

# Hydraulisk modellering av kraftverksdrift i Tokkeåi

**Lars Skeie**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Knut Alfredsen, IBM

Medveileder: Morten Stickler, Statkraft

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Masteroppgåve i vassdragsteknikk

Kandidat: **Lars Skeie**

Tema: **Hydraulisk modellering av kraftverksdrift i Tokkeåi**

### 1. Bakgrunn

I samband med revisjon av kraftverk er det viktig å skaffe til vege data som kan gi eit så nøyaktig bilete som mogleg av korleis drift av kraftverk påverkar vassdragsmiljøet. I dei seinare åra har store datamengder samla inn gjennom bruk av LiDAR gjort det mogleg å modellere effekt av vassføring i elver på ein meir detaljert måte enn tidlegare, noko som og gjer det mogleg å vurdere effekta av endra vassføring på ein meir nøyaktig måte. Statkraft har ved hjelp av AHM samla inn data for fleire elver i Norge og Sverige. I denne hovudoppgåva skal den hydrauliske modellen HECRAS settast opp for Tokkeåi i Telemark, og det skal vurderast korleis ulike framtidige vassføringsregime vil påverke miljøtilhøva i elva.

### 2. Arbeidsoppgåver

Oppgåva vil ha følgjande hovuddelar:

1. Data for Tokkeåi skal preparerast med tanke på oppsett av den hydrauliske modellen. Dette arbeidet skal baserast på data samla inn i prosjektoppgåva, og det siste datasettet frå AHM for Tokkeåi. Dette inkludere og data for substrat/ruhet på botnen som er utgangspunktet for modellen sitt Manningstal, og vasslinjer for kalibrering både frå eigne målingar og frå AHM. Det høyrer og med å velje dei vassføringane som skal brukast for kalibrering.
2. Den hydrauliske modellen HECRAS 2D skal settast opp for Tokkeåi.
  - a. Modellen skal kalibrerast mot målt nivå på vassflata frå dei vassføringane som er funne i deloppgåve 1).
  - b. Modellen skal klargjerast for dynamisk simulering av typiske vassføringssituasjonar i Tokkeåi, dvs. det må gjerast ei vurdering av endringar i Manningstal med vassføringa.
  - c. Med bakgrunn i resultat frå a) og b) skal det vurderast om ytterlegare kontrollmålingar må gjerast i felt i løpet av våren.
3. Med bakgrunn i miljøhåndboken frå ENVIPEAK (CEDREN), «Miljøvirkningar av effektkjøring», kap. 5. «Hjelpemiddel for miljøtilpasning av effektkjøring» skal metodikken testast ut med Tokkeåi som case. Arbeidet skal og inkludere ei vurdering av graden av effektkjøring. Her er det viktig med fokus mot faktorar som er relevante i ei miljøstudie:

- a. Endringsrate ved tørrlegging (senkningshastighet)
  - b. Tørrlagde areal
  - c. Størrelse av vannføringssvingningene (amplitude)
  - d. Frekvens, fordeling og tidspunkt
4. Data frå oppgåve 3) skal så koplust mot dei biologiske data som tidlegare er samla inn i Tokke, t.d. koplingar mellom tørrlegging og gytehabitat og korleis er gunstig habitat påverka av endring i vassføring.

### **3. Rettleiing, data og informasjon**

Faglærer vert professor Knut Alfredsen ved institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU. Morten Stickler ved Statkraft er ansvarleg for prosjektet i Statkraft, og vil fungere som medrettleiar. Kandidaten er elles ansvarleg for innsamling, kontroll og bruk av data. Hjelp frå ovannemnde eller andre må refererast i rapporten.

### **4. Rapport**

Struktur og oppsett av rapporten er viktig. Gå utifrå at det målgruppa er teknisk personell på seniornivå. Rapporten skal innehalde eit samandrag som gir lesaren informasjon om bakgrunn, framgangsmåte og hovudresultata. Rapporten skal ha innhaldsliste og referanseliste. Referanselista skal vere formatert etter ein eksisterande standard.

Denne oppgåveteksta skal vere inkludert i rapporten.

Data som er samla inn skal dokumenterast og leverast på digital form.

Formatet på rapporten skal følgje standarden ved NTNU. Alle figurar, kart og bilete som er inkludert i rapporten skal vere av god kvalitet med tydeleg tekst på akse og teiknforklaring.

Kandidaten skal inkludere ei signert fråsegn som seier at arbeidet som er presentert er eins eige, og at alle bidrag frå andre kjelder er identifiserte gjennom referanser eller på andre måtar.

**Frist for innlevering er 10. juni 2017.**

Institutt for bygg- og miljøteknikk, NTNU  
Knut Alfredsen  
Professor

# FORORD

---

Arbeidet har blitt gjort i forbindelse med slutføring av det 5-årige mastergradsstudiet Bygg- og miljøteknikk, ved Fakultet for Ingeniørvitenskap og Institutt for Bygg- og Miljø ved NTNU.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til mine to veiledere, Knut Alfredsen og Morten Strickler for god veiledning og konstruktive diskusjoner. Takk til Statkraft for muligheten til å arbeide med LIDAR-data og hydraulisk modellering. Ønsker også å rette en takk til Tor Haakon Bakken i SINTEF Energi for svar og hjelp ved bruk av hjelpemiddelet utviklet for påvirkningsvurdering av effektkjøring.

Jeg håper at deler av masteroppgaven kan være til nytte for andre som skal bruke LIDAR-data og/eller HEC-RAS 5.0 til å modellere todimensjonale strømminger, da informasjon til tider kan være vanskelig å komme over.

Jeg erklærer herved at arbeidet innlevert er mitt eget og at hjelp og informasjon fra andre kilder har blitt referert til.

Lars Skeie

Trondheim, 9.6.2017



# SAMMENDRAG

---

En todimensjonal hydraulisk modell har blitt konstruert i HEC-RAS 5.0 for elven Tokkeåi (5 km lang) i Telemark. Hovedformål for oppgaven er å vurdere graden av effektkjøring av kraftverk. Elven deler seg i flere løp, noe som gjør at en todimensjonal beregning vil være mer egnet enn en endimensjonal, da det er mulig å beregne ulike vannoverflater for hvert av løpene. Terrenggrunnlaget i modellen kommer fra LIDAR-skanning av elven, hvor punktmålinger har en gjennomsnittlig tetthet på 1 dm, slik at bunnforhold er dekket med en veldig høy oppløsning.

Modellen har blitt kalibrert mot målte vannlinjer gjort i felt i forbindelse med prosjektoppgave gjennomført høsten 2016, hvor to av kalibreringene dekket hele elvens område. Kalibreringen har blitt gjort ved at Mannings ruhetskoeffisient for ulike områder i elven har blitt endret, slik at vannoverflaten simulert og målt (i felt) var lik. Standardavviket mellom simulert og målt vannoverflate ble beregnet til  $\pm 5$  cm for kalibrert modell, noe som vil være av samme størrelsesorden som målte GPS-målingene og fluktuasjoner i vannspeilet.

Ved undersøkelse av ulike parametere i HEC-RAS-modellen kom det fram at valg av Mannings ruhetskoeffisient, beregningsmetode og gittercellestørrelser var de mest utslagsgivende parametere som ble testet. Variasjoner av parametere førte til vannoverflateendringer på centimeter- til desimeternivå. De resterende parametere ga utslag på millimeter- og centimeternivå.

Det ble vurdert at Tokkeåi er i moderat grad påvirket av effektkjøring, hvor lave senkningshastigheter og andel tørrlagt arealer er antatt som hovedårsaken til at påvirkningen ikke ble beregnet som høyere. Simuleringene har vist at ved vannføringer lavere enn  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  i Tokkeåi vil andel tørrlagt areal øke kraftig. Det vil frarådes å regulere vannføring lavere enn denne verdien for at gode miljøforhold i elven skal opprettholdes. Av gyteområdene undersøkt, er det området som befinner seg lengst oppstrøms i elven som har i størst grad blitt påvirket av raske endringer.





# ABSTRACT

---

A two-dimensional hydraulic model was created in HEC-RAS 5.0 for the river Tokkeåi (5 km long), Norway. The main goal of the thesis is to evaluate the impact of hydro peaking from the hydro power. The river divides into several runs, which makes a two-dimensional more suitable than a one-dimensional, due to the possibility to calculate different water surfaces in different runs. LIDAR-data with an average spacing of 1 dm is used to create the terrain. Thus, the topographic conditions are covered with a very fine resolution.

The model was calibrated against measured water surface elevation collected in previous works, where two of the calibrations covered the entire river area. The calibration was undertaken by changing the Manning's roughness coefficient for different, user-specified, areas of the river, until a satisfactory fit between the simulated and measured (in the field) water surface elevation was reached. The standard deviation measured between simulated and measured water surface elevations was  $\pm 5$  cm, which would be an accuracy of the same magnitude as GPS measuring and natural fluctuations of the water surface.

From the results of sensitivity analyses of different parameters in the HEC-RAS model, Manning's roughness coefficient, equation set and grid cell size were found to be the most decisive parameters. The variations of these parameters led to changes in water surface elevations of centimeters to decimeters, while the others led to changes of millimeters to centimeters.

The hydro peaking in Tokkeåi is considered to have a moderate impact on the environment, where low proportion of dried up areas and lowering speeds (of the water surface) is the main reason why the impact was not evaluated higher. The simulations have shown that for water discharges lower than  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  will cause rapid changes in the proportion of dried up areas. It is not advisable to regulate discharges below this value in order to maintain good environmental conditions in the river. Of the spawning grounds investigated, the area furthest upstream is the most heavily impacted.



# INNHOLDSFORTEGNELSE

---

Forord .....	i
Sammendrag .....	iii
Abstract .....	v
Forkortelser .....	xvii
1 Innledning .....	1
1.1 Formål med masteroppgaven .....	2
2 Bakgrunn/Teori .....	3
2.1 Tokkeåi .....	3
2.2 Rehabilitering av Lio Kraftverk .....	4
2.3 Revisjonsutredning .....	5
2.4 Tidligere forskningsarbeid .....	5
2.5 LIDAR-data .....	8
2.6 LAStools .....	9
2.7 Interpolasjonsteknikker for LIDAR i ArcGIS .....	10
2.8 HEC-RAS 5.0 .....	11
2.9 Beregningsgrunnlag for todimensjonal strømning .....	12
2.10 Datamaskinens spesifikasjoner .....	20
2.11 Miljøvirkninger av effektkjøring .....	20
2.12 COSH-Tool .....	25
3 Metode .....	27
3.1 LAStools .....	27
3.2 Terrengmodell .....	27
3.3 Valg og operasjoner i HEC-RAS .....	30
3.4 Følsomhetsanalyser og parametertesting .....	30
3.5 Kalibrering av den hydrauliske modellen .....	37
3.6 Vurdering av behov for felttur .....	42
3.7 Effektkjøring i Tokkeåi .....	43
3.8 Forhold mellom vanndekt areal og vannføring .....	48
3.9 Endring av bunnforhold og terreng .....	49
3.10 Andel vannføring i ulike elveløp .....	51
4 Resultat .....	53

4.1	Konstruering av sidekanal .....	53
4.2	Vurdering av interpolasjonsmetoder for terrengmodell .....	54
4.3	Følsomhetsanalyser og parametertesting.....	56
4.4	Kalibrert modell.....	68
4.5	Effektkjøring i Tokkeåi .....	72
4.6	Forhold mellom vanndekt areal og vannføring .....	77
4.7	Endring i bunnforhold og terreng .....	79
4.8	Andel av vannføringen i ulike elveløp .....	82
5	Diskusjon.....	83
5.1	Konstruering av sidekanal .....	83
5.2	Interpolasjonsmetoder for terrengmodell .....	83
5.3	Følsomhetsanalyser .....	83
5.4	Kalibrering av den hydrauliske modellen.....	89
5.5	Effektkjøring i Tokkeåi .....	92
5.6	Forhold mellom vanndekt areal og vannføring .....	95
5.7	Endring i bunnforhold og terreng .....	95
5.8	Andel vannføring i ulike elveløp .....	96
6	Konklusjon.....	97
7	Referanse .....	99
	Vedlegg A - Tokke-Vinje-reguleringen .....	I
	Vedlegg B - Diverse bilder av Tokkeåi.....	II
	Vedlegg C - Gyteområder .....	IV
	Vedlegg D - Resultater fra prosjektoppgave .....	VI
	Vedlegg E - Tabeller fra følsomhetsanalysene.....	IX
	Vedlegg F - Simuleringsinnstillinger ved følsomhetsanalyser .....	XIII
	Vedlegg G - Manning ruhetskoeffisienter ved kalibrerte vannføringer.....	XVI
	Vedlegg H - Problematiske kalibreringsområder .....	XVIII
	Vedlegg I - Effektkjøringsscenarioer .....	XXI
	Vedlegg J - Vannføringskurveutvikling i Tokkeåi.....	XXIII
	Vedlegg K - Påvirkning av vannstand i Bandak for vannstand i Tokkeåi .....	XXIV
	Vedlegg L - Resultat av vurdering av diverse effektkjøringspåvirkninger .....	XXV
	Vedlegg M - Forhold mellom vanndekt areal og vannføring.....	XXX
	Vedlegg N - Terrengmodeller ved terskel Hagusjåkanalen .....	XXXII
	Vedlegg O - Resultatplot fra COSH-tool .....	XXXIII

# FIGURLISTE

---

Figur 1: Oversiktskart over prosjektoppgavens geografiske omfang av Tokkeåi.....	3
Figur 2: Vannføringskurver for målestasjon Elvarheim .....	4
Figur 3: Vannstandskurver for målestasjon.....	4
Figur 4: Gyteområder og gytegroper identifisert ved tidligere studier i Tokkeåi .....	6
Figur 5: Vannføringskurve fra målestasjon Elvarheim for året 2015 .....	9
Figur 6: Skisse av hvordan interpolasjonstypen binning benytter to teknikker for å beregne celleverdier .....	10
Figur 7: Illustrasjon som viser hvordan de to gittercellestrukturene blir produsert og overlapper hverandre .....	17
Figur 8: Celler som viser retning de ulike diskretiseringsmetodene beregner gradienter .....	20
Figur 9: Oversikt over utklippede polygoner til vurdering av interpolasjonsmetoder.....	29
Figur 10: Området som ble benyttet til sensitivitetsanalyse av beregningsmetodene SW vs. DSW, bruddlinjer, cellestørrelse (stort område) og Mannings ruhekkoeffisient.....	31
Figur 11: Område som ble benyttet til følsomhetsanalyse av SW vs. DSW og gittercellestørrelse (lite område) .....	32
Figur 12: Geometrien som ble benyttet i følsomhetsanalyse av bruddlinjer, SW vs. DSW og gittercellestørrelser .....	33
Figur 13: Delområde av Tokkeåi som ble benyttet til følsomhetsanalyse av virvelkoeffisient	35
Figur 14: Område av Tokkeåi som ble benyttet til følsomhetsanalyse av tidssteget .....	36
Figur 15: Oversikt over de ulike Manningsområdene som ble benyttet i HEC-RAS .....	38
Figur 16: Området som ble benyttet for kalibrering av nedre delområde av Tokkeåi .....	39
Figur 17: Oversiktskart over lengdeprofiler og vannlinjemålinger .....	41
Figur 18: Værstatistikk for Tokke og omegn det siste året (april 2016 til april 2017) .....	43
Figur 19: Gyteområdene 1, 2 og 3, som ble brukt til å identifisere senkningshastigheter og tørrelegging ved ulike simuleringer ved effektkjøring i Tokkeåi .....	45
Figur 20: Kart over nedre Tokkeåi og deltaområdet som munner ut i Bandak, hvor Hagusjåkanalen er markert.....	50
Figur 21: Oversiktskart over midtre del av Tokkeåi hvor navn for de ulike elveløpene er gitt	51
Figur 22: En tredimensjonal illustrasjon av sidekanalen .....	53
Figur 23: Kartutsnitt over Tokkeåi som viser den konstruerte sidekanalen.....	54

Figur 24: Frekvensplot som viser innenfor hvilke intervall avvikene mellom fjernede og interpolerte punkter ligger.....	55
Figur 25: Differanser mellom vannoverflatene beregnet ved SW- og DSW-baserte simuleringer med bruddlinjer for det <i>store</i> området.....	57
Figur 26: Differanser mellom vannoverflatene beregnet ved SW- og DSW-baserte simuleringer uten bruddlinjer for det <i>store</i> området.....	58
Figur 27: Differanser mellom vannoverflatene beregnet ved SW- og DSW-baserte simuleringer uten bruddlinjer for det <i>lille</i> området .....	58
Figur 28: Differanser i vannoverflate mellom simuleringer med og uten bruddlinjer.....	59
Figur 29: Kartutsnitt fra Tokkeåi som viser vannoverflatedifferansene beregnet mellom simuleringsresultatene med og uten bruddlinjer .....	60
Figur 30: Følsomhetsanalyse som viser differanser mellom vannoverflatene beregnet for ulike gittercellestørrelser for det <i>lille</i> området .....	61
Figur 31: Kartutklippene viser differanse beregnet i vannoverflaten for følsomhetsanalyse av gittercellestørrelser for det <i>lille</i> området .....	62
Figur 32: Følsomhetsanalyse som viser differanser mellom vannoverflatene beregnet for ulike gittercellestørrelser for det <i>store</i> området .....	62
Figur 33: Kartutklippene viser differanse beregnet i vannoverflaten for følsomhetsanalyse av gittercellestørrelser for det <i>store</i> området .....	63
Figur 34: Differansene i simulert vannoverflate ved endring i Mannings ruhetskoeffisient ...	64
Figur 35: Differanser i simulerte vannoverflater som følge av en prosentvis endring av alle Mannings ruhetskoeffisientene .....	65
Figur 36: Følsomhet av beregnet vannoverflate ved endring av virvelkoeffisienten.....	66
Figur 37: Kart som viser differansene mellom simulert vannoverflate ved ulike virvelkoeffisienter .....	66
Figur 38: Resultat fra parameterstest av tidssteget som viser hvordan avvik i vannoverflaten ved bruk av ulike tidssteg i simuleringene.....	67
Figur 39: Resultatkart som viser påvirkningen av Corioliskraften i Tokkeåi .....	68
Figur 40: Lengdeprofil av hele Tokkeåi som viser kalibrert vannoverflate ved vannføring 17,4 m <sup>3</sup> /s.....	69
Figur 41: Lengdeprofil av høyre sideløp i Tokkeåi som viser kalibrert vannoverflate ved vannføring 17,4 m <sup>3</sup> /s .....	69
Figur 42: Kalibrerte Mannings ruhetskoeffisienter ved ulike vannføringene for ulike Manningsområder benyttet i HEC-RAS-modellen .....	70

Figur 43: Forhold mellom gjennomsnittlig Mannings ruhetskoeffisient og vannføring, hvor den gjennomsnittlige ruhetsverdien for kalibrerte vannføringer er plottet mot vannføringen.....	71
Figur 44: Døgnregulert effektkjøringsperiode 1.-20. februar 2014 .....	72
Figur 45: Strømforbruket for hele Norge over døgnet 4.-5. februar 2014 .....	73
Figur 46: Vanndekning- og tørrleggingskurver for Tokkeåi.....	78
Figur 47: Kartutsnitt for midtre del av Tokkeåi som viser vanndekt areal for ulike vannføringer 1-20 m <sup>3</sup> /s i figur a)-d).....	79
Figur 48: Kartutsnitt som viser differansene beregnet mellom terrenget etter og før flommen i 2015 .....	80
Figur 49: Utklipp av Tokkeåi som viser simulert vannføring lik 17,4 m <sup>3</sup> /s ved Hagusjåkanalen .....	80
Figur 50: Kartutsnitt fra sammenligning av LIDAR-skanningene av Tokkeåi fra 2015 og 2016, som viser differanse i høydeverdiene for de to datasettene .....	81
Figur 51: Kartutsnitt over midtre del av Tokkeåi som viser andel av vannføring i de ulike elveløpene.....	82
Figur 52: Oversiktskart over Statkrafts reguleringsområdet i Tokke-Vinje.....	I
Figur 53: Bilde fra Helveteshylen av utløp av Lio Kraftverk og Tokkeåi oppstrøms masteroppgavens omfang .....	II
Figur 54: Bilde av Tokkeåi tatt fra gangbruen ved Helveteshylen sett nedstrøms.....	II
Figur 55: Bilde tatt oppstrøms av strømningsforhold ved terskler.....	III
Figur 56: Bilde tatt oppstrøms som viser et strykområde nedstrøms tersklene i bilde over ....	III
Figur 61: Gyteområder identifisert ved tidligere arbeider.....	IV
Figur 62: Oversiktskart over gyteområder i Tokkeåi .....	V
Figur 57: Oversiktsbilde over manuelle målinger gjort i Tokkeåi som resultat av feltturen ...	VI
Figur 58: Viser tre vannlinjer for tre ulike vannføringer .....	VII
Figur 59: Oversikt over GPS-målingene fra felttur som er benyttet i vannlinjeberegningene	VII
Figur 60: Ruhetskart for Tokkeåi .....	VIII
Figur 63 a) - e): Områder hvor det var problemer med å kalibrere den hydrauliske modellen mot yttergrense for vannoverflate for vannføring 9,6 m <sup>3</sup> /s.....	XIX
Figur 64 a) – d): Områder hvor det var vanskelig å få god tilpasning av kalibreringen for vannføring 17,4 m <sup>3</sup> /s .....	XX
Figur 65: Vannføringskurver for ulike steder i Tokkeåi, hvor kurvene representerer avstander fra starten av strømningsområdet .....	XXIII
Figur 66: Kartutsnitt av område hvor nedre del av Tokkeåi munner ut i Bandak.....	XXIV

Figur 67: Kartutsnitt som viser terskel ved Hagusjåkanalen ved LIDAR-skanning i 2015 (til venstre) og 2016 (til høyre).....	XXXII
Figur 68: Vannføringsserie fra 1.1.2012-2.5.2017 med timesverdier .....	XXXIII
Figur 69: Årlig forhold mellom Qmaks og Qmin ved rask endring (90-persentil).....	XXXIV
Figur 70: Vannføringsverdier før og etter rask reduksjon (90-persentil).....	XXXIV
Figur 71: Antall raske hendelser over døgnet basert på hele analyseperioden (90-persentil) .....	XXXV
Figur 72: Antall raske hendelser over døgnet basert på vinterperiodene (90-persentil) ...	XXXV
Figur 73: Antall raske hendelser over døgnet basert på sommerperiodene (90-persentil) .....	XXXVI
Figur 74: Antall raske hendelser per år basert på hele analyseperioden (90-persentil) ..	XXXVI
Figur 75: Antall raske hendelser per år basert på vinterperioden (90-persentil).....	XXXVII
Figur 76: Antall raske hendelser per år basert på sommerperioden (90-persentil) .....	XXXVII
Figur 77: Årlig forhold mellom Qmaks og Qmin ved rask endring (93-persentil).....	XXXVIII
Figur 78: Vannføringsverdier før og etter rask reduksjon (93-persentil).....	XXXVIII
Figur 79: Antall raske hendelser over døgnet basert på hele analyseperioden (93-persentil) .....	XXXIX
Figur 80: Antall raske hendelser over døgnet basert på vinterperiodene (93-persentil) .	XXXIX
Figur 81: Antall raske hendelser over døgnet basert på sommerperiodene (93-persentil).....	XL
Figur 82: Antall raske hendelser per år basert på hele analyseperioden (93-persentil) .....	XL
Figur 83: Antall raske hendelser per år basert på vinterperioden (93-persentil).....	XLI
Figur 84: Antall raske hendelser per år basert på sommerperioden (93-persentil) .....	XLI
Figur 85: Årlig forhold mellom Qmaks og Qmin ved rask endring (96-persentil).....	XLII
Figur 86: Vannføringsverdier før og etter rask reduksjon (96-persentil).....	XLII
Figur 87: Antall raske hendelser over døgnet basert på hele analyseperioden (96-persentil) .....	XLIII
Figur 88: Antall raske hendelser over døgnet basert på vinterperiodene (96-persentil) ....	XLIII
Figur 89: Antall raske hendelser over døgnet basert på sommerperiodene (96-persentil)..	XLIV
Figur 90: Antall raske hendelser per år basert på hele analyseperioden (96-persentil) .....	XLIV
Figur 91: Antall raske hendelser per år basert på vinterperioden (96-persentil).....	XLV
Figur 92: Antall raske hendelser per år basert på sommerperioden (96-persentil) .....	XLV
Figur 93: Årlig forhold mellom Qmaks og Qmin ved rask endring (99-persentil).....	XLVI
Figur 94: Vannføringsverdier før og etter rask reduksjon (99-persentil).....	XLVI



Figur 95: Antall raske hendelser over døgnet basert på hele analyseperioden (99-persentil)	XLVII
Figur 96: Antall raske hendelser over døgnet basert på vinterperiodene (99-persentil) ...	XLVII
Figur 97: Antall raske hendelser over døgnet basert på sommerperiodene (99-persentil)	XLVIII
Figur 98: Antall raske hendelser per år basert på hele analyseperioden (99-persentil) ...	XLVIII
Figur 99: Antall raske hendelser per år basert på vinterperioden (99-persentil).....	XLIX
Figur 100: Antall raske hendelser per år basert på sommerperioden (99-persentil) .....	XLIX



# TABELLISTE

---

Tabell 1: Blandingskoeffisienter for ulike forhold ved virvelstrømning .....	14
Tabell 2: Datamaskinens spesifikasjoner .....	20
Tabell 3: Kriterier for påvirkningsstørrelse av ulike faktorer ved effektkjøring i elv.....	23
Tabell 4: Klassifisering av påvirkning av effektkjøring.....	24
Tabell 5: Oversikt over resultatene fra sammenligning av de ulike interpolasjonsmetodene..	55
Tabell 6: Liste over mest følsomme parametere i HEC-RAS .....	56
Tabell 7: Viser resultat av differansene av målte z-verdier i felt, som ble benyttet til kalibrering av modell ved vannføring 17,4 m <sup>3</sup> /s, mot simulerte z-verdier. ....	70
Tabell 8: Gjennomsnittlige Mannings ruhetskoeffisienter beregnet ved kalibrering av de ulike vannføringene.....	71
Tabell 9: Resultat fra simuleringene som viser senkningshastighet, tørrlagt areal og amplitude for de to utplukkede vinter- og sommerscenarioene for effektkjøringshendelse .....	74
Tabell 10: Resultat fra vurdering av påvirkning av effektkjøring i Tokkeåi .....	76
Tabell 11: Beregnede senkningshastigheter, tørrlagte areal og amplitude ved mest kritiske vannføringsreduksjon fra 18 til 4 m <sup>3</sup> /s .....	77
Tabell 12: Differanse i z-koordinatene mellom LIDAR-skanningene fra 2015 og 2016 .....	82
Tabell 13: Resultat av sammenligning av beregningsmetodene SW og DSW for det <i>store</i> området.....	IX
Tabell 14: Resultat av sammenligning av beregningsmetodene SW og DSW for det <i>lille</i> området.....	IX
Tabell 15: Resultatene fra følsomhetsanalyse av bruddlinjer .....	X
Tabell 16: Resultatene fra følsomhetsanalyse av gittercellestørrelser for det lille området .....	X
Tabell 17: Resultatene fra følsomhetsanalyse av gittercellestørrelser for det store området....	X
Tabell 18: Resultat av parameteretest av Mannings ruhetskoeffisient (tabell 1 av 2).....	XI
Tabell 19: Resultat av parameteretest av Mannings ruhetskoeffisient (tabell 2 av 2).....	XI
Tabell 20: Resultat fra følsomhetsanalyse av Mannings ruhetskoeffisient for kalibrert modell ved vannføring 17,4 m <sup>3</sup> /s .....	XI
Tabell 21: Resultat fra parameteretest av virvelkoeffisienten.....	XI
Tabell 22: Resultat fra parameteretest av tidssteg.....	XII
Tabell 23: Oversikt over simulasjonsinnstillinger ved ulike følsomhetsanalyser .....	XIII

Tabell 24: Mannings ruhetskoeffisienter for de ulike Manningsområdene ved ulike kalibrerte vannføringer .....	XVI
Tabell 25: Hydrograf for vinter- og sommerscenarioene som ble plukket ut fra vannføringskurven.....	XXI
Tabell 26: Vannføringer før og etter effektkjørings simulering for de ulike persentilene ....	XXII
Tabell 27: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved utplukket vinterscenario .....	XXV
Tabell 28: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved utplukket sommerscenario.....	XXV
Tabell 29: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved 90/10 %-persentilen .....	XXVI
Tabell 30: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved 93/7 %-persentilen .....	XXVI
Tabell 31: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved 96/4 %-persentilen .....	XXVII
Tabell 32: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved 99/1 %-persentilen .....	XXVIII
Tabell 33: Komplette utregning av tørrlagt areal og senkningshastighet for «verste-tilfelle»-scenarioet.....	XXIX
Tabell 34: Resultat for vanndekning og tørrlegging av elven og spesifikke gyteområder for ulike vannføring simulert i HEC-RAS for Tokkeåi .....	XXX

# FORKORTELSER

---

ADCP – Acoustic doppler current profiler

AHM – AirborneHydroMapping

ArcGIS – En GIS-programvarepakke utviklet av ESRI

ArcMap – Et GIS-program i programvarepakken til ArcGIS

ASPRS – The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing

Excel – Microsoft Excel

CEDREN – Centre for Environmental Design of Renewable Energy

GPS – Global positioning system

GIS - Geografiske informasjonssystemer

HiT – Høgskolen i Telemark

HEC-RAS – The Hydrologic Engineering Center – River Analysis System

LAS – et filformat for deling av LIDAR-data standardisert av ASPRS

LIDAR – Light Detection and Ranging – «Grønn laser» er et norsk begrep

NINA – Norsk institutt for naturforskning

NTNU – Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet

NVE – Norges vassdrags- og energidirektorat

USACE – US Army Corps of Engineers



# 1 INNLEDNING

---

Regulering av vassdrag som følge av utbygging av vannkraftanlegg fører til endringer i det naturlige vannføringsregimet, hvor det naturlige tilsiget av vann i stor grad erstattes med et menneskekontrollert utslipp av vann. Hvor stor påvirkning reguleringen har for et vassdrag kommer av hvor stor reguleringsmuligheter anlegget har. F.eks. et stort magasin, som kan lagre store deler av tilsiget i nedslagsfeltet, vil ha stor mulighet til å bestemme når vannet skal benyttes til kraftproduksjon, og samtidig når vannet tilføres resten av vassdraget.

Forhold som blir endret i vassdrag på grunn av regulering er blant annet bunnforhold (sammensetning og størrelser av masser), vannhastigheter, vanndekt areal, vanntemperaturer og isdannelsemønster. For anadrome fiskearter som laks og ørret, som tilbringer de tidlige fasene av livet i elver, vil regulering og endringer i vassdraget i veldig stor grad føre med seg negative konsekvenser for oppvekstforhold (Miljødirektoratet, 2011).

Tidligere vannkraftutbygging i Norge (før 1980-tallet) hadde i mindre grad fokus på miljøforhold når det kom til vektlegging av nytter og ulemper ved vannkraftutbygging. Det har medført at en stor del av utbygd vannkraft i Norge har fått miljøkrav inkludert i dagens konsesjon. I tiden fremover hvor konsesjoner vil få nye revisjoner vil miljøaspektet stå sentralt (Miljødirektoratet, 2011). Derfor vil forskning rundt tema som vannkraftens påvirkning på miljøet være svært nyttig for at faktabaserte og fornuftige valg kan gjøres på et beslutnings-/politisk nivå.

Som følge av klimamål bestemt av EU hvor 20 % av energikildene skal være fornybare innen 2020 (Fornybar.no, 2016), vil energikilder som kull- og gasskraft bli erstattet med fornybar sol- og vindkraft. Sol- og vindkraft er uregulerbare energikilder som kun produserer energi ved gode nok forhold. Dette vil føre til svingninger i produsert energi, slik at uten en form for reservekilde vil ikke den uregulerbare energien være tilstrekkelig for å levere nødvendig behov til enhver tid på strømmettet. Norge som «grønt batteri» har blitt diskutert i nyere tid av anerkjente forskere og fagfolk (Deign, 2017), hvor vannkraften og magasinene i Norge kan benyttes som lagring av energi i form av vann, hvor vann pumpes opp ved overproduksjon av strøm fra sol- og vindenergi, og brukes til produksjon når forholdene for de uregulerbare kildene er ugunstige.

En konsekvens av at vannkraft brukes som regulator av strømnettet vil være økning effektkjøring. Det vil si at vannføringene vil endres raskere og antall endringer vil øke, slik at nedstrøms forhold, som elver, vil påvirkes i enda større grad enn i dag. Selv om økt effektkjøring neppe vil påvirke alle vannkraftanlegg og vassdrag i Norge, hvor de med stor magasinkapasitet vil være mer egnet enn de uten, så er det potensiale for ringvirkninger i vannkraftbransjer, slik at flere anlegg blir påvirket. På bakgrunn av en mulig endring i nasjonal og global energipolitikk vil undersøkelse av hvordan effektkjøring påvirker vassdrag, og spesielt sårbare resipienter som elver være viktig for en bærekraftig framtid.

LIDAR-skanning er en relativt ny metode for å måle topografi med høy nøyaktighet, som i motsetning til radar-skanninger har mulighet til å trenge igjennom væsker slik at den kan måle elvers batymetri (bunnforhold under vann). Denne muligheten gjør LIDAR til en spennende teknologi for vassdrag og i hydraulisk/hydrologisk sammenheng. Med tanke på at Statkraft har samlet inn LIDAR-data som dekker området av Tokkeåi fra utløp i Lio kraftverk til Bandak, vil det være interessant å se i hvilken grad metoden og kvaliteten av data kan anvendes til hydrauliske formål.

## **1.1 Formål med masteroppgaven**

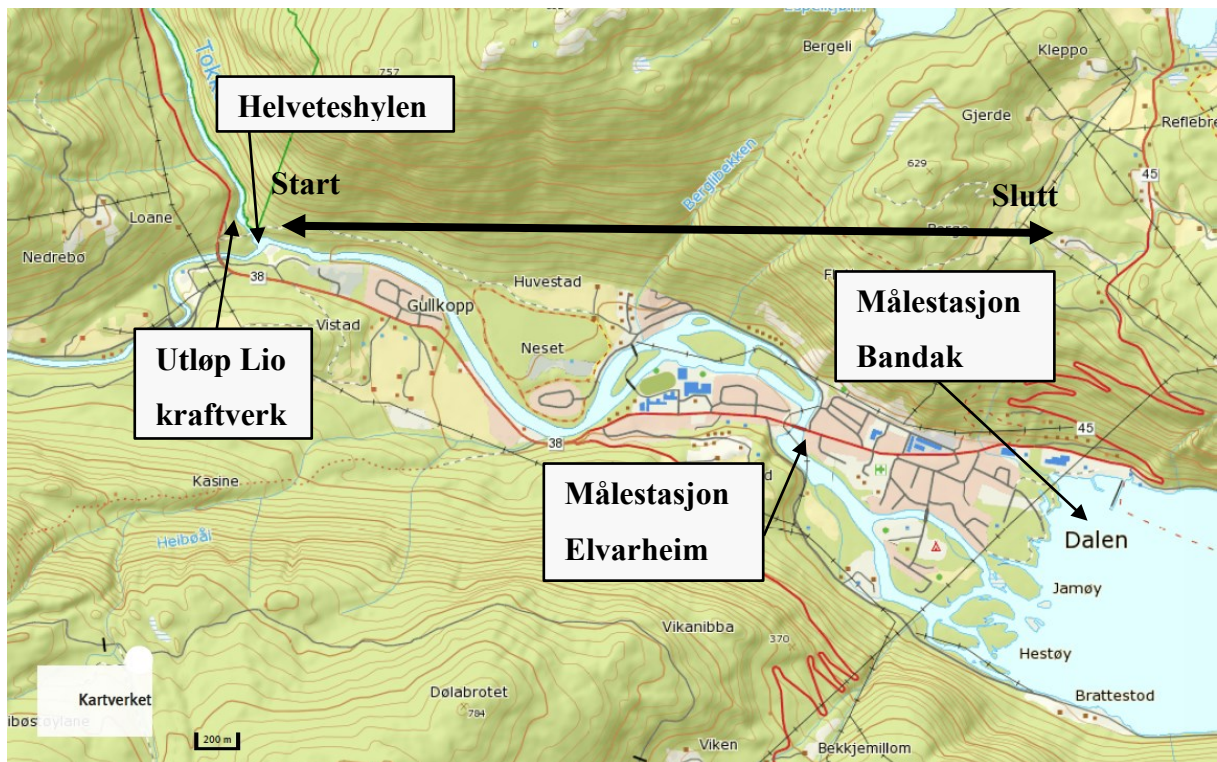
- Undersøke endringer i data mellom gammel og ny LIDAR-skanning.
- Kalibrere den hydrauliske modellen for ulike vannføringer ved å endre Mannings ruhetskoeffisient, slik at vannoverflate simulert og målt vil stemme tilstrekkelig overens.
- Undersøke hvordan ulike parametere og valg i den hydrauliske modellen påvirker kvaliteten og tidsbruk. Den todimensjonale HEC-RAS-modellen og bruk av LIDAR er relativt nytt, slik at det eksisterer ingen mønsterpraksis («best practice»). Derfor skal det forsøkes å dokumentere hva som gjøres i så stor grad som mulig.
- Vurdere påvirkningen av både reell og potensiell effektkjøring av kraftverk i Tokkeåi, med fokus på faktorer som kan knyttes opp mot gyteforhold og fiskehabitat.



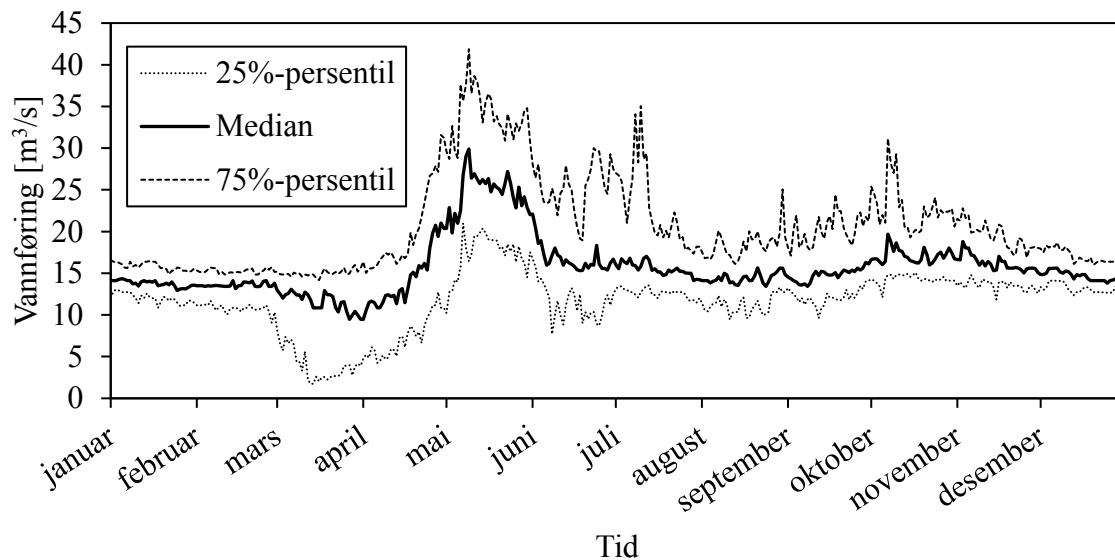
## 2 BAKGRUNN/TEORI

### 2.1 Tokkeåi

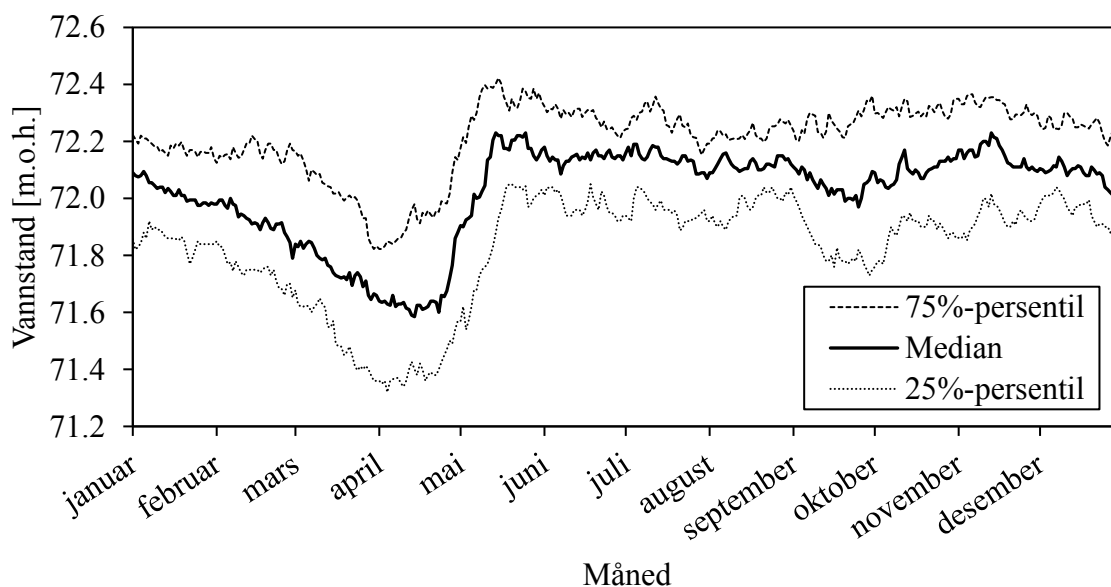
Tokkeåi er en regulert elv i Telemark fylke, som er en del av reguleringsområdet Tokke-Vinje til Statkraft (se figur 52 i Vedlegg A). Elven starter i Totak i Vinje kommune, og munner ut i Bandak, Tokke kommune. I prosjektet skal den nederste delen av Tokkeåi, som er omtrent 5 km lang, studeres. Området i prosjektet er avgrenset øverst ved området rett nedstrøms Helveteshylen, en kulp hvor Dalåi møter Tokkeåi. Rett oppstrøms Helveteshylen har Lio kraftverk sitt tunnelutløp. Statkraft driver kraftverket og har dermed kontroll over mye vann som til enhver tid går ut i Tokkeåi fra Lio kraftverk (se bilder av oppstrøms forhold i Vedlegg B). Videre følger området som blir undersøkt ned i tettstedet Dalen, og ender i det Tokkeåi munner ut i Bandak. Se figur 1 for oversikt over prosjektområdet. Statkraft/NVE har en målestasjon (Elvarheim) som måler vannføring i Tokkeåi og en som måler vannstand i Bandak (begge markert på figur 1). I figur 2 og figur 3 er vist henholdsvis vannførings- og vannstandskurver basert på median, 25 %- og 75 %-persentilen.



Figur 1: Oversiktskart over prosjektoppgavens geografiske omfang av Tokkeåi (Norgeskart, 2016).



Figur 2: Vannføringskurver for målestasjon Elvarheim (Nr. 16.117.0). Vannføringen er basert på døgnverdier målt klokken 12:00 fra 1968-2015. Datagrunnlag hentet fra NVE.



Figur 3: Vannstandskurver for målestasjon Bandak v/Dalen (Nr. 16.6.0). Vannstandene er basert på døgnverdier målt klokken 12:00 fra 1968-2015. Datagrunnlag hentet hos NVE.

## 2.2 Rehabilitering av Lio Kraftverk

I 2015 startet Statkraft rehabilitering av Lio Kraftverk, som vil øke både effekten og produksjonen til kraftverket. Blant annet vil vannvei, generator og turbin bli rehabilitert, noe som fører til at kraftverket må stoppes i en lengre periode i første halvdel i 2017 (Statkraft AS, 2015). En følge av at kraftverket må stoppe driften vil være at vannføringen fra

reguleringsområdet Tokke-Vinje til Tokkeåi vil være omtrent lik den selvpålagte miljøvannføringen (minstevannføringen) på 4 m<sup>3</sup>/s.

### **2.3 Revisjonsutredning**

I 2013 gjennomførte NVE og Miljødirektoratet en utredning av Norges vannkraftkonsesjoner som kan revideres innen 2022 på vegne av Olje- og energidepartementet og Miljødirektoratet. I rapporten er det blitt konkludert med at Tokkeåi som har en årlig produksjon på omtrent 900 GWh vil få strengere krav til minstevannføring og magasinrestriksjoner. Det blir anslått at kravene vil føre mer enn 100 GWh tapt produksjon. Samtidig blir vassdraget gitt høy prioritet som er beskrevet som «vassdrag med stort potensial for forbedring av viktige miljøverdier, og med antatt lite eller moderat krafttap i forhold til forventet miljøgevinst.». De strenge kravene til vassdraget kommer av vurderingen av verdi og påvirkning av miljøforholdene: fiske, naturmangfold og landskap/friluftsliv, hvor Tokkeåi ble vurdert å være svært påvirket av vassdragsreguleringen (høyeste klasse) (NVE, 2013).

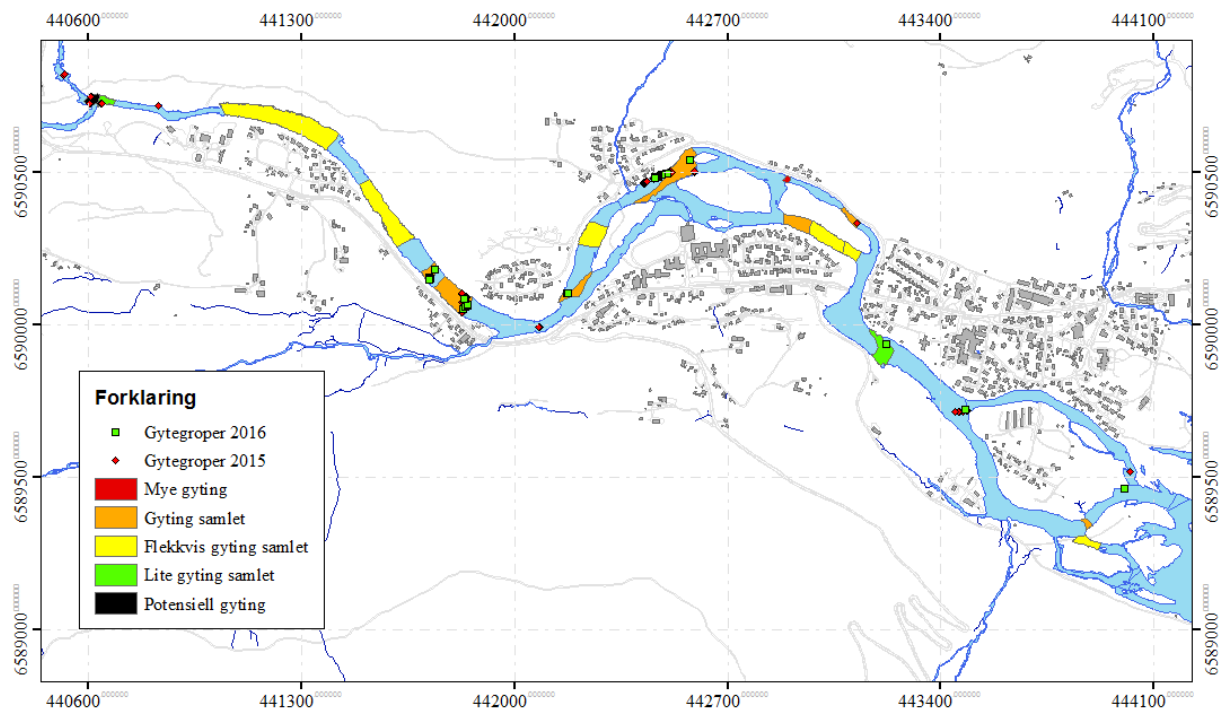
### **2.4 Tidligere forskningsarbeid**

Statkraft har holdt på med diverse forskningsarbeid i Tokkeåi med tanke på miljøforholdene i elven i flere år. Interessen for forbedring av miljøforholdene, med tanke på revisjonsutredningen som ble gjort i 2013, har bare økt. I den forbindelse har flere aktører som HiT, NINA, NTNU og UNI Miljø vært involvert. UNI Miljø i Bergen har gjort studier av storørreten (*salmo trutta lacustris*) i Bandak og Tokkeåi. De har kartlagt elven i ulike soner, hvor vurderingen av ulike sonene bestod blant annet av faktorer som mesohabitat, dybder, gytemuligheter, kornfordelinger, antall skjul for fisken og overflateareal.

HiT, gjennomførte i 2009 en studie av rehabiliteringsmuligheter for fiskehabitat i Tokkeåi (fra oppstrøms Dalen sentrum til utløp i Bandak), hvor blant annet gytekart ble dannet (se Vedlegg C). Kartene består av ulike soner i elven hvor det foregår/er potensial for gyting (Heggenes, Sageie og Kristiansen, 2009). Ved bruk av gytekartlaget fra HiT, kan det gjøres en sammenligning av gyteplasser mot data fra UNI miljø gjort i nyere tid.

Gyteplassene vil være viktige områder å studere i en hydraulisk modell, hvor vannstand og hastighet i gyteområdene vil være faktorer som forteller noe om hvor gode leveforhold fisken vil ha. I 2015 og 2016 ble det gjort nye studier av gyteforhold i Tokkeåi av Jan Heggenes hvor

fokuset lå på å identifisere store gytegrøper. Gyteområder som har blitt identifisert av UNI Miljø og Heggnes i nyere tid er oppsummert i figur 4 under.



Figur 4: Gyteområder og gytegrøper som er identifisert ved tidligere studier i Tokkeåi av UNI Miljø og Jan Heggnes. Punktdata (gytegrøper 2015 og 2016) representerer de store gytegrøpene identifisert av Heggnes og de fargede områdene er basert på UNI Miljø's studie av bunnforhold.

Høsten 2015 skrev tidligere masterstudenter ved NTNU prosjektoppgave som blant annet tok for seg bruk av LIDAR-data i Tokkeåi. Et hovedfunn i oppgaven var at LIDAR-skanning av elver var en lovende metode som har sine svakheter mht. lang prosesseringstid og høye krav til fysiske forhold for å oppnå god kvalitet på data. Avslutningsvis ble det anbefalt for videre arbeid å bruke ferdige LIDAR-data til hydraulisk modellering og feltarbeid for innsamling av data til verifisering av z-koordinater i LIDAR-data ved ulike forhold i elven (Hammeren og Alne, 2015). Arbeidet som ble gjort dannet grunnlag for prosjekt- og masteroppgaven som ble utført høsten 2016 og våren 2017.

### 2.4.1 Prosjektoppgave

Prosjektoppgaven som masteroppgaven bygger videre på ble gjennomført av undertegnede høsten 2016. Hovedformålet i oppgaven var å forberede en terrengmodell og samle inn datagrunnlag til en hydraulisk modell av Tokkeåi (med samme geografiske område som studeres i masteroppgaven). Datagrunnlaget var basert på LIDAR-data som Statkraft hadde

skaffet til veie og egne feltmålinger. Feltnmålingene bestod av måling av bunnforhold ved bruk av ADCP (ekkolodd) og GPS, vannlinjemålinger ved ulike vannføringer og stikningsmålinger på landområder til verifisering av LIDAR-data ved bruk av GPS. Resultatene fra verifiseringen av LIDAR-data mot målte GPS-/ADCP-data viste at middelfeilen (gjennomsnittlig differanse mellom høyder) lå på millimeter til centimeternivå. Det ble konkludert med at LIDAR-dataene var gode nok til kartlegging av elvens geometri (Skeie, 2016).

I Vedlegg D er noen av resultatene fra prosjektoppgaven vist. Kalibrering av den hydrauliske modellen, som er et hovedpunkt i masteroppgaven, vil basere seg på innsamlet data fra feltarbeid. I figur 59 er en oversikt over hvor i Tokkeåi det har blitt gjort målinger. GPS-målingene for vannlinjemålingene (gul, grønn og blå) vil være nyttige til kalibreringsformål. I figur 60 og figur 61 er det gitt noe mer utdypende informasjon om GPS-målingene for vannlinjemåling.

I figur 62 er en oppsummering av ruhetsvurderinger gjort i prosjektoppgaven. Ruhetskartet er basert på innsamlet data for bunnforhold gjort av UNI Miljø. Ut ifra gitt informasjon om bunnforhold ble det estimert et ruhetskart som et tenkt utgangspunkt til den hydrauliske modellen. Kartet viser Mannings ruhetskoeffisient,  $M$  [ $m^{1/3}/s$ ] for ulike soner i Tokkeåi. For miljødelen av masteroppgaven har det blitt lagt ved et kart som viser gyteområder i Tokkeåi, basert på funnene gjort av UNI Miljø. Kartet vil være et hjelpemiddel for å vurdere hvilke områder som er mest kritisk (miljømessig) for effektkjøring i Tokkeåi.

I verifiseringen av LIDAR-data viste landområdet «fotballbane ved skolen» en lavere korrelasjon mellom LIDAR- og GPS-data, sammenlignet med det andre landområdet. I tillegg lå middelfeilen på desimeternivå (Skeie, 2016, tabell 6). Feilen kunne ikke forklares, men det har i ettertid blitt diskutert om LIDAR-data har målt toppen av gresset på fotballbanen, mens GPS-data er målt ved bunnen av gresset. Derfor vil det være interessant å gjøre nye målinger av landområder (f.eks. en asfaltert vei) for å kontrollere at LIDAR-dataene er gode nok.

En svakhet med verifiseringsarbeidet gjort i prosjektoppgaven er at LIDAR-data målt i elven er kun gjort for områder med rolige vannstrømningsforhold (dypt og lav vannstandshelning). For å gjøre en mer omfattende vurdering av LIDAR-metodens evne til å måle batymetrien, må flere typer områder kontrolleres. Områder som klassifiseres som stryk (høy vannhastighet og mye turbulens) vil være interessante å kontrollere, da luft kan føre til forstyrrelser ved LIDAR-

måling. Ettersom at vannføringen vil være lav i Tokkeåi våren 2017, vil det gi bedre muligheter til å ferdes i elven i strykområder for stikningsmålinger med GPS.

## 2.5 LIDAR-data

LIDAR-dataene er samlet inn ved skanning, etterbehandlet og levert av det Østerrikske selskapet AHM (AirborneHydroMapping) på oppdrag av Statkraft i Tokkeåi. Teknologien de har utviklet gjør det mulig å kartlegge batymetrien (her: bunnivået) i elver ved at laseren (LIDAR) kan trenge igjennom vannoverflaten og ned til elvebunnen for grunt vann (ned til 8 meter) (AHM, 2016). Laseren er festet til et småfly som gir mulighet til å dekke store områder på kort tid. I prosjektoppgaven ble det benyttet måledata fra 2015, mens i 2016 ble det gjort nye flyvninger slik at data med bedre dekningsgrad har blitt tilgjengelig. Disse ble levert som LAZ-filer, et komprimert format av LAS-filer.

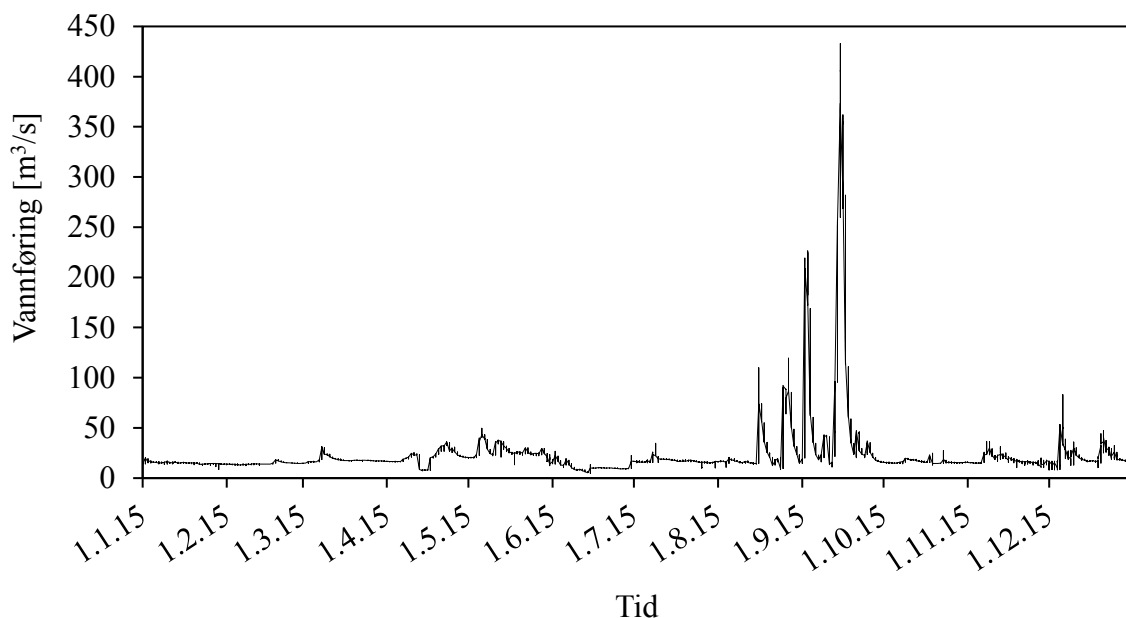
LAS er et filformat standardisert av den amerikanske organisasjonen ASPRS, som primært ble utviklet for å raskere/mer effektivt kunne lagre/overføre store punktskyer med LIDAR-data (tre-dimensjonale data med xyz-koordinater, samt informasjon som blant annet strålingsstyrke fra målinger). ASCII-formatet som tradisjonelt brukes for lagring/overføring har to svakheter når det kommer til LIDAR-data, ytelse (tar lang tid å lese store files) og tap av relevant data (har ikke mulighet til å lagre annen informasjon som blir samlet inn ved LIDAR-målinger). Hvor formålet med standardiseringen av dataformatet er å lage et åpen filformat som maskinvare og programvare kan lese og skrive (ASPRS, 2013, 2017).

LIDAR-dataene ble levert i to filer, én for elven og én for terrenget rundt, med størrelse på henholdsvis omtrent 200 og 500 MB. Etter dekomprimeringen av LAZ til LAS, hadde filene en størrelse på 1,0 og 2,6 GB. Med andre ord er komprimeringen som oppnås av LAS-filene veldig plassbesparende og gunstig i forhold til overføring av filer. Elven bestod av omtrent 38 millioner punkter, mens terrenget bestod av 78 millioner punkter. Sammenlignet med LIDAR-datasettene som ble benyttet i prosjektoppgaven, som bestod av 14 (elv) og 55 (terreng) millioner punkter, så er det tydelige at dette er et datasett med mye høyere dekningsgrad/oppløsning. LAS-filene ble levert i versjon 1.2 (hvor versjon 1.4 er det nyeste per mars 2017).

Yttergrensene av vannoverflaten, som SHP-fil, ble også levert av AHM. Grensene representerer hvor vannet stod ved gitt vannføring under LIDAR-skanningen. Fra AHM ble det oppgitt at

usikkerheten til z-koordinatene for grenseverdiene lå i området  $\pm 5\text{-}10$  cm. Vannføringen i elven for den omtrent to timer lange skanningen av Tokkeåi/Dalåi varierte mellom  $9,45\text{-}9,71$  m<sup>3</sup>/s.

15. september 2015 var det en stor flomhendelse i Tokkeåi som målte største vannføring på  $430$  m<sup>3</sup>/s (se figur 5) som tilsvarer en gjentakintervall større enn  $50$  år. Usikkerheten ved målingene for så store vannføringer er nok veldig høy, siden målestasjonen normalt måler vannføringer i området  $0\text{-}50$  m<sup>3</sup>/s (figur 2), slik at akkurat korrekt maksimalvannføring er uvisst. Hvor en medianvannføring denne dagen ligger rundt  $15$  m<sup>3</sup>/s (figur 2), utgjorde flommen en voldsom mengde med vann i elven. Ettersom den første LIDAR-skanning ble gjennomført før flomhendelsen, bestilte Statkraft en ny skanning. Årsaken til det var nok ha oppdaterte og korrekte data om bunnforholdene, da en stor flom vil føre til erosjon og endringer i batymetrien.



Figur 5: Vannføringskurve fra målestasjon Elvarheim (Nr. 16.117.0) for året 2015. Data er basert på timesverdier, og viser den store flomhendelsen i Tokkeåi 15. september.

