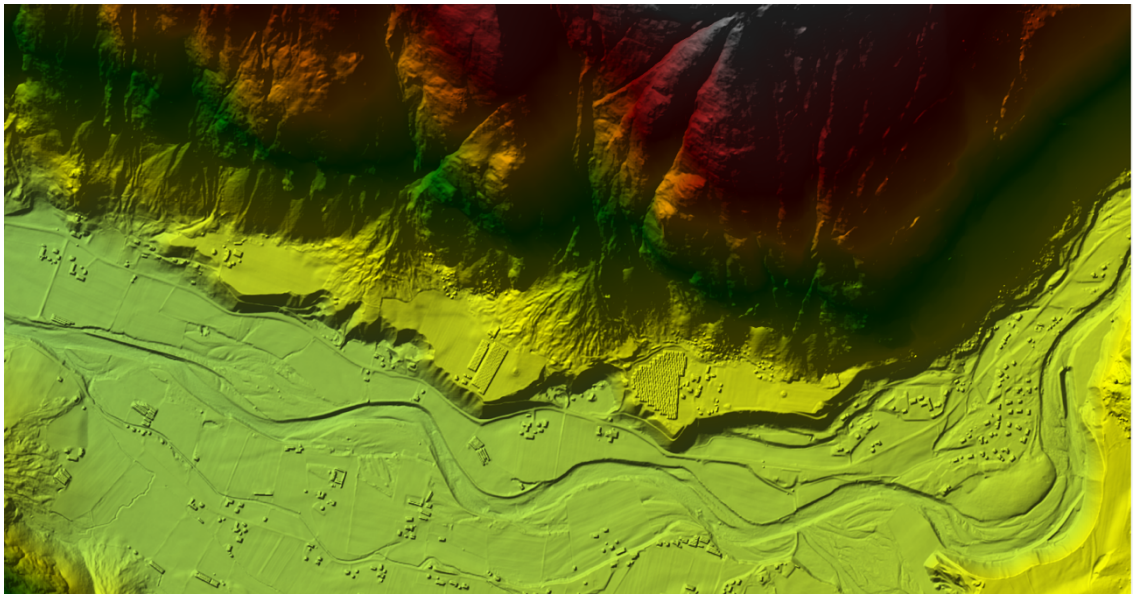


Knut Alfredsen

Oversikt over bruk av batymetrisk LiDAR ved NTNU



IVM Rapport B1-2022-1

Knut Alfredsen

Oversikt over bruk av batymetrisk LiDAR ved NTNU

Rapport B1-2022-1

Trondheim Mars 2022

Norwegian University of Science and Technology (NTNU)
Faculty of Engineering Science and Technology
Department of Civil and Environmental Engineering

ISBN 82-7598-091-7

Samandrag

Batymetrisk LiDAR er eit laserinstrument med ein bølgjelengd som trengjer gjennom vassflata og kan dermed måle refleksjonar frå botnen av elva slik at data om topografien under vatn kan samlast inn. Metoden har avgrensingar knytt til djup, turbiditet og turbulens i overflate, men ved rette tilhøve er det ei svært effektiv metode for å samle detaljerte data om batymetrien i ei elv. Dette er data som sidan kan nyttast i ulike former for analyse, til dømes som grunnlag for hydraulisk modellering, dimensjonering, overvaking og evaluering av ulike inngrep og tiltak i vassdrag.

Vi har ved institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU vore involvert i flire prosjekt for evaluering av data frå LiDAR, og i prosjekt der vi har brukt data i modellering. Ei rekke studentarbeid er gjort innan temaet, og føremålet med denne rapporten er å gi ei kort oppsummering av prosjekta og nokre av funna som er gjort. Det er og laga ei oversikt over alle rapportar, masteroppgåver og tidsskriftartiklar som er produsert i løpet av dei åra vi har jobba med dette.

Dei første forsøka med bruk av LiDAR vart gjort i samarbeid med ECO og Statkraft som sørger for oppmåling av fleire regulerte elver. Eg vil difor rette ei stor takk til Morten Stickler og Bjørn Otto Dønnum som initierte dette prosjektet og som har lagt til rette for mange interessante prosjekt for studentar på alle nivå. Takk og til alle studentar og stipendiatar som har jobba med problemstillingane. Ein spesiell takk går til Ragnhild Hammeren og Ingrid Alne som var dei første som var involvert i prosjektet og som fekk den utfordrande oppgåva med å finne ut av mykje nytt og ukjent samt å handtere forseinkingar i data og format som det ikkje var lett å bruke i praksis. Bidraga frå prosjektoppgåva til Hammeren og Alne og masteroppgåva til Alne var svært viktige og sentrale for at vi i dag er operative på praktisk bruk av metodane.

Forsidefoto: Terrengmodell av Lærdalselva (Ana Juárez/Sonia Seguin)

Innhald

Samandrag	3
Innhald	5
1. Bakgrunn.....	7
2. Eksempel på prosjekt og bruk av data.....	9
2.1 Oversikt over modellerte elver.	9
2.2 Vurdering av datakvalitet og format	9
2.3 Vurdering av Miljøtilhøve i vassdrag.....	14
2.4 Vurdering av fysiske tiltak i vassdrag.....	19
2.5 Vurdering av flom i vassdrag	24
2.6 Kopling mot bruk av dronedata, istilhøve og habitat i vassdrag.....	27
3. Oversikt over oppgåver og publikasjonar.....	29
4. Oppsummering og vidare arbeid.....	31
5. Referanser	32

1. Bakgrunn

Data som definerer geometrien til elver under vassflata har vore ei utfordring å samle inn i samband med t.d. hydraulisk modellering, og det er godt kjent at kvaliteten på modellar vil vere svært avhengig av kvaliteten på data. Metodar som er brukt dekker alt frå manuell måling med nivellerkikkert, GPS eller totalstasjon til ekkolodd eller multistrålesonar frå båt. Multistrålesonar er ei effektiv metode, men er påverka av at elvene må vere eigna for måling frå båt, . Laserinstrument (Light Detection and Ranging, LiDAR) frå fly vore brukt som ei metode for å dekke store landområde med detaljerte data, jamfør for eksempel oppmålinga av Norge (www.hoydedata.no). Topografisk LiDAR (bølgjelend 1064 nm) er den vanlegaste metoden, men denne har den ulempa at den ikkje trenger gjennom vassflata og vil difor ikkje gi batymetri. I dei seinare åra er det gjort målingar med batymetrisk LiDAR (grøn laser, bølgjelengd 532 nm, t.d. Mandlbürger et al. (2015)) som kan trenge gjennom vassflata og produsere topografien under vatn, derav namnet. Slike instrument er påverka av kvalitet på vatnet, turbulens og djup, men kan under rette omstende vere svært godt eigna for innsamling av gode batymetridata med stor detalj.

Faggruppa for vassdragsteknikk ved institutt for bygg og miljøteknikk vart i 2015 involvert i arbeid med grøn laser gjennom eit prosjektinitiativ frå Statkraft og Eco Hafslund. Prosjektet vart eit pilotprosjekt i tidleg fase med testar i vassdraga Tokkeåi (Telemark-Vestfold fylke), Ljungan (Sverige) og Hallingdalselva (Innlandet fylke). Hovuddelen av resultatane i denne rapporten vil omhandle data samla inn av firmaet Airborne Hydro Mapping, AHM, frå Austerrike. Data er frå ein Riegl LiDAR montert i eit småfly som gjorde all innsamling i desse vassdraga. Følgande delmål med samarbeidsprosjektet med Statkraft og Eco Hafslund var følgande:

1. Evaluere datakvalitet og format av grøn laser for kartlegging i utvalgte norske og svenske vassdrag.
2. Teste ut korleis data kan brukast som grunnlag for hydraulisk modellering for vurdering av miljøforhold, fysiske tiltak og flom i vassdrag.
3. Vurdere bruk av grøn laser i kombinasjon med andre datakjelder i samband med ulike analyser i vassdrag.

Involvering av studentar frå NTNU var eit grunnlaget for prosjektet, og det er gjort ei rekke med studentoppgåver i samband med arbeidet med LiDAR.

I første omgang vart data vurdert og testa (Hammeren and Alne 2015; Alne 2016). I dette første prosjektet vart det og målt inn ein del data for å fyller inn i område der LiDAR ikkje hadde dekning. Prosjektet fekk ei utfordrande start på grunn av forseinkingar i leveranse av data og store datamengder på ASCII format som det ikkje var enkelt å prosessere. I første omgang vart data levert som tverrprofil i x,y,z format og tilpassa terrengmodellar i x,y,z format. Konklusjonen frå det første prosjektet var at det er langt enklare å preparere data for bruk om data vert levert som punktskyer i LAS format og dette fekk vi og ordna for alle dei første studieelvene. Det grunnleggjande arbeidet til Hammeren og Alne har ført til gode rutinar for handtering og vurdering av LiDAR data. Modellar for Storåne i Hallingdal (Juarez

2018; Juarez et al. 2019), Ljungan (Bustos et al. 2019a; Bustos et al. 2019b) og i Tokke (Skeie 2016) vart laga med utgangspunkt i desse datasetta.

Sidan starten i 2015 er det gjennomført fleire prosjekt ved bruk av batymetridata frå LiDAR med ulike føremål, eksempel er simulering av vassdekt areal for miljøvurderingar (Skeie 2016; Alfredsen et al. 2019; Bustos et al. 2019b), simulering av effektkøyring (Juarez et al. 2019), modellering av vass temperatur (Papanikolaou 2017) og ulike vurderingar relatert til flom (Awadallah et al. 2021; Juarez et al. 2021). Arbeidet er gjort gjennom prosjekt og masterarbeid, som ein del av doktorgradsarbeid og som ein del av anvendte prosjekt. Ei full oversikt over alle arbeid som er gjort finst i kapittel 3, medan nokre eksempel er vist i kapittel 2. Erfaringane er at data er avhengige av både instrument og måten data er samla inn på. I nokre tilfelle har vi opplevd at innsamlinga har gitt lite til ingen data, t.d. første runde med data frå Lærdal i 2016, medan t.d. andre runde i Lærdal i 2018 ga eit svært detaljert datasett. Men det kan verke som om at og teknologi og teknikken har betra seg med tida, og at dei siste data samla inn er betre enn tidlege forsøk.



Figur 1 Lærdalselva i Sogn har vore mykje brukt i uttesting av data frå batymetrisk LiDAR.

2. Eksempel på prosjekt og bruk av data

2.1 Oversikt over modellerte elver.

Gjennomførte testar er gjort i utvalte vassdrag i Norge og Sverige. Val av vassdrag er basert på eit mål om å teste ut i varierte type elver med omsyn til vassføring, vassfarge, morfologiske forhold og gradient. I tabell 1 finst ei oversikt over dei vassdraga som NTNU har jobba i med batymetrisk LiDAR. I ein del av desse er data frå batymetrisk LiDAR kopla saman med topografisk LiDAR for å lage ein modell av elv med flomsletter, noko som er tatt med i tabellen. Dette er gjort ved at den delen av topografien som manglar data i det topografiske datasettet er erstatta med batymetridata frå LiDAR, og dannar dermed ein komplett DEM av elvedalen med batymetridata for elva.

Tabell 1 Oversikt over elver der det er sett opp hydrauliske modellar

Elv	Datakjelde	Modell	Kommentar
Ljungan, Sverige	Statkraft, AHM	HEC-RAS 1D	Simulering av miljøtiltak. Ifylling frå Sontek M9
Storåne	ECO, AHM	HEC-RAS 1D/2D	Kopla topografisk batymetrisk
Lærdal	NVE, AHM, Terratec Høydedata	HEC-RAS 2D	Kopla topografisk batymetrisk To datasett, men første dårleg
Tokke	Statkraft, AHM	HEC-RAS 2D	Kopla topografisk batymetrisk To datasett finst
Gaula	NVE, Terratec Høydedata	HEC-RAS 2D	Kopla topografisk-batymetrisk Fleire hydrauliske modellar.
Nea	HydroCen, Terratec	HEC-RAS 2D	Kopla topografisk batymetrisk
Surna	Statkraft, AHM	HEC-RAS 1D HEC-RAS 2D Telemac	Kopla topografisk batymetrisk Modellering av vassstemperatur
Gaua	NVE Høydedata	HEC-RAS 2D Basement	Kopla topografisk-batymetrisk Flom/erosjon
Sokna	NVE Høydedata	HEC-RAS 2D	Kopla topografisk-batymetrisk
Lågen - Otta	NVE Høydedata	HEC-RAS 2D	Batymetrisk LiDAR
Nausta	NVE Høydedata		Kopla topografisk-batymetrisk
Årdal	Lyse, Terratec	HEC-RAS 1D	Batymetrisk LiDAR Hydraulikk/isproblematikk.
Eidselva	NVE, Terratec Høydedata	HEC-RAS 2D	Batymetrisk LiDAR

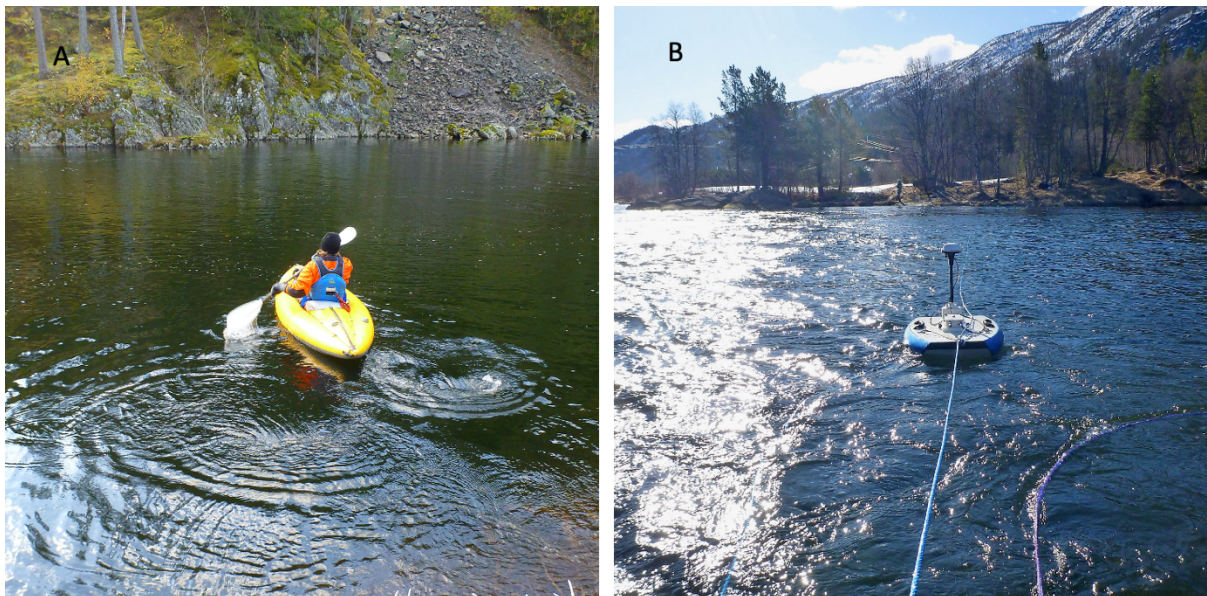
I tillegg til dette er det og gjort noko arbeid ved bruk av topografisk LiDAR for modellering, og ulike metodar for å korrigere batymetrien basert på tverrprofil, andre måledata og meir teoretiske metodar er testa ut. Dette vil ikkje verte omtalt nærare her, men i mange tilfelle vil eit godt grunnlag med batymetrisk LiDAR vere eit svært godt utgangspunkt for å utvikle slike metodar, sjå for eksempel Sundt et al. (2021) som brukar data frå batymetrisk LiDAR for å evaluere ei metode som finn batymetri frå bilete frå fly eller satellitt.

