

Pia Rønne

# Vurdering av minstevannføringslipp i Årdalselva

Masteroppgave i Hydropower Development

Veileder: Knut Alfredsen

Februar 2020





Pia Rønne

# Vurdering av minstevannføringslipp i Årdalselva

Masteroppgave i Hydropower Development  
Veileder: Knut Alfredsen  
Februar 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg- og miljøteknikk



**NTNU**

Kunnskap for en bedre verden



## Masteravtale

### M.Sc. THESIS IN HYDROPOWER DEVELOPMENT

Student: Pia Rønne

Tittel: Vurdering av minstevassføringslepp i Årdalselva

#### Bakgrunn

Lyse Produksjon har krav til minstevassføringslepp i Årdalselva i samband med reguleringa for Lysebotn kraftverk. Slepp av vatn vert gjort i Breiavad, medan måling av minstevassføring vert gjort i Kalltveit målestasjon som 19 kilometer nedstraums sleppunktet. Dette fører til utfordringar med å ta omsyn til tidsforseinkinga mellom utsleppspunkt og målepunkt, spesielt på vinteren då danning av is fører til lang transporttid i vassdraget. Konsekvensen av dette er at ein ikkje når kravet til minstevassføring eller at ein må sleppe store volum med vatn for å sikre at ein når kravet.

Føremålet med denne oppgåva er å sjå på kva faktorar som påverkar slepp av minstevassføring i Årdalselva, og om mogleg å finne forslag til løysingar som gjer at slepp av minstevassføring kan gjerast utan tap av vatn. Viktige oppgåver er å prøve å finne ein samanheng mellom forseinking av vatnet på vinteren og prosessane som dannar is samt å etablere ein hydraulisk modell for strekninga.

#### Hovudpunkt i arbeidet

Arbeidet er eit sjølvstendig arbeid der kandidaten skal planlegge, førebu og gjennomføre det som er innhaldet i oppgåva.

Oppgåva skal innehalde, men ikkje nødvendigvis vere avgrensa til spørsmåla som er lista opp her:

1. Gjere ei vurdering av tidsforseinking av vatnet om vinteren basert på vannføringsdata frå loggarar i Årdalselva. Deretter skal det vurderast om denne forseinkinga kan relaterast til data om klima og andre tilhøve i vassdraget med tanke på å lage ein modell som gir samanhengen mellom forseinking og danning av is på vinteren.
2. LiDAR data for Årdalselva skal vurderast med tanke på å lage ein hydraulisk modell av elva. Viktige faktorar her er dekningsgrad og eventuelt manglande område. Ved manglande data skal det vurderast om ifylling kan gjerast, og i tilfelle dette er mogleg skal datasettet kompletterast.
3. Med utgangspunkt i data frå 2), etablere ein hydraulisk modell for Årdalselva på den aktuelle strekninga. Det må gjerast ei vurdering om modellen skal vere 1D eller 2D og kva område den dekker. Det må vidare vurderast korleis sjøane i vassdraget skal handterast i modellen med tanke rekning av tidsforseinking.
4. Med utgangspunkt i funna frå 1) og 3) skal det vurderast korleis minstevassføring kan sleppast med minst mogleg tap av vatn. Kva løysingar kan ein tenke seg og er der alternative løysingar til den som er brukt i dag?
5. Rapportering av resultat frå prosjektet i form av ei masteroppgåve. I samband med rapporteringa er det viktig å levere alle modellar og data digitalt med tanke på vidareføring av arbeidet i prosjektet.

## **Rettleiing**

Professor Knut Alfredsen vil vere hovudrettleiar for oppgåva. Trond Erik Børresen er kontaktperson ved Lyse Produksjon.

Diskusjon med og bidrag frå kollegaer og medarbeidarar på NTNU, Lyse og eventuelt andre er tilrådd. Bidrag som nyttast i oppgåva skal alltid refererast til på rett vis.

Arbeidet som vert gjort i samband med oppgåva er ein del av eit utdanningsløp og student og rettleiarar har fridom til å ta inn avgrensingar og føresetnader som kan oppfattast som urealistiske eller uvanlege i ein kommersiell samanheng.

## **Rapportformat, referansar og erklæring**

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar og foto får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i B5-format som .pdf i Inspira/DAIM og trykkast i tre eksemplar som sendast direkte frå trykkeri til faglærer/institutt. Samandraget skal ikkje gå over meir enn 450 ord og skal vere eigna for elektronisk rapportering.

Kandidaten skal presentere oppgåva i slutten av semesteret. Tidspunkt for presentasjonen vil verte kunngjort seinare.

Innleveringsfrist er 11. februar 2020

Knut Alfredsen  
Professor

Institutt for bygg og miljøteknikk  
NTNU

## Forord

Arbeidet har blitt gjort i forbindelse med slutføring av det 2-årige internasjonale mastergradsstudiet Hydropower Development (HPD), ved Fakultet for Ingeniørvitenskap og Institutt for Bygg- og Miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU).

Jeg vil rette en stor takk til min veileder professor Knut Alfredsen for hjelp og veiledning gjennom dette prosjektet. Takk til min medveileder Ana Juarez for hjelp med data og oppsett av HEC-RAS modellen. Takk til Lyse Produksjon for muligheten til å arbeide med LiDAR-data og hydraulisk modellering. Takk til Trond Erik Børresen og Torbjørn Ims Østby fra Lyse Produksjon for anskaffelse av data. Til slutt vil jeg takke Sylvi Brækken og Aleksander Karlsson for moralsk støtte under dette prosjektet.

Forhåpentligvis vil masteroppgaven være til nytte for Lyse Produksjon og andre som skal bruke LiDAR-data og HEC-RAS til 2D ikke-stasjonær strømning.

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

Pia Rønne  
Trondheim, 11. februar 2020



## Sammendrag

Regulering av vassdrag endrer de hydrologiske forutsetningene for dannelse av is. Når vann blir ledet bort fra vassdraget, blir det satt et krav om minstevannføring i elva som må overholdes. For Årdalselva i Rogaland er en lang strekning mellom tapping og måling av vannføringen et problem, spesielt på vinteren da danning av is holder vannet tilbake. Som et resultat må mer vann slippes for å holde minstevannføringskravet og vann går tapt.

Et av hovedformålene for oppgaven er å lage en modell som viser sammenhengen mellom tidsforsinkelsen av vannet om vinteren og dannelse av is i elva. En todimensjonal hydraulisk modell er satt opp i HEC-RAS 5.0.7 for Årdalselva. Terrengmodellen er basert på LiDAR-data og en manuell konstruksjon av manglende områder.

Det skal gjøres en vurdering av tidsforsinkelsen av vannet i elva, og dette skal relateres til isdannelse om mulig. Episoder hvor vannføringen går under minstevannføringskravene skal bli lokalisert og relateres til ulike klimafaktorer. Funnene i rapporten gir grunnlag for forslag til mulige løsninger på hvordan slipp av minstevannføring kan gjøres uten tap av vann. Dette inkluderer en rask islegging av elva i vintersesongen og en nødvendig vannhastighet på under  $0.6 \text{ m/s}$ .

Den manglende batymetrien i elva førte til en usikkerhet vedrørende resultatene fra del 1 av modellen, da en nøyaktig representasjon av terrenget er nødvendig for en god hydraulisk modell. Videre ga en todimensjonal modell betraktelig lengre simuleringstid som gjorde kalibrering av modellen utfordrende. Del 2 av modellen ga gode resultater om tilsig av vann fra nedslagsfeltet ble inkludert i inndata for simuleringen.