## 2.6 LAStools

Rapidlasso GmbH har utviklet diverse verktøy for behandling av LIDAR-data som er samlet i programvarepakken LAStools. Programvarepakken har noen program/verktøy som er gratis, men de fleste krever lisensstilgang. Verktøyene i LAStools er kompatible med GIS-programmene ArcGIS, QGIS og ERDAS IMAGINE, som blant annet betyr at de kan benyttes direkte via ArcGIS. I tillegg er verktøyene tilgjengelige som egne programmer med et relativt enkelt grafisk brukergrensesnitt (Rapidlasso, 2017). I masteroppgaven har kun noen av

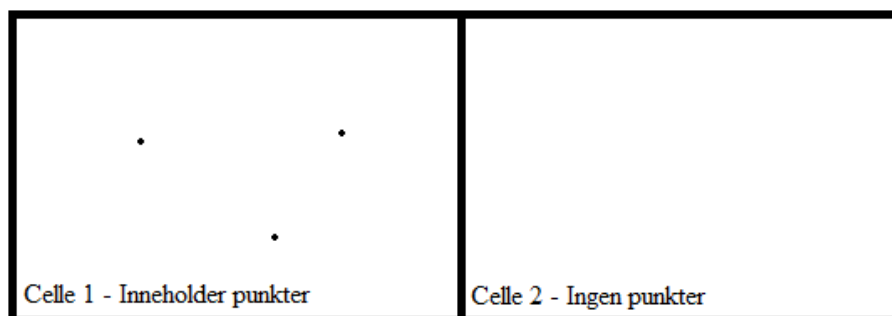
verktøyene som er gratis vært benyttet. Ved hjelp av programvarepakken har det vært mulig å pakke ut komprimerte LAZ-filer til LAS-format og konvertere tekstfiler til LAS-filer (og motsatt), i forbindelse med behandling av LIDAR-data i ArcGIS.

## 2.7 Interpolasjonsteknikker for LIDAR i ArcGIS

Verktøyet «LAS Dataset to Raster» konverterer punktdata fra LAS-filer til overflater i et raster. Beregningen av verdiene for cellene/flatene fra punkter gjøres ved interpolasjon. I verktøyet finnes det to alternativ for interpolasjonstyper: «binning» og «triangulation» (kaller heretter «binning» for binning og «triangulation» for triangulering). Interpolasjonstypen binning deler området inn i celler av en brukerbestemt cellestørrelse, for deretter å beregne cellenes høydeverdi ved bruk av to teknikker: «Cell Assignment Type» og «Void Fill Method» (kalles videre henholdsvis celletilordningsmetode og hulromfyllingsmetode).

Celletilordningsmetodene beregner cellenes verdi basert på LIDAR-data som faller innenfor cellenes grenser (celle 1 i figur 6). Metoder som kan benyttes er maksimum, minimum, gjennomsnittlig, nærmeste nabo eller IDW («Inverse Distance Weighting»). Hvor metoden maksimum velger den største verdien i cellen som cellens verdi, minimum velger den minste, gjennomsnittlig beregner gjennomsnittsverdien, nærmeste nabo interpolerer mellom punktene i cellen og velger verdien som ligger nærmest cellens midtpunkt og IDW interpolerer celleverdien med vektning av punktene i cellen sin avstand til cellens midtpunkt.

Hulromfyllingsmetodene vil beregne cellenes verdi basert på nabocellers verdi (celle 2 i figur 6). Valg består av ingen, enkel, lineær og naturlig nabo. Ingen gir cellen en «NoData»-verdi (som betyr ingen verdi), enkel beregner gjennomsnittsverdien av omringende celleverdier, lineær lager trekanten på tvers av hulrom og bruker lineær interpolasjon for å finne celleverdi og naturlig nabo benytter verdiene til nabocellene til å interpolere en celleverdi (ESRI, 2017).



Figur 6: Skisse av hvordan interpolasjonstypen binning benytter to teknikker for å beregne celleverdier. Celle 1 inneholder punkter og benytter en celletilordningsmetode for å beregne



cellens verdi. Celle 2 har ingen punkter og vil dermed benytte en hulromfyllingsmetode for å bestemme cellens verdi.

Triangulering knytter alle punktene sammen med trekanter mellom de nærmeste punktene, slik at noen trekanter blir små ved høy punkttetthet og store hvor det er få punkter. Deretter interpolerer metoden verdier for trekantene ved bruk av enten lineær- eller naturlig nabo-interpolasjon (ESRI, 2017).

## **2.8 HEC-RAS 5.0**

Februar 2016 lanserte USACE (US Army Corps of Engineers) den offentlige versjonen av HEC-RAS 5.0. I masteroppgaven benyttes nyeste oppdaterte versjon (HEC-RAS 5.0.3), som kom ut september samme år. Nytt av den femte generasjonen av HEC-RAS er muligheten for å beregne todimensjonal ikke-stasjonær («unsteady») strømning, samt kobling mellom én- og todimensjonal strømningsfelt. Tidligere var det kun mulig å velge under- eller overkritisk strømning i beregningene, men i den nye versjonen kan strømningsregimer med kritisk strømning også beregnes, slik at strømmingen kan skifte mellom under- og overkritisk (USACE, 2016c).

I tillegg til todimensjonal strømning har nyeste versjon av HEC-RAS videreutviklet det innebygde geografiske interaksjonsverktøyet RAS Mapper, hvor simuleringsresultater kan visuelt inspiseres. RAS Mapper gir blant annet mulighet til å importere terrengmodeller (raster-format), SHP-filer (polygon, linjer og punkter) og internett-baserte kartlag fra blant annet Google. Av SHP-filer kan landområder med ulik informasjon som f.eks. Mannings ruhetskoeffisient importeres og knyttes til geometrier. Vannlinjemålinger, som punkter, kan legges til for enkel og rask sammenligning mot simuleringsresultater.

For videre mer avansert geografisk behandling av simuleringsresultatene, har RAS Mapper muligheten til eksportering av resultatene på flere ulike måter. Blant annet kan vanndybder, vannoverflater og hastigheter eksporteres som rastere basert på terreng, punktdata basert på angitt SHP-fil eller som omriss av et areal (for flomsonekartlegging). Et annet alternativ til eksportering av resultater er ved bruk av profillinjer, hvor linjene enten importeres eller lages manuelt i RAS Mapper. Profillinjene kan være tverrsnitt som viser endring i vannføring over tid og vannstand, dybder eller hastigheter ved ulike beregningstidspunkt, eller lengdeprofil som viser vannoverflaten over terrenget. Ved bruk av profillinjer er det mulig å undersøke mindre områder mer i detalj.

## 2.9 Beregningsgrunnlag for todimensjonal strømning

Underkapitlene er basert på kapittel 2 «Theoretical Basis for One-Dimensional and Two-Dimensional Hydrodynamic Calculations» i referansemanualen til HEC-RAS (USACE, 2016d), som dokumenterer beregningsgrunnlaget for modellen. En forenklet framstilling av beregningsgrunnlaget i modellen er forsøkt beskrevet her, men for utdypning av ligninger, forutsetninger og beregninger henvises leseren til referansemanualen.

I HEC-RAS beregnes den todimensjonale strømningen ved forenklete ligninger av Navier-Stokes-ligningene kalt «Shallow Water» eller «Diffusive Wave Approximation of Shallow Water». Forutsetningen for todimensjonal strømning er basert på at de horisontale (x- og y-plan) lengdene er mye større enn de vertikale (z-plan), slik at krav til volumbevaring vil tilsi at de vertikale hastighetene må være små og videre kan neglisjeres.

### 2.9.1 Massebevaring (kontinuitet)

For begge beregningsmetodene må krav til massebevaring være oppfylt. Ligning ( 1 ) beskriver hvordan kontinuiteten beregnes for ikke-stasjonære tilfeller. Leddet q tar hensyn til den lokale endringen i masse, og beskriver vannmengde som infiltreres til grunn eller tilføres ved overflaten som regn.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

Hvor:

H = høydenivået på vannflaten bestemt av x- og y-koordinatene og tiden, ligning ( 4 )

[m.o.h.]

h = vannstanden [m]

u, v = vannhastigheter i henholdsvis x- og y-retning [m/s]

q = tilførsel/avgivelse av vannmengde fra/til ytre forhold [m/s]

## 2.9.2 Shallow Water-ligningene (Full Momentum)

«Shallow Water»-tilnærmingen, heretter benevnt som SW, av Navier-Stokes-ligningene kalles også for de todimensjonale St. Venants-ligningene. I HEC-RAS 5.0 blir tilnærmingen kalt «Full Momentum». SW har følgende forutsetninger: inkompressibel strømning, uniform tetthet, hydrostatisk trykk og Reynold-midling («Reynolds Averaged Navier-Stokes equations» ofte forenklet RANS), slik at turbulens er tilnærmet ved bruk av virvelviskositet («eddy viscosity»).

SW-ligningene på differensialform er definert under basert på momentlikevekt om vertikal overflate mellom celler:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad (3)$$

Hvor:

$u, v$  = vannhastigheter i henholdsvis  $x$ - og  $y$ -retning [m/s]

$H$  = høydenivået på vannflaten bestemt av  $x$ - og  $y$ -koordinatene og tiden, ligning ( 4 )

[m.o.h.]

$\nu_t$  = virvelviskositetskoeffisienten, ligning ( 5 ) [m<sup>2</sup>/s]

$c_f$  = friksjonskoeffisienten for bunnforholdene, ligning ( 6 ) [1/s]

$f$  = parameter for Corioliskraften, ligning ( 7 ) [1/s]

De ulike leddene kalles (fra venstre til høyre side) transientleddet, konveksjonsleddene i  $x$ - og  $y$ -retning, gravitasjonsleddet, turbulensleddene i  $x$ - og  $y$ -retning, friksjonsleddet og Coriolisleddet. Venstre side består av akselerasjonsleddene, mens høyre side består av de ytre- og indre kreftene som virker på væsken.

$$H = H(x, y, t) = z(x, y) + h(x, y, t) \quad (4)$$

Hvor:

$H$  = høydenivået på vannflaten bestemt av  $x$ - og  $y$ -koordinatene og tiden [m.o.h.]

$z(x,y)$  = terrengnivået [m.o.h.]

$h(x,y,t)$  = vannstanden [m]

$$v_t = Dh u_* \quad (5)$$

Hvor:

$v_t$  = virvelviskositetskoeffisienten [ $m^2/s$ ]

$D$  = en dimensjonsløs, empirisk blandingskoeffisient [-]

$h$  = vanndybden [m]

$u_*$  = skjærhastigheten [m/s]

Blandingskoeffisienten,  $D$ , er isotropisk og basert på kanalgeometri/batymetri. I referansemanualen er det oppgitt en tabell over forhold ved ulike blandingskoeffisienter, som er gjengitt under:

Tabell 1: Blandingskoeffisienter for ulike forhold ved virvelstrømming. Det spesifiseres at verdien som brukes må kalibreres for å at den skal settes riktig for hvert enkelte tilfelle. (USACE, 2016d, s. 2-58, Table 5).

<b>D</b>	<b>Grad av blanding</b>	<b>Geometri og overflater</b>
0,11 – 0,26	Lav	Rett kanal, glatt overflate
0,30 – 0,77	Middels	Svak meandring, middels ru overflate
2,0 – 5,0	Høy	Kraftig meandring, ru overflate

$$c_f = \frac{n^2 g |V|}{R^{\frac{4}{3}}} \quad (6)$$

Hvor:

$c_f$  = friksjonskoeffisienten for bunnforholdene [1/s]

$n$  = Mannings ruhekskoeffisient (Manningstall er et annet mye brukt begrep) [ $s/m^{1/3}$ ]

$g$  = gravitasjonskraften [ $m/s^2$ ]

$|V|$  = hastighetsvektor bestemt av  $u$  og  $v$  [ $m/s$ ]

$R$  = hydraulisk radius [m]

$$f = \frac{4\pi}{T} \sin\varphi \quad (7)$$

Hvor:

$f$  = parameter for Corioliskraften [1/s]

$T$  = Jordens rotasjonstid [s]

$\varphi$  = breddegrad [ $^\circ$ ]

Ligningen for parameteren for Corioliskraften er hentet fra Olsen (2016) (side 97, ligning 7.6.1), som er formulert noe annerledes enn ligningen i referansemanualen.

### 2.9.3 Diffusive Wave-ligningene

«Diffusive Wave» er en tilnærming av «Shallow Water», videre forkortet som DSW («Diffusive Wave approximation of Shallow Water»), hvor gravitasjons- og friksjonsleddet er de bestemmende leddene for strømningsforholdene. Det vil si at det transiente (ikke-stasjonære) leddet og konveksjons- og turbulensleddene, samt Coriolis effekt, er neglisjert fra SW-ligningene. Slik at DSW-ligningene på differensialform, basert på SW-ligningene, blir da:

$$c_f u = -g \frac{\partial H}{\partial x} \quad (8)$$

$$c_f v = -g \frac{\partial H}{\partial y} \quad (9)$$

Hvor:

$c_f$  = friksjonskoeffisienten for bunnforholdene [1/s]

$u, v$  = vannhastigheter i henholdsvis  $x$ - og  $y$ -retning [m/s]

$g$  = gravitasjonskraften [m/s<sup>2</sup>]

$H$  = høydenivået på vannflaten bestemt av  $x$ - og  $y$ -koordinatene og tiden, ligning ( 4 )  
[m.o.h.]

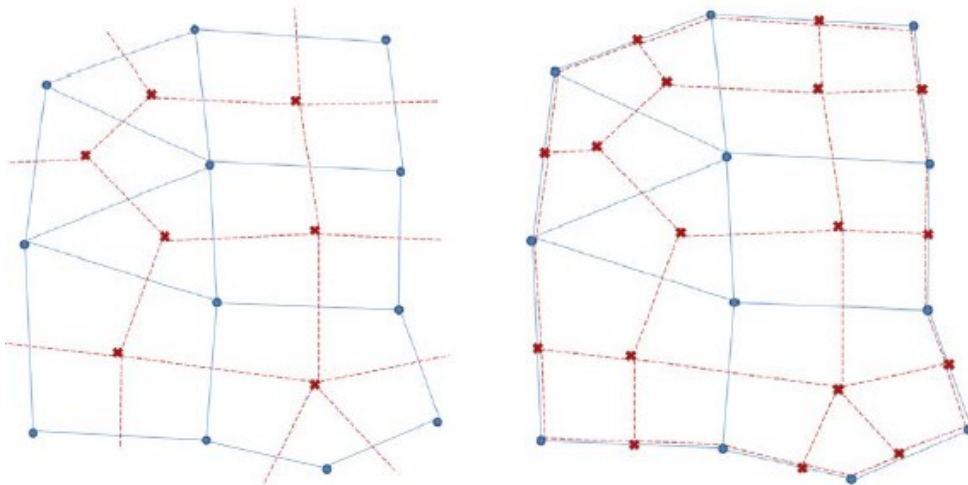
#### 2.9.4 Geometri og dobbel gittercellestruktur

Gittercellene i HEC-RAS spiller en viktig rolle i hvordan modellen beregner vannbevegelsene. Basert på et brukerdefinert strømningsområde (enten manuelt inntegnet eller ved importerte koordinater), vil modellen automatisk produsere en gittercellestruktur basert på angitt cellestørrelse innenfor strømningsområdet. De aller fleste cellene vil være ortogonale og firkantede, men i grenseområder og områder hvor bruddlinjer er definert, vil celler bli tilpasset som polygoner med 3-8 sider. Et krav er at polygonene må være konvekse (indre vinkler ikke større enn 180°). I tilfeller hvor celler er ortogonale, vil modellen utnytte forholdene slik at beregningene blir mer effektive. Det er mulig å manuelt endre enkeltceller i ettertid, men ved f.eks. en endring av strømningsområde vil de manuelt endrete cellene bli overskrevet av en ny gittercellestruktur.

De vertikale overflatene i cellene vil bli behandlet som egne tverrsnitt, slik at terrenget i bunn vil bli tatt hensyn til. Vannet vil bevege seg fra celle til celle igjennom overflatene. For hver celleoverflate vil det bli beregnet forhold mellom areal og hydraulisk radius mot vannstand. I tillegg vil forholdet mellom volum og vannstand beregnes for hver celle, basert på overflatenes tverrsnitt. Basert på antagelse om massebevaring (kontinuitetsligningen, se ligning ( 1 )) kan de ulike forholdene beregnes i en geometriprocessor, en for-processor som må gjøres én gang for hver enkelt geometri. Informasjonen fra geometriprozessoren benyttes som grunnlag i selve vannføringssimulering i HEC-RAS. Hvis det er ingen endring i geometrien, vil denne prosessen

hoppes over, slik at den totale simuleringstiden blir kortere. Geometriprosessoren har også som oppgave å oppdage lokal ortogonalitet, for å bestemme cellenes diskretiseringsmetode.

For å løse ligningene som inneholder andrederiverte ledd benytter HEC-RAS en ekstra, underliggende gittercellestruktur. Den andre gittercellestrukturen er definert ut i fra samme område som den originale gittercellestrukturen, men har knutepunktene («node» på engelsk) i senter av de originale gittercellene, slik at de underliggende gittercellene vil ligge overlappende de originale. En illustrasjon under av de to gittercellestrukturene, hentet fra referansemanualen, er vist under i figur 7.



Figur 7: Illustrasjon som viser hvordan de to gittercellestrukturene blir produsert og overlapper hverandre. Gitterceller med (venstre) og uten (høyre) områdegrenser (USACE, 2016d).

#### **2.9.4.1 Bruddlinjer**

Bruddlinjer kan benyttes til å manipulere hvordan gittercellene i det todimensjonale strømningsområdet dannes. Funksjonen til bruddlinjene kan være å styre retning/vinkel på cellene (slik at de følger vannstrømningen), redusere cellestørrelsen og øke nøyaktigheten av beregningene i områder av stor interesse eller hvor det er naturlige hindre, som terskler eller elvebanker (for å hindre at det oppstår feilaktig overtopping på grunn av for grove celler). Bruddlinjene kan tegnes inn manuelt i geometrien eller importeres fra SHP-filer. I tillegg har brukeren mulighet til å legge inn minste og største cellestørrelse.

### **2.9.4.2 Mannings ruhetskoeffisient-områder**

Mannings ruhetskoeffisient defineres som en enkeltverdi for hele strømningsområder når gittercellestrukturen blir produsert. Ved å legge til et «Land Cover», f.eks. en SHP-fil av polygonform som dekker hele strømningsområder, i RAS Mapper, vil man kunne legge til egendefinerte (enten tegnet manuelt eller importert fra SHP-filer) Mannings ruhetskoeffisient-områder, forenklet til Manningsområder videre. Ved at deler eller hele strømningsområder er dekket av mindre polygoner/Manningsområder, vil det vært mulig å endre og tilpasse Mannings ruhetskoeffisient for strømningsområdet. Samt vil flere områder hvor ruhetskoeffisienten kan endres gi større fleksibilitet i forhold til kalibrering av modellen. For utvidet informasjon om bruk av Manningsområder henvises leseren til «2D Modeling Users Manual» (USACE, 2016b, s. 21-28, kapittel 3).

### **2.9.5 Simuleringsstabilitet/Courant-kriteriet**

Som følge av valgt gridstørrelse og tidssteg på simuleringen, vil det være mulig å kunne forutsi om modellen vil klare å oppnå korrekte resultater og kjøre stabilt, uten å få konvergensproblemer. Courant-kriteriet benyttes til dette formålet og beregnes etter formel under. I brukermanualen for todimensjonal modellering, «2D Modeling User Manual», (USACE, 2016b, s. 5-6, kapittel 4) er det oppgitt at for bruk av SW-ligningene vil en simulering være stabil for Courant-kriterier under 1, men kan i noen situasjoner være stabil opptil en verdi på 3. For DSW-ligningene vil kravet for stabilitet være Courant-kriterier under 2, med en maksimalverdi opp mot 5.

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \quad (10)$$

Hvor:

C = Courant-kriteriet [-]

V = Vannhastighet [m/s]

$\Delta T$  = Tidssteg [s]

$\Delta X$  = Cellelengde/bredde [m]



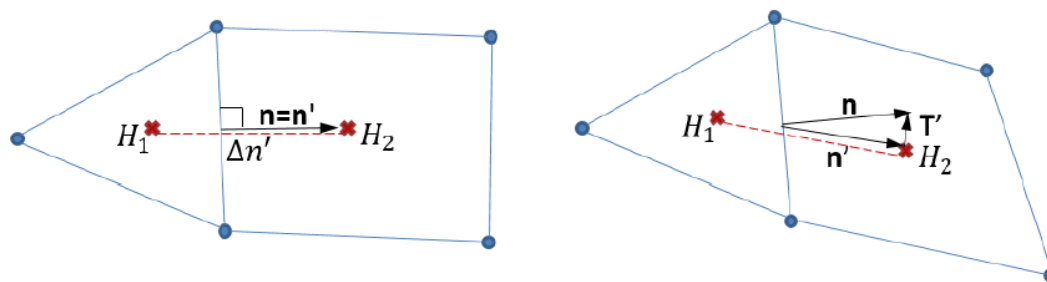
## 2.9.6 Numeriske metoder/diskretisering

For at ligningene som er gitt i tidligere kapittel på differensialform skal beregnes i HEC-RAS må de diskretiseres slik at de kan løses av den numerisk beregneren. I HEC-RAS benyttes en hybridmetode, som består av en kombinasjon av endelig differanse- og endelig volum-metodene, for å diskretisere leddene i kontinuitets- og momentligningene. Siden ligningene baserer seg på beregning om vertikal overflate mellom cellene, vil det være interessant å finne gradientene normalt på overflatene (i referansemanualen definert som retning  $n$ ).

Endelig differanse-metode krever en lineær sammenheng mellom to iterasjoner, slik at diskretiseringsmetoden har en viss begrensning i HEC-RAS. Metoden kan benyttes til å beregne de transiente-/tidsavhengige leddene, men for de stedlig avhengige leddene kreves det lokal ortogonalitet. Kravet til lokal ortogonalitet kommer av at den vertikale overflaten mellom cellene er normal på retningen mellom sentrum av to celler, slik at normalvektoren peker i retning fra sentrum i en celle til sentrum i den andre. Metoden beregner med andre ord gradienten, differanse i verdi dividert på differanse i avstand/tid, mellom to stedlige posisjoner eller iterasjoner. For de andrederiverte leddene er det behov for endelig volum-metode i tillegg til endelig differanse-metode selv om det skulle være lokal ortogonalitet.

Endelig volum-metode benytter den underliggende gittercellestrukturen, som ble presentert i kapittel 2.9.4, for å beregne gradienten for høydenivået på vannoverflaten normalt (retning  $T'$ ) på retning  $n'$  mellom (de originale) cellenes senter. Beregningene benytter Gauss sitt divergensteorem for å finne gradientene ved å se på strømming gjennom de vertikale overflatene til de underliggende gittercellene. Strømmingen vil altså være normal på retning mellom to cellesenter i den originale gittercellestrukturen.

Hybrid-metoden vil benytte seg av både endelig differanse- og endelig volum-metodene for å finne gradientene til høydenivået på vannstanden normalt på de vertikale overflatene mellom cellene (retning  $n$ ), hvor de to metodene som benyttes vil tilsvare gradientene i to ulike retninger ( $n'$  og  $T'$ ) som i sum tilsvarer retning normalt på de vertikale overflatene. F.eks. hvis cellene er lokalt ortogonale, så vil ikke endelig volum-metode gi noe bidrag i sin retning ( $T'$ ), da bidraget fra endelig differanse-metode (retning  $n'$ ) vil peke i samme retning som normalen til de vertikale overflatene ( $n$ ). Figur 8, hentet fra referansemanualen, viser en illustrasjon som definerer de ulike retningene  $n$ ,  $n'$  og  $T'$  som de ulike metodene tar for seg.



Figur 8: Celler som viser retning de ulike diskretiseringsmetodene beregner gradienter. Til venstre vises lokalt ortogonale celler hvor gradienten i retning  $n'$  fra endelig differansemetoden er lik retning  $n$ , som er normalt på den vertikale overflaten mellom cellene. Til høyre er cellene ikke ortogonale, slik at endelig differanse- og endelig volum-metodene beregner gradienter i retning henholdsvis  $n'$  og  $T'$ , hvor summen av gradientene tilsvarer gradienten i ønsket retning  $n$  (USACE, 2016d, s. 2-62).

## 2.10 Datamaskinens spesifikasjoner

I tabell 2 er spesifikasjonene til datamaskinen benyttet i oppgaven til simuleringer oppsummert.

Tabell 2: Datamaskinens spesifikasjoner.

Komponent	Informasjon
OS	Windows 7 Enterprise 64-bit SP1
CPU	2 x Intel® Core™ i7-4790 CPU @ 3.60 GHz
RAM	16 GB Dual-Channel DDR3 @ 798 MHz
GPU	4 GB NVIDIA GeForce GTX 745
Harddisk	1TB Seagate ST1000DM (SATA)

## 2.11 Miljøvirkninger av effektkjøring

«Miljøvirkninger av effektkjøring: Kunnskapsstatus og råd til forvaltning og industri» ble gitt ut i 2016 som et resultat av det flerårige forskningsprosjektet EnviPEAK, som var en del av forskningssenteret CEDREN (Centre for Environmental Design of Renewable Energy). Boka tar for seg hvordan effektkjøring (rask endring i vannføring) som følge av endring i produksjon påvirker ulike miljøforhold (fysiske og økologiske) i regulerte vassdrag. I tillegg har boka tatt for seg ulike tiltak for å redusere konsekvensene av inngrepene effektkjøring har for vassdrag,

samt produsert et hjelpemiddel for forskning og industri for å vurdere i hvilken grad effektkjøring påvirker miljøforhold i vassdrag (Bakken, Forseth og Harby, 2016).

Vannføringsreduksjonen ved effektkjøringen defineres som 90 %-persentilen av effektkjøringsperiodene for tidsserien av vannføringer tilgjengelig, slik at 90 % av raske vannføringsreduksjoner vil havne innenfor denne verdien, men de siste 10 % av reduksjonene vil skille ut ekstreme og ikke-representative verdier.

Kapittel 5.2.1 «P - Påvirkningsaksen» i boka gir en forklaring av de viktigste påvirkningsfaktorene i en elv ved en miljøstudie. De seks faktorene består av senkningshastighet, tørrlagt areal, størrelse av vannføringssvingningene (amplitude), frekvens, fordeling og tidspunkt. Informasjonen under om faktorene er hentet fra Bakken, Forseth og Harby (2016, s. 155-157). I tabell 3, som er hentet fra kapittelet, er kriteriene for hvor stor påvirkning de ulike faktorene utgjør for miljøforholdene i elven. Kriteriene i tabellen vil være et hjelpemiddel i klassifiseringsarbeidet av påvirkningen av effektkjøring i Tokkeåi.

Senkningshastighet, se ligning ( 11 ), er definert som endring i vannstand, i cm/t, for en periode som starter ved at vannstanden reduseres og slutter når 90 % av vannstandsendringen har forekommet. Årsaken til at senkningshastighet er en viktig faktor i en miljøstudie kommer av at fisken og bunndyr skal ha tilstrekkelig tid til å forflytte seg bort fra tørrleggingssoner, slik at stranding unngås. Tørrlagt areal defineres som differansen mellom vanndekt areal før ( $Q_{maks}$ ) og etter ( $Q_{min}$ ) en vannføringsreduksjon, i prosent av vanndekt areal ved  $Q_{maks}$ . Viktigheten av faktoren kommer av at den kan benyttes til beskrive påvirkning på fiske- og bunndyrsbestander, siden økt tørrleggingsareal kan føre til reduksjon i habitatområder eller endre biologiske prosesser.

$$\text{Senkningshastighet} = \frac{\text{WSEL}_{\text{før}} - \text{WSEL}_{90\% \text{ av senkingen}}}{T_{90\% \text{ av senkingen}} - T_{\text{før}}} \times 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} \quad (11)$$

Hvor:

Senkningshastighet [cm/t]

WSEL = Vannoverflatenivå [m.o.h.]

T = tidspunkt [t]

Størrelsen av vannføringsvingningene, eller amplitudene, definerer forholdet mellom vannføringen før ( $Q_{\text{maks}}$ ) og etter ( $Q_{\text{min}}$ ) en vannføringsendring. Forholdstallet benyttes kun til å sammenligne hvor store vannføringsvingninger en elv har. Frekvens er gitt ut i fra hvor mange dager i året det er effektkjøring. Påvirkning av effektkjøring som foregår noen få dager i året vil være mindre belastende for økosystemet, enn om det foregår effektkjøring over lengre perioder.

Faktoren fordeling forteller hvordan effektkjøringer forekommer, enten som en fast døgnregulering eller irregulært. Samtidig er det av betydning om vannføringsreduksjonene forekommer over hele året, eller i visse måneder eller perioder. Tidspunkt forteller om når på året/hvilken årstid effektkjøringer forekommer. For fisk vil det være kritisk om spesielt vinteren, da det er mindre lokalt tilsig og lav vannføring i elven. I forhold til gyting og oppvekst for fisk, vil det være visse perioder som er kritiske for overlevelse hvor det kreves at turrlegging ikke forekommer.

En grunn til at tiden på vinterhalvåret blir ansett som mest kritisk for fisken kommer av en feltstudie gjort av Saltveit, *et al.* (2001), hvor de undersøkte stranding av fisk (laks og ørret) ved effektkjøring i Nidelva, Trondheim ved ulike perioder over året. Funnene i studien tilsa at temperatur, sesong og lysforhold var de mest fremtredende forholdene som førte til stranding av ungfisk. Kaldt vann om vinteren førte til mindre aktivitet blant fisken, slik at ved rask vannføringsendring strandet flere fisk om vinteren enn i varmere perioder som sommer/høst. Samtidig viste det seg at aktiviteten på dagtid var lavere enn på natten, slik at strandingen var størst på dagtid om vinteren.

Tabell 3: Kriterier for påvirkningsstørrelse av ulike faktorer ved effektkjøring i elv. De ulike påvirkningsfaktorene er beskrevet over. Hentet fra tabell 5.2 i «Miljøvirkning av effektkjøring: Kunnskapsstatus og råd til forvaltning og industri» (Bakken, Forseth og Harby, 2016).

Påvirkningsfaktor	Indikator	Kriterium for klasseplassering			
		Svært stor (verdi 4)	Stor (verdi 3)	Moderat (verdi 2)	Liten (verdi 1)
P1: Senkningshastighet	Vannstandsending, angitt pr time [cm/t] Endring i vanndekt areal ved	> 20	13-20	5-13	< 5
P2: Tørrlagt areal	vannføringsreduksjon fra Qmaks til Qmin [%]	> 20	10-20	5-10	< 5
P3: Størrelse av vannføringssvingningene (amplitude)	Vannføringsforholdet Qmaks/Qmin Årlig frekvens	> 5	3-5	1,5-3	<1,5
P4: Frekvens	(andel/antall dager per år med effektkjøring)	> 40 % (> 146 d)	25-40 % (92-146 d)	10-25 % (37-91 d)	< 10 % (< 37 d)
P5: Fordeling		Irregulært over hele året	Irregulært i perioder	Døgnregulering i flere perioder	Døgnregulering i inntil to perioder
P6: Tidspunkt	Vannstandsreduksjon i kritiske perioder	I dagslys om vinteren	I mørke om vinteren	Sommer og høst	Vår og forsommer

For å gjøre en klassifisering av samlet påvirkning av effektkjøring i Tokkeåi, beregnes en poengsum basert på hvor stor påvirkning de ulike faktorene er blitt vurdert å utgjøre. Påvirkningsfaktorene kan tildeles verdier fra 1 til 4. Senkningshastighet og tørrlagt areal har blitt vurdert til de mest kritiske verdiene for miljøforhold i elven, slik at produktet av de to verdiene blir beregnet. For de resterende faktorene vil verdiene adderes. I tilfeller hvor

senkningshastigheten begrenses til maksimalt 5 cm/t i første nedtapping av vannføringsreduksjonen, etter en periode uten effektkjøring, vil en nedskrivning av påvirkning tas hensyn til. Nedskrivningen gir mulighet til å redusere summen med 1 poeng.

$$\text{Sum påvirkning} = (P1 \times P2) + \sum_{i=3}^6 P_i - n \quad (12)$$

Hvor:

$P_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) = Påvirkningsverdi (1-4) for de ulike faktorene, etter tabell 3.

$n$  = nedskrivning av påvirkning av senkningshastighet (1 poeng)

Klassifisering av effektkjøring i elven gjøres så ved å se innenfor hvilken klasse, i tabell 4, den samlede påvirkningssummen havner i. «Svært stor» påvirkning betyr at det er stor sannsynlighet for at fiskebestand og økologiske forhold vil forverres fort eller over tid som følge av ekstra belastning fra effektkjøring. Klassen «liten» betyr det motsatt, at det er lite sannsynlig av reguleringen av vannføring i elven vil føre til en økt forverring i vassdraget.

Tabell 4: Klassifisering av påvirkning av effektkjøring. Hentet fra figur 5.2 (Bakken, Forseth og Harby, 2016).

Klasse	Sum
Svært stor	21-32
Stor	15-20
Moderat	10-14
Liten	4-9

## 2.12 COSH-Tool

COSH-Tool (Characterisation of Stream Hydropeaking) er et verktøy/program som ble utviklet av SINTEF Energi AS i forbindelse med tidligere nevnte forskningsprosjekt CEDREN EnviPEAK. Formålet med verktøyet er å kunne tallfeste variasjoner i vannføring/-stand som følge av effektkjøring i elver basert på gitt inngangsdata. Inngangsdata kan være vannførings- eller vannstandsserier fra f.eks. et målepunkt i elv eller produksjonsdata. Videre kan data spesifiseres for å gjelde for en viss periode, for et vannføring- eller vannstandsintervall (hvor høye flomverdier kan kuttes ut) eller variasjonen i data jevnes/dempes ut.

Videre må nedre/øvre persentil i prosent velges for at programmet skal beregne hvilken verdi som skal defineres som rask endring. Programmet anbefaler persentiler hvor nedre grense er lavere enn 5 % og øvre over 95 %. En øvre persentil lik 95 % vil bety at den raske endring vil defineres ut i fra verdien hvor 95 % av dataene vil ligge under denne verdien, og kun 5 % over. I tillegg kan brukeren velge lengde- og breddegrader for at programmet skal beregne lysforhold ved raske endringer, eller definere tidsperioder i løpet av et år som en sesong (f.eks. en periode hvor gyting er aktuelt). Deretter vil diverse parametere beregnes. Blant annet tid på døgnet når raske endringer skjer, og hva slags lysforhold (natt/dag) som preger ved vannføringsendringer. Andre viktige parametere er vannføringer før og etter en rask endring, antall dager i året med raske endringer og maksimale endringer i vannføring. Informasjon om verktøyet er basert på artikkelen til Sauterleute og Charmasson (2014), hvor en mer utdypende forklaring av verktøyet er gitt.





## 3 METODE

---

### 3.1 LAStools

Ettersom at LIDAR-dataene fra AHM var overført på filformatet LAZ, måtte de dekomprimeres for at de kunne leses i ArcMap. Prosessen beskrevet under ble gjort i programmet LASzip:

1. Først ble de aktuelle LAZ-filene som skal dekomprimeres valgt under «browse».
2. Satt korrekt projeksjon under «projection» til UTM32N.
3. Lot være å velge «merge files into one», slik at LAZ-filene ble dekomprimert separat.
4. Valgte mappe hvor filene skulle bli lagret under «output».
5. Sørget for at «LAS» var valgt (LAZ-filene kan også pakkes ut som ASCII-filer).
6. Valgte «DECOMPRESS» og deretter «START» i det nye vinduet som dukket opp.

For transformering av ADCP-data og den konstruerte sidekanalen som manglet til LAS-format har filene først blitt gjort om til tekstfiler. Deretter ble tekstfilene konvertert til LAS-filer via programmet txt2las etter følgende prosedyre (lignende prosedyre ved konvertering fra LAS-filer til tekstfiler i programmet las2txt):

1. Valgte tekstfilene som skulle konverteres under «browse».
2. Kontrollerte at projeksjonen var korrekt, hvis ikke må UTM32N velges under «projection».
3. Sørget for at «merge files into one» ikke var huket av, slik at tekstfilene blir konvertert separat.
4. Valgte mappe hvor filene skulle plasseres etter konverteringen under «output».
5. Kontrollerte av «(x)», «(y)» og «(z)» var huket av, samt at programmet leste korrekt av hva som er x-,y- og z-koordinater.
6. Valgte «RUN» til slutt og «START» i det nye vinduet som dukket opp.

### 3.2 Terrengmodell

I ArcMap ble de ulike LAS-filene åpnet ved å legge de til i et LAS-datasett. LAS-datasettet ble først opprettet ved høyreklikk på ønsket filmappe i ArcCatalog, valgte «New» og deretter «LAS Dataset». LAS-filene må så legges til i datasettet, som ble gjort ved høyreklikk på datasettet, valgte «Properties», gikk til fanen «LAS Files», trykte «Add Files...» og la til ønskede LAS-

filer. Etter LAS-filene var lagt til, ble koordinatsystem lagt til under fanen «XY Coordinate System», og eventuelt «Z Coordinate System». LAS-datasettet ble så lagt til i ArcMap.

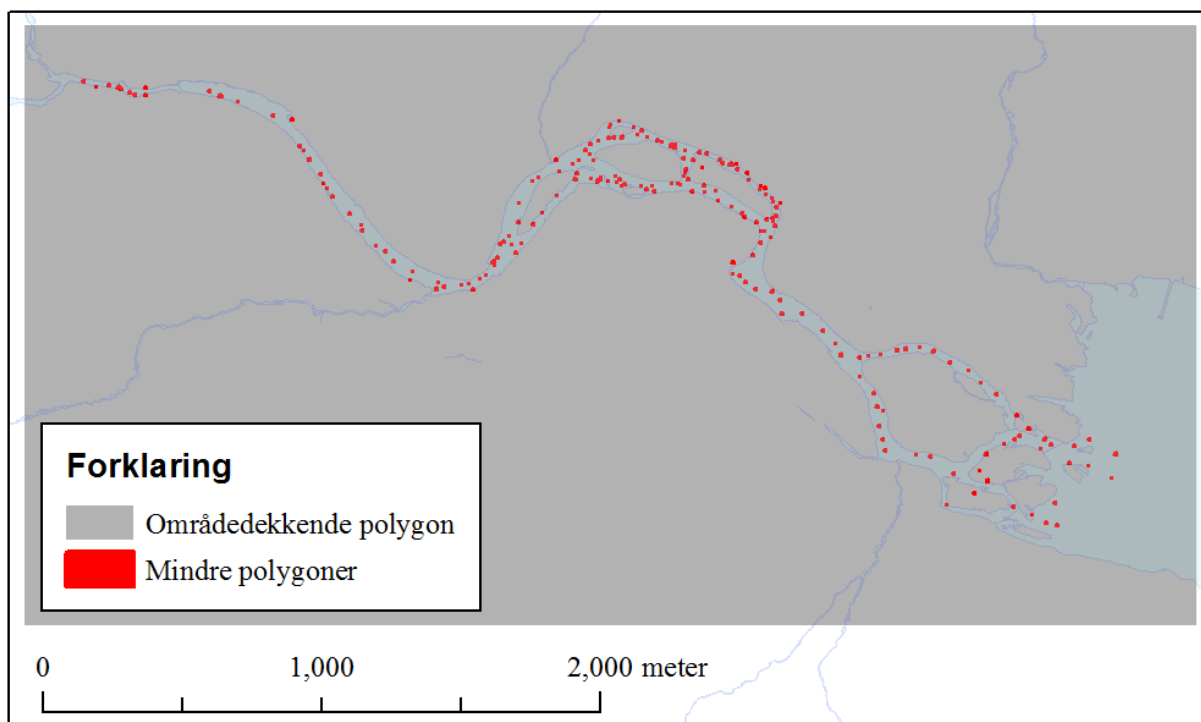
### **3.2.1 Konstruering av manglende sidekanal**

På grunn av manglende dekning av LIDAR-data for en sidekanal i Tokkeåi, hvor kun deler var kommet med i skanningen, ble det laget en kanal manuelt i ArcMap. UNI Miljø sin rapport over Tokkeåi inneholdt en polygon (SHP-fil) hvor sidekanalen var inkludert. Koordinatene til sidekanalen i polygonen ble benyttet som utgangspunkt til design av sidekanalen. For dybder ble det beregnet en gjennomsnittlig helning basert på høyder før og etter de manglende LIDAR-dataene. Videre ble høydene for ulike punkter i sidekanalen beregnet ved lineær interpolasjon. Koordinatene, samt tilhørende høyde, ble så konvertert fra tekstfiler til LAS-filer ved hjelp av programmet txt2las. LAS-filen ble så inkludert i LAS-datasettet for hele Tokkeåi, for videre interpolering av LAS-filer til raster/terrengmodell.

### **3.2.2 Vurdering av interpolasjonsmetode**

I verktøyet «LAS Dataset to Raster» i ArcMap er det flere alternative interpolasjonsmetoder for å lage et raster av LAS-punktskyer. Etersom det var usikkert hvilken metode som var mest egnet for formålet ble det gjennomført flere ulike typer interpolasjoner. De ulike interpolasjonsresultatene ble sammenlignet for å vurdere hvilke metoder som viser best tilpasning.

Først ble data fjernet fra LAS-filene, slik at de fjernede dataene kan benyttes som kontroll mot interpolerte verdier. Det ble gjort ved at ca. 200 mindre polygoner av størrelsen 0,25-5 m<sup>2</sup> ble lagd nedover hele elven. Både i områder som bestod av lav og høy punktetthet av LAS-data (se figur 9). Deretter ble de mindre polygonene benyttet til å klippe ut LAS-data ved å velge verktøyet «Extract LAS», hvor LAS-datasettet ble valgt som «Input LAS Dataset» og polygonene som «Extraction Boundary». Slik at LAS-data for polygon-områdene ble skilt fra resten av LAS-dataene. Omtrent 35 000 punkter ble fjernet fra det originale LAS-datasettet. Videre ble LAS-filene gjort om til tekstfiler ved å benytte programmet las2txt. Deretter ble tekstfilene importert som SHP-filer i ArcMap ved å høyreklikke på de gjeldene filene og velge «Create Feature Class» og deretter «From XY Table».



Figur 9: Oversikt over utklippede polygoner til vurdering av interpolasjonsmetoder.

Lagde så et stort polygon som dekte hele elvens område (gråfarget polygon i figur 9). Fjernet så områdene hvor de mindre polygonene dekket fra den store polygonen ved bruk av verktøyet «Erase», slik at et nytt polygon med hull/manglende data ble dannet. Trakk deretter ut LAS-data for området som var dekket av den store polygonen med hull, slik at LAS-datasettet bestod av originale LAS-data minus LAS-data som var fjernet for de mindre polygonene.

Videre ble ulike interpolasjonsteknikker benyttet for å lage raster av LAS-datasettet. De ulike metodene som ble benyttet er binning med gjennomsnittlig («Average»), IDW og nærmeste nabo («Nearest») og triangulering. Hvor de fire metodene alle benyttet nærmeste nabo som hulromsfylling-/interpolasjonsmetode. Mer utfyllende informasjon om metodene er gitt i kapittel 2.7.

Brukte så verktøyet «Extract values to Points» som benytter punktene i SHP-filen (altså de fjernede LIDAR-verdiene) til å trekke ut z-koordinater fra rastrene, for så å legge de til som en ekstra kolonne i SHP-filene. Eksporterte så tabellverdiene i SHP-filene til Excel-dokumenter ved bruk av verktøyet «Tables To Excel». I Excel ble differansen mellom de fjernede LIDAR-dataene og interpolerte verdiene fra rastrene beregnet. Deretter ble medianene, de gjennomsnittlige, minimale og maksimale verdiene, samt korrelasjonsfaktorene  $R^2$  regnet ut for hver av metodene.

## **3.3 Valg og operasjoner i HEC-RAS**

### **3.3.1 Stabil SW-simulering**

I SW-simuleringer hvor det ikke er benyttet vannfylte celler som en startbetingelse oppstod det til tider konvergensproblemer, noe som antageligvis kommer av at en bølgelignende front med vann blir tilført i celler uten noen vann, slik at endringene i vannstand ble så store at programmet får problemer med iterasjonsprosessen. En løsning for å unngå konvergensproblemer var å gjennomføre en DSW-simulering (som er mer stabil) først, for deretter å benytte resultatet for vannstand som startbetingelse for en SW-simulering.

Det gjøres ved å slå på «Write Initial Condition file at end of simulation», under «Options» og «Output Options...» i «Unsteady Flow Analysis». Da vil HEC-RAS lagre en «Restart File» som inneholder vannstands nivået i simuleringområdet etter simuleringen er over. Ved å lagre en restartfil ved slutt av en simulering, vil det være mulig å hente opp filen ved en ny simulering og benytte den som startbetingelse. For å benytte en restartfil i en ny simulering, legges den til i «Use a Restart File» under fanen «Initial Conditions» i «Unsteady Flow Data».

### **3.3.2 Eksportering av resultatfiler**

Beregnete kart, tverrsnitt, punkter, m.m. kan eksporteres fra RAS Mapper for videre behandling og analyse i f.eks. GIS-program. Oversikt over kartene finnes under «Manage Results Maps», som ligger under fanen «Tools» i RAS Mapper. Fant riktige simuleringer og trykte på «Add New Map»-knappen. Valgte så «Water Surface Elevation» under «Map Type», det siste/nyeste profilet i «Profile» under «Unsteady Profile» og «Raster based on Terrain» under «Map Output Mode». Det nye kartlaget havner under simuleringen, men er ikke beregnet. Det gjøres ved å trykke på knappen «Compute/Update Stored Maps». Etter at beregningsprosessen er ferdig vil TIFF-filen legge seg i en undermappe med samme navn som simuleringen hvor HEC-RAS-prosjektet er lagret på datamaskinen.

## **3.4 Følsomhetsanalyser og parameter testing**

I underkapitlene er det beskrevet fremgangsmåte og modelloppsett av de ulike følsomhetsanalysene. Analysene har blitt gjennomført samtidig som modellen har blitt kalibrert, slik at det har vært litt endringer i oppsettet av de ulike parameterne underveis.

### 3.4.1 Shallow Water vs. Diffusive Wave

For å sammenligne de to beregningsmetodene i HEC-RAS, diffusive wave (DSW) og full momentum (SW), ble det gjennomført ulike simuleringer hvor gittercellestørrelsene varierte. Områdene som ble brukt i analysen er vist under i figur 10 (stort område) og figur 11 (lite område), hvor det første dekte hele studieområdet for Tokkeåi, mens årsaket til at det lille området ble benyttet var på grunn av at det ble for mange celler ved lav gittercelleoppløsning for det store området, slik at programmet krasjet. Cellestørrelse som ble benyttet varierte fra 1,2-10 m (stort område) og 0,25-3 m (lite område), Mannings ruhetskoeffisient var  $0,08 \text{ s/m}^{1/3}$ , vannføringen var konstant i form en hydrograf med innstrømning  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  med intervall på fire timer og konstant vannstand i utløp i Bandak på 71,9 m.o.h.

For det lille området var oppstrøms grensebetingelse vannføring på  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  med én times intervall og nedstrøms grensebetingelse en normalhelning på 1 ‰. Normalhelning tilsvarer helningen ved normalstrømning (uniform og stasjonær situasjon) etter Mannings formel. Utvidet informasjon over beregningsvalg i HEC-RAS for simuleringene kan sees i kolonnen «SW vs. DSW» i tabell 23.



Figur 10: Området som ble benyttet til sensitivitetsanalyse av beregningsmetodene SW vs. DSW, bruddlinjer, cellestørrelse (stort område) og Mannings ruhetskoeffisient. Blåfargen viser vanddybden [m] ved cellestørrelse lik to meter, bruk av SW-ligningene, bruddlinjer og ruhetskoeffisient lik  $0,08 \text{ s/m}^{1/3}$ .



Figur 11: Område som ble benyttet til følsomhetsanalyse av SW vs. DSW og gittercellestørrelse (lite område). Blåfargen viser vanddybden [m] ved celledørrelse lik 2 meter.

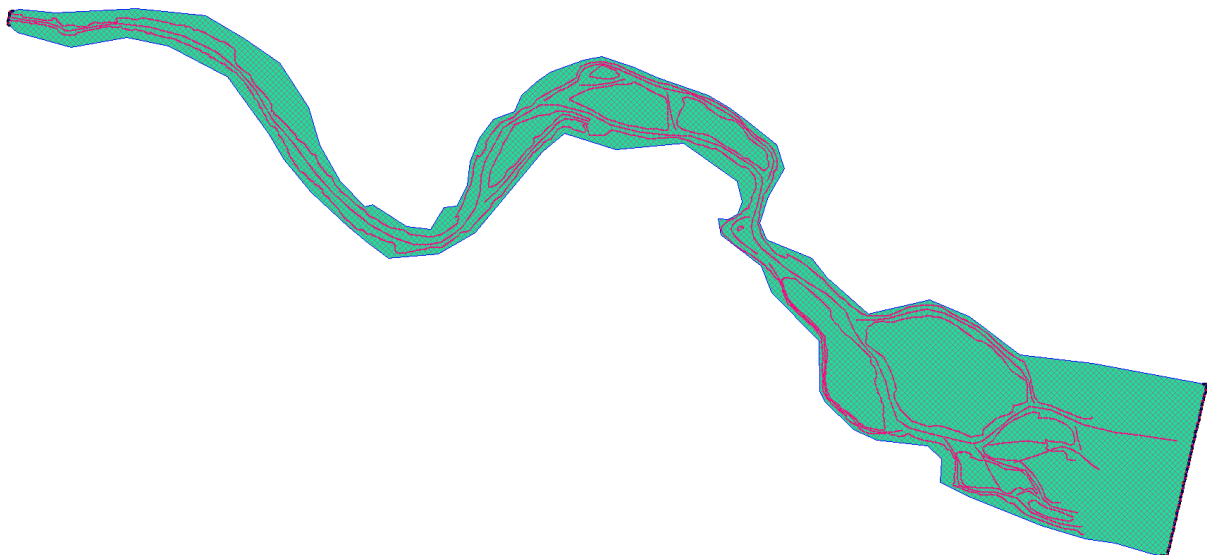
Etter simuleringene var ferdig, ble vannoverflatene eksportert fra RAS Mapper på raster-format som TIFF-filer, etter prosess i kapittel 3.3.2. TIFF-filene ble så lastet inn i ArcMap, hvor verktøyet «Minus» ble benyttet til å beregne differansen i vannoverflaten for hele simuleringområdet. «Minus» trekker verdiene i det andre rasteret fra det første rasteret. Statistiske verdier (gjennomsnitt, standardavvik, minimal- og maksimal verdi) for rasterene blir automatisk beregnet i ArcMap, og kan finnes ved et høyreklikk på rasteret, velge «Properties» og under fanen «Symbology» trykke på knappen «Classify...». I vinduet som dukker opp vil informasjon om statistikken vises. Vannoverflatene fra SW ble så trukket fra DSW, slik at en positiv differanse betyr at vannoverflatene for SW-simuleringene ligger høyere enn for DSW-simuleringene.

### 3.4.2 Bruddlinjer

Under analysen av gittercellestørrelse og SW vs. DSW ble det opprettet et nettverk av bruddlinjer for å undersøke hvor stort utslag det hadde på beregningene. Bruddlinjene kan sees under i figur 12, hvor de er tegnet inn på breddene nedover elven, rundt øyene og omtrent midt i elven. Bruddlinjene langs kantene (breddene og øyene) ble tegnet inn for å få en finere oppløsning i områder hvor terrenget har stor helning og for å hindre strømning til områder hvor vannet ikke skulle bevege seg. Det ble valgt å ikke benytte en verdi for største og minste

cellelengde, som med andre ord betyr at cellene langs bruddlinjene vil ha samme størrelse som resten av gittercellene.

Årsaken til bruk av bruddlinjer midt i elven var for at cellene skulle være orientert parallelt med vannstrømningen, slik at blant annet falsk diffusjon skulle bli redusert. Falsk diffusjon er en effekt som oppstår på grunn av tilnærminger av de konvektive leddene i diskretiseringsmetoden, som fører til en ukorrekt spredning av hastigheter. Ved at celleretningene justeres i retning av vannstrømningen vil falsk diffusjon reduseres (Olsen, 2016, s. 61-62). Den hydrauliske modellen og forholdene som ble brukt for vurdering av SW- mot DSW-ligningene var lik, med unntak av kun SW-ligningene ble benyttet for bruddlinjesimuleringene. Simuleringsinnstillingene er gjengitt under kolonnen «Bruddlinje» i tabell 23. Resultatene for vannoverflate ble eksportert til ArcMap, hvor simuleringene med bruddlinje ble trukket fra de uten.



Figur 12: Geometrien som ble benyttet i følsomhetsanalyse av bruddlinjer, SW vs. DSW og gittercellestørrelser. Det grønne området er det todimensjonale strømningsområdet, mens de mørkerosa strekene er bruddlinjene.

### 3.4.3 Gittercellestørrelser

For å undersøke påvirkning av gittercellestørrelsen ble et stort (se figur 10) og et lite område (se figur 11) benyttet, som for SW vs. DSW-analysen. Simuleringene for det store området er baserte på, som bruddlinjesimuleringene, modellen som ble benyttet for vurdering av SW- vs. DSW-ligningene og SW-ligningene. For det lille området var grensebetingelse som for SW vs.

DSW-simuleringene. I kolonnen «Gittercellestørrelse» i tabell 23 er simuleringssinnstillingene gjengitt.

Etter simuleringene var ferdige ble resultatene eksportert til ArcMap, hvor differansen i vannoverflaten ble beregnet. Gittercellestørrelsen to meter ble benyttet som referanse siden denne oppløsningen var brukt for både det store og det lille området. Det vil si at ved en positiv differanse vil vannoverflaten for to meter celler ligge over den sammenlignede cellestørrelsens vannoverflate, og vice versa.

#### **3.4.4 Mannings ruhetskoeffisienter**

Friksjonsleddet i både SW- og DSW-ligningene vil generelt være av stor betydning for rolig strømming i elver. Derfor er det viktig å vurdere følsomheten av endring i Mannings ruhetskoeffisient i forhold til endring i vannstand. En vurdering av ruhetskoeffisienten er gjort for området vist i figur 10. Det ble valgt å gjøre en forenklet studie hvor ruhetskoeffisienten benyttes for hele området, og ikke deles inn i mindre soner, som gjøres ved kalibrering av modellen. Årsaken til det var at modellen ikke var ferdig kalibrert på tidspunktet følsomhetsanalysen ble gjennomført, slik at en mer generell vurdering ble gjort.

Mannings ruhetskoeffisienter (n-verdi) som ble benyttet varierte fra 0,02 til 0,2 s/m<sup>1/3</sup>, gittercellestørrelse á 3 x 3 m, vannføringen var konstant 18 m<sup>3</sup>/s i form av en hydrograf med intervall på 30 minutter og nedstrøms vannstand i Bandak var konstant 72 m.o.h. Resultatene fra simuleringene ble eksportert til ArcMap, hvor differansene i vannoverflatene ble beregnet. Simuleringen med Mannings ruhetskoeffisient lik 0,06 s/m<sup>1/3</sup> ble benyttet som referanseverdi, slik at en positiv differanse betyr at overflaten for n = 0,06 vil ligge over overflaten til sammenlignet n-verdi.

I ettertid av kalibrert modell for vannføring 17,4 m<sup>3</sup>/s ble det gjennomført en følsomhetsanalyse av ruhetskoeffisientene som var funnet ved kalibrering. Hvor det ble undersøkt hvordan en økt/reduert verdi fører til endring i vannoverflatenivået. Måten det ble gjort på var å endre n-verdiene (ruhetskoeffisientene) med ± 10-30 %. Hvor differansene ble beregnet, på lik måte som tidligere, ut i fra kalibrert n-verdi som referanse.

#### **3.4.5 Turbulens – virvelkoeffisienter**

I HEC-RAS inkluderes turbulensleddet for todimensjonal strømming ved bruk av SW-ligningene, hvor virvelkoeffisienten beregnes etter ligning ( 5 ). Ved standardinnstillinger i



HEC-RAS er turbulensbidraget slått av ved at virvelkoeffisienten er satt lik null. For å teste effekten av turbulens i Tokkeåi har tre situasjoner med ulike transversal blandingskoeffisient blitt sammenlignet. Koeffisientene  $D = 0$  (ingen turbulens),  $D = 0,5$  (noe turbulens) og  $D = 5$  (mye turbulens, som tilsvarer den høyeste verdien oppgitt i tabell 1) ble benyttet i simuleringene.

Området som ble lagt til grunn kan sees under i figur 13, hvor geometrien bestod av gitterceller å  $5 \times 5$  meter, bruddlinjer med minste celleavstand på 1 eller 2 meter og maksimal avstand på 5 meter. Mannings ruhekskoeffisienter som var valgt varierte fra område til område, fra 0,02 til  $1 \text{ s/m}^{1/3}$ . Øvre grensebetingelse var en konstant hydrograf med vannføring lik  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  inn hvert 30. minutt og nedre grensebetingelse var normalhelning på 1 ‰. Simuleringsinnstillinger er gjengitt i kolonnen «Turbulens» i tabell 23. Simuleringsresultatene for vannoverflate ble eksportert til ArcMap, hvor rasterene som tilhørte  $D = 0,5$  og  $D = 5$  ble trukket fra rasteret med  $D = 0$ , slik at en positiv differanse betyr at vannoverflaten ligger høyere i simuleringen uten virvelkoeffisient enn for de med.



Figur 13: Delområde av Tokkeåi som ble benyttet til følsomhetsanalyse av virvelkoeffisient. Blåfargen viser vanddybden [m] ved  $D = 5$ .

### 3.4.6 Tidssteg/Courant-kriteriet

Olsen (2015, s. 52) anbefalte i sitt litteraturstudium om CFD-modellering for NVE at tidsstegets påvirkning av resultatene bør undersøkes i form av en parametertest. Det kommer av at tidssteget er et viktig ledd i Courant-kriteriet, se ligning ( 10 ), som benyttes som en kontroll av

hvor stabil en simulering vil være. Derfor har det blitt gjennomført en følsomhetsanalyse av tidssteget for Tokkeåi. Tidsstegene 0,1, 0,5, 1, 5, 10 og 60 sekunder er benyttet for å undersøke påvirkningen av resultatene.

For å redusere total simulasjonstid for følsomhetsanalysen ble øvre del av Tokkeåi benyttet. Det vil si fra nedstrøms Helveteshylen til oppstrøms Brynjulvøyane, hvor elven først deler seg i to elveløp, se figur 14. Gittercellestørrelse á 2 x 2 meter ble brukt. Det todimensjonale strømningsområdet bestod av Manningsområder som var kalibrert mot vannlinje for 18 m<sup>3</sup>/s, slik at ruhekskoeffisienten varierte mellom 0,04-0,15 s/m<sup>1/3</sup>. Tilsiget var en hydrograf som bestod av 18 m<sup>3</sup>/s med én times intervall og nedstrøms grensebetingelse bestod av normalhelning lik 1 ‰. Simuleringsinnstillinger ellers er gitt i kolonnen «Tidssteg» i tabell 23. Resultatene ble eksportert og sammenlignet som for de andre følsomhetsanalysene, hvor tidssteg lik 0,1 sekund ble valgt som referanse, da lavest tidssteg vil gi en mest mulig korrekt og stabil løsning.



Figur 14: Område av Tokkeåi som ble benyttet til følsomhetsanalyse av tidssteget. Blåfargen viser vanddybden [m] ved bruk av tidssteg = 0,5 s.

### 3.4.7 Corioliskraften

Effekten av Coriolisledet i SW-ligningene ble testet ut for strømningsområdet vist i figur 10. Breddegraden som benyttes i ligning ( 7 ) til å beregne parameteren for Corioliskraften var 59,44°. Geometri og grensebetingelser ble benyttet som for følsomhetsanalyse av Mannings

ruhetskoeffisient, men kun for ruhetskoeffisient lik  $0,08 \text{ s/m}^{1/3}$ . Simuleringsinnstillinger benyttet er gjengitt i kolonnen «Coriolis» i tabell 23. Resultatene for vannoverflatene med og uten Corioliskraften ble eksportert til ArcMap hvor differansen og statistikk ble beregnet. Simuleringene uten Corioliskraften ble benyttet som referanse.

### **3.4.8 Theta**

Den todimensjonale simuleringer gjøres ved at SW-ligninger blir løst ved en vekting av en eksplisitt og implisitt metode. Vektingen, kalt Theta, varierer fra 0,6-1,0, hvor 0,6 betyr at 60 % av beregningene løses ved implisitt metode og 40 % ved eksplisitt metode. Ved å velge Theta lik 1,0 velger man en ren implisitt metode for å løse SW-ligningene. I følge Olsen (2016, s. 33) vil en implisitt metode være mer stabil og kunne ha lengre tidssteg, men vil til gjengjeld ha en lenger simuleringstid enn en eksplisitt metode. En implisitt metode vil kunne beregne selv for et Courant-kriteriet, se ligning ( 10 ), over 1 (Olsen, 2016, s. 40). Etersom at Tokkeåi er en lang elv (5 km), så kan det tenkes at det vil være fordelaktig å benytte en stabil, implisitt løsning, til tross for økt simuleringstid.