2.2 Vurdering av datakvalitet og format

Kvaliteten på data frå batymetrisk LiDAR har variert med instrument, målestrategi og tilhøve i vassdraget som turbulens, djup, humusinnhald og andre faktorar. I enkelte målekampanjer har det og vore brukt andre instrument for å supplere LiDAR, blant anna er data frå Gaula og

Lågen ein kombinasjon av LiDAR og fleistråleekkolodd. Resultata i dette kapittelet vil omhandle data samla inn av firmaet Airborne Hydro Mapping frå Østerrike, og dette er data frå ein Riegl LiDAR montert i eit småfly. Data er georefererte mot GPS målingar på bakkenivå. Dette er data som no vert levert som LAS filer som inneheld batymetrien, alle andre data er filtrert vekk. I tillegg vert det levert ei fil som viser vassdekt areal den dagen flyginga er gjort.

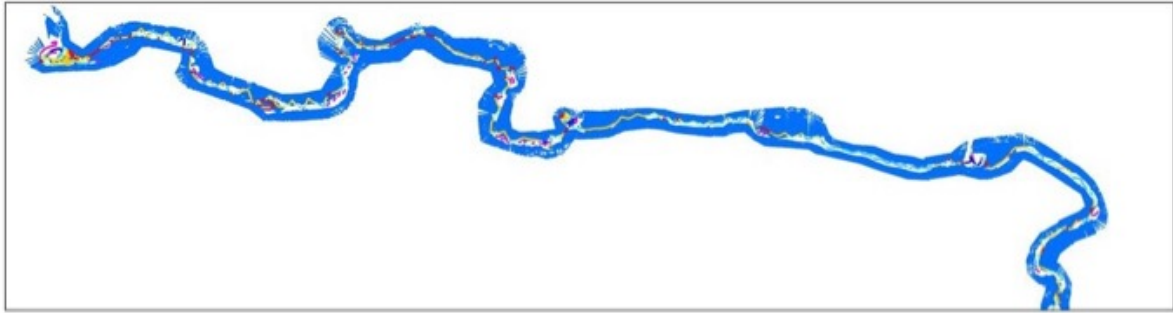
I enkelte tilfelle har det mangla data frå område med turbulent vatn eller der elva er så djup at laseren ikkje har greidd å måle botnen. Dette problemet er avhengig av elv. I Surna, Tokke og Storåne mangla det data i enkelte djupe hølår. Desse vart fylt inn ved at vi målte med ein Sontek M9 Hydro Surveyor i dei områda som mangla data (Figur 1), samt noko GPS målingar der dette var mogleg.



Figur 2A) Lars Skeie måler inn manglande data i djupområde i Tokke med instrument montert på kajakk, B) Sontek M9 i Storåne.

Eit spesielt eksempel er målingane gjort i Ljungan i Sverige. Elva er prega av humus og dette avgrensa kor djupt laseren kunne måle. Her vart det og brukt ein Sontek M9 sensor for å fylle inn data, men i motsetning til Tokke, Surna og Storåne der det stort sett var ifylling av punkt langs elva så måtte data samlast inn langs heile djupålen i Ljungan. Nokre av dei større djupe hølåne vart samla inn frå båt, medan lange strekningar vart dekt ved at lokale kajakkpadlarar slepte med M9 på flåte på kryss og tvers av djupålen (Figur 2). Tilgang til personar med kunnskap om kajakkpadling har elles vist seg svært nyttig i datainnsamling i desse prosjekta.

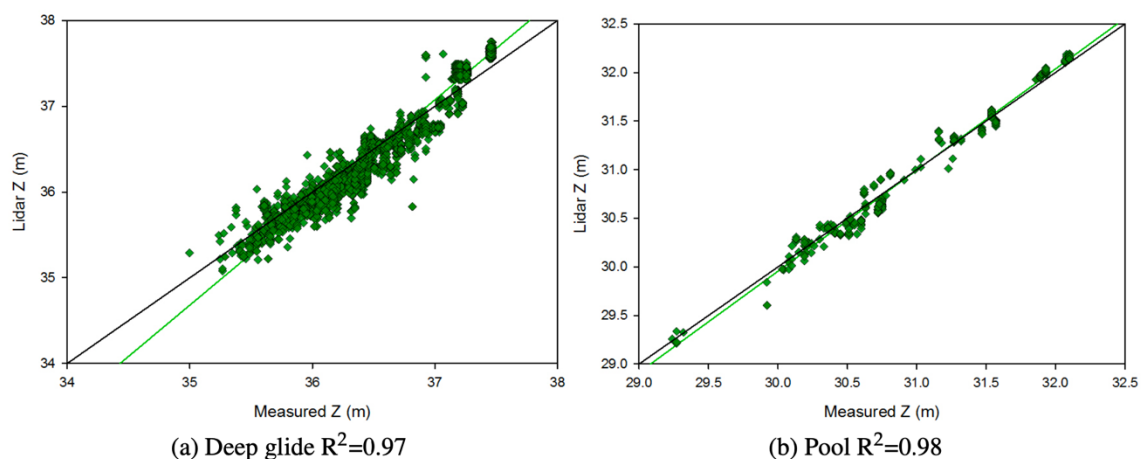
I alle tilfelle har data frå andre instrument er samla inn er desse kombinerte med data frå LiDAR til eit samla datasett som har vore utgangspunktet for å lage digitale terrengmodellar av batymetrien. Desse modellane er så grunnlaget for hydraulisk modellering.



Figur 3 Oversikt over Ljungan. Mørk blå farge er dekt med LiDAR, dei andre fargekodene viser data malt inn med Sontek M9 for å dekke manglande data.

Det er og gjort ein del forsøk på å samanlikne LiDAR data med andre målingar. Vi har samanlikna med egne målingar under vatn med RTK-GPS i grunne område og med målingar frå SONTEK-M9 i djupare område. I tillegg har vi gjort samanlikningar med på tørt land mot dronemodellar prosesser med structure from motion, med GPS målingar, med lokale målingar frå ein terrestrisk laser og med data frå topografisk laser data frå den nasjonale høgdedatabasen (www.hoydedata.no). Samanlikningar av laserdata med punktmålingar under vatn kan vere vanskeleg, spesielt der det er stor variabilitet i substrat, så her trengs det bere metodar for å kunne konkludere. Det er litt enklare å samanlikne område som vart skanna på grunt vatn og som vi kan måle opp når dei er tørre ved lav vannstand.

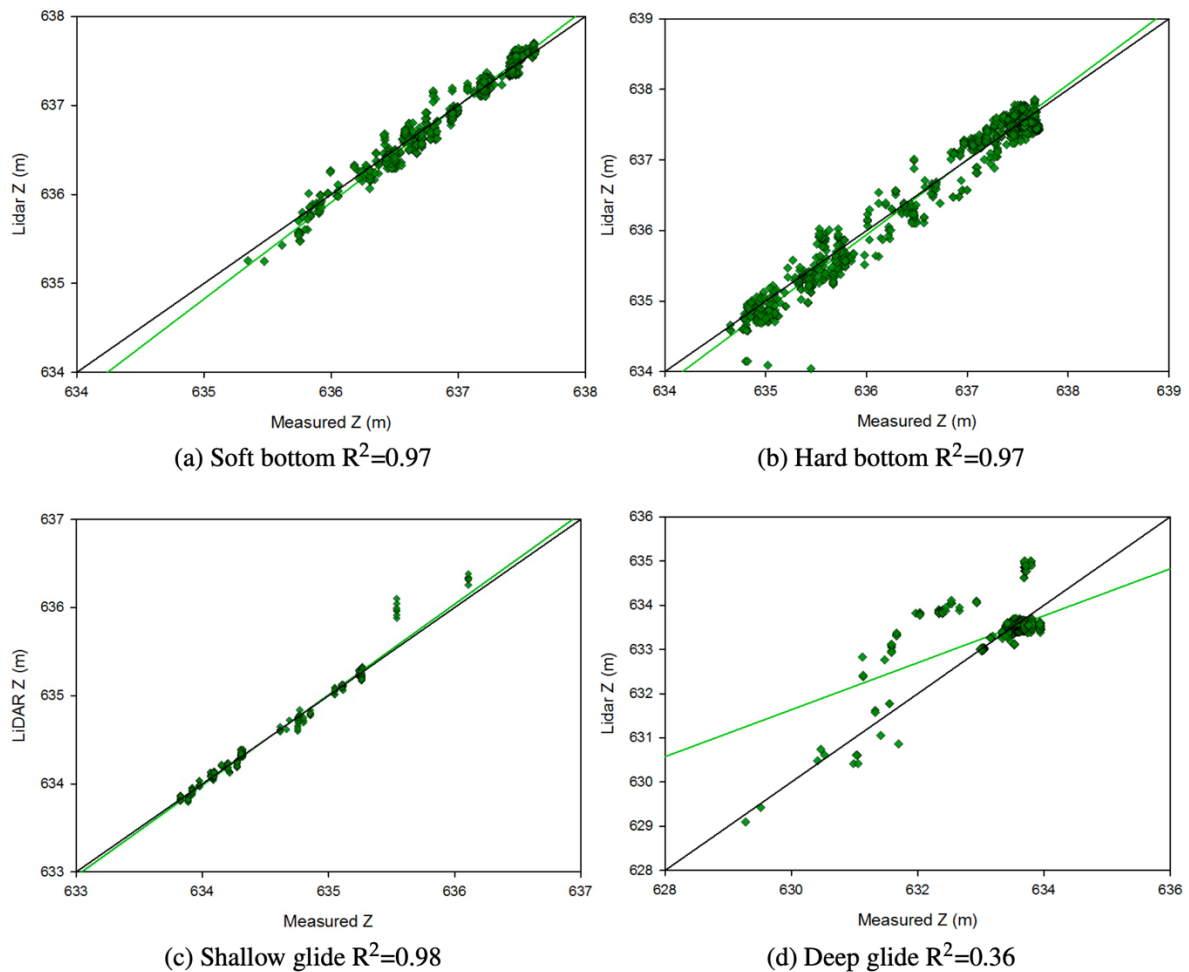
Alne (2016) gjorde oppmålingar med GPS og samanlikna dette med det første datasetta frå Storåne og Ljungan både ved å samanlikne næraste punkt og ved å samanlikne interpolerte terrengmodellar. Målingane er påverka av filtreringa som vart gjort for at det store datasettet frå lasermålingane på ascii format i det heile skulle kunne brukast. I Ljungan vart det samanlinkna med målingar med Sontek M9 (DGPS) og laserdata i to ulike elvetyper (klassifisert etter Borsanyi et al. (2004)), med rimelege resultat gitt metode (Figur 3).



Figur 4 Samanlikning mellom laserdata og data frå Sontek M9 sonar i Ljungan for eit djup o og straumsterkt område (a) og ein djupt og rolegflytande område (b). Frå (Alne 2016).

For «Deep Glide» var feilen (meter, middel \pm standardvvik) -0.04 ± -0.18 ($n=3685$), og for «Pool» 0.0 ± 0.10 ($n=254$). Maksimum avvik i dei to klassene var høvesvis 0.98 og 0.31 m.

Tilsvarande målingar vart gjort i Storåne for nokre fleire elveklasser (Figur 4).



Figur 5 Samanlikning i Storåne (a) djupområde med hard botn, (b) djupområde med mjuk botn, (c) grunt område med hurtig vatn, (d) djupt område med hurtig vatn. Her er a), b), d) malt med Sontek M9 og c) malt med GPS. Frå (Alne 2016).

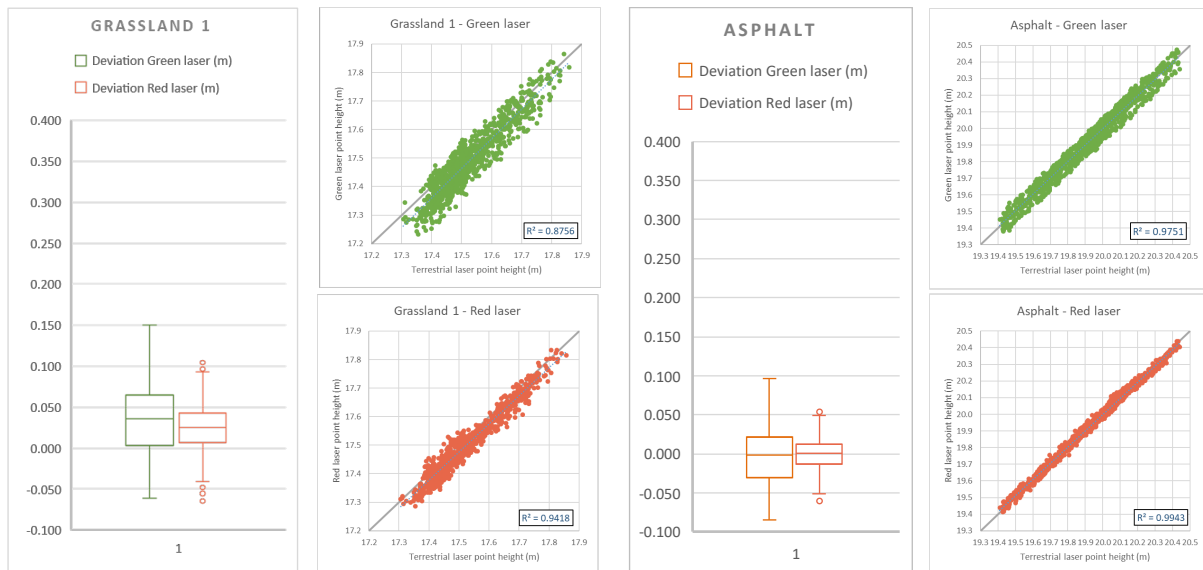
Feilen her er for djup/mjuk botn 0 ± 0.09 ($n=949$, maks=0.36), djup/hard botn 0 ± 0.19 ($n=1488$, maks=1.40), Grunnområde/hurtig straum 0 ± 0.09 ($n=158$, maks=0.56) og djupområde/rask straum 0 ± 0.53 ($n=670$, maks=1.86).

Sundt (2018) samanlikna ulike kjelder for terrengdata for to område i Surna (Figur 5). Her vart det brukt data frå terrestrisk skanner, topografiske data frå høydedata, LiDAR og droner for å lage høgde modellar og samanlikne desse.