## Abstract

Regulation of watercourses change the hydrological conditions for ice formation. When water is redirected from its natural watercourse, there is a requirement of environmental flow in the river that must be fulfilled. For Årdalselva in Rogaland the long distance between the discharge and measurement of water flow is a problem, especially in winter when formation of ice restricts the water. As a result, more water must be discharged to fulfill the environmental flow requirement and water is wasted.

One of the main goals for this thesis is to make a model that shows the correlation between the delay of water in winter and the formation of ice. A two-dimensional hydraulic model was created in HEC-RAS 5.0.7 for Årdalselva. The terrain model is based on LiDAR data and a manual construction of the missing bathymetry.

An assessment must be made of the delay of water, and if possible, relate this to formation of ice. Episodes where the water flow does not meet the environmental flow requirement should be identified and related to various climate factors. The findings of the report provide a basis for suggestions for possible solutions on how to release environmental flow without loss of water. This includes a rapid icing of the river in the winter season and a necessary water velocity below  $0.6 \text{ m/s}$ .

The lack of bathymetry in the river led to uncertainties regarding the results of part 1 of the model, as an accurate representation of the terrain is necessary for a good hydraulic model. Furthermore, a two-dimensional model gave significantly longer simulation time which made calibration of the model challenging. Part 2 of the model gave good results if inflow of water from the catchment area was included in the simulation input.



# Innhold

<b>Forord</b>	<b>iii</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Problemformulering . . . . .	1
<b>2 Teori</b>	<b>3</b>
2.1 Årdalselva . . . . .	3
2.2 Datagrunnlag for vurdering av minstevannføring og tidsforsinkelse . . . . .	3
2.3 Isdannelse . . . . .	4
2.4 LiDAR-data . . . . .	6
2.5 LAStools . . . . .	6
2.6 ArcGIS 10.7 . . . . .	7
2.7 HEC-RAS 5.0 . . . . .	7
2.7.1 Beregningsnett . . . . .	7
2.7.2 Bruddlinjer . . . . .	8
2.7.3 Justerte regioner . . . . .	9
2.7.4 Manglende data for batymetrien . . . . .	10
2.7.5 Mannings $n$ . . . . .	10
2.8 Ligninger for 2D ikke-stasjonær strømning . . . . .	11
2.8.1 Kontinuitetsligning ( <i>Mass Conservation</i> ) . . . . .	11
2.8.2 Bevegelsesligningene ( <i>Momentum Conservation</i> ) . . . . .	11
2.8.3 Diffusiv bølge ( <i>Diffusion Wave</i> ) . . . . .	12
2.9 Tidssteg . . . . .	12
2.10 Vurdering av simulert data . . . . .	13
<b>3 Metode</b>	<b>15</b>
3.1 Vurdering av tidsforsinkelsen av vannet om vinteren . . . . .	15
3.2 Vurdering av minstevannføring . . . . .	15
3.3 Vurdering av 1D vs 2D modell . . . . .	16
3.4 LAStools (LAZ til LAS) . . . . .	17
3.5 LAS til ArcMap . . . . .	17
3.6 HEC-RAS . . . . .	18
3.6.1 Beregningsnett . . . . .	19
3.6.2 Konstruksjon av manglende batymetri . . . . .	20
3.6.3 Bruddlinjer i modellen . . . . .	24
3.6.4 Håndtering av sjøene i modellen . . . . .	24
3.6.5 Justerte regioner . . . . .	24
3.7 Simuleringsvalg . . . . .	25
3.7.1 Grensebetingelser . . . . .	25
3.7.2 Restart Fil . . . . .	25
3.7.3 Simulering før kalibrering . . . . .	28
3.8 Kalibrering av Mannings $n$ . . . . .	30
<b>4 Resultat og diskusjon</b>	<b>33</b>

4.1	Vurdering av tidsforsinkelsen av vannet i Årdalselva . . . . .	33
4.2	Vurdering av minstevannføring . . . . .	35
4.3	Konstruksjon av manglende batymetri . . . . .	38
4.4	Modell del 1 . . . . .	42
4.5	Modell del 2 . . . . .	43
4.6	Slipp av minstevannføring med minst mulig tap av vann . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Oppsummering og konklusjon</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Videre arbeid</b>	<b>47</b>
	<b>Referanseliste</b>	<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Høydeprofil av Årdalselva</b>	<b>49</b>
<b>B</b>	<b>Områder med manglende batymetri</b>	<b>50</b>
<b>C</b>	<b>Konstruksjon av manglende batymetri</b>	<b>54</b>
<b>D</b>	<b>Grunnlag for valg av konstruert batymetri</b>	<b>56</b>
D.1	Kråkeholsvatnet . . . . .	56
D.2	Musdalsvatnet . . . . .	59
D.3	Viglesdalsvatnet . . . . .	63
D.4	Hiavatnet . . . . .	64

## Figurer

1	Oversiktskart over prosjektområdets geografiske omfang av Årdalselva (Norgeskart 2019).	3
2	Sammenhengen mellom vanntemperatur og strømhastighet for isdannelse i elv ved målinger i Nea. Figuren er tatt fra NVE-rapporten 20-2010: Hvordan is i vassdrag dannes [1].	5
3	Hiafossen januar 2016 (Fotograf: Trond Erik Børresen)	6
4	Utsnitt av 2D beregningsnett i HEC-RAS hvor bruddlinjen (blå) er tegnet rundt en elvebank for å styre vannet i riktig retning.	9
5	Utsnitt av 2D beregningsnett i HEC-RAS hvor grenselinjen til en justert region viser endring av cellestørrelse på begge sider.	10
6	Utsnitt fra ArcMap som viser rasteren for Årdalselva.	18
7	En transparent terrengfil med Google satelittbilde som bakgrunn.	19
8	Beregningsnettet for både del 1 og del 2 av modellen. Til høyre vises del 1 og til venstre vises del 2.	19
9	Oversiktsbilde av Musdalsvatnet. Her vises strømningslinjen, de to elvebankene og de 21 tverrsnittene som har blitt tegnet for denne sjøen.	21
10	Utsnitt av Cross Section-vinduet som viser plottet av terrenget for tverrsnitt nr. 14 fra innløpet av Musdalsvatnet. Den rette linjen uten punkter er hvor terrenget gikk før. Punktene under viser de interpolerte verdiene for terrenget.	22
11	En terskel har oppstått i terrenget etter interpolering av terrenget. Til venstre vises terskelen under en simulering hvor den hindrer vannføringen. Til høyre vises terrengprofilen som bekrefter at terskelen har en høyde på ca. 1.5 m.	23
12	Terskelen i terrenget etter endringen. Til venstre vises terskelen etter en simulering, hvor vannføringen ikke blir hindret. Til høyre vises terrengprofilen som bekrefter at terskelen er forbedret.	23
13	Vanndybden etter simulering av restart filen for del 1 av HEC-RAS modellen som viser dekningsområdene av vannet etter endt simulering.	26
14	Vannføringen ved utløpet til del 1 av modellen etter simulering med hensikt om å lagre en restart fil.	27
15	Dekningsområdet til vannet i restart filen for del 2 av HEC-RAS modellen.	27
16	Vannføring etter første simulering av modell del 1 hvor $Q_t$ inndata er simulert vannføring fra Breiavatnet, $Q_k$ simulert er vannføring ut av modellen og $Q_l$ observert er vannføring ved Kalltveit 12 timer senere og subtrahert vannføring fra Lyngsåna.	28
17	Dekningsområdet til vannet i elva under simulering av gjennomsnittlig vannføring for 22. til 24. Mai 2018.	29
18	Ortofoto fra TerraTec som viser dekningsområdet til vannet i elva under innsamling av LiDAR data 22. til 24. mai 2018.	30
19	Endring av Mannings $n$ verdi for ulike områder av modell del 1.	30
20	Endring av Mannings $n$ verdi for ulike områder av modell del 2.	31
21	Tidsforsinkelsen av vannføringen for vinteren. $Q_k$ (mørkeblå) er vannføringen målt ved Kalltveit, $Q_t$ (blå) er tappet vann fra Breiavatnet og $Q_l$ (grønn) er vannføringen fra Lyngsåna.	33
22	Tidsforsinkelsen av vannføringen, $Q$ for serie 1 på sommeren. $Q_k$ (mørkeblå) er vannføringen fra Kalltveit, $Q_t$ (blå) er tappet vann fra kraftverket og $Q_l$ (grønn) er vannføringen fra Lyngsåna.	34
23	Tidsforsinkelsen av vannføringen, $Q$ for serie 2 på sommeren. $Q_k$ (mørkeblå) er vannføringen fra Kalltveit, $Q_t$ (blå) er tappet vann fra kraftverket og $Q_l$ (grønn) er vannføringen fra Lyngsåna.	35