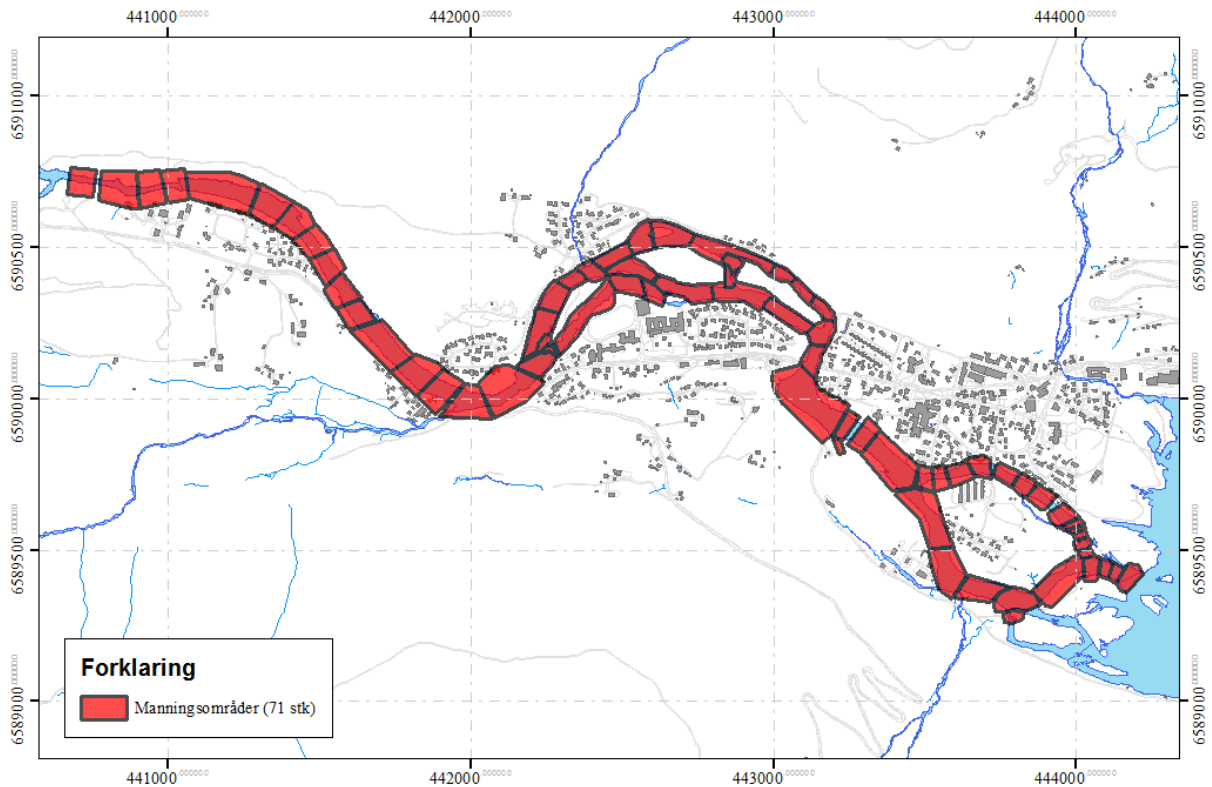
For å undersøke hvordan simuleringstid og vannstand endres ved bruk av ulike Theta-verdier, ble det gjennomført en parameteretest, hvor Theta-verdier fra 0,6 til 1,0 ble benyttet. Cellestørrelsen var på 3 x 3 m, bruddlinjer og Mannings ruhetskoeffisient lik  $0,08 \text{ s/m}^{1/3}$  for hele strømningsområdet. Vannføring oppstrøms var en hydrograf med konstant  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  hver 30. minutt og nedstrøms grensebetingelse konstant vannstand i Bandak på 72 m.o.h. Resultatene fra simuleringene ble så eksportert og lagt til i ArcMap, hvor differanse og statistikk ble beregnet som tidligere parametertester.

## **3.5 Kalibrering av den hydrauliske modellen**

Kalibrering av hydrauliske modeller blir gjort ved å tilpasse simulert/beregnet vannoverflate slik at den samsvarer til observert/målt vannoverflate, men kan også se på vannhastigheter eller vannføringer i ulike deler av elven. Måten tilpasningen gjøres er ved å endre parametere i ligningssettet, som Mannings ruhetskoeffisient eller virvelkoeffisient. For rolige elver vil treghetskreftene være dominerende (turbulent strømningsforhold), slik at Mannings ruhetskoeffisient vil være en følsom parameter.

I prosjektoppgaven ble det gjort en del vannlinjemålinger ved felttur, se figur 61, som ble lagt til grunn for kalibrering av HEC-RAS-modellen i Tokkeåi. En prøve-og-feilemetode/itereringsprosess ble utført ved at Mannings ruhetskoeffisient for ulike

områder/soner ble endret slik at simulert vannoverflate passet i tilfredsstillende grad til målte vannlinjeverdier. Oversikt over Manningsområdene benyttet er vist under i figur 15. I tillegg ble vanngrensene fra LIDAR-skanningen lagt til grunn for kalibrering for vannføringer på  $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$  (gjennomsnittlig verdi av vannføringen for perioden det ble skannet).



Figur 15: Oversikt over de ulike Manningsområdene som ble benyttet i HEC-RAS for hele Tokkeåi.

På grunn av lang tid å gjennomføre enkelte simuleringer ble studieområdet delt inn i tre ulike områder: øvre (figur 14), midtre (figur 13) og nedre (figur 16) Tokkeåi. Ved å kalibrere mindre områder først, ble det spart tid og var enklere å endre Mannings ruhetskoeffisienter for flere deler av elven samtidig uten at endringene påvirket hverandre. Etter ferdig kalibrering av delområdene ble de satt sammen til en fullstendig modell. SW-ligningene ble lagt til grunn for kalibreringsprosessen, hvor ledd som Corioliskraften og turbulens ble neglisjert på antagelse om liten påvirkning. For turbulens var det uvisst hvilke verdier som skulle benyttes for virvelkoeffisienten, siden brukermanualen til HEC-RAS anbefalte at turbulensen burde kalibreres for hver elv. Overnevnte simuleringsinnstillinger ble brukt og lagt til grunn for videre simuleringer (uten endring) i masteroppgaven.



Figur 16: Området som ble benyttet for kalibrering av nedre delområde av Tokkeåi. Blåfargen viser vannstanden [m] ved siste kalibrering.

Det midtre området ble startet på da det virket som det mest tidkrevende, på grunn av komplisert geometri og flere elveløp. I tillegg var det et område som var godt dekt av vannlinjemålinger. Geometrien i modellen bestod av gittercellestørrelser á 5 x 5 m, bruddlinjer med minste cellelengde på 1 og 2 m og største lik 5 m. Etter hvert som kalibreringen foregikk ble det lagt til flere Manningsområder da det ble behov for å kunne endre ruhetskoeffisienter mer lokalt. Til slutt endte det opp med omtrent 25 Manningsområder. Ettersom det var flest vannlinjepunkter i det midtre området for en vannføring på 17,4 m<sup>3</sup>/s, ble en konstant hydrograf med intervall på 30 minutter benyttet. Nedstrøms grensebetingelse var normalhelning på 1 ‰.

I den øvre delen ble det benyttet cellestørrelser á 2 x 2 m, bruddlinjer uten spesifisering av maksimale og minimale cellelengder. Valget av 2 m cellestørrelser var basert på følsomhetsanalysen av gittercellestørrelser for hele studieområdet, hvor simuleringstiden for denne cellestørrelsen virket overkommelig i forhold til videre simuleringer og undersøkelser i Tokkeåi. Først ble området kalibrert for en vannføring på 17,4 m<sup>3</sup>/s, som for midtre del, men da det var gjort flere vannlinjemålinger for en vannføring på 14,4 m<sup>3</sup>/s ble det også kalibrert for denne vannføringen. Ettersom det var flere målepunkter ble det nødvendig med flere

Manningsområder for å få kalibrert godt nok for en vannføring på 14,4 m<sup>3</sup>/s. Når modellen var ferdig kalibrert var det benyttet 17 Manningsområder. En normalhelning på 1 ‰ ble benyttet som nedstrøms grensebetingelse for vannstrømmingen.

For den nedre delen ble det også benyttet gittercellestørrelser á 2 x 2 m og bruddlinjer uten spesifisering av cellelengder. Totalt 28 Manningsområder ble benyttet for å dekke de mest interessante delene av utløpet av Tokkeåi som renner ut i Bandak. Basert på NVEs målestasjon for vannstand i Bandak ble en konstant vannoverflate på nivå 71,97 m.o.h. benyttet som nedstrøms grensebetingelse. Området ble kalibrert for en vannføring på 17,4 m<sup>3</sup>/s, da det var gjort flest vannlinjemålinger for denne vannføringen.

Når de tre delene var ferdig kalibrert ble de satt sammen, dvs. at Manningsområdene og verdiene som var beregnet ble importert til geometridataene for hele Tokkeåi. Et problem med å sette sammen kalibrerte områder var at grensebetingelsene endret seg. F.eks. nedstrøms grensebetingelse for øvre delområde (normalhelning på 1 ‰) vil ikke gi de samme forholdene i elven hvis elven var kontinuerlig og fortsatte. Med andre ord var det behov for kalibrering i områdene mellom delområdene slik at de antatte grensebetingelsene for delområdene ikke ville påvirke resultatene. Etter kalibrering av hele modellen for vannføring på 17,4 m<sup>3</sup>/s ble det gjort en kalibrering ved vannføring 9,6 m<sup>3</sup>/s. Altså vannføringen som var ved LIDAR-skanningen av Tokkeåi. Vannstanden i Bandak på samme tidspunkt var 72,27 m.o.h, slik at grensebetingelsen ble endret.

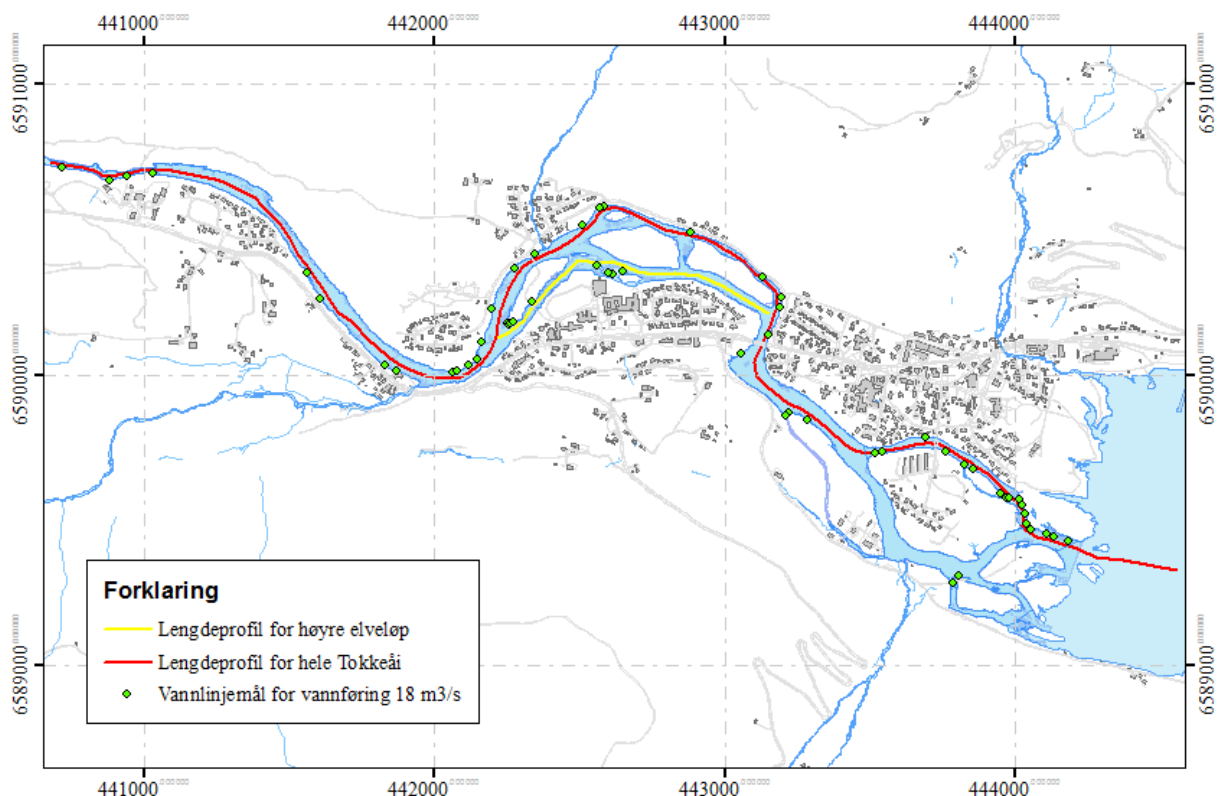
Ønsket egentlig å benytte gittercellestørrelser á 2 x 2 m for kalibreringen av hele modellen, men det viste seg at for den cellestørrelsen tok simuleringene omtrent 30 timer, noe som gjorde cellestørrelsen ugunstig for en kalibreringsprosess. Derfor ble det benyttet en cellestørrelse på 3,5 x 3,5 m, hvor simuleringstiden var 10-12 timer. Samtidig ble det påvist at det gjennomsnittlige avviket i vannoverflate mellom 2 og 3,5 m celler var 3 mm og standardavvik på 13 mm. Med andre ord omtrent 1 cm unøyaktighet/differanse ved bruk av de større gittercellene, noe som ble vurdert som akseptabelt.

For å kontrollere om vannoverflaten beregnet i simuleringene stemmer overens med målte verdier ble vannlinjemålingene, som SHP-filer, for gitte vannføringer lagt til i RAS Mapper. Ved høyreklikk på «Map Layers» og velge «Add map data layers ...» ble de ulike vannlinjemålingene lagt til. Deretter ble egenskapene for vannlinjemålingene endret slik at de var synligere og viste målte z-verdier. Det gjøres ved høyreklikk på kartlaget og velge «Layer

Properties». Huk av for «Label Features» og trykk på «Edit», hvor «Z» velges under «Attribute Text». Resultatene for vannoverflatene for de ulike simuleringene fikk også endret egenskap, slik at de ble transparente og det var mulig å se målte vannlinjemålinger igjennom vannoverflatene i RAS Mapper.

Videre ble vannoverflatene kontrollert ved å holde musepeker over målte punkter, hvor en for høy differanse førte til endring i Mannings ruhetskoeffisient. Hvis differansen lå under 10 cm ble det vurdert om det var nøyaktig nok, avhengig av antatt strømningsforhold, som stryk, hvor bølgehøyden kan antas å variere flere centimeter.

Etter ferdig kalibrering ble differansene mellom målte og simulerte verdier beregnet, hvor målte verdier ble benyttet som referanse. Lengdeprofilene i figur 17 ble benyttet for å eksportere ut høydeverdier for vannoverflatene av den kalibrerte simuleringen fra RAS Mapper, hvor høydeverdiene ble plottet mot de målte vannlinjene fra felt, samt terrenghøyder.



Figur 17: Oversiktskart over lengdeprofiler og vannlinjemålinger som er benyttet for å hente ut vannoverflatehøyder fra kalibrert modell for vannføring lik 17,4 m<sup>3</sup>/s (står ved en feil 18 m<sup>3</sup>/s i forklaringsboksen).

### **3.5.1 Vurdering av forhold mellom Mannings ruhetskoeffisient og vannføring**

Samtidig som sammenligning av målte og simulerte verdier ble gjort, ble det beregnet endring i Mannings ruhetskoeffisienter ved kalibrering ved vannføringene 9,6 og 17,4 m<sup>3</sup>/s, hvor verdiene for 9,6 m<sup>3</sup>/s ble brukt som referanse. I tillegg ble forholdet mellom endring i Mannings ruhetskoeffisient som følge av endring i vannføring. Hvor det for både differanser i målte og simulerte verdier og ruhetskoeffisientene ble beregnet gjennomsnittlig avvik, standardavvik, median, maksimalt- og minimalt avvik. For kalibrering av modell for vannføring 9,6 m<sup>3</sup>/s ble det ikke beregnet differanser, da sammenligningen av simulerte vannoverflater ble gjort ved å kontrollere om kanten passet til målt omriss av vannflaten ved 9,6 m<sup>3</sup>/s.

For vannføringen 14,4 m<sup>3</sup>/s ble øvre del kalibrert for celler á 2 m og ikke 3,5 m, som de to andre kalibreringene. En sammenligning av gjennomsnittlig Mannings ruhetskoeffisient mot vannføringer for de tre kalibrerte vannføringene 9,6, 14,4 og 17,4 m<sup>3</sup>/s ble gjort. I tillegg ble det beregnet endring i gjennomsnittlig Mannings ruhetskoeffisient per m<sup>3</sup>/s vannføringsendring ved å se på endring ved de ulike kalibrerte vannføringene.

### **3.6 Vurdering av behov for felttur**

Basert på tilgjengelig kalibreringsdata var det mulig å få kalibrert en modell for området 10-20 m<sup>3</sup>/s rimelig godt. Noe som dekker omtrent hele spennet av medianvannføringen over året (figur 2). Problemet oppstår ved lavere vannføringer (under 10 m<sup>3</sup>/s), som er av stor interesse med tanke på effektkjøringer, hvor det mangler kalibreringsdata. Derfor vil det være gunstig å få til en datainnsamling av vannlinjemålinger ved lav vannføring. Andre formål som gjør at en felttur vil være nyttig for oppgaven er innsamling av GPS-målinger for kontroll av LIDAR-data i spesielt stryk, men også for flere områder på land og i elven.

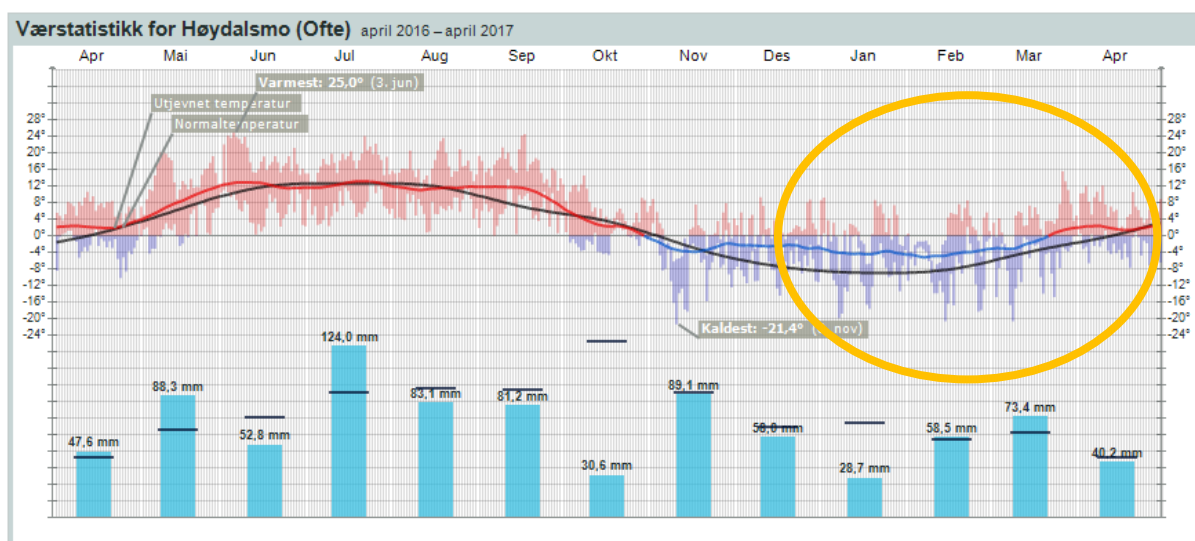
I tillegg ville det vært nyttig å få tatt bildet av områder hvor det er tvil rundt strømningsforhold, slik at modellen kunne kontrolleres og tilpasses mot bildene. Fordelingen av vannføring i de ulike løpene i elven er også delvis ukjent, da det er for få vannlinjemål som dekker to elveløp ved samme vannføring. Også en hastighetsfordeling i elven ville vært nyttig for kalibrering av modellen.

Ettersom at vannføringen i første halvdel av 2017 er regulert til å være konstant lav (selvpålagt minstevannføring omtrent lik 4 m<sup>3</sup>/s) på grunn av rehabiliteringsarbeid ved Lio kraftverk, var det et godt utgangspunkt for feltarbeid i elven. Spesielt i deler av elven hvor det tidligere var



vanskelig forhold, som sterke strømninger og høye vannhastigheter, men også områder med dypere vannivå.

På grunn av en varm vinter og vår (se figur 18 for temperaturer) har snøsmelting begynt tidlig og vannføringen i Tokkeåi har ikke holdt seg lav over lengre perioder som håpet på. I periodene hvor vannføring har vært lav har det enten vært for kaldt i lufta som har ført til isdannelse på deler av elven, eller det har ikke passet å dra på felttur. Derfor har det ikke blitt gjennomført noen felttur i masteroppgaven selv om det gjerne skulle vært samlet inn mer data.



Figur 18: Værstatistikk for Tokke og omegn det siste året (april 2016 til april 2017), fra målestasjon Høydalsmo (Ofte). De øverste linjediagrammene viser temperaturer og stolpediagrammene nederst nedbør. Ser at for januar-april (innsirklet med oransje strek) i år så ligger døgnmiddeltemperaturen (blå eller rød linje) over mediantemperaturen (sort linje) (yr.no, 2017).

### 3.7 Effektkjøring i Tokkeåi

Basert på vannføringsdata fra Tokkeåi, se figur 2, målt ved stasjonen Elvarheim, med timesoppløsning ble det gjort en visuell vurdering av vannføringskurven for årene 2012-2013 for å identifisere effektkjøringshendelser i Tokkeåi (tidsperiode som ble forespurt av Statkraft ved Morten Stickler, epost, 5. mai 2017). For å identifisere store endringer i vannføring ble differanse i vannføring per time beregnet og plottet i samme diagram som vannføringsgrafen. På den måten kunne raske endringer og lave vannføringer lettere kobles sammen.

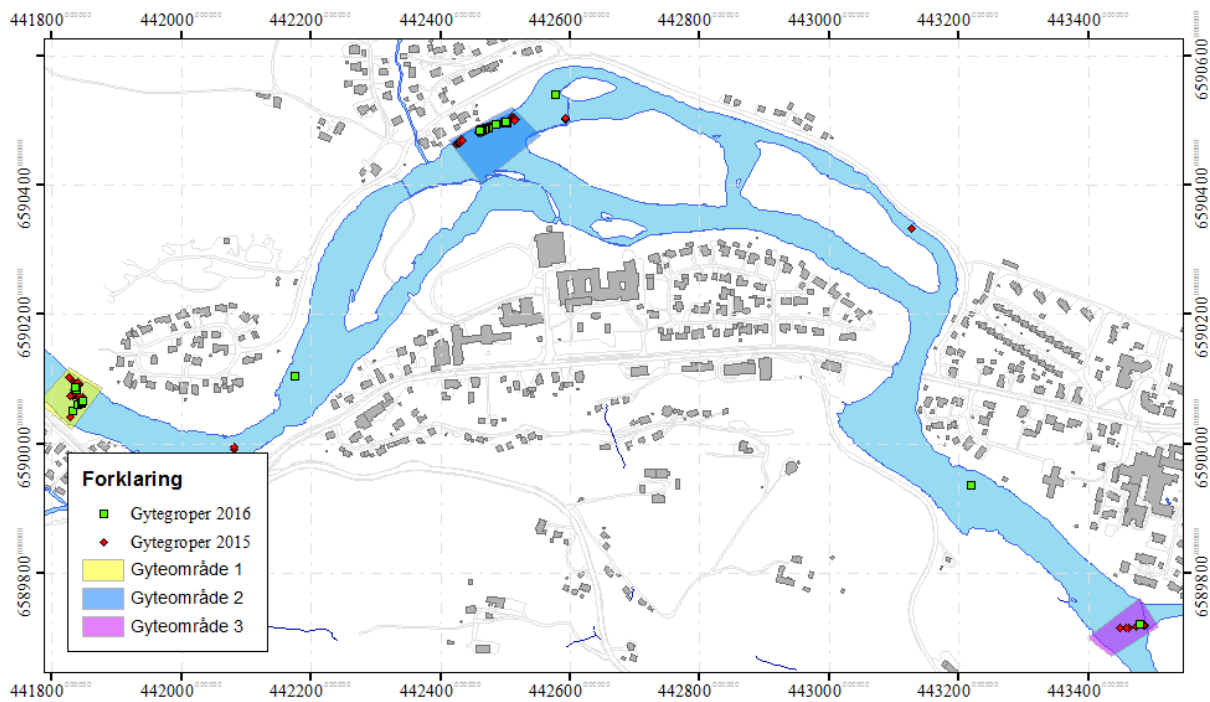
Rask endring har ingen kvantitativ definisjon, slik at for arbeidet med å finne raske endringer ble en vannføringsendring på 5 m<sup>3</sup>/s på én time satt som grenseverdi for å sortere ut data. Årsaken til at den verdien ble valgt kommer av en vurdering av endring i vannføring, basert på en vannføringsserie for 2012-2016 med timesoppløsning, hvor det ble sett på antall endringer for ulike vannføringsverdier. Denne verdien er med andre ord ikke enn reell vannføringsendringsverdi ved effektkjøring, men ble satt på bakgrunn av tilgjengelig data.

### **3.7.1 Vinter- og sommerscenario**

I utgangspunktet var det tider på vinterhalvåret som var av interesse, da dette tidspunktet gir høyest påvirkningsgrad i en miljøvurdering. I tillegg ble det vurdert perioder for sommeren. To enkeltscenarier (vinter og sommer) ble valgt ut for å undersøke påvirkningen av effektkjøring i Tokkeåi. Vannføringsscenarioene kan sees i Vedlegg I.

### **3.7.2 Gyteområder**

For å undersøke senkningshastighet og tørrlegging ved effektkjøring ble det valgt ut tre gyteområder (fra figur 4) som ble identifisert av både Heggenes og UNI Miljø. Områdene er vist under i figur 19. Gyteområde 2 og 3 tilsvarer omtrent felt 2 og 6 fra tidligere identifiserte gyteområder i figur 57 (Vedlegg C). På forhånd av effektkjøringene ble områdene undersøkt ved å se på resultatene fra kalibrert simulering ved vannføring 17,4 m<sup>3</sup>/s. Basert på resultatene kan områdene karakteriseres som rolige (vannhastigheter under 0,2 m/s) og middels dype (vannstand opp til 1 m).



Figur 19: Gyteområdene 1, 2 og 3, som ble brukt til å identifisere senkningshastigheter og tørrlegging ved ulike simuleringer ved effektkjøring i Tokkeåi. Hvor områdene er basert på studier av gyteområder identifisert av Heggenes.

### 3.7.3 Beregning av senkningshastighet

I RAS Mapper var det mulig å se hvordan vannstanden/overflatenivået i en celle endrer seg som funksjon av tid, dermed ble celler som var nærliggende markerte gyteområder valgt ut for å identifisere endring i vannoverflate over tid. Måten det ble gjort på var at det aktuelle resultatkartlaget var slått på og aktivt (dvs. at verdier fra resultatkartet vises når musepekeren holdes over beregnet område), hvor et høyreklikk ble gjort når musepekeren ble holdt over gjeldende gyteområde og korrekt posisjon var funnet. Valgte så «Time Series Plot» og «WSE». Ved å velge fanen «Table» øverst kan vannoverflateverdiene markeres og kopieres til Excel.

Siden vannoverflaten før og etter var konstant, så ble verdiene som representerte disse to situasjonene identifisert og notert. Differansen mellom vannoverflatene før og etter ble beregnet. Siden hjelpemiddelet for vurdering av effektkjøring definerer senkningshastigheten til å foregå mellom starten av en senkning og til tidspunktet hvor 90 % av senkningen har skjedd, ble 90 % av differansen og vannoverflatenivået dette representerte beregnet. Tidspunktet ble så lest av for start og slutt, hvor 90 % av senkningen har skjedd. Til slutt ble senkningshastigheten beregnet etter formel ( 11 ).

### **3.7.4 Beregning av tørrlagt/vanddekt areal**

Etter simuleringene var ferdige i HEC-RAS ble resultatkart, på raster-format, for vannoverflatene eksportert. For noen av simuleringene så var ikke vannføringen før reduksjonen konstant for hele elven ved et tidssteg, derfor måtte elven deles inn i soner hvor vannføringen var det samme. Dette ble gjort ved å lage 16 tverrsnitt nedover hele elven, hvor for hvert tverrsnitt ble vannføringskurven eksportert til Excel. I Excel ble vannføringskurvene plottet for de ulike tverrsnittene og tverrsnitt som hadde samme vannføring for samme tidssteg ble identifisert. På denne måten ble ulike områder i elven som hadde samme vannføring før reduksjonen identifisert.

Hvis det var et tidssteg hvor vannføringen var lik for hele elven, ble resultatfilen for dette tidssteget eksportert. For vannføringen etterpå ble det benyttet kartlaget som viser minimumsvannoverflaten (minste vannoverflate målt i løpet av simuleringen) i RAS Mapper, da vannføringen etter reduksjonen førte til lavest vannoverflaten for hele elven.

I ArcMap ble de importerte rasterne fra HEC-RAS omgjort til polygoner på SHP-format, som inneholdt kun avtrykket av de vannfylte cellene i rasteret. Omgjøringen ble gjort ved hjelp av verktøyet «Raster Domain». For simuleringene hvor ulike deler av elven hadde ulike vannføring ved samme tidssteg ble de ulike områdene, som var identifisert i Excel tidligere, klippet ut ved hjelp av verktøyet «Clip». De utklippede delene av elven ble satt sammen igjen til en polygon ved bruk av verktøyet «Merge», slik at vannoverflatene for hele elven svarte til samme vannføring. Til slutt ble arealet beregnet ved funksjonen «Calculate Areas». For simuleringene hvor rasterne ikke trengte å deles opp, ble de kun omgjort til polygoner og areal beregnet.

For å undersøke tørrlegging av gyteområdene ble polygonene for gyteområdene (figur 19) brukt til å klippe ut verdier fra polygonene som inneholdt vannfylte celler. På denne måten kunne arealet for de enkelte gyteområdene beregnes ved bruk av verktøyet «Calculate Areas» som tidligere. Arealverdiene ble lagt til Excel, hvor andel av totalt vanddekt areal og/eller tørrlegging av hele elven eller for gyteområder ble beregnet.

### **3.7.5 Effektkjøringsanalyse ved bruk av COSH-Tool**

Vannføringsserien fra Tokkeåi ble benyttet i verktøyet COSH-Tool for å undersøke hvordan programmet ville vurdere størrelser av raske endringer på en mer statistisk metode basert på

vannføringsserien, i motsetning til utplukkede enkelthendelser. På den måten ville resultatene være mer tilpasset til bruk av hjelpemiddelet for vurdering av effektkjøring (presentert i kapittel 2.11).

Tidsperioden ble avgrenset til årene 2012-2014, da det var en stor flomhendelse i 2015 som ville unngås. Vannføringsintervallet ble satt til 0-30 m<sup>3</sup>/s for å unngå flomhendelser, hvor 30 m<sup>3</sup>/s er høyeste medianvannføring i Tokkeåi, basert på vannføringsserien i figur 2. Utenom en periode på sommeren, er medianføring på det høyeste 20 m<sup>3</sup>/s, slik at ved en maksimal produksjon i Lio kraftverk på 14 m<sup>3</sup>/s (ifølge Morten Stickler, epost, 29. mai 2017) ble det antatt tilstrekkelig med en øvre vannføring på 30 m<sup>3</sup>/s for å ta hensyn til effektkjøring ved lavere vannføringer.

Det ble benyttet flere persentiler for å sammenligne hva slags utslag det ga på resultatene, hvor 90-, 93-, 96- og 99-persentilene ble undersøkt. For alle undersøkelsene ble toppintervall («peak interval») på 60 minutter brukt, da dataserien hadde timesoppløsning. Bredde- og lengdegrader brukt var 59,445074 og 8,005385 og tidssone GMT+1. En vinter- og sommersesong ble undersøkt. Vinter bestod av perioden 1. januar til 1. april (~90 dager), mens sommer fra 1. mai til 1. september (~120 dager). Slik at sesongvurderinger videre er basert på de to periodene. Ønsket egentlig å inkludere desember i vinterperioden, men det lot seg ikke gjøre i programmet, da tidsperioden måtte defineres fra tidligst januar.

Fra analysen som ble gjort i verktøyet ble det produsert en god del resultatplot (se Vedlegg O), hvor blant annet antall dager i året med effektkjøring ble funnet (frekvens), hvor en midling mellom antall hendelser per år ble gjort. For vinter ble antall effektkjøringsdager delt på 90 dager, mens for sommer 120 dager, for å finne frekvensen i prosent. Gjennomsnittlige amplituder basert på medianamplituder for de ulike årene ble beregnet. Fordeling er vurdert etter endring i vannføring per tidssteg (som beregnet og plottet i Excel), og tidspunkt er basert på fordeling og når på døgnet forekomsten av raske reduksjoner er størst.

Vannføringene og endringene som ble benyttet i simulering av effektkjøring for de ulike persentilene er gjengitt i Vedlegg I. Fra simulerte resultat i HEC-RAS-modellen ble senkningshastighet og tørrlagt areal beregnet som beskrevet i tidligere kapittel.

### 3.7.6 «Verste-tilfelle»-scenario

Ved stor og rask reduksjon i vannføring vil senkningshastigheten bli stor. Senkningshastigheten er en kritisk faktor for fiskeoverlevelse, da fisken trenger tid for å svømme bort fra områder som blir tørrlagte ved vannføringsreduksjoner. For å undersøke hvor stor senkningshastighet som realistisk kan oppnås i Tokkeåi, har et scenario hvor kraftanlegget produserer på maksimal kapasitet, men stopper produksjonen i løpet av fem minutter blitt benyttet. Dermed vil vannføringen som tilføres Tokkeåi endres fra 18 m<sup>3</sup>/s (maks produksjon + minstevannføring = 14 + 4 m<sup>3</sup>/s) til 4 m<sup>3</sup>/s (kun minstevannføring). Med andre ord har det blitt lagt til grunn at minstevannføringen vil være konstant over hele perioden, og at vannføringen i elven aldri blir lavere.

Det ble brukt Mannings ruhetskoeffisienter fra kalibrert vannføring på 9,6 m<sup>3</sup>/s og et tidsintervall på åtte timer. Hydrografen bestod av vannføringer med 5 minutts tidssteg, hvor de første tre timene var vannføringen konstant 18 m<sup>3</sup>/s, mens for de siste fem timene var den konstant 4 m<sup>3</sup>/s. Etter simuleringene ble senkningshastighetene, samt tørrlagt areal, for de tre gyteområdene beregnet etter tidligere beskrevet fremgangsmåte.

## 3.8 Forhold mellom vanndekt areal og vannføring

Det ble undersøkt hvordan endring i vannføring førte til endring i vanndekt areal i Tokkeåi. Da en sammenheng mellom de to faktorene vil være til støtte for en vurdering av nødvendig vannføring for elven skal være tilstrekkelig vanndekt slik at biologiske forhold (f.eks. tilstrekkelig vann i gyteskjul) i elven skal være gode.

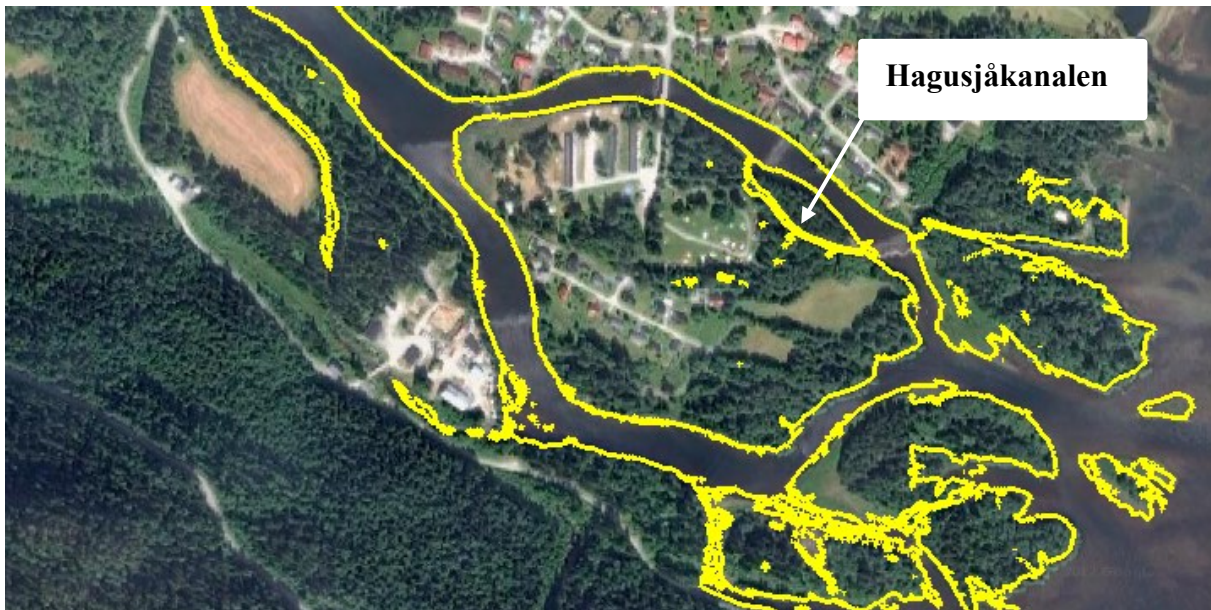
Først ble vannføring som dekker hele bredden av elven med vann definert som det regulerte årsmiddelet. Det vil si at når vannføringen øker over dette nivået vil ikke vannstanden øke noe særlig, men heller vannhastighetene. Fra de historiske vannføringsdataene fra målestasjon Elvarheim i Tokkeåi (med daglige målinger fra 1968-2015), ble middelverdien beregnet til 20 m<sup>3</sup>/s.

For vannføringer lavere enn 13,5 m<sup>3</sup>/s ble kalibrerte Mannings ruhetskoeffisienter for vannføring 9,6 m<sup>3</sup>/s benyttet, mens for beregning av vanndekte areal over 13,5 m<sup>3</sup>/s ble ruhetskoeffisientene fra kalibreringen ved 17,4 m<sup>3</sup>/s benyttet. Simuleringene ble gjennomført ved konstante hydrografer (altså statisk beregning).

### 3.9 Endring av bunnforhold og terreng

Det ble oppdaget at Hagsjøkanalen (se figur 20) manglet vann ved kalibrering av modellen for omrisset av vannstanden ved LIDAR-skanningen. Etter en undersøkelse av forholdene oppstrøms ble det oppdaget at det var store endringer i terrengdata ved terskelen inn til Hagsjøkanalen. For å tallfeste størrelse av endringene ble LIDAR-dataene omgjort til raster ved bruk av binning-interpolering (IDW og naturlig nabo) og celler á 0,2 x 0,2 m. Deretter ble rasterne klippet ut for et mindre område rundt terskelen og differansene i z-koordinat ble beregnet (framgangsmåte lik som beskrevet i kapittel 3.2.2).

For å undersøke hvordan vannføringen ville bli simulert gitt at terskelen og området i nærheten var som for tidligere forhold (før flommen i 2015), ble LIDAR-dataene for terskelområdet for 2015 lagt til datasettet for 2016. Det ble gjort etter lignende prosedyre som for vurdering av interpolasjonsmetodene (kapittel 3.2.2), hvor LIDAR-data fra området rundt tersklene ble klippet ut for både de nye og gamle LAS-datasettene. Deretter ble de gamle LIDAR-dataene, som var klippet ut, lagt til i det nye LAS-datasettet som manglet data for terskelområdet. Videre ble LAS-datasettet konvertert til raster ved bruk av triangulering- og naturlig nabo-interpolasjon og celler á 0,1 x 0,1 m (samme interpolasjonsmetode og oppløsning benyttet i original terrengmodell).



Figur 20: Kart over nedre Tokkeåi og deltaområdet som munner ut i Bandak, hvor Hagusjåkanalen er markert. De gule linjene viser omrisset av vannoverflaten ved siste LIDAR-skanning, som er benyttet til kalibrering av modellen.

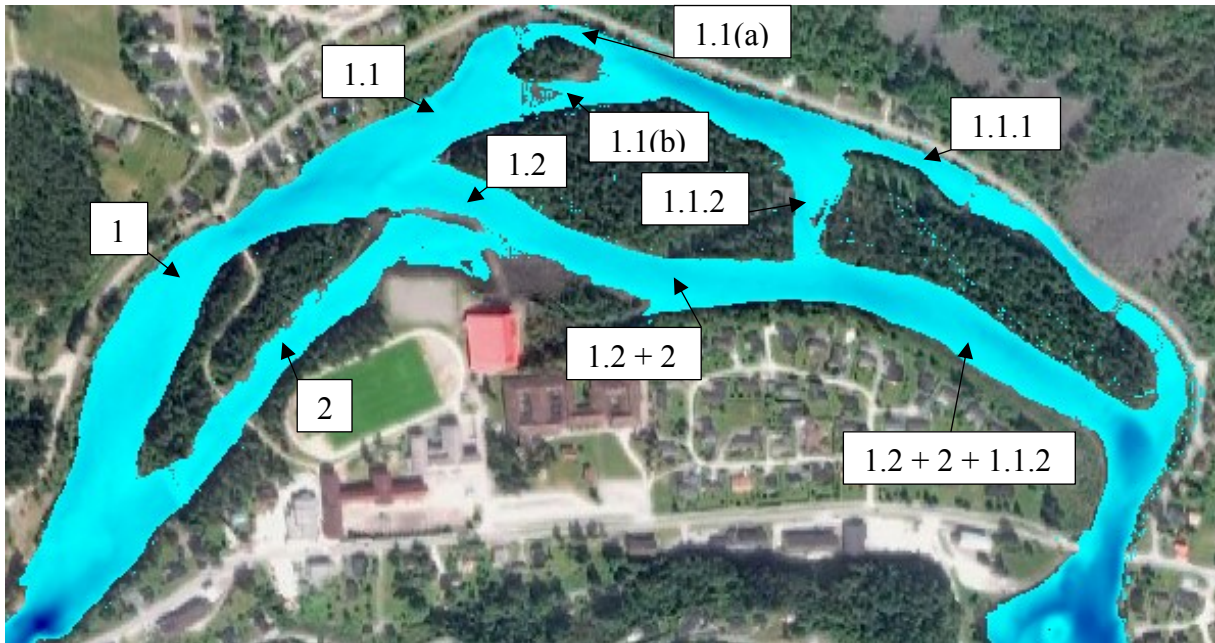
Terrengmodellen (eller rasteret) ble importert til HEC-RAS, i samme prosjekt som for kalibrert modell ved  $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , slik at det nye terrenget kunne benytte den allerede opprettede geometrien. I RAS Mapper endres hvilket terreng som skal være aktivt ved f.eks. høyreklikk på «Geometries», velg «Manage Geometry Associations...» og i vinduet som dukker opp kan for de ulike geometriene eller resultatene tilknyttes ulike terrengmodeller i nedtrykksmenyen. Deretter ble det kjørt en simulering med samme oppsett som for kalibreringen (vannføring på  $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$  og vannstand i Bandak lik  $71,97 \text{ m.o.h.}$ ), med Mannings ruhekskoeffisienter fra den siste kalibreringen.

LIDAR-skanningene fra 2015 og 2016 av hele Tokkeåi ble sammenlignet ved at differansene i z-koordinatene ble beregnet. Først ble de to LAS-datasettene interpolert ved bruk av binning, med celletilordningsmetode IDW, hulromfyllingsmetode ingen og cellestørrelser på  $0,2 \text{ m}$ . Deretter ble differansen mellom 2015-rasteret og 2016-rasteret, samt statistikk av differansene, beregnet ved hjelp av verktøyet «minus». Årsaken til at hulromfyllingsmetoden ingen ble brukt var fordi 2015-skanningen bestod av store områder uten data, slik at en interpolert verdi i disse områdene ville gitt et feil bilde av den reelle differansen mellom LIDAR-datasettene.



### 3.10 Andel vannføring i ulike elveløp

Det ble undersøkt hvor stor andel av vannføringen som går i de ulike elveløpene for midtre del av Tokkeåi. Ved at tverrsnitt for de ulike løpene i elven ble dannet i RAS Mapper, ble vannføringsandelen undersøkt. De ulike delene av elven kan sees under i figur 21. Ved å velge «Time Series» og «Flow», etter å klikket på høyre musetast for gjeldende tverrsnitt, kunne vannføring leses av fra tabellen.



Figur 21: Oversiktskart over midtre del av Tokkeåi hvor navn for de ulike elveløpene er gitt.

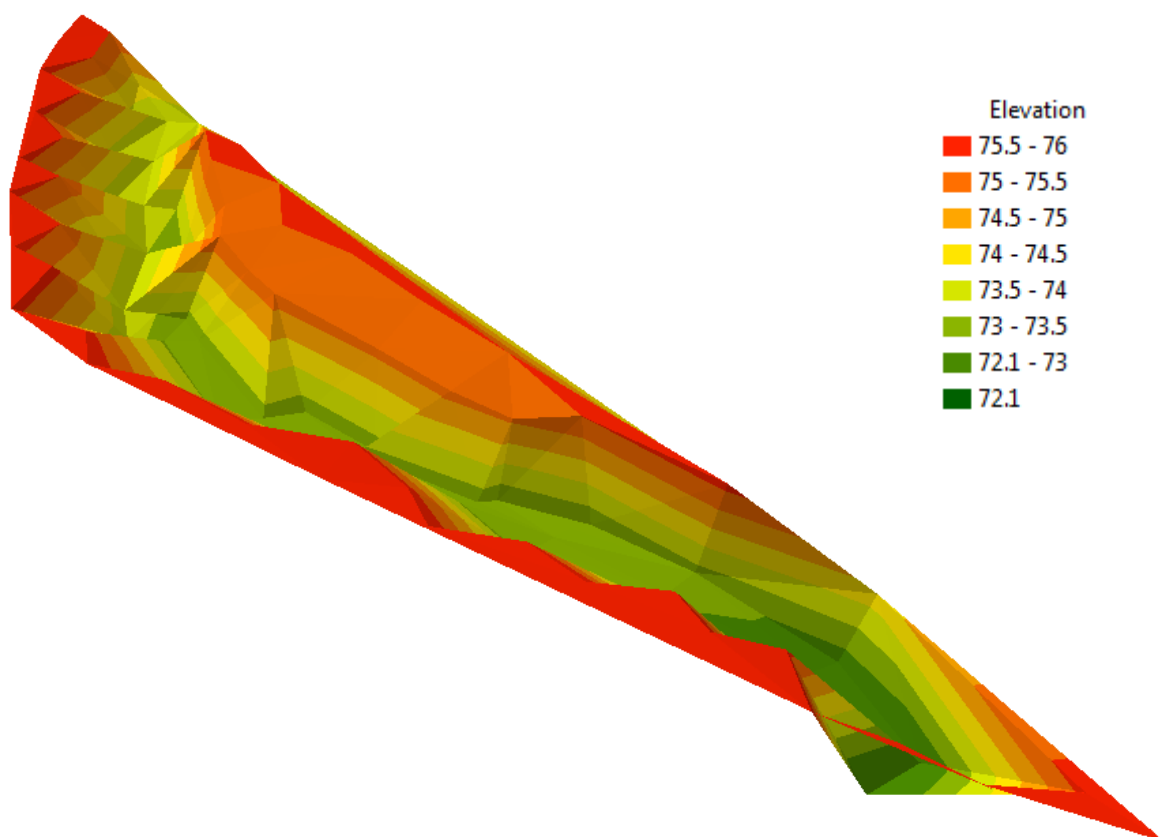


## 4 RESULTAT

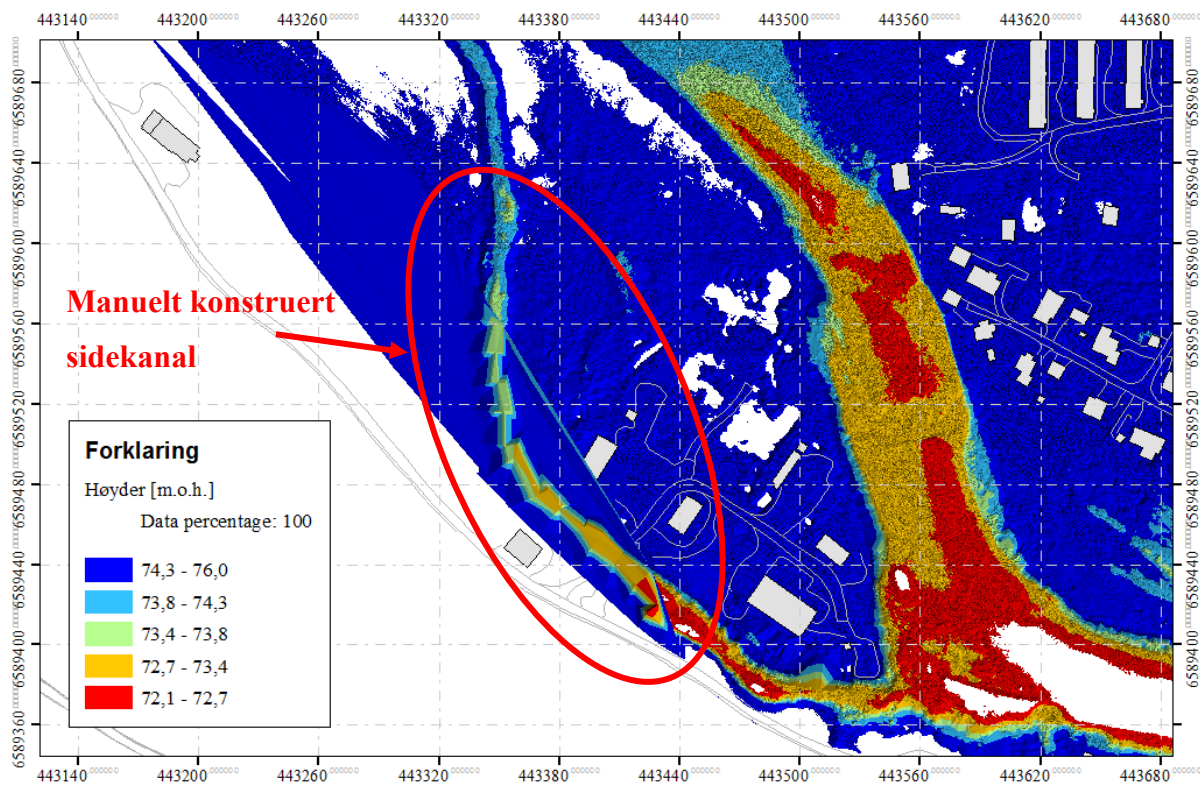
---

### 4.1 Konstruering av sidekanal

Under i figur 22 og figur 23 vises resultatet av sidekanalen som ble laget manuelt og inkludert i terrenngmodellen. Sidekanalen ble dannet av 93 punkter over et 200 meter langt strekk. Oppløsningen av sidekanalen var mye lavere enn f.eks. LIDAR-dataene, som hadde en gjennomsnittlig avstand på 0,14 meter mellom punktene, mens sidekanalen hadde 16 meter i mellom punktene som gjennomsnittlige avstand.



Figur 22: En tredimensjonal illustrasjon av sidekanalen, basert på LAS-data, fra ArcMap hvor z-koordinatene har bli overdrevet tre ganger i forhold til x- og y-koordinatene for å få fram form på sidekanalen.



Figur 23: Kartutsnitt over Tokkeåi som viser den konstruerte sidekanalen vist ved bruk av LAS-data.

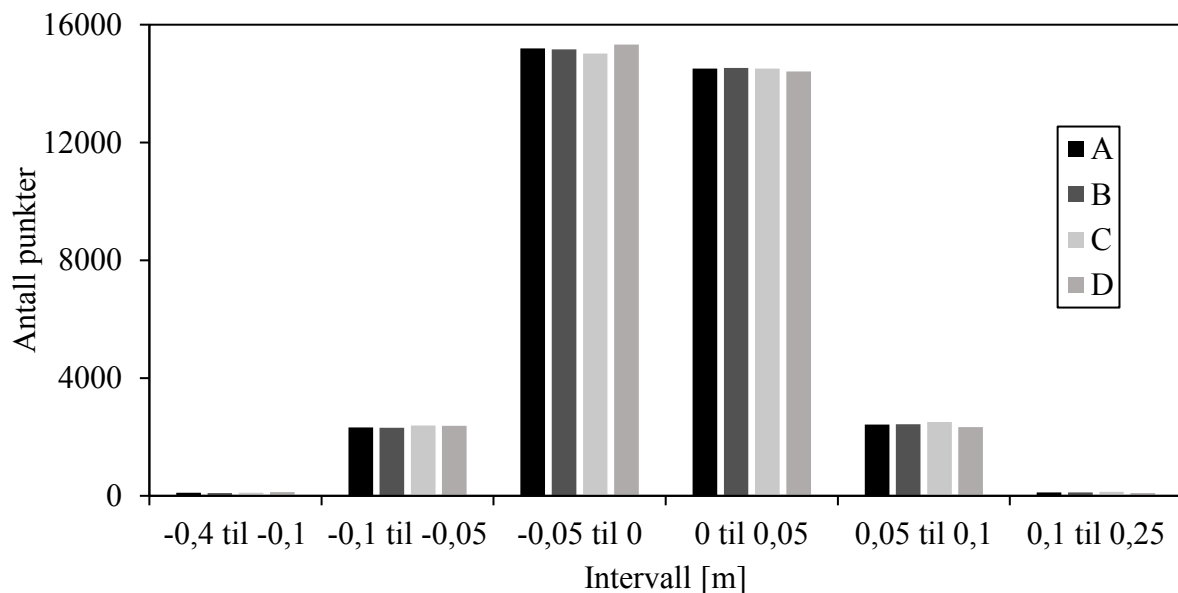
## 4.2 Vurdering av interpolasjonsmetoder for terrengmodell

De fire metodene som er vurdert resulterer i høy korrelasjon mellom interpolerte og reelle høyder, med korrelasjonsfaktor  $R^2$  lik 1,0. Ved negativt fortegn på avvikene så vil de interpolerte verdiene ligge høyere enn de reelle, noe samtlige metoder gjør ved å se på gjennomsnittlig avvik eller median. Hvor gjennomsnittlige avvik mellom reelle og interpolerte punkter ligger på et nivå rundt  $10^{-4}$  m. Differansen vil være av lavere grad enn nøyaktigheten av både LIDAR- og GPS-målinger, slik at en interpoleringen ikke vil forverre datagrunnlaget som legges til grunn i en hydraulisk modell. De maksimale og minimale differansene ligger på desimeternivå, som vil ha en påvirkning og redusere nøyaktigheten av terrenggrunnlaget.

Form og størrelse på de ulike interpolasjonsmetodenes histogram i frekvensplottet (figur 24) følger hverandre. Hoveddelen av avvikene ligger i intervallet  $\pm 5$  cm, mens de store avvikene på desimalnivå er sjeldne. Histogrammet viser at differansene generelt ligger på centimeternivå med form tilnærmet en normalfordeling.

Tabell 5: Oversikt over resultatene fra sammenligning av de ulike interpolasjonsmetodene. Forklaring av interpolasjonstyper, celletilordningstyper og hulroms-/interpolasjonsmetoder er gitt i 3.2.2.

Metode	A	B	C	D
Interpolasjonstype	Binning	Binning	Binning	Triangulering
Celletilordningsmetode	Gjennomsnittlig	IDW	Nærmeste nabo	-
Hulromfyllings- /interpolasjonsmetode	Naturlig nabo	Naturlig nabo	Naturlig nabo	Naturlig nabo
Cellestørrelse [m]	0,1	0,1	0,1	0,1
Interpoleringstid [timer]	3,3	3,3	3,3	4,3
Filstørrelse [GB]	2,3	2,3	2,2	3,5
Gjennomsnittlig avvik [m]	-1,1E-04	-1,1E-06	1,1E-04	-6,5E-04
Median [m]	-6,3E-04	-5,4E-04	-3,5E-04	-1,1E-03
Maksimalt avvik [m]	0,25	0,25	0,25	0,18
Minimalt avvik [m]	-0,39	-0,39	-0,38	-0,38
R <sup>2</sup>	0,999972	0,999972	0,999972	0,999973



Figur 24: Frekvensplot som viser innenfor hvilke intervall avvikene mellom fjernede og interpolerte punkter ligger. Forklaring av de ulike interpolasjonene A-D er beskrevet i tabell 5.

### 4.3 Følsomhetsanalyser og parameter testing

En oppsummering av følsomhetsanalysene er gitt under i tabell 6 hvor det er gjort et forsøk på å rangere etter hvilke parametere som vil påvirke simuleringene i den hydrauliske modellen mest. Rangeringen er basert på hva slags usikkerhetsnivå endring i parameteren fører til for beregnet vannoverflate.

Tabell 6: Liste over mest følsomme parametere i HEC-RAS basert på gjennomførte tester, rangert fra mest til minst sensitiv, med usikkerhetsnivå knyttet til de ulike parameterne.

Rangering	Parameter	Usikkerhetsnivå
1	Mannings ruhekskoeffisient	Desimeter
2	SW vs. DSW	Centimeter - desimeter
3	Gittercellestørrelse	Centimeter - desimeter
4	Tidssteg	Centimeter
5	Bruddlinje	Millimeter - centimeter
6	Turbulens	Millimeter - centimeter
7	Corioliskraft	Millimeter
8	Theta	Ingen

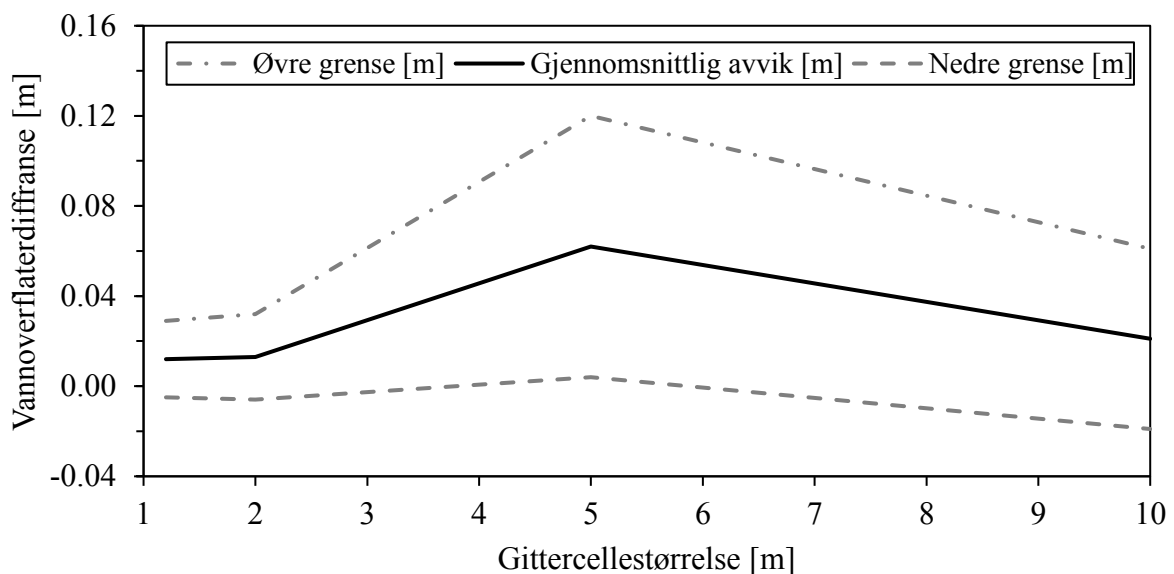
Figurene som er benyttet til framstilling av resultatene i følsomhetsanalysene, i underkapitlene, viser hvordan differansene i simulerte vannoverflater endrer seg som følge av endring av parametere. Øvre og nedre grense representerer det gjennomsnittlige avviket, hvor standardavviket er henholdsvis addert eller subtrahert. Avstanden mellom grensene forteller da innenfor hvilket intervall hoveddelen av differansene vil ligge, hvor en stor avstand betyr stor usikkerhet i differanse, og vice versa for kort avstand.

I tabellene som er vist i Vedlegg E er mer utfyllende informasjon fra simuleringene gitt, hvor gjennomsnittlige-, maksimale-, minimale- og standardavvik er gitt. I tillegg er det for enkelte analyser inkludert annen informasjon som antall gitterceller som er benyttet i de ulike simuleringene, simuleringstider, simuleringstidintervall og forhold mellom de to tidene.

