

Erfaringar med bruk av batymetrisk LiDAR for modellering av vassdrag

Av Knut Alfredsén, Morten Stickler, Ingrid Alne, Ingvild Brekke, Lars Skeie, Ana Adeva Bustos, Ana Juárez Gómez, Håkon Sundt, Mahmoud Omer Mahmoud Awadallah og Bjørn Otto Dønnum

Knut Alfredsén (Dr.ing.) er professor ved NTNU.

Morten Stickler (Ph.D) er fagansvarleg ytre miljø i Skagerak energi og førsteamanuensis II ved USN.

Ingrid Alne (M.Sc) er sivilingeniør ved Skred AS.

Ingvild Brekke (M.Sc) er sivilingeniør ved Skred AS.

Lars Skeie (M.Sc) er sivilingeniør ved SWECO AS.

Ana Adeva Bustos (Ph.D) er forskar ved SINTEF Energi.

Ana Juárez Gómez (M.Sc) er ingeniør ved Aquatec, Madrid, Spania.

Håkon Sundt (Ph.D) er forskar ved SINTEF Energi.

Mahmoud Omer Mahmoud Awadallah (M.Sc) er vitenskapelig assistent ved NTNU.

Bjørn Otto Dønnum (Cand. scient) er senior miljørådgivar ved Hafslund Eco.

Summary

Experiences with the use of bathymetric LiDAR in modelling rivers. An accurate representation of river bathymetry is important for many applications in river engineering, flood assessment and environmental impact studies. Numerous methods are used to collect these data from surveying by GPS and total stations to multi-beam sonar scanning. Common for all methods are that they do not easily cover all river reaches and that is time consuming to cover long reaches of river. Bathymetric LiDAR is a technology where a green laser beam is applied from planes and helicopter to scan the surface of the earth, and unlike the more common topographic LiDAR this instrument penetrates the water surface and can thereby map the terrain under water. This can provide an efficient way of collecting bathymetry data. In this paper we summarize the experiences of using bathymetric LiDAR in several projects over the last five years.

We will look at data quality, the need for additional or correction data and the process of utilizing the bathymetric LiDAR for hydraulic analysis. We will illustrate the use of LiDAR based bathymetry through examples from several hydraulic modelling projects.

Samandrag

Å skaffe til veie ein nøyaktig batymetri (djup og botnforhold) for elver og innsjøar er viktig for fleire ulike samfunnsføremål. Eksempel på kvar slik informasjon er viktig er til dømes vurderingar knytt til erosjon og flaum, kvikkleire, naturmangfald, samferdsel, og miljøtilhøve i regulerte vassdrag. Informasjon om djup og batymetri er viktig både ved planlegging av ulike tiltak og overvaking over tid av vassdrag og innsjøar. Det finst fleire ulike måtar å hente inn slik informasjon. Tradisjonelt vert dette gjort ved hjelp av totalstasjonar og GPS, eller fleirstråle ekkolodd

frå båt. Felles for alle metodane er at dei kanskje ikkje passar til ulike typar av elver og at det kan krevje stor innsats og tidsbruk for å få gode og dekkande datasett. Bruk av batymetrisk LiDAR er ein teknologi der overflata av jorda vert skanna med grøn laser frå fly. Til skilnad frå dei meir vanlege topografiske LiDAR instrumenta har dei batymetriske instrumenta kapasitet til å trenge gjennom vassflata og dermed samle data under vatn. Dette kan difor vere ein svært effektiv måte å samle inn data om batymetri på, og gi svært detaljerte data. Her vil vi sjå på datakvalitet, korvidt korreksjonar er naudsynte og prosessen med å utnytte slike data i hydrauliske analyser. Dette vil verte illustrert med eksempel frå fleire ulike prosjekt der vi har brukt LiDAR batymetri i samband med hydraulisk modellering.

Introduksjon

Innan arbeid med prosjekt i elver og vassdrag treng ein ofte data om geometrien til elva under vassflata (batymetrien). Dette kan til dømes vere i samband med vurderingar og tiltak knytt til erosjon og flaum, kvikkleire, naturmangfald, samferdsel, og miljøforhold i regulerte vassdrag. I mange av desse analysane vert det og brukt numeriske hydrauliske modellar. Kvaliteten på resultatane frå desse modellane heng saman med kor god batymetri dei er bygd på (t.d. Legleiter m.fl. 2011). Innsamling av batymetri i elver har hittil vore gjort for det meste med landmålingsmetoder som nivellering eller punktmåling med GPS eller totalstasjon, eller ved bruk av ulike former for sonar eller ekkolodd. Skanning med terrestrisk laser eller drone ved svært lite vatn er og ei metode som kan gi data for område som då er tørre (Casas-Mulet m.fl. 2014). Felles for desse metodane er at dei ikkje er like godt eigna i alle delar av ei elv med omsyn til kost-nytte ved innsamling av data over store område på vassdragsnivå eller tryggleik ved feltarbeid. Vidare, bruk av fleistrålesonar som metode vil gi svært detaljerte data, men er berre eigna der ein kan bruke båt eller liknande på elva og der elva ikkje er for grunn (>0,5 – 1m djup). Bruk av fleistrålesonar krev mykje tid, då arealet sonaren dekker vert kraftig redusert på grunt vatn.

Måling ved hjelp av landmålingsutstyr krev stor innsats for å få god dekning av punkt og er best eigna der ein kan måle til fots på tørt land eller der det er mogleg å vade i elva. Difor må ofte ulike metodar kombinerast, og dette aukar tidsbruk og kostnader og gir datasett som vil ha varierende dekningsgrad og kvalitet. Det er og eit element knytt til tryggleik når ein kan måle ved bruk av vading eller båt. Det er difor ønskeleg å finne metodar som kan gi god dekning av data med mindre innsats og kostnad, og som er trygge for dei som skal utføre målingane.

Måling av topografi ved hjelp av LiDAR (Light Detection and Ranging) baserer seg på å måle tida det tar for ein laserstråle å gå frå sensoren til bakken og tilbake til sensoren. På denne måten kan ein lage ein detaljert modell av overflata som laseren passerer over utifrå skilnaden i tid mellom kvar enkelt måling og ei analyse av forma på pulsen som vert returnert, der forma på returpulsen kan gi info om terrengform, vegetasjon og liknande. Måling av topografi på land med LiDAR (raud LiDAR) er vanleg. Eit eksempel på dette er den nyetablerte nasjonale høgdemodellen for Norge (www.hoydedata.no). Ei ulempe med raud LiDAR er at instrumenta som vert nytta til dette vil ikkje kunne måle geometri under vatn. Ein batymetrisk laser derimot, utnyttar lys med bølglengd på 532 nm i det grønne spekteret (derav ofte referert til som grøn LiDAR, batymetrisk LiDAR eller grøn laser) og trenger gjennom vassflata og måler nivået på botnen. Kor djupt laseren kan måle avheng av eigenskapar til vatnet, overflateforhold og eigenskapane til botnen. Ein ser t.d. at i elver med humus og laust organisk materiale har laseren kortare rekkevidde enn i klare elver (Saylam m.fl. 2020), og at vegetasjon på botnen eller turbulens på overflata kan påverke kor djupt vi kan måle.

Batymetrisk LiDAR kan gi svært stor detalj og kan dekke store område og mange ulike typar elv på ein svært effektiv måte, men krev etterprosessering før data er klar til bruk. Prosessering av data vert gjort av den som opererer instrumentet, og kan vere ein omfattande prosess (Mandlbürger m.fl. 2015). Sluttbrukar

får data som ferdig klassifiserte punktskyer, og i nokre tilfelle kan dei og verte leverte som ferdige digitale terrengmodellar (DTM). Fram til i dag er instrumenta som måler med grøn laser for det meste brukt frå fly, men det finst òg eksempel på bruk frå drone og helikopter. Tidlege forsøk med LiDAR for batymetri vart gjort av USGS (Kinzel m.fl. 2007). Både metoden og instrumenta er utvikla vidare etter dette, og det er fleire ulike grøn laser instrument tilgjengelege i marknaden i dag med ulike eigenskapar.