24	Lufttemperatur i grader celsius for Årdalselva i år 2014. . . . .	37
25	Lufttemperatur i grader celsius for Årdalselva i år 2015. . . . .	37
26	Lufttemperatur i grader celsius for Årdalselva i år 2016. . . . .	38
27	Kråkeholsvatnet med konturlinjer med 0.5 meters intervall. . . . .	39
28	De to mindre områdene nedstrøms Kråkeholsvatnet med konturlinjer med 0.5 meters intervall. . . . .	39
29	Musdalsvatnet med konturlinjer med 1 meters intervall. . . . .	40
30	Viglesdalsvatnet med konturlinjer med 1 meters intervall. . . . .	40
31	Hiavatnet med konturlinjer med 0.5 meters intervall. . . . .	41
32	Det mindre området nedstrøms Hiavatnet med konturlinjer med 0.5 meters intervall. . . . .	41
33	Vannføring modell del 1 etter simulering med restart fil hvor inndata er kjørt med lav vannføring seks timer før økning for å stabilisere vannføringen etter den høye vannføringen i restart filen. $Qt$ inndata er vann tappet fra Breiavatnet, $Qk$ simulert er vannføringen ut av modellen og $Qk$ observert er målt vannføring ved Kalltveit (subtrahert vannføring fra Lyngsåna). . . . .	42
34	Dekningsområdet til vannet i elva under simulering av gjennomsnittlig vannføring for 22. til 24. Mai 2018 etter kalibrering av Mannings $n$ verider for tre områder i modell del 2. . . . .	43
35	Ortofoto fra TerraTec som viser dekningsområdet til vannet i elva under innsamling av LiDAR data 22. til 24. mai 2018. . . . .	43
A.1	Høydeprofil av Årdalselva fra målestasjonen Kalltveit til utløpet av Breiava før dataene blir etterfylt (?). . . . .	49
A.2	Høydeprofil av Årdalselva fra målestasjonen Kalltveit til utløpet av Breiavatnet etter konstruering av manglende batymetri. . . . .	50
B.1	Manglende batymetri for Kråkeholsvatnet. . . . .	51
B.2	Manglende batymetri nedstrøms Kråkeholsvatnet. . . . .	51
B.3	Manglende batymetri i Musdalsvatnet. . . . .	52
B.4	Manglende batymetri i innløpet til Viglesdalsvatnet. . . . .	52
B.5	Manglende batymetri i utløpet av Viglesdalsvatnet og Hiavatnet . . . . .	53
B.6	Manglende batymetri i Granefossane og Hiafossen som ligger nedstrøms Hiavatnet. . . . .	53
C.1	Oversiktsbilde av Kråkeholsvatnet. Her er 17 tverrsnitt tegnet. . . . .	54
C.2	Oversiktsbilde av Musdalsvatnet. Her er 21 tverrsnitt tegnet. . . . .	55
C.3	Oversiktsbilde av Viglesdalsvatnet. Her er 22 tverrsnitt tegnet. . . . .	55
C.4	Oversiktsbilde av Hiavatnet. Her er 19 tverrsnitt tegnet. . . . .	56
D.1	Terrengkart over Kråkeholsvatnet. . . . .	57
D.2	Terrengkart over Heggvatnet. . . . .	57
D.3	Dybdekart over Heggvatnet. . . . .	58
D.4	Terreng-og dybdekart over Granavatnet. . . . .	59
D.5	Terrengkart over Musdalsvatnet. . . . .	60
D.6	Terrengkart over Risvatnet. . . . .	60
D.7	Dybdekart over Risvatnet. . . . .	61
D.8	Terrengkart over Martadalsvatnet. . . . .	62
D.9	Dybdekart over Martadalsvatnet. . . . .	62
D.10	Terrengkart over Viglesdalsvatnet. . . . .	63
D.11	Terreng-og dybdekart over Gjevden. . . . .	64
D.12	Terrengkart over Hiavatnet. . . . .	65
D.13	Terrengkart over Magnusvatnet. . . . .	65
D.14	Dybdekart over Magnusvatnet. . . . .	66
D.15	Terreng-og dybdekart over Stemtjørna. . . . .	67
D.16	Terrengkart over Myrtjernet. . . . .	67

D.17 Dybdekart over Myrtjernet. . . . . 68

## Tabeller

1	Spesifikasjoner til datamaskinen brukt under prosjektet. . . . .	15
2	Vannmengden i $m^3/s$ som slippes for de første tre timene ved grensebetingelsene i del 1 av modellen. Det ble også kjørt null vannføring i syv timer i etterkant for å stabilisere vannføringen i elva. Denne vannmengden brukes for å fylle elva og spesielt sjøene med hensikten å lagre en restart fil. . . . .	26
3	Første simulering av modell del 2 viser en differanse mellom simulert $Q_k$ og observert $Q_k$ når inndata for modellen er tapping fra Breiavatnet, $Q_t$ , og vannføring fra Lyngsåna, $Q_l$ . . . . .	29
4	Alle separate episoder hvor vannføringen ved Kalltveit går under minstevannføringskravene. Varighet er oppgitt som totalt antall timer og resten av faktorene er gjennomsnittlige verdier for den separate episoden. . . . .	36



## Begrepsliste

ArcGIS	-	En GIS-programvarepakke utviklet av ESRI
ArcMap	-	Et GIS-program i programvarepakken til ArcGIS
ASPRS	-	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
ESRI	-	Environmental Systems Research Institute
GIS	-	Geografisk Informasjonssystem
HEC-RAS	-	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
IDW	-	Inverse Distance Weighting
LiDAR	-	Light Detection and Ranging
NTNU	-	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NSE	-	Nash-Sutcliffe effektivitet
NVE	-	Norges vassdrags- og energidirektorat
TIFF	-	Tagged Image File Format

# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

Norge er et land med stort potensial for vannkraft. Om lag 70% av Norges største vassdrag er bygget ut [11]. Som følge av denne vannkraftutbyggingen blir vassdrag regulert og endret fra sin naturlige vannføring ved at vannet blir holdt tilbake med en dam eller avledet gjennom en tunnel.

De første vannkraftverkene som ble bygget påvirket naturen i liten grad, da magasinene var relativt små og kun en liten del av vannet ble utnyttet i vannrike perioder. På 1950- og 1960-tallet ble det bygget større magasiner der mer av vannet ble utnyttet for å dekke behovet for strøm om vinteren. Konsekvensene av dette ble redusert vannføring på lange strekninger i vassdraget og økt vannføring der vannet ble ledet. Dette førte til isproblemer i vassdragene som igjen førte til driftsproblemer ved kraftstasjoner. Vannføring og vanntemperatur er grunnleggende faktorer for isforholdene i et vassdrag. Regulering av vassdraget endrer de hydrologiske forholdene, som igjen påvirker isforholdene [1].