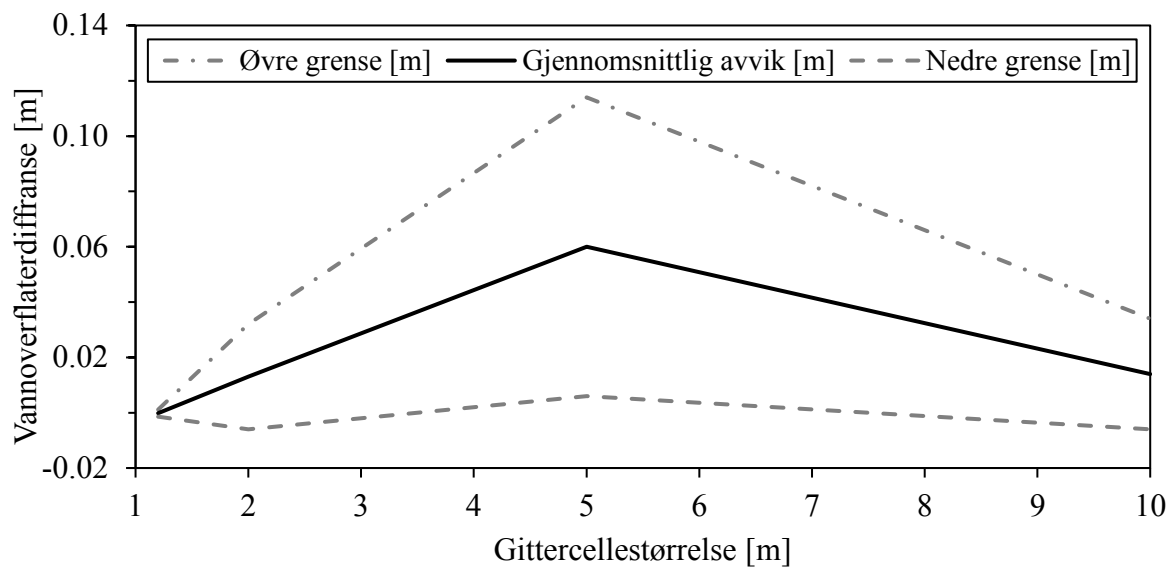
### 4.3.1 SW vs. DSW

Resultatene fra sammenligningen av de to beregningsmetodene SW og DSW er oppsummert i figur 25, figur 26, figur 27, tabell 13 og tabell 14. De to første figurene viser hvordan differansen i vannoverflate endrer seg ved gittercellestørrelser for det store området, og skiller mellom om det er simulering med eller uten bruddlinjer. Den siste figuren beregner differansene ved ulike gittercellestørrelser for det lille området.

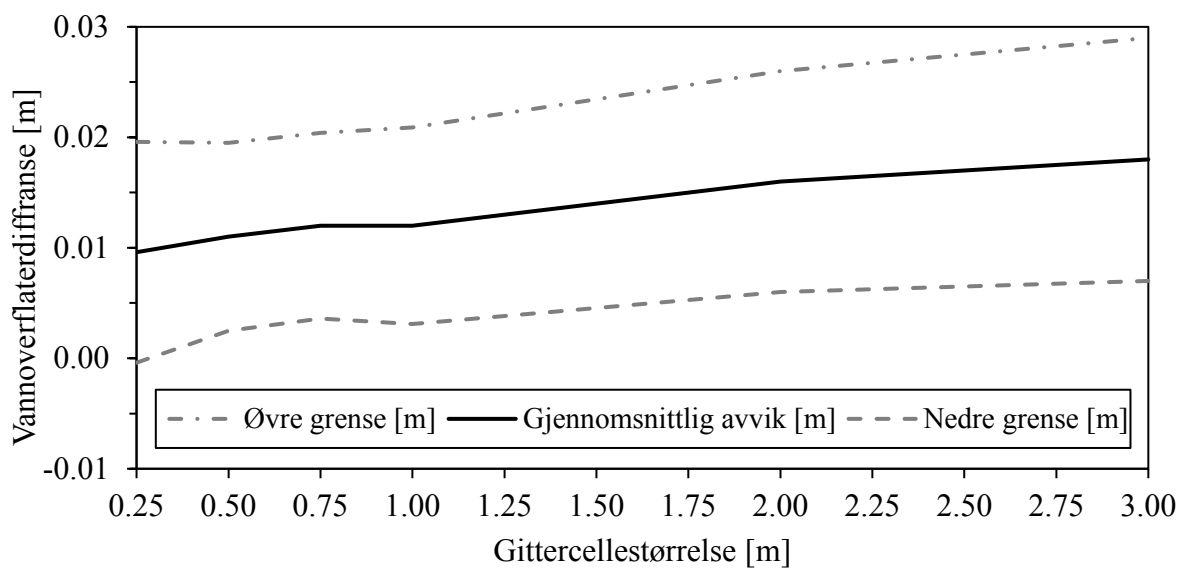
De gjennomsnittlige avvikene mellom SW- og DSW-simuleringene ser ut til å være noe større ved bruk av bruddlinjer enn uten, spesielt ved cellestørrelsene 1,2 og 10 m. For de to samme cellestørrelsene er også standardavviket en god del større. For cellestørrelsene 2 og 5 m viser simuleringene med og uten bruddlinjer liten forskjell. For begge sammenligningene så ligger avvikene generelt på centimeternivå, men opp mot desimeternivå for de største avvikene. Fra sammenligning av simuleringstid ser det ut til at en SW-basert simulering bruker omtrent dobbelt så lang tid som en DSW-basert simulering. For det lille området ligger standardavviket på omtrent 1 cm for samtlige av gittercellestørrelsene, og SW-baserte simuleringer ligger gjennomsnittlig ca. 1 cm over DSW-baserte beregninger.



Figur 25: Differanser mellom vannoverflatene beregnet ved SW- og DSW-baserte simuleringer *med* bruddlinjer for det *store* området.



Figur 26: Differanser mellom vannoverflatene beregnet ved SW- og DSW-baserte simuleringer *uten* bruddlinjer for det *store* området.

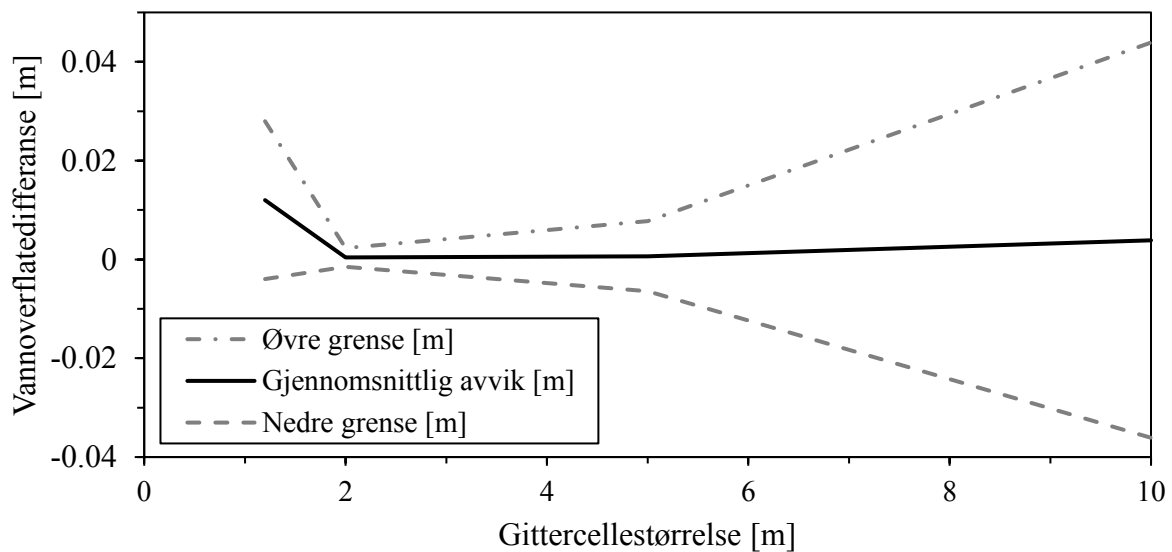


Figur 27: Differanser mellom vannoverflatene beregnet ved SW- og DSW-baserte simuleringer *uten* bruddlinjer for det *lille* området.

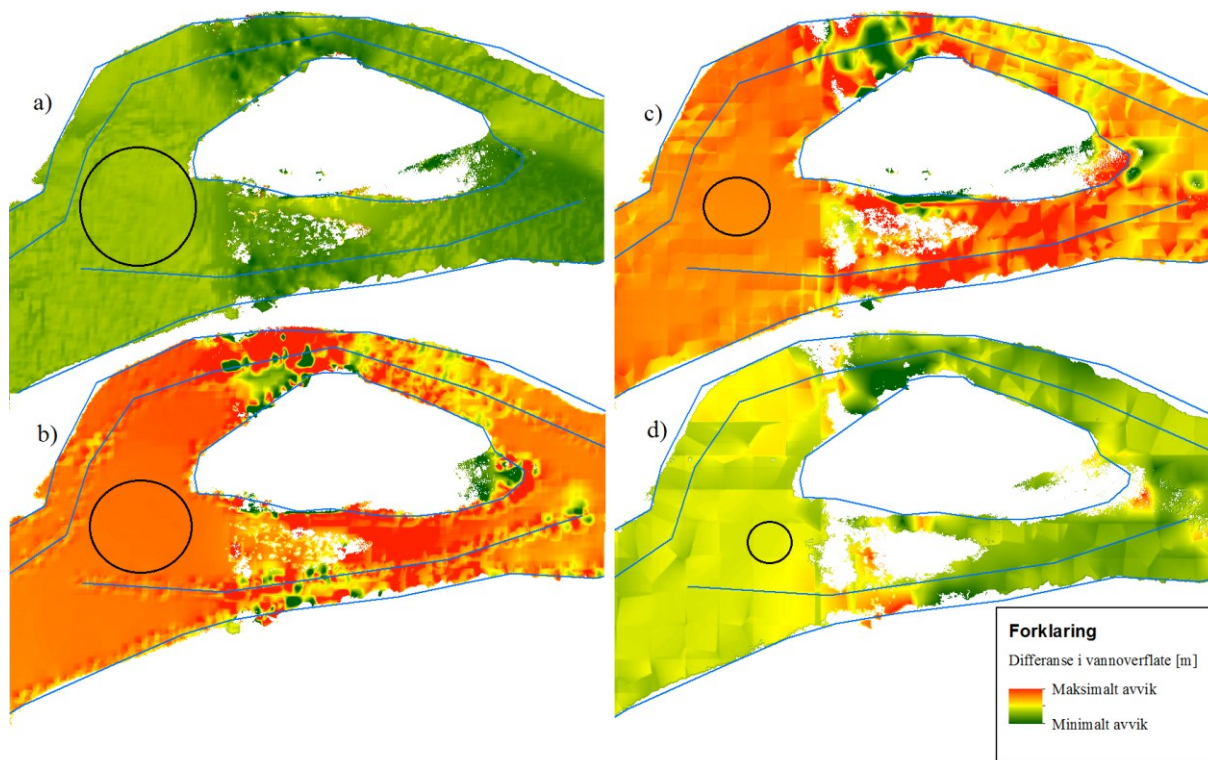


### 4.3.2 Bruddlinje

I figur 28, figur 29 og tabell 15 er følsomhetsanalysen for bruddlinjer oppsummert. Differansene i vannoverflate er beregnet mellom simuleringene med og uten bruddlinjer. Den første figuren viser at gjennomsnittlig avvik mellom beregningene med og uten bruddlinjer ligger på millimeternivå for alle gittercellestørrelsene utenom for 1,2 m. Det gjennomsnittlige avviket virker konstant for økende cellestørrelser, mens standardavviket øker med endret cellestørrelser. I figur med kartutsnitt fra Tokkeåi vises differansene i vannoverflaten for de ulike cellestørrelsene, samt hvordan cellestrukturen påvirkes av bruddlinjene.



Figur 28: Differanser i vannoverflate mellom simuleringer med og uten bruddlinjer.



Figur 29: Kartutsnitt fra Tokkeåi som viser vannoverflatedifferansene beregnet mellom simuleringsresultatene med og uten bruddlinjer, hvor mørk rød og grønn betyr stor positiv og negativ differanse. Bokstavnummereringen henviser til gittercellestørrelsene: a) 1,2 m, b) 2 m, c) 5 m og d) 10 m. Fargeskalaene er ulike og bestemt av maksimale og minimale avvik for de ulike gittercellestørrelsene i tabell 15. De lyseblå linjene representerer bruddlinjene og de svarte ringene skal illustrere områder hvor cellestrukturen er ortogonal og firkantet, som vil si uten påvirkning av bruddlinjer.

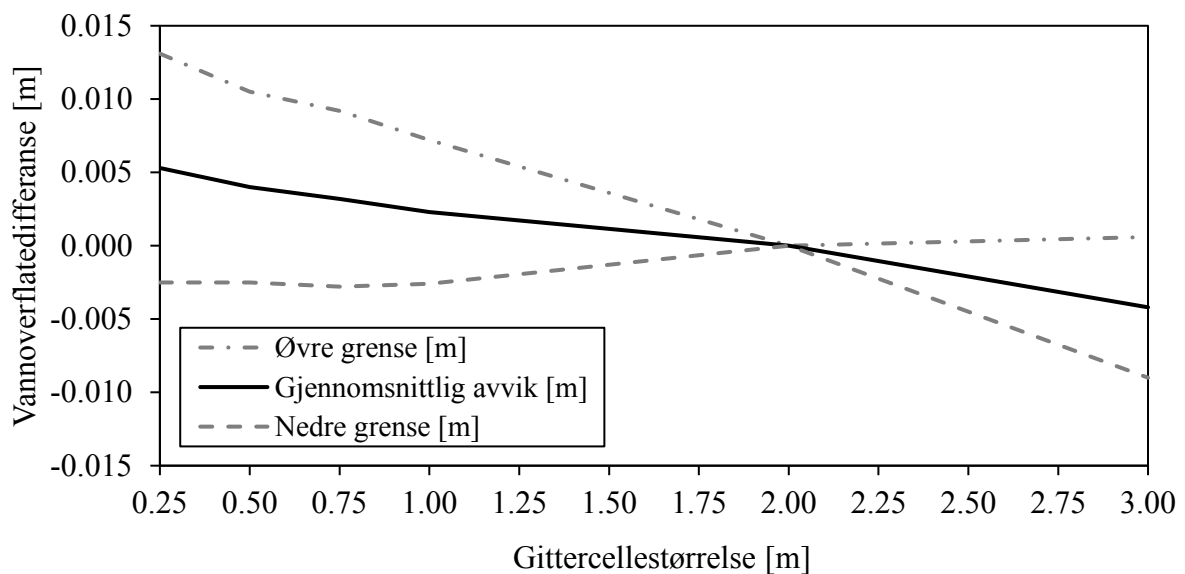
### 4.3.3 Gittercellestørrelse

Resultatene fra følsomhetsanalysene av gittercellestørrelser er skilt for de to områdene som ble benyttet (lite og stort område), hvor figur 30, figur 31 og tabell 16 viser resultatene fra det lille området, mens figur 32, figur 33 og tabell 17 viser for det store. Vannoverflatedifferansene for de ulike cellestørrelsene er beregnet som differansen fra simuleringen med 2 m gittercellestørrelse. For det lille området ligger det gjennomsnittlige avviket i området  $\pm 5$  mm, mens standardavviket (øvre/nedre grense) varierer noe mer opp mot centimeternivå. For det store området ligger det gjennomsnittlige avviket for cellestørrelser i området 1,2-5 m på millimeternivå, hvor øvre og nedre grenser blir ganske store (centimeternivå) ved økende cellestørrelser. Vannoverflatedifferansen beregnet mellom simuleringen for cellestørrelse på 2

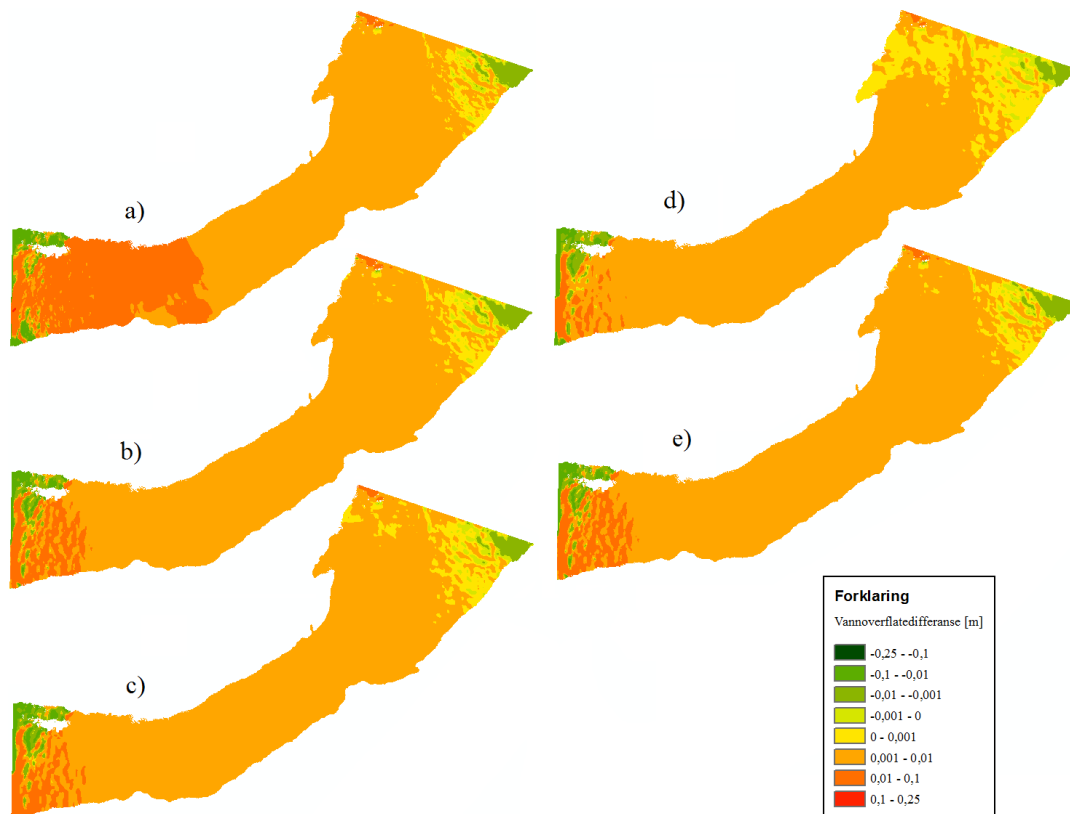
og 10 m gir gjennomsnittlige- og standardavvik på centimeternivå, som tydelig skiller seg fra de andre celledimensjonene beregnet.

Kartutklippene er tatt med for å sammenligne den stedlige variasjonen i vannoverflatedifferanse for de ulike gittercellestørelsene. For det lille området er det spesielt sammenligning mellom 2 og 0,25 m som skiller seg ut, der den mørkeoransje sonen strekker seg mye lenger ned enn for de andre celledimensjonene. For det store området vil resultat for 1,2 m ha motsatt fargeskala av de to andre celledimensjonene, da differansene er beregnet slik at resultatene for celledimensjonene er trukket fra resultatene fra 2 m.

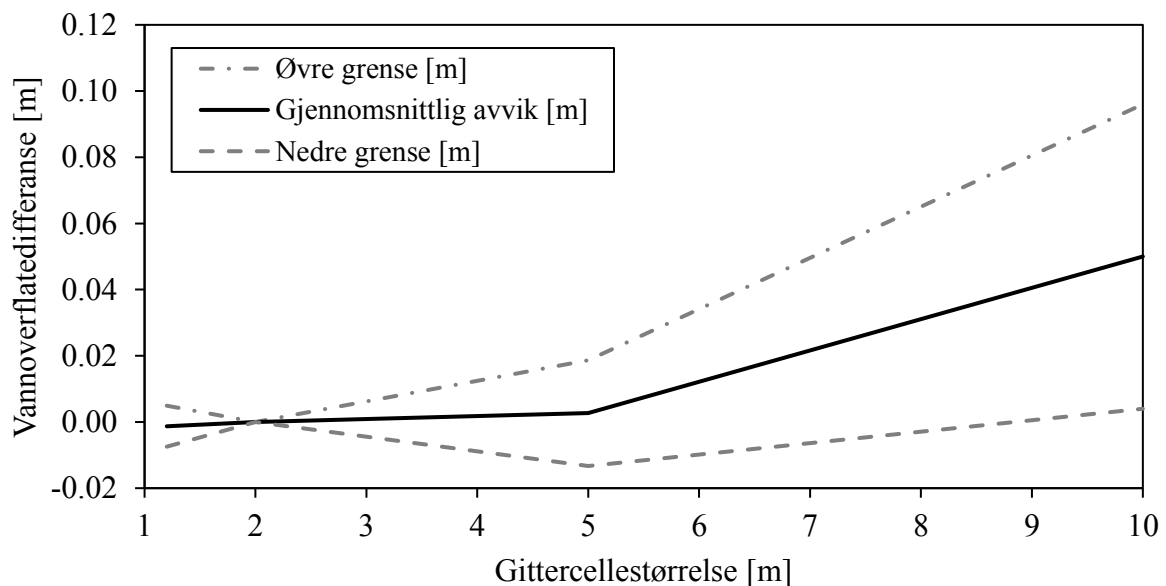
Tidsmessig viser resultatene i tabellene en klar sammenheng mellom celledimensjon og simuleringstid, hvor en reduksjon i celledimensjon fører til økt beregningstid. For noen av beregningene var forholdstallet mellom antall celler og SW/SI veldig likt, men det var ingen klar trend.



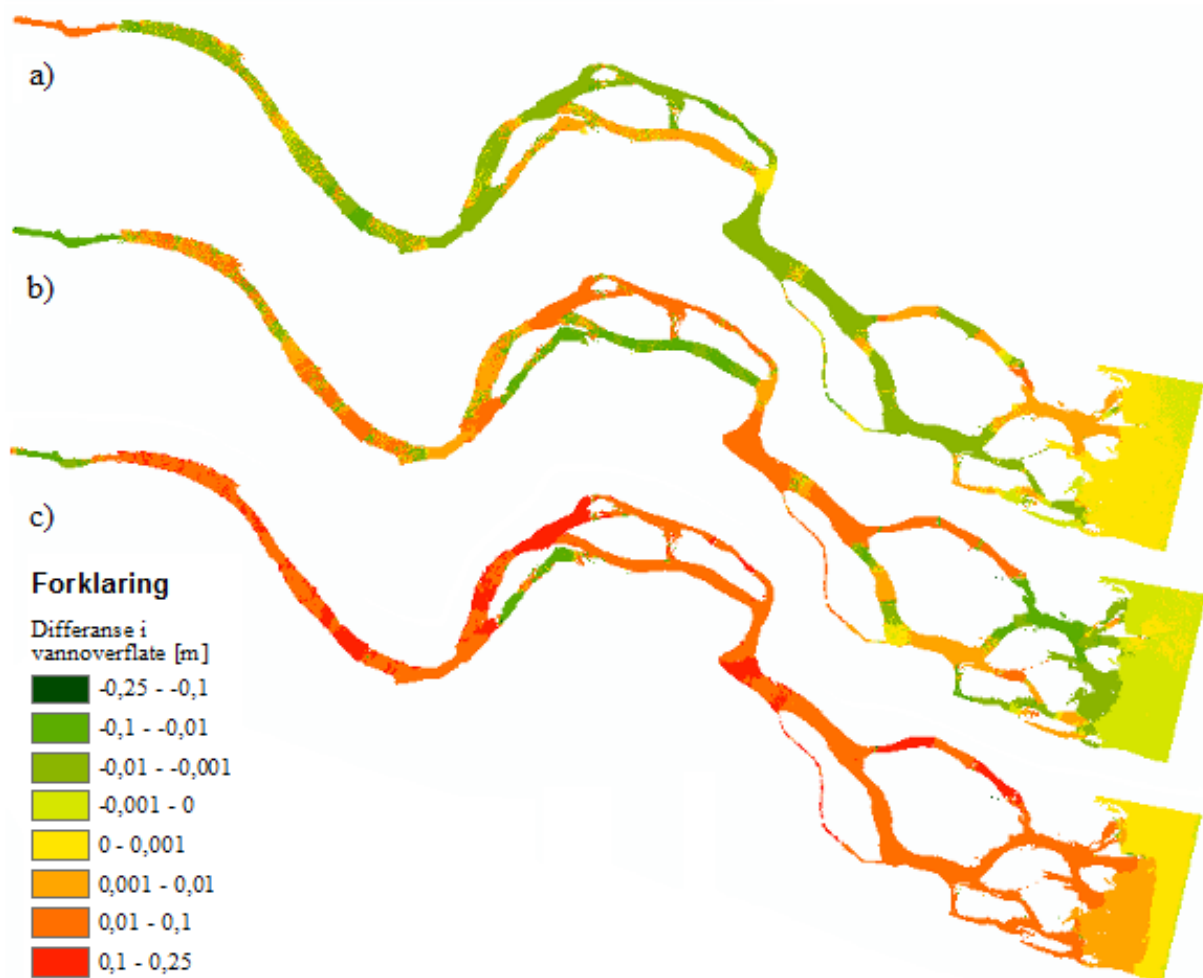
Figur 30: Følsomhetsanalyse som viser differanser mellom vannoverflatene beregnet for ulike gittercellestørrelser for det *lille* området.



Figur 31: Kartutklippene viser differanse beregnet i vannoverflaten for følsomhetsanalyse av gittercellestørrelser for det *lille* området. Her representerer de ulike beregningene ved gittercellestørrelser á: a) 0,25 m, b) 0,5 m, c) 0,75 m, d) 1 m og e) 3 m, hvor resultatene fra cellestørrelse på 2 m er brukt som referanse.



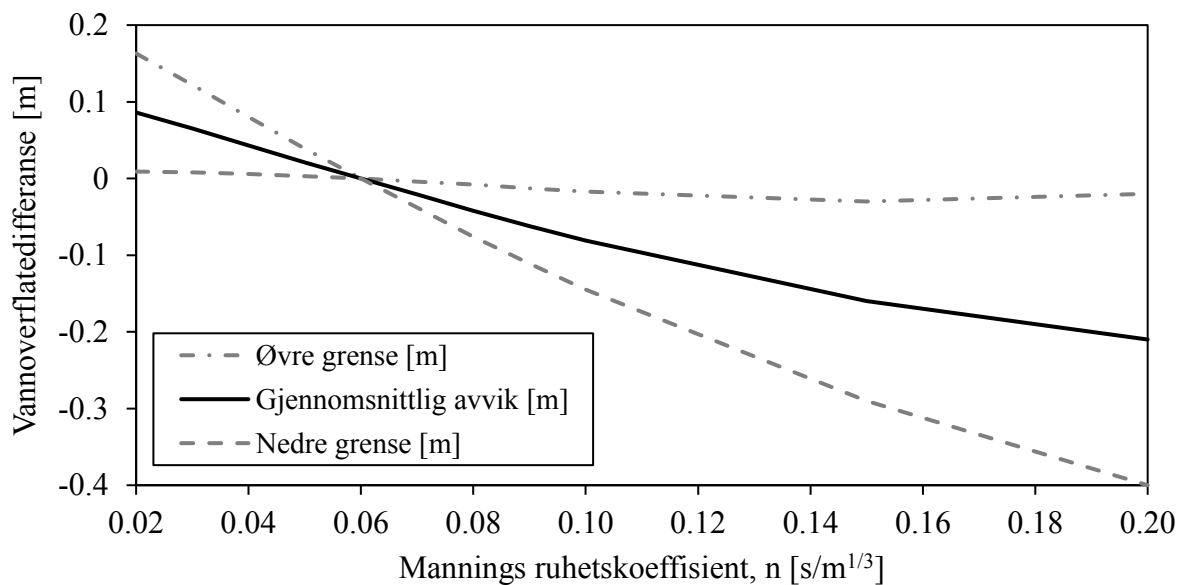
Figur 32: Følsomhetsanalyse som viser differanser mellom vannoverflatene beregnet for ulike gittercellestørrelser for det *store* området.



Figur 33: Kartutklippene viser differanse beregnet i vannoverflaten for følsomhetsanalyse av gittercellestørrelser for det *store* området. Her representerer de ulike beregningene ved gittercellestørrelser á: a) 1,2 m, b) 5 m og c) 10 m, hvor beregning ved 2 m benyttet som referanse.

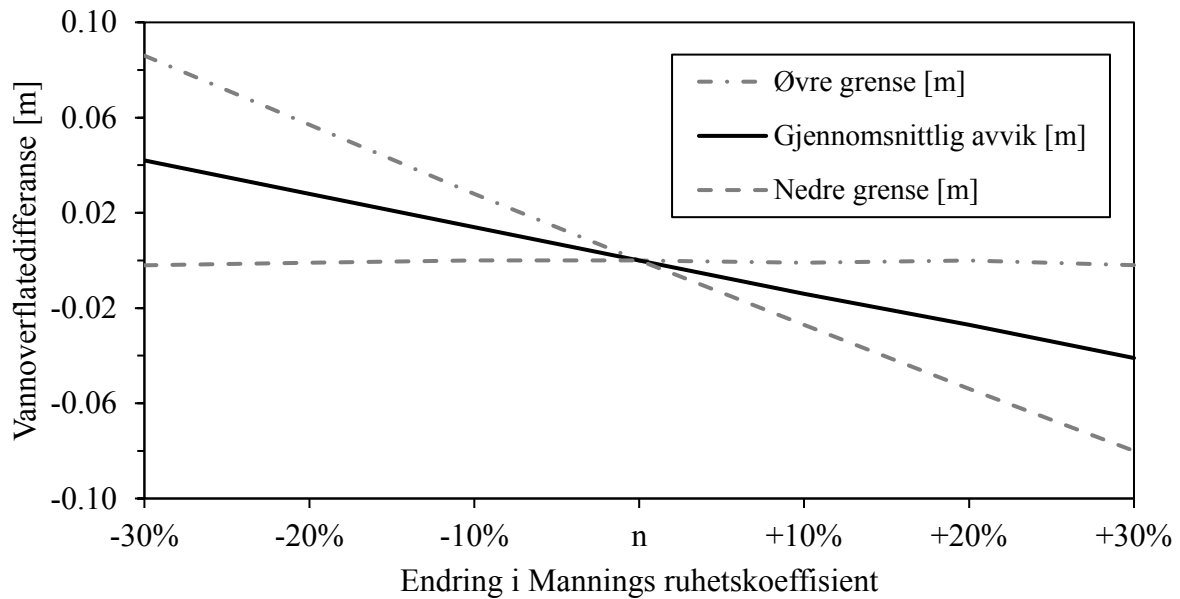
#### 4.3.4 Mannings ruhetskoeffisient

Resultatene fra parametertest av Mannings ruhetskoeffisient, som ble gjort før kalibrert modell var ferdig, er gitt i figur 34, tabell 18 og tabell 19. Resultatene av vannoverflatedifferansene, hvor simulering med ruhetskoeffisient lik  $0,06 \text{ s/m}^{1/3}$  er benyttet som referanseverdi, viser at endring i ruhetsverdiene fører til vannstandsendringer på desimeternivå, både for de gjennomsnittlige- og standardavvikene. Endring i ruhetskoeffisient påvirket lite i forholdet mellom simuleringstid og simuleringsintervall i modellen, som hadde et forhold på 3. Altså tok det tre ganger så lang tid å beregne tiden, eller et intervall, i modellen.



Figur 34: Differansene i simulert vannoverflate ved endring i Mannings ruhetskoeffisient, hvor beregninger ved  $n = 0,6 \text{ s/m}^{1/3}$  er brukt som referanse.

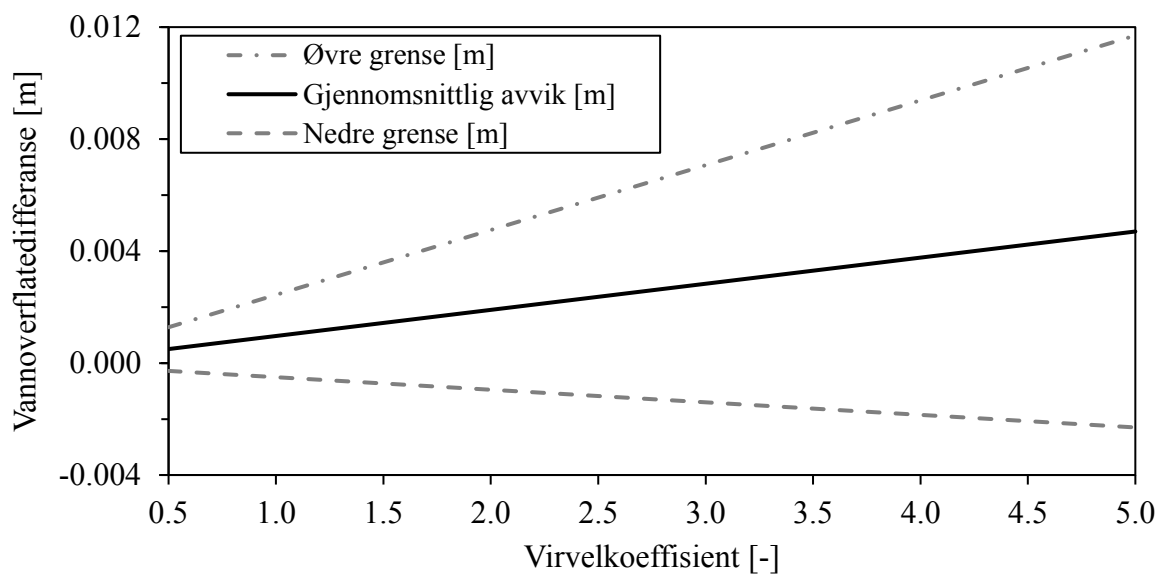
Resultatene fra følsomhetsanalysen av Mannings ruhetskoeffisient, altså etter kalibrering av modellen ved vannføring lik  $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , er vist i figur 35 og tabell 20. Forholdet mellom gjennomsnittlige- og standardavviket virker å være relativt konstant. Det vil si at standardavviket vil øke med samme verdi som det gjennomsnittlige avviket, mens fortegn for det gjennomsnittlige avviket vil variere avhenge av økning/reduksjon av Mannings ruhetskoeffisient. Avvikene ved endring i Mannings ruhetskoeffisient opp til  $\pm 30 \%$  viser at det generelle avviket ligger på centimeternivå, men opp mot desimeternivå.



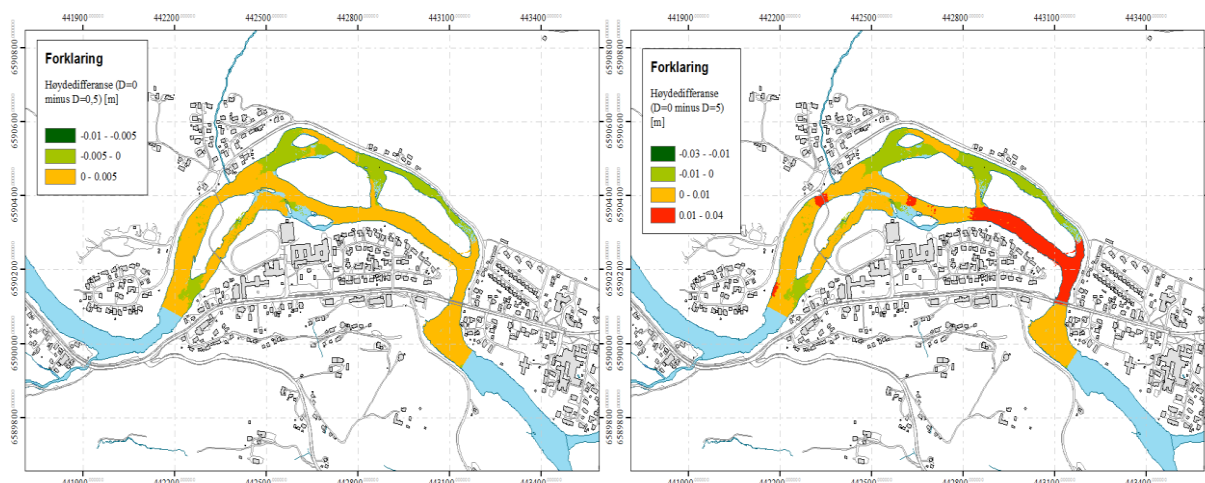
Figur 35: Differanser i simulerte vannoverflater som følge av en prosentvis endring av alle Mannings ruhekskoeffisientene, hvor kalibrerte ruheksverdier er benyttet som referanse.

#### 4.3.5 Turbulens – virvelkoeffisient

Parametertesten av virvelkoeffisientene, som styrer turbulensleddet i SW-ligningene, er oppsummert i figur 36, figur 37 og tabell 21. Kartene viser hvordan vannoverflatedifferansen for de to ulike virvelkoeffisientene varierer over ulike deler av elven. Nedre del av området (til høyre i kartutsnittene) er den delen med største endring ved høy virvelkoeffisient. Det gjennomsnittlige avviket og standardavvik øker med en faktor ti fra beregningene med virvelkoeffisient 0,5 til 5, hvor avvikene ligger på millimeternivå.



Figur 36: Følsomhet av beregnet vannoverflate ved endring av virvelkoeffisienten.

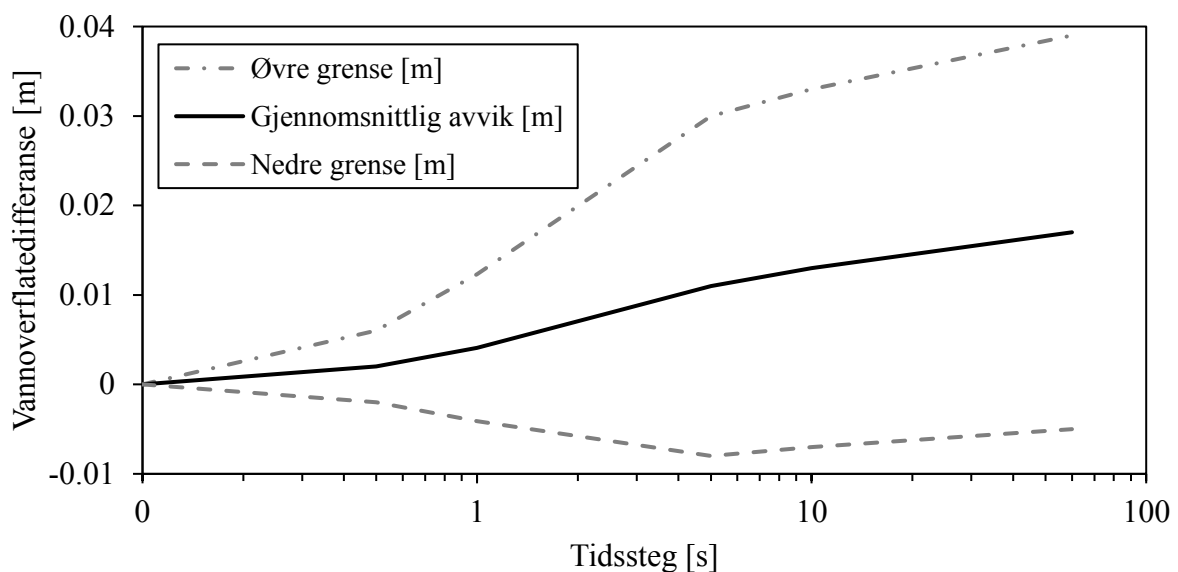


Figur 37: Kart som viser differansene mellom simulert vannoverflate ved virvelkoeffisientene  $D = 0$  og  $D = 0,5$  (til venstre) og  $D = 0$  og  $D = 5$  (til høyre). Fargene viser differanse, hvor rød og mørkegrønn representere yttergrensen ved stor positiv og negativ differanse. Legg merke til at fargekodene har ulike grenseverdier for de to kartene.



### 4.3.6 Tidssteg

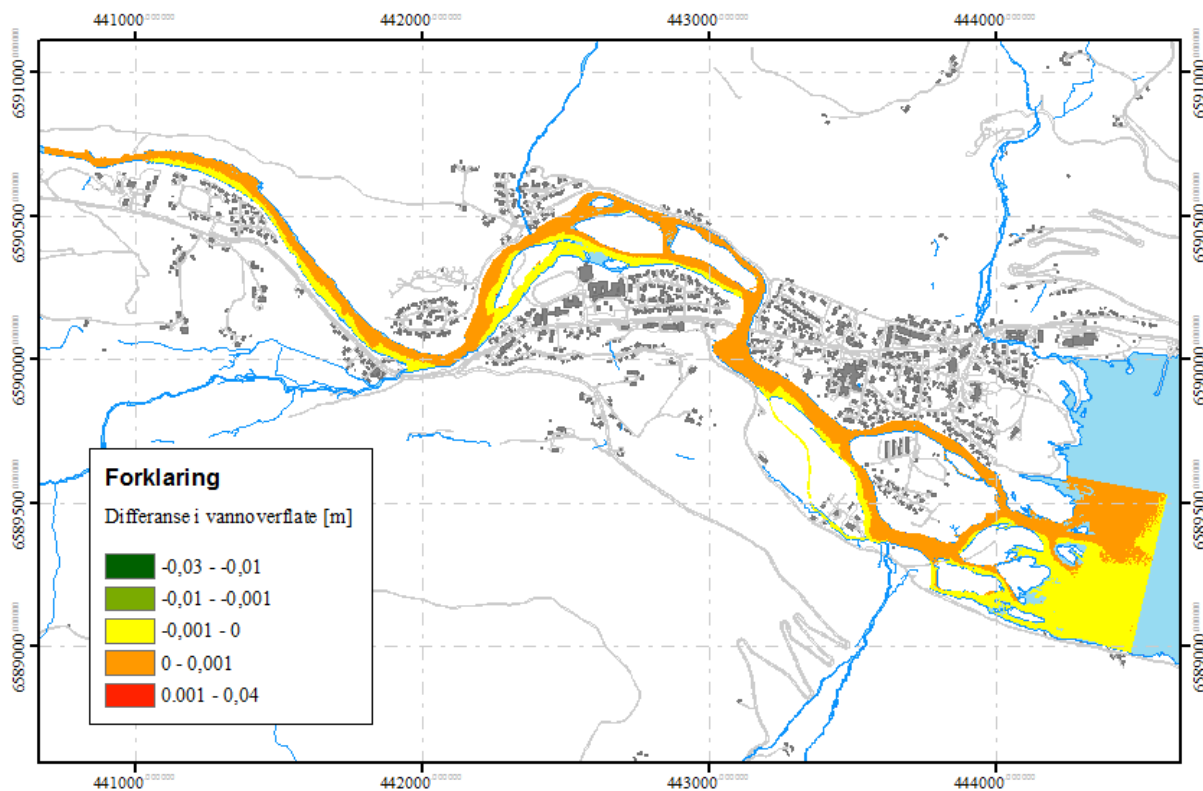
Resultatet fra parameter testen for tidssteget er vist i figur 38 og tabell 22. Det ble tatt utgangspunkt i simuleringsresultatene for tidssteg lik 0,1 s i differanseberegningene. I tabellen er Courant-kriteriet for de ulike tidsstegene forsøkt beregnet, som viser at for tidssteg 5 s og lengre er maksimalgrensen for stabilitet på 3 overskredet. Det kommer også fram av økning i antall konvergensproblemer ved lange tidssteg. Under tidssteg på 1 s vil differansen i vannoverflate ligge på millimeternivå, mens for verdier over vil den øke til centimeternivå.



Figur 38: Resultat fra parameter test av tidssteget som viser hvordan avvik i vannoverflaten ved bruk av ulike tidssteg i simuleringene. Legg merke til at x-aksen er logaritmisk.

### 4.3.7 Corioliskraft

Resultatet fra simuleringene som ble gjort med og uten Coriolisleddet i SW-ligningene er vist under i figur 39. Påvirkningen av Corioliskraften kommer tydelig fram av figuren ved at vannstanden øker (gul farget) på sørsiden og synker (oransjefarget) på nordsiden i elven. Differansene i vannoverflate mellom simulering uten og med Corioliskraft viser at påvirkningene av Corioliskraften ligger i området -0,001 til 0,001 meter, altså en differanse på  $\pm 1$  mm. Gjennomsnittlige avvik var  $-7,5 \times 10^{-5}$  m, standardavvik på  $1,3 \times 10^{-4}$  m og største og minste avvik på henholdsvis 3,6 og -2,5 cm.



Figur 39: Resultatkart som viser påvirkningen av Corioliskraften i Tokkeåi, hvor verdiene viser differanse i vannoverflate mellom simulering beregnet uten og med Coriolisleddet i SW-ligningene.

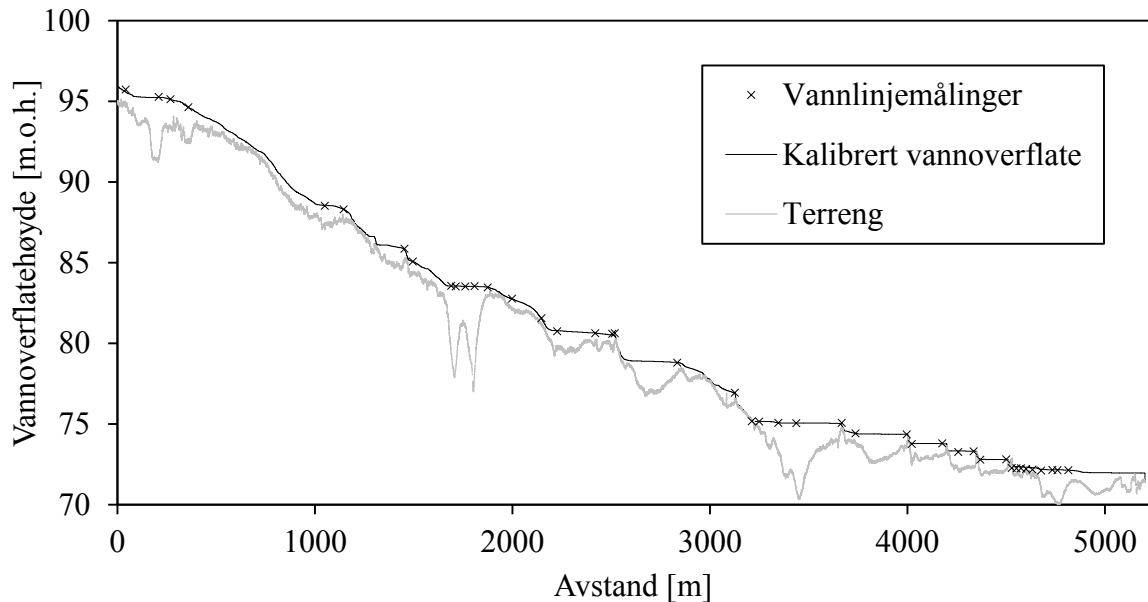
#### 4.3.1 Theta

Simuleringene gjort ved de ulike Theta-verdiene beregnet samme vannoverflate. Det vil si at for den simuleringen (Theta = 0,6) som var minst lik simulering ved Theta lik 1,0, så var de maksimale og minimale avvikene for vannoverflaten  $2,3 \times 10^{-5}$  og  $-1,2 \times 10^{-4}$ . Tidsmessig ble testene simulert over et intervall på tre timer, hvor alle brukte rundt ni timer per simulering. Dermed er påvirkningen av parameteren Theta tilnærmet neglisjerbar for gjeldende simuleringer som er gjort.

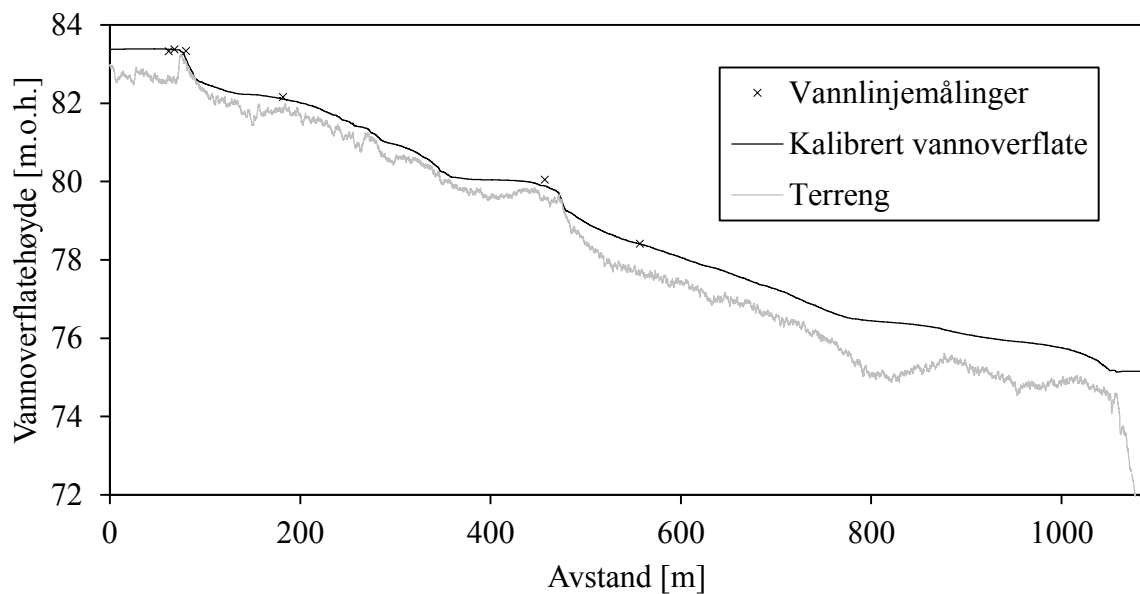
#### 4.4 Kalibrert modell

I figur 40 og figur 41 er lengdeprofiler av simulert vannstand ved kalibrering for vannføring  $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$  plottet mot målte vannlinjer og tilsvarende terreng. Posisjonene til lengdeprofilene som er benyttet til å sammenligne målte og simulerte verdier er vist i figur 17. Resultatet av kalibrering av den hydrauliske modellen ved vannføring  $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$  er vist i tabell 7, hvor målte og simulerte høydeverdier er sammenlignet ved å beregne differanser ved å benytte de målte

høydeverdiene som referanse. Med en lavt gjennomsnittlig avvik/median og standardavviket på rundt 5 cm vil det si at oppnådd kalibrering av den hydrauliske modellen for vannføring 17,4 m<sup>3</sup>/s er god, med tanke på usikkerheten som allerede ligger i målte feltverdier og de naturlige vannoverflatefluktusjonene.



Figur 40: Lengdeprofil av hele Tokkeåi, etter figur 17, som viser kalibrert vannoverflate ved vannføring 17,4 m<sup>3</sup>/s mot målte vannlinjer, samt terrenghøyder.

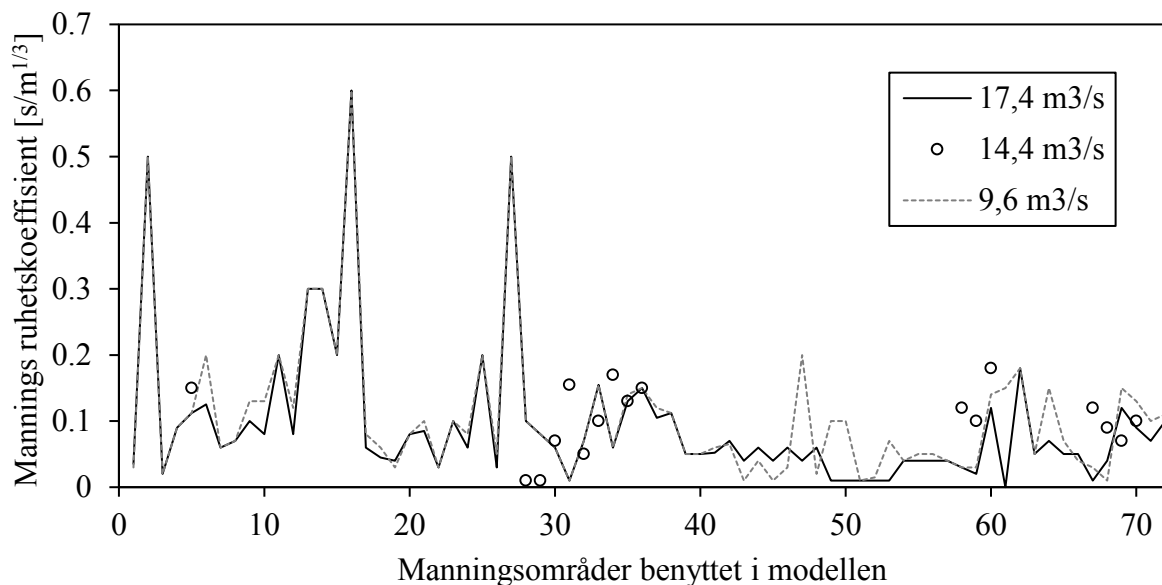


Figur 41: Lengdeprofil av høyre sideløp i Tokkeåi, etter figur 17, som viser kalibrert vannoverflate ved vannføring 17,4 m<sup>3</sup>/s mot målte vannlinjer, samt terrenghøyder.

Tabell 7: Viser resultat av differansene av målte z-verdier i felt, som ble benyttet til kalibrering av modell ved vannføring 17,4 m<sup>3</sup>/s, mot simulerte z-verdier.

Gjennomsnittlig avvik [m]	Median [m]	Standardavvik [m]	Maksimalt avvik [m]	Minimalt avvik [m]
0,00080	0,0	0,047	0,14	-0,091

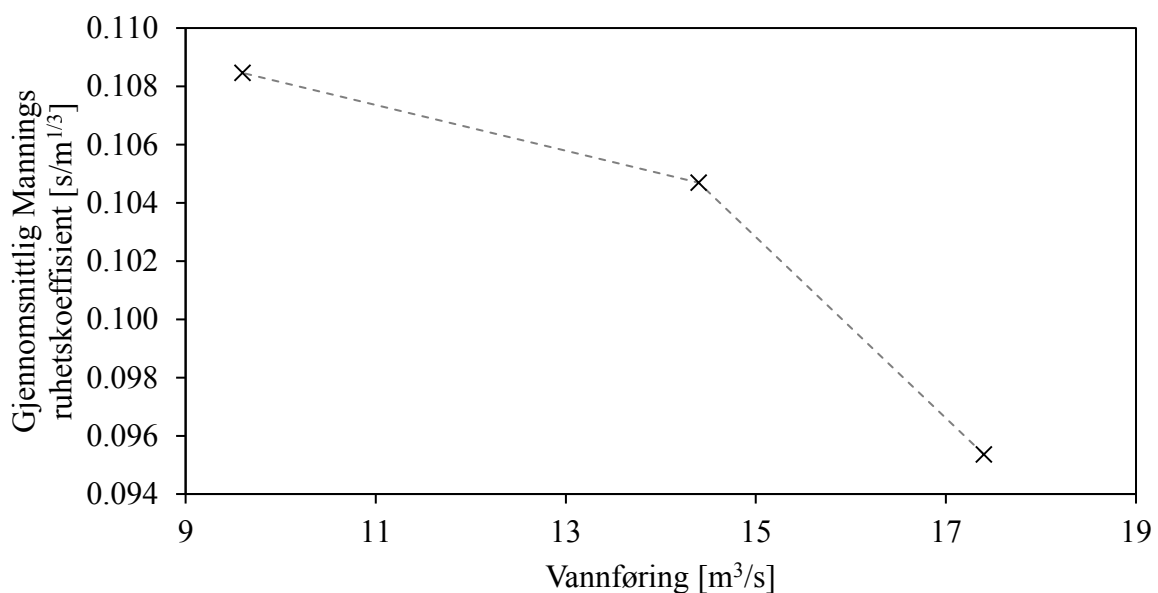
Den hydrauliske modellen ble kalibrert for hele Tokkeåi for vannføring på 9,6 og 17,4 m<sup>3</sup>/s, samt for øvre del ved 14,4 m<sup>3</sup>/s. Hvilken Mannings ruhekskoeffisient de 71 ulike Manningsområdene (17 stykk for 14,4 m<sup>3</sup>/s) ble tilegnet ved kalibrering for de ulike vannføringene er presentert i figur 42. Områder som var problematiske å kalibrere korrekt er gjengitt i Vedlegg H, som viser at det var flere områder som gikk igjen for de kalibrering ved vannføring 9,6 og 17,4 m<sup>3</sup>/s.



Figur 42: Kalibrerte Mannings ruhekskoeffisienter ved ulike vannføringene for ulike Manningsområder benyttet i HEC-RAS-modellen. Datagrunnlaget for grafene finnes i tabell 24 i Vedlegg G.

#### 4.4.1 Vurdering av forhold mellom Mannings ruhetskoeffisient og vannføring

Gjennomsnittlig Mannings ruhetskoeffisient for de ulike kalibrerte vannføringene er plottet mot kalibrert vannføring i figur 43. Figuren viser at en økning i vannføring fører til en reduksjon i gjennomsnittlig Mannings ruhetskoeffisient, og vice versa. I tabell 8 er det lineære stigningstallet mellom endring i gjennomsnittlig Mannings ruhetskoeffisient og vannføring for kalibreringene ved vannføringene 9,6, 14,4 og 17,4 m<sup>3</sup>/s. Stigningstallene gjelder for intervallene 9,6 - 14,4 m<sup>3</sup>/s og 14,4 - 17,4 m<sup>3</sup>/s, hvor laveste vannføring og tilhørende Mannings ruhetskoeffisient er benyttet som referanse. De negative stigningstallene forteller med andre ord det samme som figuren, at økt vannføring fører til lavere ruhetsverdi.



Figur 43: Forhold mellom gjennomsnittlig Mannings ruhetskoeffisient og vannføring, hvor den gjennomsnittlige ruhetsverdien for kalibrerte vannføringer er plottet mot vannføringen.

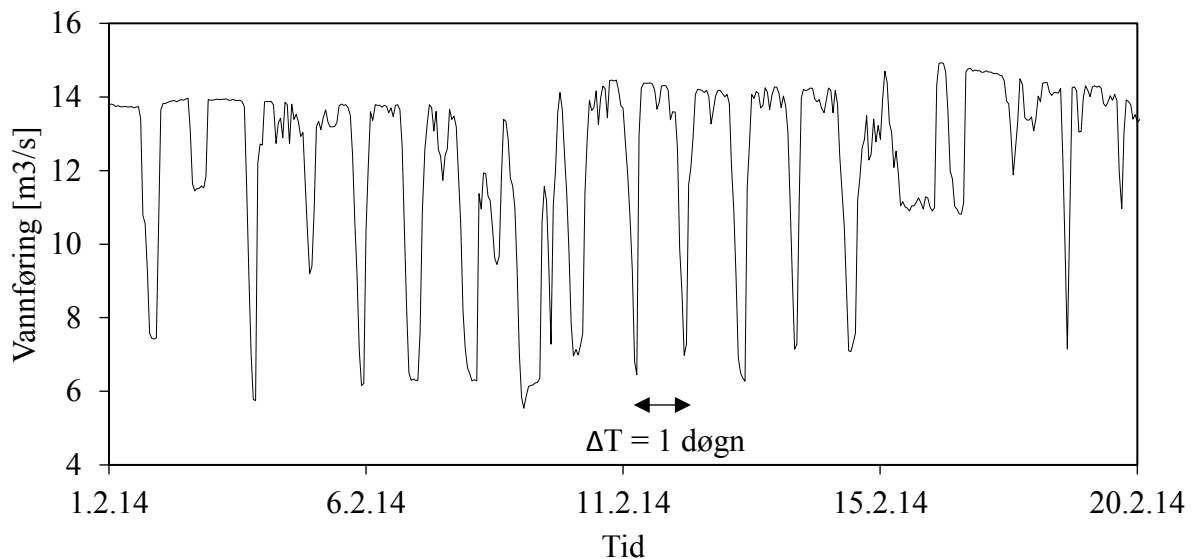
Tabell 8: Gjennomsnittlige Mannings ruhetskoeffisienter beregnet ved kalibrering av de ulike vannføringene, samt det lineære stigningstallet mellom endring i gjennomsnittlige ruhetskoeffisient og vannføring.