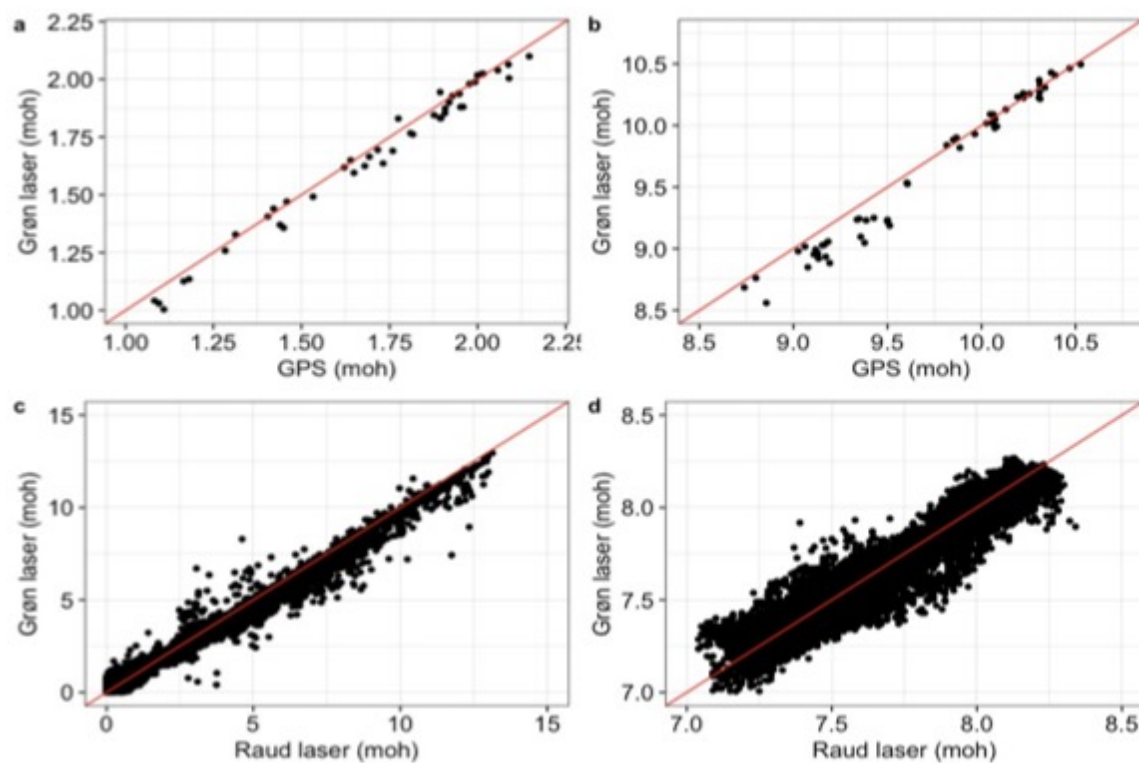
Figur 6 Oppmåling av kontrolldata for LiDAR på grusbanke.

Nokre eksempel på samanlikning mellom topografisk og batymetrisk laser mot data frå terrestrisk laser er vist i Figur 6 for tørre område. Vi ser eit avvik på område med gras som vi og har sett andre stader og som kanskje kan kome av tidspunkt på året då målingane er gjort. Vegetasjon er ei utfordring or lasermåling, noko som og er tilfelle for vegetasjon i vassdrag.



Figur 7 Samanlikning mellom topografisk, batymetrisk og terrestrisk LiDAR i Surna. Frå (Sundt 2018)

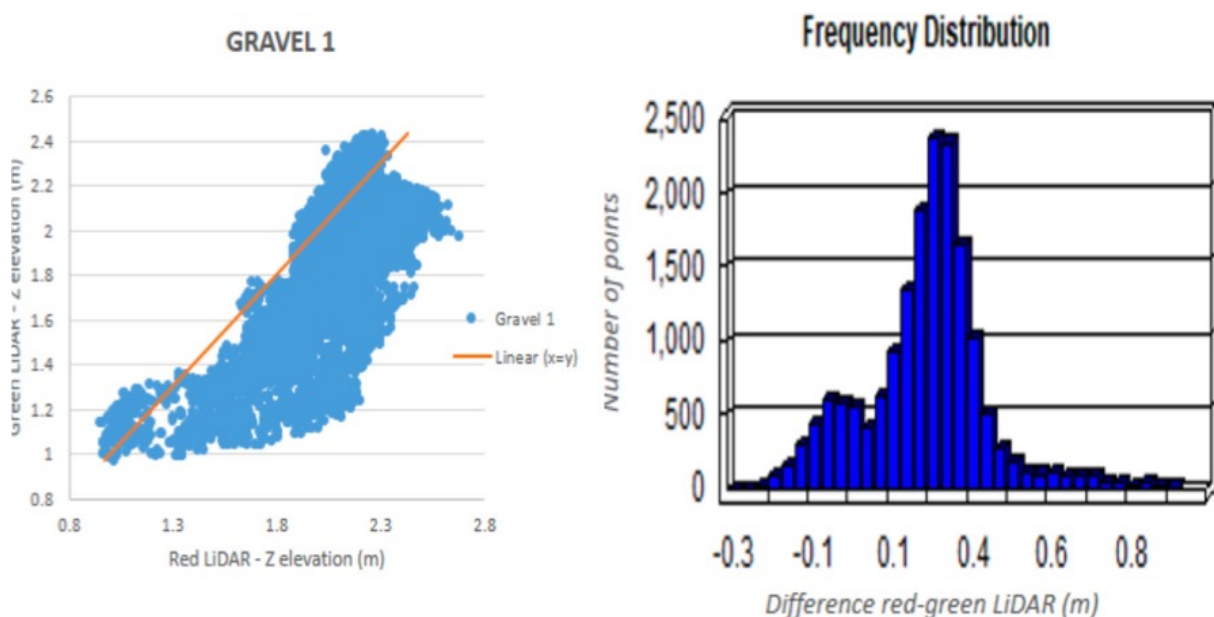
Kontrollmålingar er og gjort i Lærdal i samband med kalibrering og testing av hydraulisk modell (Alfredsen et al. 2019; Seguin Garcia 2019). Her vart batymetrisk LiDAR samalikna med måling med GPS og med data frå topografisk LiDAR (Figur 7).



Figur 8a) Krakøya, b) Hunderi, c) Stønjum, d) Ofta. Frå (Alfredsen et al. 2019).

Middelverdi og standardavvik for feil i målingane frå Lærdal var Krakøya: -0.034 ± 0.043 , Hunderi: 0.086 ± 0.108 , Stønjum: -0.04 ± 0.2 , d) 0.03 ± 0.08 . Vurdering av data er eit tema som det må gjerast meir arbeid på, og då helst gjennom samanlikning av punkttskyer mellom batymetrisk LiDAR og andre skannande metodar, noko som og er planlagt gjort.

Eit spørsmål knytt til datakvalitet er kor vidt endringar i elver fører til at data frå batymetrisk LiDAR vert utdaterte. Dette kan vere eit viktig spørsmål i enkelte samanhengar, og vi ser enkelte slike endringar i dei datasetta vi har jobba med. Eksempelet i Figur 8 viser data frå ei grusør i Lærdal der måling med topografisk LiDAR er frå 2011 og batymetrisk LiDAR frå 2018. Det er klare indikasjonar på at øra er erodert etter at målingane med topografisk LiDAR vart gjort.



Figur 9 Samanlinkning mellom batymetrisk og topografisk LiDAR på elveør i Lærdal.

Gjennom dette arbeidet har vi kome fram til dei metodane som er brukt i dag. Viktige ting er at det held lenge med data på LAS-format, og det er ikkje naudsynt å få data levert som DEM, profil eller på andre måtar. Eigne måledata kan leggest inn i LAS filene slik at vi får eit kombinert datasett. Ferdige data er det best å få i ein ortogonal høgdemodell, sidan dei då kan direkte brukast saman med andre kartdata, terrengdata eller flybilete. Dei første datasetta hadde ellipsoidehøgde og konvertering av store datamengder er tungvindt. Prosessering er stor sett gjort ved bruk av LAS-Tools (<https://rapidlasso.com/lastools/>) og ArcMap (www.esri.com) noko som fungerer bra.

2.3 Vurdering av Miljøtilhøve i vassdrag

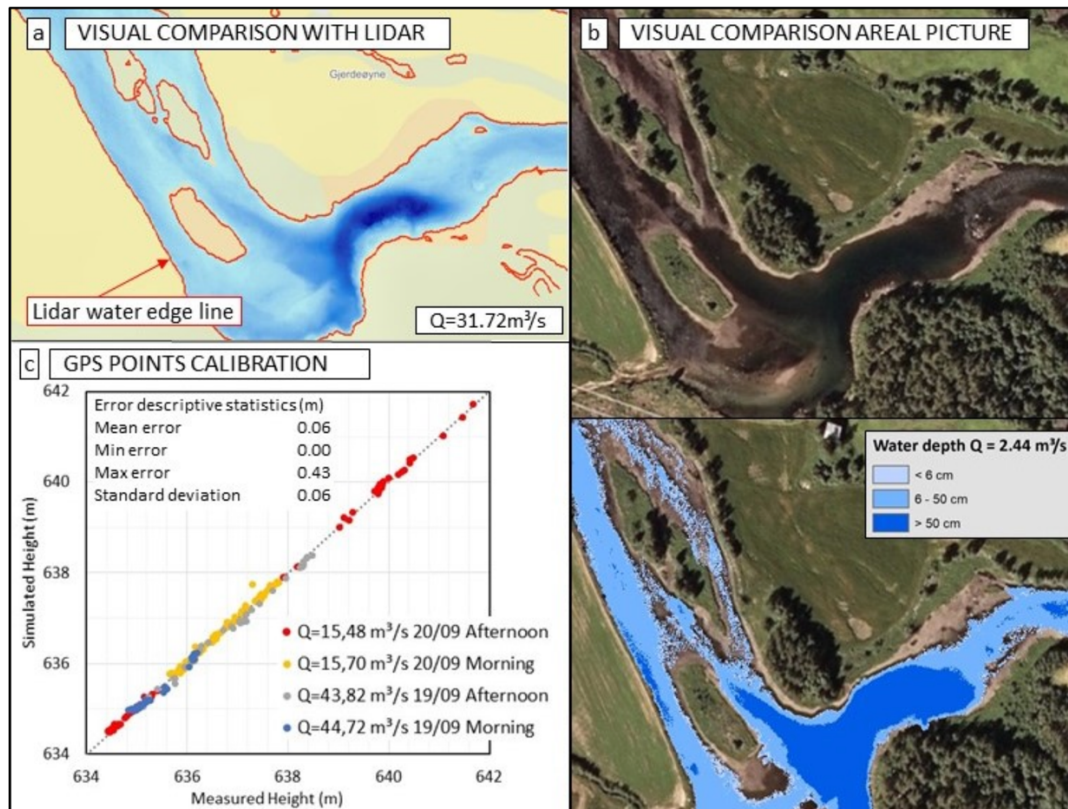
Storåne i Hallingdal på strekninga frå utløpet av Holl kraftverk til Hovsfjorden er prega av effektkøyring. Ein hydraulisk modell vart sett opp for å sjå på korleis køyringa av kraftverket påverka dei fysiske tilhøva i vassdraget (Juarez et al. 2019).



Figur 10 Oppmåling av kontrolldata i Storåne.

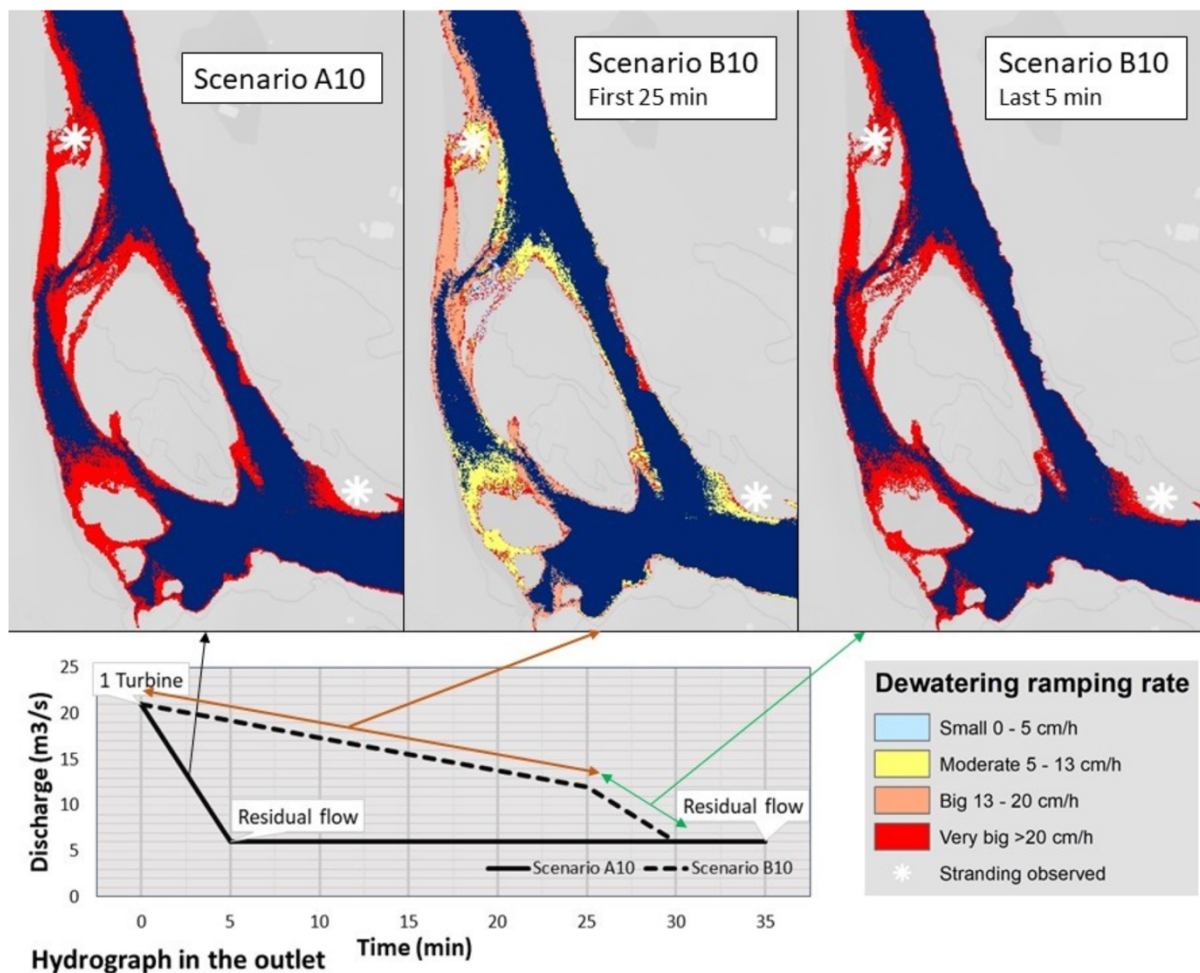
Oppmålinga med batymetrisk LiDAR er gjort av AHM, og kontrolldata og data for fylling av manglande data vart gjort av NTNU (Alne 2016). Eit eksempel på måling med Sontek M9 i Storåne er vist i Figur 9, og all måling her vart gjort ved at instrumentet vart slept over områda med manglande data i tau frå land. I tillegg til geometridata vart det og målt hastighetsprofil og vassføring i nokre sideløp i nedre del av elva.