I Norge må vannkraftverkene holde et krav om minstevannføring i de påvirkede elvene som er satt av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) som en del av konsesjonsvilkårene [12]. Minstevannføring er minste tillatte vannføring i regulert vassdrag satt for å ivareta miljøverdier i og langs vassdraget, spesielt med tanke på økologi og landskapsopplevelsen. Lysebotn kraftverk har krav om minstevannføring på  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$  for perioden 15.05-14.10 (sommer) og  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  for perioden 15.10-14.05 (vinter) i Årdalselva. Målestasjonen Kalltveit ligger 19 km nedstrøms Breiavatnet som skaper utfordringer med tanke på tidsforsinkelsen vannet i elva. Spesielt på vinteren fører danning av is i elva til en lengre transporttid i vassdraget. Konsekvensene dette medfører er at minstevannføringskravet ikke blir oppfylt, eller at store mengder vann må slippes for å nå kravet.

Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS) er et dataprogram som modellerer hydraulikken til vannføringer gjennom elver. En hydraulisk modell vil kunne simulere ulike scenario satt av brukeren. For dette tilfellet er det interessant med en modell som viser sammenhengen mellom tidsforsinkelsen av vannet om vinteren og danning av is i elva. En slik modell vil kunne brukes av Lyse Produksjon AS for å estimere slipp av minstevannføring uten tap av vann.

## 1.2 Problemformulering

I denne rapporten skal tidsforsinkelsen av vannet om vinteren vurderes basert på vannføringsdata fra loggere i Årdalselva. Om mulig skal sammenhengen mellom tidsforsinkelsen og prosessene som danner is finnes. Ved bruk av observasjonsdata skal episoder hvor minstevannføringskravet ikke er møtt identifiseres. Varigheten til slike episoder skal merkes og om mulig relateres til klimafaktorer slik som lufttemperatur.

Light Detection and Ranging (LiDAR)-data skal brukes til å lage en terrengmodell til bruk i HEC-RAS og videre skal en hydraulisk modell av den aktuelle strekningen i Årdalselva etableres. Ved manglende data skal datasettet gjøres komplett. Det skal også vurderes hvordan sjøene skal håndteres i modellen med tanke på beregning av tidsforsinkelsen. Til slutt skal rapporten inneholde forslag til mulige løsninger som gjør at slipp av minstevannføring kan gjøres uten tap av vann.



## 2 Teori

Dette kapittelet inneholder en kort innføring om studieområdet, Årdalselva, teori om isdannelse, informasjon om datagrunnlaget for prosjektet, samt informasjon om programvarene som er brukt, hvor HEC-RAS står i fokus.

### 2.1 Årdalselva

Årdalselva (originalt kalt Storåna) er en elv i Hjelmeland kommune i Rogaland. Elva er en del av Årdalsvassdraget. I dette prosjektet skal den nederste delen av Årdalselva studeres. Området i prosjektet er avgrenset fra utløpet av Breiavatnet hvor Lysebotn kraftverk slipper ut minstevannføring, fram til målestasjonen Kalltveit i Årdal. Denne strekningen er omtrent 19 km lang. Lyse Produksjon AS driver kraftverket og har dermed kontroll over hvor mye vann de slipper ut i Årdalselva. Videre går elva gjennom Kråkeholsvatnet, Musdalsvatnet, Viglesdalsvatnet, Hiavatnet, og fossene Granefossane, Hiafossen og Sendingfossen. Elva slås sammen med sideelvene Lyngsåna, Ullestadåna og Bjørg før den munner ut i Årdalsfjorden ved bygda Årdal. Se Figur 1 for oversikt over prosjektområdet. NVE har målestasjonen Kalltveit i Årdal som en kontroll for at minstevannføringskravene blir holdt. En høydeprofil av elva vises i vedlegg A.



**Figur 1:** Oversiktskart over prosjektområdets geografiske omfang av Årdalselva (Norgeskart 2019).

### 2.2 Datagrunnlag for vurdering av minstevannføring og tidsforsinkelse

For å vurdere tidsforsinkelsen av vannet i elva og dokumentere episoder hvor minstevannføringskravene ikke er møtt, blir det gjort analyser i Microsoft Office Excel. Data for perioden 2014 til 2019 er levert av Lyse Produksjon. Dataene inkluderer tapping av vann fra Breiavatnet, vannføring og vanntemperatur fra målestasjonen Kalltveit i Årdal, vannføring fra målestasjonen i Lyngsåna ved Nes og nedbør fra to nærliggende stasjoner. Data for lufttemperatur er hentet fra senorge.no ved målestasjonen Kalltveit i Årdal med stasjonId=33.4.0. Samme datagrunnlag er brukt for å vurdere både minstevannføringen og tidsforsinkelsen i elva.

## 2.3 Isdannelse

Dette delkapittelet beskriver prosessen for isdannelse med vekt på isdannelse i regulerte vassdrag. Teorien er hentet fra *Vassdragshåndboka* [15] og *NVE rapport 20-2010 -Hvordan is i vassdrag dannes* [1].

Tidspunktet for isdannelse i elver og sjøer, lengden på is-sesongen og isforholdene varierer med meteorologiske faktorer. Disse faktorene er først og fremst lufttemperatur, skydekke, vind og nedbør. Vannføring og vanntemperatur har også en sentral betydning for isforholdene i et vassdrag. Det kan være store forskjeller mellom isleggingen i den samme elven, om det er variasjoner i helning, størrelse og/eller dybde for de ulike elvestrykene. Spesielt mindre elver og grunne sjøer vil normalt islegges først. Isdannelse begynner normalt i november eller desember.

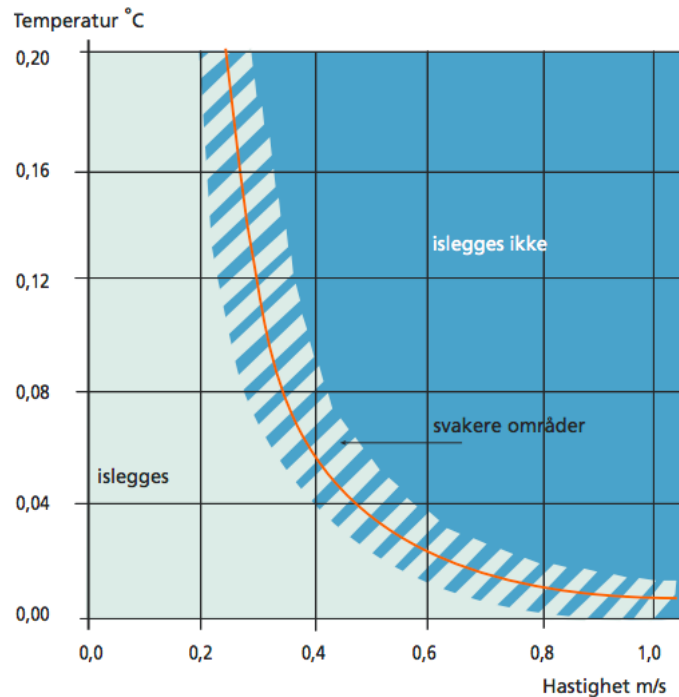
Det er to svært forskjellige måter isdannelse skjer på, statisk eller dynamisk. Statisk isdannelse skjer i stilleflytende vann og dynamisk isdannelse skjer i turbulent strømmende vann. Isdannelse kan først begynne når vannoverflaten blir underkjølt, altså at den synker ned til  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , i tillegg til at det må være krystallasjonskjerner tilstedet.

