robert Manning i 1890. Formlen beregner en vandføring,  $Q$  ved en stationær, ensformig og turbulent strømning. Manningformlen er som følger:

Ligning 4.1

$$Q = A \cdot M \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I_0^{\frac{1}{2}}$$

$A$ =Areal,  $R$ =Hydraulisk radius, der er defineret ved  $R=A/P$ , hvor  $P$ =den våde perimeter,  $I_0$ =gradient (bundhældning).

#### 4.4.2 Manningtal bestemmelse

For ikke grødefyldte vandløb kan Manningtallet bedre estimeres ud fra tabelværdier, hvormed vandføringsevnen kan beregnes ud fra vandløbsopmålinger og vandstandsmålinger. Det skyldes at Manningtallet her alene bestemmes ud fra ruheden i bund- og kantmateriale. Dermed kan der laves  $Q/h$ -kurver uden måling af vandføringen. Det er dog stadig ikke lige så præcist som ved Manningtal bestemmelse med sammenhængende vandstands- og vandføringsmålinger.

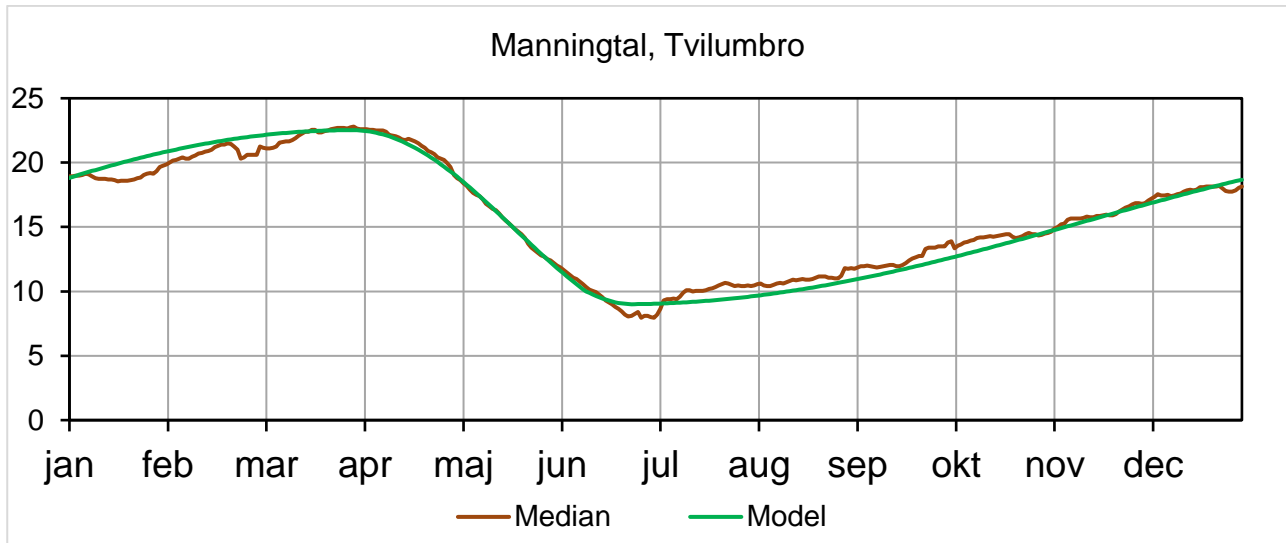
For grødefyldte vandløb er den hydrauliske modstand i høj grad bestemt af grøden. Med den varierende hydrauliske modstand er det derfor ikke muligt at lave  $Q/h$ -kurver uden opmålinger af både vandføring og vandstand.[19] Manningtallet i grødefyldte vandløb kan variere mellem 3 og 30, hvor det i nyanlagte retlinede kanaler kan være op til 50.[20]

#### 4.4.3 Manningtal bestemmelse på projektstrækningen

WSP har udleveret beregnede værdier for døgnværdier for Manningtal, for 6 målestationer på projektstrækningen, i VASP. WSP's version af VASP har en funktion, hvor der kan udtrækkes døgnværdier for henholdsvis vandstand og vandføring fra Hymer, til bestemmelse af Manningtal. Hymer er WSP's egen hydrometridatabase, hvor blandt andet vandstand for de 6 stationer på strækningen og vandføring for Tvilumbro, er gemt for de respektive målestationers levetid. Vandføringsdata på de øvrige stationer er beregnet ud fra vandføringen ved Tvilumbro, med de pågældende oplandsarealer. VASP-værktøjet matcher døgnværdierne for vandstand og vandføring på de forskellige stationer og beregner Manningtal for hvert døgn. Bestemmelsen bygger på Manningformlen, hvor den hydrauliske radius og gradienten, bestemmes ud fra det opmålte længdeprofil samt den målte vandstand. Se Bilag 4.4 for nærmere beskrivelse af Manningtal bestemmelse i VASP.

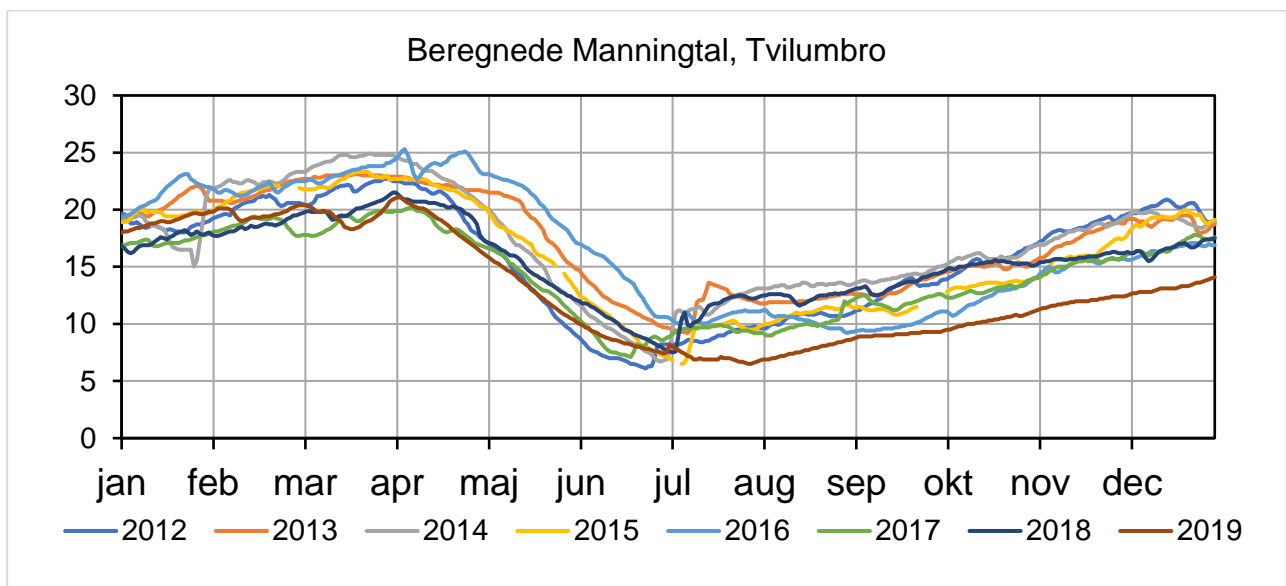
Manningtallene for stationen ved Ringvejen, Resebro, Tvilumbro og Kongensbro er bestemt fra 2012 til 2020. Begrundelsen for tidsperioden for data er beskrevet i afsnit 4.3.3. Manningtallene for stationen ved Svostrup og Nebelgårde bygger på de 8-10 måneder der er måledata for. Døgnværdierne for de resterende måneder af året, er bestemt i forhold til de nærmeste stationer. Se døgnværdier for Manningtal i Bilag 4.5.

Døgnværdierne er udtrukket fra sinuskurver, der angiver Manningtallenes variation over et år, for hver af de enkelte stationer. Kurverne er tilpasset de beregnede Manningtal fra VASP, og er justeret i top og bund efter minimum og maksimum Manningtal. Den er tilpasset så tidspunkterne for top og bund matcher. Manningtal for Tvilumbro er vist i Figur 4.2. For de resterende kurver henvises til Bilag 4.5 Manningtal.



Figur 4.2 - Manningtal til model, Tvilumbro

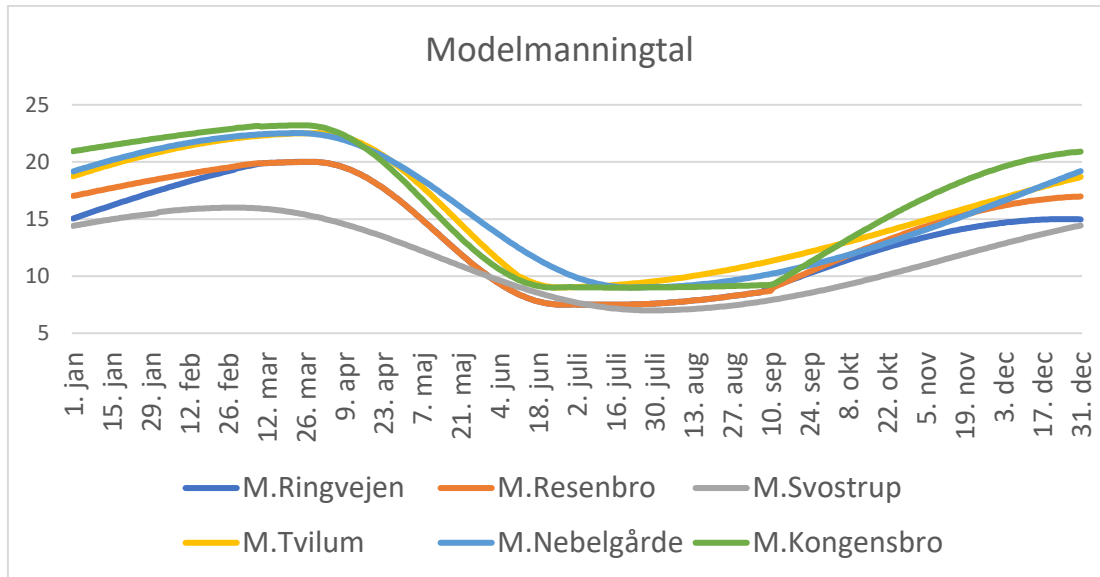
Ved brug af Manningtallene er det vigtigt at tage højde for de variationer der er midlet ud fra. Vurderes et plot af de beregnede Manningtal for Tvilumbro fra 2012 til 2020, er der midlet over et spænd på op mod 10 i værdien for Manningtal, for de enkelte dage. Se Figur 4.3.



Figur 4.3 - Beregnede Manningtal for Tvilumbro fra 2012-2020.

Ud over at variere fra dag til dag, og fra år til år, er der desuden store variationer i Manningtallene mellem strækningerne. Se Figur 4.4.





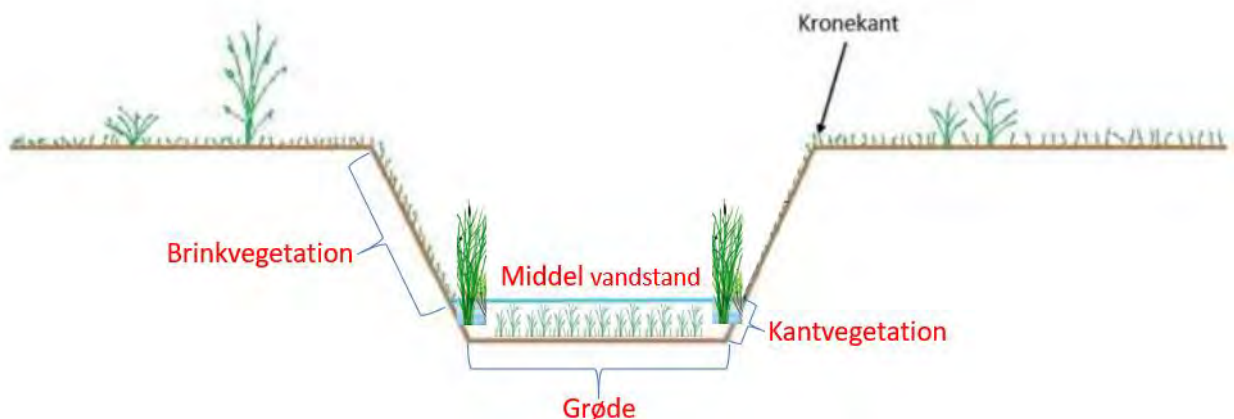
Figur 4.4 - Modelmanningtal for de 6 målestationer.

Døgnværdierne for Manningtallene, der er vist på Figur 4.4 omtales herfra som Modelmanningtal, da disse anvendes i det følgende modelarbejde.

Gudenåen går under betegnelsen grødefyldt vandløb på projektstrækningen, hvilket er årsagen til døgnvariationerne og årsvariationerne, som kan ses på de tre oven liggende figurer.

#### 4.4.4 Vandløbsvegetationens indvirkning på den hydrauliske modstand i Gudenåen

I afsnittet vil den hydrauliske påvirkning af grøde, brink- og kantvegetation på projektstrækningen blive beskrevet. På Figur 4.5 er illustreret en grov opdeling af placeringen af vegetationen. Mere specifik opdeling beskrives i afsnittet.



Figur 4.5 - Grov opdeling af placering af vegetation.

##### 4.4.4.1 Kant- og brinkvegetation på projektstrækningen

Kanterne og brinkerne langs projektstrækningen er i høj grad bevoget med tagrør, sødgræs og dunhammer. Det er svært at definere kant- og brinkvegetationens præcise modstandseffekt, fordi det afhænger af hvor meget vand, der strømmer ude i kantvegetationen. Modstanden øges med stigende strømning.

Hvorvidt der er strømning ude i kantvegetation eller ej kan bestemmes ved besigtigelse. På Figur 4.6 registreres strømningen i kantplanterne ved de skrå linjer efter planterne, samt bølgen lige før. På en optagelse vil planterne vibrere.



Figur 4.6 - Strømning gennem kantvegetation på projektstrækningen efterår 2019.

Hvor kantvegetationen er meget tæt, fungerer planterne tilnærmelsesvis som en indsnævring af vandløbsprofilet. Det kan have betydning for vandføringsevnen, særligt på smalle strækninger.

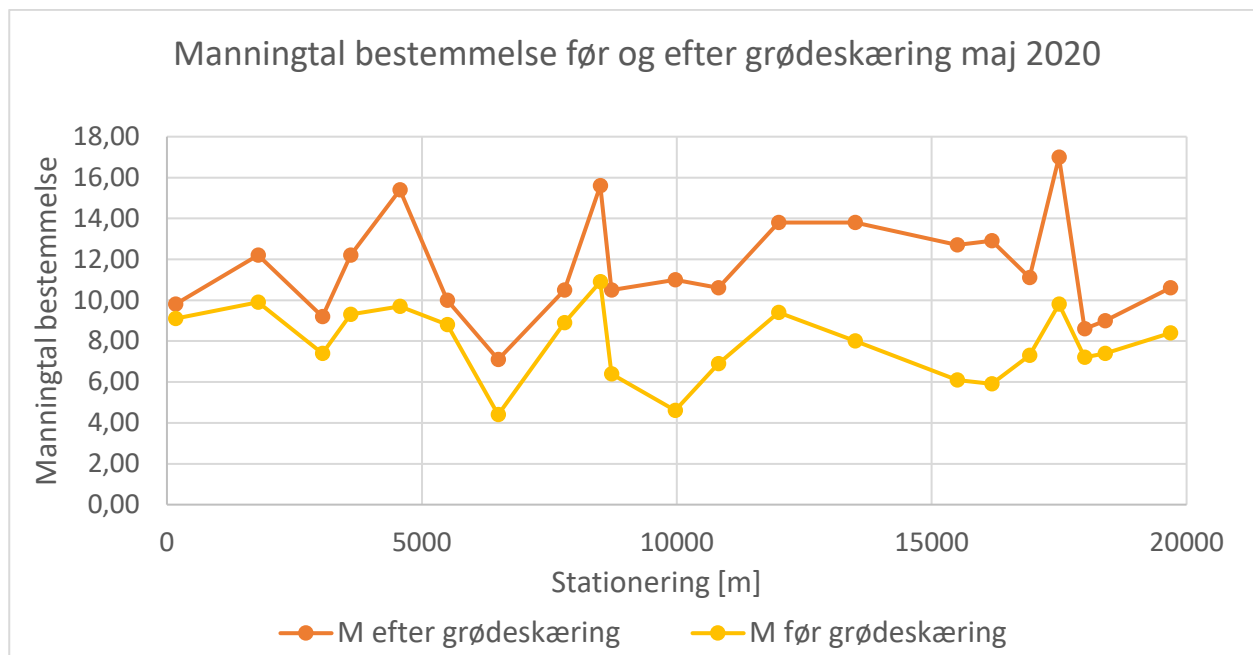
#### 4.4.4.2 Grøde og grødeskæring på projektstrækningen

Grødemængde, -art og -udbredelse ændrer sig på projektstrækningen som i andre naturlige vandløb. Se Bilag 4.6 for yderligere beskrivelse.

I 2019 blev det ved en gennemsejling vurderet, at strækningerne med tæt grøde var domineret af Børstebladet vandaks.

Ved grødeskæring på projektstrækningen oprettes en 7 m bred strømrønde iht. gældende regulativ[12]. Vandføringsevnen inden for strømrønden er markant bedre end udenfor, hvor dækningsgraden af vandplanter er større. Forskellen på dækningsgraden, henholdsvis udenfor og i strømrønden, varierer over strækningen samt efter sæson. Tilmed kan vandstanden og vandhastigheden have indvirkning på fordelingen.

I maj 2020 lavede WSP Manningtal bestemmelser før og efter grødeskæring på projektstrækningen. Se Figur 4.7. Hvor forskellen på Manningtallet før og efter grødeskæring er størst, har grødeskæringen den største virkning på vandføringsevnen. Det er forventeligt, at strækningerne med stor forskel på Manningtallet før og efter grødeskæring, har størst dækningsgrad af grøde generelt.



Figur 4.7 - Manningtal bestemmelse før og efter grødeskæring udarbejdet af WSP på projektstrækning i maj 2020. Se eksempel på beregning i Bilag 4.4.

## 5 Modelgrundlag

Der findes mange potentielle løsninger, for problemet med de høje vandstande i Gudenåen. For bedst muligt at kunne vurdere effekten af disse løsninger, kræves et solidt beslutningsgrundlag. Dette er præcis, hvad en model kan fungere som, forudsat at den er korrekt bygget op.

Der udvælges enkelte potentielle løsningsmuligheder, hvorefter de forsøges indsat i modellen. Resultaterne vil dernæst blive analyseret og vurderet.

Der gøres midlertidig brug af flere modelværktøjer i projekt. Til hvilke formål programmerne bliver brugt, kan læses herunder.