Hec-RAS 2D vart brukt for å simulere elva, og modellen vart testa mot vassdekt areal målt frå fly under innmåling med LiDAR, mot georefererte flybilete frå Norge i bilder og mot vasslinje målt med GPS (Muscara 2017). I desse tilfella vart modellen køyrt med ei konstant vassføring lik vassføringa på observasjonstidspunktet. Samanlikninga med observasjonar vart gjort både visuelt og numerisk, og viser at modellen gir eit godt bilete av den verkelege vannstanden i elva (Figur 10).



Figur 11 Samanlikning av modell med observasjonar i Storåne, a) samanlikning med vasskant frå innsamlinga av LiDAR data, b) visuell samanlinkning med flybilete på lavvassføring og c) samanlikning med GPS punkt. Frå Juarez et al. (2019).

Med utgangspunkt i den kaliberte modellen er det gjort simuleringar av køyringa av Holl kraftverk og vurderingar av kort fort tørrlegging skjer langs vassdraget. Eit hydrogram som viser stopp i kraftverk er brukt som øvre grensevilkår for modellen, og Hovsfjorden er nedre grense. Det vart gjort både simulering av køyringar med eksisterande nedtapping og med forsøk på justeringar for å hindre for raske endringar i vasstand i område utsett for stranding. Ei samanlikning av normal nedtapping (scenario A10) og ei nedtapping med redusert hastighet (scenario B10) er vist i Figur 11. Fargekodene viser vertikal hastighet på reduksjon i vasstand, klassifiseringa følgjer Bakken et al. (2021).



Figur 12 Simulert nedtapping i Storåne ved to ulike scenario for stop av siste turbin i Holl. Figur frå Juarez et al. (2019).

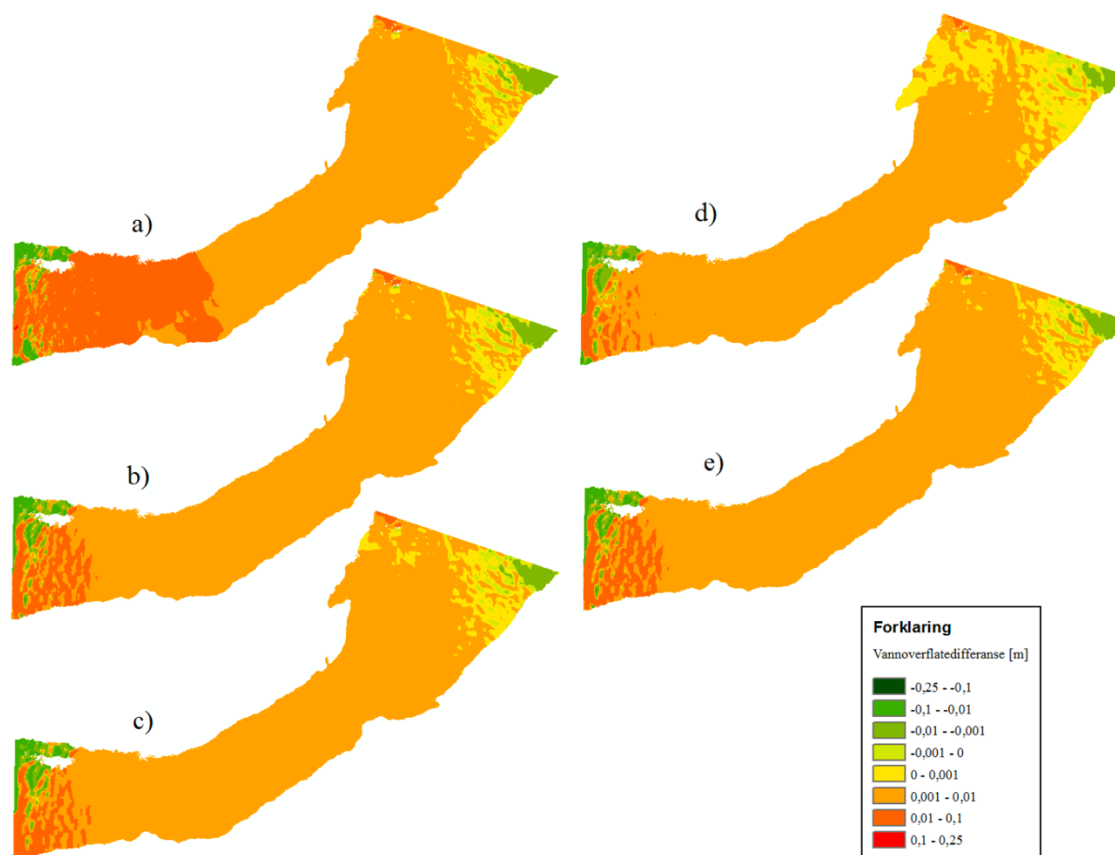
Resultata frå arbeidet til Juarez et al. (2019) vart seinare brukt av Saltveit et al. (2020) i ei analyse av korleis tettleiken av brunaure på strekninga varierer og viser moglege effektar av hurtige endringar i vasstand og dermed vassdekt areal på 0+. Dette illustrerer at den veldig detaljerte modellen gir eit heilt anna grunnlag for slike vurderingar enn kva ein kan oppnå med enklare modellar som t.d. i Forseth et al. (2009). Utrekning av område som kan vere utsett for stranding inneber ofte prosessar som skjer i marginane i vasskanten, og då er det viktig å ha presise batymetridata. Tilgang til slike data gjer det og mogleg å rekne på horisontal tørrleggingsrate i detalj, noko som vil gi nye data for analyse av stranding av fisk (Tekle 2021).

Skeie (2016) brukte LiDAR data frå AHM og HecRAS til å modellere ulike minstevassføringar i Tokkeåi i Telemark og for å kople simuleringane mot tilhøve for aure i

vassdraget. Det vart og gjort ei vurdering av modellen, og korleis ulike parametrar i modellen, bruk av bruddlinjer, storleik på grid (storleik på gitterceller) og val av metode for løysing av dei hydrauliske likningane («Full Momentum» eller «Diffusive wave» påverkar resultatet frå berekningane. Resultata frå dette arbeidet har og vore eit grunnlag for seinare bruk av HecRAS i liknande prosjekt. Påverknaden av dei ulike faktorane er rangert i Tabell 2 med verknad på vasstand som grunnlag for nivå av uvisse. Figur 14 viser eit eksempel på testar av korleis storleik på gitterceller påverkar vannstand i eit avgrensa område i elva.

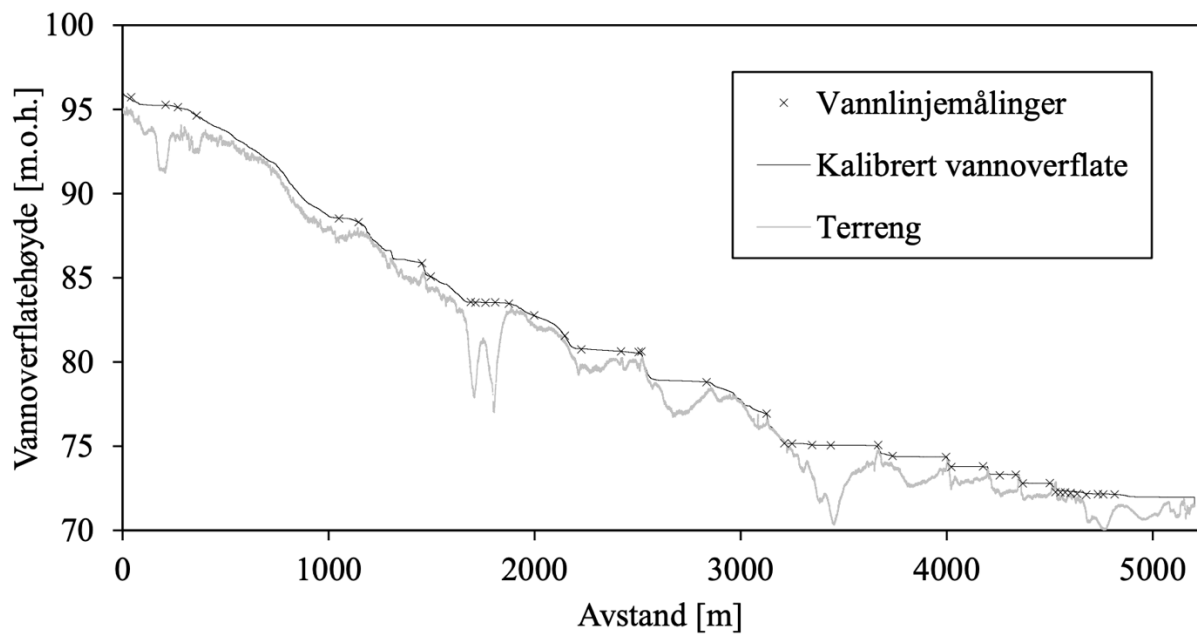
Tabell 2 Oversikt over ulike faktorar som påverkar resultatet frå HecRAS frå testar i Tokke, ranger verknad på simulert vassflate. Frå Skeie (2016), og meir detaljerte data kan ein finne der.

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



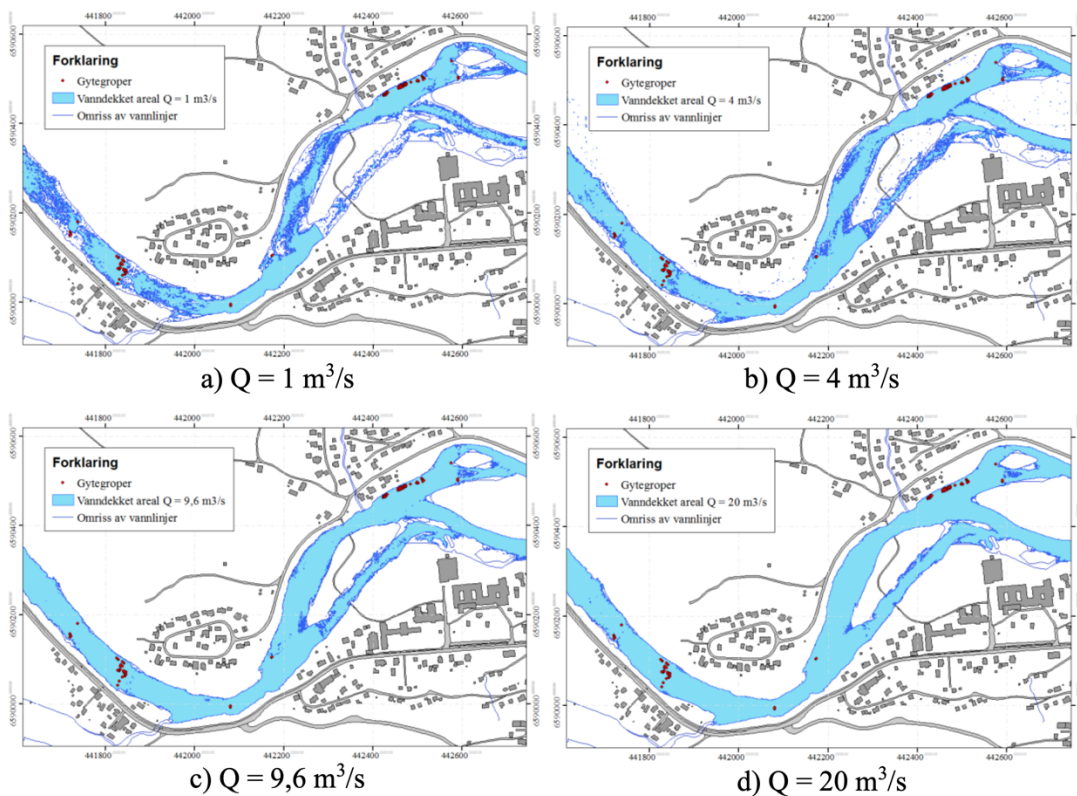
Figur 13 Effekt av ulik storleik på gitterceller på utrekna vassoverflate på ein del av Tokkeåi. Dei ulike karta representerer a) 0.25 m, b) 0.5 m, c) 0.75 m, d) 1 m og e) 3m der resultatata frå celler på 2 meter er brukt som referanse. Frå Skeie (2016).

Modellen for Tokkeåi vart kalibrert mot målt vasstand for ei vassføring på $17.4 \text{ m}^3/\text{s}$ i samband med at vi var i felt for å fylle inn nokre område som mangla dekning i LiDAR datasettet (sjå Figur 1A). Resultat frå kalibreringa av modellen er vist i figur 13.



Figur 14 Simulert vasslinje for Tokkeåi med målt vasstand med GPS vist som kryss. Frå Skeie (2016).

Med utgangspunkt i den kalibererte modellen vart det så simulert ulike vassøringar i Tokkeåi og vassdekt areal på kvar av desse vart kopla til plasering av gyttegroper (Figur 14)



Figur 15 Potensielt tørrlagde gyttegroper i Tokkeåi

Som Figur 14 viser så gir den detaljerte batymetrien frå den grøn laser i kombinasjon med ein godt kalibrert hydraulisk modell eit svært detaljert bilete av elva og potensiale for tørrlegging. I marginale område vil auka grad av detaljar som vi kan oppnå frå batymetrisk LiDAR vere avgjerande for å få dette rett, og å kunne lage slike kart med låg uvisse i utrekna vassdekt areal. Simuleringane i Tokkeåi såg og på nedkøyring av vassføring og dei effektene dette hadde på gyteareal.

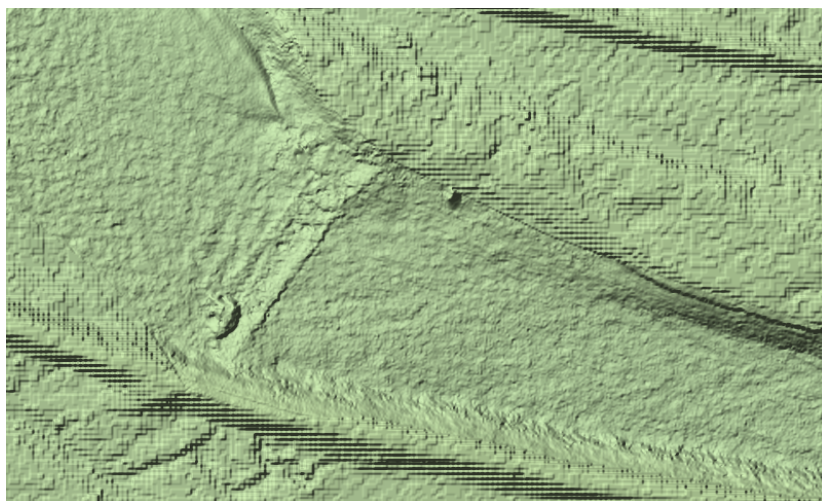
Tabell 3 Oppsummering av ein effektkøyringsepisode i Tokkeåi sommar og vinter.