Statisk isdannelse oppstår ved at den første isen vokser ut fra strandkanten eller fra krystallasjonskjerner i den underkjølte vannoverflaten. Først dannes et nettverk av isnåler. Områdene mellom isnålene islegges deretter raskt. Dette kalles kraving og det dannes stålis. Statisk isdannelse oppstår vanligvis i vann med svak strøm uten merkbar virveldannelse. Etter et sammenhengende isdekke er dannet, vil isen ha en temperatur på  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  på undersiden. Vannet under isen vil ikke bli ytterligere underkjølt. Når isdekkets overflate avkjøles til under  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  vil istykkelsen øke ved at vannet fryser på undersiden av isen.

Turbulent isdannelse oppstår i strømmende vann hvor det er nærmest fullstendig blanding av vannmassene. Under en kuldeperiode vil hele vannmassen etter hvert avkjøles til omtrent  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Et tynt overflatelag vil underkjøles om vannmassen opplever ytterligere varmetap. Dette underkjølte overflatelaget vil bevege seg i vannet med virvlinger og vil danne sarr om det kommer i kontakt med krystallasjonskjerner. Sarret vil flyte i overflaten ved svak strømming eller bevege seg dypere under vannoverflaten ved sterkere strømming. Om det underkjølte sarret når elvebunnen vil det dannes bunnis. Ved en langvarig kuldeperiode kan bunnisen vokse til et tykt lag som til slutt dekker hele elvebunnen. Dannelsen av sarr og bunnis kalles kjøving.

Store deler av overflaten kan til slutt være dekket med sarr, da sarr fnokkes sammen til større flak. Sarr er enten aktivt eller passivt. Aktivt sarr er underkjølt sarr som lett fester seg til is, elvebunnen og andre gjenstander i vannet. Passivt sarr er sarr som ikke lenger er underkjølt og vil dermed ikke feste seg til noe. Dette sarret vil bli tatt av strømmingen eller samles oppunder isen på rolige partier i elva. Bunnisen vil også løsne fra bunnen og flyte med strømmingen om det ikke lenger er tilgang på underkjølt vann eller sarr.

Ved utførte målinger i Nea er det utarbeidet en sammenheng mellom vanntemperatur og strømhastighet som er kritiske for dannelsen av et sammenhengende isdekke i elva. Figur 2 viser denne sammenhengen. Aktivt sarr vil kun feste seg på langsgående iskanter ved vannhastigheter opp til ca.  $0.4\text{ m/s}$ , men vil stanse mot tverrgående isfronter og bygge isdekket oppover elva ved vannhastigheter opp til ca.  $0.6\text{ m/s}$ . Over denne hastigheten vil sarret dykke under isfronten, som kan føre til at elva holder seg åpen hele vinteren.



**Figur 2:** Sammenhengen mellom vanntemperatur og strømhastighet for isdannelse i elv ved målinger i Nea. Figuren er tatt fra NVE-rapporten 20-2010: Hvordan is i vassdrag dannes [1].

Sarr i elva vil ved hastigheter over  $0.6 \text{ m/s}$  dykke under en isfront og akkumuleres på rolige partier i elva. Senere kan sarret fryse til is og bli flere meter tykt. Hele elveleiet kan tettes om det oppstår mye sarrproduksjon. Som følge vil vannføringen hindres og vannet vil presse seg gjennom sprekker i isen og fryse til is slik at isen vokser på oversiden. En slik islegging vil kunne føre til oversvømmelser og i tillegg hindre vannføringen.

Bunnis kan føre til problemer i elva om det bygger seg opp til isøyer og isdammer som stenger elveleiet. Vannstanden vil heves og isen vil fortsette å vokse på oversiden når kantisen oversvømmes. Bunnisdammen vil fortsette å vokse ved tilgang på underkjølt vann og sarr, så lenge vannhastigheten er stor. Kun ved hastighet under  $0.6 \text{ m/s}$  vil et isdekke dannes.

Årdalselva har problemer med isdannelse som hindrer vannføringen og resulterer i at minstevannføringskravet ikke blir oppfylt på vinteren. Figur 3 viser et av problemområdene for isdannelse i Årdalselva.





*Figur 3: Hiafossen januar 2016 (Fotograf: Trond Erik Børresen)*

## 2.4 LiDAR-data

LiDAR er en optisk fjernmålingsteknikk med bruk av ultrafiolett, synlig eller infrarød lys til innhenting av data. Luftbåren LiDAR-skanning brukes blant annet til å lage høyoppløselige kart.

LiDAR-data er samlet, etterbehandlet og levert av selskapet TerraTec AS på oppdrag av Lyse Produksjon AS i Årdalsvassdraget. Det er utført en laserskanning med batymetrisk sensor for å fremskaffe terrengmodellen. Det er levert data ca. 50 m fra elvekanten og data ned til ca. 6 m under vannflaten enkelte steder. Laserskanningen ble utført 22. til 24. mai 2018. All data ble levert som LAZ-filer, et komprimert format av LAS-filer. Det ble levert 17 LAZ-filer med størrelser varierende fra 46.5 MB til 287.6 MB (totalt 2.5 GB) hvor alle ble levert i 1.2-format. Det ble også levert ortofoto (høyoppløselige bildeprodukter).

LAS er et filformat standardisert av den amerikanske organisasjonen American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) utviklet hovedsaklig for overføring av LiDAR-data. Tradisjonelt sett brukes ASCII-formatet til overføring av data, men når LiDAR-data skal overføres har den problemer med ytelse og at all informasjon spesifikk til LiDAR-data går tapt. LAS-formatet er et binært filformat som holder på informasjon spesifikk til LiDAR-data uten å være for komplekst [13].

## 2.5 LAStools

LAStools er en programvarepakke med verktøy for behandling av LiDAR-data utviklet av rapidlasso GmbH. Programvarepakken består av en rekke verktøy som enten er gratis eller krever lisensstilgang. Verktøyene i LAStools er kompatible med programmene ArcGIS, QGIS og ERDAS IMAGINE. I dette

prosjektet er kun den gratis programvaren las2las brukt. Ved bruk av denne programvaren er det mulig å pakke ut komprimerte LAZ-filer, samle de til en LAS-fil og beholde kun de klassifiseringene av data som er relevant for prosjektet.

## 2.6 ArcGIS 10.7

ArcGIS er et Geografisk Informasjonssystem (GIS) som er utviklet av Environmental Systems Research Institute (ESRI). ArcMap er et GIS-program i programvarepakken til ArcGIS. ArcMap representerer geografisk informasjon som en samling av lag og andre elementer i et kart. Her kan studieområdet vises, utforskes og redigeres. Det er nødvendig å bruke ArcMap for å konvertere LAS-filene til en raster i Tagged Image File Format (TIFF), som er et filformat HEC-RAS støtter.

En LAS-fil inneholder LiDAR punktsky data. Verktøyet *LAS dataset to raster* brukes for å konvertere denne filen til overflater i en raster [8]. Interpolasjon brukes for å beregne verdiene i celler fra punkter. I ArcMap kan det velges mellom to ulike interpolasjonsteknikker, *Binning* og *Triangulation*. *Triangulation* er en interpolasjonsteknikk hvor punkter blir knyttet sammen med linjer som former et nettverk av trekant mellom de nærmeste punktene [9]. *Binning* er en interpolasjonsteknikk hvor området blir delt inn i celler av en brukerbestemt cellestørrelse. Deretter blir cellens høydeverdi beregnet ved bruk av to ulike teknikker, *Cell Assignment Type* og *Void Fill Method*.

*Cell Assignment Type* beregner cellens høydeverdi basert på LiDAR-data som er innenfor cellens grenser. De ulike alternativene for dette er gjennomsnittlig verdi, maksimumsverdi, minimumsverdi eller interpolering. Interpolering kan gjøres ved å interpolere celleverdien med vektning av punktene i cellen sin avstand til cellens midtpunkt, eller ved å interpolere mellom punktene i cellen og velge verdien som ligger nærmest cellens midtpunkt.