Over dei seinare åra har tilgangen til gode og effektive to-dimensjonale hydrauliske simuleringsprogram auka, både gjennom ei vidareutvikling av modellane i retning av raskare algoritmar og gjennom tilgang til kraftigare datamaskiner. Koplinga mellom svært detaljert batymetri og meir effektiv programvare gjer at det er mogleg å modellere lange strekningar i elver i to-dimensjonar samanlikna med det ein kunne gjere for få år sidan. Dette gir meir detalj i resultatata, noko som til dømes gjer at ein kan køyre numeriske modellar for kartlegging av flaum og erosjon med ei heilt anna oppløysing enn det som ein ein-dimensjonal modell kan gjere. Det opnar òg for meir detaljert simulering av ulike miljøtiltak i vassdrag som til dømes dynamisk simulering av tørrlegging ved effekt-køyring, eller koplingar mellom vassdekt areal ved ulike vassføringar mot biologiske data. Metodane kan og utnyttast til simulering av tiltak og miljøverknader i vassdrag som effekt av tersklar eller terskelfjerning, erosjon og deponering av sediment og effekt av bygging av infrastruktur. På denne måten har bruk av batymetrisk LiDAR eit stort potensial innanfor fleire ulike problemstillingar som er aktuelle i dag og framover, og som eit viktig i framtidig kostnytte verkty.

Denne artikkelen summerer opp erfaringar med bruk av data frå batymetrisk laser som grunnlag for hydraulisk modellering i fleire ulike vassdrag knytt til ulike problemstillingar i vassdrag. Hovudmålet med denne oppsummeringa er å trekke generelle erfaringar rundt kvaliteten og bruken av batymetrisk LiDAR i primært regulerte vassdrag basert på tidlegare

gjennomførte prosjekt ved NTNU. Det er særskilt fokus på tre delmål i denne oppsummeringa:

1. Samanlikning av batymetrisk LiDAR med andre målingar av terrengdata for vurdering av kvalitet på data.
2. Evaluering av kvalitet på numerisk modellar basert på grøn LiDAR.
3. Test av grøn LiDAR som grunnlag for vurdering av flaum, tiltak og miljøverknader i regulerte vassdrag.

Resultata som vert presentert her er hovudsakleg samla inn gjennom eit pilotprosjekt initiert av ECO Hafslund og Statkraft i 2015. I dette prosjektet vart tre norske og ei svensk elv Sverige målt opp med ein sensor som til då ikkje var brukt i Norge tidlegare. I tillegg har vi brukt data frå ei elv målt opp av NVE og ei elv målt opp i regi av forskningssenteret HydroCen. Vi vil i artikkelen gå igjennom erfaringar med kvalitet på data og naudsynte korreksjonar og tilpassingar som må gjerast, samt erfaringar med bruk av LiDAR i samband med hydraulisk modellering både med tanke på prosessering av data og kva resultat ein kan få ut frå ein modell med batymetrisk LiDAR som grunnlag.

Materiale og metode

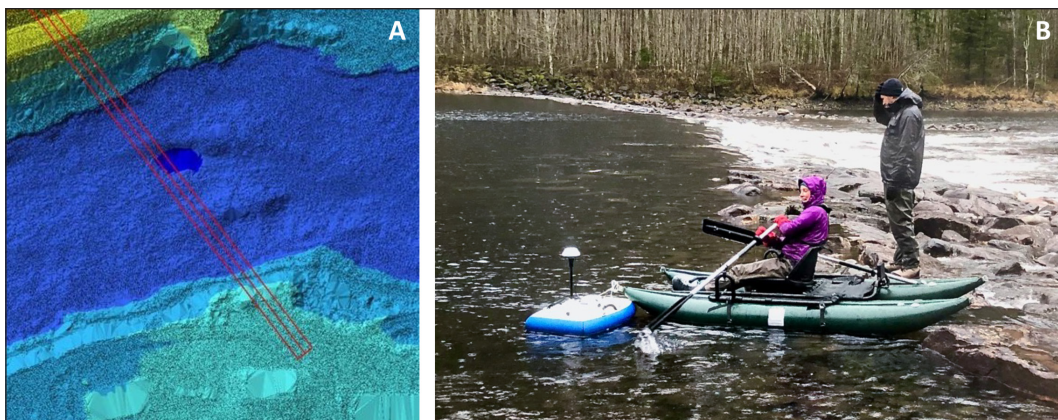
Studieområde

Resultata som er vist i dette arbeidet er henta frå fem ulike elver i Norge (Tabell 1). Fire av elvene er oppmålte med ein sensor frå Riegl og den siste med ein sensor frå Optech. Alle målingane er gjort frå fly. Data vart korrigererte, georefererte og klassifiserte og deretter leverte som punktskyer på LAZ format (Isenburg 2011). For dei fire første elvene vist i Tabell 1 fekk vi og levert data om vasskanten ved flyging, noko som er nyttig ved kalibrering av hydraulisk modell. For Nea fekk vi gode flybilette tatt samstundes med oppmåling som og kan brukast for vurdering av vassdekt areal når oppmålinga vart gjort.

I tillegg til den generelle vurderinga av batymetrisk LiDAR som kjelde til hydraulisk modellering var det ulike målsettingar for dei ulike elvene (Tabell 1). I Storåne var målet med

Tabell 1 Oversikt over elver brukt i analyse av batymetrisk LiDAR.

Elv	Instrument	Datakjelde	Strekning (km)	Tettleik (punkt/m ²)	Mål med arbeidet
Storåne	Riegl VQ-880	Hafslund Eco/Statkraft	4.4	153	Vurdere effektkøyring av kraftverk
Tokke	Riegl VQ-880	Hafslund Eco/Statkraft	4.2	124	Minstevassføring, kopling mot biologiske data
Surna	Riegl VQ-880	Hafslund Eco/Statkraft	29	72	Vassdekt areal, effekt av raske stopp i kraftverk
Lærdal	Riegl VQ-880	NVE	15	117	Vassdekt areal, flaum
Nea	Optech Titan	HydroCen	24	24	Terskeljustering



Figur 1. Innmåling av punkt for komplettering av laserdata. Data for kontroll vart målt opp med liknande utstyr. A) eksempel på manglande data i djupområde i Surna og B) innmåling med Sontek M9 taua frå pontongbåt i Nea.

prosjektet og vurdere konsekvensen av raske endringar i vassføring frå Hol 1 på vasstand i elva. Surna, Lærdal og Tokke hadde alle ulike problemstillingar knytt til minstevassføring, vassdekt areal og drift av kraftverk og kopling av dette mot akvatisk biologi. I Lærdal vart det og gjort noko arbeid knytt til simulering av dimensjonerande flaumsoner (200-års flaum med og utan klimapåslag) i nedre del av elva. I Nea var problemstillinga å sjå på korleis fjerning eller endringar i tersklar påverka dei hydrauliske tilhøva i ei elv med låg minstevassføring. Etter reguleringa i Nea vart det bygd ei rekke tersklar i den delen av elva som er forbitappa av kraftverket (minstevassføringsstrekninga). Dette arbeidet er gjort på ei 2,3 km delstrekning med tre terskler 15 km oppstrøms utløpet i Selbusjøen (Brekke 2020).

Data, korleksjon og kontroll

Data frå batymetrisk LiDAR vert levert som «punktskyer» ofte komprimert i eit format

(LAZ) som er spesielt eigna for store mengder med laserdata. Vi konverterte data og brukte eit GIS verktøy for å analysere data. Ved hjelp av dette fann vi kor god dekning vi hadde for strekninga vi var interessert i, og med utgangspunkt i plottet kunne vi òg planlegge innsamling av ekstra data der dette var naudsynt. For Lærdal trong vi ikkje noko tilleggsdata, medan vi for Storåne, Surna og Tokke henta vi inn data frå nokre få djupe område og for Nea måtte det meir oppmåling til då punktdekninga ikkje var god i område djupare enn omtrent 1,0 meter. Innsamling av ekstra data vart gjort ved å bruke ein Sontek M9 RiverSurveyor frå kajakk, båt eller ved bruk av tau frå land der dette var mogleg (Figur 1). Vassflata vart i kvart tilfelle målt med RTK-GPS (Leica Viva CS-15). Når tilleggsdata var samla inn vart dei lagde inn i den originale punktskyen. Når denne var komplettert med data, vart ein digital terrengmodell interpolert frå datasettet i GIS, og denne dannar så utgangspunktet for seinare modellering.