Vannføring, Q [m <sup>3</sup> /s]	Gjennomsnittlig Mannings	
	ruhetskoeffisient, $\bar{n}$ [s/m <sup>1/3</sup> ]	$\Delta\bar{n}/\Delta Q$ [s <sup>2</sup> /m <sup>10/3</sup> ]
17,4	0,095	-
14,4	0,10	-0,0031
9,6	0,11	-0,00079

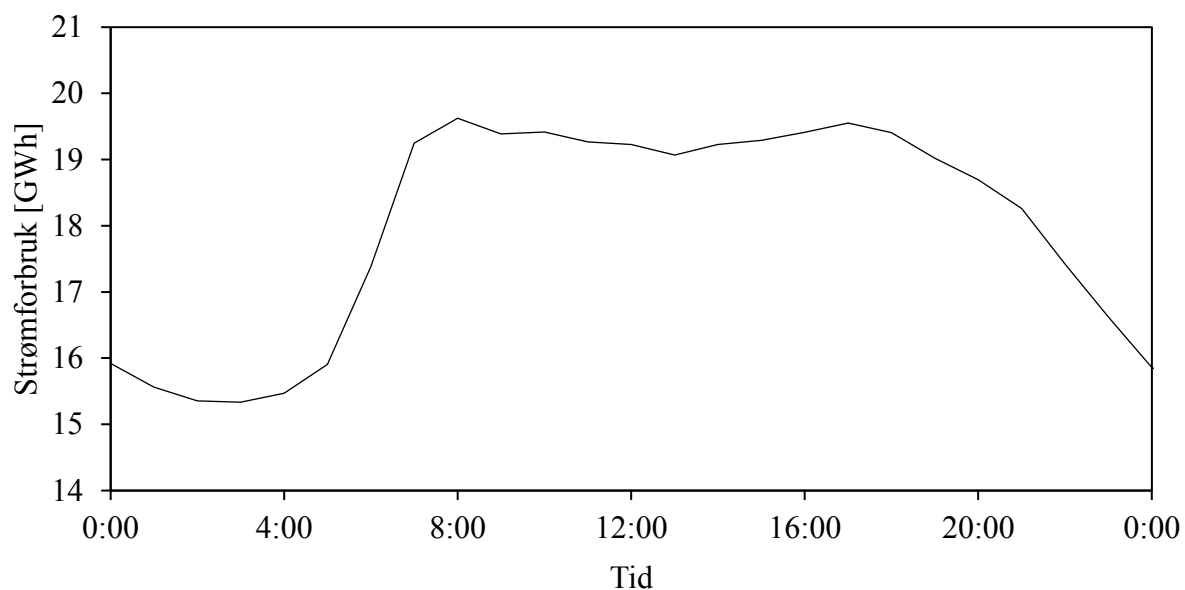
## 4.5 Effektkjøring i Tokkeåi

### 4.5.1 Identifiserte effektkjøringsperioder

Etter manuell inspeksjonen av vannføringsdata ser det ut til at enkelte vinterperioder (omtrent desember til mars) vil ha klar tendens til døgnregulert effektkjøring. Dette er forsøkt å illustrere i figur 44, som viser bunnpunkter for omtrent hvert døgn, noe som tyder på at kraftverket startes og stoppes på døgnbasis. Lavest vannføring, altså lav/ingen produksjon skjer på natten en gang mellom kl. tre og sju. Like etter dette begynner vannføringen (produksjonen) å øke, og når høyeste punkt på morgenen til formiddag. På kvelden, rundt midnatt, faller produksjonen ned igjen. Mønsteret på effektkjøringen ligner i stor grad på når på døgnet det er etterspørsel etter strøm i markedet, som kan sees ved å sammenligne med strømforbruk målt over døgnet (hentet fra Statnett sin database) i figur 45.



Figur 44: Døgnregulert effektkjøringsperiode 1.-20. februar 2014 hvor reduksjonen i vannføring skjer rundt midnatt.



Figur 45: Strømforbruket for hele Norge over døgnet 4.-5. februar 2014 hentet fra databasen til Statnett. Hvor «Forbruk er beregnet som produksjon pluss kraftimport, eventuelt minus eksport, på Statnetts forbindelser til Norden og Europa.» (Statnett, 2017).

#### 4.5.2 Vinter- og sommerscenario

Resultat for vurdering av diverse påvirkningsfaktorer for effektkjøring ved de to utplukkete vinter- og sommerscenarioene er vist under i tabell 9, hvor beregningsgrunnlaget finnes i tabell 27 og tabell 28 (for henholdsvis vinter og sommer). Simulering av vinterscenarioet resulterte i påvirkningsfaktorer i klasse stor og svært stor, som tilsier at hendelsen vil være en meget kritisk effektkjøringshendelse. For sommerscenarioet ble de tre påvirkningsfaktorene vurdert fra liten til stor, slik at en hendelsen vil være betraktelig mindre kritisk. Lite tørrlagt gyteareal gjør at sommerscenarioet vurdert vil være i mindre grad belastende for miljøet i elven.

Tabell 9: Resultat fra simuleringene som viser senkningshastighet, tørrlagt areal og amplitude for de to utplukkede vinter- og sommerscenarioene for effektkjøringshendelse.

		<b>Gyteområde</b>				
	<b>Område</b>	<b>Elv</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Samlet</b>
<b>Vinter</b>	P1: Senkningshastighet [cm/t]	-	37 (Svært stort)	16 (Stor)	12 (Moderat)	22 (Svært stor)
	P2: Tørrlagt areal [%]	24 (Svært stor)	17 (Stor)	13 (Stor)	3,3 (Liten)	11 (Moderat)
	P3: Amplitude [-]	8,4 (Svært stor)	8,4 (Svært stor)	7,7 (Svært stor)	8,2 (Svært stor)	8,1 (Svært stor)
<b>Sommer</b>	P1: Senkningshastighet [cm/t]	-	13 (Stor)	6,9 (Moderat)	6,7 (Moderat)	8,9 (Moderat)
	P2: Tørrlagt areal [%]	8,9 (Moderat)	4,0 (Liten)	3,3 (Liten)	1,0 (Liten)	2,9 (Liten)
	P3: Amplitude [-]	2,3 (Moderat)	2,3 (Moderat)	2,2 (Moderat)	2,2 (Moderat)	2,2 (Moderat)

#### 4.5.3 Effektkjøringsvurdering ved bruk av COSH-Tool

Resultat av effektkjøringsvurderingen er vist i tabell 10. Vurdering, etter hjelpemiddelet benyttet i oppgaven, gjør at effektkjøringspåvirkningen totalt i Tokkeåi havner i klasse moderat, noe som gjelder for samtlige persentilsenarioer. Med andre ord vil ikke effektkjøringene, som er vurdert å være reelle i Tokkeåi ved hjelp av COSH-Tool, være helt uten påvirkning for miljøforhold i elven. Samtidig vil ikke effektkjøringene ha en svært kritisk påvirkning.

En årsak til at påvirkningen av effektkjøringshendelsene ikke er større, kommer av beregningene av andel tørrlagt areal, som er vurdert til liten påvirkning. Situasjonen kunne vært verre hvis et større areal ble tørrlagt ved vannføringsreduksjoner. Siden tørrlagt areal er en faktor som vektlagt høyt ved vurdering av total påvirkning av effektkjøring. Senkningshastighetene, som også blir høyt vektlagt, er også beregnet som ganske beskjedne,



som vurderes som moderate eller små. Slik at vannføringsendringene benyttet i scenarioene vil ikke gi den store påvirkningen.

For å vurdere faktoren fordeling ble det gjort en visuell undersøkelse av vannføringsserien. I forrige kapittel ble det vist en periode på vinteren hvor det var tydelig døgnregulering, noe som ville klassifisert fordelingen som moderat. Men tendensen beskrevet der var ikke tydelig for alle år. Samtidig ble det identifisert effektkjøringshendelser noe sporadisk hvis hele året, og flere år ble vurdert. Dermed ble scenarioene plassert i strengeste klasse, av hensyn til at vurderingene var basert på skjønn.

Vurdering av faktoren tidspunkt for periodene vinter og sommer er basert på når på døgnet det var flest effektkjøringen, mens for den helhetlige vurderingen (kolonne hele) er den mest kritiske tiden det foregår effektkjøring valgt. For samtlige av vurderingene ble det identifisert at det var effektkjøring på dagtid på vinteren, men samtidig at dette ikke var det mest dominerende tidspunktet. Likevel ble strengest vurdering gitt for å være på den konservative siden, da vurderingen er i stor grad skjønnsbasert.

Tabell 10: Resultat fra vurdering av påvirkning av effektkjøring i Tokkeåi, basert på vannføringsdata for ulike persentiler beregnet med COSH-Tool. Vurderingen av effektkjøringspåvirkning er gjort etter hjelpemiddelet i boka «Miljøvirkninger av effektkjøring: Kunnskapsstatus og råd til forvaltning og industri».

Påvirkningsfaktor	Persentiler øvre/nedre [%]											
	90/10		93/7		96/4		99/1					
	Hele	Vinter	Sommer	Hele	Vinter	Sommer	Hele	Vinter	Sommer	Hele	Vinter	Sommer
P1: Senkningshastighet [cm/t]	4,1 (liten)			5,6 (moderat)			6,5 (moderat)			9,8 (moderat)		
P2: Tørrlagt areal [%]	1,4 (liten)			1,8 (liten)			2,4 (liten)			4,9 (liten)		
P3: Størrelse av vannføringssvingningene (amplitude) [-]	1,1 (liten)	1,2 (liten)	1,1 (liten)	1,1 (liten)	1,2 (liten)	1,1 (liten)	1,2 (liten)	1,4 (liten)	1,2 (liten)	1,4 (liten)	1,5 (moderat)	
P4: Frekvens [%]	24 (moderat)	27 (stor)	21 (moderat)	20 (moderat)	26 (stor)	15 (moderat)	18 (moderat)	27 (stor)	11 (moderat)	9 (liten)	12 (moderat)	7 (liten)
P5: Fordeling	Irregulært over hele året (Svært stor)			Irregulært over hele året (Svært stor)			Irregulært over hele året (Svært stor)			Irregulært over hele året (Svært stor)		
P6: Tidspunkt	Dagslys vinter (Svært stor)	Natt	Hele dagen	Dagslys vinter (Svært stor)	Natt	Hele dagen	Dagslys vinter (Svært stor)	Natt	Natt	Dagslys vinter (Svært stor)	Natt	Mest natt
n	Ingen			Ingen			Ingen			Ingen		
Sum påvirkning (for hele)	12			13			13			12		
Klasse (for hele)	Moderat			Moderat			Moderat			Moderat		

#### 4.5.4 «Verste-tilfelle»-scenario

Oppsummering av det vannføringsreduksjonsscenarioet som ble antatt å være det mest kritiske (gi størst påvirkning i vurdering av effektkjøring) er vist under i tabell 11, hvor bakgrunn for beregningene er vist i tabell 33 (Vedlegg L). Senkningshastighetene for gyteområder havner i den høyeste påvirkningsklassen. Tørrlagte gyteareal havner i moderat/liten påvirkning, men i klasse stor for hele elven. Med andre ord vil fisk som ikke oppholder seg i et av de undersøkte gyteområdene ha kort til på å oppsøke gyteområder, men om fisk allerede oppholder seg i gyteområdet vil ikke faren være så stor for stranding.

Tabell 11: Beregnede senkningshastigheter, tørrlagte areal og amplitude ved mest kritiske vannføringsreduksjon fra 18 til 4 m<sup>3</sup>/s, hvor tilhørende påvirkningsklasse er vurdert etter hjelpemiddelet i «Miljøvirkninger av effektkjøring: ...».

Område	Elv	Gyteområde			
		1	2	3	Samlet
P1: Senkningshastighet [cm/t]	-	50 (Svært stor)	23 (Svært stor)	17 (Stor)	30 (Svært stor)
P2: Tørrlagt areal [%]	16 (Stor)	8,6 (Moderat)	6,6 (Moderat)	1,9 (Liten)	5,9 (Moderat)
P3: Amplitude [-]	4,5 (Stor)	4,5 (Stor)	4,2 (Stor)	4,5 (Stor)	4,4 (Stor)

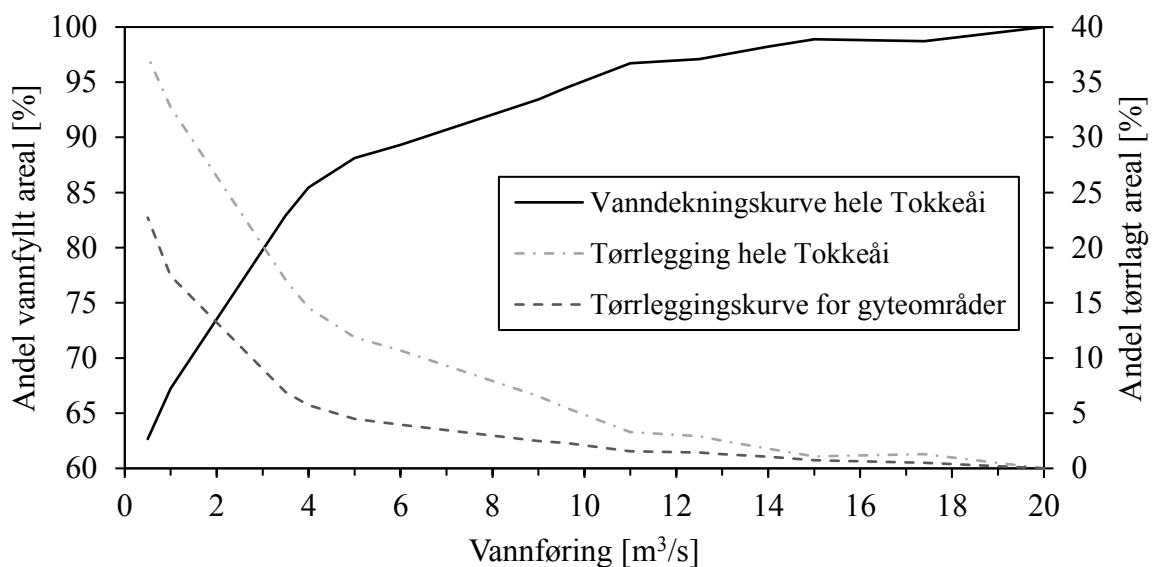
#### 4.6 Forhold mellom vanndekt areal og vannføring

I figur 46 er resultatene fra undersøkelse av forhold mellom vanndekning/tørrelgging og vannføring i Tokkeåi og for gyteområdene vist. De tabulerte verdiene er gitt i tabell 34 (Vedlegg M). Det ser ut til at endringen i vanndekt areal i forhold til vannføring kan deles inn i tre vannføringsintervall, hvor endringen er beregnet som endring i andel vanndekt areal (prosent) per endring i vannføring (m<sup>3</sup>/s). Lav endringen i vanndekning forekommer mellom 11-20 m<sup>3</sup>/s (~0,4 %/m<sup>3</sup>/s), middels endring mellom 4-11 m<sup>3</sup>/s (~1 %/m<sup>3</sup>/s) og veldig stor endring for vannføringer lavere enn 4 m<sup>3</sup>/s (<7 %/m<sup>3</sup>/s).

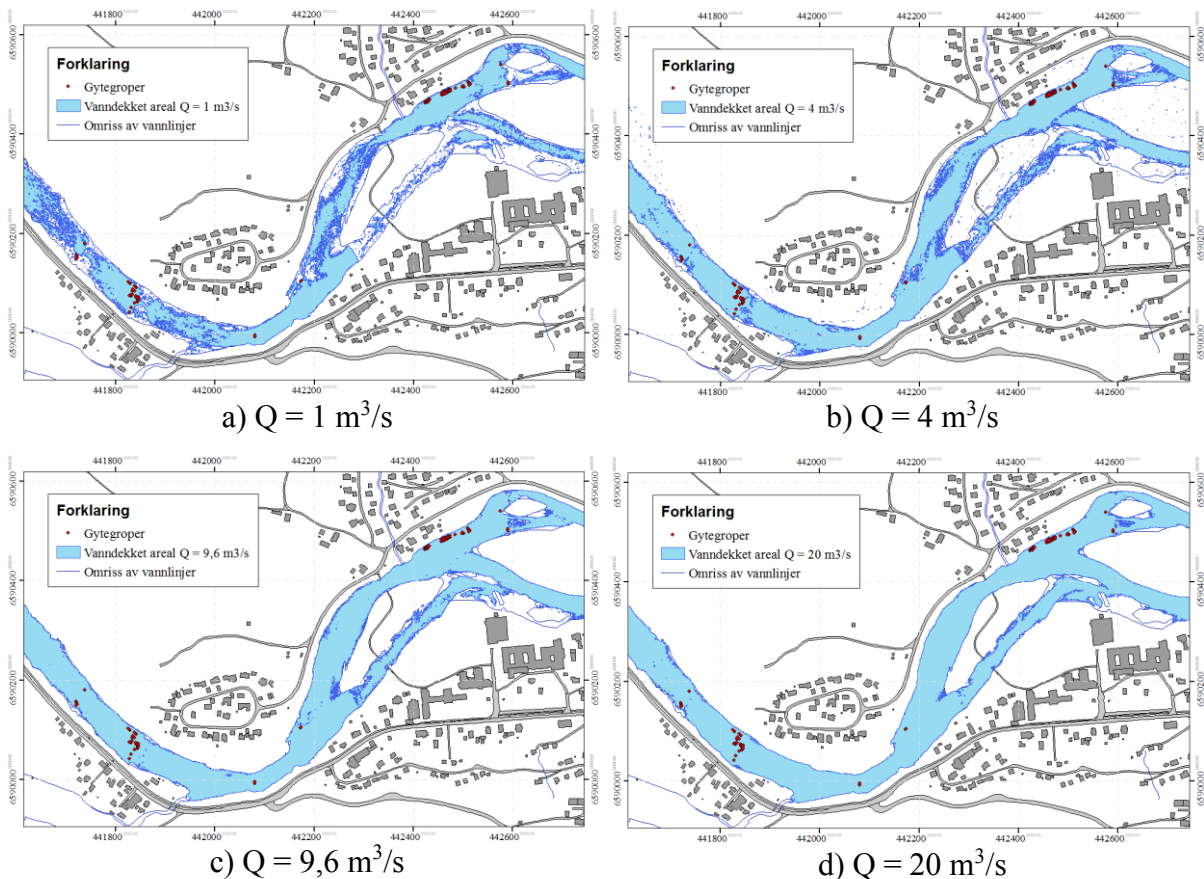
Ut i fra vanndekningskurven for hele Tokkeåi ser det ut til at vanndekt areal ved vannføring lik 0 m<sup>3</sup>/s vil ende på andel rundt 60 %. Det vil si at ca. 60 % av vannet i elven vil være «fanget opp» i lokale groper, basseng eller områder oppstrøms terskler. En forutsetning her er at det har

vært vannføring i elven tidligere. For over tid, uten ny tilførsel av vann, vil fordampningsprosesser redusere vannvolumet i elven.

Tørreleggingskurven for hele Tokkeåi viser egentlig det samme som vanndekningskurven, hvor den ene fokuserer på tørre områder, mens den andre våte. Årsaken til at tørreleggingskurven for hele Tokkeåi ble inkludert var for lettere å sammenligne mot gyteområdene. Hvor tørreleggingskurven for gyteområdene ligger lavere enn for hele Tokkeåi, noe som tyder på at mer vann vil bli liggende igjen i gyteområder ved vannføringsreduksjoner. Dette støttes opp av kartutsnittene av Tokkeåi, i figur 47, som viser hvordan vanndekning endres ved ulike vannføringer.



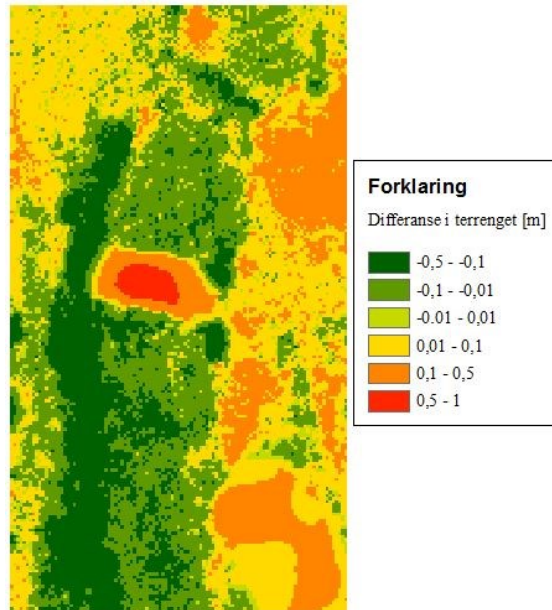
Figur 46: Vanndekning- og tørreleggingskurver for Tokkeåi, hvor vanndekningskurve viser hvor stor andel av elven som er dekt med vann ved redusert vannføring fra middelvannføringen på 20 m<sup>3</sup>/s. Tørreleggingskurvene viser endring i vanndekt areal fra vanndekt areal ved middelvannføring 20 m<sup>3</sup>/s.



Figur 47: Kartutsnitt for midtre del av Tokkeåi som viser vanddekt areal for ulike vannføringer 1-20  $\text{m}^3/\text{s}$  i figur a)-d). Gytegroperne ved område 1 og 2 (se figur 19) er vist med mørkerød sirkel, omriss av vannlinjer er vist med mørkeblå strek og vanddekket areal er vist med lyseblå farge.

## 4.7 Endring i bunnforhold og terreng

Differanse i høyde mellom terrengmodellene, for området rundt terskelen i Hagsjøkanalen, basert på LIDAR-skanningene i 2015 og 2016 er vist i figur 48, mens rastrene som lå til grunn i beregningen er vist i figur 67 (Vedlegg N). En positiv differanse betyr at de nye LIDAR-dataene ligger høyere enn de gamle, og motsatt. På terskelen har terrenget hevet seg fra noen desimeter opp mot en meter på det høyeste. I området rundt er terrenget senket noe, på centimeter- og desimeternivå.



Figur 48: Kartutsnitt som viser differansene beregnet mellom terrenget etter og før flommen i 2015. Dataene før er basert på første LIDAR-skanning, mens etter er basert på nyeste skanning.

Ved å endre LIDAR-data i områdene rundt terskelen, slik at data fra skanningen i 2015 blir satt inn og skiftet ut med data fra 2016-skanningen, har noe vann mulighet til å renne i Hagusjåkanalen. Figur 49 viser hvordan vannstanden (og vannføringen) endret seg fra før og etter utskiftningen av LIDAR-data. Mengden vann som gikk i kanalen var kun 3 l/s, mens i elveløpet gikk det 3 m<sup>3</sup>/s. Altså var vannføringen kun én promille av den totale vannføringen i det elveløpet.

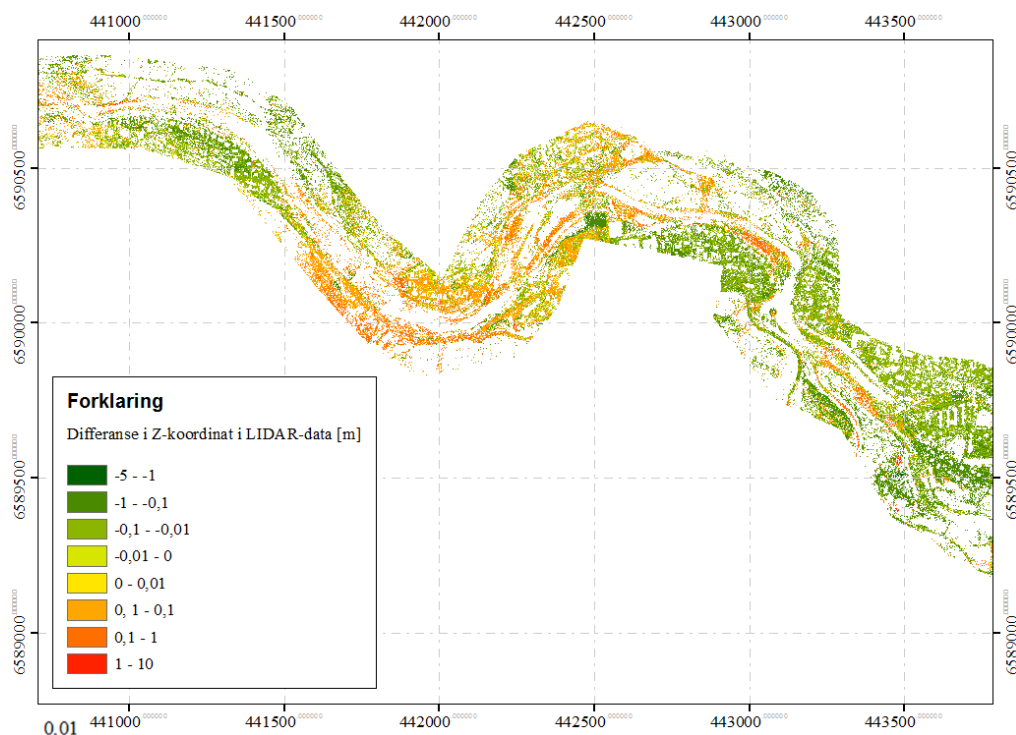


Figur 49: Utklipp av Tokkeåi som viser simulert vannføring lik 17,4 m<sup>3</sup>/s ved Hagusjåkanalen, hvor simulering ved bruk av kun LIDAR-data fra 2016 har ingen vannføring i kanalen (til venstre), mens ved bruk av LIDAR-data fra 2015 i området rundt terskelen sammen med 2016-

data vil noe vann gå i Hagusjåkanalen (til høyre). Blåfargen representerer vannstand, hvor mørkeblå er dype områder og lyseblå er grunne områder.

Endringene i z-koordinat mellom LIDAR-datasettene skannet i 2015 og 2016 for en del av Tokkeåi er vist under i figur 50. Ser at mesteparten av dataene dekker terrenget, altså topografien på siden av elven. Men for elven er det en del hull, hvor data mangler. Årsaken til datamangel kommer av at 2015-skanningen hadde en dårligere dekningsgrad av elven enn 2016-skanningen. For de data som er i elveleiet, ser det ut til at differansen er positiv for øvre del av Tokkeåi, som betyr at bunnen lå høyere i 2015 enn i 2016. Differansene i z-verdi ligger på centimeter- til desimeternivå. For nedre del ser det ut til at forholdene er motsatt, hvor bunnen ligger høyere (centimeternivå) i 2016 enn i 2015.

For terrenget utenom elven ser det ut til at det er generelt en høyere z-verdi som ble målt ved skanning i 2016 enn i 2015. Z-verdiene er da av størrelsesorden centimeter og desimeter. Det er områder (mellom x-koordinatene 441500 og 442500) i nærheten av elven som er preget av lavere terreng i 2016 enn 2015, på centimeter- og desimeternivå.



Figur 50: Kartutsnitt fra sammenligning av LIDAR-skanningene av Tokkeåi fra 2015 og 2016, som viser differanse i høydeverdiene for de to datasettene. Hvitfargen betyr at området ikke har noen målt z-verdi.

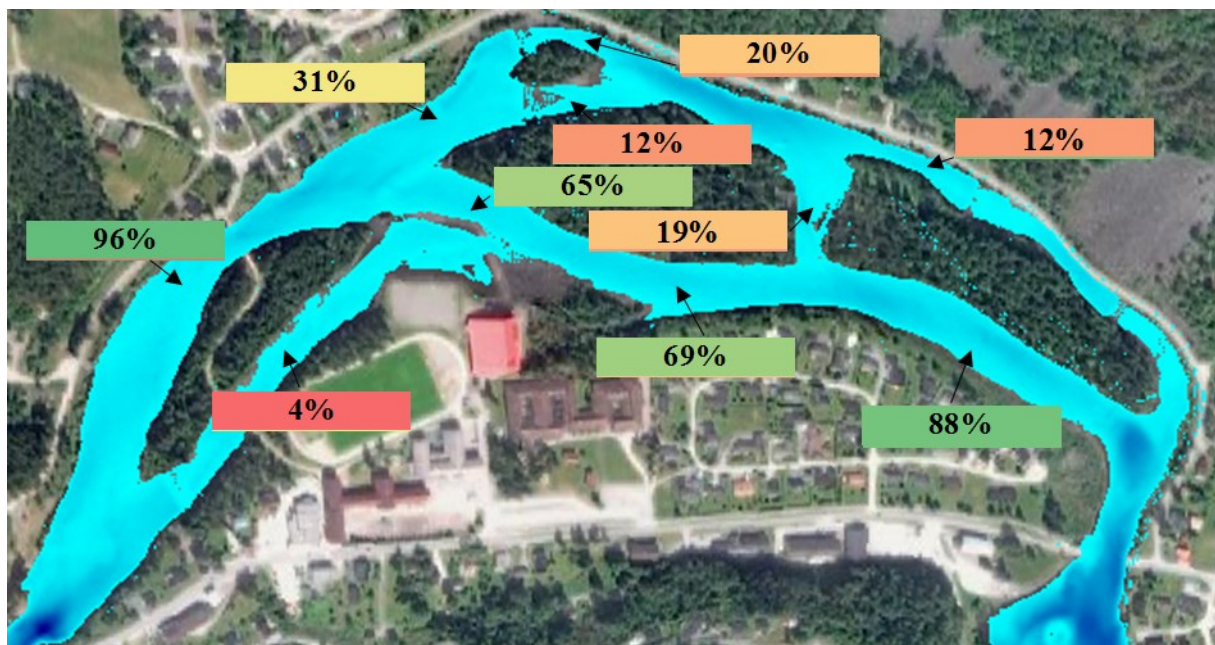
Ved beregning av differanser i z-koordinat mellom LIDAR-skanning i 2015 og 2016 ble det beregnet noe statistikk for hele området (som starter nedstrøms i Bandak, måler ca. 5 km opp i Tokkeåi og videre ca. 5 km av Dalåi). Resultatene er vist under i tabell 12, som viser at differansene ligger på et desimeternivå generelt (basert på gjennomsnittlig avvik og standardavvik), hvor de største avvikene er på flere meter.

Tabell 12: Differanse i z-koordinatene mellom LIDAR-skanningene fra 2015 og 2016.

Gjennomsnittlig avvik	Standardavvik	Maksimalt avvik	Minimalt avvik
[m]	[m]	[m]	[m]
-0,061	0,17	9,1	-5,0

#### 4.8 Andel av vannføringen i ulike elveløp

Vannføring som andel av total vannføring i elven i de ulike løpene er vist i figur 51. Hoveddelen av vannføringen vil oppstrøms gå i nordre løp, for deretter å fortsette i det søndre løpet etter første øy. Blant annet vil vannføringen i gyteområde 2 (figur 19), være omtrent 1/3 av den totale vannføringen.



Figur 51: Kartutsnitt over midtre del av Tokkeåi som viser andel av vannføring i de ulike elveløpene.



## 5 DISKUSJON

---

### 5.1 Konstruering av sidekanal

Grovheten, altså den store avstanden mellom punkter, som gir store overflater i terrengmodellen til den konstruerte sidekanalen vil føre til at bunnforholdene blir jevnere, men samtidig vil endringer i x- og y-retning bli bråere/skarpere. Effekten av denne påvirkningen vil gi økt usikkerhet for modellen, men usikkerheten vil i størst grad ligge i hvordan vannet beveger seg igjennom kanalen. Siden elveløpet spiller en liten rolle for vannføringen i Tokkeåi, da simuleringene viser at kun 1 % av den totale vannføringen går i sidekanalen. Basert på hvor liten vannmengden som passerer igjennom er, anslås å være minimal til neglisjerbar.

### 5.2 Interpolasjonsmetoder for terrengmodell

Vurderingen av de ulike interpolasjonsmetodene for terrengmodell viser at alle interpolasjonsmetodene gir svært like og veldig gode resultater. Med andre ord vil metodene som er testet gi like gode resultater, slik vil det være anbefalt å benytte interpolasjonsmetoden som er raskest og produserer minste filstørrelse. Da vil metodene som er basert på interpolasjonsmetode binning være mest gunstig, hvor hulromfyllingsmetode IDW og naturlig nabo gi lavest gjennomsnittlig avvik og median. Årsaken til at det gjennomsnittlige avviket er negativt for samtlige metoder, som betyr at interpolerte verdier ligger over LIDAR-verdier, kommer nok av at interpolerte flater ikke klarer å ta hensyn til de store høydevariasjonen i LIDAR-dataene.

### 5.3 Følsomhetsanalyser

Årsaken til at vannføringen  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  blir benyttet i følsomhetsanalysene, men ikke i kalibreringen, hvor  $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$  benyttes, kommer av avrundinger gjort i prosjektoppgaven. Da ble vannføringene rundet av til nærmeste heltall for enkelthetens skyld siden verdiene ikke ble benyttet videre. Dette feilen ble oppdaget først etter at følsomhetsanalysene ble gjennomført. Størrelsen av denne feilen antas å være neglisjerbar, da det i følsomhetsanalyser er parameterne som blir endret som påvirker resultatet.

En svakhet med følsomhetsanalysene som er gjennomført er at de ikke direkte kan knyttes opp mot den endelige, kalibrerte modellen. Det kommer av at analysene ble gjort før kalibrert modell var ferdig (følsomhetsanalysen av Mannings ruhetskoeffisient som ble gjort etter

kalibrering av modell er et unntak), noe som bør gjøres i motsatt rekkefølge for å oppnå et best mulig følsomhetsgrunnlag for modellen. Årsaken til at analysene ble gjort for tidlig henger sammen med tilgjengelig tid. Kalibreringen av hele modellen tok veldig lang tid og foregikk på en periode over flere måneder. Skulle følsomhetsanalysene først gjøres etter at modellen var ferdig kalibrert ville det tvilsomt vært tid nok. Eventuelt måtte kalibreringsprosessen ha blitt avsluttet tidligere for å få tid, noe som ville gått på bekostning av kvaliteten av kalibreringen.

Det er viktig å spesifisere at følsomhetsanalysene er begrenset til statiske simuleringer (vannstand er konstant over tid), slik at det er vanskelig å kunne si noe om hvor sensitive parameterne er ved dynamiske situasjoner. I tillegg kunne det blitt benyttet mer enn én vannføring (hvor simuleringene fortsatt er statiske) i følsomhetsanalysene, ettersom at endring i vannføring vil føre til endring i vannføringsregimet. Igjen så har faktorer som tilgjengelig tid og kunnskap vært begrensende for hvor mye som har blitt gjort. Slik at konklusjoner som trekkes videre i underkapittelet forutsetter statiske forhold for Tokkeåi for at de skal være gyldige, og kan ikke trekkes automatisk for enhver elv, strømningssituasjon eller HEC-RAS-modellen som helhet.

Basert på resultatene fra parameterrestene vil det være rimelig at Mannings ruhekkoeffisient, som antatt, ble benyttet til kalibrering av modellen for å beregne korrekte vannoverflater i forhold til feltmålte vannlinjer. Grunnen til det ruhekkoeffisientene ble benyttet til kalibrering, var på bakgrunn av antagelse at parameteren var den mest følsomme, hvilket resultatene bekrefter.

### **5.3.1 SW vs. DSW**

DSW-baserte beregninger mangler, som skrevet om i teorikapittelet, en del av leddene i ligningssettet til SW. Ettersom at turbulens og Corioliskraften er neglisjert i beregningene, vil en differanse i vannoverflatene mellom SW- og DSW-simuleringene komme av de transiente- og konveksjonsleddene.

At differansene for vannoverflaten ved gitterceller på 10 m er lavere enn for 5 m kan komme av at de grove cellene ikke klarer å få med seg detaljer i like god grad. Slik at simuleringene basert på SW vil gi veldig avrundede verdier og grove resultater som ligger nærmere simuleringene ved bruk av DSW. Samtidig kan det virke som om gitterceller på 5 m vil også være for grove for beregninger i Tokkeåi, da differanser på centimeter- til desimeternivå blir

for unøyaktig og vil påvirke resultatene i stor grad. For de lave cellestørrelsene, 1,2 og 2 m, vil det transiente- og konveksjonsleddene utgjøre et mindre bidrag på centimeternivå.

Ved å se på resultatene fra det lille området ser litt ut som om trenden, som mellom 1,2 og 2 m i beregningene med bruddlinje for det store området, fortsetter for lavere cellestørrelser. Dog her benyttes ikke bruddlinjer. Slik at for de så lave gitterceller vil ikke bruk av DSW-ligningene i simulering av Tokkeåi gitt så veldig stort utslag. Problemet da ligger i at så små celler vil kreve et enormt antall celler (antageligvis flere millioner) for å dekke f.eks. hele strømningsområdet til Tokkeåi. Derfor vil det være mer gunstig å velge større celler og SW-ligningene for beregningene av vannstrømning.

Usikker på om beregningene uten bruddlinje for 1,2 m kan være korrekte, siden det er så små differanser i vannoverflaten. Det hadde vært en interessant teori hvor for små nok gitterceller, så vil DSW-ligningene gi like gode resultater som SW-ligningene. Men teorien blir motbevist ved å se på differansene mellom SW- og DSW-baserte simuleringer for det lille området. For differansene er fortsatt tilstede for cellestørrelser ned mot 0,25 m.

Beregnet differanser mellom vannoverflate med og uten bruddlinjer for gitterceller 2 og 5 m viser tilnærmet like resultater, som videre betyr at bruk av bruddlinjer har hatt ingen/liten effekt på simuleringene. For cellestørrelser på 10 m viser resultatene mellom med og uten bruddlinjer et lite avvik, mens for gittercellestørrelse på 1,2 m er avvikene mye større og bruddlinjene vil med andre ord ha en effekt.

For små og store gitterceller så vil bruddlinjer utgjøre en forskjell i vannoverflateberegninger ved bruk av SW- eller DSW-ligninger. Sammenhengen her er vanskelig å forstå. Bruddlinjer ved store celler kan føre til at cellestrukturen beregnes ulikt enn hvis det ikke var bruddlinjer der, da to bruddlinjer kan ligge nærmere hverandre med avstand kortere enn cellestørrelsen. Hvis cellene derimot er veldig små, skal det kort avstand mellom bruddlinjene til for at to eller flere bruddlinjer vil påvirke hvordan cellestrukturen dannes rundt dem. Ved små celler vil cellestrukturen være mindre påvirket av bruddlinjene, da det er færre celler som vil tilpasses ut i fra bruddlinjene. For store celler vil med andre ord bruddlinjene påvirke en større andel celler enn små, som er forsøkt illustrert i figur 29.

### 5.3.2 Bruddlinje

Bruk av bruddlinjer ble nevnt i forrige delkapittel hvor ulike beregningsmetoder ble sammenlignet, hvor kun én av cellestørrelsene viste tegn til påvirkning på resultatene i stor grad, mens resten i liten grad til ingen påvirkning. Fra resultatene i parameter testen av bruddlinjer viser at gjennomsnittlige avviket ligger på millimeternivå rundt null, mens standardavvikene øker på centimeternivå ved endret gittercellestørrelse. Det kan tolkes som at noen området i elven vil ha en økning i vannstand, mens andre vil på samme tid ha en senkning. Videre vil økningene/senkningene bli større ved større cellestørrelser.

Bruddlinjer vil medføre en retningsjustering av cellene i nærheten. En retningsjustering vil medføre at de vertikale overflatene i cellene blir flyttet, og videre vil tverrsnittene endres. For store celler vil bruddlinjer påvirke en større andel av totale celler enn for små, siden strukturen ved små celler vil kun etter et par cellelengder unna bruddlinjene være firkantede og ortogonale (se figur 29). For store celler vil også cellestrukturen gå mot samme cellestruktur, men siden cellelengdene er større vil en større lengde fra bruddlinjene være påvirket. Dette kan være en del av forklaring av hvorfor differansene blir større ved økt cellestørrelser.

Bruk av ulike største og minste cellelengder for bruddlinjene ble ikke undersøkt i testene, noe som kunne vært interessant for å se hvordan spesielt mindre celler rundt bruddlinjene påvirket resultatene. Samtidig vil nok en reduksjon av største cellelengde ha litt samme effekt som testen som har blitt gjennomført her, da mindre celler fører til færre (totalt sett) påvirkede celler.

### 5.3.3 Gittercellestørrelse

Det lille området ligger i en kulp, og er preget av rolig strømminger og liten variasjon i vannoverflate. For det store området, som ser på hele Tokkeåi, er det en mye større variasjon strømnings- og bunnforhold. Sann sett vil resultatene fra det store området være mer troverdige da de dekker flere typer forhold.

For det lille området ser det, fra figur 30, ut som en trend mellom vannoverflatedifferansen og gittercellestørrelsen. Hvor en reduksjon i gittercellestørrelser vil føre til en økt gjennomsnittlig differanse. Sagt på en annen måte: økt gittercellestørrelsen fører til økte vannstander. Denne trenden er derimot motsatt for det store området, hvor økt gittercellestørrelse fører til en reduksjon i vannstand (ser da hovedsakelige på intervallet 1,2-5 m i figur 32, hvor for cellestørrelser á 10 m ikke følger trenden og gir veldig store avvik). Igjen er det viktig å

poengtere at det lille området dekker de ulike strømningsforholdene i elven på dårligere måte en for det store området.

Med utgangspunkt i de stedlige differansene for det store områdene (figur 33) kan det se ut til at cellestørrelsesendringene fører til forskjellig vannstandsending i ulike deler/forhold i elven. Hvor det i de strykpregede delene så synker vannstanden ved reduksjon av cellestørrelser, så stiger vannstanden i de roligere delene av elven. For cellestørrelser på 10 m er denne tendensen vanskeligere å se, noe som tyder på at oppløsningen av cellene er for grov til å fange opp endringene i bunnforhold i elven.

Basert på det resultater fra det store området, ser det ut til at for cellestørrelse opp til 5 meter så vil det ikke usikkerhetene og differansene være av størrelse høyere enn opp mot centimeternivå. Altså vil de gjennomsnittlige endringene ved å velge cellestørrelser á 5 m kontra 2 m, som tar en god del lenger tid å beregne, gi en akseptabel unøyaktighet på omtrent  $\pm 1$  cm. Samtidig hadde det vært mer korrekt å sammenligne med en lavere gittercellestørrelse, da en så lav cellestørrelse som mulig vil ta hensyn til lokale endringer på bedre måte. Problemet med Tokkeåi er at en lavere gittercellestørrelse enn det som er testet vil være for datakrevende og var ikke mulig å gjennomføre uten at programmet krasjet.

### **5.3.4 Mannings ruhetskoeffisient**

I parametertesten har det blitt benyttet en fast ruhetskoeffisient for hele elven, hvor en endelig, kalibrert elv vil bestå av et stort spenn i ruhetskoeffisienter. Som diskutert i starten av kapitlet vil det i utgangspunktet vil det være ønskelig å se følsomheten av en kalibrert modell, da følsomheten, og usikkerheten, vil da være mer direkte knyttet til det endelige resultatet. Derfor ble det i ettertid av kalibrert modell gjort en følsomhetsanalyse av parameteren.

Basert differansene plottet i figur 34 ser det ut til at vannoverflaten synker ved lavere ruhetskoeffisienter og motsatt for høyere ruhetskoeffisienter. Denne sammenhengen er forventet, da en økt ruhetskoeffisient i ligning for friksjonsleddet,  $c_f$ , i ligningssettene, fører til økt friksjonen (se ligning ( 6 )). Siden vannstandsendingene er av størrelsesorden desimeter vil Mannings ruhetskoeffisient være en av de mest følsomme parameterne, og videre en viktig parameter å få korrekt. Det at parameteren er så sensitiv gjør den også ypperlig til kalibrering av den hydrauliske modellen, da det en parameter som er enkel å endre for ulike deler av elven. Hvor parametere som gittercellestørrelse fører til stor variasjoner i tidssteg, vil endring i Mannings ruhetskoeffisient i minimal grad påvirke simulasjonstid.

Følsomhetsanalysen følger samme trend som parameter testen, reduksjon i Mannings ruhetskoeffisient gir økte vannoverflatedifferanser, og motsatt. Differansene er en del lavere enn for parameter testen, hvor avvikene lå på desimeternivå, mens for prosentvis endring av ruhetskoeffisienter i den kalibrerte modellen var vannoverflatedifferansene i større grad av preget av differanser på centimeternivå. Altså vil en kalibrert modell være mer stabil, eller mindre følsom, for endringer i Mannings ruhetskoeffisient enn en modell med fast ruhetskoeffisient. Med andre ord vil en kalibrering gi en mer troverdig hydraulisk modell, enn å anta Mannings ruhetskoeffisienter for ulike områder.

### **5.3.5 Turbulens – virvelkoeffisient**

En svakhet med parameter testingen av turbulensen ligger i at kun deler av Tokkeåi blir benyttet. Selv om testingen kunne vært gjort for hele Tokkeåi, klarer området som er valgt å ivareta de ulike forholdene (mesohabitat) i elven. En middels høy virvelkoeffisient ( $D = 0,5$ ) vil ikke bidra i særlig grad i beregningene av vannoverflatene, da usikkerheten varierer på millimeternivå. Ved en høy virvelkoeffisient vil utslaget være noe større og variere på millimeter- og centimeternivå.

Basert på hvilke områder i figur 37 som er preget av positive og negative vannoverflatedifferanser, kan det se ut til at i områdene preget av strykforhold har en reduksjon i vannoverflatene ved at turbulensleddet innføres. Samtidig ser det ut til at de rolige områdene vil ha en stigning av vannoverflaten ved bruk av turbulens. Sammenhengen mellom hvordan turbulens påvirker vannstandene i ulike deler av elven er noe som kunne vært undersøkt videre. Blant annet ved å koble de beregnede områdene mot vannhastigheter og/eller dybder.

Å legge til turbulensleddet i SW-ligningene, ved å benytte en virvelkoeffisient, ser ikke ut til å føre til en lenger beregningsprosess/simuleringstid, da forholdet mellom simuleringstid og simuleringstid holdes konstant for de ulike beregningene.

### **5.3.6 Tidssteg**

For tidsstegtestingen ble heller ikke hele Tokkeåi benyttet for å se på følsomheten, men også den øvre delen av Tokkeåi består av både kulper og stryk, slik at forholdene er til en viss grad ivaretatt. Etersom at det gjennomsnittlige- og standardavviket øker opp til centimeternivå ved lengre tidssteg vil det utgjøre en vesentlig del på beregning av vannoverflater. Selv om tidsstegene ble lengre, altså totalt færre tidssteg å beregne for et fast simuleringstidintervall, ble simuleringstiden for enkelte tidssteg lengre enn for korte tidssteg. Det henger nok sammen med

at antall konvergensfeil øker, som gjør at beregningsprosessene blir tregere. Ellers var det vanskelig å finne en klar sammenheng mellom økt konvergensfeil og simuleringstid ved økt tidssteg og Courant-kriterium. Basert på resultatene vil en tidssteg et steg mellom 0,1-1,0 sekunder være rimelig å benytte for en cellestørrelse på 2 meter, slik at Courant-kriteriet er lavere enn 1. Da vil parameteren kun utgjøre en usikkerhet i området  $\pm 1$  cm.

### **5.3.7 Corioliskraft**

Påvirkningen av Corioliskraften på vannstanden i Tokkeåi var mindre enn  $\pm 1$  mm. Altså vil det være, som antatt, rimelig å konkludere med at bruk av Corioliskraften for en elv som Tokkeåi vil være ubetydelig og ikke påvirke resultatene i noen særlig grad, da det er større usikkerheter, som f.eks. bølger, som vil gjøre at vannspeilet aldri vil være nøyaktig på millimeternivå.

### **5.3.8 Theta**

De lave differansene som er beregnet mellom implisitt og en blanding av implisitt og eksplisitt metode tilsier at parameteren har lite å si for kvaliteten (og usikkerheten) av simuleringresultatene i Tokkeåi. Basert på informasjon gitt i brukermanualene til HEC-RAS om at en ren implisitt metode (Theta lik 1,0) vil bruke lenger tid på å kjøre simuleringene enn for en lavere Theta-verdi støttes ikke opp av på resultatene fra parameter testen av Theta. Hvor testene viser at tiden er tilnærmet lik for alle simuleringene. Det er viktig å bemerke seg at testen baserer seg på konstante vannføringsdata, slik at beregningene og itereringsprosessen i HEC-RAS-modellen ikke nødvendigvis er av en kompleks natur, som kan oppstå ved raske endringer i vannføring. Dermed vil det kun være mulig å konkludere med at for en statisk beregning i Tokkeåi, vil ikke Theta-verdien ha noe betydning for simuleringstiden.

## **5.4 Kalibrering av den hydrauliske modellen**

Det var enkelte områder som var spesielt vanskelig å få kalibrert korrekte, både for 9,6 og 17,4 m<sup>3</sup>/s, hvor noen av områdene er vist i figur 63 og figur 64. For område a) i figur 64 var det vanskelig å få vannstanden til å bli høyere, da den lå omtrent 10 cm under målt verdi uansett. Hvis Mannings ruhekkoeffisient ble økt, som i utgangspunktet vil føre til høyere vannstand, ble vannføring inn i elveløpet redusert, slik at vannstanden endte opp med å bli redusert. Mens for område c) og d) i figur 64 var problemet at det var vanskelig å simulere høy nok vannstand før og lav nok etter tersklene.

#### 5.4.1 Svakheter ved kalibreringene

Variasjoner i vannstand, bølger og lignende vil gjøre det vanskelig å gjøre en korrekt kalibrering. Områder med stryk vil være preget av lokal variasjon av bølger og vil dermed ikke ha en jevn vannflate, i motsetning til kulper og områder med rolig strømning. Bildene i figur 55 og figur 56 illustrerer ulike forhold i elven som gjør det vanskelig å gjøre gode og korrekte vannlinjemålinger, da vannspeilet fluktuierer som følge av bølger og steiner.

En årsak til at vannlinjene fra LIDAR-skanningen har et større vannfylt areal enn kalibrert simulering kan være at vann har vært fanget fra tidligere, høyere vannføringer. Slik at det ligger igjen vann i områder ved LIDAR-skanningen, men som egentlig skulle vært tørrlagt. Sorteringen og klassifisering av LIDAR-data er gjort av AHM som leverte dataene. Denne prosessen er en blanding av automatisk og manuell, hvor det er stor mulighet for at menneskelige feil kan oppstå (Hammeren og Alne, 2015, s. 7-9).

Mannings ruhetskoeffisientene mister sin empiriske betydning i kalibreringsprosessen da parameteren blir brukt til å manipulere resultatene for å tilpasse en målt verdi i felt. Med andre ord kan manipuleringen føre til at koeffisientene blir urealistiske i forhold til hva litteratur skulle tilsi. F.eks. vil Mannings ruhetskoeffisienter på 1 og 0,01 s/m<sup>1/3</sup> være unaturlige verdier for en elv, da 0,01 s/m<sup>1/3</sup> tilsvarer veldig glatte materialer som glass. Men for at vannstanden skal synke mest mulig må en slik lav verdi benyttes i modellen for enkelte områder.

En svakhet med kalibreringen var at det ikke var samlet inn flere vannlinjemål for de ulike elveløpene for samme vannføring. Dermed er det usikkert om vannmengden som er de ulike elveløpene er korrekte. Siden valg av ruhetskoeffisienter før elven deler seg i flere løp har stor betydning for hvilket løp vannet skal fortsette i.

For kalibrering av modellen ved vannføring 14,4 m<sup>3</sup>/s for øvre del av Tokkeåi ble det benyttet mindre cellestørrelser enn ved kalibrering av de to andre vannføringene for hele Tokkeåi. Basert på resultat fra følsomhetsanalyse av cellestørrelse, figur 32, ser det ut til at vannoverflaten vil endre seg ± 2 cm ved en endring av cellestørrelser fra 2 til 3,5 m. Altså vil nok de kalibrerte Mannings ruhetskoeffisientene beregnet være noe feil. Samtidig er det ikke sikkert at en endring i vannoverflaten på 2 cm ville ført til at differansene mellom målt og simulert vannoverflater ble høyere enn 10 cm (som var grense benyttet for kalibrering, se kapittel 3.5). For da ville ikke Mannings ruhetskoeffisientene blitt endret for de ulike Manningsområdene. Dermed er det



rimelig å anta at kalibrerte Manningsområder er gode nok for sammenligning av forhold mellom vannføring og Mannings ruhetskoeffisienter, til tross for bruk av ulike cellestørrelser.

#### **5.4.2 Vannlinjemålinger lavere enn terrengmodellen**

Det ble oppdaget at z-koordinatene til terrengmodellen ligger høyere enn z-koordinatene for en del av vannlinjemålingene. Av totalt 120 vannlinjemålinger ble det identifisert 31 stykk hvor dette var tilfellet. Tyngden av vannlinjemålingene med problemet var lokalisert i nedre del av Tokkeåi, spesielt i nordre elveløp og helt ut i deltaet og Bandak. Ved visuell kontroll så det ut til at differansen lå på centimeter- og delvis desimeternivå, hvor nedre del av Tokkeåi var mest ukorrekt.

Det er usikkert om feilen kommer av målefeil i felt eller ved LIDAR-skanning. LAS-filene viste samme feil, slik at interpolering av terrengmodell er utelukket som feilkilde. En antagelse om at lav vannstand, luft i vannet og stor variasjon i bunnforhold kan ha gjort at LIDAR-skanningen av elven i spesielt nedre del av Tokkeåi har hatt for vanskelige forhold til å måle batymetrien.

#### **5.4.3 Vurdering av forhold mellom Mannings ruhetskoeffisient og vannføring**

Ut i fra vannføringskurven for Tokkeåi (figur 2) ser det ut til at det kalibrerte området 9,6 til 17,4 m<sup>3</sup>/s dekker omtrent vannføringsintervallet mellom 25 %- og 75 %-persentilen for vintermånedene desember til mars, noe som er positivt i forhold til at det var aktuelt område å kjøre dynamiske simuleringer. Samtidig så vil det være gunstig å vite hvordan endringen i Mannings ruhetskoeffisient vil bli for enda lavere vannføringer, da det for en dynamisk simulering vil være interessant å undersøke miljøforhold for vannføringer ned mot 4-5 m<sup>3</sup>/s. Slik at det vil være gunstig å gjøre vannlinjemålinger for lavere vannføringer i felt for å kalibrere modellen med korrekte ruhetskoeffisienter.

Ettersom endringene som er beregnet for gjennomsnittlig Mannings ruhetskoeffisient i forhold til vannføring er så usikre, og HEC-RAS per i dag ikke har mulighet til å variere ruhetskoeffisienten i forhold til vannføring for todimensjonale simuleringer (noe som er mulig for éndimensjonal simuleringer), er det antatt tilstrekkelig å benytte Mannings ruhetskoeffisienter beregnet ved kalibrering for vannføring 9,6 m<sup>3</sup>/s for vannføringer som er lavere.

## 5.5 Effektkjøring i Tokkeåi

Vannføringsdata er basert på målestasjon Elverheim, som ligger omtrent 3 km nedstrøms studieområdet start, som igjen ligger ca. 200 m nedstrøms Lio kraftverk. At målingene av vannføring gjøres så langt ned i elven, fører til at vannføringsendringene blir dempet i forhold til vannføringsvingningene som vil oppstå rett nedstrøms utslippet. Konsekvensen av bruk av dempete vannføringsverdier som inngangsverdier for vannføring oppstrøms, vil være at de simulerte vannføringsendringene vil være lavere og mindre kritiske enn de reelle vannføringsendringene. I tillegg vil svingningene i vannføring som beregnes ved Elvarheim være enda mer dempet enn de som ble målt. Altså vil det være en ikke-konservativ handling å benytte vannføringsdata målt en god avstand fra utslipp av kraftverk. Med andre ord vil en optimal effektkjøringsstudie benytte vannføringsdata fra kraftverket for at reelle endringer i vannføring blir brukt som inngangsdata i strømningsområder.

Dette er forsøkt å vise i figur 65 (Vedlegg J), hvor inngangsdata er basert på målinger fra Elvarheim (lengde 3000 m fra oppstrøms). En liten reduksjon i topp-/bunnverdier kan sees fra hydrograf-kurven til 3000 m-kurven, som betyr at vannføringene har blitt dempet ut. Reduksjonen av topp-/bunnpunkter ser ut til utvikle seg relativt lineært, da avstanden i mellom vannføringskurvene som er beregnet er ca. lik (1,5 km). Ved å måle tidsforskjellen mellom toppene for start (hydrograf-kurve) og slutt (4500 m-kurve) av Tokkeåi ser det ut til at det er en forsinkelse på rundt 1 time og 45 min, som tilsvarer en gjennomsnittlig vannhastighet på 0,7 m/s.

Vannføringsgrunnlaget er basert på timesmålinger, noe Bakken, Forseth og Harby (2016) mener sjeldent er tilstrekkelig for å fange opp detaljene i vannføringsendringer for effektkjøringsstudier. En konsekvens av å ikke ha tilgjengelig finere oppløsning av vannføringene er at svingningene i vannføringen blir dempet, slik at de reelle maksimale- og minimale vannføringene vil bli mye vanskeligere å få med i vannføringsmålinger, siden måletidspunktet må stemme overens med tidspunkt for maksimal/minimal vannføring.

For vurdering av hvilke vannføringsperioder med rask endring som skulle legges til grunn for effektkjøringsstudie i Tokkeåi ble det forsøkt å skille ut tydelig feil i måleserien. Selv om enkelthendelser bar preg av tydelige feil (som f.eks. perioder med null vannføring), er det en viss usikkerhet i at målestasjonen har lest av feil verdier, eller andre forhold har endret avlest

verdi. Slik at periodene som har blitt plukket ut basert på raske endringer i vannføring kan være mindre representative for elven enn hva som er antatt i vurderingen.

Simuleringene skulle ha begynt rett nedstrøms Lio kraftverk, da det ble har blitt identifisert gyting i Helveteshylen (kulpen som er oppstrøms studieområdet omfang). Årsaken til at studieområdet ikke startet rett etter utslippet til Lio kraftverk kommer av at Dalåi munner ut i Helveteshylen, slik at det ville vært vanskeligere å inkludere påvirkning av tilsiget derfra i den hydrauliske modellen. Det ble antatt tilfredsstillende å starte nedstrøms Helveteshylen siden det var i utgangspunktet tenkt at de sentrumsnære områdene i Tokkeåi var av størst interesse. Men sett i ettertid, så ville det nok være en grei antagelse å ekskludert tilsig fra Dalåi for å undersøke påvirkningen av effektkjøring i Helveteshylen.

Ettersom at det har blitt identifisert flere gytegroper i Helveteshylen, vil simuleringer som inkluderer disse delene av Tokkeåi være interessant. F.eks. gyteområdet som ligger rett nedstrøms utslippet av Lio kraftverk vil ha vannføringsendringene nesten helt like som produksjonen i kraftverket, uten at forhold i elven har mulighet til å dempe endringene/svingningene.

Det er usikkert om gittercellestørrelser på 3,5 m er tilstrekkelig for å beregne endring i vannføring og tørrlegging av gyteområder. Hvis det skal undersøkes enkelte skjul, så vil det nok være gunstig med en finere oppløsning. For undersøkelsene i oppgaven var det ikke vektlagt å finne ut hva slags nøyaktighet som var krevd for at modellens beregninger er gode nok for å beskrive endringene i gyteområdene. Det ville vært interessant å finne ut hvor små celler en må ha for å dekke variasjonen i steiner, skjul og andre forhold.

### **5.5.1 Vinter- og sommerscenario**

For vinterscenarioet ble vannføringen redusert til 1,7 m<sup>3</sup>/s som i utgangspunktet er en vannføring som ikke er aktuell, da Statkraft har en selvpålagt minstevannføring på 4 m<sup>3</sup>/s. Dermed kan nok valget av effektkjøringshendelse virke litt ulogisk, sett i ettertid. Det som derimot er interessant er at vinterscenarioet er det eneste som oppnår klasse stor og svært stor for påvirkningsfaktor tørrlagt areal i vurdering av effektkjøring. Noe som henger sammen med resultatene fra forhold mellom vanndekning/tørrlegging og vannføring, hvor vannføringer lavere enn 4 m<sup>3</sup>/s ser ut til å føre til en kritisk økning i tørrlagt areal. Dermed vil ikke de andre effektkjøringsscenarioene oppnå den samme graden av tørrlegging, da disse ikke ha laveste vannføring lavere enn 4 m<sup>3</sup>/s.

De to enkelthendelsene som her er valgt vil ikke være tilstrekkelig for å si noe om sesongvariasjonen av effektkjøring i Tokkeåi, da det ville vært nødvendig å finne verdier som representerer flere reelle hendelser for en periode. Vurderingene vil derimot være et bidrag for å forstå hva slags vannføringsendringer som vil påvirke ulike faktorer i vurdering av miljøpåvirkning ved effektkjøring, som at en reduksjon av vannføring til under 4 m<sup>3</sup>/s vil føre til store tørrlagte områder.

### **5.5.2 Effektkjøringsscenarioer ved bruk av COSH-Tool**

Det ble benyttet ulike persentiler i COSH-Tool for å undersøke hva slags utslag det ville gi for vurdering av påvirkning av effektkjøring. Ettersom at det er lite forskjell i beregnede tallverdier og klasser for den totale påvirkningen for de ulike persentilene, var valget av persentil i COSH-Tool en mindre viktig faktor for vurdering av effektkjøring i Tokkeåi.

Basert på vurdering av resultater fra COSH-Tool vil det være vanskelig å si om Tokkeåi er preget av klare effektkjøringshendelser, med typiske døgnregulerte opp- og nedjusteringer av vannføring som følge av økt/redusert produksjon. Verktøyet ble oppfattet som noe mangelfullt for vurdering av påvirkningsfaktoren fordeling, slik at den ble vurdert ut ifra manuell inspeksjon av vannføringsserien. Både fordeling og tidspunkt ble i stor grad basert på synsing av vannføringsserien og resultatplottene fra COSH-Tool, slik at vurderingen som er gjort for disse faktorene vil være svært usikre, og må betraktes deretter.

Tørrlagt areal er beregnet for hele strømningsområdet, slik at en del av området vil bestå av utløpet/deltaområdet i Bandak. Med andre ord vil en stor del av området (se figur 66 i Vedlegg K) ikke ha noe endring i vanddekt areal, da vannstanden i Bandak ble holdt lik i alle simuleringene. En konsekvens av å inkludere området er at tørrlagt areal blir underestimert. Slik at tørrlagt areal i elven vil være større enn for hele området som er vurdert.