### 1. Stationære beregninger

Formålet er at bestemme Gudenåens kapacitet på strækningen. Til de stationære vandspejlsberegninger kan bruges modelleringsværktøjerne VASP og MIKE HYDRO. For sidstnævnte bliver det såkaldte River modul anvendt. Afstrømningsværdierne der indsættes, er konstante. Der opnås hermed et øjebliksbillede, for en specifik hændelse. Det at regne stationært er mindre tids- og beregningskrævende, men resultatet vil ikke nødvendigvis være tilsvarende præcist, som ved en dynamisk model. Der vil derfor blive foretaget en sammenligning mellem den stationære og den dynamiske model, for at bestemme førstnævntes nøjagtighed.

### 2. Dynamiske beregninger

Formålet er igen at bestemme Gudenåens kapacitet på strækningen. Her bruges ligeledes MIKE HYDRO. Værdierne der indsættes, er tidsvarierende input, suppleret af enkelte konstante. Der foretages simulationer for op til flere år ad gangen. Der udvælges det år, hvor den hændelse der ønskes undersøgt, indtræffer. De tidsvarierende input for dette specifikke år, indsættes efterfølgende som døgnmidler.

I efterfølgende underafsnit gives en introduktion til de anvendte programmer. Der vil her blive beskrevet anvendelsesmuligheder, begrænsninger, kompleksitet m.m.

#### 5.1 VASP

VASP er udviklet af WSP. De beskriver selv udgangspunktet for programmet som værende, *"...at brugeren hurtigt, sikkert og præcist skal kunne præsentere vandløbenes skikkelse og beregne vandspejlet ved forskellige afstrømningshændelser."* [21] Programmet benyttes i størstedelen af landets kommuner og rådgivere. Flere af programmets funktioner er kun tilgængelige i WSP's interne version. Herunder muligheden for opsætning af ådalsanalyse, som er anvendt i dette projekt.

Når VASP udfører dets beregninger, er det ud fra en forudsætning om, at der er stationære forhold til stede. For at programmet kan udføre en vandspejlsberegning, kræves der input af både fysiske samt hydrauliske data. Fysisk data indebærer opmålinger med tværsnitsprofiler. De hydrauliske data, omfatter vandoplade, Manningtal, afstrømninger m.m.

VASP anvendes i projektet primært til Manningtal bestemmelse samt ådalsanalyse.

Resultatet kan vises som vandstanden på et længdeprofil eller i et tværsnit.

#### 5.2 Mike Hydro

MIKE HYDRO fungerer som et hydrodynamisk 1-dimensionelt vandløbsmodelleringsprogram, og er en del af DHI's MIKE Zero pakke. Programmet gør det både muligt at modellere dynamiske forhold, men også at arbejde med koblede vandløb. Noget som VASP ikke formår. De ekstra muligheder er dog med til at øge kompleksiteten, og gør både opsætning og simulering mere krævende.

Programmet indeholder to moduler. De kaldes henholdsvis MIKE HYDRO River og MIKE HYDRO Basin. Kun førstnævnte er brugt i dette projekt, og er udelukkende anvendt til modellering af vandløbshydraulik. En stor fordel ved programmet er, at det både kan simulere stationære og dynamiske forhold. I dette projekt benyttes begge dele.

Ligeledes kræver MIKE HYDRO input af både fysiske samt hydrauliske data, for at en vandspejlsberegning kan udføres. Fysisk data indebærer også her opmålinger med tværsnitsprofiler. Hydrauliske data indebærer bl.a. Manningtal, vandstandsdata og afstrømninger. Vandløbsoplande indgår indirekte, da disse er anvendt til at bestemme tilløbsafstrømningerne. Ved dynamiske beregninger kræves desuden en tidsserie, hvor variationen for det specifikke input over tid beskrives.

Resultatet kan vises som forskellige typer af plots, med mulighed for animeret fremvisning over tid.

### 5.3 Excel

Excel er et særdeles stærkt regneprogram, der er i stand til at regne på store dataserier. Programmet benyttes til at behandle udvalgte beregnede vandstande fra MIKE HYDRO River, som herefter tilpasses i forhold til en observeret vandstand ved 6 målestationer. Det er muligt at kode "celler" for input-data, således Excel udvælger en given række og herefter udfører ønskede beregninger.



## 6 Vandløbsberegninger

Følgende afsnit omhandler vandløbsberegninger, der er foretaget for henholdsvis den stationære og dynamiske model. Der beskrives kort, hvordan de respektive modeller er sat op. For en mere dybdegående forklaring af opsætningen samt begrundelse for valgte parametre, henvises til Bilag 6.1. Resultaterne fra udvalgte vandløbsberegninger analyseres og vil efterfølgende blive vurderet.

Resultater fra øvrige vandspejlsberegninger findes i Excel-Bilag 6.1 og 6.2.

Der er udarbejdet en guide til opsætning af model i MIKE HYDRO River. Se Bilag 6.4.

Modelberegningerne illustrerer en fremtidig situation i den forstand, at de viser, hvilken effekt en given afstrømningshændelse ville have på vandløbet, hvis den indtraf under nuværende skikkelse og med døgnmedianværdier for Manningtal. Sidstnævnte er bestemt med hydrometridata fra perioden 2012 - 2020.

### 6.1 Stationære beregninger

De stationære beregninger er lavet i MIKE HYDRO River. Den stationære model bygger på konstante input, og der vil dermed ikke være variationer over tid. Stationære forhold forekommer dog yderst sjældent i vandløb. Modellen fungerer derfor som en simplificering af virkeligheden, og giver blot et øjebliksbillede af en given situation.

Den stationære model fungerer primært som et sammenligningsgrundlag for den dynamiske model, og der vil derfor kun foretages en kort analyse af resultaterne.

#### 6.1.1 Opsætning

##### 6.1.1.1 Tværsnit

Tværsnits- og vandløbsprofil er udleveret af samarbejdspartner WSP. Tværsnitsprofilerne er på forhånd blevet udvidet vha. en højdemodel, for at få mere af ådalen med. Alle profiler har en bredde på mellem 50 og 250 m, hvoraf størstedelen ligger omkring 100 m.

Selve opmålingen er udført af erfarne folk, og med moderne teknologi.[22] Punkterne i opmålingen ligger tæt på hinanden, og afstanden mellem hvert profil er ligeledes lille. Opmålingen vurderes dermed at være af god kvalitet.

Vandstande højere end yderste kantpunkter kan potentielt forekomme. I denne situation vil kantpunkterne forlænges lodret opad, og bredden vil dermed forblive den samme for øgede vandstande.

##### 6.1.1.2 Manningtal

Værdier for Manningtallene indsættes for en given station. Der indsættes for hvert af de seks stationer, hvor data er tilgængelig. De mellemliggende værdier bestemmes ud fra en lineær interpolation.

Der arbejdes i den stationære model kun med konstante værdier. De indsættes for den specifikke situation, der ønskes undersøgt. For at kunne generere en konstant værdi, udregnes på forhånd en middelværdi for den gældende situation. Det anvendte Middelmanningtal, er beregnet med afsæt i Modelmanningtallene. For nærmere beskrivelse, se afsnit 4.4.3. De anvendte værdier findes i Excel-Bilag 6.3

##### 6.1.1.3 Randbetingelser

I alt defineres 13 forskellige randbetingelser. Fælles for dem alle gælder det, at inputværdierne er konstante. Øvre og nedre rand er valgt som værende henholdsvis en afstrømning og en vandstand. Afstrømningsværdien beskriver, hvor meget vand der tilføres modellen opstrøms Ringvejen, mens vandstanden beskriver koten i Tange Sø. Ydermere tilføjes de fem større sidetilløb som punktkilder. Der er

her tale om Linå, Gjern Å, Allinge Å, Gjel Å samt Borre Å. Til sidst tilføjes seks værdier for tilvækst i vandføring, som følge af det voksende opland.

#### 6.1.1.4 Simulering

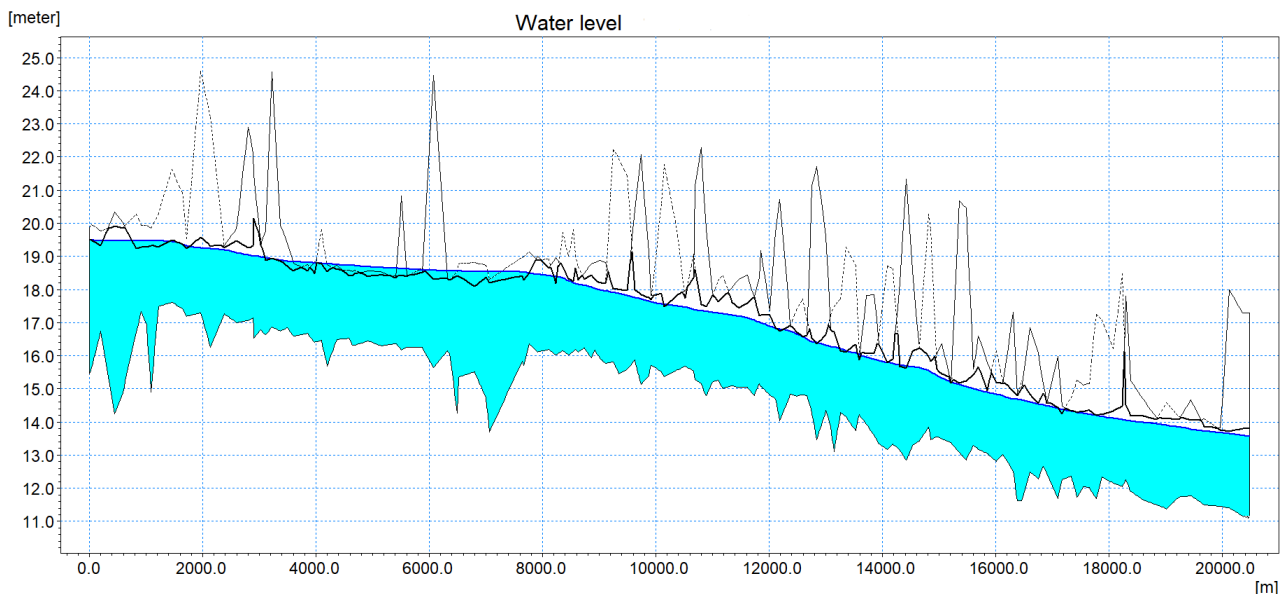
Inputværdierne er konstante. Beregningspunkter dannes med et mellemrum på 50 m.

#### 6.1.2 Analyse

Der udvælges tre hændelser til analysen. Det er henholdsvis årsmiddel, medianmaksimum og sommermedianmaksimum. Netop de hændelser er valgt, fordi de fordeler sig godt over året. Ydermere er det fremvist af simuleringer, at Gudenåens kapacitet ved middelfløjninger er tæt på fuldt udnyttet. Der vurderes at være større beregningsusikkerheder på ekstremhændelser, fordi hele det oversvømmede areal ikke indgår i opmålingen.

Til at analysere på resultatvandspejlene anvendes MIKE View og Excel.

##### 6.1.2.1 Årsmiddel

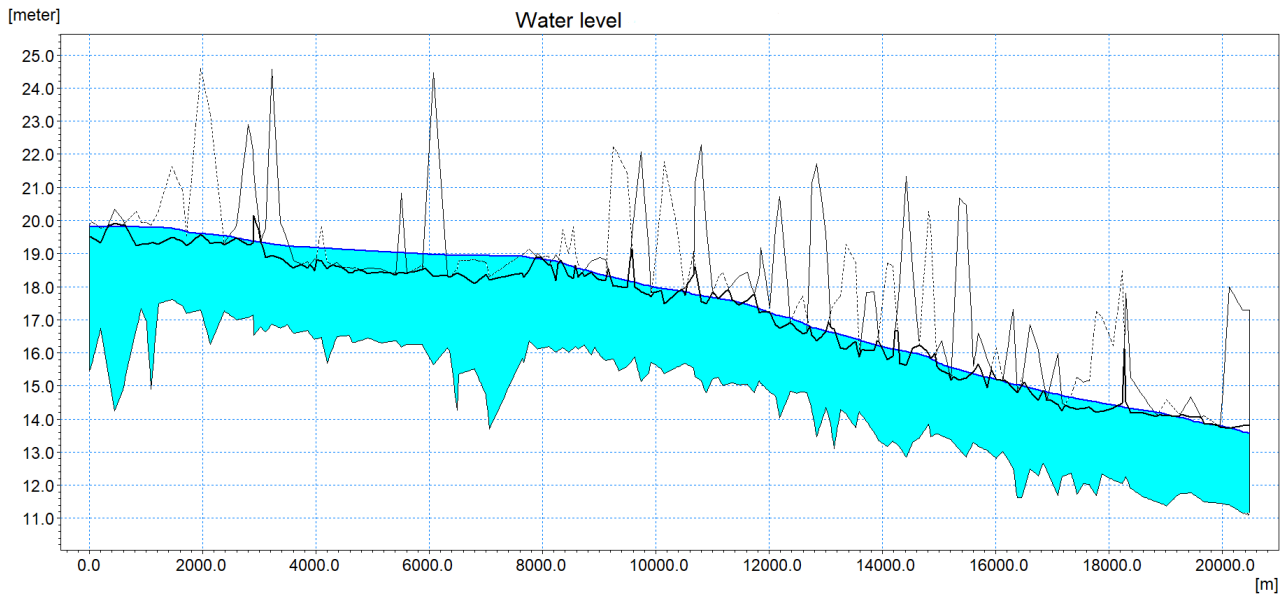


Figur 6.1 – Længdeprofil af vandstand ved årsmiddelhændelse, stationær MIKE View. Venstre bred er markeret med en tynd sort linje, imens højre bred er en tynd sort solid linje. Den tykke sorte linje markerer den laveste af de to bredder.

Der observeres generelt en høj vandstand ved en årsmiddelvandføring. Kapaciteten indenfor vandløbsprofilet er gennemgående tæt på at være maksimalt udnyttet. Det illustreres bl.a. ved, at vandstanden i gennemsnit kun ligger 13 cm under laveste bred. Flere steder går vandet langt over den laveste bred, hvor det værste tilfælde er 45 cm.

Den mest kritiske strækning er opstrøms Sminge Sø. Se Figur 6.1, st. 4000-7000. Her er begge bredder oversvømmet på næsten hele strækningen. Hertil skal det bemærkes at åen ligger i en flad ådal og bundhældningen på strækningen er flad.

### 6.1.2.2 Medianmaksimum



Figur 6.2 – Længdeprofil af vandstand ved medianmaksimumhændelse, stationær MIKE View. Venstre bred er markeret med en tynd sort linje, imens højre bred er en tynd sort solid linje. Den tykke sorte linje markerer den laveste af de to bredder.

Den mest kritiske strækning er mellem Ringvejen og Sminge Sø. Se Figur 6.2, st. 0-7000. Her er begge bredder oversvømmet på næsten hele strækningen.

Der er yderligere simuleret for en sommermedianmaksimumhændelse. Resultatet er tilnærmelsesvist det samme som ovenstående. For nærmere beskrivelse henvises til Bilag 6.1.

Oversvømmelserne vurderes at se voldsommere ud på plottet end i virkeligheden, fordi ådalen her vil have tilpasset sig de våde forhold. Dette stemmer overens med naturtyperne i området, hvor der bl.a. findes våd eng og moser. Se Bilag 3.3 for udpegning af naturtyper på strækningen.

### 6.1.3 Delkonklusion

Der observeres generelt høje vandstande. Kapaciteten er tæt på fuldt udnyttet allerede ved en årsmiddelhændelse. Allerede ved mildere ekstremhændelser bliver vandløbsprofilen i høj grad overudnyttet. Ved 5-, 10- og 20-års hændelser, vil situationen således blive endnu værre.

Rent visuelt ville det have set mindre voldsomt ud, hvis profilerne var forlænget ud til, hvor ådalen stiger. Beregningsmæssigt ville dette give forkerte resultater, fordi Modelmanningtallene er bestemt for det opmålte profil. En efterfølgende udvidelse af tværsnittene, ville resultere i for lav strømningsmodstand i det samlede profil og dermed for lave vandstande. Derfor er profilerne ikke udvidet.

Ovenstående resultater vil senere blive sammenlignet og vurderet med henblik på det dynamiske modeloutput. Se afsnit 6.3.

## 6.2 Dynamiske vandløbsberegninger

De dynamiske beregninger er ligeledes lavet i MIKE HYDRO River. Den dynamiske model bygger på varierende input, og viser dermed variationer over tid. Modellen viser en mere nuanceret udgave af virkeligheden, end blot et øjebliksbillede for en given situation.

### 6.2.1 Opsætning

#### 6.2.1.1 Tværsnit

Samme beskrivelse som for den stationære model. Se afsnit 6.1.1.1.

#### 6.2.1.2 Manningtal

I den dynamiske model varierer Manningtallet over tid og for en givet strækning. Værdier for Manningtal er indsat som døgnværdier for et år fra Modelmanningtalskurven. Se afsnit 4.4.3. Der er igen brugt data fra 6 stationer. I den dynamiske model indtastes værdien for en strækning kontra et enkelt punkt, og der vil dermed ikke blive foretaget lineær interpolation. Anvendte værdier findes i Excel-Bilag 6.3.

#### 6.2.1.3 Randbetingelser

I alt defineres 13 forskellige randbetingelser. For 12 af dem gælder det, at inputværdierne er indsat som døgnværdier for ønskede simulerede periode. Kun vanstandskoten i Tange Sø er valgt som værende konstant. Øvre og nedre rand er valgt som værende henholdsvis en afstrømning og en vandstand, hvor afstrømningsværdien beskriver, hvor meget vand der tilføres modellen opstrøms Ringvejen. Ydermere tilføjes de fem større sidetilløb som punktkilder. Til sidst tilføjes seks værdier for tilvækst i vandføring, som følge af det voksende opland.

#### 6.2.1.4 Simulering

Simuleringsperioden afhænger af den valgte hændelse. Der simuleres enten for et helt år eller udvalgte sommer- eller vinter måneder. Vinter strækker sig fra oktober til og med april, mens sommer strækker sig fra maj til og med september.

Ekstremhændelser er valgt til at indtræffe midt i en specifik måned, som et forsøg på at skabe det bedst mulige sammenligningsgrundlag. Vinterhændelsen er valgt til at indtræffe i januar og sommerhændelsen i september. Dette skyldes primært grødens årlige variation, som kan resultere i store forskelle på vandstande for den samme hændelse, alt efter hvornår den indtræffer. Den præcise betydning analyseres i afsnit 6.2.3.

Der er to primære grunde til, at netop månederne januar og september er valgt. Den første grund er, at ekstremhændelserne statistisk set ofte forekommer i disse måneder. Dernæst har begge måneder værdier for Modelmanningtal, der ligger relativt tæt på gennemsnittet, for henholdsvis sommer- og vinterperioden. Se Excel-Bilag 4.1.

Beregningspunkter dannes med et mellemrum på 50 m. Tidsskridt for simuleringen er valgt i intervallet 1-60 sekunder.