Surna vart interpolert med gitterstorleik 0,5 x 0,5 meter, medan dei andre vart interpolert til 0,25 x 0,25 meter oppløysing. For nokre elver finst det i dag batymetri tilgjengeleg på høydedata (www.hoydedata.no). Desse er allereie interpolert til ein DTM med oppløysing på 1 x 1 m, men det finst og punktdata å laste ned. I dei fleste tilfelle vil det vere å tilrå å laste ned punkt-skya både for at ein då kan lage ein DTM tilpassa dei analysane som skal gjerast, men òg for å få eit bilete av kor god punktdekninga er og om det kan vere naudsynt å hente inn tilleggsdata.

For å vurdere kvaliteten på data så vart det i Storåne og Tokkeåi målt opp område med både med RTK GPS og Sontek M9, og i Surna med område med RTK GPS og terrestrisk laserskanner (Topcon TLS 1000) for samanlikning med data frå LiDAR. Med RTK GPS målte vi opp nokre vegar og nokre område i elva over og under vatn. Kvart målepunkt vart samanlikna direkte med næraste punkt i punkt-skya, noko som kan vere utfordrande når det gjeld GPS målingar i område med stor variabilitet i substratet. Med terrestrisk skanner målte vi opp eit større område som då er på linje med LiDAR i punkttettleik. Måling med Sontek M9 gir og punktmålingar, og sjølv om tettleiken er betre enn RTK GPS så kan det vere liknande metodiske problem i samanlikninga. Det er verdt å merke seg at kontrollmålingane vart gjort eit år eller meir i etterkant av flyginga med LiDAR, noko som kan påverke resultatata om t.d. området har endra seg mellom dei to målekampanjane.

Modellering

All modellering vart gjort med HEC-RAS 2D (Brunner 2021). Modellen vart etablert med utgangspunkt i terrengmodellar som vart interpolert frå punkt-skyene med batymetri frå dei ulike elvene. Alle modellane vart kalibrert ved justering av Mannings n basert på ei samanlikning mot målte vasslinjer (validering av vassdjup), mot vasskant henta inn ved oppmåling og mot georefererte flybilete (www.norgebilder.no). For flybilete brukte vi dato for innsamling for å finne den vassføringa som biletet er tatt på og som då vert utgangspunktet for kalibreringa.

I fleire av elvene vart vasskanten levert digitalt av firmaet som utførte lasermålinga, noko som er svært nyttig for kalibrering då vi har ein nøyaktig samanheng mellom vassdekt areal og vassføringa når lasermålinga vart gjort.

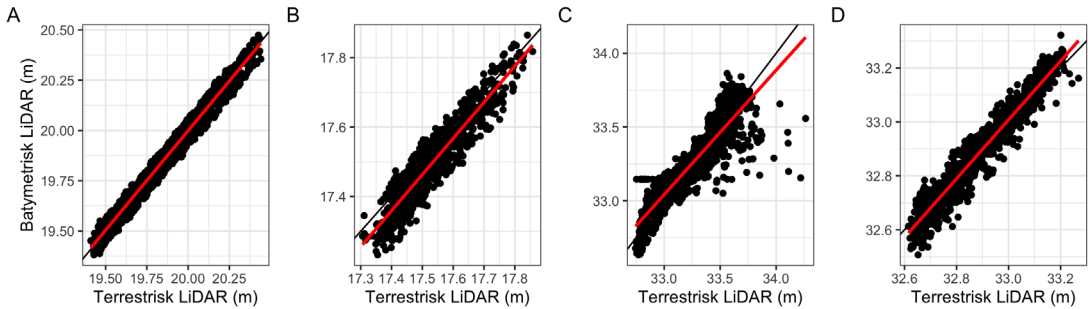
I dei fleste tilfelle brukte vi observert vassføring frå kraftverk og målestasjonar som utgangspunkt for modelleringa. For Storåne brukte vi driftsvassføring frå Holl og målt vassføring frå Ruud (12.143.0). For Surna brukte vi målestasjonen Skjeremo (112.27.0), i Lærdal Stuvane (73.2.0) og i Tokkeåi Elvarheim (16.117.0). I Nea vart det brukt ei vassføring på 2 m³/s for den modellerte strekninga som består av minstevassføringa pluss eit tillegg for uregulert felt mellom studieområdet og sleppunkt for minstevassføring. Tilsvarende har vi der vi har lange elvestrekningar skalert tilsig frå sidevassdrag og lagt desse til i modellen. I tillegg vart det laga vassføringsscenario for vurdering av t.d. slepp av minstevassføring og stopp av kraftverk. For flaumsimuleringa som er gjort i Lærdal er vassføringa frå observerte data i 2020.

Resultat og diskusjon

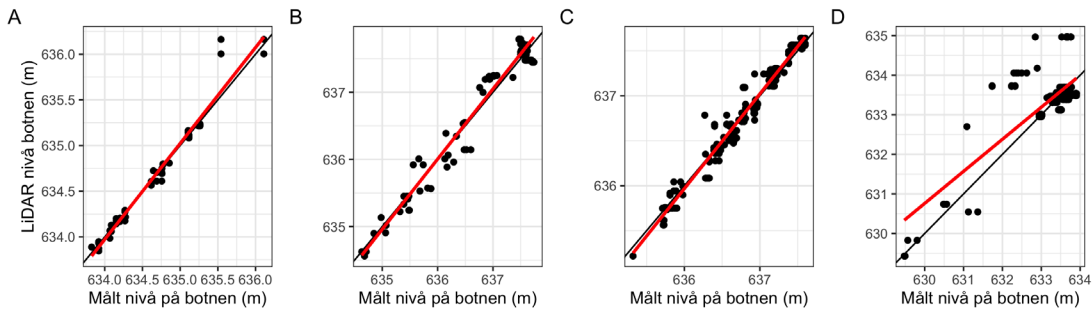
Datakvalitet

Det første målet med arbeidet var å vurdere kvaliteten på data frå den batymetriske laseren. I Surna målte vi opp to grusører ved Sande, ein veg med asfalt og eit felt på ein åker med terrestrisk skanner og samanlikna det med LiDAR data, resultat er vist i Figur 2.

For asfaltvegen hadde vi ein absolutt feil for høgd over havet (z-nivået) (gitt som middelfeil ± standardavvik) på 3.0 ± 2.3 cm, Åker: 4.6 ± 3.2 cm, nedre grusør 6.8 ± 7.5 cm og øvre grusør 3.7 ± 2.9 cm. Vi ser at for den nedre grusøra (Figur 2 C) har vi ein del punkt med avvik opp til 1 meter. Vi ser same feilen om vi samanliknar med topografisk laser og med ein terrengmodell laga med drone same dagen som denne målinga vart gjort, så denne feilen skuldast mest sannsynleg ei randeffekt i den terrestriske punkt-skya. For åkeren (Figur 2B) ser vi at den batymetriske laseren underestimerer verdiane vi finn ved terrestrisk skanning. Dette kan skuldast at veksten på åkeren var høgare når datainnsamling med



Figur 2. Samanlikning av batymetrisk laser med målingar med terrestrisk laser i Surna. A) asfaltflate (n=1068), B) Åker/grasmark (n=932), C) nedre grusør ved Sande (n=2335), D) øvre grusør ved Sande (n=1203).



Figur 3. Samanlikning av batymetrisk laser med målingar med GPS/Sontek M9 i Storåne. Data frå A) er frå ein grunn glattstrøm, B) djupare område med hard botn, C) djupare område med mjuk botn og D) djupe glattstrøm. Data frå Alne (2016).

batymetrisk laser vart gjort. Vi har sett tilsvarende effekt andre stader når kontrollmåling er gjort på over område med periodevis høgt gras og andre låge vekstar.

Ei tilsvarende samanlikning vart gjort i Storåne. Her vart kontrollmålingane gjort med GPS og Sontek M9 i vassdekte område.

Absolutt feil for det grunne området er 5.6 ± 10.6 cm, for hard botn $11 \pm 7,7$ cm, for mjuk botn $7,8 \pm 7,1$ cm og for djupområdet $33,5 \pm 47$ cm. Det djupe området har metodiske problem med få punkt med god overlapp mellom målt og LiDAR på grunn av stor djupne og meir spreidde LiDAR punkt.