### **5.5.3 «Verste-tilfelle» -scenario**

En endring i vannføring ved kraftverket fra full produksjon til stans har i scenarioet blitt antatt å skje på fem minutter, noe som i realiteten kan skje både fortere og seinere. Siden tid kraftverket bruker på å stoppe er ukjent, har formel for refleksjonstid ( $t_r = 2L/c$ ) for trykkbølger i rør blitt benyttet for å beregne korteste stengetid. Hvis tunnallengde,  $L$ , for Lio kraftverk er ca. 6,5 km (målt av fra [altas.nve.no](http://altas.nve.no)) og forplantningshastigheten,  $c$ , er 1200 m/s, vil refleksjonstiden bli 11 sekunder. Altså vil en stopptid av kraftverket på fem minutter være veldig konservativt. Slik at senkningshastigheter som har blitt beregnet kan nok antas å bli enda

større hvis kraftverket blir stoppet raskere enn på fem minutter. Formel for refleksjonstid og verdi for forplantningshastighet er hentet fra Guttormsen (2014, s. 151-155).

## 5.6 Forhold mellom vanddekt areal og vannføring

Ved at den største endringen i vanddekning skjer for vannføringer lavere enn  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , tyder det på at Statkrafts selvpålagte minstevannføring virker logisk og fornuftig. Da lavere vannføringer vil føre til betydelig forverring av dekningsgraden av vann i elven.

En svakhet med polygonen som ble benyttet til å klippe ut gyteområde 3 i ArcMap, var at den ikke dekte område utenfor elvebredden godt nok. Dette medfører at en reduksjon i vannareal kan bli underestimert, ved at f.eks. to vannføringer kan dekke polygonen med vann, men kun ved høyeste vannføring vil vannet dekke hele bredden av elven. Altså ligger vannareal for en lavere vannføring mellom elvens bredde og polygonens kant. Størrelsen av denne feilkilden er nok ikke betydelig, men kan medføre at tørrlagt areal har blitt underestimert for gyteområde 3.

Modellen er ikke kalibrert for vannføringer lavere enn  $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , noe som gjør at den vil være usikker ved lavere vannføring. Slik at beregnet andel vannareal i hele elven og tørrleggingsareal av gyteområder for de lave vannføringene må forstås som indikerende og ikke reelle. Basert på beregnede Mannings ruhekkoeffisienter for ulike vannføringer vil ruhekkoeffisientene øke ved lavere vannføring.

Selv om det har blitt forsøkt å ta ut resultatverdier for vannoverflater for samme vannføring, er det viss fare for at enkelte områder ikke har oppnådd stabil (statisk) vannføring før simuleringen ble ferdig (eller vannføringen endret seg igjen). Det ville vært for tidkrevende å gjøre en god undersøkelse og det var heller ikke tid til å gjøre simuleringer om igjen, da simuleringene ble gjort i slutfasen av oppgaveprosessen. Med andre ord så vil nok ikke vanddekte areal beregnet være helt korrekte, men vil absolutt gi et godt bilde av elven ved ulike vannføring.

## 5.7 Endring i bunnforhold og terreng

Ut i fra endringene i høyde i området på og rundt terskelen kan det se ut som om masser, som stein og grus, har erodert i elveløpet og blitt avsatt på terskelen og sidene. Den store differansen på terskelen har mest sannsynlig ført til at Hagusjåkanalen har blitt tett igjen, som vil si at terskelen har blitt for høy til at vann ved normale vannføringer ikke klarer å passere. Dette støttes opp av simuleringen hvor terskelområdet har blitt skiftet ut og noe vann vil strømme igjennom. Samtidig viser det seg at kanalen ikke er av stor betydning for vannføringen generelt

i elveløpet, da minimale mengder vann strømmer i Hagusjåkanalen sammenlignet med elveløpet. Det er mulig at ved større vannføringer enn  $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$  så vil påvirkningen og effekten av kanalen være mer betydelig. Dette ble ikke undersøkt.

En årsak til at bunnen i elven lå lavere for øvre del av Tokkeåi ved 2016-skanningen enn ved 2015-skanningen kan komme av erosjon som følge av den store flommen i 2015. Det kan også forklare hvorfor bunnen ligger høyere nederst i Tokkeåi, hvor det er tenkelig at det har foregått sedimentering av eroderte masser fra områder lenger opp i elven.

Store endringer i terrenget på flere meter som er beregnet mellom de to skanningene virker urealistisk og lite troverdig. Årsaken til de store avvikene kan f.eks. komme av at de ulike skanningene har beregnet kanten på bygninger ulikt. Uansett vil ikke de store avvikene mellom LIDAR-skanningene påvirke resultatene av den hydrauliske modellen, da områdene som har store avvik ligger på landområder som ikke er berørt av strømningsområdet.

## **5.8 Andel vannføring i ulike elveløp**

Beregning av andel vannføring i de ulike løpene i elven er basert på kun tre vannføringer, mellom  $4\text{-}8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Altså vil nok resultatene kun representere andeler ved lavere vannføringer, da det er usikkert hvordan fordelingen vil være for høyere vannføringer. Undersøkelsen av andelen av vannføring var ikke en viktig del av masteroppgaven, slik det ble kun valgt å se på et fåtall simuleringer. Siden tidsbruken for å samle inn data per vannføring var relativt stor ble det vurdert å være tilstrekkelig med noen vannføringer for å få et inntrykk av andelen i de ulike løpene.

## 6 KONKLUSJON

---

LIDAR-data med oppløsning på 1 dm danner et solid terrenggrunnlag for den hydrauliske modellen, og klarer å fange opp lokale variasjoner i elven. Innsamling av et så detaljert datasett ville nok ikke vært mulig på noen annen måte, da andre målemetoder som ADCP, GPS, satellitt, osv. vil være for tidkrevende, unøyaktige eller mangelfulle. Med rask innsamling, høy tetthet og nøyaktighet på millimeter- til centimeternivå (Skeie, 2016), virker LIDAR-skanning som et godt valg for innsamling av data om bunnforhold i elver.

Basert på de gjennomførte parameter-testene eller følsomhetsanalysene er det valg av Mannings ruhetskoeffisient, beregningsmetode (SW eller DSW) og gittercellestørrelser som utgjør den største forskjellen i beregnet vannoverflate. De tre parameterne vil ved unøyaktig bruk kunne føre til vannoverflateendringer på desimeternivå. Resten av undersøkte parametere fører til endringer på millimeter- eller centimeternivå.

Den hydrauliske modellen har for hele strømningsområdet blitt kalibrert for to vannføringer, hvor den ene bestod av omriss av vandekningen i elven, mens den andre av målte vannlinjer. Kalibrerte verdier mot målte vannlinjeverdier hadde en differanse på  $\pm 5$  cm i målingene, noe som ble vurdert som tilstrekkelig da naturlige vannfluktuasjoner vil trolig variere opp mot 10 cm, samt unøyaktigheter ved GPS-målingene. Modellens resultater blir derfor konkluderte med å være troverdige.

Ved bruk av hjelpemiddelet for vurdering av miljøpåvirkning ved effektkjøring, COSH-Tool til å kvantifisere størrelser av ulike påvirkningsfaktorer og vannføringsserien fra Elvarheim, kan det på bakgrunn av resultatene konkluderes med at Tokkeåi er i moderat grad påvirket av effektkjøring. Lave senkningshastigheter og andel tørrlagte areal er noe av grunnen til at miljøpåvirkningen ikke ser ut til å være kritisk for de undersøkte effektkjøringshendelsene.

Sammenligning av vanddekt/tørrlagt areal for ulike vannføringer, viser at andel tørrlagt areal for hele elven er beregnet til å være større enn for kun gyteområdene. Årsaken til dette kommer trolig av at studerte gyteområder er lokalisert i basseng/kulper oppstrøms terskler, slik at ved vannføringsreduksjon vil vann bli værende i gyteområdene. Først ved vannføringer lavere enn  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  vil en stor endring i tørrlagt areal forekomme, både for gyteområdene og for elven ellers.

Gyteområdet lengst oppstrøms i elven viser seg å være det mest utsatte for raske reduksjoner i vannføring, noe samtlige simuleringer gjennomført viser. Det gjelder både for senkningshastigheter og andel tørrlagt areal. Med andre ord kan det, basert på resultatene, trekkes en konklusjon om at jo lenger oppstrøms et gyteområde befinner seg i elven, jo mer vil det være utsatt for raske reduksjoner i vannføring og effektkjøring. Altså vil gyteområdet lengst oppstrøms være det kritiske, eller dimensjonerende, ved undersøkelse av vannføringsendringer.

## Videre arbeid

En liste over forslag til videre arbeid er gitt under:

- Måle inn vannoverflate for lavere vannføring (4-5 m<sup>3</sup>/s) slik at det kan gjøres en kalibrering for å finne Mannings ruhetskoeffisienter for lavere vannføring. Dette vil føre til at mer korrekte sammenhenger for lav vannføring kan beregnes, som vanddekt/tørrlagt areal og forhold mellom Mannings ruhetskoeffisienter og vannføring.
- Kontroll av LIDAR-data i flere ulike deler av elven, samt på landområder, for å kontrollere kvaliteten og nøyaktigheten av metoden for å samle inn terrengdata. Blant annet kunne det være interessant å sjekke om Hagusjåkanalen er fylt igjen av masser, eller om det er målt feil ved LIDAR-skanning.
- Benytte ulike todimensjonale strømningsområder i HEC-RAS, hvor det blir brukt ulike gittercellestørrelsesoppløsning. Slik at områder som er mer interessante (som gyteområder) blir beregnet med små gitterceller og høyere nøyaktig, mens områder ellers blir raskere beregnet ved store gitterceller. Vil være nyttig å undersøke i forhold til økt kvalitet av resultater og tidsbesparelse. Et alternativ er en kombinert 1D-2D modell, som også er en mulighet i HEC-RAS, eller mange bruddlinjer med små celler.
- Utvide strømningsområder til å starte rett nedstrøms utløpet til Lio kraftverk, slik at gyteområdene i Helveteshylen blir inkludert, da dette er det området som har blitt identifisert lengst oppstrøms.



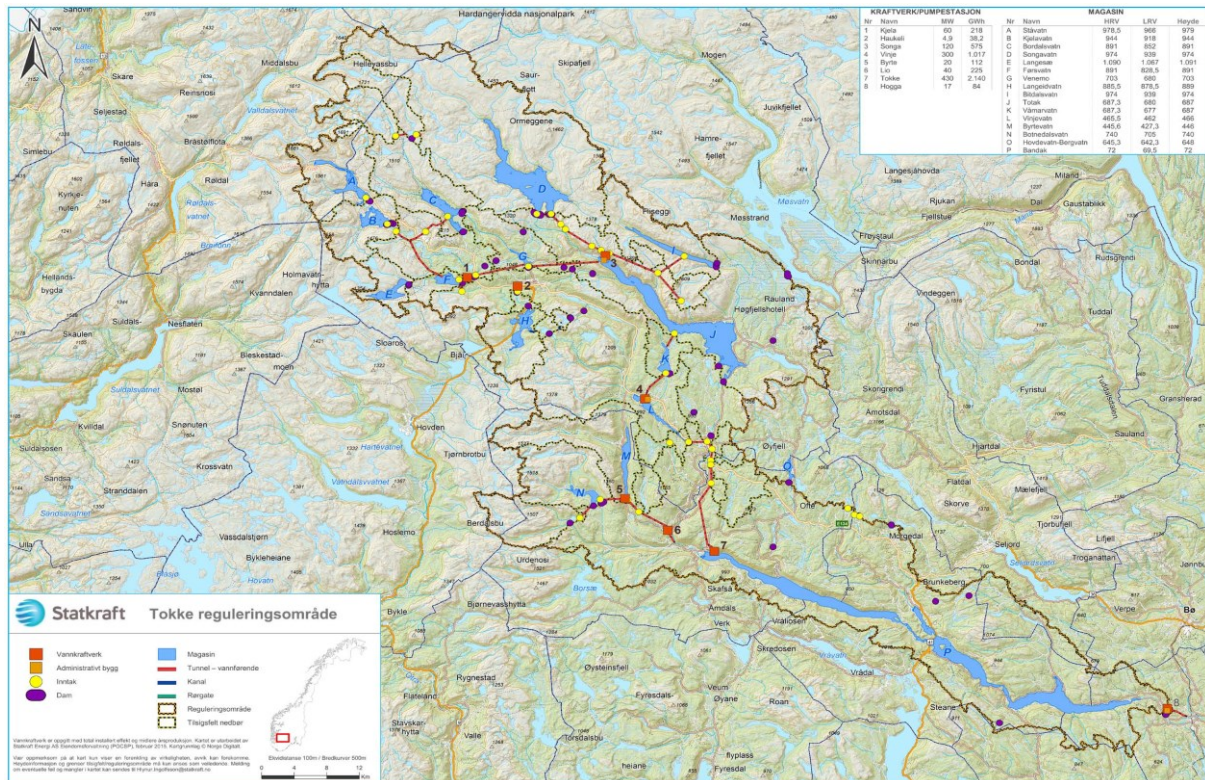
## 7 REFERANSE

---

- AHM (2016). Tilgjengelig fra: <http://ahm.co.at/hydro-mapping/> (Hentet: 12.12. 2016).
- ASPRS (2013) *LAS SPECIFICATION, VERSION 1.4 - R13*. The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. Tilgjengelig fra: [http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS\\_1\\_4\\_r13.pdf](http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS_1_4_r13.pdf) (Hentet: 06.03.2017).
- ASPRS (2017) *LASer (LAS) File Format Exchange Activities. What is the LAS Format?* Tilgjengelig fra: <https://www.asprs.org/committee-general/laser-las-file-format-exchange-activities.html> (Hentet: 06.03. 2017).
- Bakken, T. H., Forseth, T. og Harby, A. (red.) (2016) *Miljøvirkninger av effektkjøring: Kunnskapsstatus og råd til forvaltning og industri NINA*. Trondheim mai: Norsk institutt for naturforskning - NINA Temahefte 62.
- Deign, J. (2017) The Debate Over Norway's Ability to Become a Hydro Battery for Europe Is Surprisingly Robust, *Greentech Media*, 31.05.2017. doi: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/experts-respond-to-norway-battery-pack-dismissal>.
- ESRI (2017). Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/conversion/las-dataset-to-raster.htm> (Hentet: 22.03. 2017).
- Fornybar.no (2016) *Energipolitikk* (Hentet: 31.05. 2017).
- Guttormsen, O. (2014) *Vassdragsteknikk II*. Trondheim: NTNU, Institutt for Vann- og Miljøteknikk. Akademika Forlag.
- Hammeren, R. og Alne, I. S. (2015) *The Process and Performance of Bathymetric LiDAR Survey*. Student Thesis, NTNU.
- Heggenes, J., Sageie, J. og Kristiansen, J. (2009) *Rehabilitering av elvehabitat i Tokkeåi, Dalen i Telemark: Tilstand og tiltak*. HiT skrift nr 2/2009: Høgskolen i Telemark.
- Miljødirektoratet (2011) *Vassdragsreguleringer*. Tilgjengelig fra: <http://www.miljodirektoratet.no/no/Tema/Arter-og-naturtyper/Villaksportalen/Pavirkninger/Fysiske-inngrep-i-vassdrag/Vassdragsreguleringer/> (Hentet: 25.05. 2017).
- Norgeskart (2016) *Karttjeneste*. Tilgjengelig fra: <http://www.norgeskart.no/> (Hentet: 22.11.2016).
- NVE (2013) *Rapport nr. 49/2013. Vannkraftkonsesjoner som kan revideres innen 2022. Nasjonal gjennomgang og forslag til prioritering*. (49/2013). Tilgjengelig fra: <http://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M49/M49.pdf>.
- Olsen, N. R. B. (2015) Numerisk modellering av kapasitet på flomløp - et litteraturstudium, s. 79. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/Media/4612/numerisk-modellering-av-kapasitet-p%C3%A5-floml%C3%B8p.pdf> (Hentet: 20.10.2016).
- Olsen, N. R. B. (2016) *Numerical Modelling and Hydraulics*. 5th. utg. Trondheim: NTNU.
- Rapidlasso (2017) *LAStools*. Tilgjengelig fra: <https://rapidlasso.com/> (Hentet: 01.03. 2017).
- Saltveit, S. J., *et al.* (2001) Field experiments on stranding in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) during rapid flow decreases caused by hydropeaking, *Regulated Rivers-Research & Management*, 17(4-5), s. 609-622. doi: 10.1002/rrr.652.abs.
- Sauterleute, J. F. og Charmasson, J. (2014) A computational tool for the characterisation of rapid fluctuations in flow and stage in rivers caused by hydropeaking, *Environmental Modelling & Software*, 55, s. 266-278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.004>.
- Skeie, L. (2016) *LIDAR-data for hydraulisk modellering av Tokkeåi*. Prosjektoppgave, NTNU.

- Statkraft AS (2015) Lio kraftverk. Tilgjengelig fra: <http://www.statkraft.no/media/pressemeldinger/Pressemeldinger-arkiv/2015/investerer-200-mill.-kr-i-ljo-kraftverk/>.
- Statkraft Energi AS Eiendomsforvaltning (2015) *Tokke reguleringsområde* (Hentet: 22.11.2016).
- Statnett (2017) *Produksjon og forbruk for år 2014*. Tilgjengelig fra: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Nedlastingssenter/Last-ned-grunndata/> (Hentet: 04.06. 2017).
- Tranmæl, E. og Midttun, L. (2005) Vandrings- og bestandsundersøkelser av ørret (*Salmo trutta*) i et sterkt regulert elveøkosystem i Telemark. Masteroppgave, Høgskolen i Telemark, Avdeling for allmenne fag, Bø.
- USACE (2016a) *HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0*. (CPD-68): US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC).
- USACE (2016b) *HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0*. (CPD-68A): US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC).
- USACE (2016c) River Analysis System HEC-RAS Release Notes Version 5.0.3 September 2016. Tilgjengelig fra: [http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS\\_5.0.3\\_Release\\_Notes.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS_5.0.3_Release_Notes.pdf) (Hentet: 28.03.2017).
- USACE (2016d) *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0*. (CPD-69): US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC).
- Wollebæk, J., Thue, R. og Heggenes, J. (2003) Valg av gyteplasser og karakterisering av gytegroper til storørret på elv - kvantitativ modellering av gytehabitat. Rapport Laboratorium for ferskvannøkologi og innlandsfiske (LFI) 224, Universitetet i Oslo, Oslo.
- yr.no (2017) Værstatistikk for Høydalsmo (Ofte). Tilgjengelig fra: [https://www.yr.no/sted/Norge/Telemark/Tokke/H%C3%B8ydalsmo\\_\(Ofte\)\\_m%C3%A5lestasjon/statistikk.html](https://www.yr.no/sted/Norge/Telemark/Tokke/H%C3%B8ydalsmo_(Ofte)_m%C3%A5lestasjon/statistikk.html) (Hentet: 19.05.2017).

# VEDLEGG A - TOKKE-VINJE-REGULERINGEN



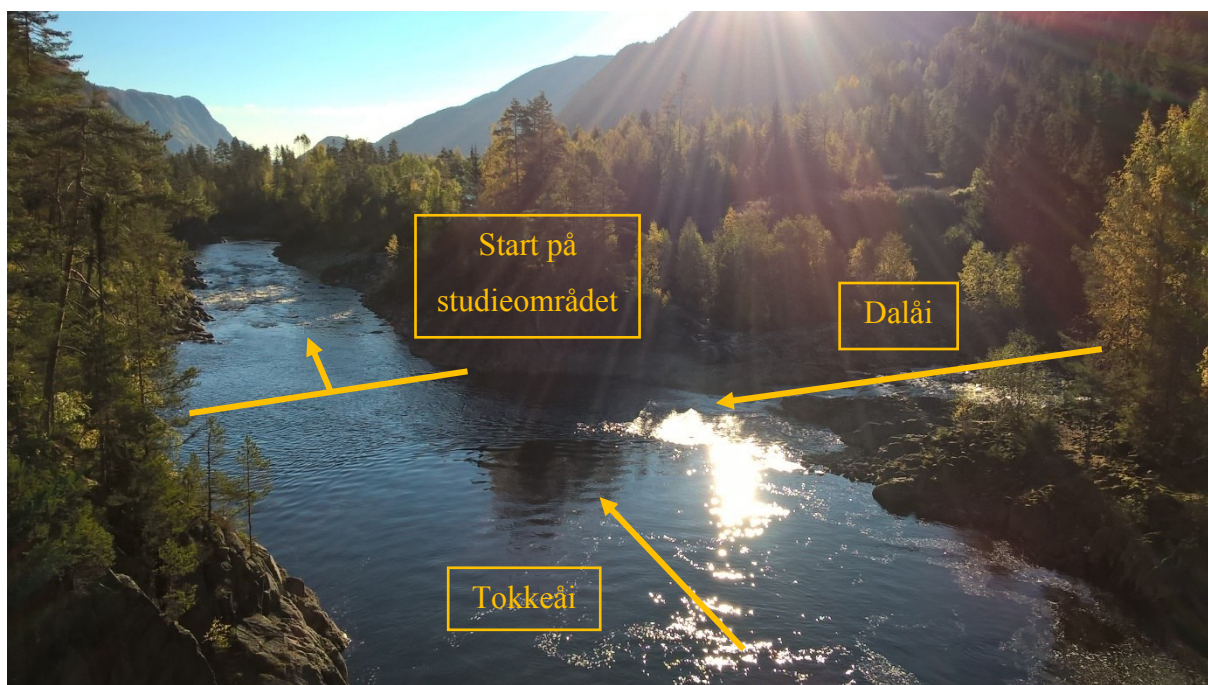
Figur 52: Oversiktskart over Statkrafts reguleringsområdet i Tokke-Vinje (Statkraft Energi AS Eiendomsforvaltning, 2015).

## VEDLEGG B - DIVERSE BILDER AV TOKKEÅI

---



Figur 53: Bilde fra Helveteshylen av utløp av Lio Kraftverk og Tokkeåi oppstrøms masteroppgavens omfang.



Figur 54: Bilde av Tokkeåi tatt fra gangbruen ved Helveteshylen sett nedstrøms. Til høyre ser man Dalåi som munner ut i Tokkeåi og til venstre renner Tokkeåi ned mot Dalen og Bandak.

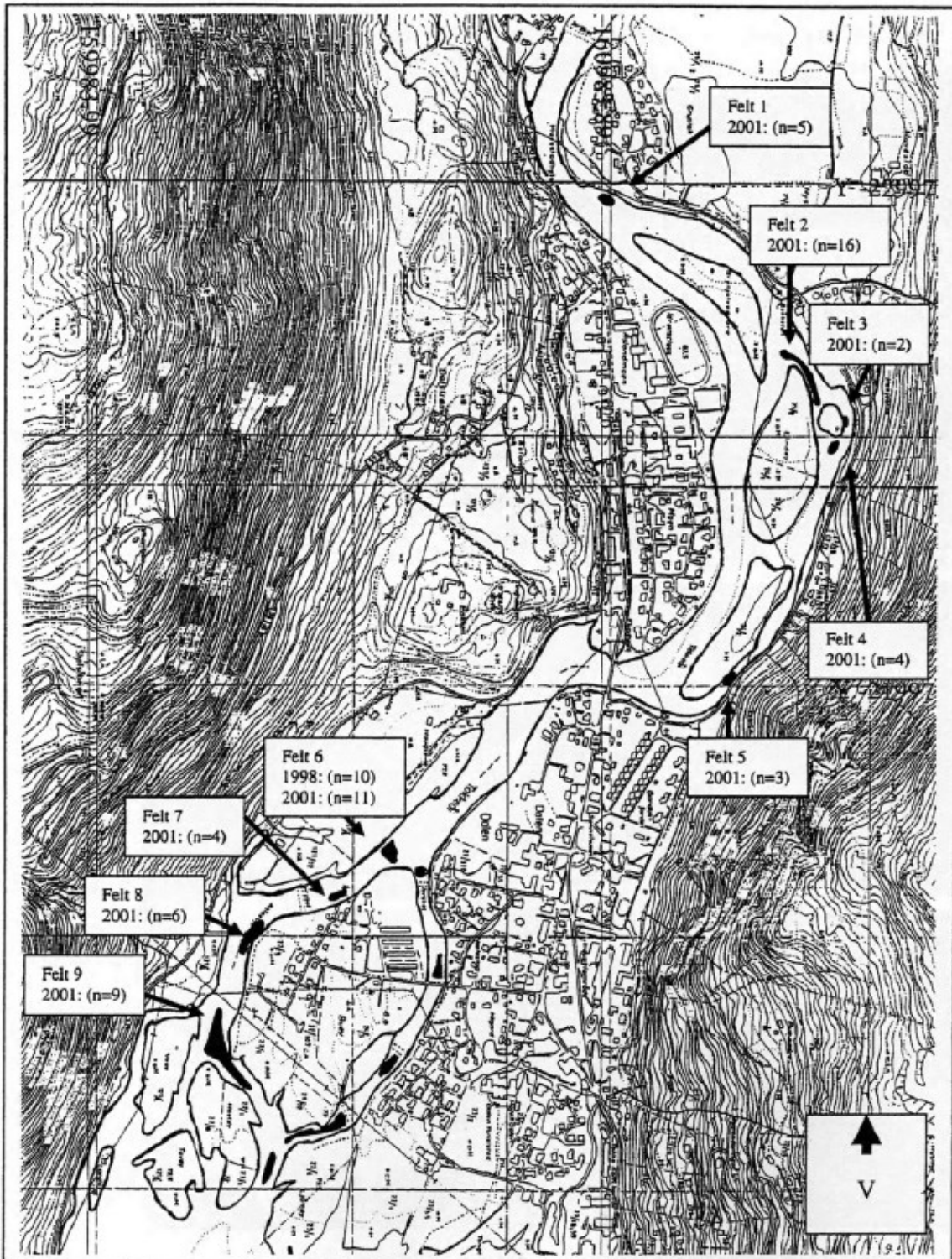


Figur 55: Bilde tatt oppstrøms av strømningsforhold ved terskler, hvor markert område viser en rolig og flatt parti mellom tersklene, som ellers er preget av irregulær strømning på grunn av stor steiner. Vannføring ved bilde var  $14,4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

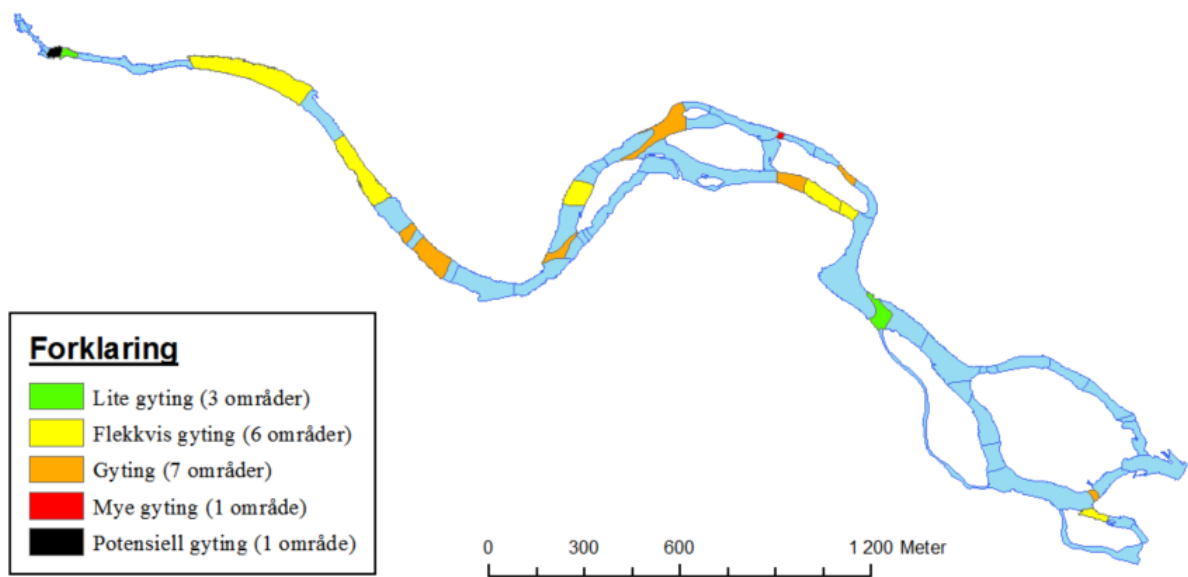


Figur 56: Bilde tatt oppstrøms som viser et strykområde nedstrøms tersklene i bilde over. Ser at bølgetoppene (markert med rød sirkel) demonstrerer hvordan vannoverflaten kan variere flere centimeter/desimeter. Vannføring ved bildet var  $14,4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## VEDLEGG C - GYTEOMRÅDER

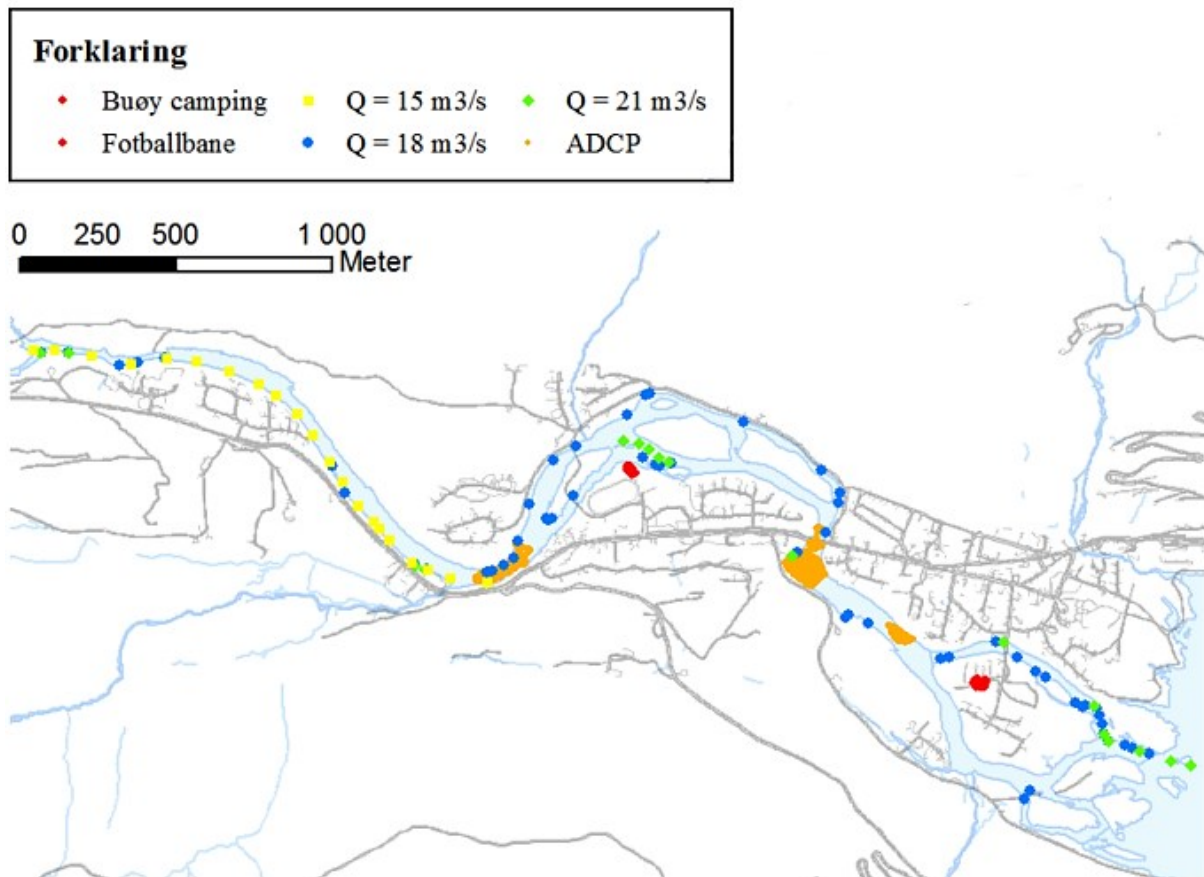


Figur 57: Gyteområder identifisert ved tidligere arbeider av Tranmæl og Midttun (2005) og Wollebæk, Thue og Heggenes (2003) hentet fra Heggenes, Sageie og Kristiansen (2009).



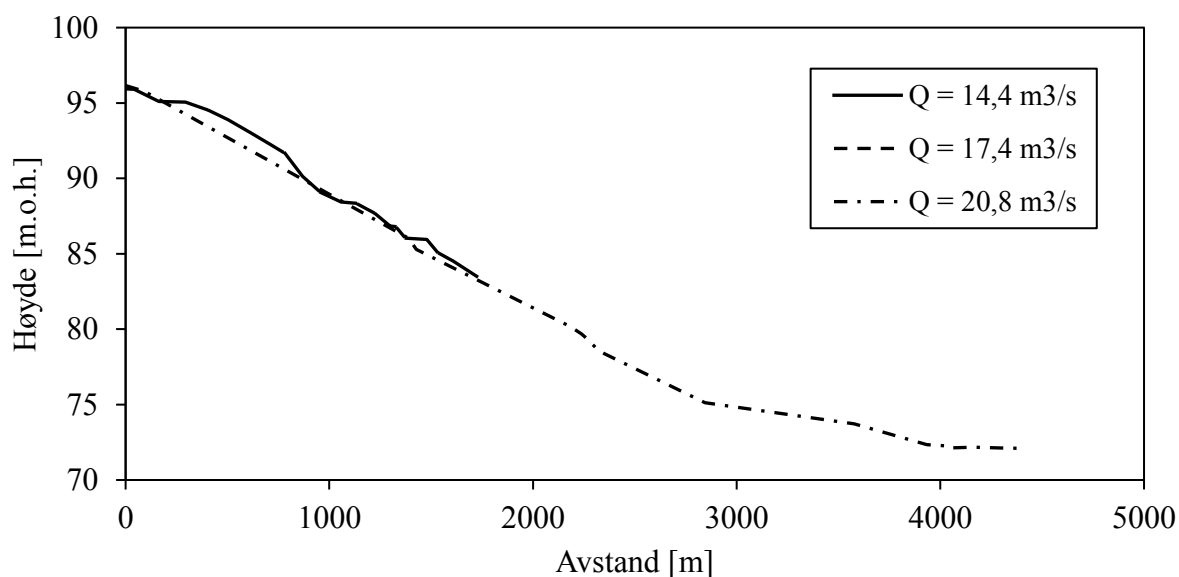
Figur 58: Oversiktskart over gyteområder i Tokkeåi. Fargene forteller i hvilken grad det foregår gyting (Skeie, 2016).

# VEDLEGG D - RESULTATER FRA PROSJEKTOPPGAVE

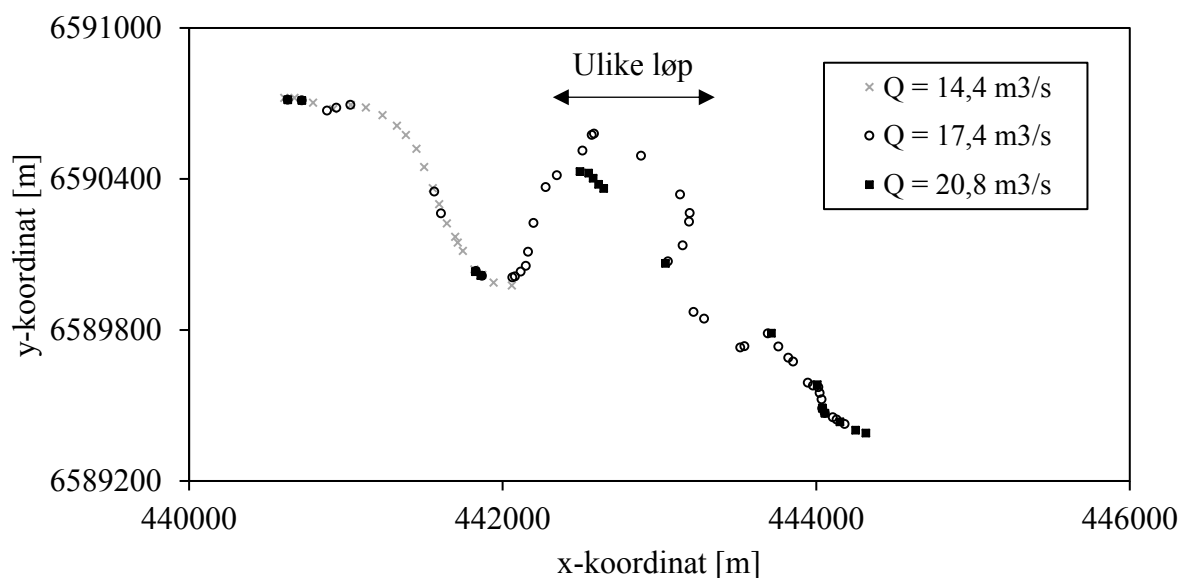


Figur 59: Oversiktsbilde over manuelle målinger gjort i Tokkeåi som resultat av feltturen. GPS-målingene er delt inn for de tre ulike vannlinjemålingene (gul, grønn og blå) og for stikningsmålinger på land (rød), mens de oransje områdene er ADCP-målinger (Skeie, 2016).

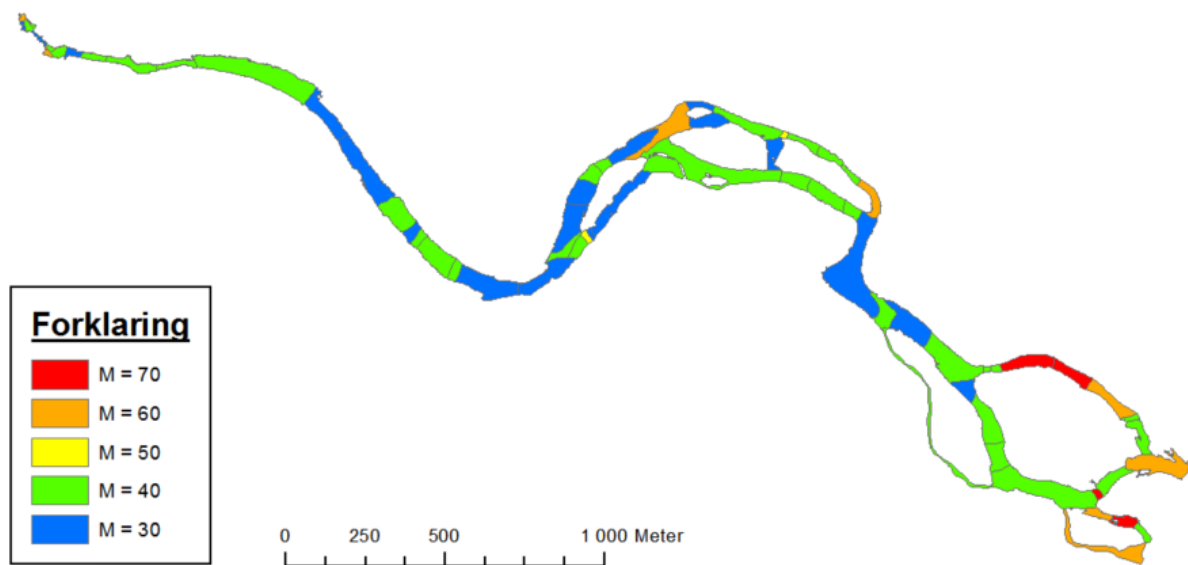




Figur 60: Viser tre vannlinjer for tre ulike vannføringer. Høyden på vannflaten er plottet mot avstand fra et felles referansepunkt oppstrøms. For  $Q = 14,4 \text{ m}^3/\text{s}$  så stopper vannlinjen opp ved omtrent en avstand lik 1800 m, noe som skyldes at vannføringen ikke ble målt for hele lengden av Tokkeåi, slik som er gjort for de to andre vannlinjene (Skeie, 2016).



Figur 61: Oversikt over GPS-målingene fra felttur som er benyttet i vannlinjeberegningene. Ser her at for  $Q = 14,4 \text{ m}^3/\text{s}$  så stopper målingene ved omtrent  $x = 442000$  meter. For området  $x = 442000$  til  $443000$  meter så ble vannlinjen for 17,4 og 20,8  $\text{m}^3/\text{s}$  målt ved forskjellige løp i elven (Skeie, 2016).



Figur 62: Ruhetskart for Tokkeåi. Fargene for de ulike områdene representerer størrelsen av Mannings ruhetskoeffisient for områdene. Grønn betyr lavere ruhetskoeffisient, mens rød betyr høy (Skeie, 2016).

## VEDLEGG E - TABELLER FRA FØLSOMHETSANALYSENE

Tabell 13: Resultat av sammenligning av beregningsmetodene SW og DSW for det *store* området. \*Simuleringen ble gjennomført samtidig som to andre, slik at beregningen fikk ikke utnyttet full datakraft som de andre.

<b>Gittercellestørrelse [m]</b>	<b>1,2</b>		<b>2</b>		<b>5</b>		<b>10</b>	
Antall celler [ $\times 1000$ ]	810		290		48		13	
Bruddlinjer	Uten*	Med	Uten	Med	Uten	Med	Uten	Med
Simuleringstid DSW [timer]	84	73	30	25	9,3	12	6,5	5,6
Simuleringsintervall (SI) [timer]	5	7	10	7	15	15	48	24
DSW/SI [-]	17	10	3,0	3,6	0,62	0,80	0,14	0,23
Simuleringstid SW [timer]	49	105	43	52	18	25	5,5	7
Simuleringsintervall (SI) [timer]	4,0	4,0	7,0	7,0	15	15	15	15
SW/SI [-]	12	26	6,1	7,4	1,2	1,7	0,37	0,47
SW/DSW [-]	0,73	2,5	2,0	2,1	1,9	2,1	2,7	2,0
Gjennomsnittlig avvik [m]	-0,00017	0,012	0,013	0,013	0,060	0,0620	0,014	0,021
Standardavvik [m]	0,0013	0,017	0,019	0,019	0,054	0,058	0,020	0,040
Maksimalt avvik [m]	0,081	0,38	0,19	0,21	0,35	0,41	0,21	0,38
Minimalt avvik [m]	-0,011	-0,062	-0,045	-0,050	-0,12	0,089	-0,082	-0,11

Tabell 14: Resultat av sammenligning av beregningsmetodene SW og DSW for det *lille* området.

<b>Gittercellestørrelse [m]</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Gjennomsnittlig avvik [m]	0,0096	0,011	0,012	0,012	0,016	0,018
Standardavvik [m]	0,010	0,0085	0,0084	0,0089	0,010	0,011

Maksimalt avvik [m]	0,17	0,11	0,097	0,13	0,013	0,11
Minimalt avvik [m]	-0,079	-0,047	-0,039	-0,031	-0,025	-0,011

Tabell 15: Resultatene fra følsomhetsanalyse av bruddlinjer.

Gittercellestørrelse [m]	1,2		2		5		10		
	Med/uten bruddlinjer	Uten	Med	Uten	Med	Uten	Med	Uten	Med
Antall celler [ $\times 1000$ ]		800	810	290	290	45	48	11	13
Gjennomsnittlig avvik [m]		0,012	-	0,00041	-	0,00064	-	0,0039	-
Standardavvik [m]		0,016	-	0,0019	-	0,0071	-	0,040	-
Maksimalt avvik [m]		0,18	-	0,10	-	0,18	-	0,36	-
Minimalt avvik [m]		-0,074	-	-0,19	-	-0,26	-	-0,28	-

Tabell 16: Resultatene fra følsomhetsanalyse av gittercellestørrelser for det lille området.

Gittercellestørrelse [m]	0,25	0,5	0,75	1	2	3
Antall celler [ $\times 1000$ ]	330	83	37	21	5,1	2,3
Simuleringsintervall (SI) [timer]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Simulasjonstid SW [timer]	13,0	3,7	1,3	1,0	0,42	0,17
SW/SI [-]	13	3,7	1,3	1,0	0,42	0,17
Gjennomsnittlig avvik [m]	0,0053	0,0040	0,0032	0,0023	-	-0,0042
Standardavvik [m]	0,0078	0,0065	0,0060	0,0049	-	0,0048
Maksimalt avvik [m]	0,14	0,097	0,077	0,061	-	0,050
Minimalt avvik [m]	-0,098	-0,095	-0,068	-0,054	-	-0,077

Tabell 17: Resultatene fra følsomhetsanalyse av gittercellestørrelser for det store området.

Gittercellestørrelse [m]	1,2	2	5	10
Antall celler [ $\times 1000$ ]	810	290	48	13
Simuleringsintervall (SI) [timer]	4	7	15	15
Simulasjonstid SW [timer]	105	52	25	7
SW/SI [-]	26	7,4	1,7	0,47
Gjennomsnittlig avvik [m]	-0,0013	-	0,0027	0,050
Standardavvik [m]	0,0062	-	0,016	0,046
Maksimalt avvik [m]	0,088	-	0,24	0,38
Minimalt avvik [m]	-0,13	-	-0,25	-0,19

Tabell 18: Resultat av parameteretest av Mannings ruhetskoeffisient (tabell 1 av 2).

<b>Mannings ruhetskoeffisient [s/m<sup>1/3</sup>]</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>
Simuleringstid SW [timer]	12	11	10	9,8	12
Simuleringsintervall (SI) [timer]	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0
SW/SI [-]	3,9	3,7	3,4	3,3	3,0
Gjennomsnittlig avvik [m]	0,086	0,065	0,043	0,021	-
Standardavvik [m]	0,077	0,057	0,037	0,018	-
Maksimalt avvik [m]	0,41	0,33	0,24	0,15	-
Minimalt avvik [m]	-0,060	-0,06	-0,05	-0,04	-

Tabell 19: Resultat av parameteretest av Mannings ruhetskoeffisient (tabell 2 av 2).

<b>Mannings ruhetskoeffisient [s/m<sup>1/3</sup>]</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,10</b>	<b>0,15</b>	<b>0,20</b>
Simuleringstid SW [timer]	12	9,5	9,2	9,3	9,2	9,2	9,2
Simuleringsintervall (SI) [timer]	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
SW/SI [-]	3,0	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Gjennomsnittlig avvik [m]	-	-0,020	-0,040	-0,060	-0,10	-0,16	-0,21
Standardavvik [m]	-	0,017	0,034	0,049	0,10	0,13	0,19
Maksimalt avvik [m]	-	0,050	0,034	0,029	0,0	0,016	0,19
Minimalt avvik [m]	-	-0,15	-0,19	-0,22	-0,30	-0,58	-0,84

Tabell 20: Resultat fra følsomhetsanalyse av Mannings ruhetskoeffisient for kalibrert modell ved vannføring 17,4 m<sup>3</sup>/s.

<b>Mannings ruhetskoeffisient [s/m<sup>1/3</sup>]</b>	<b>-30%</b>	<b>-20%</b>	<b>-10%</b>	<b>n</b>	<b>+10%</b>	<b>+20%</b>	<b>+30%</b>
Gjennomsnittlig avvik [m]	0,042	0,028	0,014	-	-0,014	-0,027	-0,041
Standardavvik [m]	0,044	0,029	0,014	-	0,013	0,027	0,039
Maksimalt avvik [m]	0,20	0,16	0,13	-	0,038	0,073	0,070
Minimalt avvik [m]	-0,10	-0,089	-0,055	-	-0,090	-0,16	-0,19

Tabell 21: Resultat fra parameteretest av virvelkoeffisienten.

<b>Virvelkoeffisient, D [-]</b>	<b>0</b>	<b>0,5</b>	<b>5</b>
Simulasjonstid SW [timer]	6,0	6,0	5,0
Simuleringsintervall (SI) [timer]	5,8	5,9	4,9

SW/SI [-]	1,0	1,0	1,0
Gjennomsnittlig avvik [m]	-	0,00050	0,0047
Standardavvik [m]	-	0,00078	0,0070
Maksimalt avvik [m]	-	0,012	0,041
Minimalt avvik [m]	-	-0,0092	-0,028

Tabell 22: Resultat fra parameteretest av tidssteg.

Tidssteg [s]	0,1	0,5	1	5	10	60
Maksimal vannhastighet [m/s]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
$\Delta X$ [m]	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Courant-kriteriet [-]	0,060	0,30	0,60	3,0	6,0	36
Simuleringsintervall (SI) [timer]	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Simulasjonstid (SW) [timer]	2,5	0,67	2,5	11	6,2	1,2
SW/SI [-]	1,7	0,3	1,0	4,4	2,5	0,5
Antall konvergensproblem	0	1	60	420	460	120
Gjennomsnittlig avvik [m]	-	0,0020	0,0041	0,011	0,013	0,017
Standardavvik [m]	-	0,0040	0,0082	0,019	0,020	0,022
Maksimalt avvik [m]	-	0,044	0,079	0,12	0,18	0,22
Minimalt avvik [m]	-	-0,025	-0,025	-0,025	-0,024	-0,037

## VEDLEGG F - SIMULERINGSINNSTILLINGER VED FØLSOMHETSANALYSER

Tabell 23: Oversikt over simulasjonsinnstillinger ved ulike følsomhetsanalyser.

<b>Simulasjonsinnstillinger</b>	<b>Brudd- linje</b>	<b>Celle- størrelse / SW vs. DSW</b>	<b>Mannings ruhetskoeffisient / Coriolis / Theta</b>	<b>Tidssteg</b>	<b>Turbulens</b>
Simulation Time Window [timer]	4,0 - 15	1,0 - 15	3,0-4,0	2,5	3
Computation Interval [s]	0,1	0,1	0,1	<i>Varierer</i>	0,1
Mapping Output Interval [min]	60	10 - 60	30	30	10
Hydrograph Output Interval [min]	60	60	30	60	30
Detailed Output Interval	60	60	30	60	30
Mixed Flow Regime	Slått på	Slått på	Slått på	Slått på	Slått på
<b>2D Flow Options</b>					
Coriolis Effects	Slått av	Slått av	Slått av	Slått av	Slått av
Theta	1	1	1 / 1 / <i>Varierer</i>	1	1
Theta Warmup	1	1	1	1	1
Water Surface Tolerance [m]	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Volume Tolerance [m]	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Maximum Iterations	10000	10000	10000	10000	10000
Equation Set	Full Momen- tum	Full Momen- tum / <i>Varierer</i>	Full Momen- tum	Full Momen- tum	Full Momen- tum
Initial Condition Time [timer]	-	-	-	-	-

Initial Condition Ramp Up Fraction	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Number of Time Slices	1	1	1	1	1
Eddy Viscosity Transverse Mixing Coefficient	0	0	0	0	<i>Variierer</i>
Boundary Condition Volume Check	Slått av	Slått av	Slått av	Slått av	Slått av
Latitude for Coriolis [°]	-	-	- / 59,44 / -	-	-

Forklaringene for begrepene i tabellen er gitt under, basert på informasjon fra brukermanualene for HEC-RAS (USACE, 2016a, 2016b), hvor mer utfyllende informasjon kan finnes.

- **Simulation Time Window** = er tiden i modellen som det skal simuleres over.
- **Computation Interval** = tidssteg i simuleringen.
- **Mapping Output Interval** = hvor ofte resultatkart skal beregnes, som vises i RAS Mapper.
- **Hydrograph Output Interval** = tidssteget som er benyttet i inngangsdata for hydrografen.
- **Detailed Output Interval** = hvor ofte detaljert hydraulisk informasjon skal beregnes.
- **Mixed Flom Regime** = blandet vannføringsregime. Om over- og underkritisk strømning skal benyttes i modellen.
- **Coriolis Effects** = Coriolis-leddet i SW-ligningene. Om det skal benyttes eller ikke i simuleringen.
- **Theta** = faktor for vektning av implisitt løsning av endelig differanse-metode.
- **Theta Warmup** = Theta-verdi som skal benyttes i en oppvarmingsfase av modellen.
- **Water Surface Tolerance** = maksimalt tillatte vannoverflatedifferanse mellom to itereringer. Hvis differansen er lavere enn grenseverdien stopper itereringen.
- **Volume Tolerance** = maksimalt tillatte volumdifferanse mellom to itereringer, omgjort til vannstand ved volum-vannstandgrafen, for at itereringene skal ende.
- **Maximum Iterations** = maksimalt antall itereringer per tidssteg.
- **Equation Set** = beregningsmetoden som skal benyttes, enten SW- (Full Momentum) eller DSW-ligningene (Diffusive Wave).
- **Initial Condition Time** = hvor lengde oppvarming av modellen skal foregå.



- **Initial Condition Ramp Up Fraction** = hvor stor andel av tiden til oppvarming som skal gå med til å fylle vann i modellen slik at forholdene er lik inngangsverdiene.
- **Number of Time Slices** = en faktor som deler opp tidssteget for det todimensjonale området som en andel av valgt verdi. F.eks. 5 vil si at et valgt tidssteg på 0,1 sekund blir delt inn i fem deler, altså blir tidssteget nå  $0,1 \text{ sekunder} / 5 = 0,02 \text{ sekunder}$ .
- **Eddy Viscosity Transverse Mixing Coefficient** = virvelkoeffisienten.
- **Boundary Condition Volume Check** = kontroll av at volum som beveger seg fra et endimensjonalt strømningsområde til et todimensjonalt område (og vice versa) over et tidssteg ikke er mer enn volum tilgjengelig i det todimensjonale området.
- **Latitude of Coriolis** = breddegrad ( $-90^\circ$  til  $90^\circ$ ) på området for beregning av parameteren i Corioliskraften.

# VEDLEGG G - MANNING RUHETSKOEFFISIENTER VED KALIBRERTE VANNFØRINGER

Tabell 24: Mannings ruhetskoeffisienter for de ulike Manningsområdene ved ulike kalibrerte vannføringer.

Manningsområde	Vannføring [m <sup>3</sup> /s]			Manningsområde	Vannføring [m <sup>3</sup> /s]		
	17,4	14,4	9,6		17,4	14,4	9,6
<b>Base</b>	0,035		0,03	<b>35</b>	0,105		0,12
<b>0</b>	0,5		0,5	<b>36</b>	0,112		0,112
<b>1</b>	0,02		0,02	<b>37</b>	0,05		0,05
<b>2</b>	0,09		0,09	<b>38</b>	0,05		0,05
<b>3</b>	0,112	0,15	0,112	<b>39</b>	0,052		0,06
<b>4</b>	0,125		0,2	<b>40</b>	0,07		0,065
<b>5</b>	0,06		0,06	<b>41</b>	0,04		0,01
<b>6</b>	0,07		0,07	<b>42</b>	0,06		0,04
<b>7</b>	0,1		0,13	<b>43</b>	0,04		0,01
<b>8</b>	0,08		0,13	<b>44</b>	0,06		0,03
<b>9</b>	0,2		0,2	<b>45</b>	0,04		0,2
<b>10</b>	0,08		0,12	<b>46</b>	0,06		0,02
<b>11</b>	0,3		0,3	<b>47</b>	0,01		0,1
<b>12</b>	0,3		0,3	<b>48</b>	0,01		0,1
<b>13</b>	0,2		0,2	<b>49</b>	0,01		0,01
<b>14</b>	0,6		0,6	<b>50</b>	0,01		0,015
<b>15</b>	0,06		0,08	<b>51</b>	0,01		0,07
<b>16</b>	0,045		0,06	<b>52</b>	0,04		0,04
<b>17</b>	0,04		0,03	<b>53</b>	0,04		0,05
<b>18</b>	0,08		0,08	<b>54</b>	0,04		0,05
<b>19</b>	0,085		0,1	<b>55</b>	0,04		0,04
<b>20</b>	0,03		0,03	<b>56</b>	0,03	0,12	0,03
<b>21</b>	0,1		0,1	<b>57</b>	0,02	0,1	0,03
<b>22</b>	0,06		0,08	<b>58</b>	0,12	0,18	0,14
<b>23</b>	0,2		0,2	<b>59</b>	0		0,15

<b>24</b>	0,03		0,05	<b>60</b>	0,18		0,18
<b>25</b>	0,5		0,5	<b>61</b>	0,05		0,05
<b>26</b>	0,1	0,01	0,1	<b>62</b>	0,07		0,15
<b>27</b>	0,08	0,01	0,08	<b>63</b>	0,05		0,07
<b>28</b>	0,06	0,07	0,06	<b>64</b>	0,05		0,04
<b>29</b>	0,01	0,155	0,01	<b>65</b>	0,01	0,12	0,03
<b>30</b>	0,07	0,05	0,07	<b>66</b>	0,04	0,09	0,01
<b>31</b>	0,155	0,1	0,155	<b>67</b>	0,12	0,07	0,15
<b>32</b>	0,06	0,17	0,06	<b>68</b>	0,09	0,1	0,13
<b>33</b>	0,13	0,13	0,14	<b>69</b>	0,07		0,1
<b>34</b>	0,15	0,15	0,15	<b>70</b>	0,1		0,11

---

# VEDLEGG H - PROBLEMATISKE KALIBRERRINGSOMRÅDER

---



a)



b)



c)



d)



e)

Figur 63 a) - e): Områder hvor det var problemer med å kalibrere den hydrauliske modellen mot yttergrense for vannoverflate for vannføring  $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Gul strek viser omrisset av vannoverflate for vannføring  $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$  og blåfargen viser simulert vannstand, hvor mørkere blåfarge betyr dypere vannstand.



Figur 64 a) – d): Områder hvor det var vanskelig å få god tilpasning av kalibreringen for vannføring  $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Blåfargen viser simulerte vannstand, hvor jo mørkere farge jo dypere er vannet. Tallene i rød farge viser målt høydeverdi i felt, mens tallet i sort viser simulert høyde.

# VEDLEGG I - EFFEKTKJØRINGSSCENARIOER

---

## Utplukkede hendelser

Vinter- og sommerscenarioene ble simulert ved bruk av vannføringsdata vist i

Tabell 25: Hydrograf for vinter- og sommerscenarioene som ble plukket ut fra vannføringskurven.

Tid	Vannføring [m <sup>3</sup> /s]		Tid	Vannføring [m <sup>3</sup> /s]	
	Vinter	Sommer		Vinter	Sommer
<b>0:00</b>	14,2	12,8	<b>4:15</b>	1,7	5,7
<b>0:15</b>	14,2	12,8	<b>4:30</b>	1,7	5,7
<b>0:30</b>	14,2	12,8	<b>4:45</b>	1,7	5,7
<b>0:45</b>	14,2	12,8	<b>5:00</b>	1,7	5,7
<b>1:00</b>	14,2	12,8	<b>5:15</b>	1,7	5,7
<b>1:15</b>	14,2	12,8	<b>5:30</b>	1,7	5,7
<b>1:30</b>	14,2	12,8	<b>5:45</b>	1,7	5,7
<b>1:45</b>	14,2	12,8	<b>6:00</b>	1,7	5,7
<b>2:00</b>	14,2	12,8	<b>6:15</b>	1,7	5,7
<b>2:15</b>	14,2	12,8	<b>6:30</b>	1,7	5,7
<b>2:30</b>	14,2	12,8	<b>6:45</b>	1,7	5,7
<b>2:45</b>	14,2	12,8	<b>7:00</b>	1,7	5,7
<b>3:00</b>	14,2	12,8	<b>7:15</b>	1,7	5,7
<b>3:15</b>	14,2	7,0	<b>7:30</b>	1,7	5,7
<b>3:30</b>	14,2	7,0	<b>7:45</b>	1,7	5,7
<b>3:45</b>	14,2	7,0	<b>8:00</b>	1,7	5,7
<b>4:00</b>	14,2	7,0			

## Persentilsimuleringer etter verdier fra COSH-Tool

Simuleringene for de fire persentilene ble gjennomført ved at hydrografen (timesoppløsning) for simuleringen bestod av fire timer med vannføringen før ( $Q_{maks}$ ) etterfulgt av vannføringen etter ( $Q_{min}$ ) i fire nye timer. Ved å ha en periode på fire timer for hver av vannføringene ble det

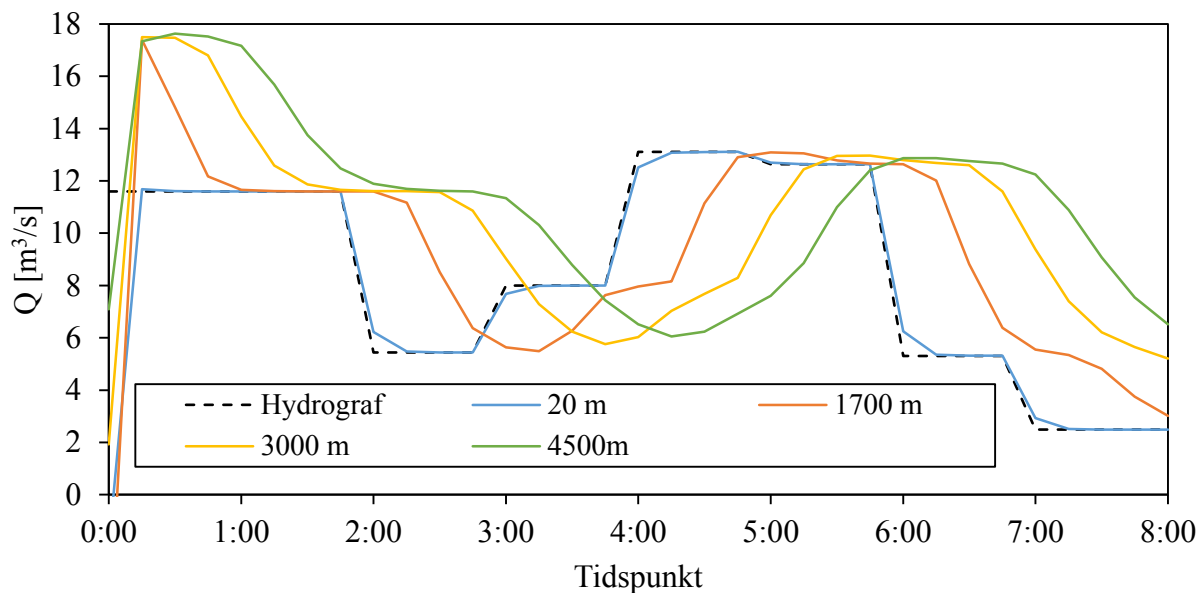
oppnådd en stabil vannføring for hele elven, slik at behandlingen av resultatene i ettertid i ArcMap ble enklere. De ulike vannføringene som ble brukt er vist under i tabell 26.