*Void Fill Method* beregner cellens høydeverdi basert på nabocellers verdi for celler som ikke inneholder LAS-data. De ulike metodene dette kan gjøres på er *None*, *Simple*, *Linear* og *Natural\_Neighbor*. *None* gir ingen verdi til cellen. *Simple* beregner gjennomsnittsverdien av omkringende celler for å unngå små tomrom. *Linear* triangulerer over tomrom og bruker lineær interpolasjon på den triangulerte verdien for å bestemme celleverdien. *Natural\_Neighbor* interpolerer celleverdien ved å bruke verdiene til nabocellene.

## 2.7 HEC-RAS 5.0

HEC-RAS er en programvare utviklet av U.S. Army Corps of Engineers. Programvaren kan utføre endimensjonal stasjonær strømning, en- og todimensjonal ikke-stasjonær strømning, endimensjonal sedimenttransport og kvalitetsanalyse av elvevann. I dette prosjektet benyttes HEC-RAS 5.0.7 utgitt mars 2019. I følgende underkapitler beskrives grunnleggende prinsipper for todimensjonal modellering i HEC-RAS. For mer utfyllende teori, se *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0* [5].

### 2.7.1 Beregningsnett

I HEC-RAS vil de todimensjonale beregningene være avgrenset med et 2D strømningsområde (kalt 2D Flow Area i HEC-RAS), hvor et beregningsnett med forbundne celler konstrueres. Hver celle har et definert senterpunkt, referert til som cellesenter, hvor cellens vannoverflatehøyde beregnes. En celle kan ha opptil åtte sider, referert til som cellesider, som er forbundet via cellepunkt på endene.



HEC-RAS bruker en metode for *sub-grid* terrengrepresentasjon som betyr at høyoppløselige topografiske data representeres uten bruk av like høy oppløsning på beregningsnett. Cellene i beregningsnett inneholder ekstra informasjon slik som hydraulisk radius, volum og forholdet mellom høyde og areal. Ved simulering vil en forbehandling av dataene gjennomføres hvor hydrauliske tabeller med denne informasjonen blir opprettet. Hver cellediagonale blir behandlet som egne tverrsnitt, slik at detaljer i terrenget blir representert. For hver celle vil forholdet mellom høyde og volum regnes ut, basert på overflatens tverrsnitt.

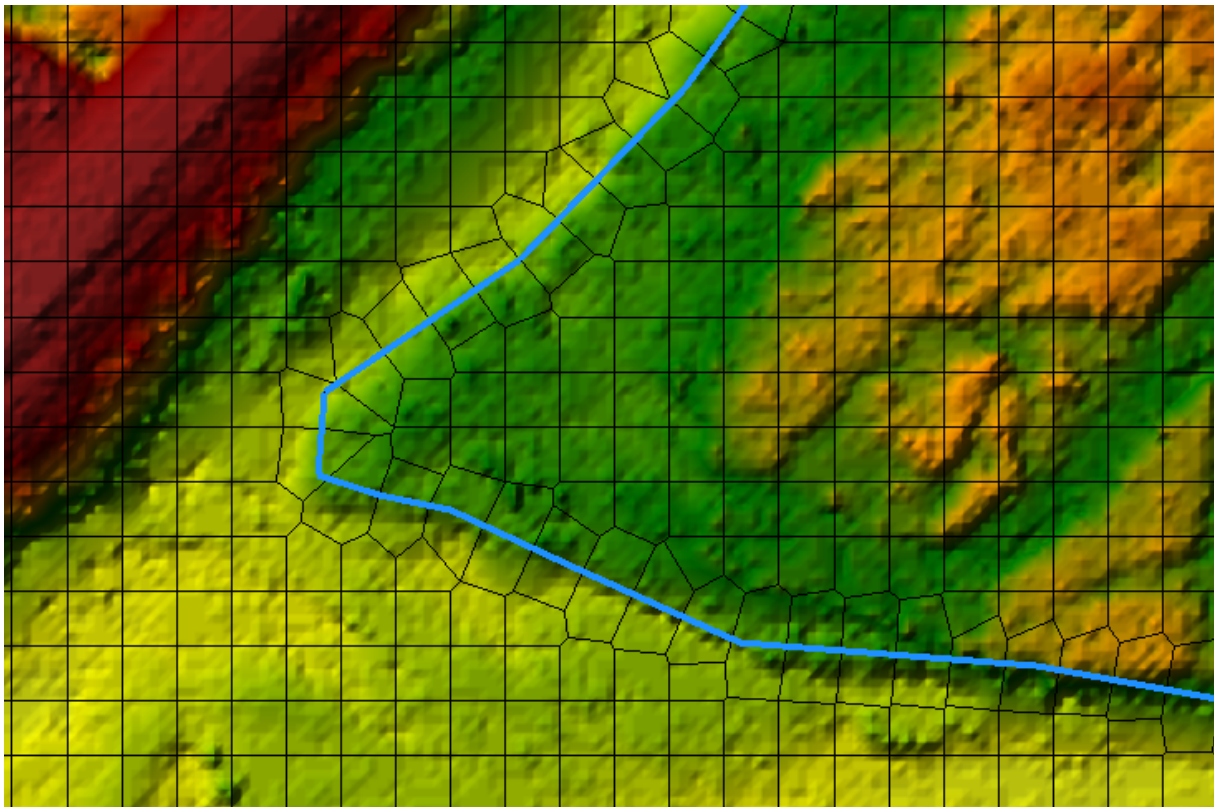
HEC-RAS kan bare skape et 2D uniform beregningsnett som vil si kvadratiske eller rektangulære celler, med unntak av celler langs bruddlinjer eller grenselinjer. En ulempe med uniform beregningsnett er at alle cellene er i samme størrelse. HEC-RAS genererer ikke celledimensjonen automatisk etter endringer i terrenget, og vannoverflatens høyde representeres kun av én verdi i celledimensjonen. Med større celler vil det si at avstanden er større mellom beregnede vannoverflatehøyder, og dette må tas hensyn til ved valg av celledimensjon. For eksempel i områder med lite endring i terrenget er det kun nødvendig med celler som reflekterer disse endringene (store celler). I områder hvor det er hyppige endringer av terrenget eller små elveløp og strømmer er det nødvendig med mindre celler som representerer disse detaljene. Foreløpig må slike justeringer endres manuelt med enten justerte regioner eller bruddlinjer. Omtalt henholdsvis i delkapittel 2.7.3 og 2.7.2.

HEC-RAS genererer beregningsnett automatisk etter brukerbestemt størrelse, men cellene har ulike betingelser for at beregningsnett skal fungere optimalt. Disse betingelsene kan føre til problemer ved generering av beregningsnett [3]. Disse problemene kan være:

- Skarpe kanter i grenselinjen kan føre til at algoritmen i HEC-RAS ikke klarer å forme et korrekt beregningsnett for dette området. Dette løses ved å legge til flere celler i problemområdet, eller legge til flere punkter for en glattere grenselinje.
- For mange sider i en celle. En celle kan ha maksimalt åtte sider. Dette løses ved å legge til flere celler, flytte eller slette eksisterende celler.
- Duplikate celledimensjoner. Dette skjer om to celledimensjoner er for tett eller ligger over hverandre. Løsningen er å slette en av cellene.
- Celledimensjoner ligger utenfor beregningsnett. Løsningen er å slette denne cellen.
- Celler med kollinear sider (de danner en rett linje). To sider av samme celle kan ikke forme en rett linje. Der hvor to celler møtes, må vinkelen på utsiden formet av de to cellene være større enn 180 grader. Dette problemet kommer som regel av at to bruddlinjer ligger parallelt eller for tett på hverandre. Dette problemet kan løses på flere måter, men den enkleste løsningen er å endre maksimumstørrelsen på cellene langs bruddlinjen.