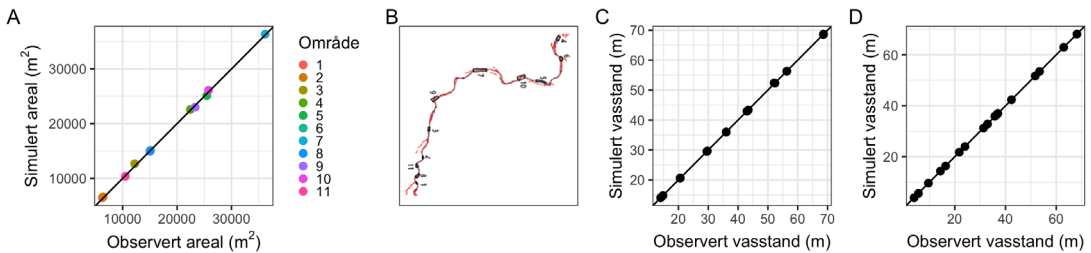
LiDAR data for Storåne var i utgangspunktet gitt som ein serie med tette tverrprofil på ASCII format, og dette datasettet er brukt her. Vi har samanlikna nærliggande målepunkt med ein annan, noko som vil ha større uvisse enn tilsvarende samanlikning av punktskyer som er gjort i Figur 2. Noko uvisse kan og knytast til innmåling av nivå på vassflata for utrekning av

botnnivå ved bruk av M9. Data viser ein stor reduksjon i punkt djupare enn 3 meter i den djupe glattstrømen, med det djupaste målepunktet på 5,1 m, noko som påverkar samanlikninga vist i Figur 3D. Dette området var difor fylt ut med data frå Sontek M9 for å få betre dekning i djupe område når vi interpolerer den digitale terrengmodellen.

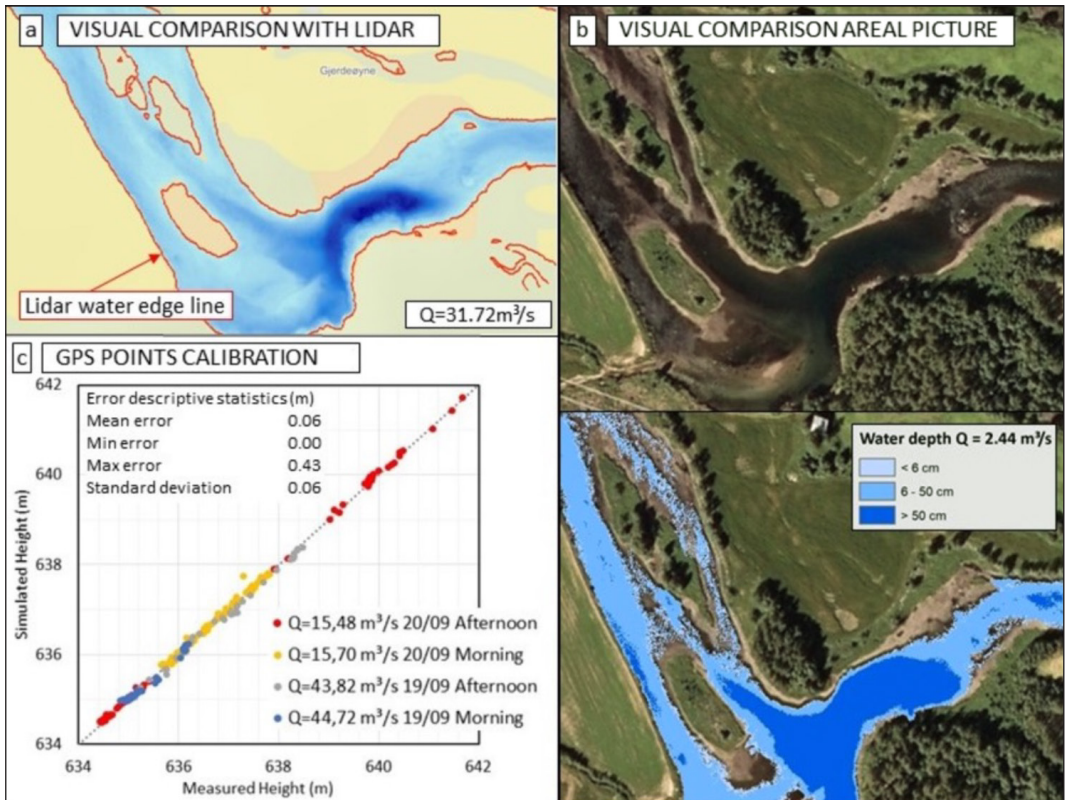
Kvalitet på numerisk modell

Det andre målet var å vurdere kvaliteten på dei numeriske modellane vi sette opp med utgangspunkt i lasermålt batymetri. Figur 4 viser kalibreringa av ein modell for Lærdalselva der vi har samanlikna vassdekt areal for 11 ulike område for den vassføringa målinga var gjort på, og vasslinja for to ulike vassføringar som vart målt med RTK-GPS.

For kontroll mot vassdekt areal fann vi eit gjennomsnittleg avvik på 1,5%. Areala som vart testa varierte mellom 6466 og 36351 m². Her er det òg ei uvisse i det digitaliserte arealet som



Figur 4. Samanlikning av modellsimuleringar med observerte data. A) samanlikning av vassdekt areal for 11 område for ei vassføring på $97 \text{ m}^3/\text{s}$, B) områda som er brukte i A), C) samanlikning med GPS målt vasslinje for $38 \text{ m}^3/\text{s}$, D) samanlikning med GPS målt vasslinje for $10 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figur 5. Samanlikning av modell med observasjonar i Storåne, a) samanlikning med vasskant frå innsamlinga av LiDAR data, b) visuell samanlikning med flybilete på låg vassføring og c) samanlikning med RTK GPS punkt målt på ulike vassføringar. Figur frå Juarez m.fl. (2019).

vart målt inn i samband med datainnsamlinga. For målinga på $38 \text{ m}^3/\text{s}$ var middelfeilen $5,5 \text{ cm}$ og for målinga på $10 \text{ m}^3/\text{s}$ fann vi ein middelfeil på $3,8 \text{ cm}$. For den lågaste vassføringa vart kalibreringa modifisert for å forbetre resultatet, men om vi brukar same kalibrering som for dei større vassføringane får vi framleis ein liten feil. Ei tilsvarende kalibrering vart gjort for Storåne i

Hallingdal (Figur 5), men her samanlikna vi og låg vassføring visuelt mot flybilete for å sjekke at vi før tørrelagde areal rett når kraftverket stoppar og vi har lite vatn frå nedbørfeltet oppstrøms (Juarez m.fl. 2019).

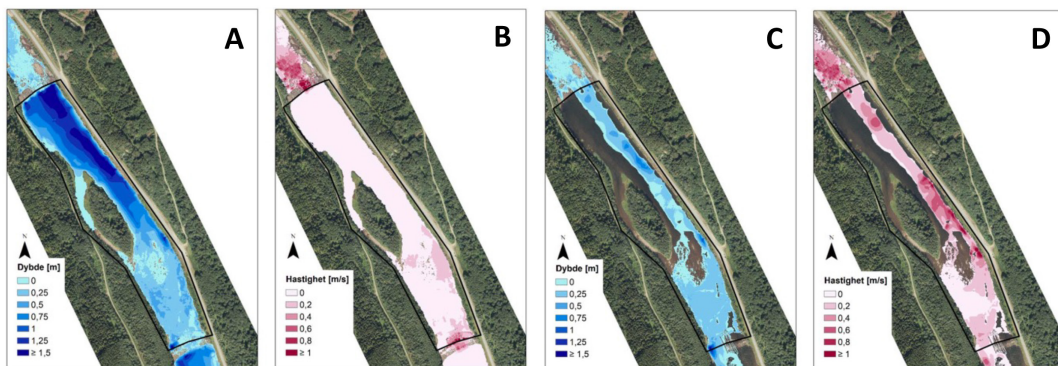
Totalt så dekker kalibreringa i Storåne vassføringar frå $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ til $44,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Her gir det same oppsettet med Manningstal akseptable

Tabell 2. Oversikt over ulike faktorar som påverkar resultatet frå HecRAS frå testar i Tokkeåi, rangert utifrå verknad på simulert vasslinje. Tabell frå Skeie (2016), og meir detaljerte data kan ein finne der.