Tabell 26: Vannføringer før og etter effektkjøringssimulering for de ulike persentilene, hvor vannføringsdata er lest av medianverdiene (rød strek i boksplottet) i figur 70, figur 78, figur 85 og figur 94 i Vedlegg O.

<b>Persentiler øvre/nedre (%)</b>	<b>90/10</b>	<b>93/7</b>	<b>96/4</b>	<b>99/1</b>
$Q_{maks}$ [m <sup>3</sup> /s]	15	15	14	14
$Q_{min}$ [m <sup>3</sup> /s]	13	12,5	11	9,0
$\Delta Q$ [m <sup>3</sup> /s]	2,0	2,5	3,0	5,0



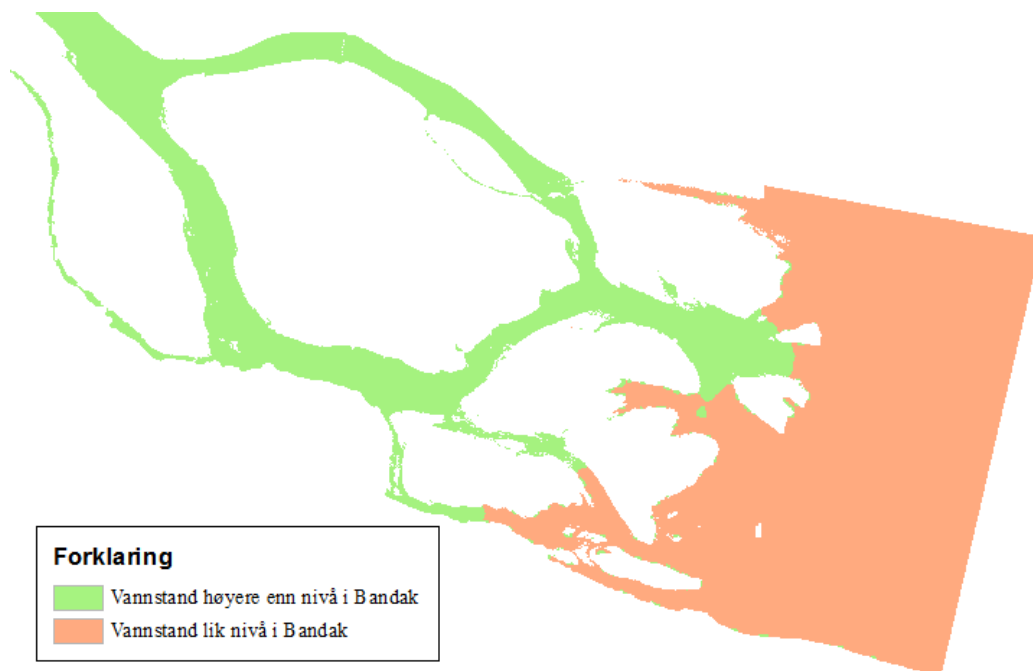
## VEDLEGG J - VANNFØRINGSKURVEUTVIKLING I TOKKEÅI



Figur 65: Vannføringskurver for ulike steder i Tokkeåi, hvor kurvene representerer avstander fra starten av strømningsområdet. Hydrograf tilsvarer her vannføringsserien som ble brukt som inngangsdata i simuleringen. Vannføringsdata som er benyttet er basert på en identifisert effektkjøringshendelse som ikke ble benyttet for vurdering av effektkjøringspåvirkning. På grunn av mange endringer i vannføring ble hendelsen benyttet for å vise demping/utjevning og forsinkelse/forskyvning av topp-/bunnverdier.

## VEDLEGG K - PÅVIRKNING AV VANNSTAND I BANDAK FOR VANNSTAND I TOKKEÅI

---



Figur 66: Kartutsnitt av område hvor nedre del av Tokkeåi munner ut i Bandak, som viser hvilke områder i strømningsområdet som har samme vannstand som valgt vannstand i Bandak (her: 72,25 m.o.h.). Rød farge representerer områder med samme vannoverflatenivå som Bandak, mens grønn farge for områder med vannoverflater som ligger høyere enn Bandak.

## VEDLEGG L - RESULTAT AV VURDERING AV DIVERSE EFFEKTKJØRINGSPÅVIRNINGER

Tabell 27: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved utplukket vinterscenario.

Område	Elv	Gyteområde			
		1	2	3	Samlet
Areal etter ( $Q = 1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) [ $\text{m}^2$ ]	228995	3284	6191	3920	13396
Areal før ( $Q = 14,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) [ $\text{m}^2$ ]	302136	3939	7118	4053	15110
$\Delta A$ [ $\text{m}^2$ ]	73141	655	926	133	1714
Tørrlagt areal [%]	24	17	13	3,3	11
WSEL før [m.o.h.]	-	85,862	80,642	74,408	-
WSEL etter [m.o.h.]	-	85,434	80,374	74,139	-
$\Delta WSEL$ [m]	-	0,428	0,268	0,269	-
$0,9 \times \Delta WSEL$ [m]	-	0,385	0,241	0,242	-
WSEL før - $0,9 \times \Delta WSEL$ [m.o.h.]	-	85,476	80,401	74,166	-
Tidspunkt før [timer]	-	3,3	3,5	3,8	-
Tidspunkt etter [timer]	-	4,4	5,2	6,1	-
$\Delta T$ [timer]	-	1,2	1,7	2,3	-
Senkningshastighet [cm/t]	-	37	16	12	22

Tabell 28: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved utplukket sommerscenario.

Område	Elv	Gyteområde			
		1	2	3	Samlet
Areal etter ( $Q = 5,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) [ $\text{m}^2$ ]	272489	3758	6861	4006	14626
Areal før ( $Q = 12,8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) [ $\text{m}^2$ ]	298982	3915	7096	4048	15059
$\Delta A$ [ $\text{m}^2$ ]	26493	156	235	41	433
Tørrlagt areal [%]	8,9	4,0	3,3	1,0	2,9
WSEL før [m.o.h.]	-	85,834	80,620	74,384	-
WSEL etter [m.o.h.]	-	85,635	80,506	74,250	-
$\Delta WSEL$ [m]	-	0,199	0,114	0,135	-

0,9×ΔWSEL [m]	-	0,179	0,103	0,121	-
WSEL før - 0,9×ΔWSEL [m.o.h.]	-	85,655	80,518	74,263	-
Tidspunkt før [timer]	-	3,3	3,5	3,8	-
Tidspunkt etter [timer]	-	4,8	5,2	5,8	-
ΔT [timer]	-	1,5	1,7	2,0	-
Senkningshastighet [cm/t]	-	13	6,9	6,7	8,9

Tabell 29: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved 90/10 %-persentilen.

Område	Elv	Gyteområde			
		1	2	3	Samlet
Areal etter (Q = 13 m <sup>3</sup> /s) [m <sup>2</sup> ]	299445	3918	7099	4048	15066
Areal før (Q = 15 m <sup>3</sup> /s) [m <sup>2</sup> ]	303798	3953	7128	4056	15137
ΔA [m <sup>2</sup> ]	4352	35	29	7	71
Tørrlagt areal [%]	1,4	0,88	0,41	0,18	0,47
WSEL før [m.o.h.]	-	85,879	80,651	74,421	-
WSEL etter [m.o.h.]	-	85,835	80,624	74,388	-
ΔWSEL [m]	-	0,044	0,027	0,033	-
0,9×ΔWSEL [m]	-	0,040	0,024	0,030	-
WSEL før - 0,9×ΔWSEL [m.o.h.]	-	85,839	80,627	74,391	-
Tidspunkt før [timer]	-	3,3	3,6	3,9	-
Tidspunkt etter [timer]	-	4,4	4,8	5,3	-
ΔT [timer]	-	1,1	1,2	1,4	-
Senkningshastighet [cm/t]	-	4,1	2,3	2,4	2,9

Tabell 30: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved 93/7 %-persentilen.

Område	Elv	Gyteområde			
		1	2	3	Samlet
Areal etter (Q = 12,5 m <sup>3</sup> /s) [m <sup>2</sup> ]	298231	3909	7091	4046	15047
Areal før (Q = 15 m <sup>3</sup> /s) [m <sup>2</sup> ]	303798	3953	7128	4056	15137
ΔA [m <sup>2</sup> ]	5566	43	38	9	90
Tørrlagt areal [%]	1,8	1,1	0,53	0,23	0,60

WSEL før [m.o.h.]	-	85,880	80,653	74,421	-
WSEL etter [m.o.h.]	-	85,824	80,619	74,379	-
$\Delta$ WSEL [m]	-	0,056	0,034	0,042	-
$0,9 \times \Delta$ WSEL [m]	-	0,050	0,031	0,038	-
WSEL før - $0,9 \times \Delta$ WSEL [m.o.h.]	-	85,830	80,622	74,383	-
Tidspunkt før [timer]	-	3,4	3,6	3,9	-
Tidspunkt etter [timer]	-	4,4	4,8	5,3	-
$\Delta$ T [timer]	-	1,0	1,2	1,4	-
Senkningshastighet [cm/t]	-	5,6	2,9	3,0	3,8

Tabell 31: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved 96/4 %-persentilen.

Område	Elv	Gyteområde			
		1	2	3	Samlet
Areal etter ( $Q = 11 \text{ m}^3/\text{s}$ ) [ $\text{m}^2$ ]	297069	3909	7080	4041	15030
Areal før ( $Q = 14 \text{ m}^3/\text{s}$ ) [ $\text{m}^2$ ]	304362	3966	7133	4054	15152
$\Delta$ A [ $\text{m}^2$ ]	7293	57	52	13	122
Tørrlagt areal [%]	2,4	1,4	0,73	0,31	0,81
WSEL før [m.o.h.]	-	85,860	80,640	74,405	-
WSEL etter [m.o.h.]	-	85,789	80,597	74,353	-
$\Delta$ WSEL [m]	-	0,071	0,043	0,052	-
$0,9 \times \Delta$ WSEL [m]	-	0,064	0,038	0,046	-
WSEL før - $0,9 \times \Delta$ WSEL [m.o.h.]	-	85,796	80,601	74,358	-
Tidspunkt før [timer]	-	3,3	3,6	4,0	-
Tidspunkt etter [timer]	-	4,4	4,8	5,4	-
$\Delta$ T [timer]	-	1,1	1,2	1,4	-
Senkningshastighet [cm/t]	-	6,5	3,6	3,6	4,6

Tabell 32: Beregnet tørrlagt areal og senkningshastighet for vannføringene ved 99/1 %-persentilen.

Område	Elv	Gyteområde			
		1	2	3	Samlet
Areal etter ( $Q = 9,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) [ $\text{m}^2$ ]	287040	3850	7011	4026	14887
Areal før ( $Q = 14 \text{ m}^3/\text{s}$ ) [ $\text{m}^2$ ]	301704	3936	7116	4052	15104
$\Delta A$ [ $\text{m}^2$ ]	14664	86	105	27	217
Tørrlagt areal [%]	4,9	2,2	1,5	0,66	1,4
WSEL før [m.o.h.]	-	85,856	80,638	74,405	-
WSEL etter [m.o.h.]	-	85,734	80,566	74,317	-
$\Delta \text{WSEL}$ [m]	-	0,122	0,072	0,088	-
$0,9 \times \Delta \text{WSEL}$ [m]	-	0,110	0,065	0,079	-
WSEL før - $0,9 \times \Delta \text{WSEL}$ [m.o.h.]	-	85,746	80,573	74,325	-
Tidspunkt før [timer]	-	2,3	2,5	3,0	-
Tidspunkt etter [timer]	-	3,5	3,8	4,5	-
$\Delta T$ [timer]	-	1,3	1,3	1,5	-
Senkningshastighet [cm/t]	-	9,8	5,8	5,9	7,1

Tabell 33: Komplet utregning av tørrlagt areal og senkningshastighet for «verste-tilfelle»-scenarioet, hvor vannføringen endres fra 18 til 4 m<sup>3</sup>/s.

Område	Elv	Gyteområde			
		Gyte1	Gyte2	Gyte3	Samlet
Areal etter (Q = 4,0 m <sup>3</sup> /s) [m <sup>2</sup> ]	259797	3658	6690	3989	14338
Areal før (Q = 18 m <sup>3</sup> /s) [m <sup>2</sup> ]	309410	4004	7165	4067	15236
$\Delta A$ [m <sup>2</sup> ]	49614	346	475	78	899
Tørrlagt areal [%]	16	8,6	6,6	1,9	5,9
WSEL før [m.o.h.]	-	85,945	80,698	74,469	-
WSEL etter [m.o.h.]	-	85,568	80,468	74,210	-
$\Delta WSEL$ [m]	-	0,377	0,230	0,259	-
0,9 $\times\Delta WSEL$ [m]	-	0,339	0,207	0,233	-
WSEL før - 0,9 $\times\Delta WSEL$ [m.o.h.]	-	85,606	80,491	74,236	-
Tidspunkt før [timer]	-	3,2	3,3	3,7	-
Tidspunkt etter [timer]	-	3,9	4,3	5,2	-
$\Delta T$ [timer]	-	0,75	1,0	1,5	-
Senkningshastighet [cm/t]	-	50	23	17	30

# VEDLEGG M - FORHOLD MELLOM VANNDEKT AREAL OG VANNFØRING

Tabell 34: Resultat for vanndekning og tørrlegging av elven og spesifikke gyteområder for ulike vannføring simulert i HEC-RAS for Tokkeåi. For gyteområdene er andel tørrlagt areal beregnet for den samlede verdien.

Vannføring [m <sup>3</sup> /s]	Vanndekt areal (Tokkeåi) [m <sup>2</sup> ]	Andel vanndekt areal (Tokkeåi) [%]	Andel tørrlagt areal (Tokkeåi) [%]	Gyteområde [m <sup>2</sup> ]				Andel tørrlagt areal (gyteområder) [%]	Kommentar
				1	2	3	Samlet		
20	307172	100	0,0	4029	7187	4049	15264	0,0	Ingen endring i vannføring. Hele elven vanndekt, m.a.o. gyteområdene også. Kalibrert vannføring.
17,4	303247	99	1,3	3991	7154	4041	15185	0,52	Vannstand i Bandak 71,97 m.o.h. Fra dynamisk kjøring,
15	303798	99	1,1	3966	7133	4054	15152	0,74	slik at den kan være noe usikker.
14	301704	98	1,8	3936	7116	4052	15104	1,0	Som forrige ...
13	299445	97	2,5	3918	7099	4048	15066	1,3	Som forrige ...
12,5	298231	97	2,9	3909	7091	4046	15047	1,4	Som forrige ...
11	297069	97	3,3	3909	7080	4041	15030	1,5	Som forrige ...
9,6	290260	94	5,5	3857	7021	4033	14911	2,3	Kalibrert vannføring. Vannstand i Bandak 72,25 m.o.h. Fra dynamisk kjøring,
9	287040	93	6,6	3850	7011	4026	14887	2,5	slik at den kan være noe usikker.

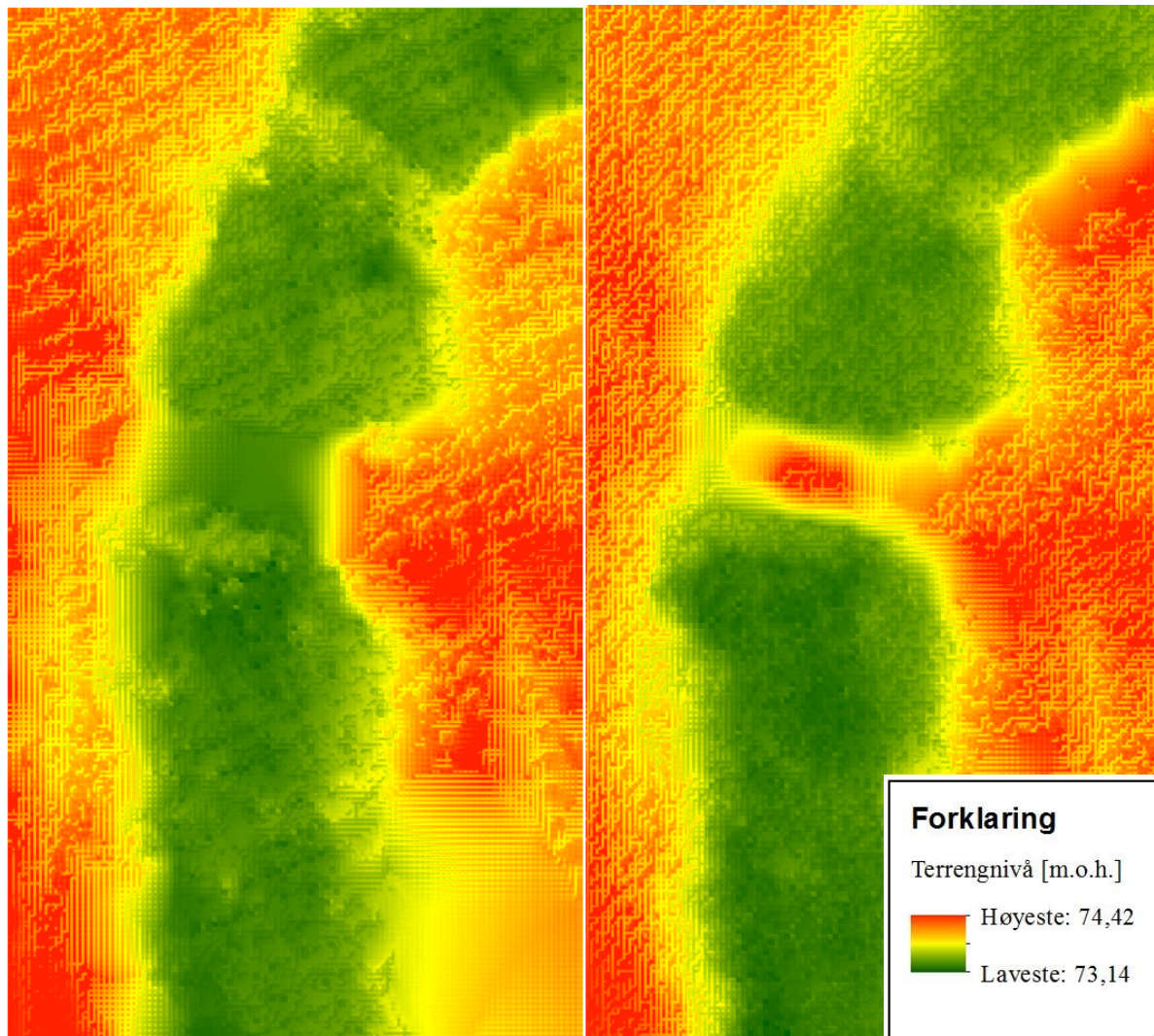


6	274326	89	11	3771	6881	4009	14660	4,0	
5	270680	88	12	3753	6825	4002	14580	4,5	Vannstand i Bandak 72 m.o.h.
4	262516	85	15	3684	6717	3990	14392	5,7	Fra dynamisk kjøring, slik at den kan være noe usikker.
3,5	254674	83	17	3611	6615	3981	14208	6,9	
1	206557	67	33	3007	5877	3716	12600	17	Ruhetskoeffisienter fra 17,4m3s kalibreringen ble benyttet ved et uhell.
0,5	192480	63	37	2707	5362	3727	11796	23	

---

## VEDLEGG N - TERRENGMODELLER VED TERSKEL HAGUSJÅKANALEN

---



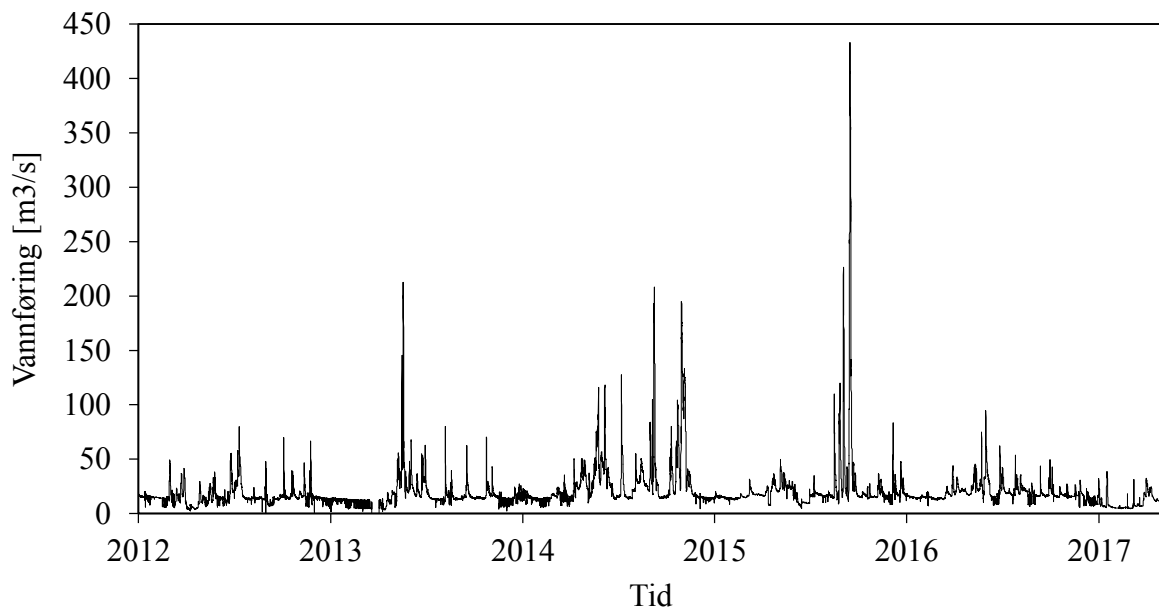
Figur 67: Kartutsnitt som viser terskel ved Hagusjøkanalen ved LIDAR-skanning i 2015 (til venstre) og 2016 (til høyre).

## VEDLEGG O - RESULTATPLOT FRA COSH-TOOL

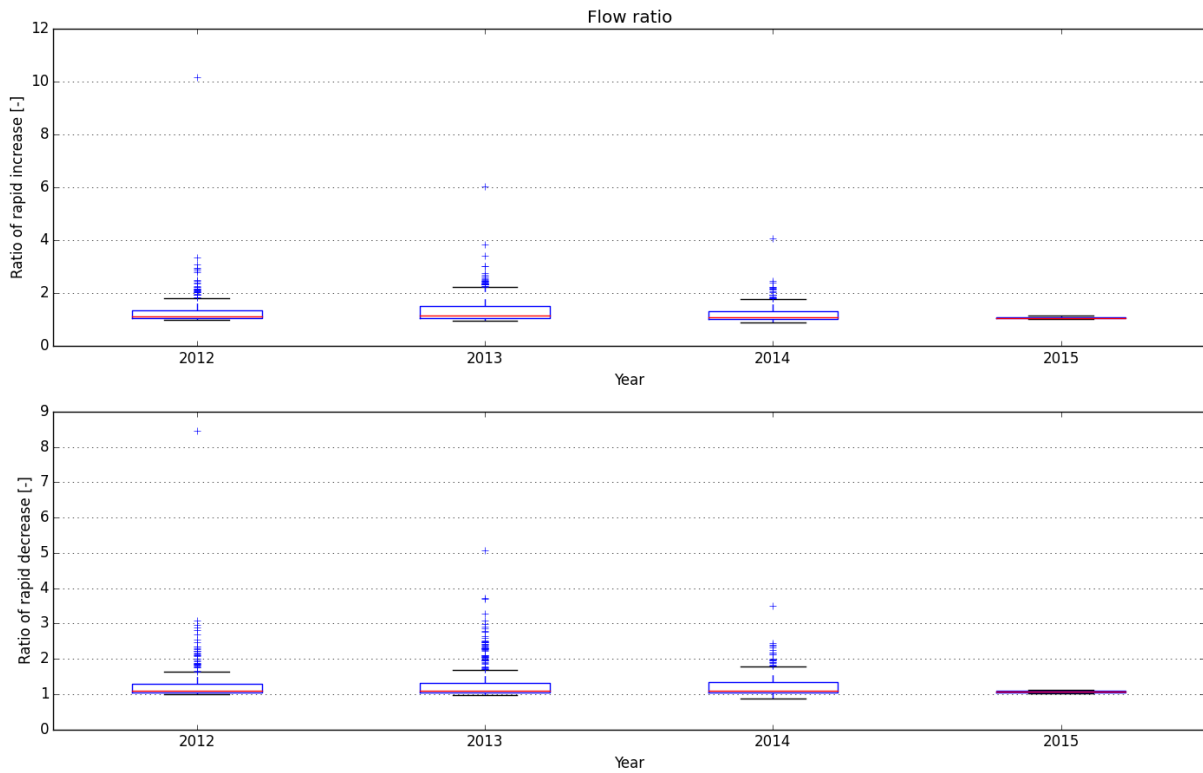
---

Nedenfor er de ulike resultatplottene for persentilene 90, 93, 96 og 99 % fra COSH-Tool vist. En liten forklaring av plottene er gitt her:

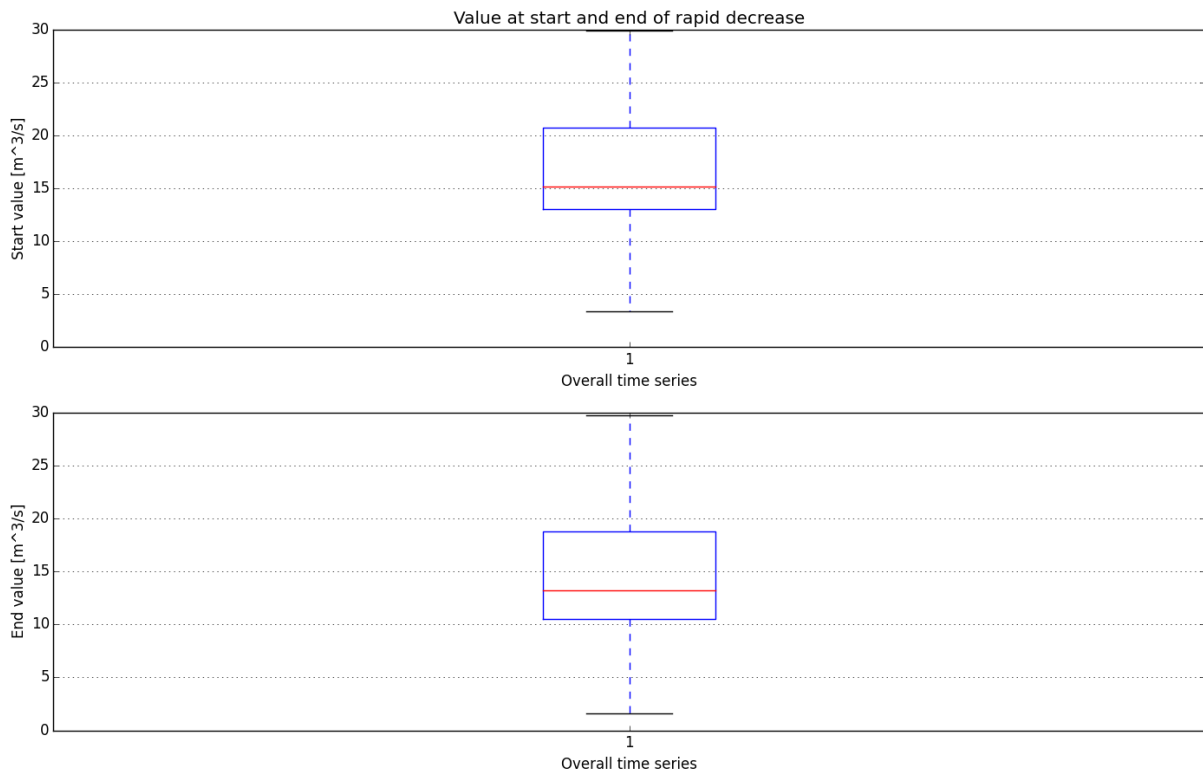
- **Flow Ratio** = Forhold mellom Qmaks og Qmin. Boksplottets øvre og nedre grense viser 25 og 75 % persentilene, altså vil intervallet i mellom inneholde 50 % av verdiene. Medianverdien er vist ved rød strek, som er lagt til grunn for vurderingene.
- **Value at start and end of decrease** = vannføringsverdiene før og etter en vannføringsreduksjon ved effektkjøring skjer. Boksplottets øvre og nedre grense viser 25 og 75 % persentilene, altså vil intervallet i mellom inneholde 50 % av verdiene. Medianverdien er vist ved rød strek, som er lagt til grunn for vurderingene.
- **Number of peaking event per hour** = Antall raske vannføringsendringer som skjer innenfor et viss tidsrom (time) i løpet av dagen basert på alle vannføringsendringer.
- **Number of peaks per day** = Antall raske vannføringsendringer som foregår i løpet av en dag, samt antall dager per år/periode.



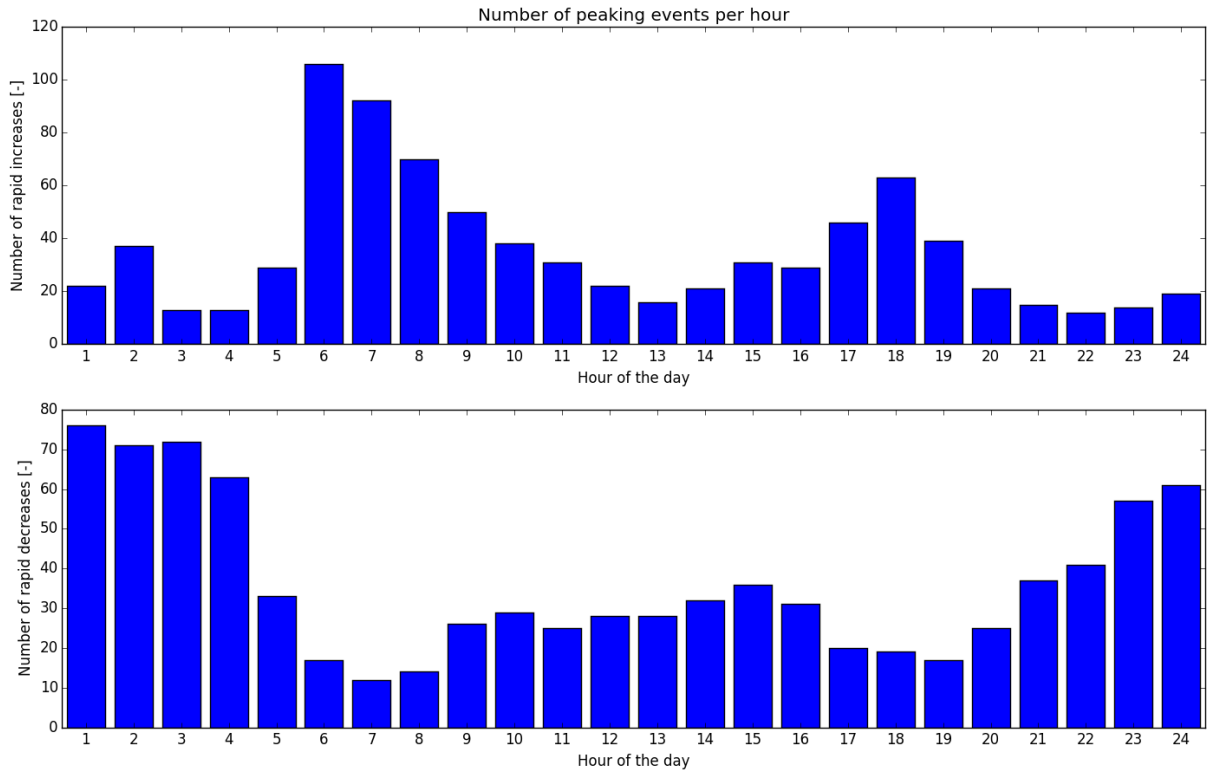
Figur 68: Vannføringsserie fra 1.1.2012-2.5.2017 med timesverdier for vannføring benyttes til vurdering av effektkjøringshendelser. Fra målestasjon Elvarheim (Nr. 16.117.0). Datagrunnlag fra NVE.



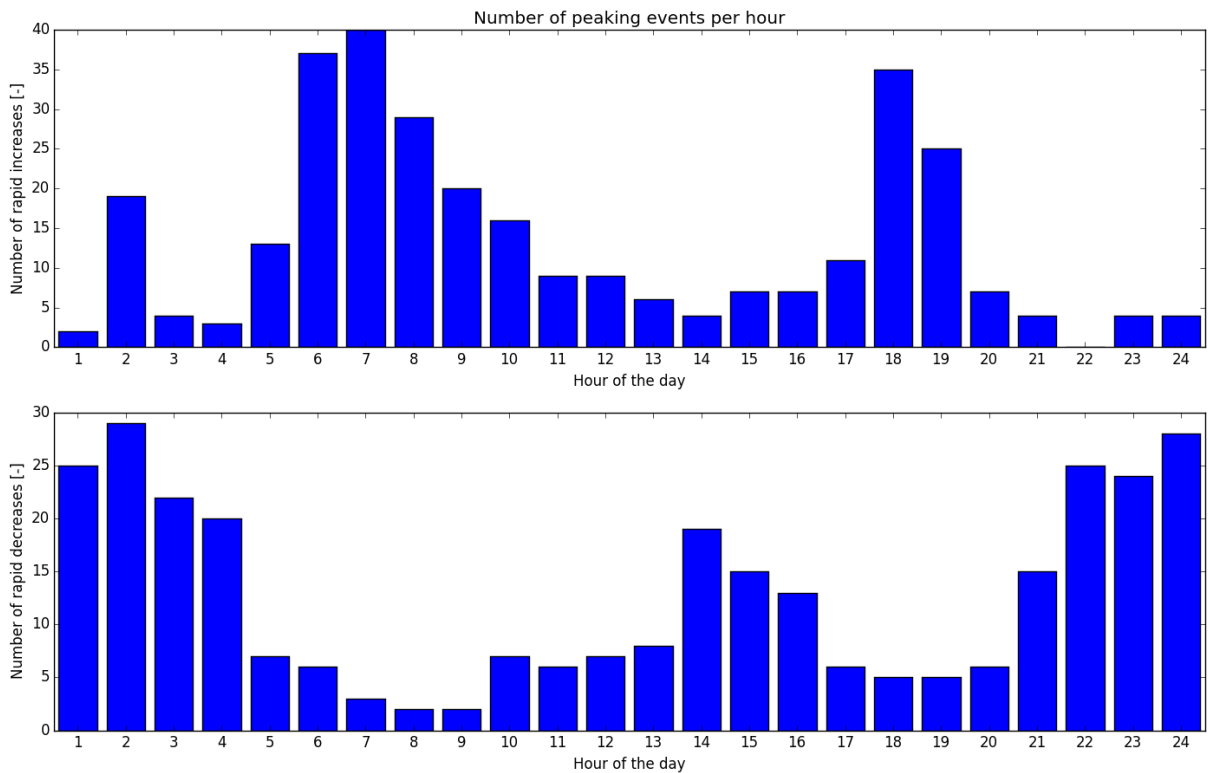
Figur 69: Årlig forhold mellom Qmaks og Qmin ved rask endring (90-persentil).



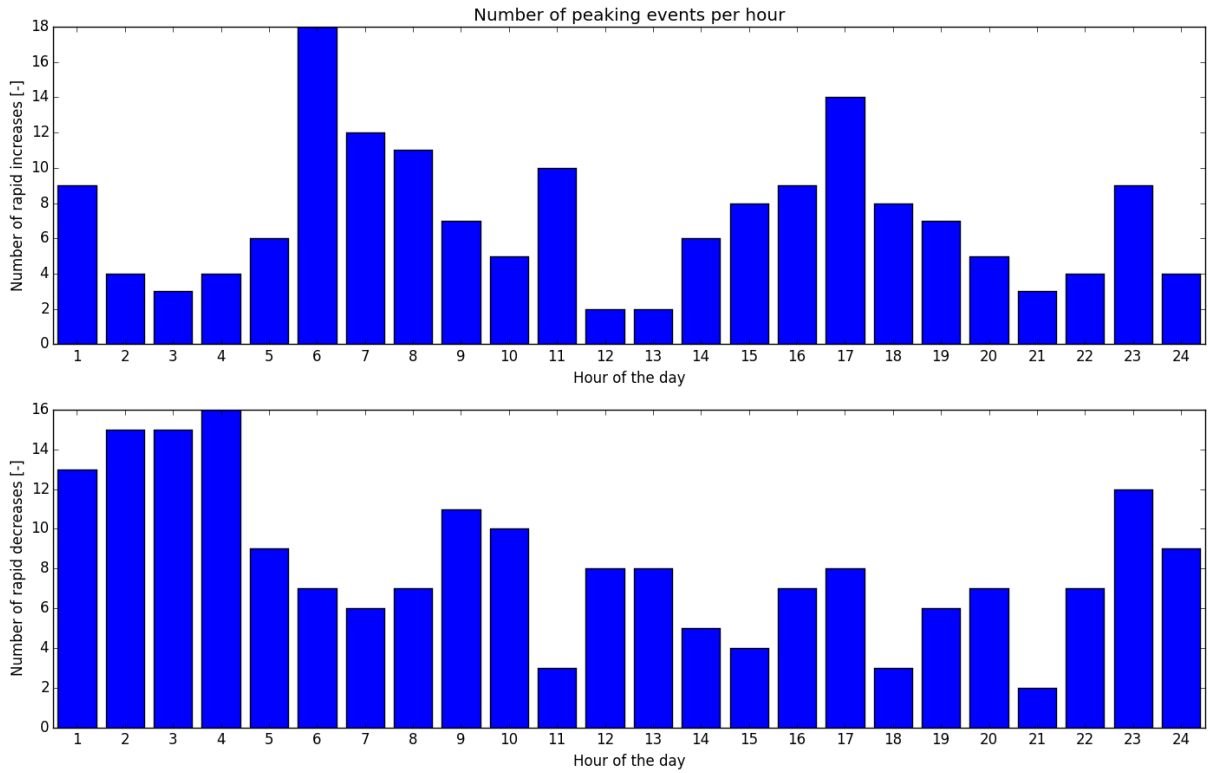
Figur 70: Vannføringsverdier før og etter rask reduksjon (90-persentil).



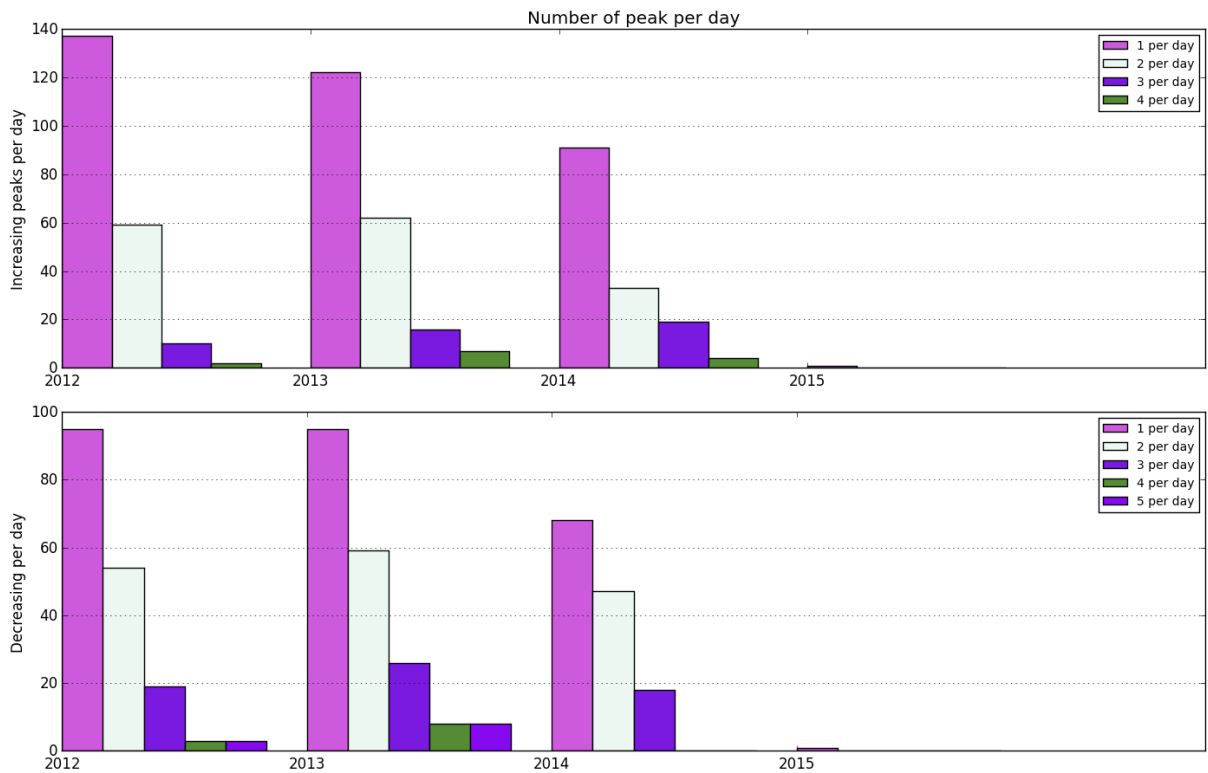
Figur 71: Antall raske hendelser over døgnet basert på hele analyseperioden (90-persentil).



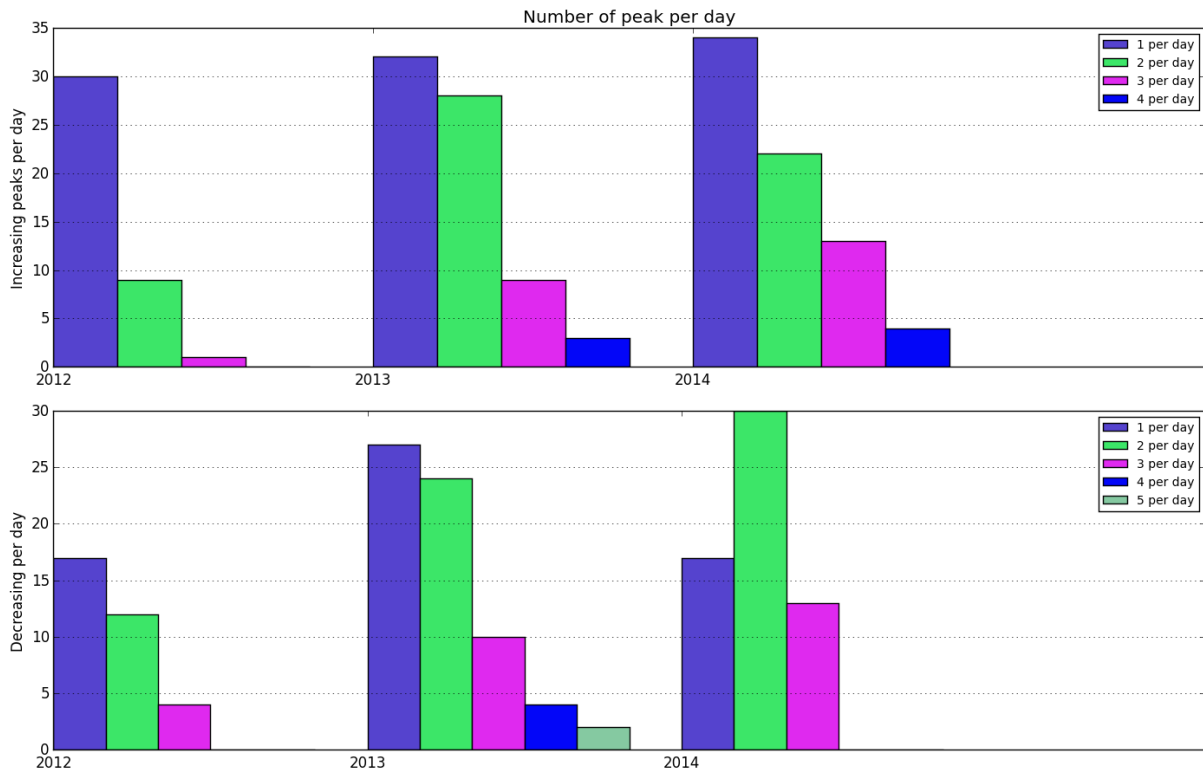
Figur 72: Antall raske hendelser over døgnet basert på vinterperiodene (90-persentil).



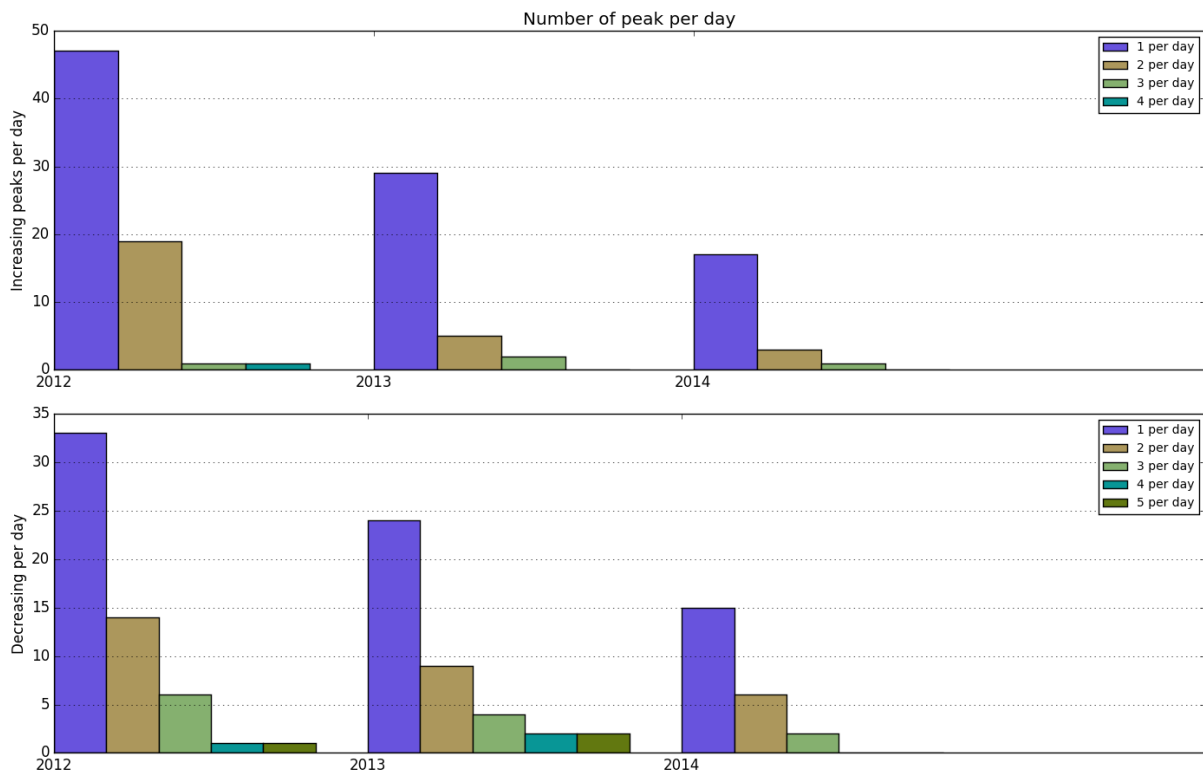
Figur 73: Antall raske hendelser over døgnet basert på sommerperiodene (90-persentil).



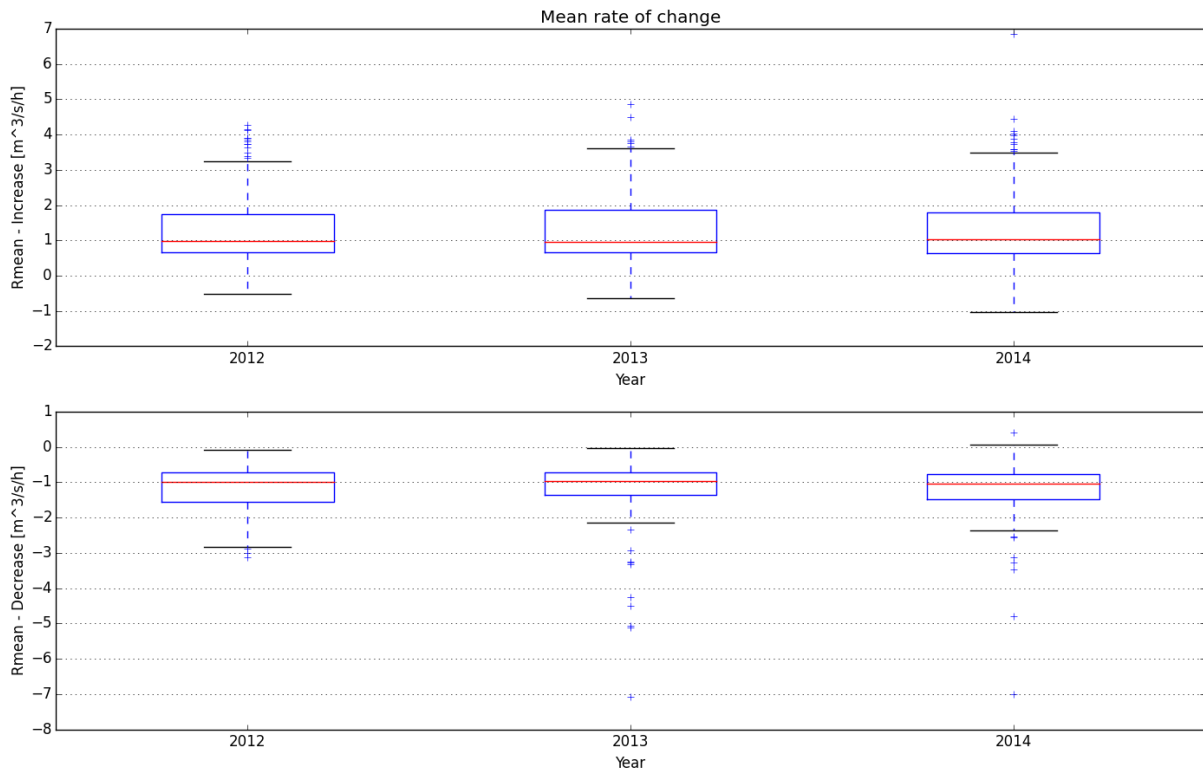
Figur 74: Antall raske hendelser per år basert på hele analyseperioden (90-persentil).



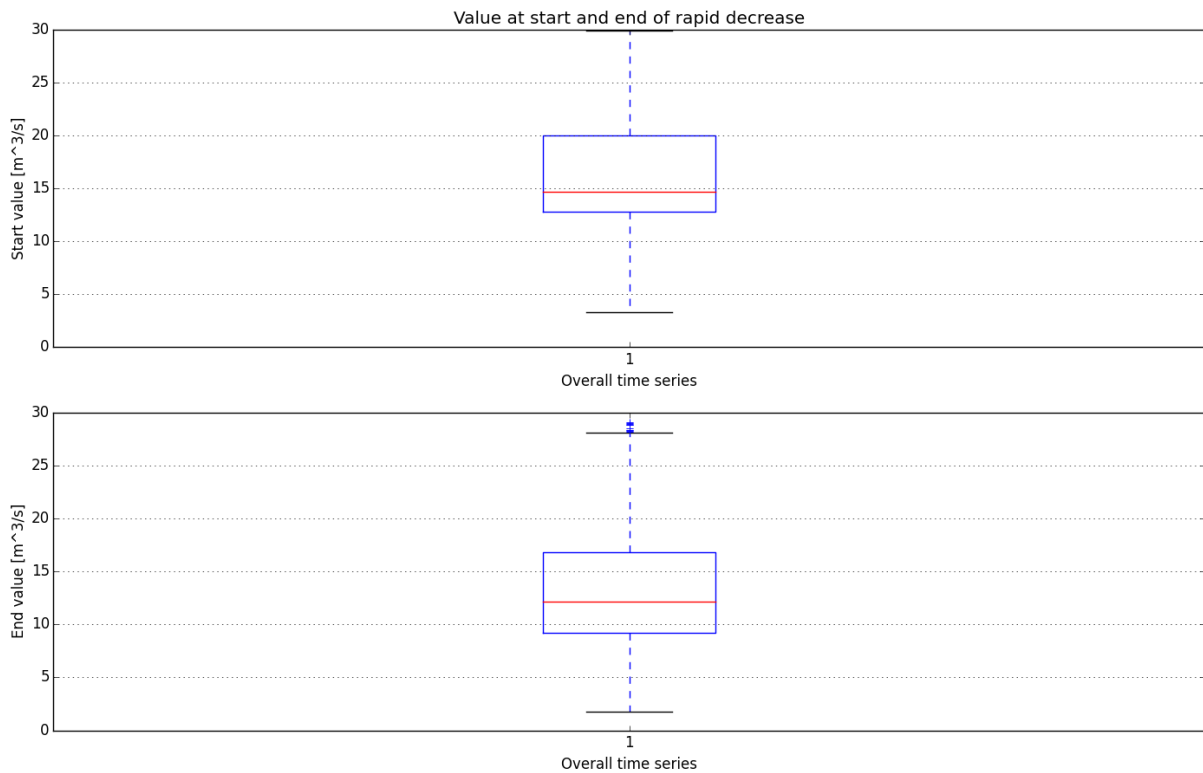
Figur 75: Antall raske hendelser per år basert på vinterperioden (90-persentil).



Figur 76: Antall raske hendelser per år basert på sommerperioden (90-persentil).

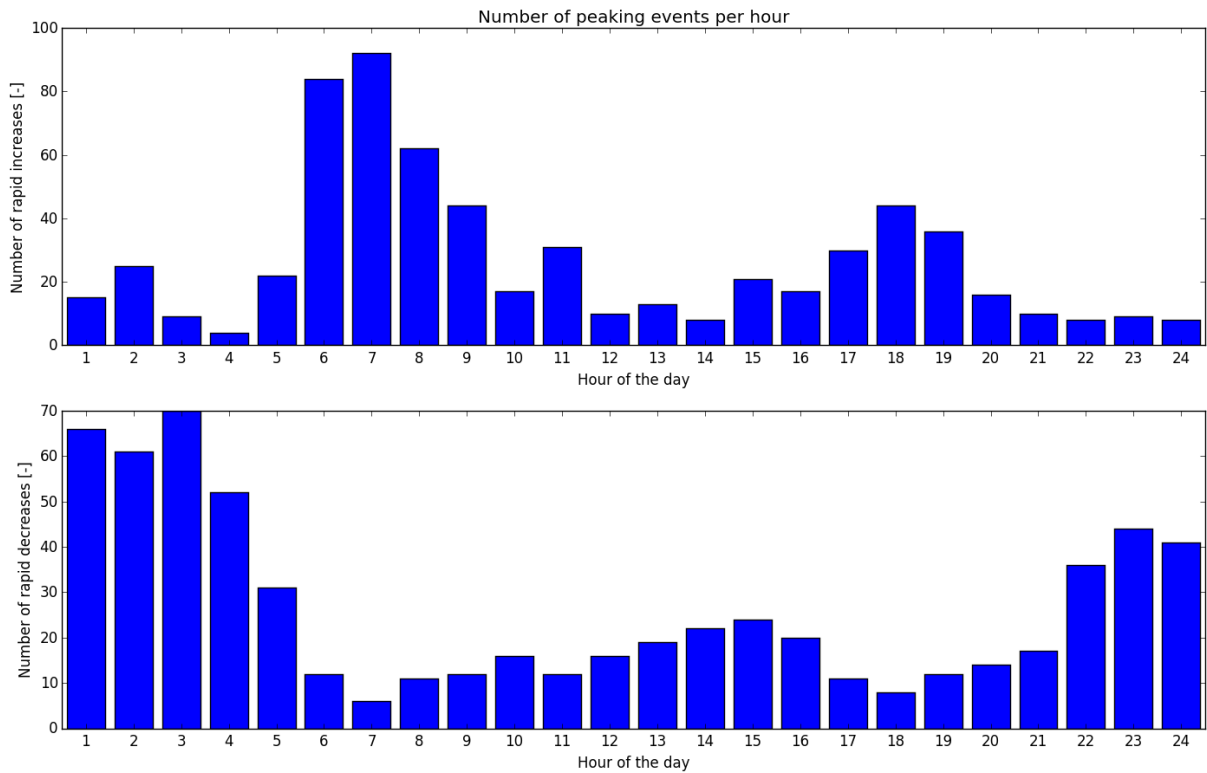


Figur 77: Årlig forhold mellom Qmaks og Qmin ved rask endring (93-persentil).

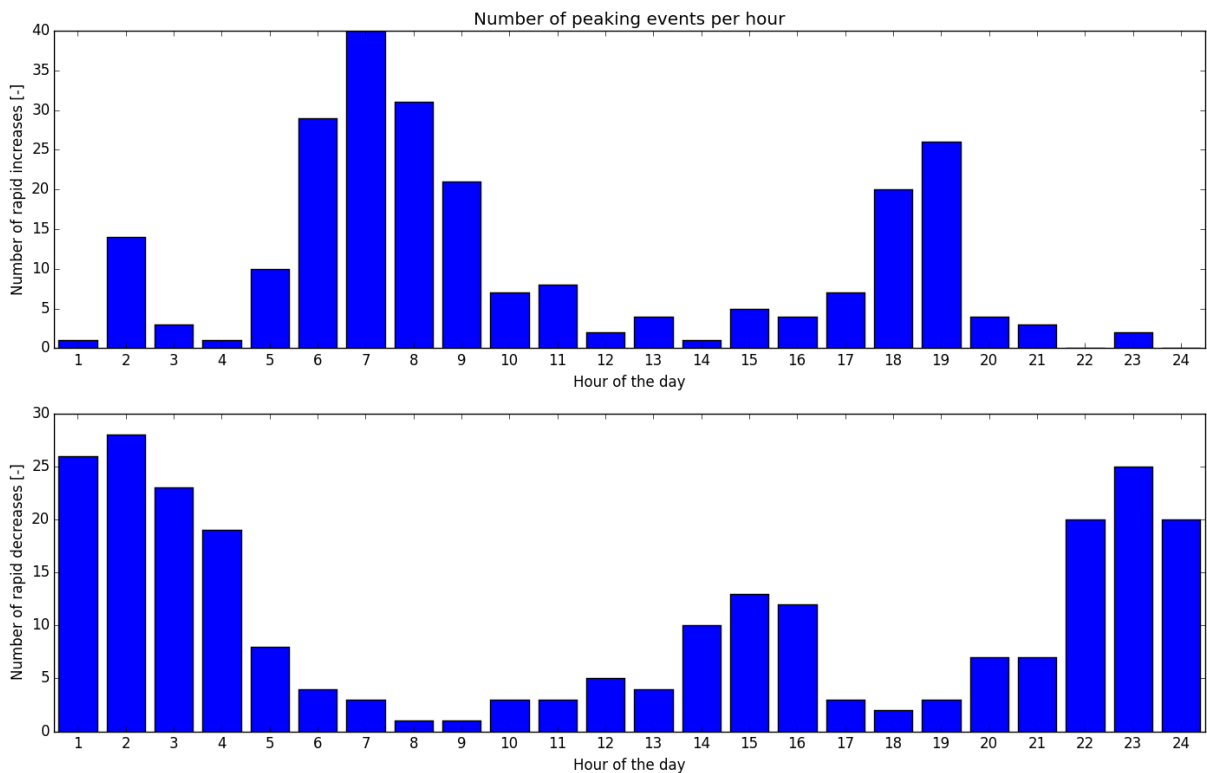


Figur 78: Vannføringsverdier før og etter rask reduksjon (93-persentil).