	Parameter	Gyteområde 1	Gyteområde 2	Gyteområde 3	Samla
Vinter	Senkningshastighet (cm/t)	37	16	12	22
	Tørrlagt areal (%)	17	13	3.3	11
	Amplitude	8.4	7.7	8.2	8.1
Sommar	Senkningshastighet (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

Eit eksempel på tilsvarande bruk av ein detaljert hydraulisk modell kopla mot data for laks finst for Lærdalselva (Bustos et al. 2020). Her er simulering av vassdekt areal knytt mot gyteområde for laks og samanhengar mellom senkningshastiget og gunstige skjulområder er evaluert. Modellen brukt i Lærdal er basert på LiDAR data frå AHM og har svært god dekning.

2.4 Vurdering av fysiske tiltak i vassdrag

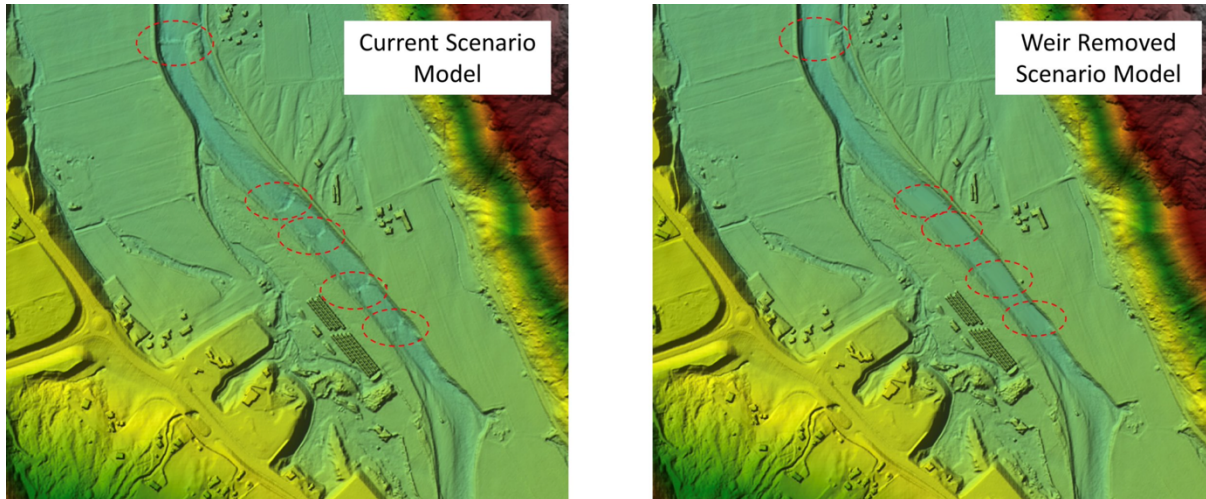
Det batymetriske datasettet for Lærdalselva har som sagt tidlegare svært gode dekning og vart brukt til å sette opp ein modell for å simulere vassdekt areal på strekninga nedstrøms Stuvane kraftverk (Alfredsen et al. 2019). I Lærdalselva er det bygd fleire tersklar og det er gjort eit arbeid for å sjå kva effekt terskeljusteringar har på vassdekt areal og hydrauliske tilhøve oppstrøms og nedstrøms terskelen (Alfredsen og Awadallah, under arbeid). Ein batymetri basert på data frå LiDAR er svært godt eigna til slike prosjekt sidan dei gir ein detaljert geometri for terskelen og elvestrekninga oppstrøms og nedstrøms (Figur 15).



Figur 16 Terskel i Lærdalselva ved Charlie Bo. Rett steinterskel på tvers av elva.

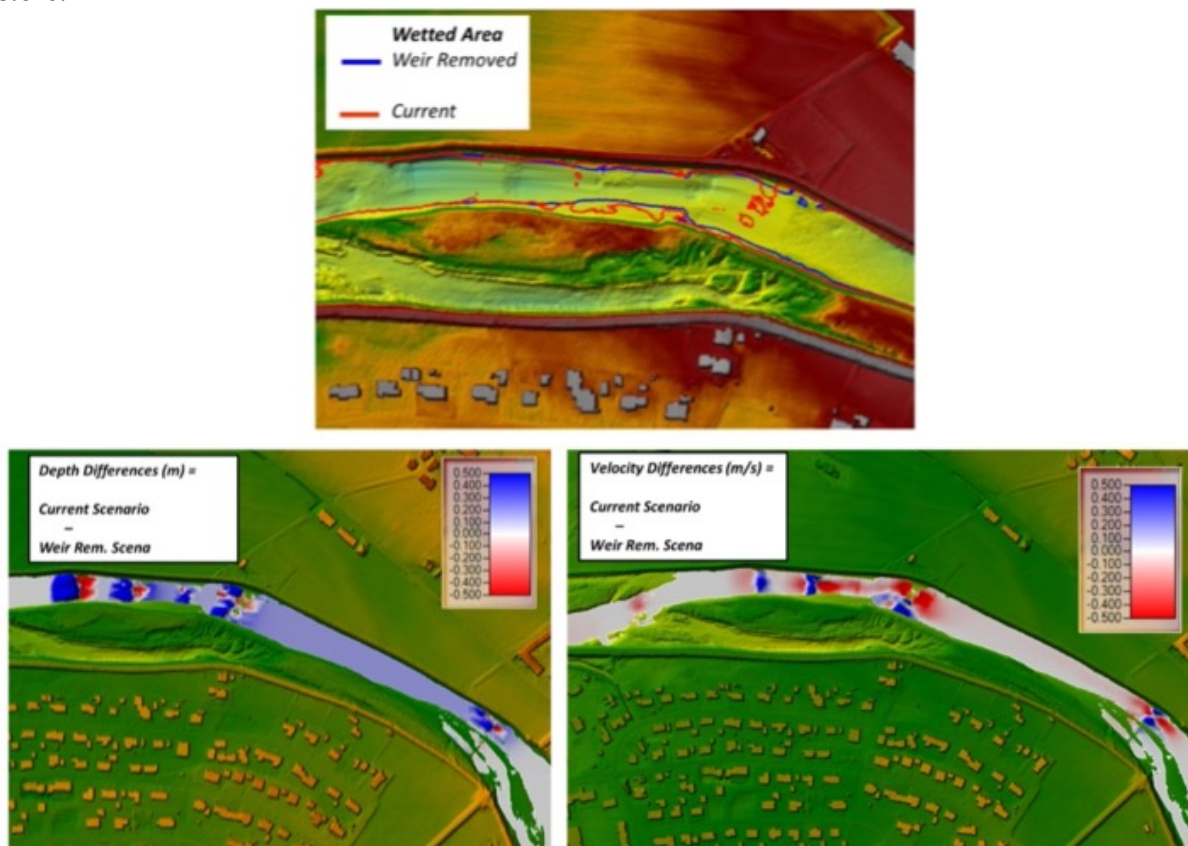
Med utgangspunkt i den digitale terrengmodellen er det gjort justeringar på tersklane i elva eit GIS system. Ei fullstendig fjerning er gjort ved å interpolere ein jamt skånande botn frå eit

stykke oppstrams terskelen til ein stykke nedstrams terskelen (Figur 16). Dette er gjort for alle tersklane frå eit stykke nedstrams Stuvane utløp til sjøen. Her er det brukt same oppløysing på modellen som for utrekning av vassdekt areal. I tillegg er enkelte tersklar modellert med finare romleg oppløysing for å få meir detalj i rundt terskelen som er justert, og for å sjå på alternative endringar utover full fjerning.



Figur 17 Tilstandi dag med tersklar til venstre, etter fjerning av tersklar til høgre.

Figur 17 viser eit eksempel på ein terskel som er heilt fjerna. Vi ser ein reduksjon i djup oppstrams tersklane, det vert grunnare nedstrams når vi fyller inn «holet» under terskelkrona. Vi får og større hastighet, medan endringane i vassdekt areal ikkje er spesielt store.



Figur 18 Endringar i vassdekt areal, djup og hastighet ved fjerning av tersklar på Øye. Vassføring $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Eit tilsvarande prosjekt med terskeljusteringar er gjort i Nea i Trøndelag. Ei rekke med terskar er bygd i elva etter at den vart regulert som kompensasjon for sterkt redusert vassføring hovudsakleg i form av tverrgåande tersklar i stein. Nea er ei stor elv og med svært låg vassfring etter regulering så fungerer tersklane som små demningar i elva. Det er vist at desse har effekt på vandring av fisk, og arbeid er i gang med å vurdere justering av tersklane. I samband med dette gjorde Terratec datainnsamling med LiDAR frå fly i 2018 og 2019. Dette datasettet dekkjer djup ned til i overkant av 1 m og for djupare område er det samla inn tilleggsdata med Sontek M9 (Figur 18).

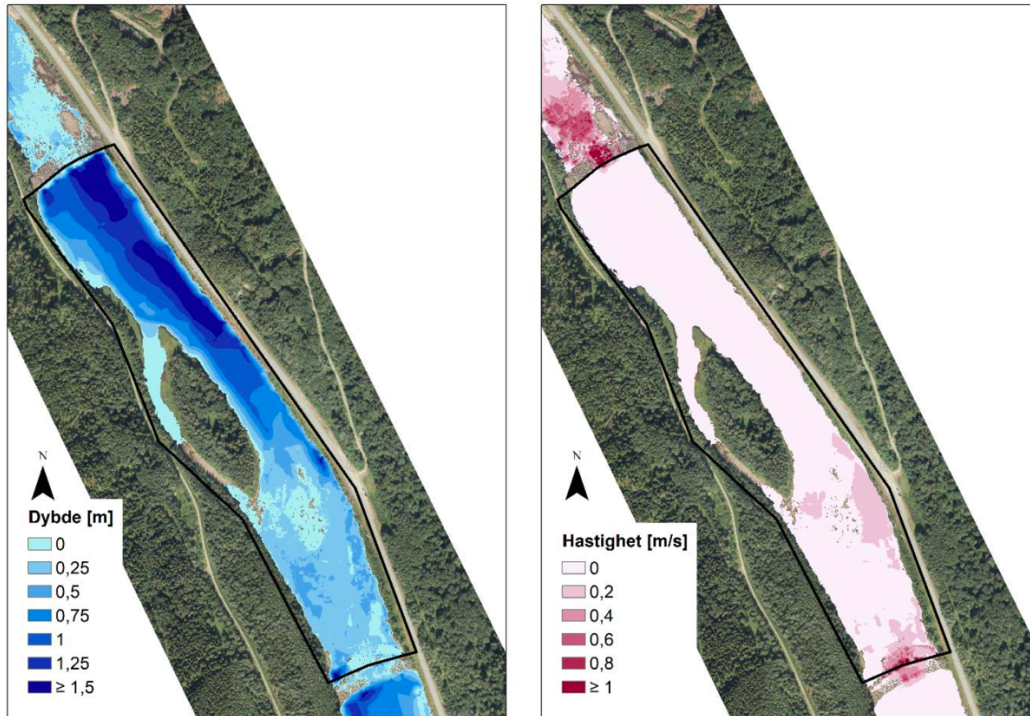


Figur 19 Datainnsamling i Nea i samband med terskeljustering. Biletet viser og ein typisk terskel i Nea.

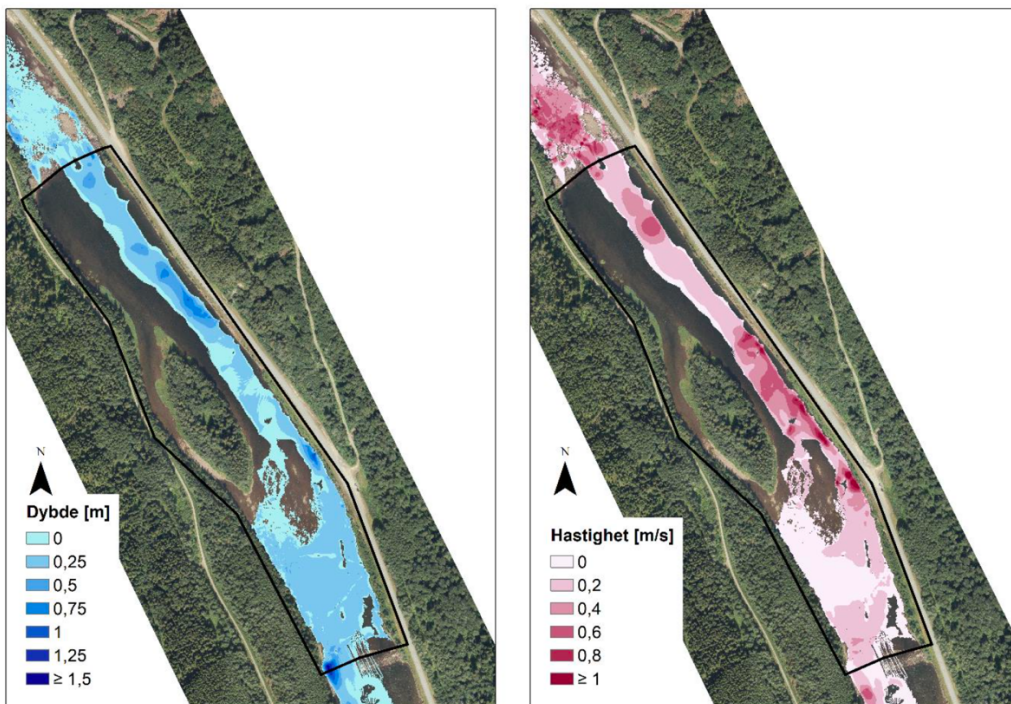
Batymetrien i Nea vart laga ved å kombinere LiDAR data med målingane med Sontek M9. LiDAR hadde god dekning rundt terskelen og langs land, men mangla data i djupare område. Det vart laga ein modell med 0.25 m celler over terskelen og 1 m i terskelbassenget (Brekke 2020). Modellen vart kalibrert mot ein kombinasjon av flybilete og LiDAR målt vassflate. Vi ser at det trengs meir justeringar i kalibreringsfaktoren i dette tilfellet enn i t.d. modellen av Lærdal, og det skuldast mest sannsynleg at batymetrien i terskelbassenga ikkje er like nøyaktig. Det vart og gjort testar på effekt av «Full Momentum» og «Diffusive wave» løysing av likningane, noko som utgjorde ein skilnad på 0.016 ± 0.012 m i nivå på vassflata, men ein skilnad på 122 mot 15 timar i simuleringstid. Samanlikninga av faktoren theta ga ein skilnad på 1 mm når ein bruke høvesvis 1.0 og 0.6, så dette hadde i praksis ingen effekt som stemmer med det Skeie (2016) fann ved tilsvarande testar.