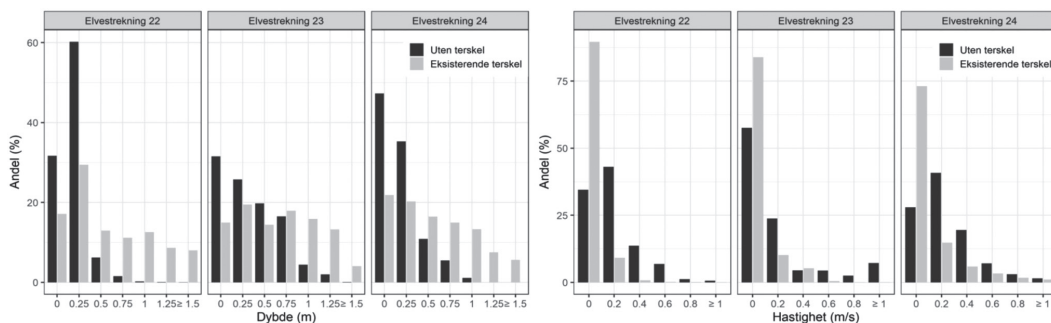
Rangering	Parameter	Uvisse
1	Manningstal	Desimeter
2	Full momentum vs Diffusive wave	Centimeter – desimeter
3	Storleik på gitterceller	Centimeter – desimeter
4	Tidssteg i løysinga	Centimeter
5	Bruddlinjer	Millimeter – Centimeter
6	Turbulens	Millimeter – Centimeter
7	Coriolis	Millimeter
9	Theta (faktor i løysing av likning)	Ingen

Tabell 3. Avvik ved kalibrering av Tokkeåi. Frå Skeie (2016).

Gjennomsnitt avvik (m)	Median avvik (m)	Standdardavvik (m)	Maksimalt avvik (m)
0.00080	0.0	0.047	0.14



Figur 6. Simulering av verknad av fjerning av terskel 22 i Nea. A) djup før fjerning, B) hastighet før fjerning, C) djup etter fjerning og D) hastighet etter fjerning. Frå (Brekke 2020)

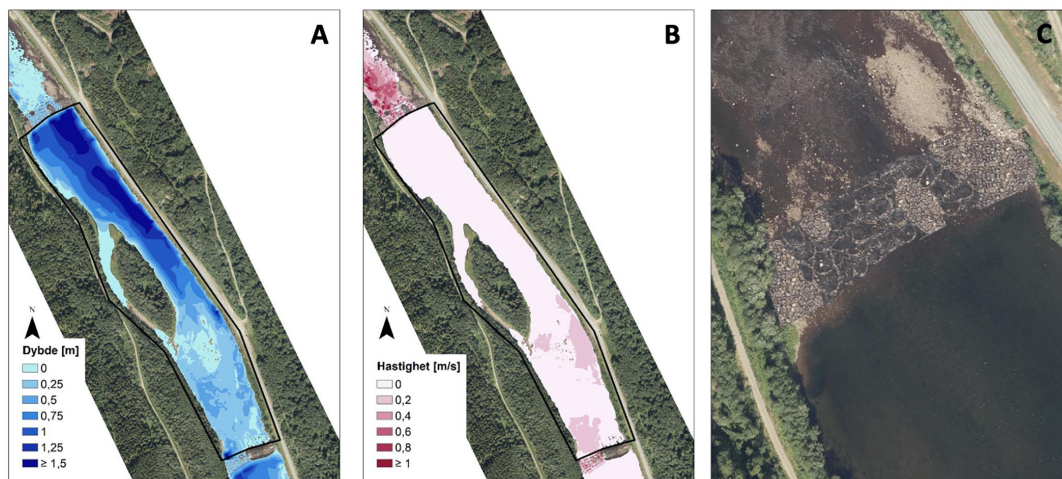


Figur 7. Endring av djup og hastighet for terskel 22 – 24 før og etter fullstendig fjerning av tersklar. Frå (Brekke 2020)

resultat. Middelfeil frå samanlikninga med GPS er på 6 cm.

Med ein detaljert batymetri i Tokkeåi som grunnlag vart det gjort ei vurdering av korleis

faktorar som val av numerisk løysingsmetode («Full momentum» eller «Diffusive wave»), Manningstal, storleik på gitterceller, lengde på tidssteg og bruk av brotlinjer påverkar resultat



Figur 8 Endring av djup og hastighet for terskel 22 – 24 ved justering til celleterskel. A) djup, B) hastighet og C) visualisering av terskelen. Frå (Brekke 2020)

frå den hydrauliske simuleringa (Skeie 2016). Resultata er vist i Tabell 2, og dette har vore brukt som grunnlag for mykje av den modelleringa som er gjort i andre prosjekt.

Tokkeåi vart kalibrert for ei vassføring på 17,4 m³/s mot måling av vasslinje med RTK-GPS. Resultat frå kalibreringa er vist i Tabell 3.

Tiltak i vassdrag

Tre tersklar i Nea vart brukt dette studiet. Først var terskelen heilt fjerna og konsekvensen av dette vart analysert, deretter så vart ulike justeringar av terskelen gjort for å sjå korleis ulik utforming av terskelen påverka vassdekt areal og fordeling av djup og hastighet oppstrøms terskelen. Simuleringar er gjort med terskelen på plass og terskelen heilt fjerna for ei vassføringa på 2 m³/s som tilsvarar minstevassføring med noko lokalt tilsig, resultat frå terskel 22 er vist i Figur 6, og endring i djup og hastighet for alle tersklane er vist i figur 7.

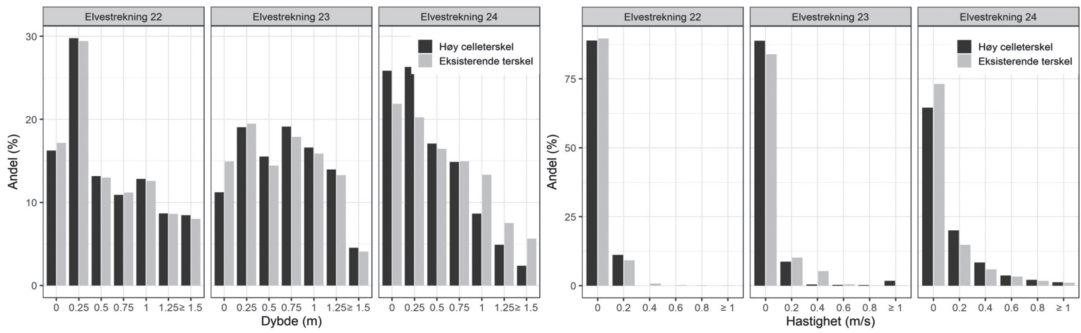
Vi ser frå Figur 6 at det vassdekte arealet vert redusert når terskelen vert fjerna, så ei terskel-fjerning vil påverke det visuelle inntrykket av elva som var ein del av grunnen til at terskelen vart bygd (Junker-Köhler and Sundt 2021). Dette ser vi òg frå fordelinga av djup i figur 7, der den delen som er tørrlagd aukar i alle dei tre terskelbassenga. Vi ser at spesielt terskel 22 vert svært grunn etter fjerning, medan dei to andre

tersklane framleis har noko djupe område etter fjerning. Vi ser òg frå Figur 7 at hastigheita aukar i alle tilfella, noko som er eit mål ved terskeljustering for å gjere forhold for vandring av fisk betre.