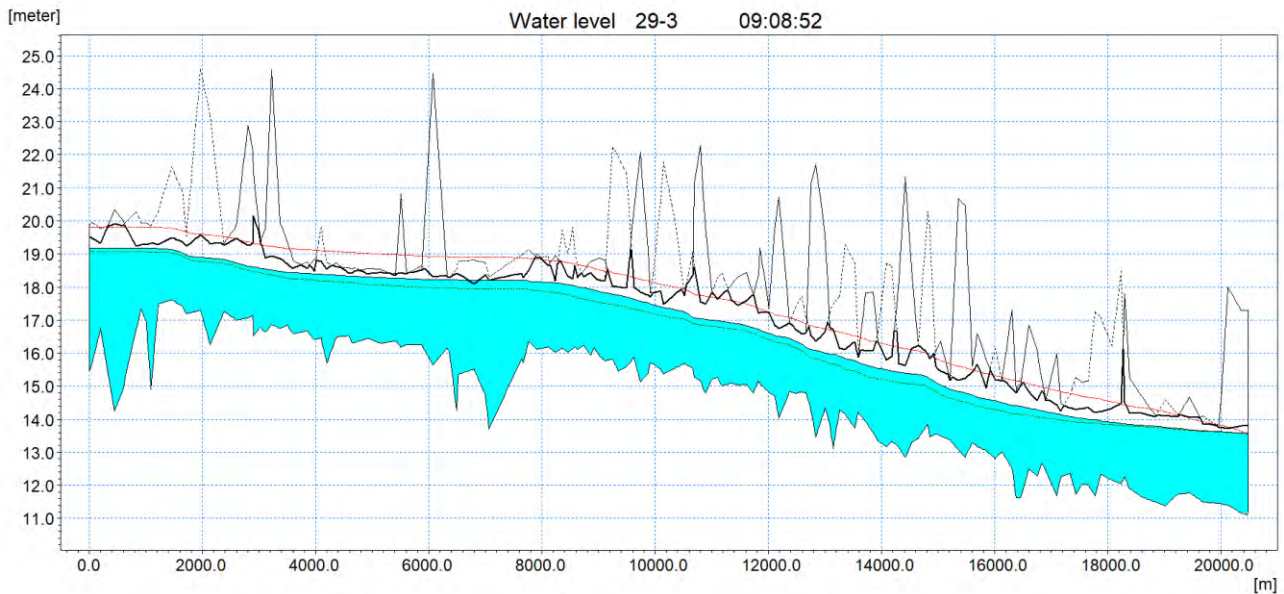
### 6.2.2 Analyse

Der udvælges tre hændelser til analyse. Først undersøges et helt år. Afstrømningsværdier indsættes for året 2012, hvor årsmiddel-afstrømningen bl.a. forekommer. Der undersøges både for et specifikt tidspunkt, hvor en årsmiddelfafstrømning indtræffer, samt variationer i vandstands niveau, der forekommer i løbet af året.

Derudover undersøges en medianmaksimum- og sommermedianmaksimumhændelse.

Til at analysere på resultatvandspejlene anvendes værktøjerne MIKE View, Excel samt "Ådalsanalyser" i WSP's version af VASP.

### 6.2.2.1 Undersøgelse af årsvariationer



Figur 6.3 – Længdeprofil af vandstand ved årsmiddelhændelse forekommende den 29. marts, dynamisk MIKE View. Den øvre røde stiplede linje viser den maksimale vandstand for pågældende år, imens den nedre grønne viser den minimale. Venstre bred er markeret med en tynd sort linje, imens højre bred er en tynd sort solid linje. Den tykke sorte linje markerer den laveste af de to bredder.

Figur 6.3 illustrerer variationer i vandstanden over et år. Den aktuelle vandstand på billedet er fra den 29. marts, hvor afstrømning svarende til en årsmiddelhændelse indtræffer. For analyse af den specifikke situation, henvises til bilag 6.1.

Der forekommer store vandstandsvariationer i løbet af det undersøgte år. Simuleringen er kørt med afstrømningsværdier for 2012. Nedenstående tabel viser afstrømningsværdierne sammenlignet med et gennemsnit for de seneste 30 år.

Tabel 6-1 – Sammenligning af afstrømningsværdier for 2012 og perioden 1990-2020

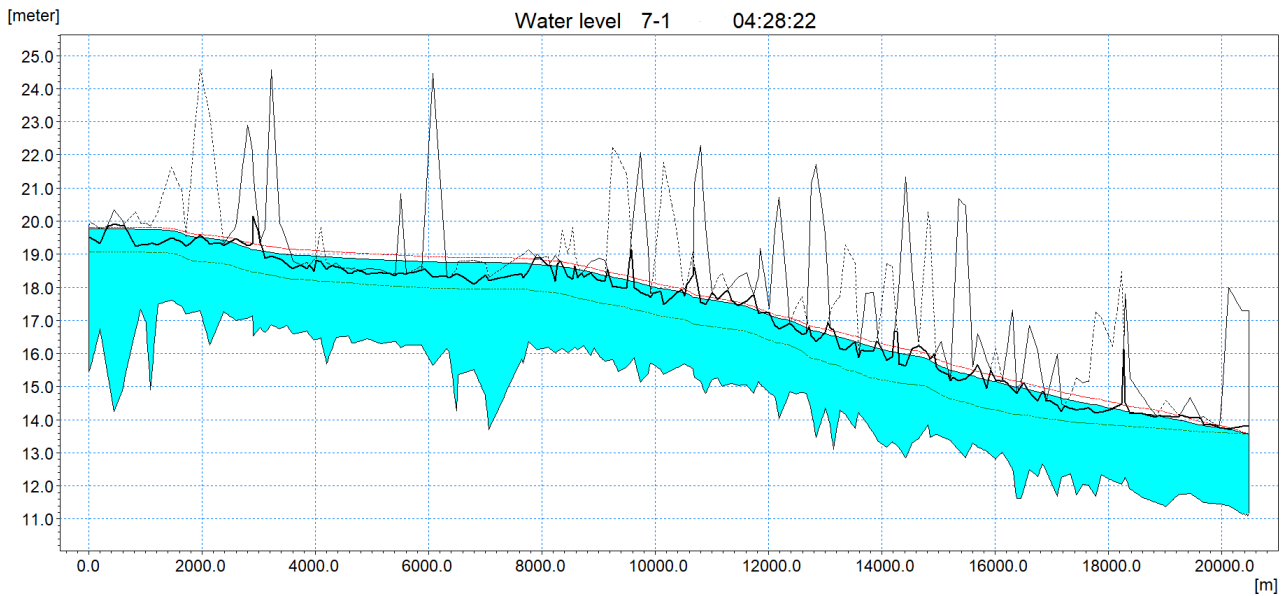
	Årsmiddel [L/s/km <sup>2</sup> ]	Sommermiddel [L/s/km <sup>2</sup> ]	Vintermiddel [L/s/km <sup>2</sup> ]	Maksimum [L/s/km <sup>2</sup> ]
2012	13,2	9,3	15,9	22,8
Gns. 1990-2020	13,0	8,6	16,1	40,6

Den højst forekommende afstrømningsværdi for året 2012 er 22,8 L/s/km<sup>2</sup>. Værdien ligger tæt under medianmaksimum for de seneste 30 år. Se Tabel 4-2. Ud fra ovenstående tabel vurderes året 2012, at være et tilnærmelsesvist gennemsnitligt år med henblik på afstrømningsværdier.

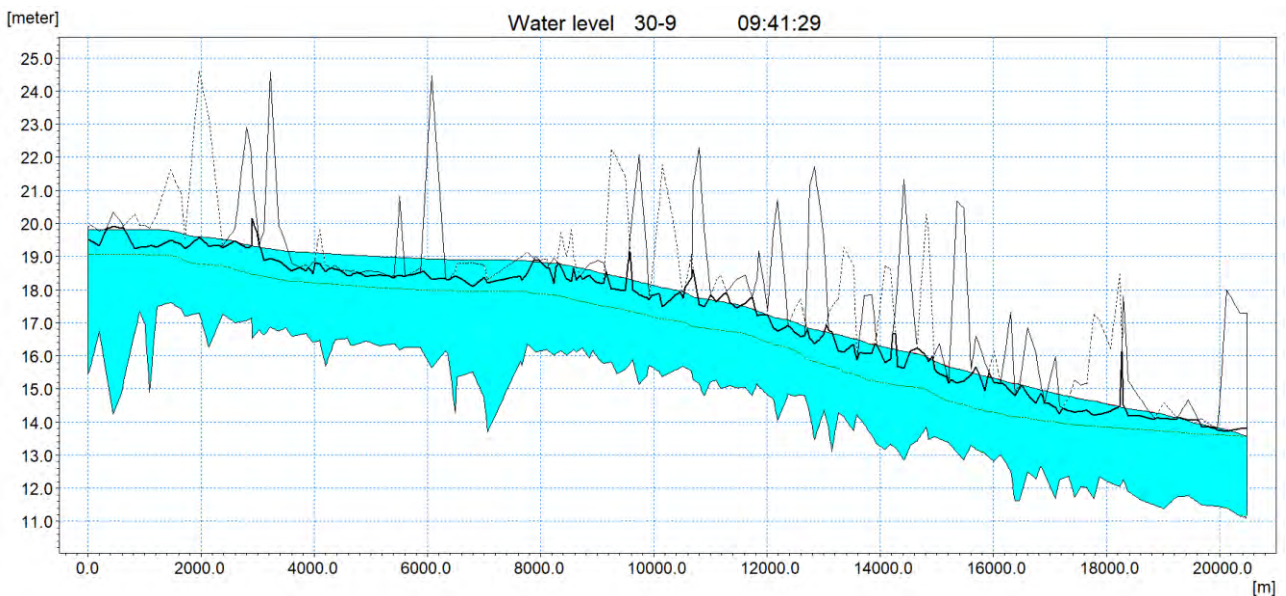
Ovenstående situation vurderes derfor at afspejle en tilnærmelsesvist gennemsnitlig situation med den nuværende skikkelse og grødeforhold.

Vandstanden varierer i gennemsnit 86 cm over strækningen, og enkelte steder forekommer variationer på op til 1,1 m. Flere steder går vandet langt over kronekant, hvor det værste tilfælde er 80 cm vand over laveste bred. De høje vandstande forekommer ikke kun om vinteren. Se Figur 6.4 og Figur 6.5.





Figur 6.4 – Længdeprofil af vandstand ved maksimumhændelse for vintermånederne, som indtræffer den 7. januar, MIKE View



Figur 6.5 – Længdeprofil af vandstand ved maksimumhændelse for sommermånederne, som indtræffer den 30. september, MIKE View

Om vinteren er vandstanden tæt på årsmaksimum, med højeste vandstand for vinterperioden den 7. januar. Se Figur 6.4. Vandstanden er for det specifikke år højest om sensommeren, den 30. september. Se Figur 6.5.

Tidspunkterne for minimumsværdierne, for henholdsvis sommer- og vinterperioden, er den 6. juni og 8. april. For øvrige vandstande henvises til Excel-Bilag 6.2.

De høje vandstande undersøges nærmere ved udvalgte stationer.

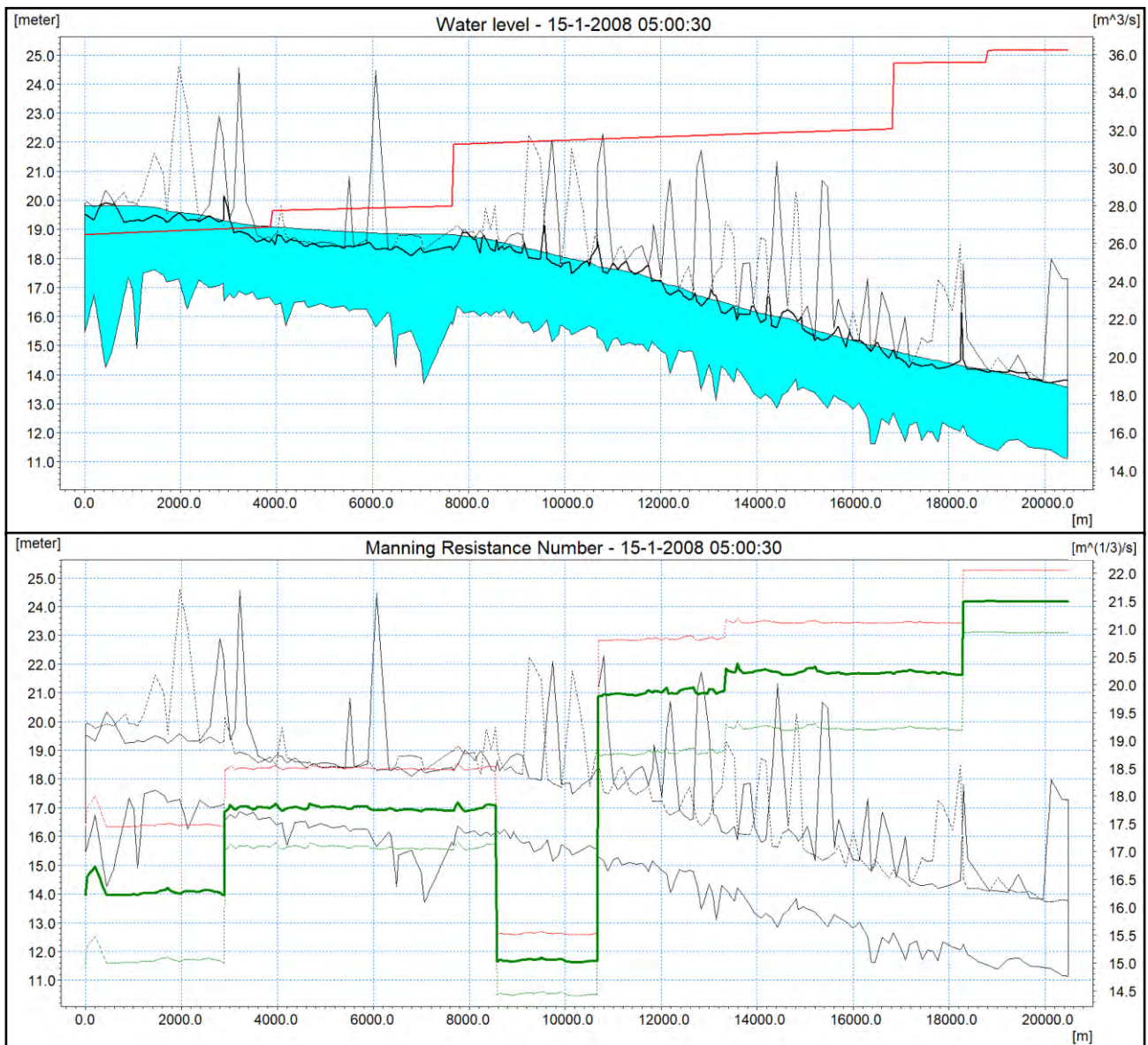
Tabel 6-2 – Antallet af dage kapaciteten af åen overskrides i et tilnærmelsesvist gennemsnitligt år for udvalgte stationer

Station	Lokation	Dage hvor kapacitet overskrides (dage)	Dage hvor kapacitet overskrides (%)
144	Ringvejen	190	52,1
3051	Resenbro	0	0
6410	Opstrøms Sminge Sø	244	66,8
8729	Svostrup	22	6
10807	Tvilum	0	0
13500	Nebelgårde	218	59,7
18485	Kongensbro	11	3

Tabel 6-2 viser overskridelser af kapaciteten mere end 50 % af året for både Ringvejen, Opstrøms Sminge Sø samt Nebelgårde. Det undersøgte år er vurderet som værende gennemsnitligt, og overskridelserne kan dermed også vurderes at være tilnærmelsesvist gennemsnitlige. Vurderingen af oversvømmelserne følger beskrivelsen i afsnit 6.1.2.2, hvor flere steder bekræftes at være tilpasset våde forhold, hvorfor beskrivelsen "oversvømmelse" kan diskuteres.

Der laves ikke en ådalsanalyse for de maksimale hændelser forekommende i dette år. Som tidligere beskrevet ligger den maksimale afstrømningsværdi for året tæt på medianmaksimum. Konsekvenserne af overskridelserne kan derfor tænkes at være tilnærmelsesvis de samme. I de kommende to underafsnit vil der vha. ådalsanalyser undersøges konsekvenser for en medianmaksimum- og sommermedianmaksimum-hændelse.

### 6.2.2.2 Medianmaksimum



Figur 6.6 – Øverst illustreres længdeprofil af vandstand ved medianmaksimumhændelse. Nederst illustreres Manningtallets variation over strækningen. Begge tilfælde er fra den 15. januar. Årstallet afspejler kun det år afstrømningshændelsen indtraf. Vandføringsværdien er afbilledet som en rød solid linje på øverste del af figuren. På nederste del er værdien for Manningtallet vist med en grøn solid linje. Værdien for denne kan aflæses på den sekundære lodrette akse. De stiplede linjer angiver henholdsvis minimum- og maksimumværdien for Manningtallet den simulerede måned.

Ovenstående figur viser vandstand, vandføring og Manningtal for strækningen ved en medianmaksimumhændelse. De små variationer på Manningtallet undervejs på de vandrette strækninger beskrives nærmere i Bilag 6.3.

Vandspejlet ligger generelt højt, og overskrider laveste bred de fleste steder. Værst står det til i starten omkring Ringvejen samt opstrøms Sminge Sø. Fælles for strækningerne gælder det, at de er relativt flade, hvorfor stuvningspåvirkninger generelt er større. Manningtallet er ligeledes lavere på første del af strækningen end på den sidste.



De høje vandstande ved st. 0 er ensbetydende med en høj vandstand i Silkeborg Langsø, hvilket potentielt kan skabe problemer for de omkringliggende områder. En kritisk kote for vandstanden i Silkeborg Langsø vil blive præsenteret i afsnit 7.

På strækningen opstrøms Sminge Sø observeres der meget høje vandstande, som næsten konsekvent ligger over begge kronekanter. Hældningen på vandspejlet er desuden fladere end hældningen af bunden, hvilket indikerer en stuvningspåvirkning.

Der observeres lave Manningtal mellem Svostrup og Tvillum, men det store fald på vandspejlet kan være med til at sænke effekten af dette. Efter Tvillum fortsætter det store fald, imens der samtidig kommer mindre modstand. Vandstanden er derfor her lavere end for den resterende strækning.

Påvirkningen af ådalen og det omkringliggende landskab for hele strækningen, findes i Bilag 6.2. Som tidligere illustreret i Tabel-4, er der indikationer på problemer med kapaciteten omkring Nebelgårde. Ådalsanalysen viser dog, at konsekvenserne af denne overskridelse er minimale.

Første del af strækningen vurderes i stedet at være mest kritisk, og er vist på Figur 6.7.