Tersklar i Nea vart fjerna heilt på same måte som i Lærdal. I tillegg vart det gjort endringar i tersklane der steintersklar vart justerte til cellelersklar. Desse vil gi betre tilhøve for vandring av fisk forbi terskelen og ei anna utforming av sjølve terskelkrona. Cellelerskelen vart laga som eit tverrprofil i modellen med oppstraums fylling, terskelkrona og ei plan nedstraums fylling. Gradienten på terskelen vart laga slik den er innanfor grensene i tiltakshandboka. Tersklar med full høgde og halv høgde vart testa. Endringar vart gjort i tre tersklar i elva, terskel 22, 23 og 24, og for meir detaljar om utforming og andre tersklar som vart testa i

prosjektet så sjå Brekke (2020). Dei nye tersklane vart så lagt inn i modellen og simuleringar vart køyrt for ulike vassføringar. Ei målsetjing var å finne ut korleis vassdekt areal endrar seg oppstrøms terskelen, og korleis hastighet og djup endrar seg i terskelbassenget. Eit eksempel på korleis elva vil sjå ut ved full fjerning er vist i Figur 19 o Figur 20.

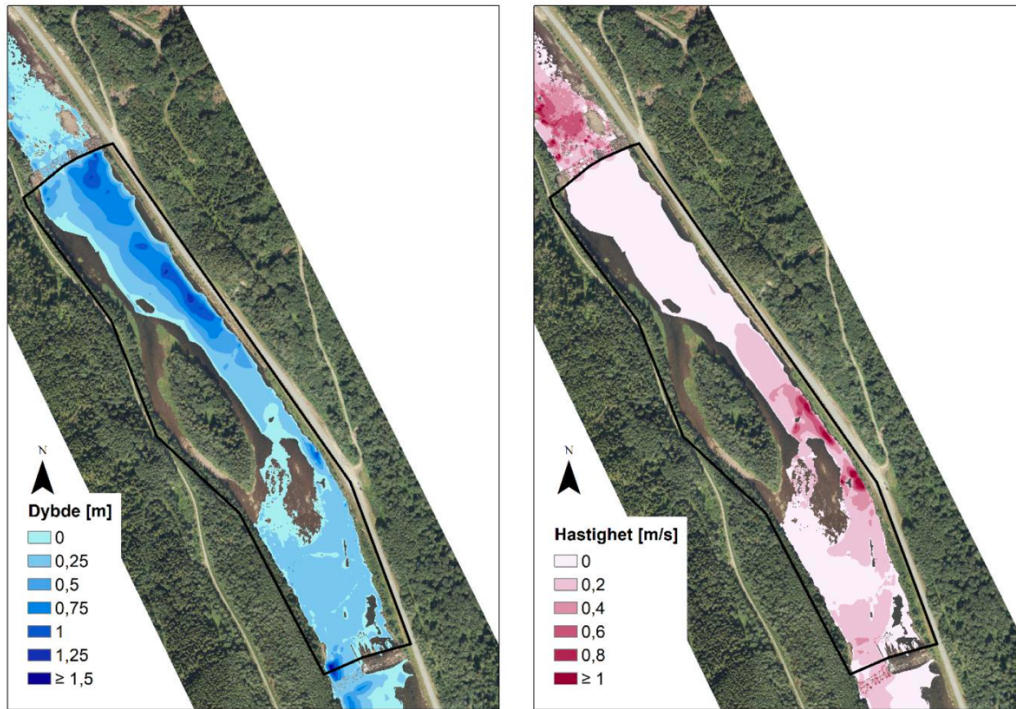


Figur 20 Djup (til venstre) og hastighet ved terskel 22 i Nea. Vassføring $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Frå (Brekke 2020)



Figur 21 Djup (til venstre) og hastighet etter fjerning av terskel 22 i Nea. Vassføring $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Frå (Brekke 2020)

I Figur 20 ser vi resultatet av ei full fjerning av terskelen. Eit alternativ er ein lav celleterskel som er vist i Figur 21.



Figur 22 Dyp (til venstre) og hastighet etter modifisering av terskel 22 i til ein lav celleterskel. Vassføring $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Frå (Brekke 2020)

For å vise korleis dette ville sjå ut er modellresultata tilpassa flybilete frå strekninga. Figur 22 viser terskel 22 med celleterskel og trinnterskel.



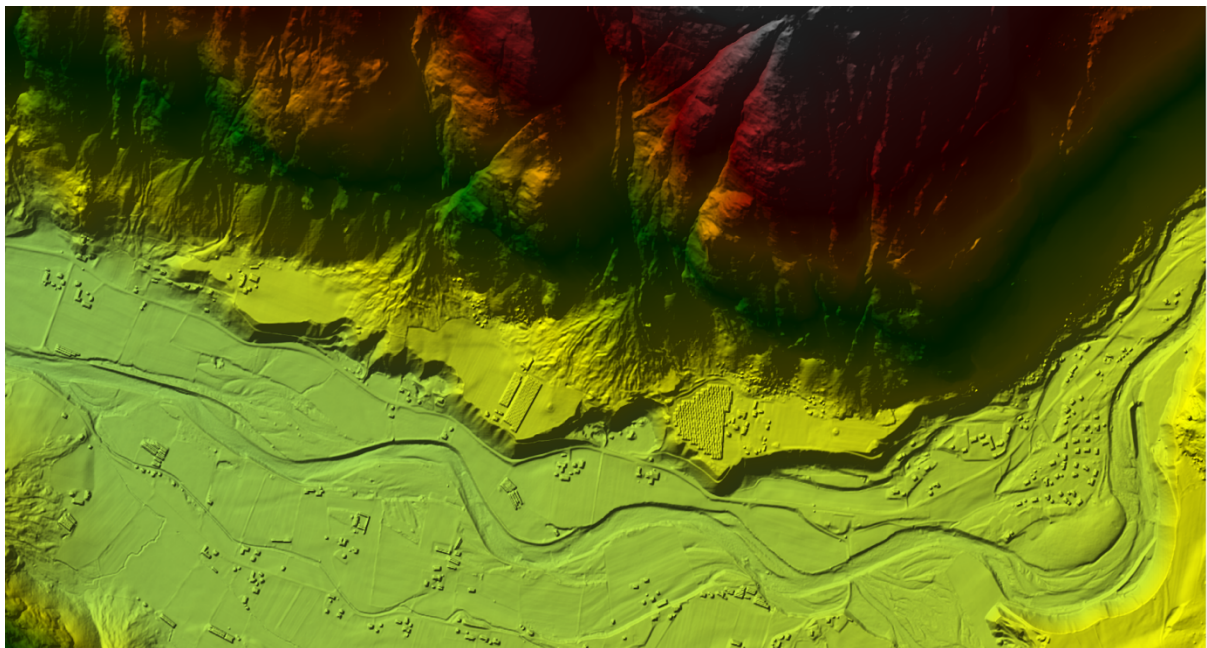
Figur 23 Terskel 22 som celleterskel (venstre) og trinnterskel. Frå (Brekke 2020)

Ein interessant bruk av modellen og resultatata frå terskelfjerning i Nea er vist av Junker-Köhler and Sundt (2021) som brukar kart som viser vasstand før og etter ulike

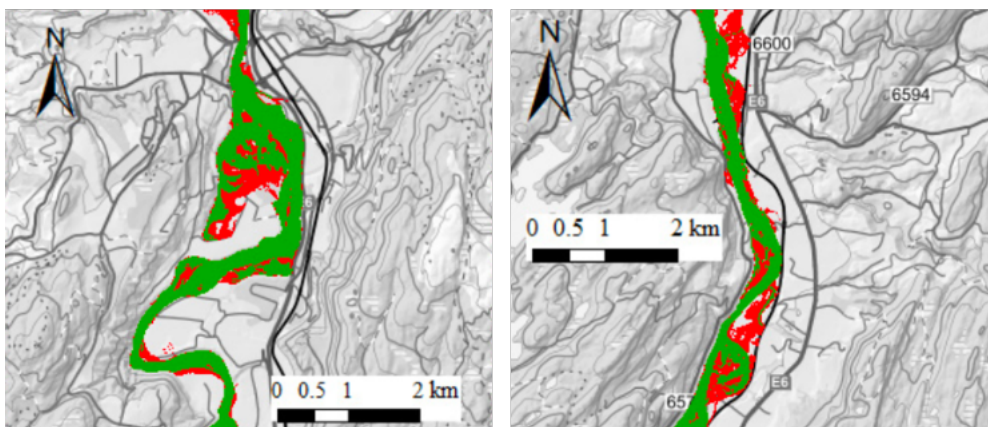
terskeljusteringar som grunnlag for å undersøke korleis ulike brukarar av Nea ville reagere på desse endringane. Dette som eit eksempel på korleis realistiske hydrauliske simuleringar og kan inngå i vurderingar om naturbruk og korleis endringar påverkar oppfatninga av vassdraget. I slike situasjonar kan integrasjon av både detaljerte terrengmodellar, simuleringresultat og bilete frå fly eller droner gi nye måtar å visualisere endringar på.

2.5 Vurdering av flom i vassdrag

Kombinasjonen mellom topografisk og batymetrisk LiDAR gir eit godt utgangspunkt for simulering av flom og flomsoner. Fleire slike modellar er laga i samband med ein undersøkelse av i kor stor grad vi kan simulere flomvannstander med utgangspunkt i topografisk LiDAR, og eit eksempel på ein slik kombinert modell er vist i Figur 23.



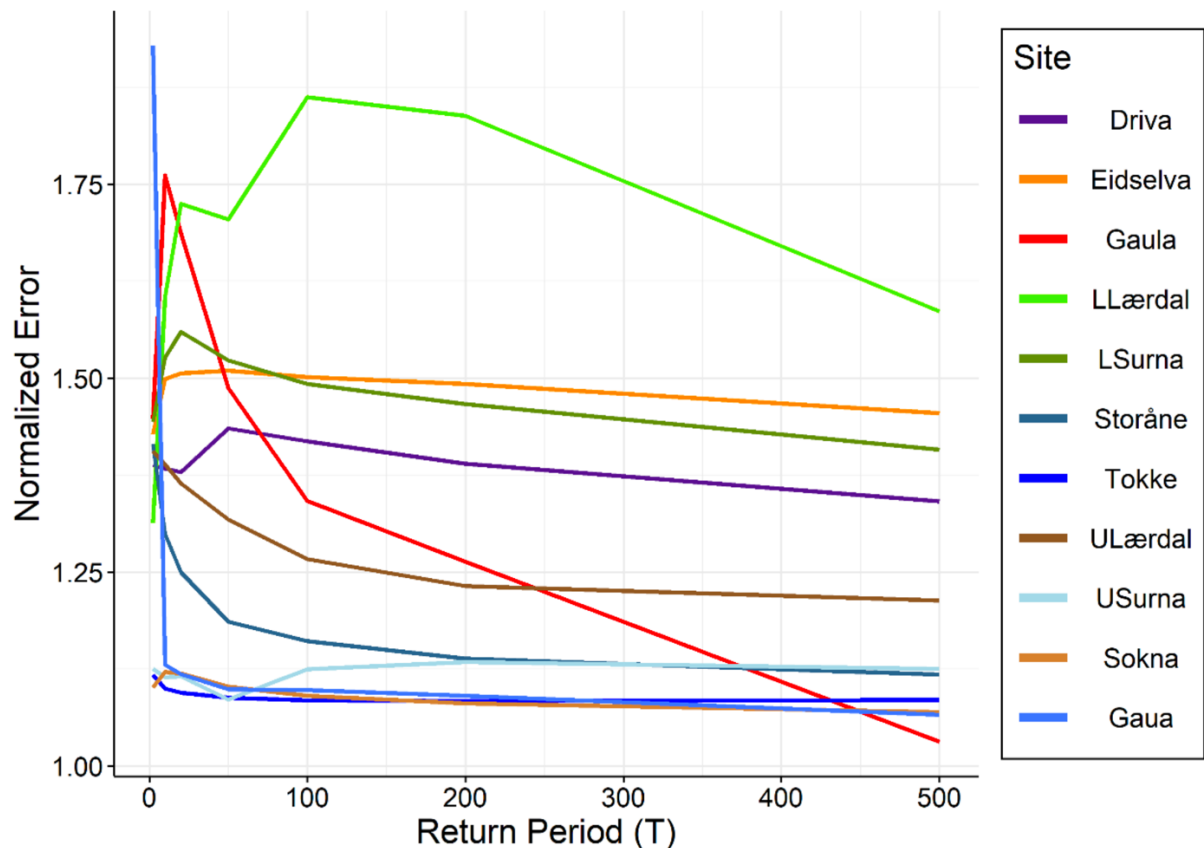
Figur 24 Kombinert topografisk og batymetrisk LiDAR brukt for å laget digital terrengmodell for Lærdalselva (Seguin Garcia 2019).



Figur 25 Samanlikning av vassdekt areal for 50-årsflom med topografisk (raud) og kombinert (grøn) terrengmodell som utgangspunkt.

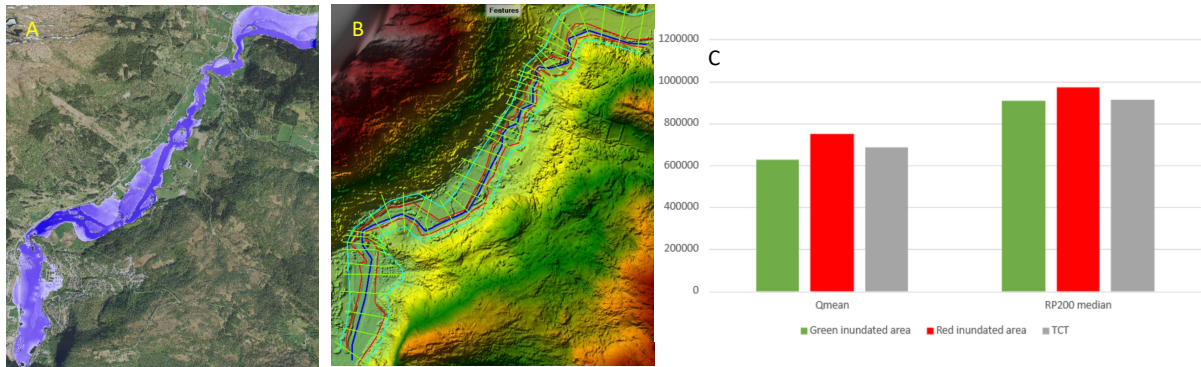
Topografisk LiDAR har stor dekning i Norge og det er difor interessant å vite kor stor feil det er å bruke dette som utgangspunkt for flomsimuleringar. Dette kan vi gjere ved å samanlikne vassdekt areal ved flom frå simuleringar med kun topografisk LiDAR som terrengmodell mot

simuleringar med ein terrengmodell som kombinerer dei to LiDAR datasetta. Dette vil gi ei vurdering av om vi kan bruke den topografiske modellen åleine eller om det trengs korrigering av denne før bruk. Ei slik studie er gjort av Awadallah et al. (2021) som bytta ut den delen av den delen av elva i terrengmodellen som ligg under vatn med korrekt batymetri frå grøn LiDAR. Resultata (Figur 25) viser at feilen til dels kan vere svært stor og avhenging av elvetype, og at korreksjon vil vere naudsynt.