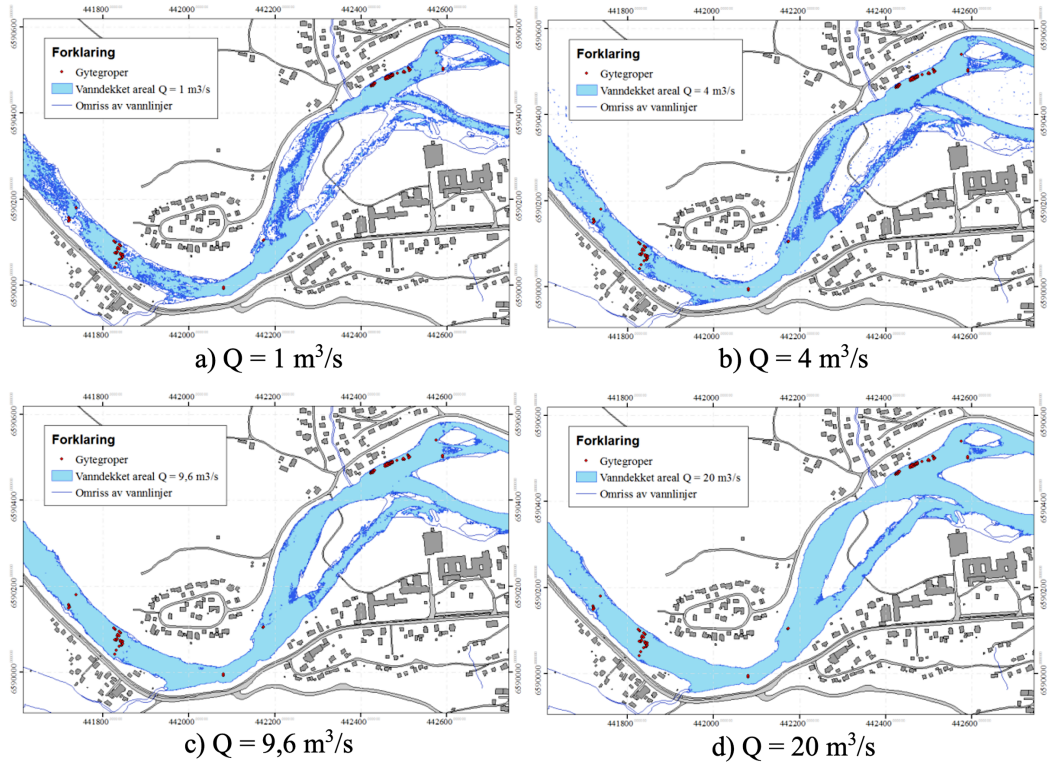
Ei alternativ løysing er å erstatte den noverande steinterskelen med ein celleterskel som gir ei meir eigna løysing for fisk til å passere sjølve terskelen, medan terskelen vil oppretthalde vasstand oppstrøms i høve til ei full fjerning. Figur 8A og B viser djup og hastighet i terskel 22 der den originale terskelen er erstatta med ein celleterskel. Vi ser svært små endringar i vassdekt areal oppstrøms terskelen for denne justeringa. Figur 8C viser sjølve terskelen slik den er utforma i HecRAS med tekstur frå flybilette overlatt. Vi ser her korleis vi får eit samanhengande areal med vatn gjennom terskelen som vil kunne betre tilhøva for vandring av fisk, vi ser derimot frå Figur 8B at vi ikkje får noko stor endring i hastighet i terskelbassenget oppstrøms den nye celleterskelen.

Fordelinga av djup og hastighet i Figur 9 stadfestar små endringar ved justering til ein celleterskel, og det er berre i terskel 24 vi ser at vi får grunnare vatn etter at terskelen er justert. Vi ser og at denne endringa fører til ei lita auke i hastighet i terskelbassenget ved terskel 24.

Gjennom ein detaljert modell av tersklane frå oppmålinga med batymetrisk LiDAR kan vi



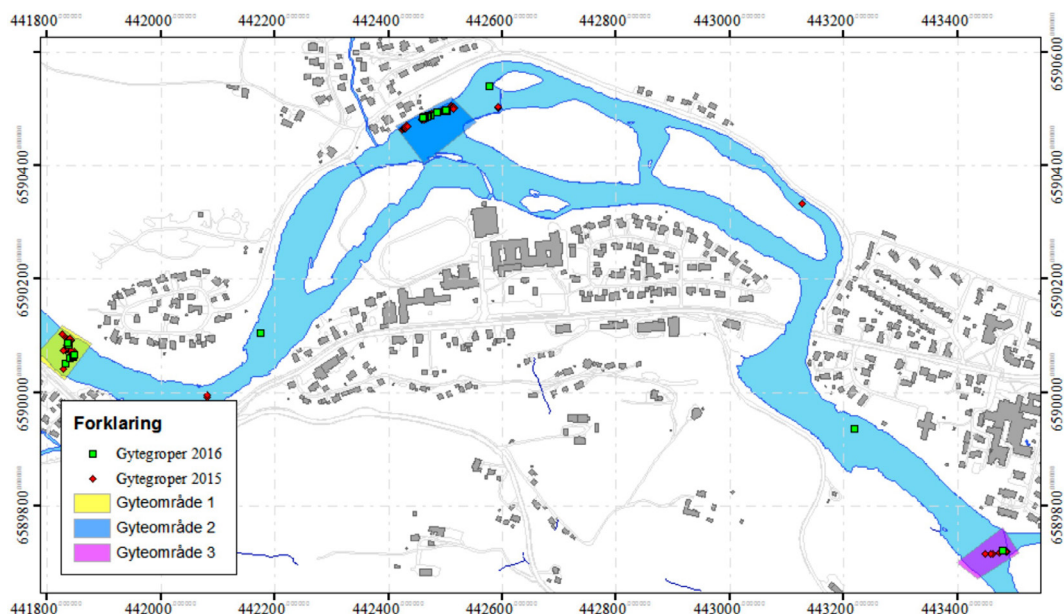
Figur 9. Endring av djup og hastighet for terskel 22 – 24 i situasjonen for justering og i situasjonen med cellederskel. Frå (Brekke 2020).



Figur 10. Vassdekt areal for ulike vassføringar overlagt gyteområde for aure. Vassdekt areal er vist som lyseblå flate, omriss av vasskant er mørkeblå og gyteområde med raud sirkel. Frå Skeie (2016).

gjere endringar i modellen for å sjå på effekt for ein eventuelt gjer fysiske endringar i vassdraget, noko som vil gi eit betre grunnlag for ein plan for justeringar. Brekke (2020) viser fleire eksempel på ulike utformingar av tersklar i Nea, og gjer og tilsvarende vurderingar for sjølve terskelen. Justering av store tersklar som i Nea kan ha positiv effekt for vassdragsmiljøet i dei gamle

terskelbassenga (Fjeldstad m.fl. 2012), og ein god batymetri kan vi føresjå desse endringane meir effektivt enn gjennom ei metode basert på prøving og feiling. Bustos m.fl. (2019) viser eit anna eksempel på bruk av LiDAR grunnlag og hydrauliske simuleringar for å vurdere miljøtiltak i Ljungan. Som i eksempelet frå Nea vart og batymetrien her justert og simulering av



Figur 11. Gyteområde i Storåne. Frå Skeie (2016)

Tabell 4. Gyteområde i Tokke klassifisert i høve til senking, tørrlagt areal og amplitude. Markert med raud – grøn etter skalaen svært stor – stor – moderat og liten effekt. Etter (Skeie 2016).

	Parameter	Område 1	Område 2	Område 3	Samla
Vinter	Senkingshastighet (cm/t)	37	16	12	22
	Tørrlagt areal (%)	17	13	3.3	11
	Amplitude (-)	8.4	7.7	8.2	8.1
Sommar	Senkingshastighet (cm/t)	13	6.9	6.7	8.9
	Tørrlagt areal (%)	4.0	3.3	1.0	2.9
	Amplitude (-)	2.3	2.2	2.2	2.2

tilhøve før og etter justeringar vart gjort, men her vart det sett på fjerning av buner og opning av murar for å sikre vassføring i sideløp til hovudelva.

Vassdragsmiljø

I Tokkeåi er det gjort simuleringar av ulike vassføringar frå 1 m³/s til 20 m³/s for å kople vassdekt areal mot observerte gyteområde i elva (Heggenes m.fl. 2009) for å vurdere risiko for tørrlegging. Vi ser at nokre av dei observerte gyteområda er utsette ved 1 m³/s, men ved neste vassføring på 4 m³/s er dei observerte gyteområda alle vassdekte.

For å vurdere korleis effektkøyning påverkar gyteområda i Tokke vart det henta ut eit vintertilfelle (14,2 – 1,7 m³/s) og eit sommartilfelle (12,8 – 5,7 m³/s) for tre ulike område i elva (Figur 11). Effekten av rask reduksjon i vasstand er vurder i høve til kriteria i Bakken m.fl. (2021) der hastigheit på senking, tørrlagt areal og amplitude vert vurdert på ein skala frå svært stor til liten. Tre gyteområde i Tokkeåi vart undersøkte (Figur 11).