## 2.7.2 Bruddlinjer

Bruddlinjer (kalt *2D Area Break Lines* i HEC-RAS) er linjer som legges til innenfor beregningsnett for å manipulere cellene i dette området. Bruddlinjer kan enten tegnes manuelt i geometrien eller importeres fra *shape*-filer. De kan ha flere funksjoner som blant annet å styre retningen eller vinkelen på cellene. Celledimensjonen kan også justeres og dermed øke nøyaktigheten av beregningene i områder av stor interesse eller i områder hvor det er naturlige hinder slik som terskel eller elvebanker, se Figur 4.

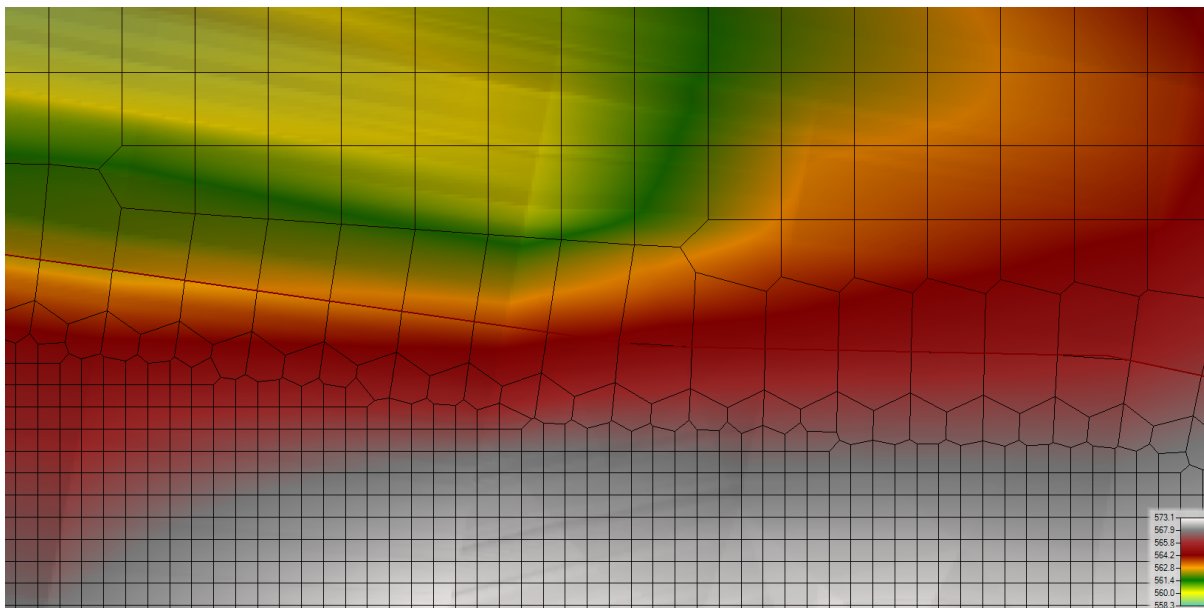


**Figur 4:** Utsnitt av 2D beregningsnett i HEC-RAS hvor bruddlinjen (blå) er tegnet rundt en elvebank for å styre vannet i riktig retning.

### 2.7.3 Justerte regioner

*Refinement Regions*, heretter referert til som justerte regioner, er brukt til å modifisere cellestørrelsen i et 2D område. De justerte regionene kan øke eller minke tettheten til beregningspunktene [6]. Dette vil si at de kan brukes til å øke tettheten til celler i områder med hurtige endringer i form av terreng eller vannoverflatehøyde. Områder kan også forenkles ved å minke tettheten for å redusere antall beregningspunkt i modellen. Redusert antall beregningspunkt i modellen fører til kortere simuleringstid.

Grenselinjen til et slikt område fungerer som en bruddlinje i form av at den interpolerer cellestørrelsen fra grensen til cellene i beregningsnettet slik at en gradvis overgang av størrelsen på cellene oppnås. Dette skjer på begge sider av grenselinjen [3], se Figur 5.



**Figur 5:** Utsnitt av 2D beregningsnett i HEC-RAS hvor grenselinjen til en justert region viser endring av cellestørrelse på begge sider.

#### 2.7.4 Manglende data for batymetrien

En detaljert og korrekt terrengmodell er avgjørende for å kunne lage en nøyaktig hydraulisk modell. Kvaliteten til terrengmodellen kan være en begrensende faktor for kvaliteten til den hydrauliske modellen som brukeren skal konstruere [3].

Det ble tidligere informert om at TerraTec ikke leverte LiDAR-data under seks meter under vannoverflaten. Resultatet av dette er at batymetrien mangler i de dypeste områdene av elva (deriblant de fire sjøene) som vises i vedlegg D. Batymetrien må derfor konstrueres manuelt i HEC-RAS.

De geofysiske prosessene som former innsjøen er det samme som de geofysiske prosessene som former topografien omkring denne innsjøen [10]. Det er derfor rimelig å anta at helningen til topografien rundt innsjøen er tilnærmet lik helningen av batymetrien. Ved å studere lignende sjøer i form av topografi, form og arealflate, i tillegg til helningen av topografien av den gjeldene sjøen, gir dette et grunnlag for å estimere batymetrien. Data er hentet fra både dybdekart.no og atlas.nve.no.

#### 2.7.5 Mannings $n$

Mannings  $n$  er en ruhetskoeffisient som brukes til å forutsi graden av ruhet i elver. Valg av en passende verdi er viktig for nøyaktigheten til den simulerte vannføringen [4]. Som standard settes en enkeltverdi for alle celler i beregningsnettet når 2D området blir laget. Ved kalibrering av modellen vil denne verdien kunne overstyres ved å definere egne polygoner med Mannings  $n$ -verdier for å skape en egen *shape*-fil i *RAS Mapper*-vinduet. I tidligere versjoner av HEC-RAS kunne Mannings  $n$ -verdien bare bli endret for flere områder av modellen ved å importere *shape*-filer eller et såkalt *Land Cover layer*. Prosessen er nå mye enklere og mer fleksibel.

## 2.8 Ligninger for 2D ikke-stasjonær strømning

I dette delkapittelet følger en kort oppsummering av beregningsgrunnlaget for todimensjonal ikke-stasjonær strømning i HEC-RAS. For en mer detaljert innføring, se *HEC-RAS 5.0 Hydraulic Reference Manual* [3].

Navier-Stokes-ligningene beskriver bevegelsen av væsker i tre dimensjoner, men for todimensjonal modellering i HEC-RAS er ligningene forenklet. Disse ligningene er kalt gruntvannsligningene og har følgende forutsetninger: inkompressibel strømning, hydrostatisk trykk (vertikal akselerasjon neglisjeres), turbulens er tilnærmet ved bruk av eddy viskositet og vertikal lengdeskala er mye mindre enn horisontal lengdeskala (vertikale hastigheter er små og kan neglisjeres).

Innenfor HEC-RAS er *Diffusion Wave* satt som standard. Generelt anbefales det å bruke *Diffusion Wave* under utviklingen av modellen til den fungerer optimalt. Når modellen er ferdig bør ligningen skifte til *Full Momentum* som generelt trenger mindre tidssteg for å kjøre stabilt. Ved store forskjeller mellom disse antas det at *Full Momentum*-resultatet er mer korrekt [3].

### 2.8.1 Kontinuitetsligning (*Mass Conservation*)

Ved å anta inkompressibel strømning kan bevaring av masse uttrykkes ved kontinuitetsligningen i to dimensjoner:

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

Hvor  $t$  er tid,  $H$  er vannoverflatehøyde,  $h$  er vanddybde,  $u$  og  $v$  er gjennomsnittshastighet (i forhold til dybde) i henholdsvis x- og y-retning,  $q$  er en representasjon av innstrømning fra eksterne kilder (for eksempel vann fra infiltrering, fordampning eller nedbør).