Figur 6.7 – Uddrag af ådalsanalyse for strækningen mellem Ringvejen og Svostrup, medianmaksimum

Generelt observeres der høj vandstand i ådalen. Ringvejen og strækningen opstrøms Sminge Sø er som forventet hårdest ramt. Sidstnævnte især, hvor de høje vandstande har medført oversvømmelse på begge sider af åen, over en strækning på flere kilometer. Det kan potentielt skabe konsekvenser for nærliggende

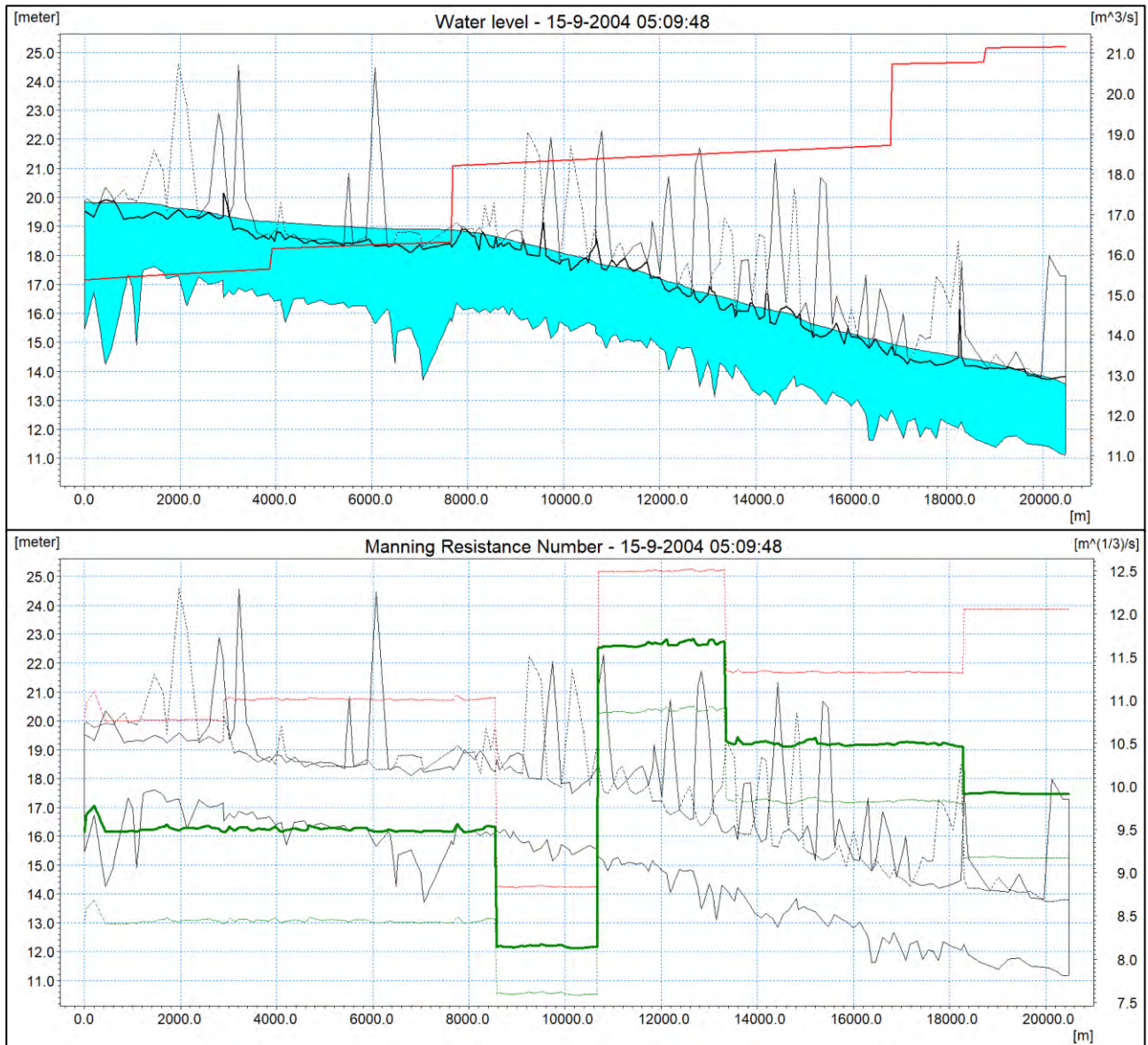
arealer på disse strækninger. F.eks. i form af vand i kælderen i de vandløbsnære boliger, ødelagte afgrøder for landmændene eller oversvømmelser på Trækstien.

Arealerne på denne strækning består primært af vådområder, og konsekvenser af oversvømmelser må dermed vurderes at være små. Trækstien vil dog være dækket af en betydelig mængde vand på hele strækningen.

Dertil skal det medregnes, at ovenstående situation i gennemsnit vil ske hver andet år. Mere ekstreme hændelser vil også forekomme, hvilket kan medføre langt større konsekvenser. F.eks. er den gennemsnitlige forskel på vandspejlet for en medianmaksimum- og en 20-årshændelse 34 cm, og må derfor vurderes at kunne skabe markant større oversvømmelser. For forskelle på vandspejlet for de forskellige hændelser, henvises til Excel-Bilag 6.2.



### 6.2.2.3 Sommermedianmaksimum



Figur 6.8 – Øverst illustreres længdeprofil af vandstand ved sommermedianmaksimumhændelse. Nederst illustreres Manningtallets variation over strækningen. Begge tilfælde er fra den 15. september. Årstallet afspejler kun det år afstrømningshændelsen indtraf. Vandføringsværdien er afbilledet som en rød solid linje på øverste del af figuren. På nederste del er værdien for Manningtallet vist med en grøn solid linje. Værdien for denne kan aflæses på den sekundære lodrette akse. De stiplede linjer angiver henholdsvis minimum- og maksimumværdien for Manningtallet den simulerede måned.

Forskellen i vandspejlet for en sommermedianmaksimumhændelse og en medianmaksimumhændelse er minimal. Både ift. niveau og forløb. Dette på trods af store afvigelser for afstrømnings- og Modelmanningtalsværdier for de to hændelser. Sommerhændelsen har markant lavere vandføring, men også markant lavere Manningtal. De to parametre opvejer derfor tilnærmelsesvis hinanden.

De mindre forskelle der trods alt forekommer, er størst på sidste del af strækningen. Mere specifikt omkring Kongensbro ved st. 18500. Vandstanden er her en anelse højere for sommerhændelsen. Denne forskel forklares ved en sammenligning af nederste halvdel på henholdsvis Figur 6.6 og Figur 6.8. På førstnævnte figur ligger værdien højere end for resten af strækningen, hvorimod den for sidstnævnte figur ligger mere gennemsnitligt. Det resulterer i større modstand, og dermed den højere vandstand.

Påvirkningen af ådalen og det omkringliggende landskab for hele strækningen, findes i Bilag 6.2 Ådalsanalyse. Grundet de minimale forskelle på vandspejlsniveauet, er resultatet af ådalsanalysen for sommer- og vinterhændelsen nærmest identisk.

### 6.2.3 Vurdering af nøjagtighed på modeloutput

Det kommende afsnit beskriver konklusionen af følsomhedsanalyse for den dynamiske model. For nærmere beskrivelse, henvises til Bilag 6.3.

Grundmodellen er overordnet følsom. Primært pga. Manningtallenes store variation. En hændelse der indtræffer i en måned, hvor Manningtallet er anderledes end for en gennemsnitlig måned for den gældende periode, kan resultere i store afvigelser. Det skal dog medregnes, at chancen for at en ekstremhændelse forekommer på de undersøgte tidspunkter, ikke er særlig stor.

Modellens følsomhed, er til en vis grad forventeligt. Mange af parametrene er bestemt af naturen, som generelt er meget varierende og uforudsigelig. Modellen vurderes derfor at ramme tæt på virkeligheden, og derfor stadig at være anvendelig.

### 6.2.4 Delkonklusion

Der observeres generelt høje vandstande, selv ved mindre ekstreme hændelser. Kapaciteten af åen er hurtigt opbrugt, og den resterende ådal inddrages derfor ofte. Kapaciteten er i et gennemsnitligt år overskredet mere end 50 % af tiden, flere udsatte steder. De mest udbredte oversvømmelser sker ved strækningerne omkring Ringvejen og opstrøms Sminge Sø.

Vandstands niveauet er nærmest ensartet for både sommer og vinter. Det vurderes primært at skyldes grødens store variation i løbet af året. De høje vandstande om sommeren har konsekvenser for brugere af Trækstien samt de mange andre udendørsaktiviteter der finder sted i og omkring åen, grundet Silkeborgs status som Danmarks outdoorhovedstad.

Grødens store variationer er desuden medvirkende til, at modellen overordnet set er følsom. Variationerne sker både fra år til år samt i løbet af året. Der kan dermed forekomme afvigelser, hvis grødemængden et år generelt er større eller mindre end normalt, og hvis en hændelse indtræffer i en mere atypisk måned end normalt.

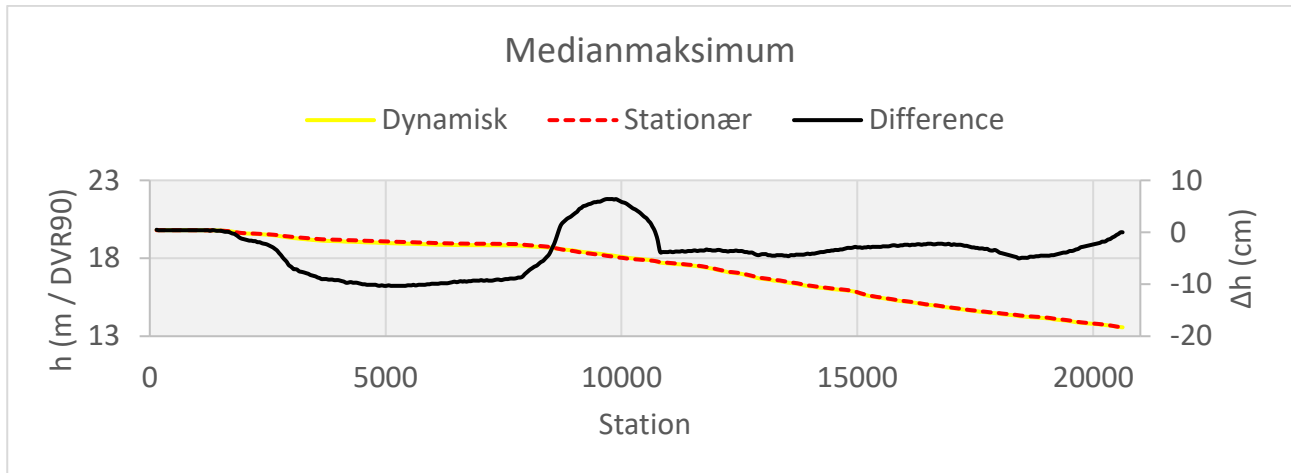
## 6.3 Sammenligning af dynamiske og stationære vandløbsberegninger

Dette afsnit omhandler forskelle mellem den stationære og dynamiske Grundmodel. Fordele og ulemper ved de to modeller vil blive afvejet, hvorefter en vurdering af modellernes anvendelighed vil blive foretaget.

### 6.3.1 Sammenligning

Den primære forskel på de to modeller er, at inputs i den dynamiske model er tidsvarierende. I den stationære er det ikke tilfældet, og den viser således blot et øjebliksbillede for en given situation.

Der er foretaget en sammenligning mellem simuleringerne for de to modeller, se Excel-Bilag 6.5. Differencen mellem vandspejlene for de forskellige hændelser er ensartede og følger tilnærmelsesvis den samme kurve. Der vil derfor kun analyseres på en hændelse, og denne vurderes at være gældende for de resterende. Hændelsen der undersøges, er medianmaksimumhændelsen, se Figur 6.9.

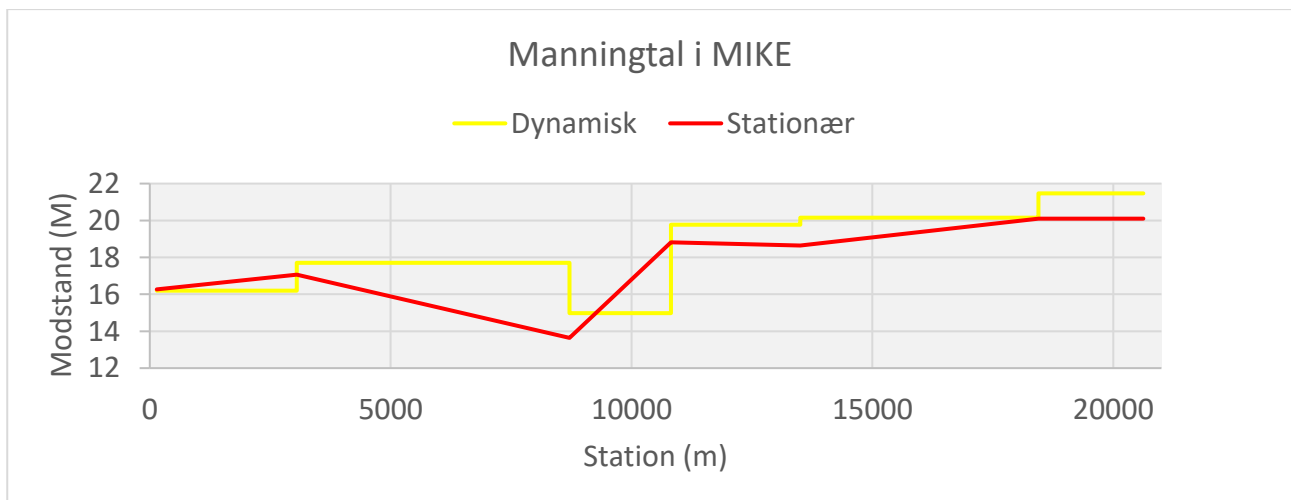


Figur 6.9 – Medianmaksimum-hændelse, sammenligning mellem stationær og dynamisk model

De to modeller har tilnærmelsesvis samme vandspejl. Der forekommer en forskel på maksimalt 10 cm, imens den gennemsnitlige forskel ligger under 5 cm.

Differencen fremkommer ved at trække vandspejlet for den stationære simulering, fra vandspejlet for den dynamiske. Da differencen på størstedelen af strækningen er negativ, er det ensbetydende med at vandspejlet fra den stationære simulering generelt er en anelse højere. Den primære grund hertil, vurderes at være forskelle i Manningtal for de to modeller. I den dynamiske model indtræffer hændelsen i januar. Januar måned har i gennemsnit et marginalt højere Manningtal sammenlignet med et gennemsnit for hele vinterperioden, hvilket kan have resulteret i den mindre forskel. For nærmere indsigt i Modelmanningtal for de to modeller, henvises til Excel-Bilag 6.3. Modelmanningtallets variation over året, er desuden illustreret på figur 4.4.

Figur 6.10 viser, at de største forskelle forekommer på strækningen mellem st. 3.500 og 11.000. Frem til omkring st. 8500 er differencen negativ, imens differencen derfra skifter til at være positiv. Dette spring tilskrives forskellen på, hvordan Manningtallet defineres i MIKE HYDRO River, for henholdsvis den stationære og dynamiske model. Indsætning af modstande for de to modeller beskrives i afsnit 6.1.1.2 og 6.2.1.2. En grafisk sammenligning er vist på Figur 6.10.



Figur 6.10 – Sammenligning af Manningtallets variation over strækningen for de to modeller

Det er på føromtalt strækning, mellem st. 3.500 og 11.000, at der sker de største afvigelser. Det er igen omkring st. 8.500, at det mest markante spring forekommer. Før dette punkt ligger Manningtallet brugt i den dynamiske model højere end det for den stationære, hvilket resulterer i højere vandstande for den stationære model. Efter førnævnte punkt ligger Manningtallet brugt i den stationære model højere end det for den dynamiske, hvilket i stedet resulterer i højere vandstande for den dynamiske model.

Forskelle i definering af Manningtal vurderes derfor at være den primære årsag til, at afvigelsen på denne strækning er større end for de resterende strækninger.

### 6.3.2 Vurdering

Der er både fordele og ulemper ved både den stationære og dynamiske model.

Den stationære model er lettere og mindre tidskrævende at arbejde med. De anvendte Manningtal er dog indsat som middelværdier for en given periode. Eventuelle variationer inden for denne periode, vil derfor ikke blive medregnet. Til undersøgelser på et screenings-niveau, vurderes den stationære model dog at være rigeligt tilstrækkelig.

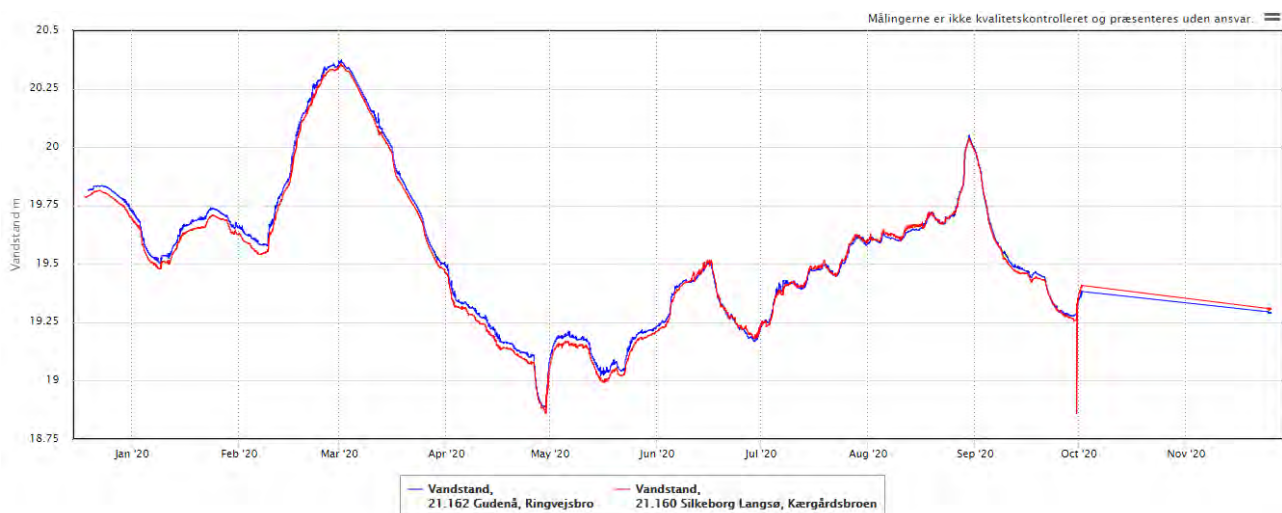
Den dynamiske model er mere krævende, både tids- og kapacitetsmæssigt. Til gengæld illustrer den de variationer, der sker i løbet af året, i form af skiftende afstrømninger og Manningtal.