Resultata frå simuleringa av raske endringar er vist i Tabell 4. Dei tre områda er meir utsett på vinteren enn om sommaren, sidan vassføringa i elva om sommaren er større slik at stopp ikkje

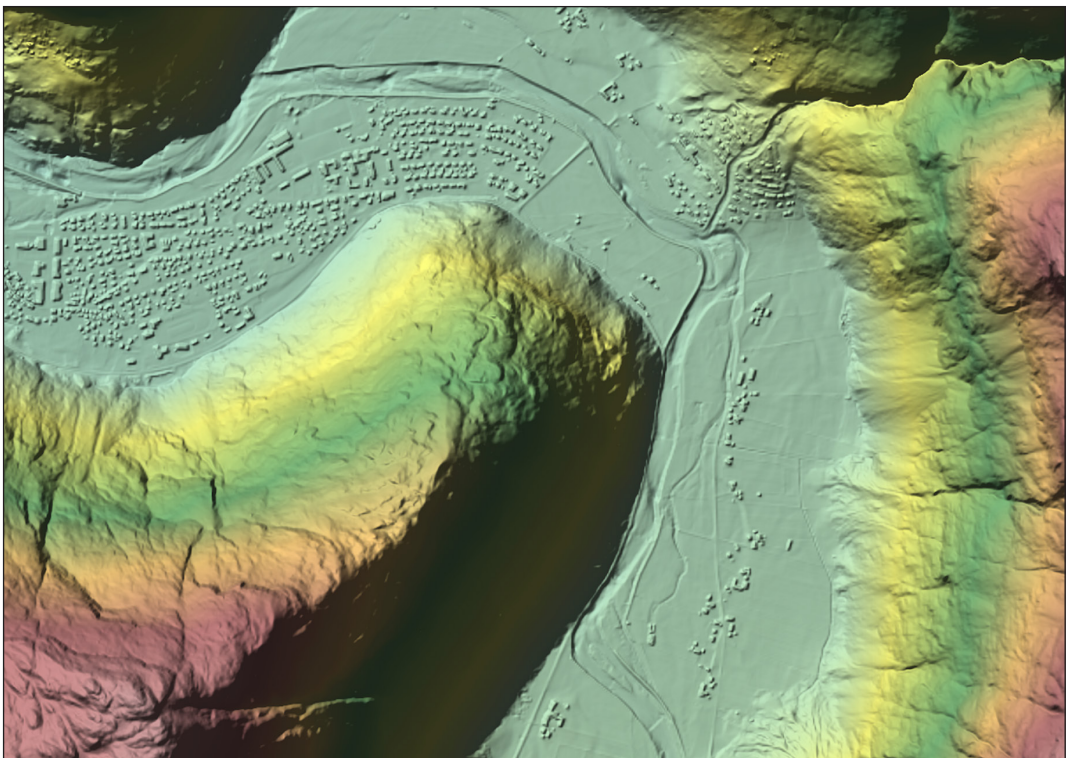
fører til like stor tørrelgging. At endringane er størst på vinteren kan vere eit problem i seg sjølv, sidan slike endringar er meir kritiske i vintersesongen (Bakken m.fl. 2021). Simuleringane viser at på vinteren har vi svært store utslag i område 1 og delvis i område 2. Samla sett har vi svært stor effekt av hastigheit på nedtapping, men moderat effekt av tørrelgging på vinteren. Ser ein på heile elva og ikkje berre dei tre gyteområda, så er det svært stor effekt av tørrelgging på vinteren og moderat tørrelgging på sommaren. Områda som er spesielt utsett for tørrelgging kan vi òg sjå i Figur 10.

Flaum

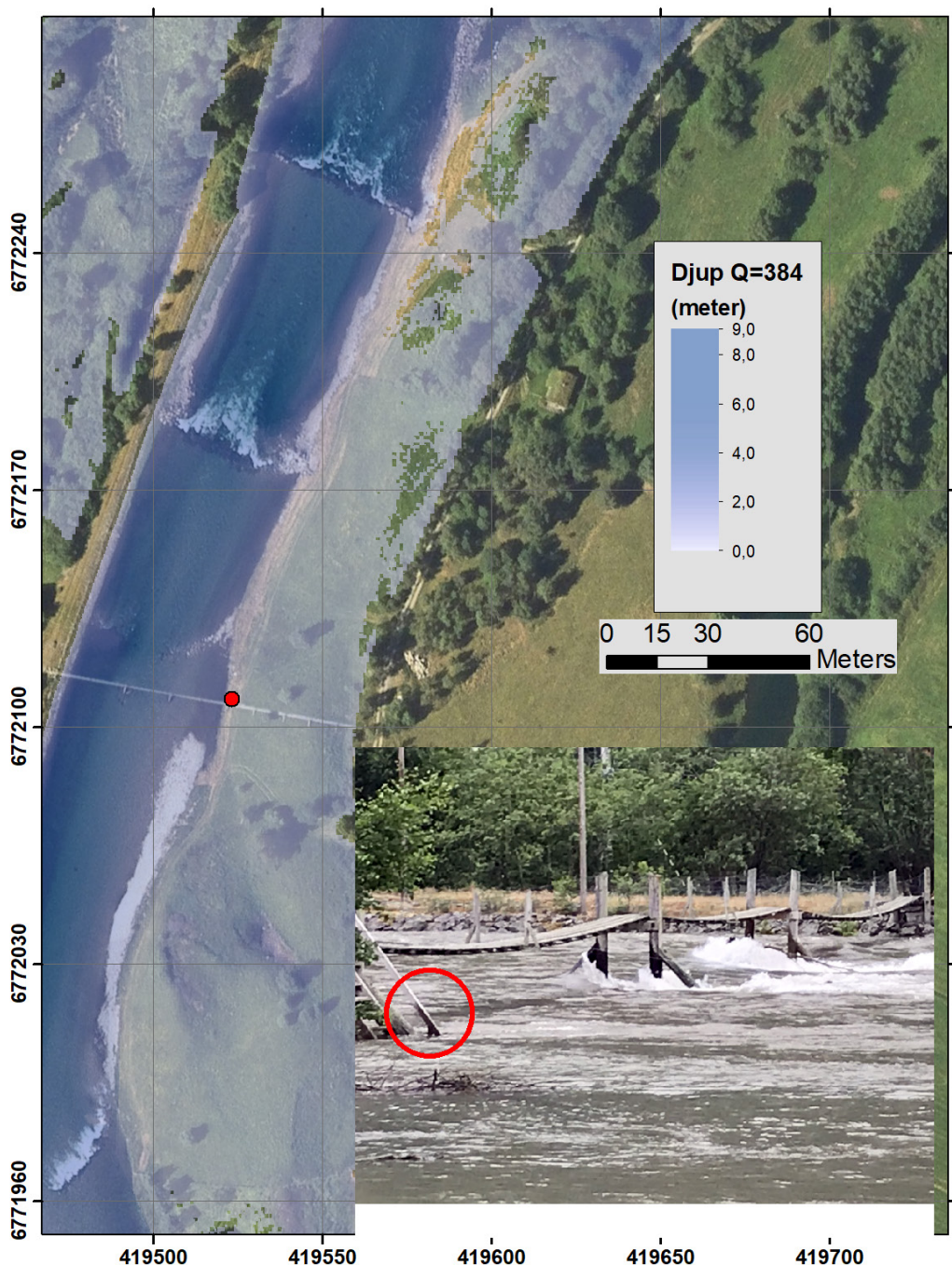
Simulering av vasstand ved flaum er ein svært viktig bruksområde for hydrauliske modellar og grunnlaget or å lage kart som viser kva område som vert lagt under vatn ved flaum av ulike storleikar. Måling med topografisk laser har gitt eit svært bra datagrunnlag for å lage slike kart, og

her kan dette datasettet koplant med batymetrisk LiDAR for å lage ein komplett modell av terrenget både over og under vatn. Figur 12 viser ein slik modell for ein del av Lærdalselva. Her erstattar batymetrisk LiDAR den delen av høgdemodellen som ligg innanfor det som er vassdekt. Det er viktig å sjekke kor godt randsonene i det batymetriske datasettet stemmer med høgdemodellen ved samankopling av dei to datasetta.

Det er viktig med batymetri òg for simulering av flaum. Awadallah m.fl. (2022) viser at simulering med berre topografisk DEM som utgangspunkt kan føre til store feil i vurdering av vassdekt areal sjølv ved flaum med høgt gjentakintervall. Ei utfordring ved simulering av flaum er kalibrering mot høge vassføringar og vassdekt areal sidan slike data ofte ikkje finst for situasjonar med stor vassføring. Sommaren 2020 var det ei flaum i Lærdalselva som nådde 384 m³/s i døgnmiddel, noko som er over



Figur 12. Integrert DEM for Lærdal basert på topografisk og batymetrisk LiDAR. Bygningar er representert som «klossar» i denne modellen med FKB-Bygning som utgangspunkt.