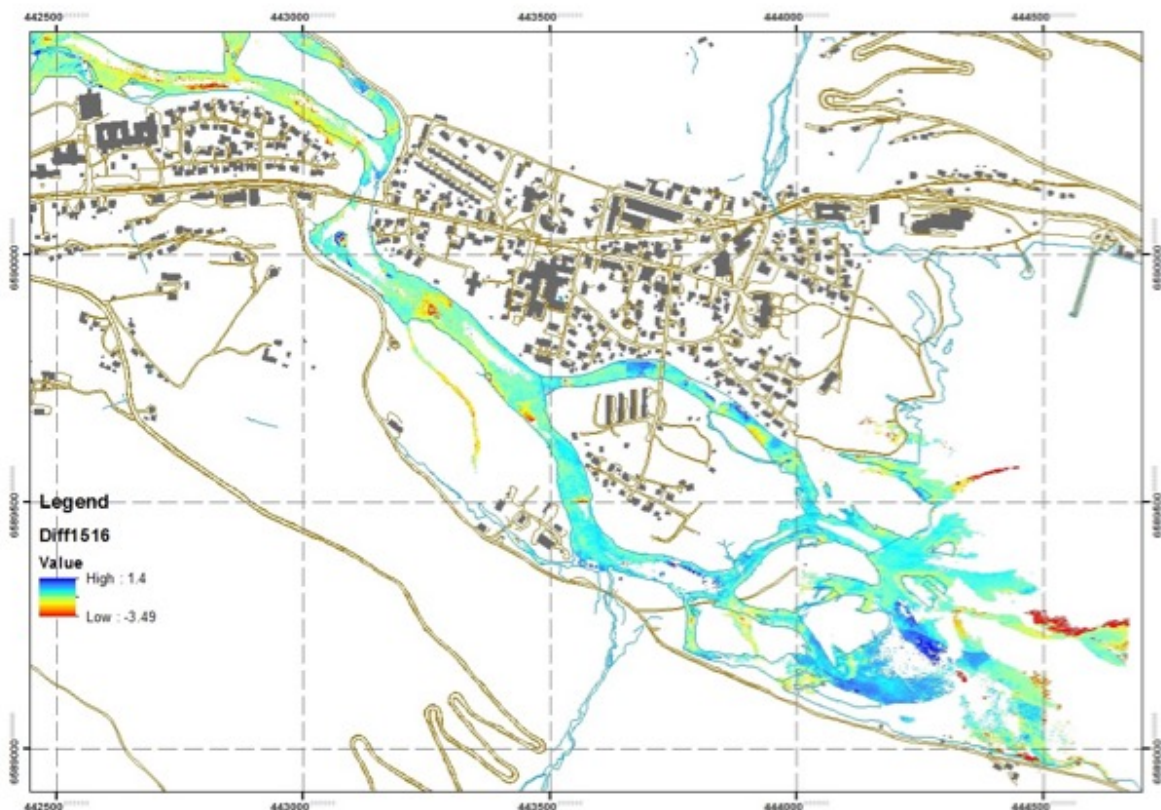
Figur 26 Skilnad i vassdekt areal mellom topografisk og topografisk/batymetrisk terrengmodell som utgangspunkt for flomsimuleringar. Ein verdi på 1.0 viser identisk vassdekt areal, verdiar større enn 1 indikerer at topografisk LiDAR overestimerer arealet. Frå Awadallah et al. (2021).

Ulike metodar for korreksjon er mogleg, alt frå bruk av måledata (t.d. tverrprofil) til fråtrekk av vassføringa den dagen målingane som er grunnlaget for den topografiske modellen er gjort. To teknikkar er prøvd ut, justering av vassføring (DCT, Discharge Correction Technique) og justering av elvegeometri (TCT, Terrain Correction Technique) (Chone et al. 2018). TCT teknikken går ut på å simulere den vassføringa som var i vassdraget når data vart samla inn med topografisk LiDAR med den data frå topografisk LiDAR som geometri. Volumet som ein då simulerer vert «grave» ut i terrengmodellen og gir geometrien då geometrien som vi brukar som utgangspunkt for flomsimuleringane. Vår erfaring med desse metodane er at TCT gir resultat som er nærare det ein får med batymetrisk LiDAR som utgangspunkt, og at DCT er svært avhengig av elv og kanskje best eigna i små vassdrag. Figur 26 gir eit eksempel på ei samanlikning mellom batymetrisk LiDAR, TCT og DCT i Nausta (Le Floch 2021). Her der det brukt same Manningstal for alle tre situasjonane, og det er mogleg at kalibrering kunne gitt andre resultat. Men gode kalibreringsdata i flomsituasjonar for elver der ein og har batymetrisk LiDAR har vist seg vanskelege å finne.



Figur 27 A) Vasssdekt areal i Nausta ved 200-årsflom, B) oppsett for simulering med 1D modell for TCT korleksjon, C) samanlikning av vassdekt areal for batymetrisk LiDAR, topografisk LiDAR og topografisk med TCT korleksjon for middelflom og 200-årsflom. Frå Le Floch (2021). Merk at modellen ikkje er kalibrert mot flomvasstand, så simulerte oversvømte område er ikkje eigna for praktisk bruk.

Eit alternativ til TCT og DCT er å bruke målte tverrprofil der desse finst. Om desse er tett målt kan batymetrien interpolerast frå desse og med kalibrering er det ei metode som kan fungere (Hailemariam 2021).



Figur 28 Differanseplott for Tokkeåi. Raud farge indikerar erosjon, blå farge deponering av sediment.

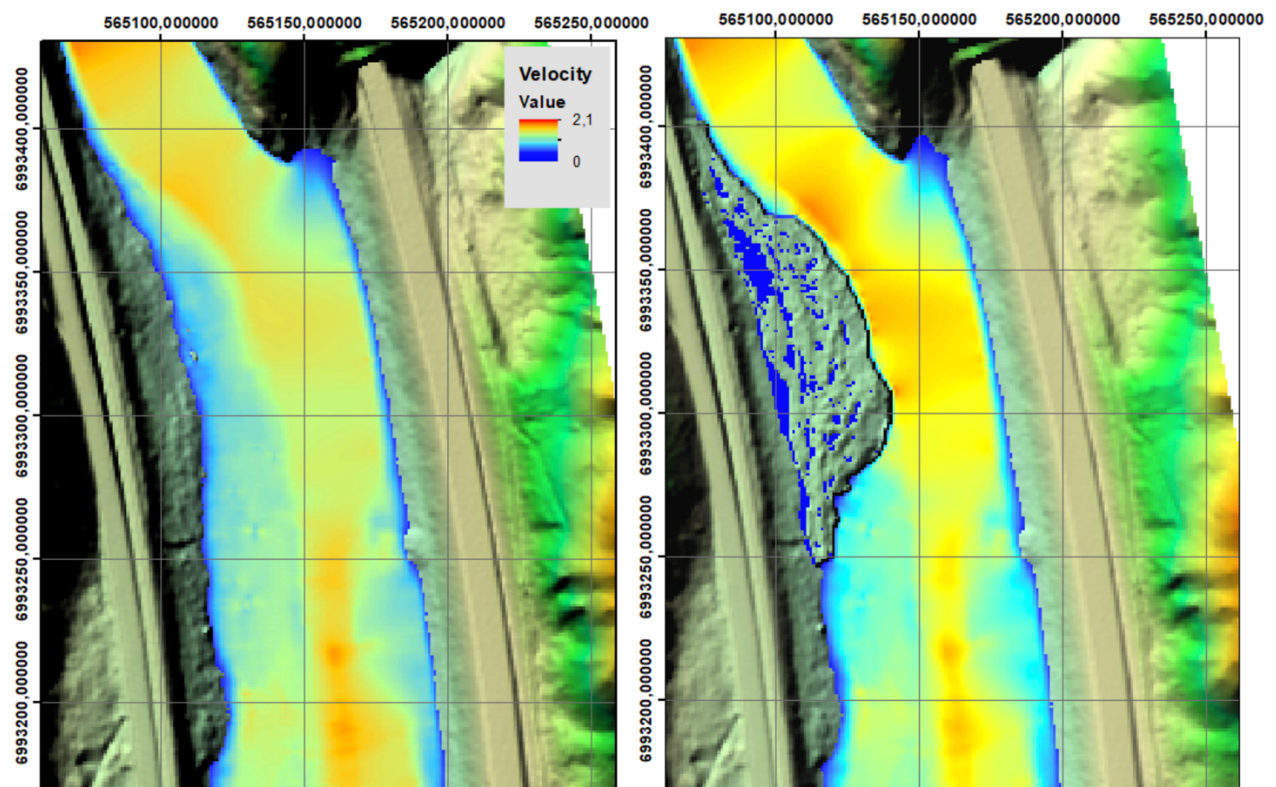
I kapittel 2.1 er levetida til batymetrisk LiDAR diskutert med tanke på endringar i batymetri frå t.d. flomepisodar. Effekt av flom på batymetri er ein interessant prosess som har verknader på mange prosessar. I Tokkeåi er det gjort to målingar med LiDAR i 2015 og 2016. Hausten 2015 var det ei flom i vassdraget som nærma seg 50-års gjentaksintervall. Ved

å samanlikne dei to batymetriane får vi ein indikasjon på erosjon og sedimentering mellom dei to målingane som og inkluderer denne flomeepisoda (Figur 27).

2.6 Kopling mot bruk av dronedata, istilhøve og habitat i vassdrag

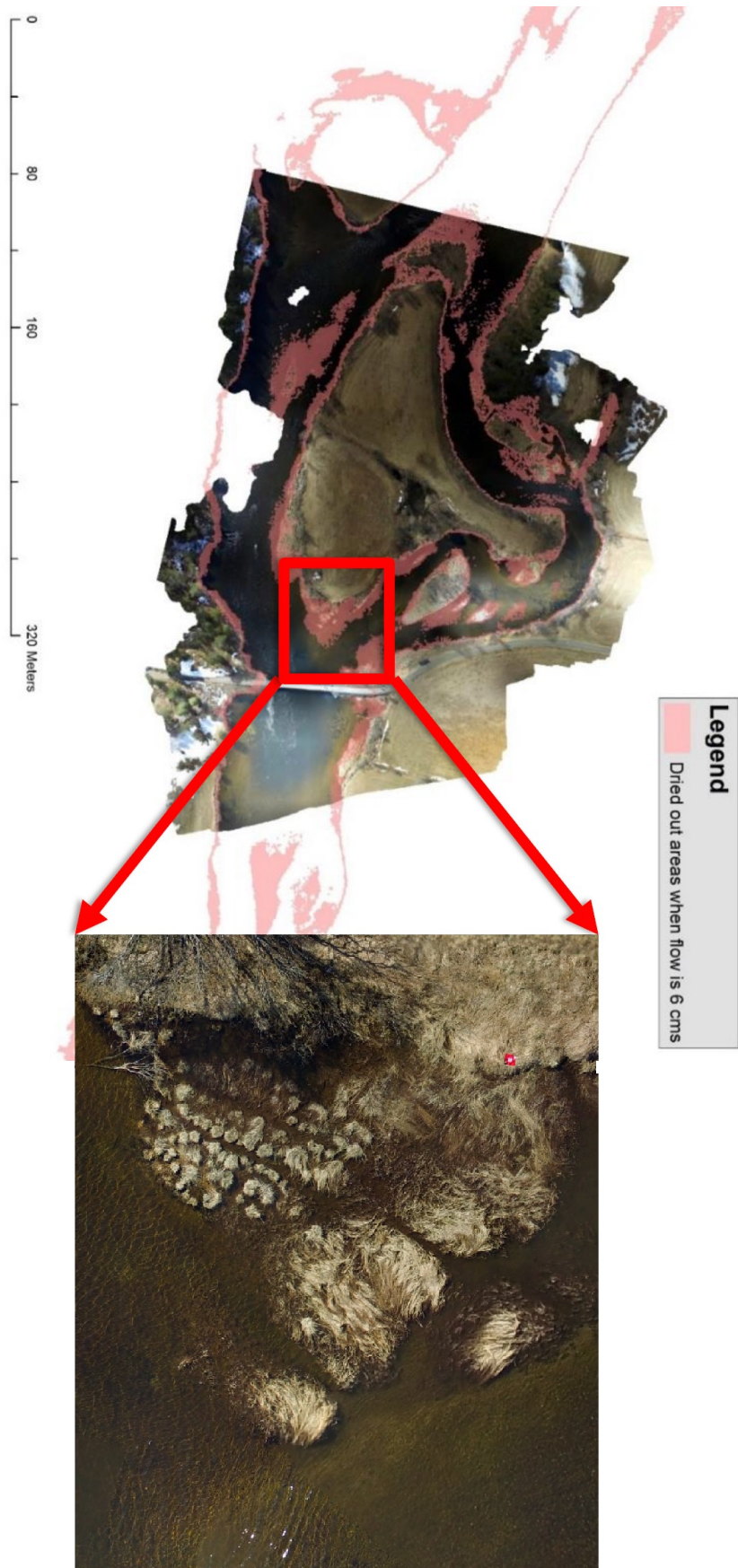
Gode data frå batymetrisk LiDAR gir nøyaktig geometri med fin oppløysing. Slike data kan brukast direkte til analyser som vist i dei førre kapitla. Data kan og kombinerast med andre data for ulike føremål. Bruk av enkle droner for innsamling av georefererte bilete (ortofotomosaikkar) og terrengdata gjennom prosessering med «structure from motion» teknikken er eit område som har eit stort bruksområde og som kan brukast saman med batymetri og modellresultat på mange ulike måtar. Dette kapitlet viser eit par eksempel på dette.

Isgang kan legge igjen store mengder is som kan snevre inn elveløpet og påverke hydraulikken. Slike isformasjonar er vanskeleg og farleg å måle med konvensjonelle metodar, men bruk av drone gjer slike målingar langt enklare (Alfredsen et al. 2018). Alfredsen and Juarez (2020) integrerte ein drone basert modell av is med LiDAR batymetri for å simulere hydraulisk effekt av ispropper (Figur 28).



Figur 29 Simulert hastighet utan is (venstre) og med ein stranda isgang (høgre side). Den stranda isen målt inn med drone/SfM og integrert i ein LiDAR basert batymetri.

Ein annan måte å kombinere drone målte data med modelldata er å legge resultat frå simuleringsmodellar over ortofoto frå droner og så hente ut informasjon frå bileta enten gjennom automatiske metodar eller manuelt. Eit eksempel på dette er vist i Figur 29 der eit simulert område med stranding av fisk i Storåne (kapittel 2.3) er lagt over eit foto frå drone for å sjå kva substrat og skjul som finst i området.



Figur 30 Simulering av tørrlagt areal (rosa farge) i Storåne lagt over ein mosaikk av drone foto for å finne habitat for fisk i strandingsområda. Frå Juarez (2018).