## 7 Scenarieberegninger

Nærværende afsnit omhandler to undersøgte scenarier, der har til formål at sænke vandstanden i Silkeborg Langsø og generelt på projektstrækningen strækningen. Opsætning af scenarierne og resultater vil blive beskrevet i afsnittet og en mere teknisk beskrivelse vil fremgå bilag tilhørende pågældende scenarie. Afsnittet indeholder tekniske følsomhedsanalyser for begge scenarier. Disse henvender sig til personer med kendskab til hydraulisk modellering.

Det er opgivet af Natur og Miljøafdelingen fra Silkeborg Kommune, at der er problemer med oversvømmelser ved et par boliger omkring Lysåen, der løber ned til Silkeborg Langsø længst mod vest. De har ved analyse i Scalgo vurderet, at vandstanden bliver kritisk for ejendommene ved en vandstand i Silkeborg Langsø på 19,87 m.

Vandstanden ved Ringvejsbroen er, som det fremgår af Figur 7.1, tilnærmelsesvis ens med vandstanden ved udløbet af Lyså, Silkeborg Langsø, Kærgårdsbroen. For scenarieberegningerne arbejdes der med en kritisk kote i Silkeborg Langsø målt ved Ringvejsbroen på 19,87 m.



Figur 7.1 Vandstand ved Ringvejsbroen og Kærgårdsbroen ved Lyså.

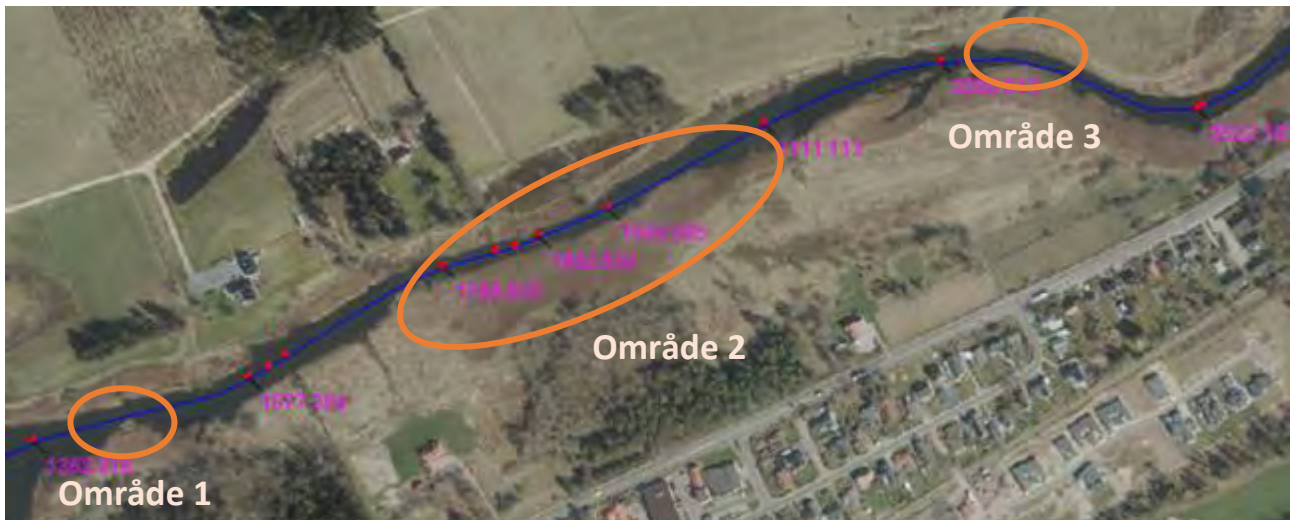
### 7.1 Scenarie 1 – Fjernelse af Tagrør

Scenariet omhandler ændring af kantvegetation på en strækning nedstrøms Ringvejsbroen, hvor profilet indsnævres. Formålet med scenariet er at holde vandstanden i Silkeborg Langsø på et niveau, hvor oversvømmelser begrænses. Her arbejdes ud fra den i afsnit 7 omtalte kritiske kote på 19,87 m i Silkeborg Langsø.

På nuværende tidspunkt er kanterne på den snævre strækning tæt bevokset, primært med tagrør. Det undersøges, hvad effekten vil være, hvis tagrørene fjernes. Området kunne efterfølgende nedholdes/vedligeholdes ved græsning. Ved ændringen forventes det, at vandstanden i Silkeborg Langsø vil reduceres pga. mindre modstand på strækningen.



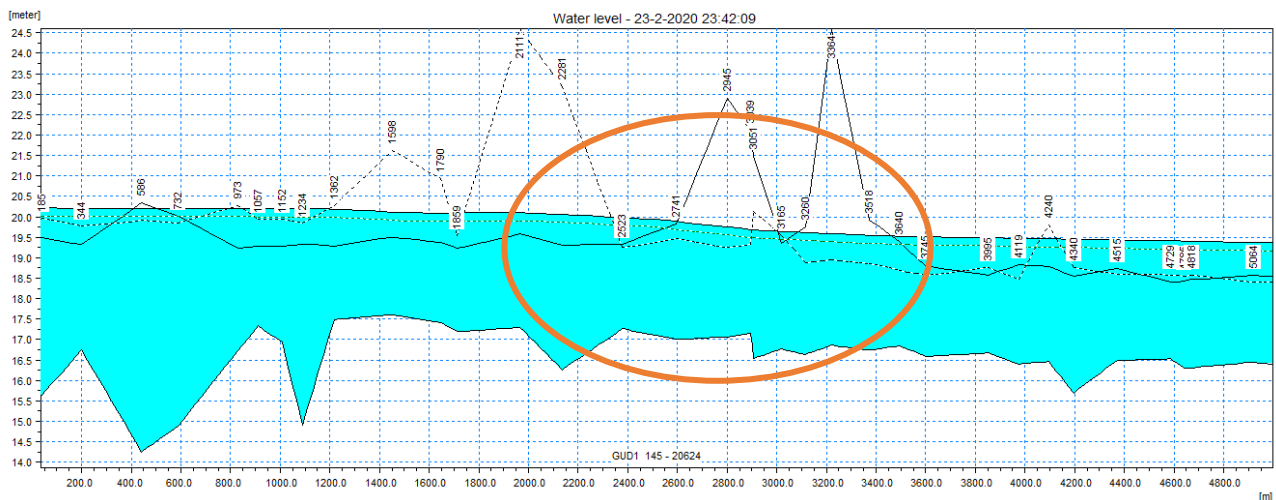
På **Fejl!** Henvisningskilde ikke fundet. er markeret tre områder med tagrør på smalle strækninger, der er i betragtning ved undersøgelse af tagrørs effekt på vandstanden i Silkeborg Langsø. De fordeler sig fra st. 1430



Figur 7.2 Områder nedstrøms Silkeborg Langsø, der er i betragtning ved undersøgelse af mulige indgreb mod høje vandstande.

til st. 2453.

Der ses et øget vandspejlsfald fra st. 2400-3000, hvilket kan skyldes øget modstand på strækningen. Området er markeret med en orange ring på Figur 7.3.



Figur 7.3 - Vandspejlet nedstrøms Ringvejsbroen fra simulering af den 23. februar 2020.

Indledningsvist er potentialet for sænkning af vandspejlet i Silkeborg Langsø undersøgt, alene ved at reducere modstanden på strækningen indeholdende de tre områder. I undersøgelsen beregnes, hvilket Manningtal, der er nødvendigt for at holde vandstanden i Silkeborg Langsø under den kritiske kote på 19,87 m. Resultatet af undersøgelsen vises i Tabel 7-1. Se beskrivelse af opsætning af undersøgelsen i Bilag 7.1.

Tabel 7-1 – Beregnet vandstand ved Ringvejen ved forskellige hændelser samt beregnet minimum Manningtal for at holde vandstandskote under 19,87 ved Ringvejsbroen.

	VST ved Ringvejen [m]	Manningtal for at holde VST under 19,87 ved Ringvejsbroen
2-årshændelse	19,81	14
5-årshændelse	20,00	25
10-årshændelse	20,05	36
20-årshændelse	20,16	>70

Ud fra de beregnede nødvendige Manningtal vurderes det realistisk at udarbejde tiltag, der kan sikre mod oversvømmelser ved en 5-årshændelse. Ved en tilnærmelsesvis asfaltering af strækningen, vil en 10-årshændelse i princippet kunne holdes under den kritiske kote. Der kan reduceres på oversvømmelser ved 20-årshændelser og formentligt større hændelser, men disse vurderes ikke mulige at sikre mod.

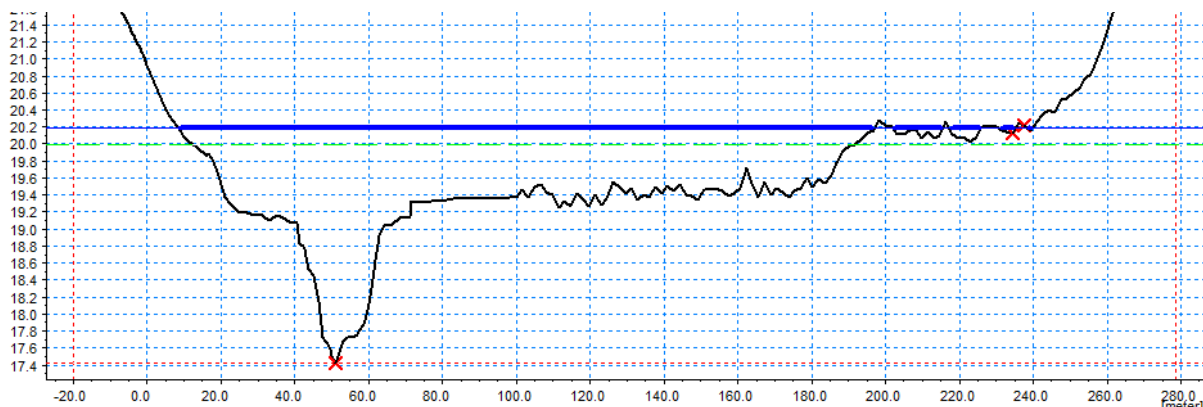
Der arbejdes herfra ikke videre med den indledende undersøgelse. I stedet kigges der på et specifikt scenarie, med viden om potentiale for sænkning fra indledende undersøgelse.

#### 7.1.1 Effekt ved fjernelse af tagrør på område 2 (station 1789 til 2281)

I dette afsnit vil effekten ved fjernelse af tagrør på område 2 blive undersøgt. Det vil blive beskrevet hvordan simuleringerne i MIKE HYDRO River er sat op, og resultaterne vil fremgå efterfølgende. Der vil blive analyseret på resultaterne med en følsomhedsanalyse.

Samtlige grafer og tabeller er lavet ud fra resultattabeller og tidsserier, der kan findes i Excel-bilag 7.2.

Område 2 er udvalgt, da udstrækningen af indsnævring med tagrør her er størst, for de tre områder. Samt pga. tværsnitsprofilets udformning på strækningen. Se tværsnit ved station 1789 på Figur 7.4.



Figur 7.4 - Tværsnitsprofil for station 1789 med vandstand svarende til en 100-årshændelse.

Tagrørene står på det flade stykke til højre i profilet, der oversvømmes omkring kote 19,50. Tiltaget med fjernelse af tagrør på strækningen, vil derfor have størst effekt ved ekstremhændelser. Derfor undersøges effekten ved fjernelse af tagrør i begge sider af den snævre strækning ved en hændelse svarende til vinteren 2020, der er vurderet at svare til en 100-års hændelsen.

##### 7.1.1.1 Opsætning

100-årshændelsen indtræf i slutningen af februar 2020. Netop denne hændelse ønskes undersøgt, hvorfor der simuleres med Manningtal, som bestemmes specifikt for denne hændelse. Modellen køres for perioden fra den 17.-24. februar 2020, hvor hændelsen indtræf.

Manningtal for 100-årshændelsen bestemmes i VASP, for strækningen fra Ringvejsbroen til Resenbro. Til bestemmelse anvendes opmålt vandspejl ved begge stationer samt udregnede værdier for vandføring. Sidstnævnte er genereret ud fra vandføringsværdier for Tvilum, som er udleveret af WSP. Bestemmelsen forgår som beskrevet i Bilag 4.4.

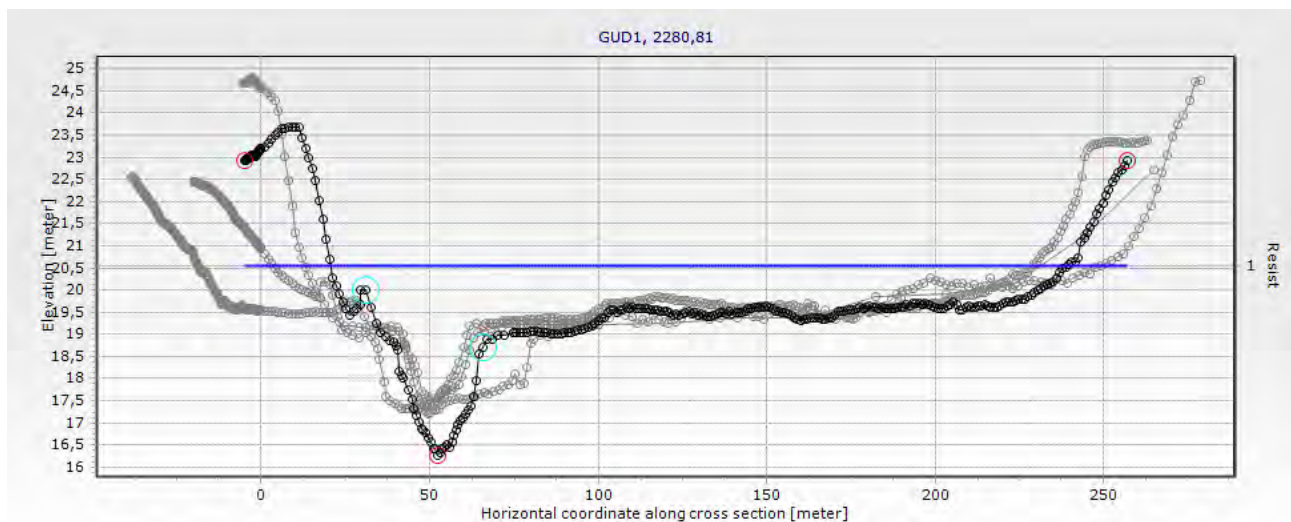
Manningtallet bestemmes for den 24. februar. Se indsatte værdier samt resultat i Tabel 7-2.

Tabel 7-2 - Manningtal bestemmelse

Station	VST [m]	$Q \left[ \frac{m^3}{s} \right]$	$M$
Ringvejsbro st. 145	20,44	44,29	12,9
Resenbro st. 3049	19,82	44,85	

Det beregnede Manningtal indsættes uniformt i tværsnittene for strækningen Ringvejsbroen - Resenbro. De øvrige Manningtal forbliver middelværdier for februar, fra Modelmanningtallene. Beregnede værdier for afstrømning, passende til hændelsen i februar 2020, sættes ind som randbetingelser i modellen. Se værdier i Excel-bilag 4.1.

Tværsnittene med tagrør i område 2, samt to tværsnit med tilsvarende tværnsnitsudformning nedstrøms, er udvidet med Den Danske Højdemodel (DTM). Dette er gjort for at få et mere korrekt resultat af scenariet. Se udvidede profiler i samlet plot på Figur 7.5. Fremgangsmåden er beskrevet i Bilag 7.1.

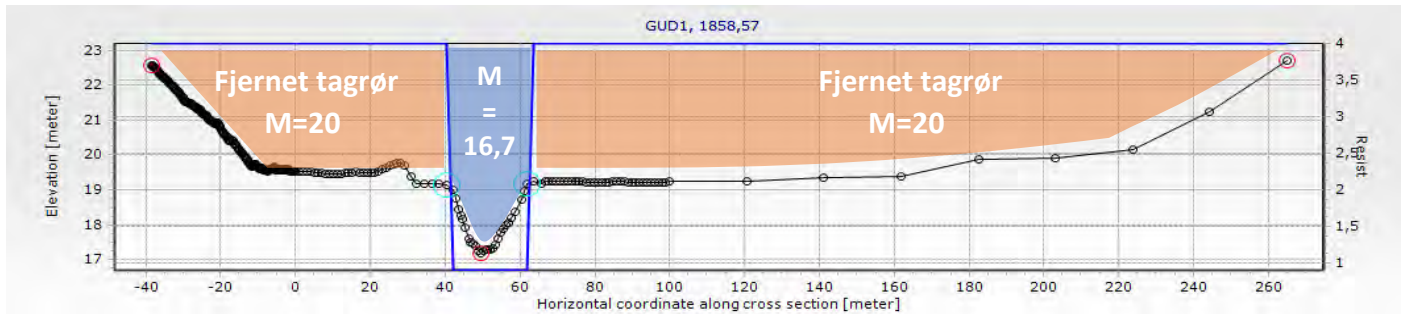


Figur 7.5 - Tværsnittene 1790, 1859, 211 og 2281 plottet i samme graf. Den blå linje tilhører den sekundære akse, og angiver modstandsfaktoren.

Udvidelsen sænker vandspejlet opstrøms de udvidede tværsnit ved simuleringer i MIKE HYDRO River. Vandspejlet er kalibreret på plads med ændring på modstanden ved de ændrede tværsnit. Værktøjet *high/low flow zones* er anvendt til kalibrering, hvor der opdeles i flere værdier for modstand i samme tværsnit. Se Bilag 7.1 for uddybelse af fremgangsmåde for kalibrering.

#### 7.1.1.2 Resultat

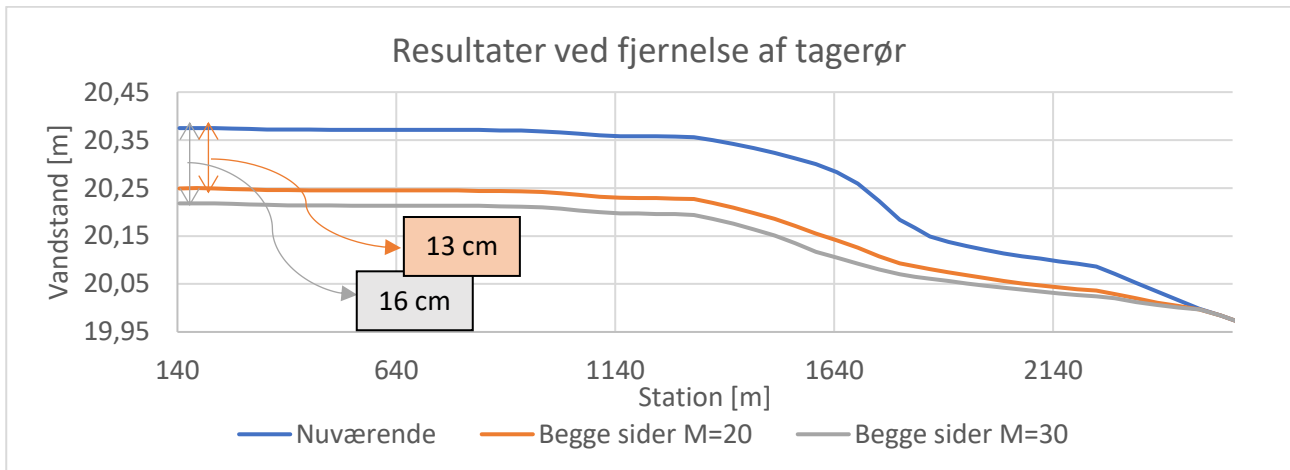
Effekten ved fjernelse af tagrør undersøges for reduktion af modstand til Manningtal = 20 og Manningtal = 30 i området, hvor tagrørene står (*high flow zones*).