Figur 13. Vassdekt areal ved ei vassføring på $384 \text{ m}^3/\text{s}$ i Lærdal. Kontrollpunktet er vist i figuren saman med bilete som rekkverk på bru som vart målt inn. Foto: Ola Petter Bøe.

kulminert middelflom. I samband med dette vart det tatt ein del bilete lokalt der ein kan finne vasstand frå ulike objekt langs elva. Dette er

brukt for å estimere vassdekt areal ved flaum basert på den kombinerte terrengmodellen vist i Figur 12. Vi ser vassdekt areal i Figur 13. Her er

kontrollpunktet markert, og vi fann eit avvik på omtrent 8 cm mellom vassflata i modellen og det målte nivået på handtaket der vi såg vassstand på biletet.

Vi har eit tilsvarande punkt lenger nede i vassdraget som gir omtrent same avvik, og sjølv med stor uvisse viser resultatata eit potensiale til å simulere flaum med ein nøyaktig terrengmodell. Det viser òg at det vi treng meir målingar på svært høg vassføring for verifisering av hydraulisk modellering av vassdekt areal ved flaum.

Oppsummering

Erfaringa med bruk av batymetrisk LiDAR dekker fleire elver og fleire ulike typar av analyser. Vi har i prosjektet nytta batymetrisk LiDAR til å gjere prosjekt som dekker fleire viktige oppgåver innanfor forvaltning og forskning i vassdrag. Ein overordna konklusjon er at data frå LiDAR gjer slike analyser enklare og ein eliminerer til ei stor grad uvisse vi har hatt i slike prosjekt med tynt datagrunnlag, noko som ofte er tilfelle når manuell innsamling må gjerast.

Med utgangspunkt i prosjektet sine tre målsetningar kan vi konkludere følgjande:

1. Kvaliteten på data er med svært få unntak god, og har blitt betre over tid. Vi ser at data frå batymetrisk LiDAR gir eit grunnlag som vi knapt nok kan få frå andre metodar. Eit feltarbeid for å skaffe data med tilsvarande dekning og presisjon over store område ville vere svært omfattande, kostbart og mest sannsynleg umogleg å oppnå. Vi har brukt ein del tid på å fylle ut datasetta der vi har manglar, og i etterkant så kan det diskutertast om ifylling av små djupområde er naudsynt.
2. Vi ser at kvaliteten på dei hydrauliske modellane som bygger på batymetrisk LiDAR vert svært god. Det krev mindre arbeid med kalibrering når batymetrien er detaljert, og samanlikninga med observerte vasslinjer og vassdekt areal viser god samanheng.
3. Vi ser og at simulering av moglege tiltak i vassdrag vert enklare når vi har ein god elvegeometri som grunnlag, og at modellen

kan kalibrerast og tilpassast ulik bruk. Ved simulering av vassdekt areal og tørrlegging ved effektkøyning gir den detaljerte digitale modellen av elvebotnen meir nøyaktige arealutrekningar og betre kopling mot biologiske data. For tiltak i vassdrag som i eksempelet med terskeljustering så gir modellen av terskelen frå laserdata eit svært godt utgangspunkt for å digitalt redigere inn endringane vi ønskjer å simulere. For flaum har kan vi gjennom å kople topografiske og batymetriske data lage ein svært detaljert både av elva under vatn og av flaumslettene.

Samanlikninga av LiDAR mot andre måledata er med unntak av terrestrisk skanner basert på ei punktdata med langt mindre oppløysing enn det den batymetriske laseren har. Dette gir uvisse i resultatata, men arbeid er undervegs i eit nasjonal LiDAR prosjekt leia av Kartverket og NVE for å gjere ei meir omfattande samanlikning mellom LiDAR og andre detaljerte målemetodar. Dette arbeidet vil og gi betre kunnskap om elver der LiDAR måling er vanskeleg og korleis slike situasjonar kan handterast.

Takk til

Takk til Statkraft og Hafslund Eco for tilgang til data og for å ha initiert ei rekke masterprosjekt som har evaluert batymetrisk LiDAR i Surna, Tokke, Ljungan og Storåne. Topografiske og batymetriske data frå Lærdal er henta frå www.hoydedata.no. Vassføringsdata er henta frå NVE sin Hydra II database. Takk til alle som har tatt del i feltarbeid og tilpassing av data, spesiell takk til masterstudent Sonia Seguin Garcia og utvekslingsstudent Etienne Limpens for bidrag til modellering i Lærdal. Arbeidet med denne artikkelen er gjort i samband med eit pågåande nasjonalt prosjekt for uttesting av grøn laser i vassdrag og innsjøar (NVE, Kartverket).

Referanser

Alne, I. (2016). Topo-Bathymetric LiDAR for Hydraulic Modeling - Evaluation of LiDAR Data From Two Rivers. MSc, Norwegian University of Science and Technology.

- Awadallah, M., A. Juarez and K. Alfredsen (2022). Comparison between Topographic and Bathymetric LiDAR Terrain Models in Flood Inundation Estimations. *Remote Sensing* 14(1) doi:doi.org/10.3390/rs14010227
- Bakken, T. H., A. Harby, T. Forseth, O. Ugedal, J. Sauterleute, J. H. Halleraker and K. Alfredsen (2021). Classification of hydropeaking impacts on Atlantic salmon populations in regulated rivers. *River research and applications* doi:DOI: 10.1002/rra.3917
- Brekke, I. (2020). Modelling av terskelfjerning og terskelendringer i Nea (Modelling weir removal in river Nea (In Norwegian)). MSc, NTNU.
- Brunner, G.(2021).HEC-RAS River Analysis System US Army Corps of Engineers CPD-68
- Bustos, A., K. Alfredsen, H.-P. Fjeldstad and K. Ottoson (2019). Ecohydraulic Modelling to Support Fish Habitat Restoration Measures. *Sustainability* 11(5) doi:doi.org/10.3390/su11051500
- Casas-Mulet, R., K. Alfredsen, T. Boissy, H. Sundt and N. Rütter (2014). Performance of a one-dimensional hydraulic model for the calculation of stranding areas in hydropeaking rivers. *Rivers Research and Applications: an international journal devoted to river research and management* doi:http://dx.doi.org10.1002/rra.2734
- Fjeldstad, H.-P., B. T. Barlaup, M. Stickler, S. E. Gabrielsen and K. Alfredsen (2012). Removal of weirs and the influence on physical habitat for salmonids in a Norwegian river. *Rivers Research and Applications: an international journal devoted to river research and management* doi:http://dx.doi.org10.1002/rra.1529
- Heggenes, J., J. Sageie and J. Kristiansen(2009).Rehabilitering av elvehabitat i Tokkeåi, Dalen i Telemark: Tilstand og tiltak. *Høgskolen i Telemark* 2/2009
- Isenburg, M. (2011). LASzip: lossless compression of LiDAR data. *European LiDAR Mapping Forum*. Salzburg, Austria.
- Juarez, A., A. Adeva-Bustos, K. Alfredsen and B. Dønnum (2019). Performance of A Two-Dimensional Hydraulic Model for the Evaluation of Stranding Areas and Characterization of Rapid Fluctuations in Hydropeaking Rivers. *Water* 11 doi:doi:10.3390/w11020201
- Junker-Köhler, B. and H. Sundt (2021). Assessing Visual Preferences of the Local Public for Environmental Mitigation Measures of Hydropower Impacts—Does Point-of-View Location Make a Difference? *Water* 13(21) doi:doi.org/10.3390/w13212985
- Kinzel, P., C. Wright, J. Nelson and A. Burman (2007). Evaluation of an experimental LiDAR for surveying a shallow, braided, sand-bedded river,. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(7): 838-842
- Legleiter, C., P. Kyriakidis, R. McDonald and J. Nelson (2011). Effects of uncertain topographic input data on two-dimensional flow modeling in a gravel-bed river. *Water Resources Research* 47 doi:doi:10.1029/2010WR009618
- Mandlbürger, G., C. Hauer, M. Wiesner and N. Pfeifer (2015). Topo-Bathymetric LiDAR for Monitoring River Morphodynamics and Instream Habitats—A Case Study at the Pielach River. *Remote Sensing* 2015(7): 5 doi:10.3390/rs70506160
- Saylam, K., A. Averett, L. Costard, B. Wolaver and S. Robertson (2020). Multi-Sensor Approach to Improve Bathymetric Lidar Mapping of Semi-Arid Groundwater-Dependent Streams: Devils River, Texas. *Remote Sensing* 12(15) doi:doi.org/10.3390/rs12152491
- Skeie, L. (2016). LIDAR-data for hydraulisk modellering av Tokkeåi. MSc, NTNU.