3. Oversikt over oppgaver og publikasjoner

Som vist over så er data frå batymetrisk LiDAR brukt i fleire studentarbeid ved NTNU, både i form av masteroppgåver, prosjektoppgåver for utvekslingsstudentar og forskingsarbeid i samband med doktorgradsstudier (som tidsskriftartiklar og konferansebidrag). Her følgjer ei oversikt over desse. Under prosjektoppgåver er det lagt inn det som er gjort som prosjektarbeid i det 5-årige byggstudiet (merka med *) og arbeid frå utvekslingsstudentar.

Prosjektoppgåver

1. Hammeren, R og Alne, I (2015) "Vurdering av grøn laser for geometridata frå elver " *
2. Forti, MG (2016) "Temperaturemodellering Surna"
3. Skeie, L (2016) "LIDAR-data for hydraulisk modellering av Tokkeåi" *
4. Rozier, C. (2017) "2D Hydraulic modelling in Ljungan river"
5. Gosset, A. (2017) "Hydraulic modelling of Ljungan and Surna"
6. Papanikolaou, K (2017) "Surna temperature modelling"
7. Valbuena, R (2018) "2D modelling of Orkla and Laerdal river"
8. Trogno, L (2018) "Hydraulic modelling of environmental impacts of hydropower"
9. Sivakumar, A (2019) "Modelling of rivers related to environmental studies"
10. Limpens, E (2019) "Modelling water level variations due to hydropower"
11. Brekke, I. (2019) "Vurdering av terskelfjerning i Nea" *
12. Moss, S (2019) "Fjernmåling av geometridata" *
13. Schaufler, J (2020) "Mitigation of hydropeaking in Storåne, Hallingdal"
14. Le Floch, Y (2021) "Prediction of flooded areas during Nausta River floods"

Masteroppgåver

1. Alne, I (2016) "Topo-Bathymetric LiDAR for Hydraulic Modelling"
2. Muscara, I (2017) "Modelling the impact of the Hol 1 hydroelectric power plant turbine operation on the hydraulic habitat of the Storåne river"
3. Skeie, L (2017) "Hydraulisk modellering av kraftverksdrift i Tokkeåi"
4. Juarez, A (2018) "Performance of a two-dimensional hydraulic model for the evaluation of stranding areas and characterization of rapid fluctuations in hydropeaking rivers"
5. Garcia, SS (2019) "Hydraulic modelling of the Lærdal river"
6. Moss, S (2019) "Remote Sensing Data and Hydraulic Modelling"
7. Naher, K. (2019) "Climate Change Assessments for the Gaula River"
8. Rønne, P (2020) "Vurdering av minstevannføringslipp i Årdalselva"
9. Brekke, I (2020) "Modellering av terskelfjerning og terskelendringer i Nea"
10. Erso, S (2020) "Hydraulic model suitability for hydrodynamic analysis based on LiDAR data of steep rivers"
11. Adawalla, M (2021) "Comparison Between Green and Red LiDAR Terrain Models in Flood Estimations"
12. Eikeland, J og Olsen, H (2021) "Tidsforsinkelse av vannføring i elver om vinteren"
13. Tekle, M (2021) "Hydraulic modelling of flow ramping related to river morphology and river geometry "

Tidsskriftartiklar

1. Adeva Bustos, A., Hedger, RD., Fjeldstad, H-P., Stickler, M., Alfredsen, K. (2019) Identification of salmon population bottlenecks from low flows in a hydro-regulated river. *Environmental Modelling & Software* vol 120,104494
2. Adeva Bustos, A., Alfredsen, K., Fjeldstad, H.-P., Ottoson, K. (2019). Ecohydraulic Modelling to Support Fish Habitat Restoration Measures. *Sustainability*, 11(5), 1500
3. Juarez, A., Adeva Bustos, A., Alfredsen, K., Dønnum, B.O. (2019) Performance of a Two-Dimensional Hydraulic Model for the Evaluation of Stranding Areas and Characterization of Rapid Fluctuations in Hydropeaking Rivers. *Water*.
4. Saltveit, Svein Jakob, Brabrand, Åge, Juarez, Ana, Stickler, Morten, Dønnum, Bjørn Otto. (2020) The impact of hydropeaking on juvenile brown trout (*Salmo trutta*) in a Norwegian regulated river. *Sustainability* vol. 12 (20).
5. Sundt, H., Alfredsen, K., Museth, J., Forseth, T. (2021) Combining green LiDAR bathymetry, aerial images and telemetry data to derive mesoscale habitat characteristics for European grayling and brown trout in a Norwegian river. *Hydrobiologia*
6. Juarez, A., Alfredsen, K., Stickler, M., Adeva Bustos, A., Suarez, R., Seguin García, S., Hansen, BKT. (2021) A conflict between traditional flood measures and maintaining river ecosystems? A case study based upon the river Lærdal, Norway. *Water*. vol. 13 (14)
7. Sundt, H., Alfredsen, K., Harby, A., (2021) Regionalized Linear Models for River Depth Retrieval Using 3-Band Multispectral Imagery and Green LIDAR Data. *Remote Sensing* vol. 13(19).
8. Junker-Köhler, B., Sundt, H. (2021) Assessing Visual Preferences of the Local Public for Environmental Mitigation Measures of Hydropower Impacts—Does Point-of-View Location Make a Difference? *Water* vol. 13(21)
9. Awadallah, MOM., Juarez, A., Alfredsen, K. (2022) Comparison between Topographic and Bathymetric LiDAR Terrain Models in Flood Inundation Estimations. *Remote Sensing*. vol. 14 (1).

Konferanseartiklar/Rapportar

1. Alfredsen, K., Juarez, A. (2020) Modelling stranded river ice using LiDAR and drone-based models. *PROCEEDINGS OF THE 25th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ICE Trondheim, Norway, 23rd – 25th November 2020*.
2. Alfredsen, K., Juarez, A., Limpens, E., Sivakumar, A. (2020) Simulering av vassdekt areal i Lærdalselva. Trondheim: Norges Teknisk Naturvitenskaplige Universitet 2020 (ISBN 978-82-7598-118-7) 28 p. NTNU report B1-2019-5.
3. Adeva-Bustos, A., Alfredsen, K., Schönfelder, LH, Stranzl, SF, Hansen, B, Gabrielsen, S-E (2020) Supplerende undersøkelser i Lærdalselva. SINTEF Energi 2020:01196.

4. Oppsummering og vidare arbeid

Med utgangspunkt i dei erfaringane som er gjort med bruk av batymetrisk LiDAR har vi erfart at:

- Eit godt datasett frå batymetrisk LiDAR er eit svært godt utgangspunkt for å lage terrengmodellar for elver under vatn og for sette opp hydrauliske modellar i stor detalj. I nokre tilfelle har der vore manglar i datasetta i nokre djupe område og i delar av elva med turbulent vatn. Desse kan fyllast inn ved feltmålingar, men det er og mogleg å gjere dette gjennom interpolasjon og etterkvart og andre og meir avanserte metodar.
- Erfaringane er at kalibrering av som bygger på denne batymetrien er enklare og krev mindre arbeid enn for tidlegare modellar målt med manuelle og ekkolodd baserte metodar. Vi finn og at for det arbeidet vi har gjort i HecRAS så ligg Manningstalet nærare dei «teoretiske» verdiane enn i ein modell kalibrert på ein mindre nøyaktig batymetri. På mange måtar er tilgangen til batymetri frå LiDAR eit slags paradigmeskifte i korleis ein kan bygge modellar og lage digitale representasjonar av elver.
- Erfaringane med omtrent alle dei vassdraga vi har jobba med et at vi greier å simulere vassdekt areal og vasslinje som ligg nær opptil observerte verdiar. Dette gir auka tiltru til modellen og er viktig når den er brukt til å undersøke detaljerte tilhøve som t.d. strandingsareal for fisk.
- For simulering av tiltak i vassdrag som inneber endringar i batymetrien er data frå LiDAR svært godt eigna. Detaljane i modellen gjer at terrengmodellen kan endrast på ein nøyaktig måte og det er relativt lett å lage nye strukturar t.d. ved bruk av GIS.
- Gjennom dei prosjekta som er lista opp over så har vi etterkvart fått eit effektivt opplegg for å ta data frå LAS format til dei formata som vi brukar til analyse. Dette er viktig sidan datasetta stort sett er svært store og vanskelege å handtere som tradisjonelle data.
- Pr i dag er LiDAR batymetri relativt kostbart. Men dersom ein vil ha data med tilsvarende oppløysing er det vel ingen metodar som i praksis kan konkurrere med metoden, det er vanskeleg å sjå andre metodar som kan få til tilsvarende til same pris. Ein annan ting er at sjølv om det kanskje er lite realistisk å måle opp alle vassdrag med batymetrisk LiDAR så vil eit godt utval slike datasett vere grunnlag for å utvikle metodar for å betre utnytte topografisk LiDAR data for å lage modellar av elver, sjå t.d. Sundt et al. (2021) som brukte batymetriske LiDAR data for å sette opp ei metode som brukar bilete frå fly og satellitt for å finne batymetri.
- Hittil har data vore brukt til å sette opp modellar og for å justere batymetri i samband med simulering av tiltak. Spesielt i dei områda der vi har stor tettleik av data er det sikkert mogleg å utnytte data til å hente ut annan informasjon, som t.d. data om botnmateriale som er viktig i mange samanhengar. Hydrauliske modellar med den presisjonen som vi har her kan og ha fleire bruksområde enn det vi har sett på så langt.

Basert på oppsummeringa ovanfor er der og nokre ting som treng meir arbeid:

- Kva er levetida av eit batymetrisk LiDAR? Kva betyr endringar i batymetrien for bruken t.d. i hydrauliske modellar?

- Vi har testa data mot målingar på land og på grunt vatn. Det bør og gjerast ei samanlikning av data på djupt vatn. Samanlikningar bør gjerast mot t.d. «multi beam» sonar i djupare område og terrestrisk laser på tørt land der vi kan samanlikne punkttskyer direkte.
- I alle tilfelle har vi brukt det fulle datasettet for å lage terrengmodellar. Med tanke på ifylling og målingar med andre metodar hadde det vore interessant å sjekke kor mykje data som trengs for å oppnå resultat tilsvarande det fulle datasettet.
- Det kan gjerast meir evaluering av hydrauliske modellar, t.d. kor godt dei representerer hastighet, og kor godt dei representerer flomsituasjonar der vatn strøymer utover flomslettene.
- Bruk av slike data for å utforme tiltak i vassdrag verkar svært lovande. Det er naudsynt med meir testing av metodar og verkty for utforming av tiltaka.

5. Referanser

- Alfredsen, K., C. Haas, J. Thuthan and P. Zinke (2018). Brief Communication: Mapping river ice using drones and structure from motion. *The Cryosphere* **12**: 627–633
doi:doi.org/10.5194/tc-12-627-2018
- Alfredsen, K. and A. Juarez (2020). Modelling stranded river ice using LiDAR and drone-based models. The 25th International Symposium on Ice, Trondheim, Norway, IAHR.10
- Alfredsen, K., A. Juarez, E. Limpens and A. Sivakumar(2019).Simulering av vassdekt areal i Lærdalselva. (Simulation of water covered area in Lærdalselva) (In Norwegian) Norwegian University of Science and Technology B1-2019-5
- 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 (2021). 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
- Borsanyi, P., K. Alfredsen, A. Harby, O. Ugedal and C. E. Kraxner (2004). A meso-scale habitat classification method for production modelling of Atlantic salmon in Norway. *Hydroecol. Appl.* **14**(1): 119-138
- Brekke, I. (2020). Modellering av terskelfjerning og terskelendringer i Nea. MSc, NTNU.
- Bustos, A., K. Alfredsen, H.-P. Fjeldstad and K. Ottoson (2019a). Ecohydraulic Modelling to Support Fish Habitat Restoration Measures. *Sustainability* **11**(5)
doi:doi.org/10.3390/su11051500
- Bustos, A., K. Alfredsen, L. Schöenfelder, S. Stranzl, B. Hansen and S.-E. Gabrielsen(2020).Supplerende undersøkelser i Lærdalselva SINTEF Energi AS 2020:01196 47
- Bustos, A., R. Hedger, H.-P. Fjeldstad, M. Stickler and K. Alfredsen (2019b). Identification of salmon population bottlenecks from low flows in a hydro-regulated river. *Environmental Modelling and Software* **102**
doi:doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104494
- Chone, G., P. Biron and T. Buffin-Bélanger (2018). Flood hazard mapping techniques with LiDAR in the absence of river bathymetry data. *E3S Web Conf.* **40**

- Forseth, T., M. Stickler, O. Ugedal, H. SUNDT, G. Bremset, T. Linnansaari, N. A. Hvidsten, A. Harby, T. Bongard and K. Alfredsen(2009).Utfall av Trollheim kraftverk i juli 2008 (summary in english) Norwegian Institute of Nature Research 435 35
- Hailemariam, S. (2021). Comparing flood cost estimates with varying levels of detail. MSc, NTNU.
- Hammeren, R. and I. Alne (2015). Vurdering av grøn laser for geometridata frå elver NTNU.
- Juarez, A. (2018). Performance of a two-dimensional hydraulic model for the evaluation of stranding areas and characterization of rapid fluctuations in hydropeaking rivers. MSc, NTNU.
- 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
- Juarez, A., K. Alfredsen, M. Stickler, A. Adeva-Bustos, R. Suarez and S. Seguin Garcia (2021). A conflict between traditional flood measures and maintaining river ecosystems? A case study based upon the river Lærdal, Norway. . *Water* **13**(14) doi:doi.org/10.3390/w13141884
- 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
- Le Floch, Y. (2021). Prediction of flooded areas during Nausta River floods. Internship. , NTNU.
- Mandlburger, 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
- Muscara, I. (2017). Modelling the impact of the Hol 1 hydroelectric power plant turbine operation on the hydraulic habitat of the Storåne river. MSc, Roma Tre University.
- Papanikolaou, K. (2017). Surna temperature modelling. Internship report, NTNU.
- Saltveit, S. J., Å. Brabrand, A. Juarez, M. Stickler and B. Dønnum (2020). The Impact of Hydropeaking on Juvenile Brown Trout (*Salmo trutta*) in a Norwegian Regulated River. *Sustainability* **12**(20) doi:<https://doi.org/10.3390/su12208670>
- Seguin Garcia, S. (2019). Hydraulic modelling of the Lærdal river. MSc, NTNU.
- Skeie, L. (2016). LIDAR-data for hydraulisk modellering av Tokkeåi. MSc, NTNU.
- Sundt, H. (2018). COMPARING REMOTE SENSING DATA FOR ASSESSING VERTICAL ACCURACY IN FOUR DIFFERENT TERRAIN MODELS IN A HYDROPOWER REGULATED RIVER. 12th International Symposium on Ecohydraulics. Tokyo, Japan.
- Sundt, H., K. Alfredsen and A. Harby (2021). Regionalized Linear Models for River Depth Retrieval Using 3-Band Multispectral Imagery and Green LIDAR Data. *Remote Sensing* **13**(19) doi:doi.org/10.3390/rs13193897
- Tekle, M. (2021). Hydraulic modelling of flow ramping related to river morphology and river geometry MSc, NTNU.

ISBN 82-7598-091-7