Figur 7.6 - Tværsnit på st. 1858,57 med opdeling af Manningtal i henholdsvis det dybe profil (low flow zone) og hvor tagrørene er fjernet (high flow zone). Den blå linje tilhører den sekundære akse, og angiver modstandsfaktoren.

Et Manningtal på 20 vurderes at beskrive modstanden ved et afgræsset område med begrænsede planter. Et Manningtal på 30 vurderes at beskrive et område, hvor plantemateriale er skåret helt i bund.

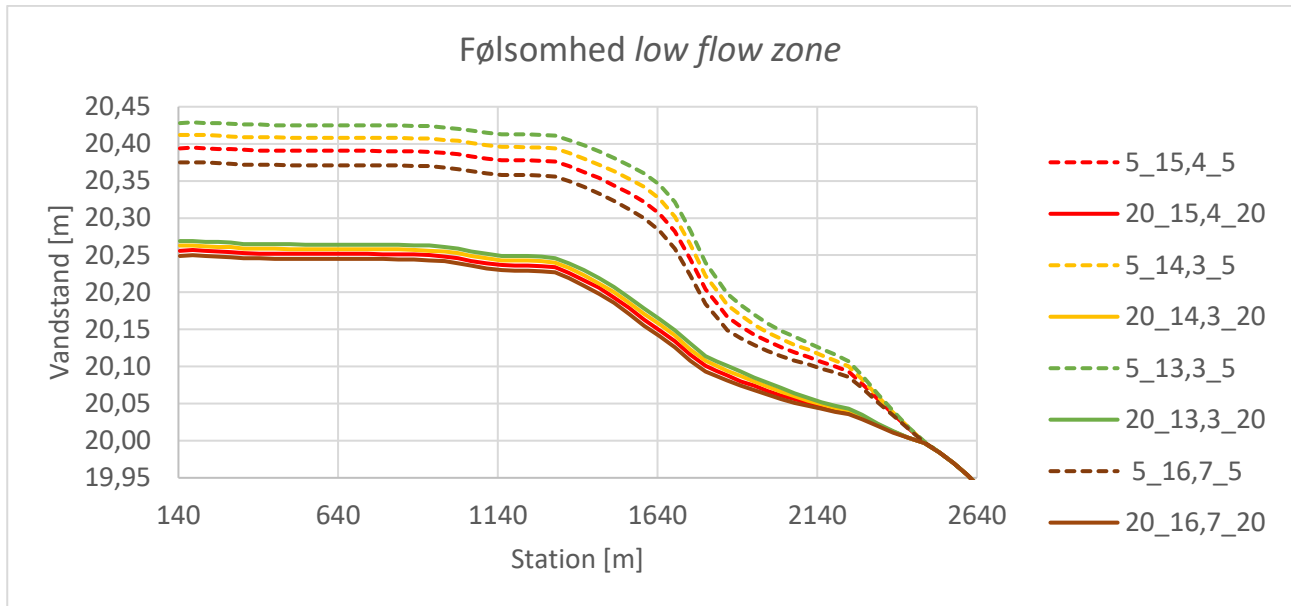
Ved ændring fra rørsump til afgræsset område, kan vandspejlet ved en 100-årshændelse reduceres med 13 cm i Silkeborg Langsø. Ved total nedskæring kan vandspejlet sænkes med 16 cm. Se vandspejlsænkninger på Figur 7.7.



Figur 7.7 - Resultatgraf for fjernelse af tagrør.

### 7.1.1.3 Følsomhedsanalyse

Der er vurderet på følsomheden i forhold til bestemmelse af værdien for Manningtallet i *low flow zonen*. Her vurderes på fire simuleringer, med hver sin ændring af Manningtallet i *low flow zonen*. Inden for det undersøgte spænd af værdier findes, at vandspejlskoten ændres med 1-2 cm mellem simuleringerne. Der undersøges for før og efter ændring af modstanden i *high flow zonen*, hvor der ændres fra 5-20 i Manningtal. Her findes marginalt mindre forskel mellem simuleringer. Se vandspejl fra simuleringer samt resultattabel på henholdsvis Figur 7.8 og Tabel 7-3.

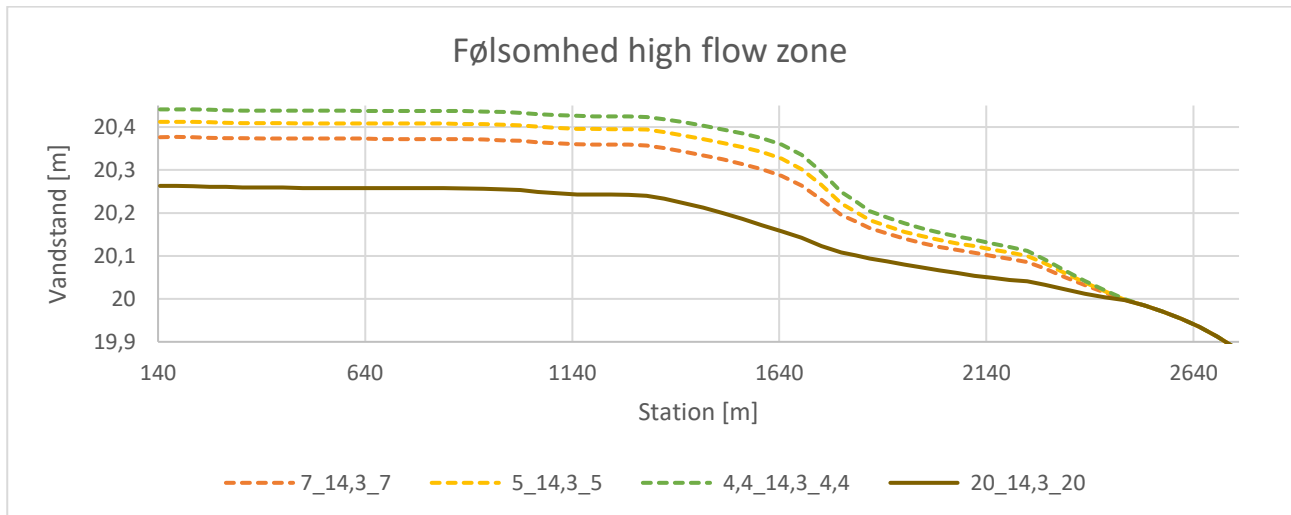


Figur 7.8 - Følsomhed af low flow zone, før og efter fjernelse af tagrør.

Tabel 7-3 - Resultattabel følsomhed af low flow zone.

<b>Manningtal i low flow zone</b>	<b>13,3</b>	<b>14,3</b>	<b>15,4</b>	<b>16,7</b>
Vandspejlskote ved Ringvejsbroen [m]	20,43	20,41	20,39	20,38
Vandspejlsænkning ved <i>high flow zone</i> fra M=5 til M=20 [cm]	16	15	14	13

Ved en afvigelse på én cm mellem simuleringer, hvor forskellen på Manningtallet er så lille. Vurderes bestemmelsen af Manningtallet i *low flow zone* følsom, hvorfor resultatet også skal præsenteres efter følsomheden.



Figur 7.9 - Følsomhed af high flow zone



Tabel 7-4 - Resultattabel af følsomhed high flow zone.

Manningtal i <i>high flow zone</i>	7	5	4,4
Vandspejlskote ved Ringvejsbroen [m]	20,38	20,41	20,44
Vandspejlssænkning ved <i>high flow zone</i> til M=20 [cm]	11	15	18

Forskellen på reduktionen spænder fra 11-18 cm. Ved ændring på high flow zone fra Manningtal 5 til 4,4 øges reduktionen ved ændring på Manningtallet til 20 med 3 cm. Ved ændring på Manningtallet fra 5-7 er reduktionen 4 cm mindre. Bestemmelsen af værdien for high flow zone vurderes følsom.

Resultaterne af følsomhedsanalysen belyser usikkerheden på scenarieresultatet. For mere præcise resultater anbefales målinger af vandstanden før og efter scenarieområde ved ekstremhændelser til mere præcise bestemmelser af Manningtal.

### 7.1.2 Delkonklusion

Ved opsætning og kalibrering af modellen med de udvidede tværsnit er forholdet mellem *high/low flow zonerne* særdeles vigtigt. Kendskab til realistiske værdier for Manningtal er derfor nødvendige for bestemmelse af fordeling af modstanden i de forskellige zoner i et tværsnit.

Ud fra den indledende undersøgelse vurderes det muligt at holde vandstandskoten under 19,87 i Silkeborg Langsø op til en 10-årshændelse, med tiltag på den betragtede strækning nedstrøms Ringvejsbroen. Det vurderes samtidig tæt på umuligt at undgå vandstande over den kritiske kote i Silkeborg Langsø ved afstrømninger over en 10-årshændelse.

Tagrørene på den undersøgte smalle strækning (1789-2281) oversvømmes først af betydelig grad ved høje vandstande. Derfor er scenariet undersøgt for en 100-årshændelse, hvor effekten ved fjernelse af tagrørene vurderes at være størst.

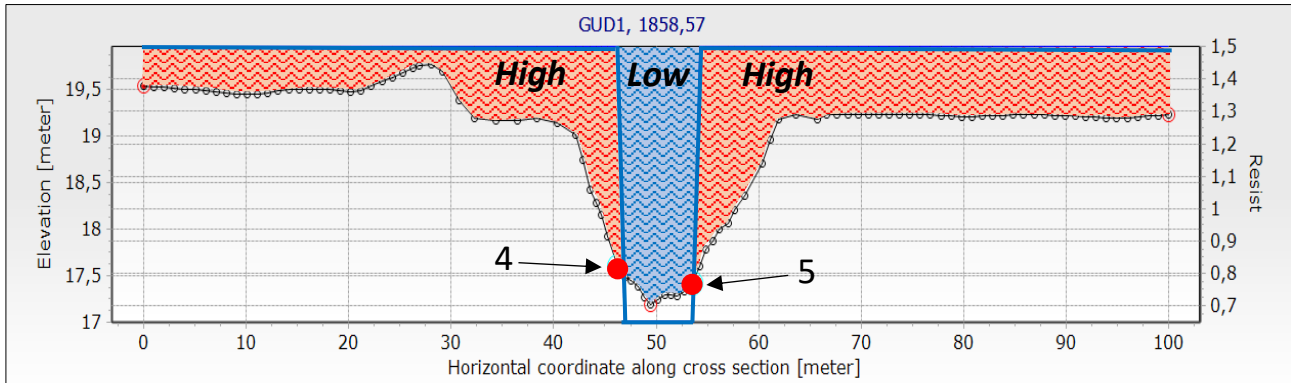
Det er vurderet muligt at reducere vandstanden i Silkeborg Langsø med 13-16 cm alt efter omfang af indgreb ved en 100-årshændelse.

## 7.2 Scenarie 2 – Strømrrende

Som nævnt tidligere i afsnit 3.3.2, har landbruget og lodsejere store interesser forbundet med vandstanden i Gudenåen. Et muligt hjælpemiddel kan være ændring af vedligeholdelse. Der er i regulativet for Gudenåen fra Silkeborg til Randers, angivet en strømrrende bredde på 7 m mellem Silkeborg Langsø og Tange Sø. Der udføres som udgangspunkt én grødeskæring om året, med mulighed for ekstra skæring. [12] Dette scenarie vil belyse en ændring af grødeskæringen, hvis der skæres en strømrrende på 10 m. Opsætning, resultater og følsomhedsanalyse for scenarie 2 er uddybet yderligere i Bilag 7.2.

### 7.2.1 Opsætning

I *MIKE Zero cross section* - filen flyttes punkterne 4 og 5 der normalvis angiver vandløbskanten, manuelt for hvert tværsnit i opmålingen. Punkterne indsættes med en afstand på 7 meter, svarende til den vedligeholdte strømrrendebredde. Punkterne angiver *high/low flow zones*, og inddeler dermed tværsnittet i to zoner. Zoneopdelingen giver mulighed for at sænke modstanden i strømrrenden, og øge den udenfor. Modsat er Grundmodellen opbygget med ét Manningtal fordelt uniformt ud over hele tværsnittet. Modelmanningtallet som er defineret i Grundmodellen, deles med den indsatte faktor.



Figur 7.10 – Eksempel på tværsnit fra MIKE Zero cross section - filen med en strømrendebredde på 7 m. Den blå linje angiver modstandsfaktoren. Punkt 4 og 5 er indtegnet med rød prik.

Efter indsætning af 7 m strømrende, skal faktorerne kalibreres således at vandstanden er tilnærmelsesvis lig Grundmodellen. Der kalibreres ved en årsmiddel-afstrømningshændelse, hvor der er udvalgt én dagsituation i hvert kvartal således at kalibreringsparametrene passer bedst muligt med årsvariationen. Kalibreringen er en iterativ proces, hvor faktorerne tilpasses indtil vandstanden svarer til grundmodellen. Det er nødvendigt at strækningsinddele faktorerne, da der findes store variationer i vandløbsbredden og dermed i forholdet mellem *high/low-zonerne*. For uddybende forklaring af opsætningen, kalibrering og de erfaringer som er tilegnet undervejs, se Bilag 7.2.

Følgende Tabel 7-5 viser den endelige inddeling af *high/low-zonerne* og dertilhørende stationeringer. Der findes formentligt andre fordelinger i forholdet af *high/low-zonerne*, som giver et tilsvarende resultat.

Tabel 7-5 Kalibrerede faktorer for *high/low-zoner* og stationering

Station	High	Low
0-1.500	1,4	0,55
1.500-3.200	1,5	0,65
3.200-6.000	1,5	0,52
6.000-8.000	1,5	0,55
8.000-11.500	1,5	0,6
11.500-15.800	1,5	0,7
15.800-21.000	1,5	0,6

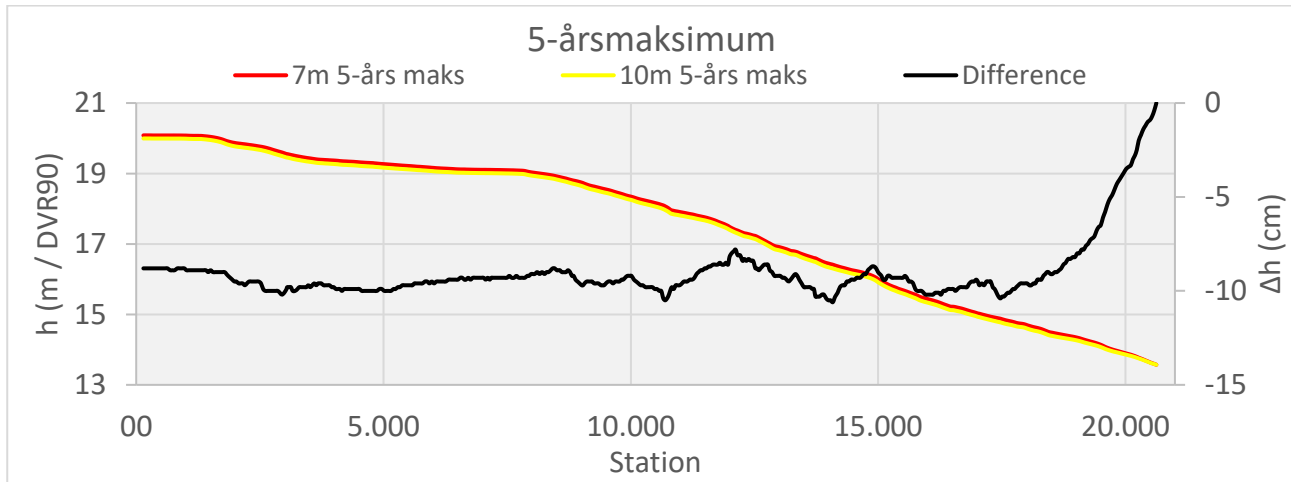
Afvigelsen fra Grundmodellen efter endt kalibrering, er  $\pm 6$  cm på vandspejlskoten.

### 7.2.2 Resultat

Strømrendebredden udvides til 10 m ved at flytte punkt 4 og 5, uden at ændre værdierne for *high/low-zonerne*. Dermed bliver en væsentligt større del af tværsnittene nu *low-zone*, med en lav modstand. Den beregnede vandstand ved henholdsvis 7 og 10 m, trækkes fra hinanden for at finde den mulige vandstandssænkning.

Nedenstående Figur 7.11 viser resultatet for beregning af en 5-årsmaksimumhændelse, der indtræffer d. 15. januar. Vandstanden ved en 10 m strømrende, ligger på hele strækningen under tilsvarende beregning med en 7 m strømrende. Det bemærkes at sænkningen fra st. 18.000 og nedstrøms, bliver reduceret af stuvningen

fra Tange Sø. Derfor vurderes sænkningen udelukkende fra st. 0 til 18.411 (Kongensbro). I Bilag 7.2, findes tilsvarende resultatgrafer for øvrige hændelser.



Figur 7.11 – Resultat af udvidelse af strømrønde fra 7 til 10 m, ved en 5-års maksimum hændelse d. 15. jan. Differencen tilhører den sekundære akse.

Beregningerne udføres for de i Tabel 7-6 angivne hændelser. Resultaterne er som nævnt tidligere bestemt fra st. 0-18.411. Generelt ligger sænkningen omkring 10 cm, for alle hændelser. Der er altså ikke de store forskelle i sænkning mellem f.eks. sommer- og vintermedianmaksimum. Det kan skyldes store mængder af overvintrende grøde. Dog findes der ved årsmiddel hændelsen en større sænkning d. 15/07, hvor der er større modstand i forhold til 15/04, hvor modstanden er lav.

Tabel 7-6 Resultattabel for scenarie 2 med udvidelse af strømrønde bredde fra 7 til 10m.

Resultaterne er angivet ved sænkningen af vandstanden i cm. Der er medtaget ét decimal for præsentationens skyld, på trods af de væsentligt større usikkerheder der er forbundet med modellen. Derudover indgår vandspejlskoten ved Ringvejen.