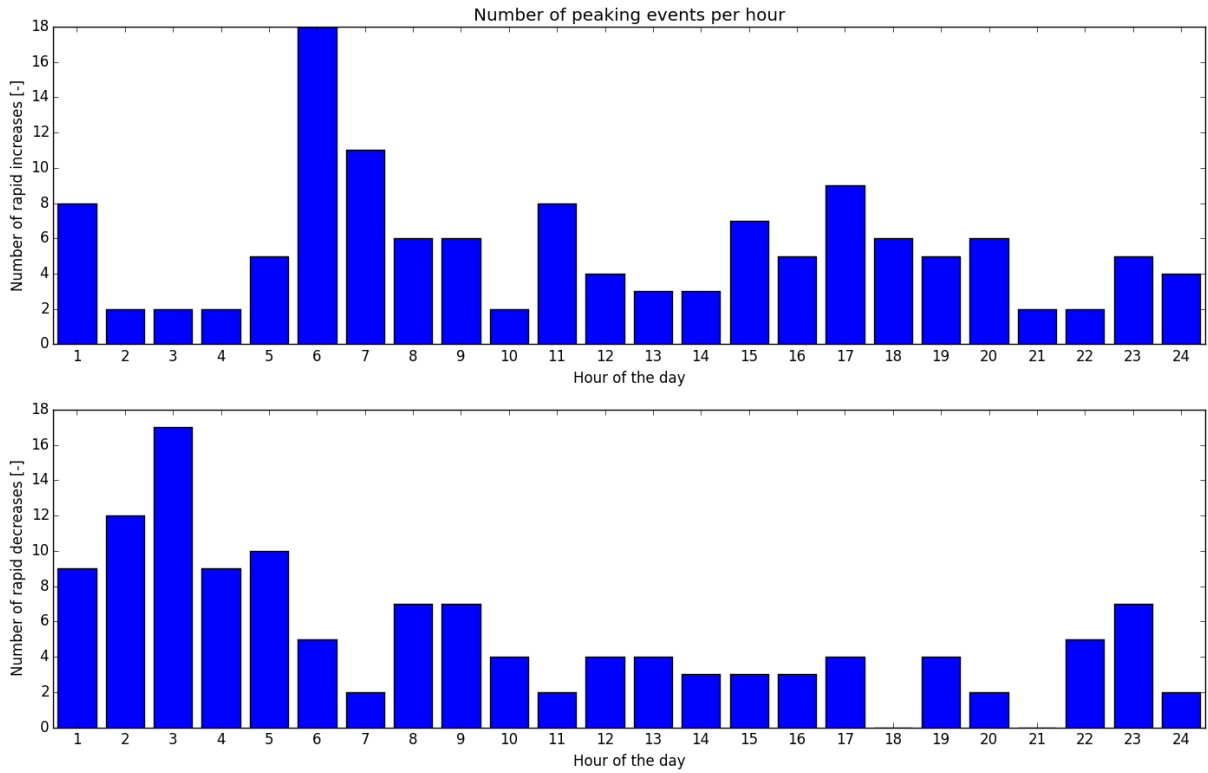




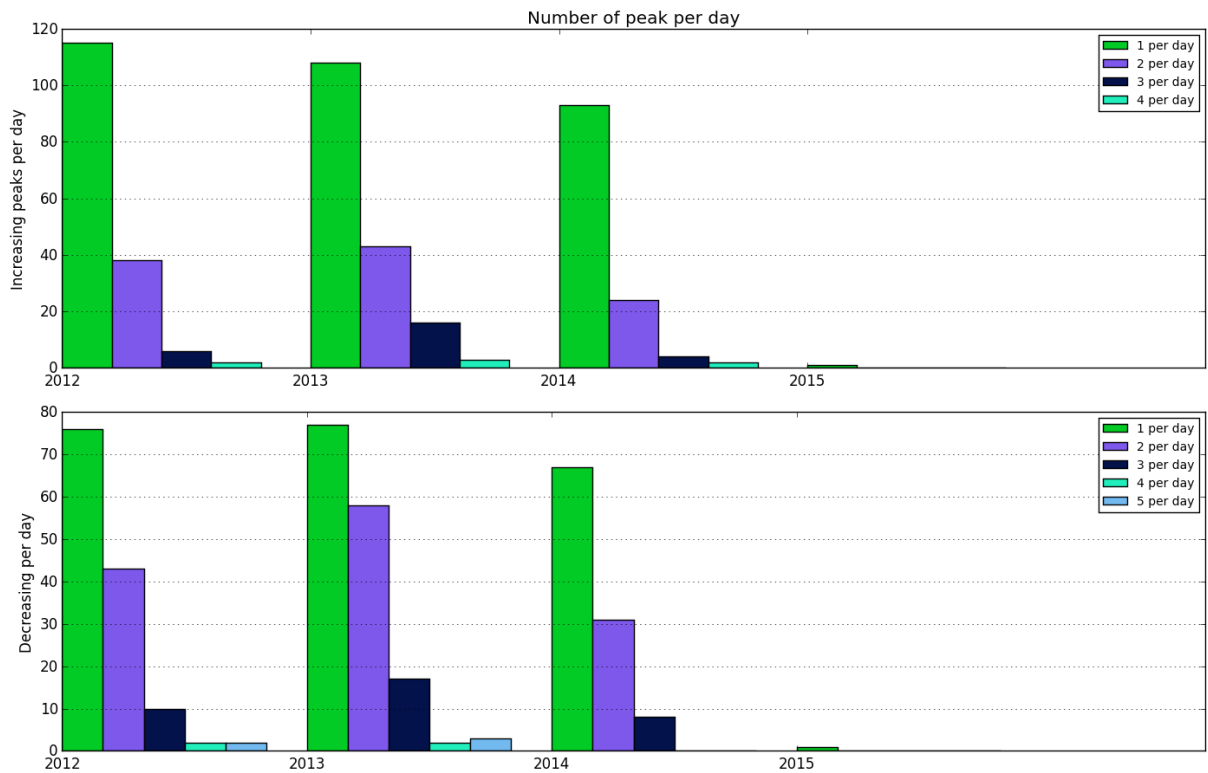
Figur 79: Antall raske hendelser over døgnet basert på hele analyseperioden (93-persentil).



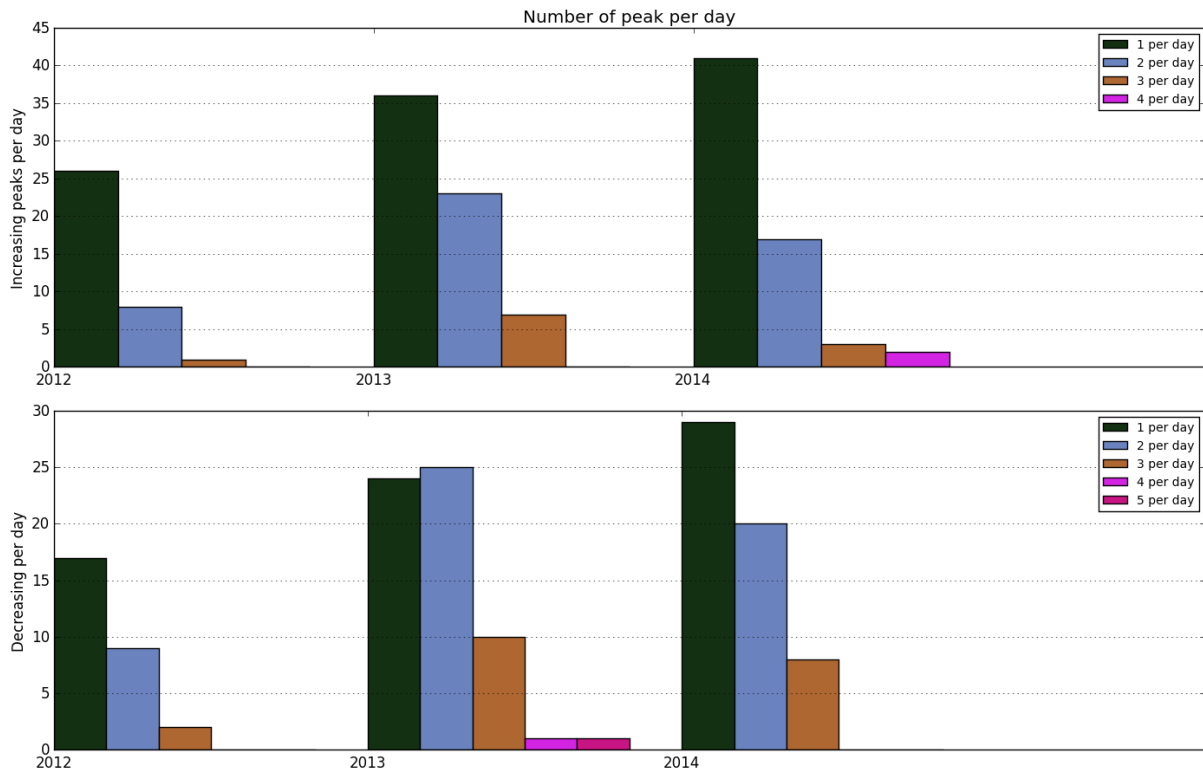
Figur 80: Antall raske hendelser over døgnet basert på vinterperiodene (93-persentil).



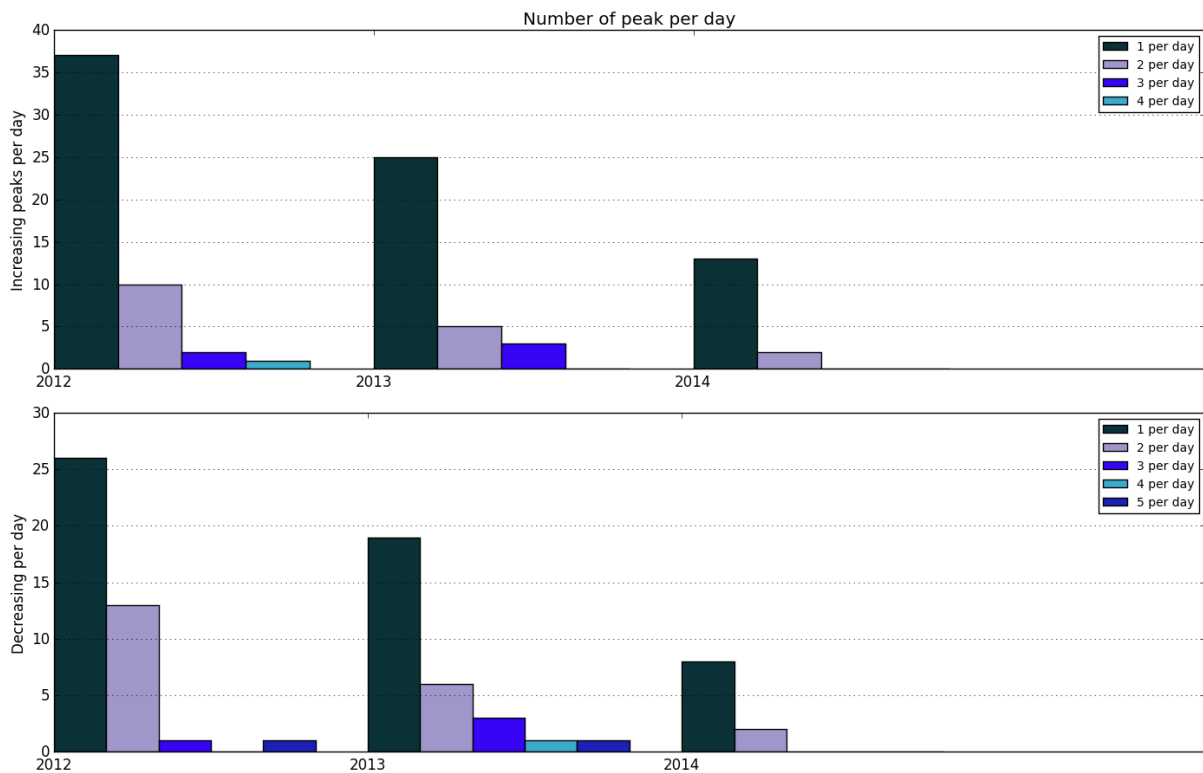
Figur 81: Antall raske hendelser over døgnet basert på sommerperiodene (93-persentil).



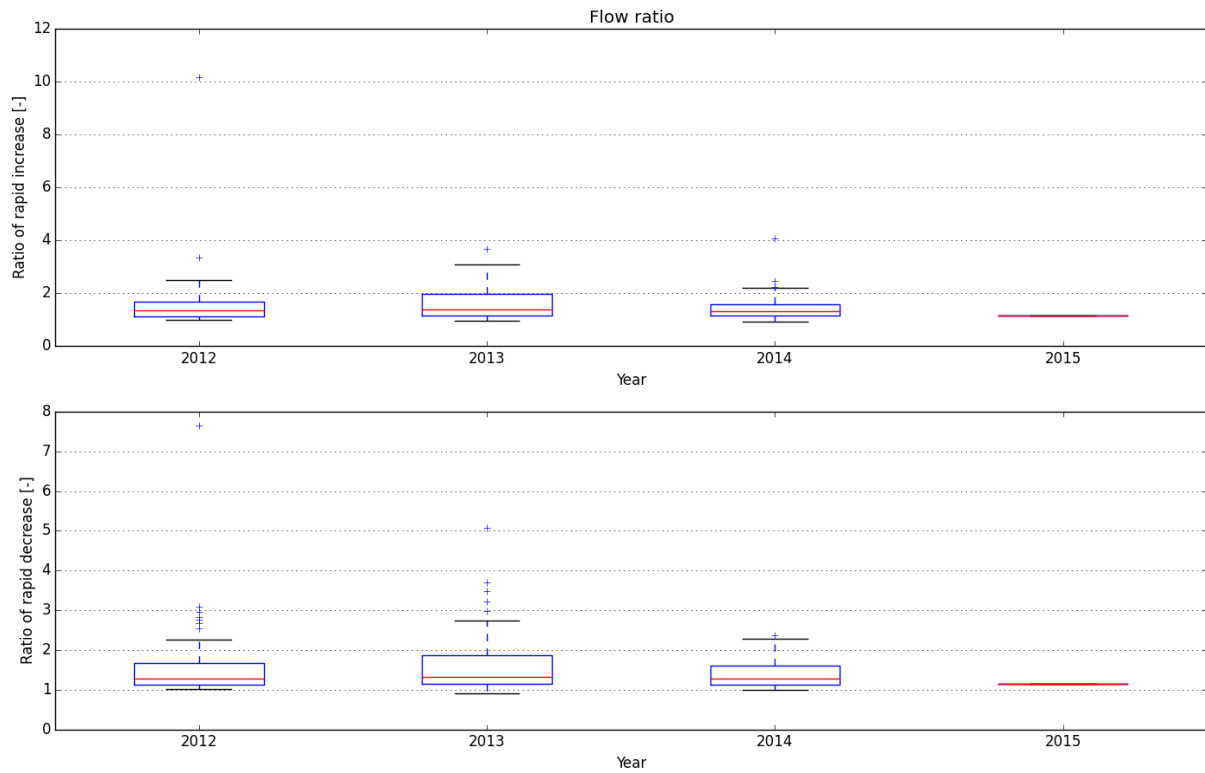
Figur 82: Antall raske hendelser per år basert på hele analyseperioden (93-persentil).



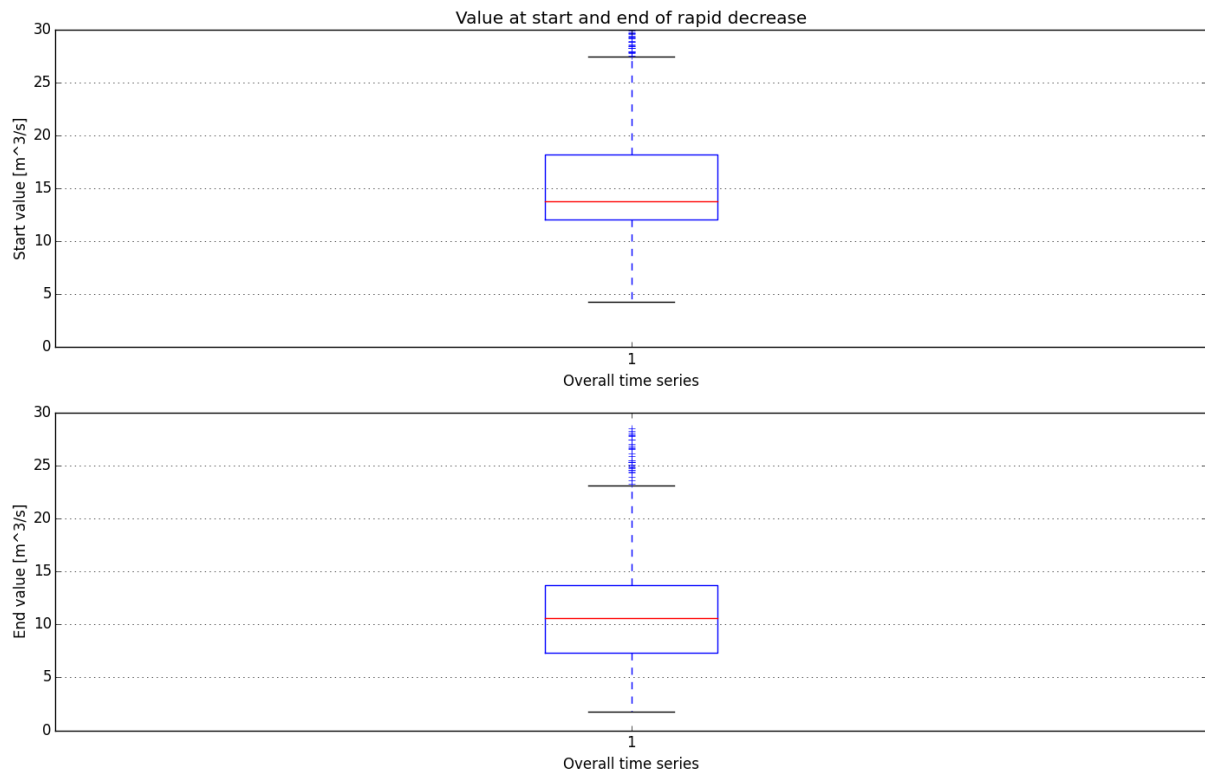
Figur 83: Antall raske hendelser per år basert på vinterperioden (93-persentil).



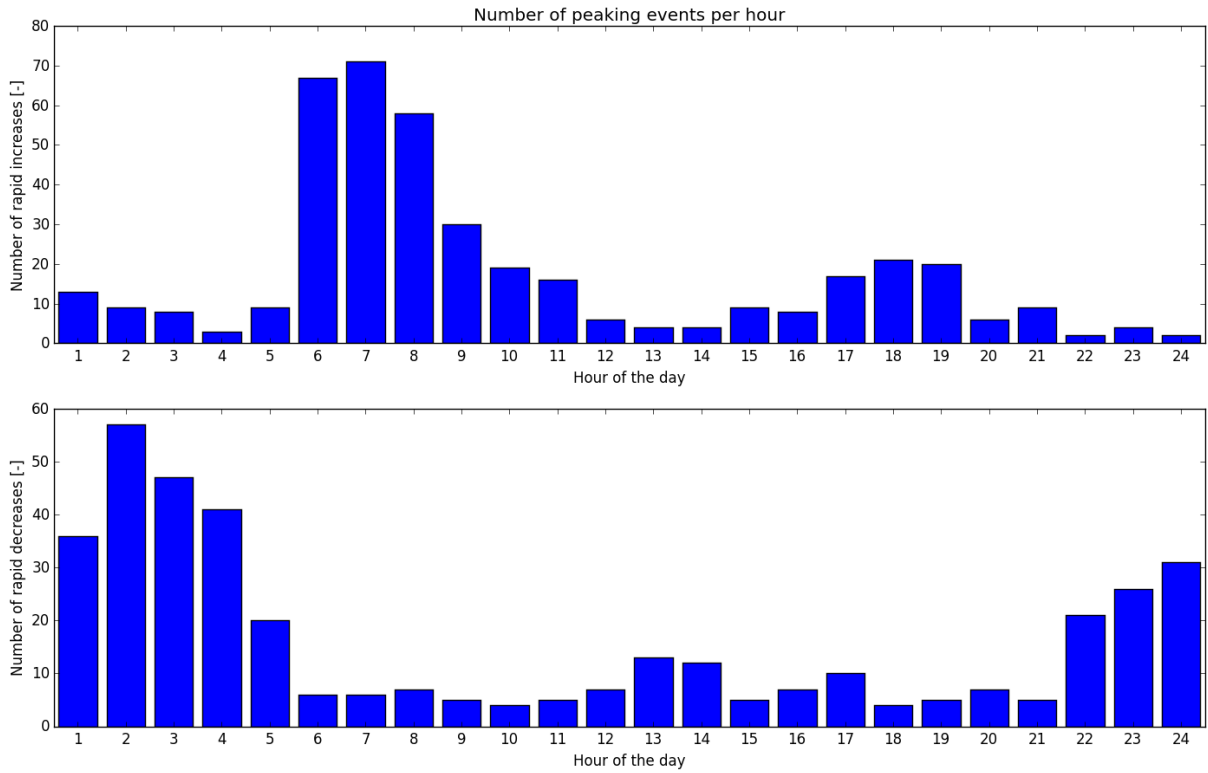
Figur 84: Antall raske hendelser per år basert på sommerperioden (93-persentil).



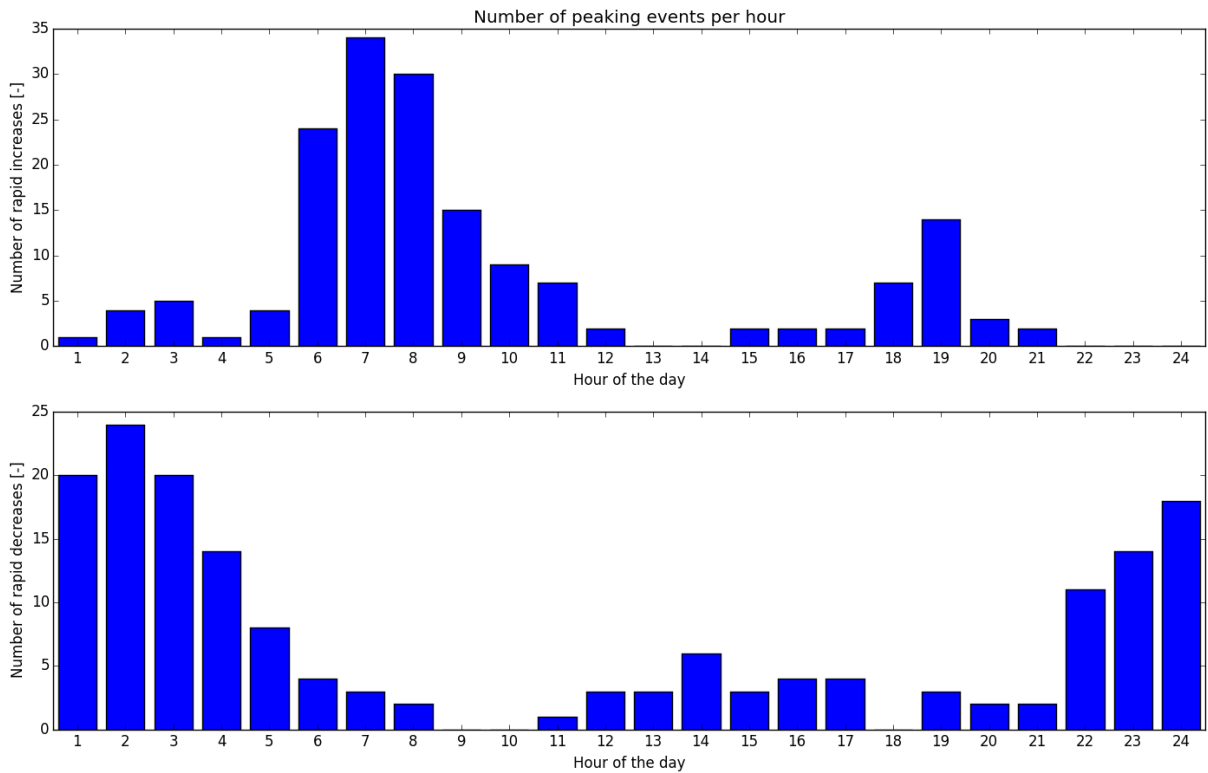
Figur 85: Årlig forhold mellom Qmaks og Qmin ved rask endring (96-persentil).



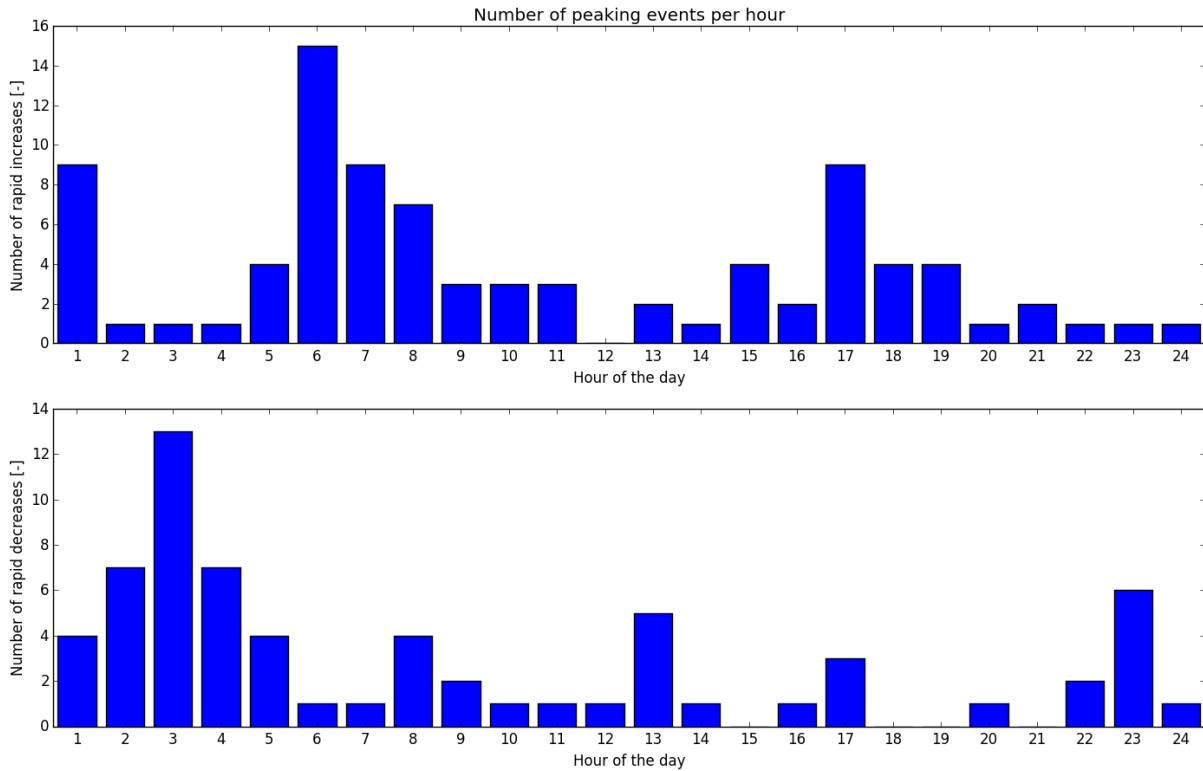
Figur 86: Vannføringsverdier før og etter rask reduksjon (96-persentil).



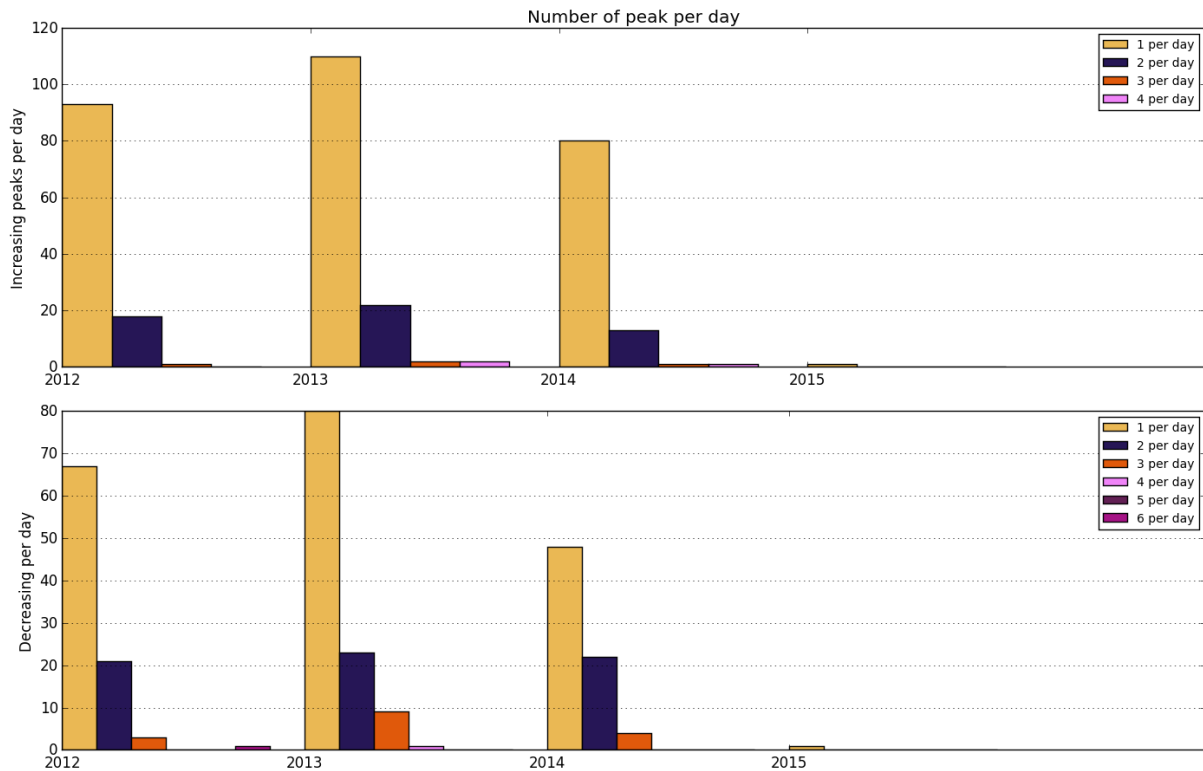
Figur 87: Antall raske hendelser over døgnet basert på hele analyseperioden (96-percentil).



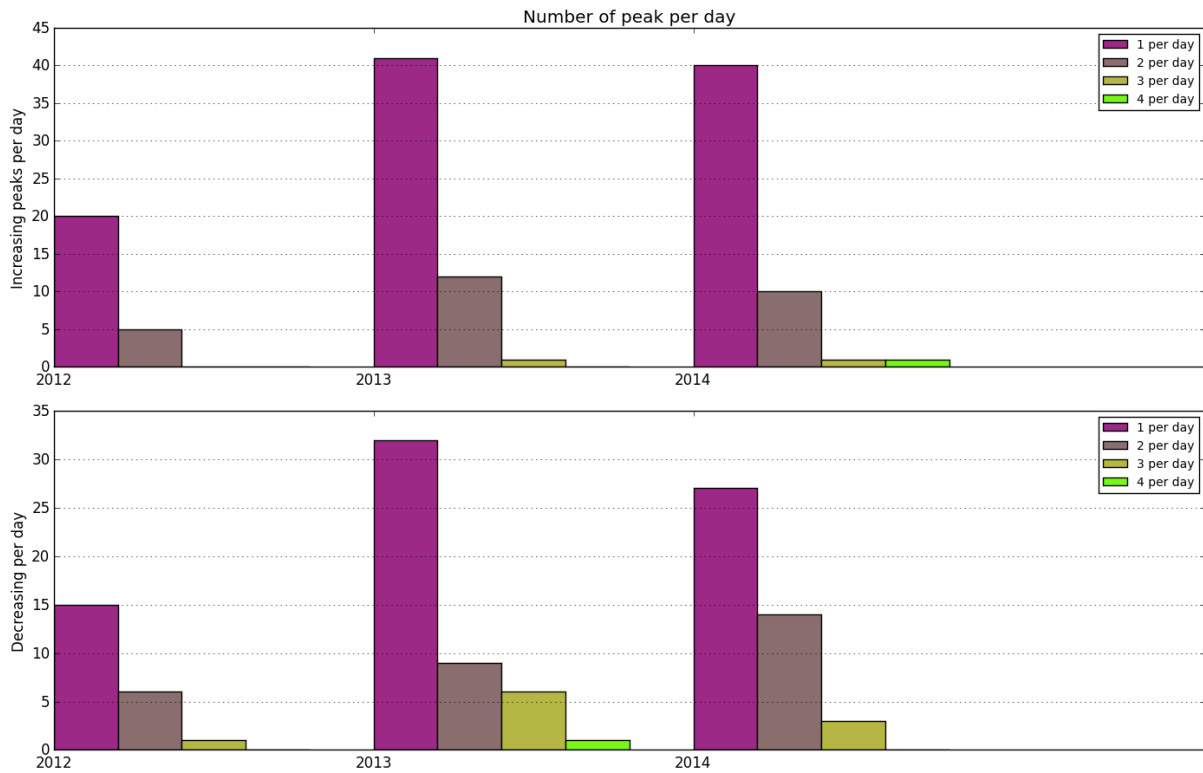
Figur 88: Antall raske hendelser over døgnet basert på vinterperiodene (96-percentil).



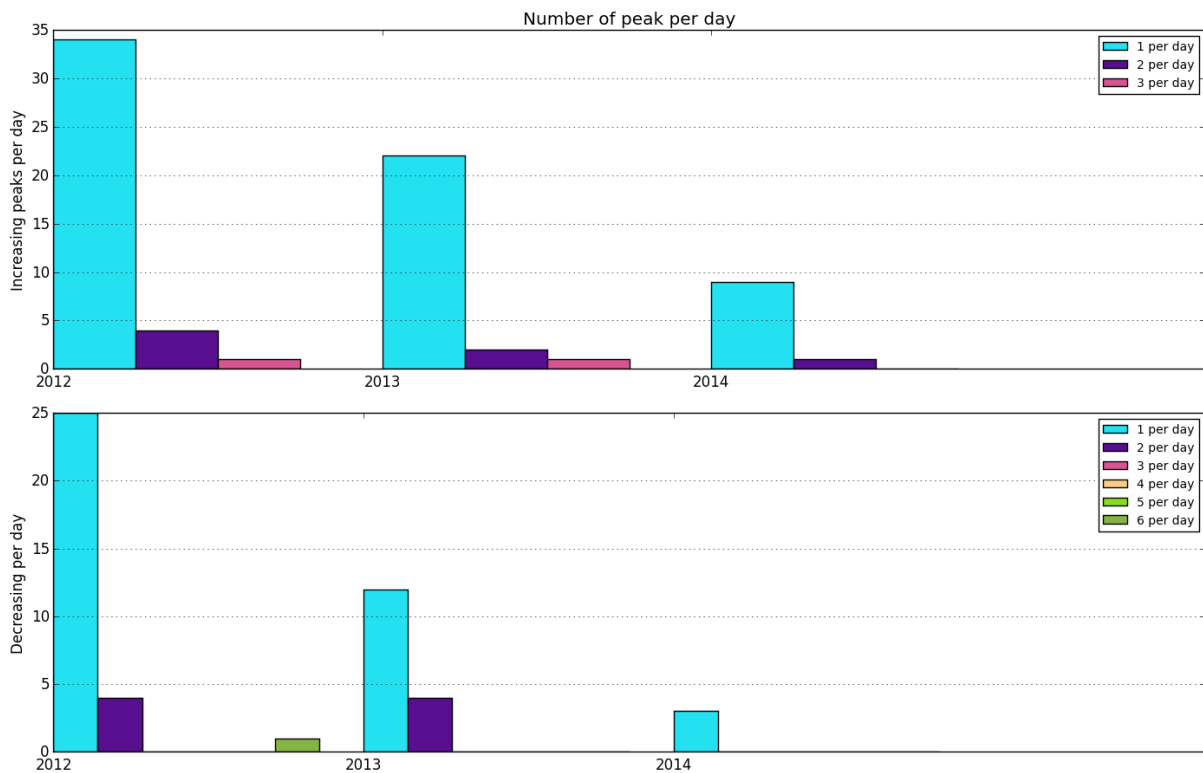
Figur 89: Antall raske hendelser over døgnet basert på sommerperiodene (96-persentil).



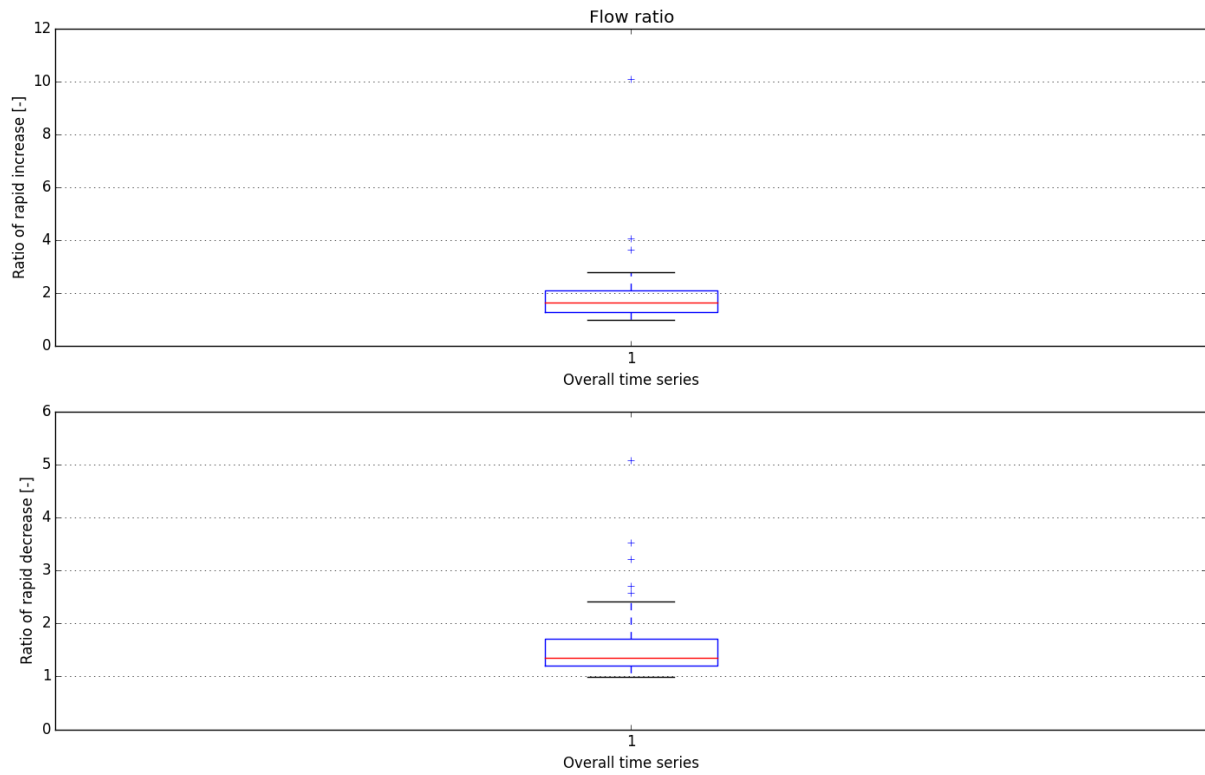
Figur 90: Antall raske hendelser per år basert på hele analyseperioden (96-persentil).



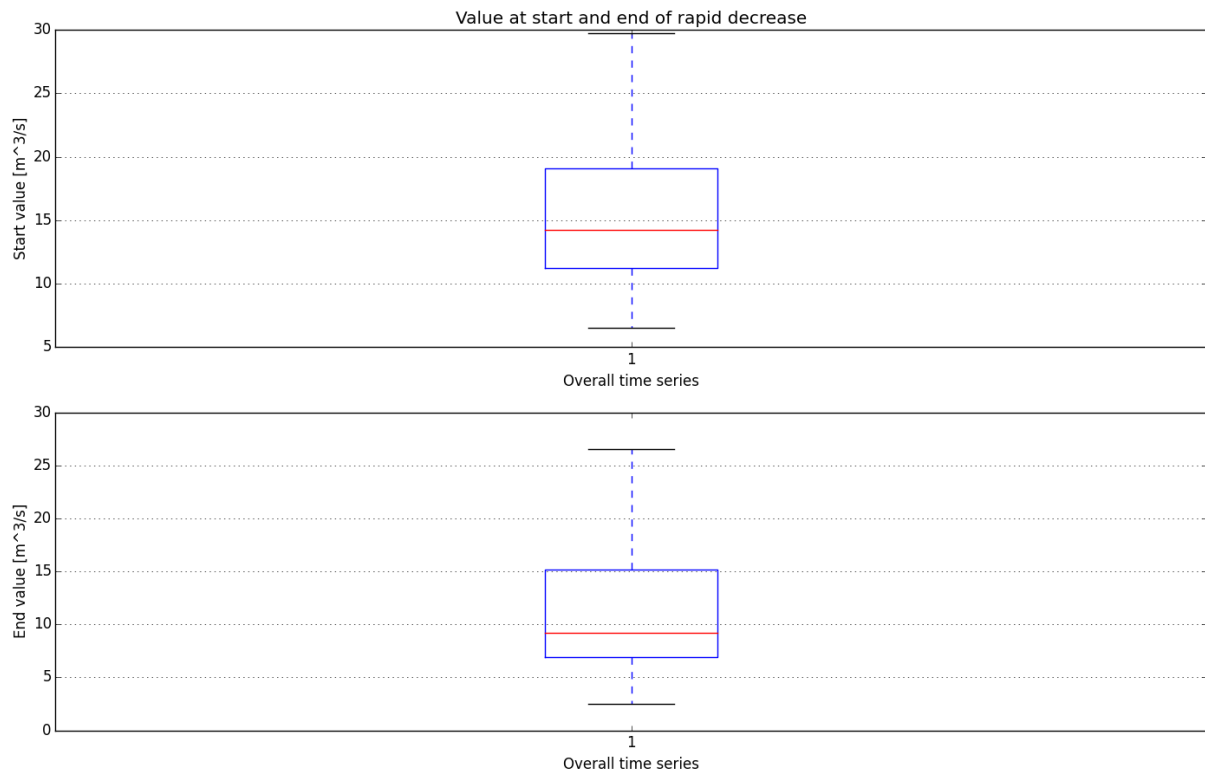
Figur 91: Antall raske hendelser per år basert på vinterperioden (96-persentil).



Figur 92: Antall raske hendelser per år basert på sommerperioden (96-persentil).

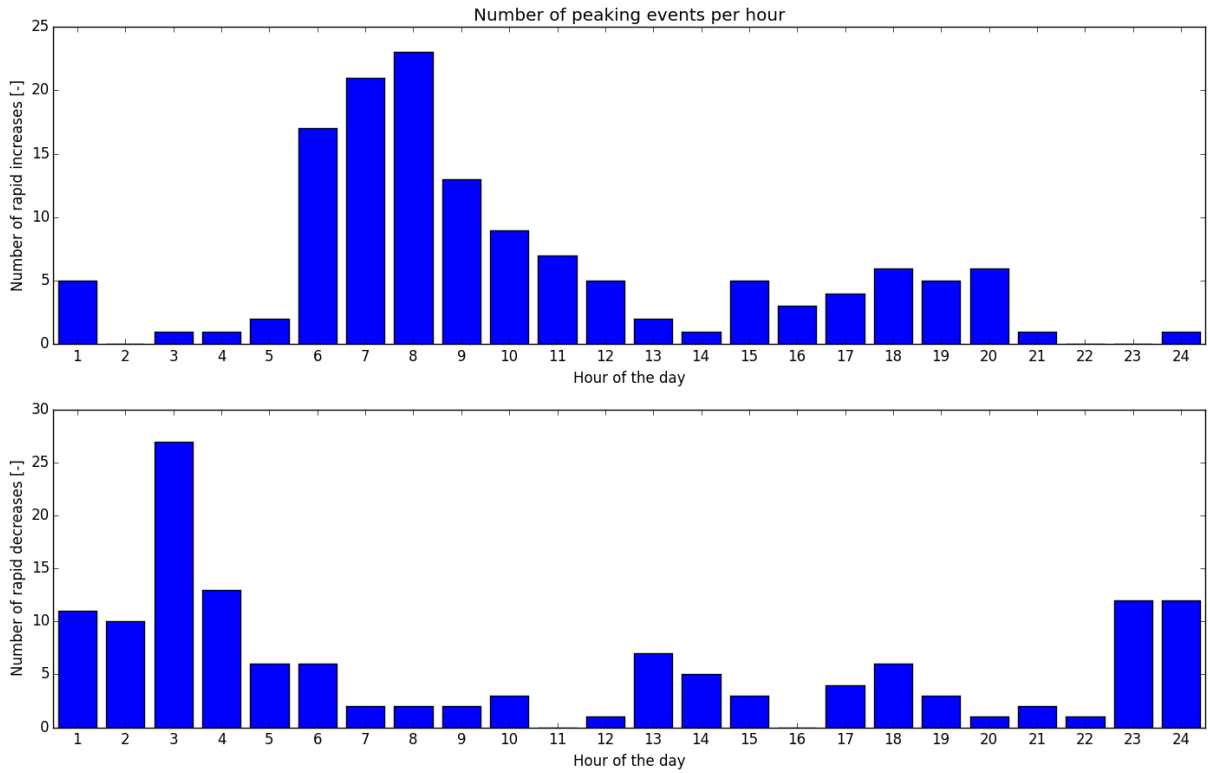


Figur 93: Årlig forhold mellom Qmaks og Qmin ved rask endring (99-persentil).

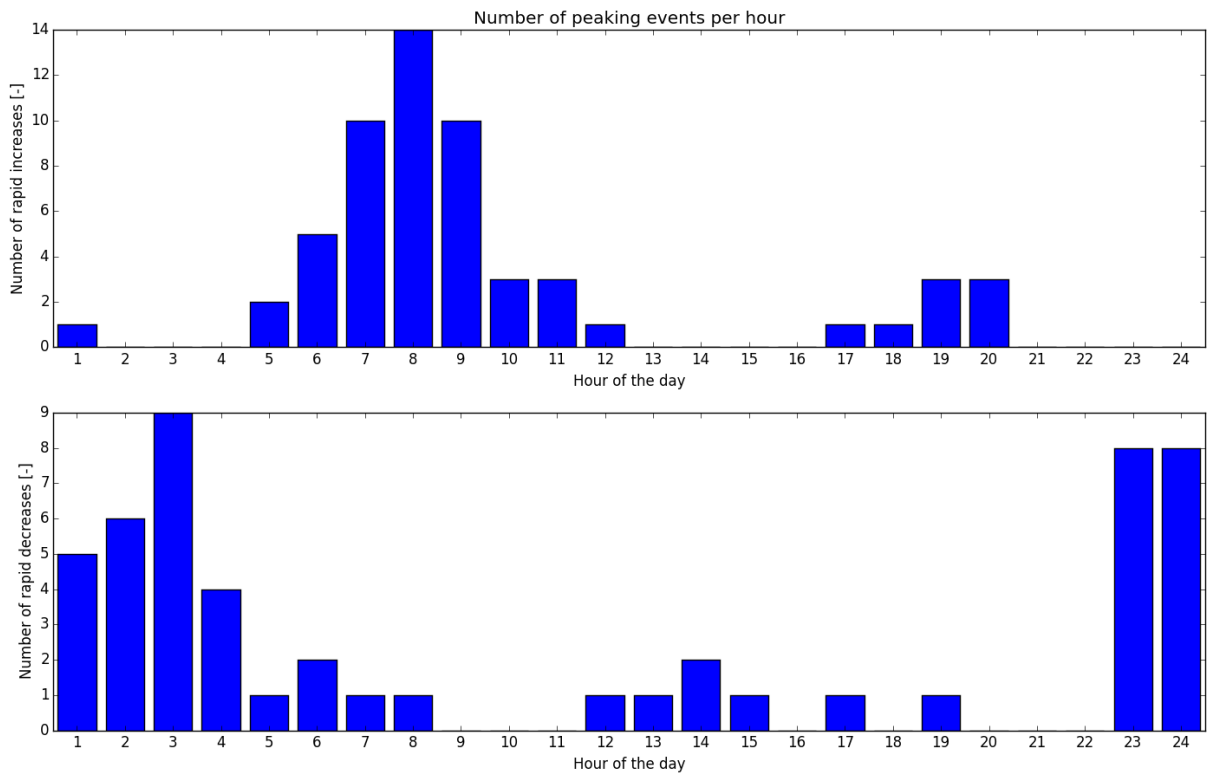


Figur 94: Vannføringsverdier før og etter rask reduksjon (99-persentil).

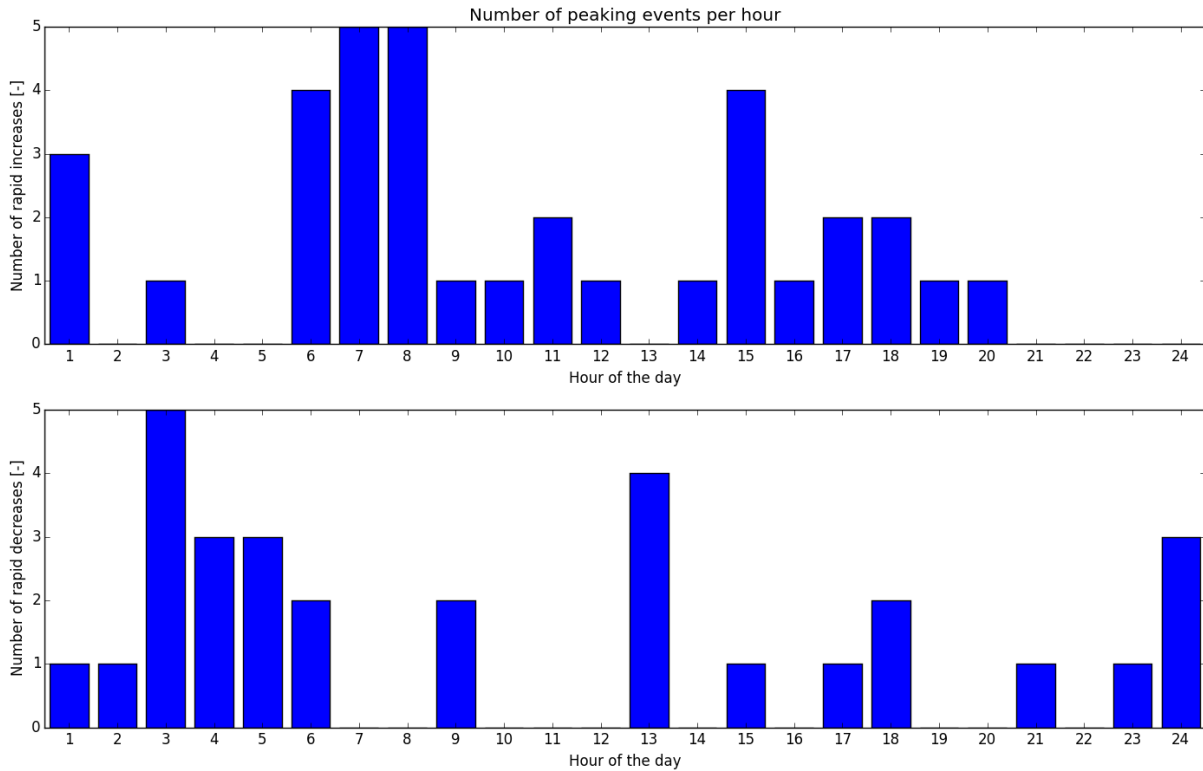




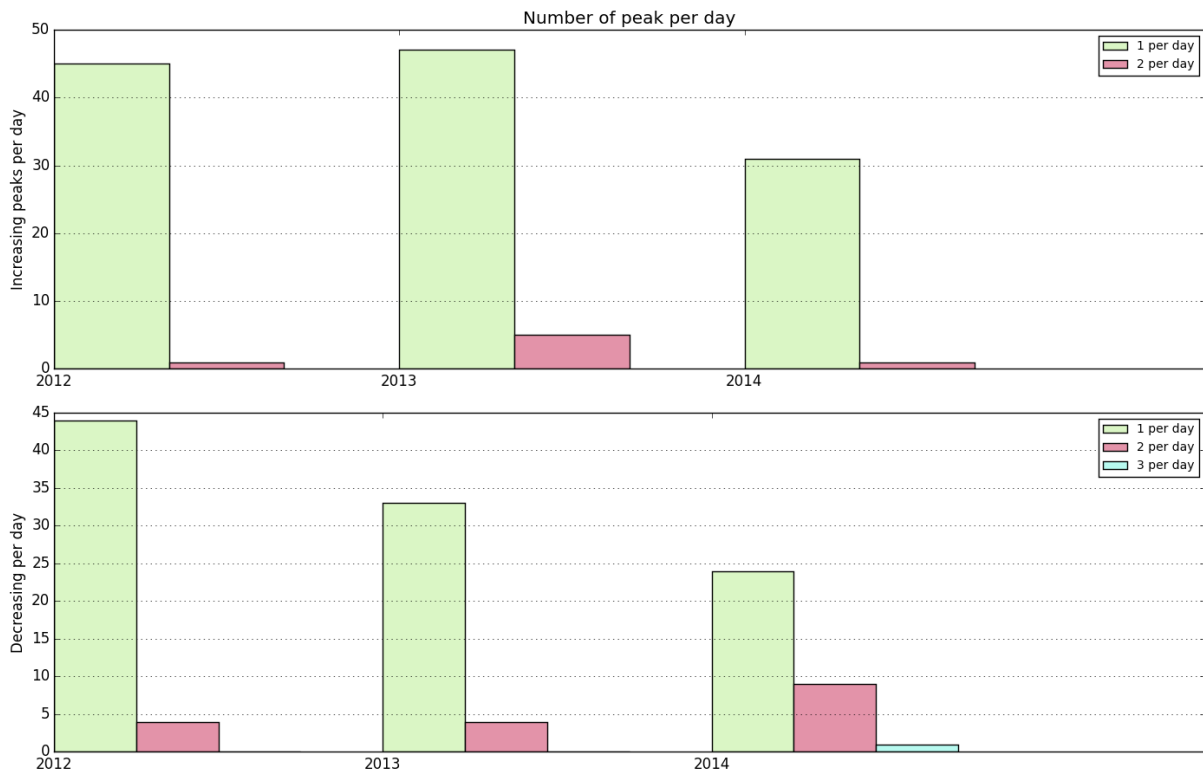
Figur 95: Antall raske hendelser over døgnet basert på hele analyseperioden (99-persentil).



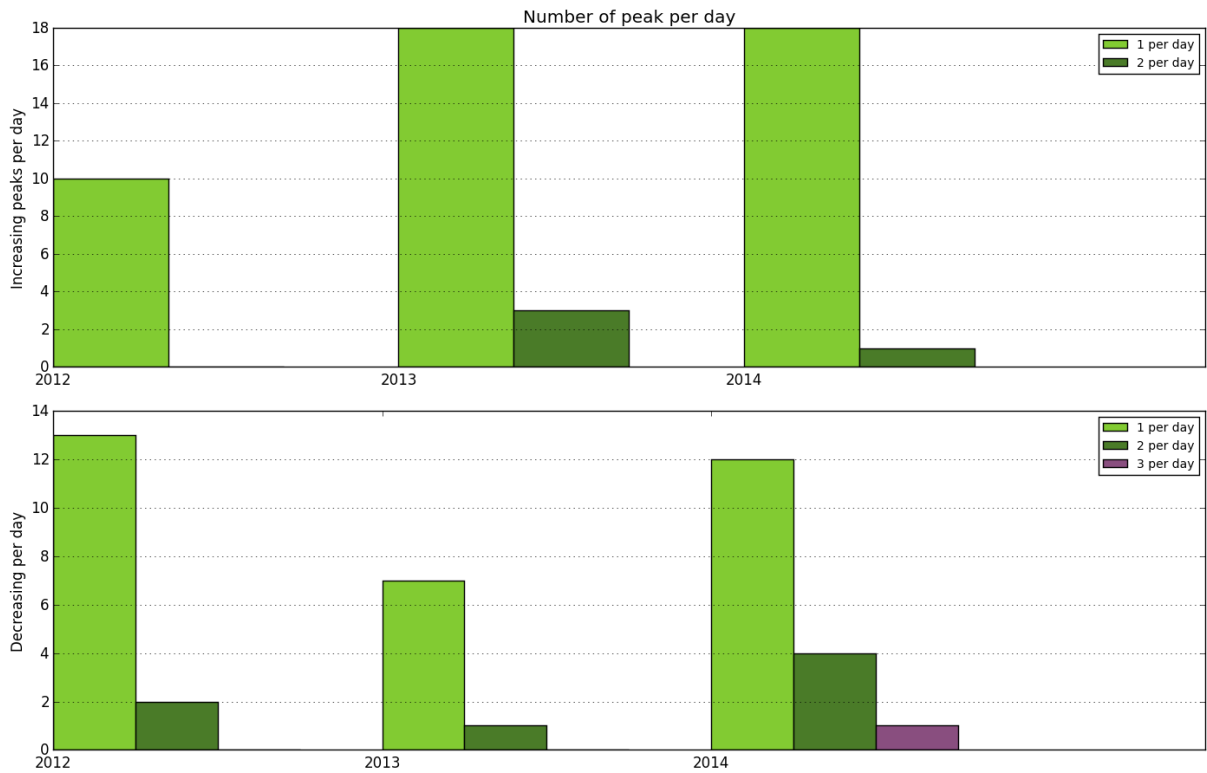
Figur 96: Antall raske hendelser over døgnet basert på vinterperiodene (99-persentil).



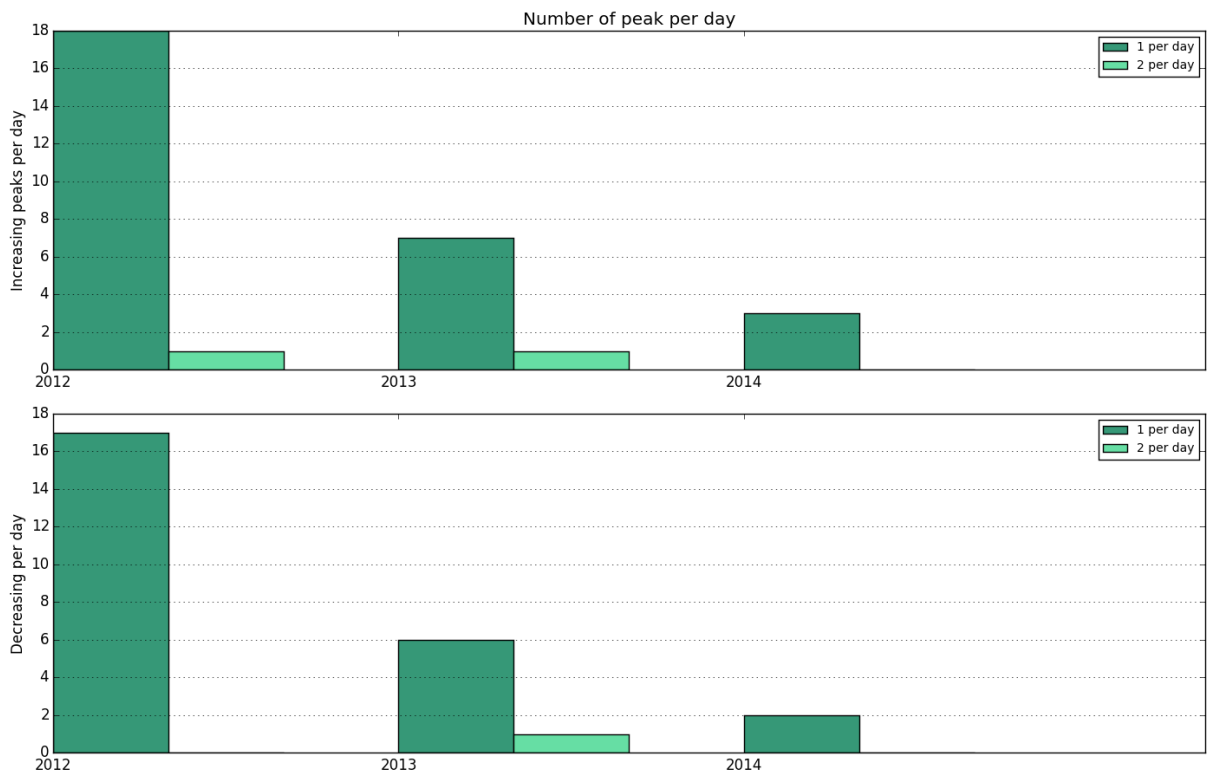
Figur 97: Antall raske hendelser over døgnet basert på sommerperiodene (99-persentil).



Figur 98: Antall raske hendelser per år basert på hele analyseperioden (99-persentil).



Figur 99: Antall raske hendelser per år basert på vinterperioden (99-persentil).



Figur 100: Antall raske hendelser per år basert på sommerperioden (99-persentil).