Hændelse	Dato	Gns. sænkning [cm]	Maks. sænkning [cm]	Min. sænkning [cm]	Vsp. Ringvejen 7 m [m/DVR90]	Vsp. Ringvejen 10m [m/DVR90]
Årsmiddel	15-01	10,2	11,5	7,9	19,77	19,67
Årsmiddel	15-04	9,5	11	4,6	19,18	19,09
Årsmiddel	15-07	10,5	11,7	7,5	19,67	19,57
Årsmiddel	15-10	9,7	10,9	8,3	19,87	19,77
Sommermedianmaks.	15-09	9,7	11	8,5	19,88	19,79
Vintermedianmaks.	15-01	9,9	11,3	8,3	19,86	19,77
5-årsmaksimum	15-01	9,5	10,6	7,8	20,08	19,99
20-årsmaksimum	15-01	9,1	10,5	7,6	20,26	20,17

Det fremgår af Tabel 7-6 at der ved vandføringshændelser større end medianmaksimumværdier, ikke er tilstrækkeligt sænkning i forhold til førnævnte kritiske kote i Silkeborg Langsø på 19.87. Det bemærkes, at sænkningen bliver mindre ved større afstrømning. Der vil stadig indtræde væsentlige oversvømmelser ved store afstrømninger, hvorfor en udvidelse af strømrønde bredden vurderes at have ringe indvirkning ved ekstremhændelser.

Udvidelse af strømrønde bredden, vurderes at kunne sikre mod vandstande over kote 19,87 ved median hændelser, eftersom disse ved nuværende strømrønde bredde ligger omkring den kritiske kote. Dermed kan

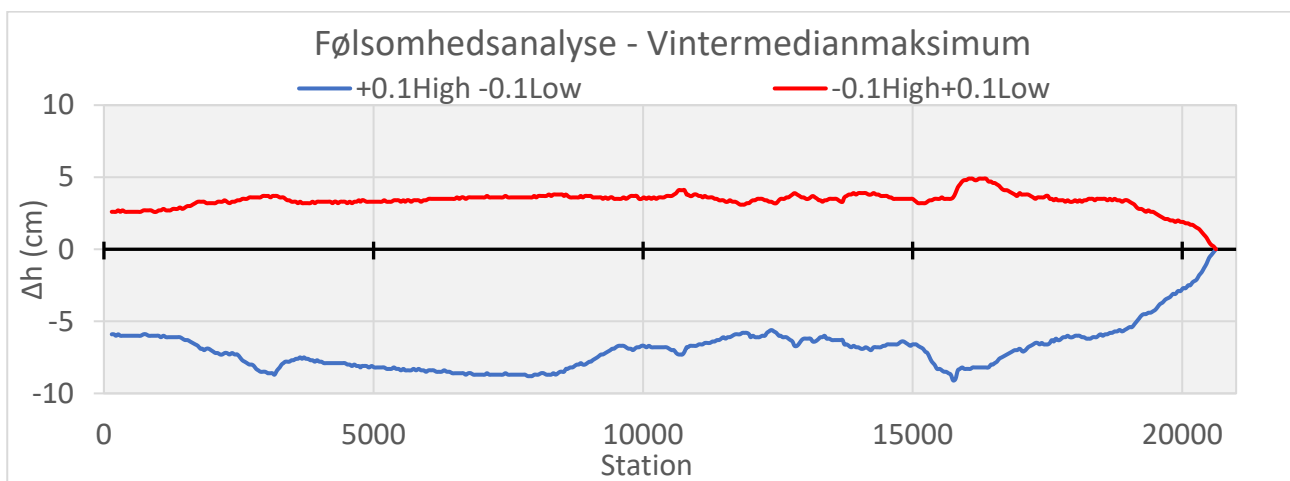
der dæmmes op for de i afsnit 4.3.2 angivne tendenser for vandstandsstigning, som i fremtiden potentielt kan skabe problemer ved median hændelser.

Tiltaget vil desuden have betydning for hyppigheden for oversvømmelse på Trækstien. Forøgelsen af antallet af farbare dage bør undersøges nærmere.

### 7.2.3 Følsomhedsanalyse

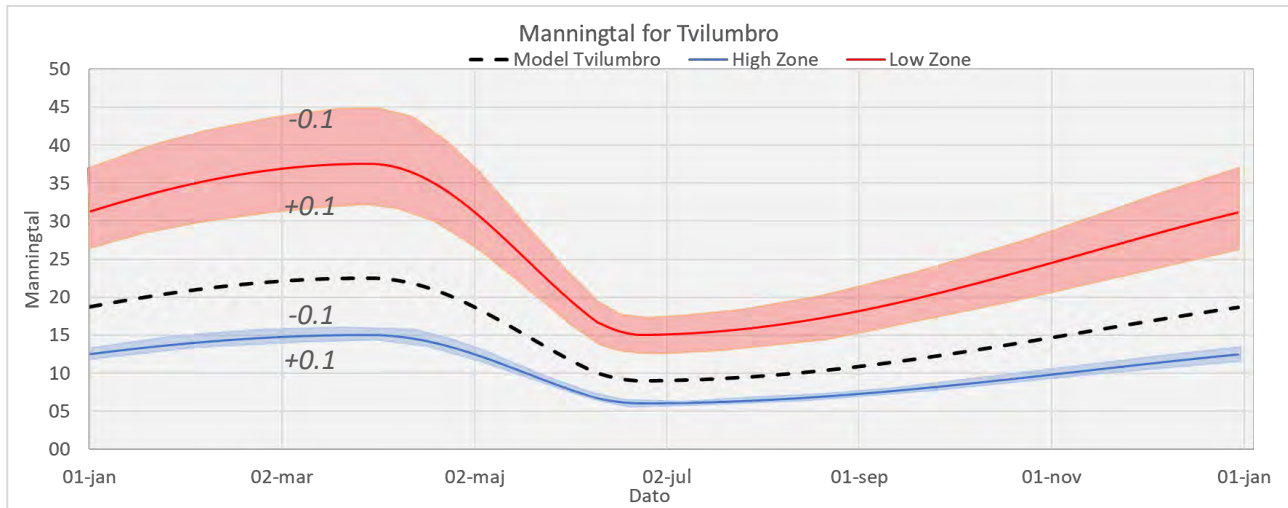
Der er udført en følsomhedsanalyse for påvirkningen af det anvendte forhold mellem *high/low flow-zonerne*, for den kalibrerede model med 7 m strømbredde. Beregningerne foretages for en medianmaksimum-hændelse, hvor der justeres henholdsvis op og ned for hver *flow-zone*. Der er udført beregninger med +0,1 af faktoren i *High-zonen* (højere modstand - lavere Manningtal) og -0,1 af faktoren i *Low-zonen* (lavere modstand - højere Manningtal), samt en tilsvarende beregning med modsatte justering. Se Figur 7.13. Herefter er den færdigkalibrerede model trukket fra det oprindelige resultat.

I Figur 7.12 findes forskellen i vandstanden efter ændring af *high/low-zonerne*. Der sker en betragtelig sænkning af vandstanden ved at sænke modstanden med 0,1 i strømbredden, på trods af mere modstand udenfor. Modsat findes en mindre vandstandsstigning, når modstanden i strømbredden øges 0,1 og sænkes tilsvarende udenfor.



Figur 7.12 – Resultat af ændring i forholdet mellem High/Low-zonerne for 7 m strømbredde.

Vandstanden er altså primært påvirket af modstanden i strømbredden, hvorfor det er vigtigt at dette parameter er så tæt på virkeligheden som muligt. Er modstanden for lav i strømbredden, skal der være en urealistisk høj modstand udenfor og tilsvarende omvendt. De i scenariet anvendte Manningtal ved Tvilumbro for *high/low-zonerne* kan findes på Figur 7.13, og vurderes at være realistiske.



Figur 7.13 – Ændring af Manningtal i High/Low-zonerne ved Målestation 21.01 Tvilumbro. Fed rød og blå streg angiver de anvendte Manningtal.

Det er værd at bemærke at der i følsomhedsanalysen, ændres på faktorerne i *high/low-zonerne* med  $\pm 0,1$  hvorfor der sker en stor ændring af Manningtallet i *low zonen*, mens der sker en mindre ændring i *high zonen*. Et lavt Manningtal har dog en eksponentielt større påvirkning af vandstanden, i forhold til et højt.

#### 7.2.4 Delkonklusion

I forbindelse med opsætning og kalibrering af strømrøndebredde, er forholdet mellem *high/low-zonerne* særdeles vigtigt. Formentlig kan andre forhold tilpasses Grundmodellen. Vigtigheden af kendskab og erfaring i forhold til fastsættelse af realistiske Manningtal er dermed stor.

Udvidelse af strømrøndebredde fra 7 til 10 m, findes at give en generel vandstandssænkning på omkring 10 cm. Ved høje afstrømninger og vandstande, falder effekten af en bredere strømrønde. Det er ikke muligt at stoppe oversvømmelser, ved ekstremhændelser som 5- og 20års maksimum. Ligeledes aftager effekten drastisk efter Kongensbro i st. 18.411, grundet stuvning fra Tange Sø. Tiltaget kan ikke anbefales til sænkning af vandstanden nedstrøms Kongensbro, samt ved større ekstreme hændelser.

Der findes midlertidigt mulighed for at stoppe oversvømmelse ved medianhændelser. Her er vandstanden ved nuværende strømrøndebredde, tæt på den kritiske kote. Det vil derfor være muligt at sikre mod de stigende tendenser for vandstanden, og dermed sikre at fremtidens median hændelser ikke overskrider den kritiske kote.



## 8 Vandstandsmodel for Trækstien

Der er store interesser forbundet med Trækstien, og dennes tilgængelighed. Som nævnt tidligere i afsnit 3.3 er Trækstien projekteret efter at være farbar 10 ud af årets 12 måneder. Derfor vil en vandstandsmodel, hvor vandstanden er angivet med små intervaller på strækningen, have stor værdi for stiens brugere. I afsnittet gennemgås opsætning, resultater og optimeringsmuligheder af en vandstandsmodel for Trækstien. Ligeledes vurderes mulighederne for inkorporering af et varslingsmodul for vandstandsændringer. Excel benyttes til opbygning af vandstandsmodellen. I Excel-Bilag 8.1, findes Excel-filen med vandstandsmodellen. Her kan alle anvendte formler mm. kan findes. Modellen opsættes, så det nødvendige input-data udelukkende er vandstanden, ved de 6 tilgængelige målestationer fra Ringvejen til Kongensbro samt datoen. Dette vandstandsdata er frit tilgængeligt på Vandløbssiden. [23]

### 8.1 Opsætning

Indledningsvis indsættes resultaterne af beregnede vandspejl fra MIKE HYDRO River. Der indsættes tre vandspejlsresultater fra sommerperioden: medianminimum, sommermiddel og sommermedianmaksimum. Ligeledes indsættes tre fra vinterperioden: vintermiddel, medianmaksimum og 5-årsmaksimum. Beregningerne indsættes i hver sin fane. Opsætningen er inddelt i fem trin, der beskrives nedenfor. Hvert trin i opsætningen er illustreret ved "(x)" på Figur 8.1.

Hernæst dannes en ny fane til modelopsætningen, hvor der skelnes mellem sommerperioden og vinterperioden. For hver periode skal modellen udtage den kolonne med beregnet vandstand, som ligger tættest på vandstanden i input-dataet. Her benyttes funktionen "LOPSLAG", til at bestemme kolonnennummeret i sommer/vinter fanen med det beregnede vandspejl, der ligger nærmest input-dataet ved Ringvejsbroen. (1)

Herefter benyttes funktionen "LOPSLAG" igen, som nu udtager de værdier som ligger i den angivne kolonne i sommer/vinter fanen. Hermed er det bestemt, hvilket vandspejlsresultat modellen skal benytte, i den videre opsætning. (2)

Nu beregnes en kolonne med korrektionen for vandspejlskoten i input-dataet, i forhold til den beregnede vandspejlskote. Denne bestemmes som forskellen ved hver af de 6 målestationer,  $\pm$  det beregnede vandspejlsfald på strækningen mellem to stationer. (3)

Korrektionen mellem den beregnede kolonne og de 6 input-data, lægges nu til input-værdierne så vandspejlet mødes mellem to målestationer. Hermed findes nu en resultatkolonne, med et vandspejl der er kalibreret efter input-data fra de 6 målestationer. (4)

Resultatkolonnen trækkes fra kolonnen med Trækstiens topkote. Hermed dannes en kolonne med modellens vandspejl i forhold til Trækstiens topkote. Der kan midlertidigt være stor forskel i vandspejlet mellem to målestationer, grundet forskellig Manningtal i forhold til Grundmodellen. Derfor udignes en eventuel forskel, hvor målestationerne mødes, ved at fordele forskellen ligeligt på delstrækningen. (5)

Vinter model					
Dato	15-09-2020	Data til udvælgelse af Kolonne/situation			
Ringvejsbro (144)	19.77	Station:	144.63	Kolonne	Omregning
Resenbro (3036)	19.37	Vinter middel	19.483	2	0.162
Svostrup (8714)	18.67	Median Max	19.645	4	0.0955
Tvilumbro (10810)	17.84	Median Max.	19.807	4	
Nebelgårde (13500)	16.49	5-års Max.	19.903	3	
Kongensbro (18411)	14.63	5-års Max.	19.998	3	
Kolonne:	4				
Station	Beregnet Vsp.	Korrektion	Resultat	Træksti	Vsp Træksti
144.63	19.807	-0.037	19.77	19.77	0.00
184.586	19.807	-0.037	19.77	19.769	0.25

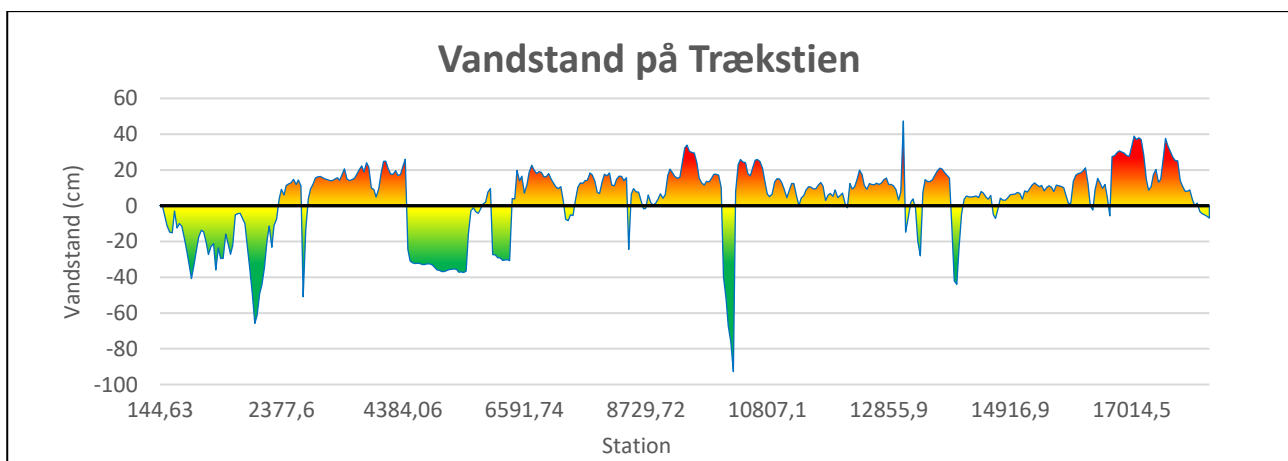
Figur 8.1 – Fremgangsmåde for opsætning af vandstandsmodel i Excel

Derefter opsættes en ny fane med resultatgrafer. Her afbilledes resultatet af henholdsvis sommer- og vintermodellen.

Afslutningsvis opsættes forsiden. Her dannes en kolonne, som ved hjælp af funktionen "HVIS" henter enten resultatgrafer for sommer- eller vinterperioden. Den indsatte dato afgør, hvilken af de to resultatgrafer der skal indhentes data fra med funktionen "HVIS". Dermed bliver resultatgrafer på forsiden af Excel-bilag afhængigt af både den indsatte dato, samt observeret vandspejl ved de 6 målestationer på strækningen.

## 8.2 Resultat

Resultatet af et givent input vises på forsiden af Excel-bilag 8.1, i form af en graf med vandstanden på Trækstien.



Figur 8.2 – Eksempel på Vandstandsmodel for Trækstien d. 15-09-2019

Vandstandsmodellen kan potentielt overføres automatisk til et GIS-værktøj, hvor det er muligt at afbilde vandstanden på strækningen grafisk. Vandstanden bør indeles i forskellige intervaller på strækningen.

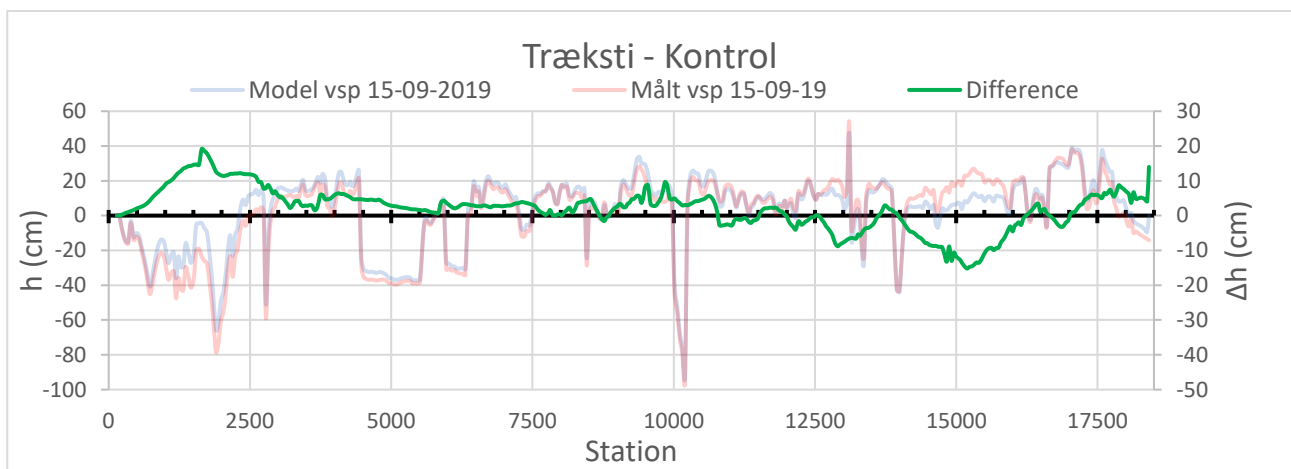
Brugeren kan således selv vurdere om man vil trodse vandet. Der foreslås intervaller inddelt efter fodtøjskrav, f.eks. sko - vandresko - gummistøvler - waders - kano - Hjejlen.

### 8.3 Optimering

Følgende afsnit kvalitetskontrollerer vandstandsmodellen ved en given situation, belyser muligheden for varsling af vandstandsændringer samt en optimeret brugervenlig præsentation af resultat.

#### 8.3.1 Kontrol

I forbindelse med en opmåling af Trækstiens topkote, blev vandspejlet ligeledes opmålt. Der findes en god opmåling af vandspejlet i Gudenåen fra d. 15-09-2019. Denne opmåling benyttes til sammenligning med vandstandsmodellens beregnede vandspejl med inputdata fra 15-09-2019. Inputdata er hentet fra vandløbssiden. [23]



Figur 8.3 – Resultat af kontrol af vandspejl fra 15-09-2019. Differencen mellem model og måling tilhører den sekundære akse.

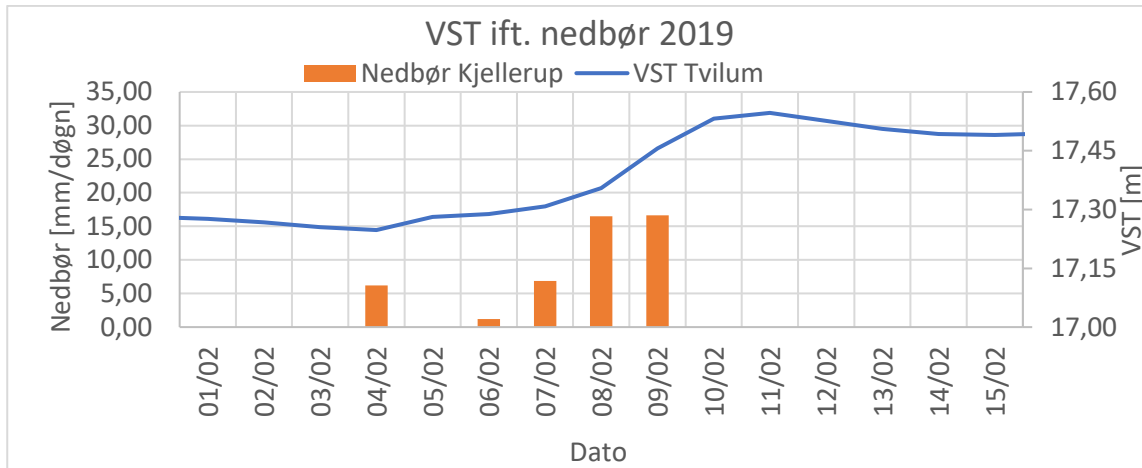
Der findes en god sammenhæng mellem opmålingen og modellens beregnede vandspejl fra Resenbro (st. 3.036) til Nebelgårde (st. 13.500). Mellem Ringvejsbroen (st. 144) og Resenbro, er afvigelsen mellem de to vandspejl større. Dette vurderes at skyldes de store variationer i Manningtal, som tidligere nævnt er forekommende ved Ringvejsbroen. En mulig optimering af modellen vil være opsætning af en ny vandstandsmåler, mellem Ringvejsbroen og Resenbro. Vandstandsmåleren foreslås placeret ved st. 1789, hvor også tagrørsindsnævringen indtræffer. Herved vil modellen blive mere præcis på strækningen, samt man vil få værdifulde data for det mulige problem belyst i scenarie 1.

Ydermere observeres en afvigelse mellem Nebelgårde og Kongensbro (st. 18.411), her vil opsætning af ny vandstandsmåler ligeledes kunne optimere modellen.

#### 8.3.2 Varslingsmodul

Der er undersøgt muligheden for at tilføje varsling af vandstandsændringer til modellen. Denne optimering vurderes at være til stor fordel for brugerne af Trækstien, der vil få en idé om farbarheden et par dage i forvejen.

Åens respons på nedbør ved forskellige hændelser er analyseret, for at vurdere på muligheden for at tilføje varsling. Se eksempel for februar 2019 på Figur 8.4. Hele analysen kan findes i Bilag 8.2 med data og supplerende grafer i Excel-bilag 8.2.



Figur 8.4 - Vandstand i forhold til nedbør februar 2019.

Ud fra analysen vurderes det muligt at tilføje et element med varsling 1-2 dage frem ud fra nedbørsdata. Hertil anbefales mere end én nedbørsstation, for at undgå lokale skybrud, der ikke har effekt på strækningen. Ved en mere langsigtet varsling, kan muligheden for inddragelse af vejrudsigt tilføjes. Dette med forbehold for de øgede usikkerheder.

## 9 Diskussion

Følgende afsnit fungerer som en tolkning af vurderinger og beregningsresultater fremført igennem rapporten.

Det er vurderet at vandremuslingens indtog i Gudenåen med begyndelse i 2006, er hovedårsagen til de markante vandstandsstigninger sidst i 00'erne pga. øget plantevækst. Dette stemmer overens med Gudenå Komitéens vurdering af vandremuslingens betydning[7].

Grødens årsvariationer tillægges samme betydning for vandstanden, som vandføringsvariationerne. En undersøgelse af mange års data for vandføringen i de danske vandløb, viser stigende tendenser, hvorfor en forsigtig fremskrivning, vil resultere i større vandføringer[3]. Derimod er det vanskeligt at fremskrive grødens udbredelse og art. Dette medfører en stor usikkerhed ved vurderinger af fremtidige afstrømningshændelsers effekt på vandstanden. Dertil er det vigtigt at overveje, hvilken grødesituation der ønskes undersøgt for.

De højeste vandstande forekommer opstrøms Sminge Sø og ved Ringvejsbroen. Hvorvidt situationen i virkeligheden er så kritisk, kan ikke vides med sikkerhed. Ved vandstande i denne størrelsesorden, vil kapaciteten af tværsnitsprofilerne overskrides. Modellen vil i dette tilfælde forlænge kantpunkterne lodret opad, og bredden vil dermed forblive den samme for øgede vandstande. I realiteten vil tværsnittene udvides i en linje nærmere vandret end lodret, og modellen kan dermed potentielt vise for høje vandstande. Strømningen på det omkringliggende terræn, beregnes af programmets 1-dimensionelle beregningsmotor. Det kunne tænkes, at et 2-dimensionel beregningsprogram, som f.eks. MIKE FLOOD, i stedet ville være at foretrække. F.eks. ved scenarie 1, hvor ådalen bringes i spil. Det ville dog resultere i en øget modelkompleksitet. Grundet længden på den undersøgte strækning, vil et fokus på kortere dele af strækningen anbefales.

Modellen er derudover følsom over for grødens store variation, hvilket til en vis grad forventeligt. Mange af parametrene er bestemt af naturen, som generelt er meget varierende og uforudsigelig. Modellen vurderes derfor at ramme tæt på virkeligheden, og derfor stadig at være anvendelig.

De to scenarier er udelukkende undersøgt for den hydrauliske effekt. Før scenarierne kan gennemføres, skal der laves en grundig undersøgelse af miljøeffekten. Projektområdet er udpeget som et Natura 2000 habitatområde og er flere steder §3 beskyttet. For begge scenarier forventes negativ effekt på miljøet, hvorfor mulighed for tilladelse begrænses.

I forbindelse med udarbejdelse af begge scenarier tilføjes yderligere usikkerhed til modellen. Bestemmelsen af et passende forhold mellem *high/low flow zonerne*, har stor betydning for resultatet. Fastsættes en for lav modstand i *high flow zonen* ved nuværende forhold, vil en ændring af strømrendebreden eller fjernelse af tagrør, give en usandsynligt stor vandspejlsænkning. Ligeledes vil man ikke opnå realistiske resultater ved simulering, hvis modstanden i *low flow zonen*, er sat for lavt. Der forefindes sparsomt litteratur på området, hvorfor kendskab og ingeniørmæssig kunden i forbindelse med fastsættelse af Manningtal, er af stor betydning i de to scenarier.

Scenarierne vil potentielt supplere hinanden godt, eftersom de tilsammen vil medføre vandstandssænkning ved både høje og lave afstrømningsværdier. Fjernelsen af tagrørene har betydning for vandstanden i Silkeborg Langsø ved høje afstrømninger. Netop omkring Silkeborg Langsø findes områder af høj værdi, der er truet af høje vandstande. Det bør derfor undersøges nærmere, hvilke værdier der potentielt kan sikres ved at fjerne tagrørene på et kort stræk af Gudenåen. En ændring af strømrendebreden vurderes at være et væsentligt større og mere bekosteligt indgreb. Det giver desuden et gradvist ringere resultat for



afstrømningshændelser større end medianmaksimum. Modsat vil vandstanden sænkes på hele strækningen, og dermed være til gavn for grundejere, landmænd og sikre væsentligt flere farbare dage på Trækstien.

På nuværende tidspunkt findes Trækstiens kote i forhold til Gudenåens vandspejl, ved tre målestationer på projektstrækningen. Før vandstandsmodellen vurderes at være af yderligere værdi for brugerne, skal resultatet være af en vis præcision. Med opsætning af to ekstra vandstandsmålere, vurderes afvigelsen at kunne holdes under 5 cm. Ved at inddele vandstanden på Trækstien i intervaller efter anbefalet fodtøj, tages der højde for eventuelle usikkerheder i resultatet. Ønskes yderligere sikkerhed for stiens brugere, kan der lægges f.eks. 5 cm til den beregnede vandstand på Trækstien. Dette vil dog medføre flere dage om året, hvor Trækstien fremvises ufarbar.

## 10 Konklusion

Formålet med projektet har været at undersøge de hydrauliske forhold i Gudenåen, på strækningen fra Silkeborg Langsø til Tange Sø. Det med henblik på at beregne resultater for to scenarier, der har til formål at sænke vandstanden på projektstrækningen. Samt som grundlag for opsætning af en vandstandsmodel, der skal formidle tilstanden på Trækstien til dennes brugere.

Vandstanden på projektstrækningen er steget med op mod 0,5 meter over en kort periode sidst i 00'erne. Dette uden betydelig ændring af vandføringen eller fysiske skikkelse, hvorfor årsagen til stigningen tillægges øget vandmodstand. Klarere vand som følge af filtrering af den indvandrede vandremusling, har givet bedre grobetingselser for vandplanter på strækningen og dermed øget grødetilvæksten.

De høje vandstande bekræftes af den hydrauliske Grundmodel. Dette er gældende for både den stationære og dynamiske model. Allerede ved mindre ekstreme hændelser, såsom sommer- og vintermedianmaksimum, sker betydelige oversvømmelser af ådalen. Ved de to hændelser forekommer tilnærmelsesvist samme vandspejlsniveauer, hvilket tilskrives øget grødemængde. Situationen er værst opstrøms Sminge Sø samt omkring Ringvejsbroen. Oversvømmelser for disse strækninger forekommer mere end 50 % af tiden, for et tilnærmelsesvist gennemsnitligt år. Dette har medført til, at der i dag findes naturtyper, tilpasset de periodevise oversvømmelser på strækningen.

Grundmodellen er efterfølgende anvendt til at undersøge enkelte af de udokumenterede uløste problemstillinger. Mere specifikt to scenarier, omhandlende fjernelse af tagrør på en udvalgt strækning samt udvidelse af den vedligeholdte strømrønde.

Første scenarie indledes med en undersøgelse af effekten ved at reducere vandmodstanden på en strækning nedstrøms Ringvejsbroen. Det vurderes muligt at sikre for den kritiske kote i Silkeborg Langsø op til en 5-årshændelse. Effekten ved fjernelse af tagrør på den udvalgte strækning vurderes at kunne sænke vandstanden i Silkeborg Langsø med 13-16 cm, alt efter omfang af indgreb.

I andet scenarie er effekten af en udvidelse af strømrønde bredde fra 7 til 10 m blevet undersøgt. Hertil findes det, at en generel vandstandssænkning på omkring 10 cm er mulig. Ved høj afstrømning og vandstand, aftager effekten af en bredere strømrønde. Det er ikke muligt at hindre oversvømmelser, ved ekstremhændelser som 5- og 20-årsmaksimum. Tiltaget kan ikke anbefales til sænkning af vandstanden nedstrøms Kongensbro pga. stuvning, samt ved ekstremhændelser. Det vurderes muligt at sikre mod stigende tendenser for vandstanden, og dermed sikre at fremtidens sommer- og vintermedianhændelser fortsat ikke overskrider den kritiske kote i Silkeborg Langsø.

Vandstandsmodellen bygger på førromtalte Grundmodel. Ud fra observerede vandspejl ved 6 målestationer og oplyst dato, formår den at formidle tilstanden på hele Trækstien. Der findes god overensstemmelse mellem modellens beregnede vandspejl og opmålingen, med en afvigelse under 10 cm på størstedelen af strækningen. Dog findes afvigelser på op til 20 cm to steder på strækningen. Yderligere optimeringer kan implementeres ved opsætning af to nye vandstandsmålere på udvalgte strækninger, hvormed afvigelsen vurderes at kunne reduceres til mindre end 10 cm.

## 11 Perspektivering

I nærværende afsnit omtales undersøgte emner og resultater i projektet, med et større samfundsrelevant perspektiv.

I Gudenåen har bedre sigtbarhed, ført til ændret grødevækst, der har påvirket vandstanden betydeligt. Denne problematik kan overføres til vandløb, hvor opfyldelse af miljømål, potentielt kan resultere i klarere vand. Det bør derfor undersøges nærmere, hvorvidt der i fremtiden kan opstå problemer med lignende vandstandsstigninger i andre danske vandløb.

Scenarierne, der er undersøgt, er blot to ud af mange potentielle tiltag i forbindelse med klimatilpasning. I Helhedsplanen er listet ni mulige tiltag, der lige så godt kunne have været undersøgt. Hvor ændret grødeskæringsbredde har størst effekt ved de mindre ekstremhændelser, har scenariet med fjernelse af tagrør bedst virkning ved de helt store ekstremhændelser. Dette bør lede til en udvidet undersøgelse af effekten ved sammenspil mellem scenarier. Både samspil mellem de i projektet undersøgte scenarier, men også kombineret med øvrige undersøgte scenarier for Gudenåen. Klimatilpasningstiltag forventes dog besværlige at gennemføre, fordi en stor del af disse har negativ effekt på miljøet. Hertil opstår problematikker ved sikring mod stigende vandstande i de danske ådale.

Et generelt tiltag til bedre dynamiske modeller i vandløb til eks. fremtidige klimatilpasningsprojekter, er bedre datagrundlag. Tidens teknologi og måleudstyr udvider muligheden for indhentning af data indenfor overkommelige økonomiske rammer. Særligt hvor grødens variationer har stor indflydelse på vandstanden er udvidet hydrometrisk overvågning væsentlig. Desuden kan mere udbredt overvågning af vandløbenes hydrologi være grundlag for intelligent grødeskæring, hvor en Q/h-relationen kan angive det optimale skæringstidspunkt. Den teknologiske udvikling lægger dermed op til regulativrevisioner, hvor større viden om de enkelte vandløbs variationer inddrages.

Udvidet overvågning af vandløbs hydrometri kan desuden anvendes til opsætning af modeller, der kan beskrive tilstanden i et vandløb her og nu. Herunder opbygning af gode varslingsmoduler. Vandstandsmodellen i projektet, giver mulighed for at informere brugere af Trækstien om tilstanden. Modellen kan overføres direkte til andre vandløbsnære stier. Desuden bør lodsejeres interesse i melding om tilstand og varsling af vandstand ved deres vandløbsnære jord undersøges. Her findes potentiale for eks. rettidig tilbagetrækning af dyr eller høslæt.

## 12 Litteraturliste

1. Miljø- og Fødevarerministeriet, M. *MiljøGIS for basisanalyse for vandområdeplaner 2021-2027*. 2020 16-11-2020]; Available from: <http://miljoegis.mim.dk/spatialmap?profile=vandrammedirektiv2-bek-2019>.
2. Institut for Planlægning, A.U.F.A., Michael Søgaard Jørgensen, Esben Munk Sørensen, *Prioritering af Danmarks areal i fremtiden*. 2017.
3. al., N.B.O.E., *Afstrømningsforhold i danske vandløb*. 2000.
4. Ida Bülow Gregersen, D., Henrik Madsen, DHI, Jens Jørgen Linde, Krüger, og and D. Karsten Arnbjerg-Nielsen, *Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende regnintensiteter, Skrift nr. 30*. 2014: IDA Spildevandskomiteen 2014.
5. *Ådale skal rumme mere vand*. 16-11-2020].
6. Vestergaard, K., *Hydrologi og vandløbsregulativer*. 2020.
7. Gudenåkomiteén. *Viden om Gudenåen*. 2020 13-10-2020; Available from: <https://videnomgudenaen.silkeborg.dk/>.
8. Bondesen, B.H.L.M.L. 2016 08-09-2016; Available from: <https://denstoredanske.lex.dk/Guden%C3%A5en>.
9. Gudenåkomiteén. *Om Gudenåkomiteén*. 2020; Available from: <https://www.gudenaakomiteen.dk/gudenaakomit%C3%A9en/om-gudenaakomit%C3%A9en/>.
10. Miljøportal, D. *Danmarks Arealinformation*. 2020 04-11-2020]; Available from: <https://arealinformation.miljoportal.dk/html5/index.html?viewer=distribution>.
11. *Landskab og natur langs Trækstien*. 2020 04-11-2020]; Available from: <https://silkeborg.dk/Borger/Natur/Oplev-naturen/Traekstien/Landskab-og-natur>.
12. Viborg amt, A.a., *Regulativ for Gudenåen Silkeborg - Randers*. 2000.
13. *GudenåSamarbejdet*. 2020 06-11-2020]; Available from: <https://silkeborg.dk/Kommunen/Afdelinger-og-ledelse/Oekonomi-og-IT-staben/Gudenaasamarbejdet>.
14. Kommune, S., *OPLÆG TIL HELHEDSPLAN FOR VANDHÅNDBLING LANGS GUDENÅEN*. 2020.
15. Miljøstyrelsen, M.-o.F., *Gudenå-borgmestre arbejder på helhedsplan mod oversvømmelser*. 2020.
16. Midtjylland, R. *C2C CC*. 15-10-2020]; Available from: <https://www.c2ccc.eu/projektmateriale/delprojekterne/aben-land-projekterne/gudenaen/>.
17. SCALGO. 2020; Available from: <https://scalgo.com/da/>.
18. *Overfladevandsdatabasen*. Miljø- og fødevarerministeriet: <https://odaforalle.au.dk/>.
19. Larsen, T., *Manningtallet for vandløb - en udtømmelig kilde til diskussion*. 2017, Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet: Vand & Jord 24. årgang nr. 217.
20. Larsen, L.M.o.T., *Grødens indflydelse på de hydrauliske forhold i vandløb*. 2017, Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet.
21. WSP, *VASP brugervejledning*. 2016.
22. WSP. *Orbicon | WSP er i gang med opmåling af 20 km af Gudenåen*. 2020 20-05-2020; Available from: <https://www.linkedin.com/pulse/orbicon-wsp-er-i-gang-med-opm%C3%A5ling-af-20-km-guden%C3%A5en-petersen/?articleId=6670991095079415808&fbclid=IwAR1jT6zvH9kitLQcVGI3B9m2BMUMsbQzYI-G-3RvnbvAfVh8DACxnLHS4fi>.
23. *Vandløbssiden*. 2020 [cited 2020; Available from: <http://www.hydrometri.dk/hyd/>.