### 2.8.2 Bevegelsesligningene (*Momentum Conservation*)

Bevegelsesligningene er avledet fra Newtons 2. lov, bare anvendt på væsker. Når vertikal lengdeskala er mye mindre enn horisontal lengdeskala, impliserer volumbevaring at den vertikale hastigheten er liten. I tillegg har bevegelsesligningene følgende forutsetninger: hydrostatisk trykk, uniform tetthet, Reynold-midling og tilnærming av turbulens ved hjelp av eddy viskositet. Bevegelsesligningene kan uttrykkes som følgende:

x-retning:

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

y-retning:

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

hvor

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

Hvor  $u$  og  $v$  er hastigheten i x- og y-akse i det horisontale planet.  $g$  er tyngdeakselerasjonen,  $\nu_t$  er den horisontale eddyviskositetskoeffisienten,  $c_f$  er friksjonskoeffisienten,  $f$  er Coriolis parameteret,  $|V|$  er størrelsen på hastighetsvektoren og  $R$  er hydraulisk radius.

### 2.8.3 Diffusiv bølge (*Diffusion Wave*)

For tilfeller hvor tyngdekraft og friksjon antas å være de dominerende kreftene som virker på væsken, kan bevegelsesligningene forenkles ved å neglisjere akselerasjon, coriolis effekt og eddy viskositet. En forenkling av bevegelsesligningene i den klassiske formen, gir:

$$V = \frac{-(R(H))^{3/2}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}} \quad (5)$$

Hvor  $V$  er hastighetsvektor,  $R$  er hydraulisk radius,  $\nabla H$  er (vann)overflatehøyde gradient og  $n$  er Mannings  $n$ . Direkte substitusjon av ligning 5 inn i kontinuitetsligningen 1 og skrive denne på vektorform gir diffusiv bølge tilnærmingen av gruntvannsligningene:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (6)$$

hvor

$$\beta = \frac{(R(H))^{5/2}}{n|\nabla H|^{1/2}} \quad (7)$$

## 2.9 Tidssteg

Det er viktig å velge en passende størrelse for cellene i beregningsnettet samt tidssteg for beregning. Spesielt tidssteg er en av de viktigste parameterene som blir lagt inn i modellen. Tidssteget bør være lite nok til å korrekt kunne beskrive endringene av hydrografen som blir simulert, hvis ikke vil modellen få konvergensproblemer under simuleringen [3]. Valg av tidssteg er en funksjon av cellestørrelsen og hastigheten av strømmingen som beveger seg gjennom denne cellen. HEC-RAS har to ligningssett for dette. Følgende er retningslinjer for valg av tidssteg avhengig av valg av ligningssett:

Bevegelsesligningene:

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \text{ (maks } C = 3.0) \quad (8)$$

Eller

$$\Delta T \leq \frac{\Delta X}{V} \text{ (} C = 1.0) \quad (9)$$

Hvor  $C$  er Courant nummer,  $V$  er vannhastighet,  $\Delta T$  er tidssteg i beregningene og  $\Delta X$  er gjennomsnittlig cellestørrelse.

Diffusiv bølge:

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 2.0 \text{ (maks } C = 5.0) \quad (10)$$

Eller

$$\Delta T \leq \frac{2\Delta X}{V} \text{ (} C = 2.0) \quad (11)$$

Disse ligningene brukes ved å finne områdene med høyest hastighet og hurtige endringer i vannoverflate og hastighet. Kjører modellen for første gang, må en makshastighet estimere. Så velges gjennomsnittlig cellestørrelse i disse områdene. Etter dette velges et tidssteg  $\Delta T$  slik at Courant nummer  $C$  er lik det foreslåtte nummeret i ligningene over. Ved ulike tilfeller kan simuleringen klare seg med  $C=3$  for bevegelsesligningene og  $C=5$  for diffusiv bølge. I det tilfellet at 2D området starter helt tørt må det brukes et tidssteg basert på et Courant nummer mindre eller lik 1.

## 2.10 Vurdering av simulert data

Vurdering av simulert vannføring kan bli gjort på to måter; ved visuell verifikasjon eller ved utregning av  $NSE/R^2$ . Ved visuell verifikasjon blir ortofoto tatt av TerraTec for dagene 22. til 24. mai 2018 brukt. Disse sammenlignes med dekningsgraden til vannføringen under en simulering. For simuleringen vil data fra Lyse Produksjon bli brukt til inndata.

Nash-Sutcliffe effektivitet (NSE) blir brukt for å vurdere hvor godt resultatet av den simulerte vannføringen er sammenlignet med den virkelige vannføringen i elva. NSE kan også gå under navnet Nash-Sutcliffe forklart varians  $R^2$ . NSE kan variere fra  $-\infty$  til 1, hvor 1 tilsvarer et perfekt forhold mellom modellert og observert vannføring (ingen feil). NSE lik null betyr at modellert vannføring er like nøyaktig som gjennomsnittet av observert vannføring. NSE mindre enn null oppstår når det observerte gjennomsnittet kan forutsi vannføringen bedre enn modellen, som er en uakseptabel ytelse av modellen. NSE er kalkulert som:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (12)$$

Hvor  $Q_m^t$  er modellert vannføring ved tid  $t$ ,  $Q_o^t$  er observert vannføring ved tid  $t$ ,  $\bar{Q}_o$  er gjennomsnittlig observert vannføring og  $T$  er total antall observasjoner.



### 3 Metode

Dette kapitlet inneholder informasjon om metodene som er blitt brukt i prosjektet. Hva som er blitt gjort er skrevet i detalj slik at leserne av denne rapporten kan benytte samme fremgangsmåte hvis ønskelig.

En vurdering av tidsforsinkelsen av vannet i elva i tillegg til minstevannføring er utført i Excel. Videre i kapitlet blir det beskrevet hvordan LiDAR-data i form av komprimerte LAZ-filer omgjøres til inndata i et format HEC-RAS støtter, gjennom bruk av LAsTools og ArcMap. Til sist blir modelloppsettet for Årdalselva i HEC-RAS beskrevet.

I Tabell 1 er spesifikasjonene til datamaskinen som er brukt under prosjektet oppført. HEC-RAS og ArcMap vil begge ha problemer med å kjøre hvis noen av innstillingene ikke er korrekt satt på datamaskinen. *Region* må være *English (United States)* og dato- og tid må være i formatet *h:mm:ss tt*.

**Tabell 1:** Spesifikasjoner til datamaskinen brukt under prosjektet.

Komponent	Informasjon
OS	Windows 10 Home 64-bit
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-9400 CPU @ 2.90GHz
RAM	8.0GB
GPU	AMD Radeon R9 390
Harddisk	2TB Seagate ST2000DM006 (SATA)

#### 3.1 Vurdering av tidsforsinkelsen av vannet om vinteren

En vurdering av tidsforsinkelsen av vannet om vinteren er hovedsakelig basert på vannføringsdata fra målestasjonen Kalltveit i Årdalselva. Siden strekningen fra Breiavatnet til målestasjonen er ca. 19 km lang, er ulike forbehold nødvendig. Disse forbeholdene er listet nedenfor:

- Vannføringen fra Lynsåna bør være konstant. Differansen mellom største og minste vannføring går ikke over  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dette er fordi stor og/eller varierende vannføring fra Lynsåna har en større påvirkning av vannføringen ved målestasjonen da Lynsåna sammenflettes med Årdalselva ca. 5 km unna målestasjonen. I tillegg er denne strekningen roligere da den ikke inneholder fosser eller sjøer som den første strekningen av elva.
- Det må være en stor nok differanse i tappingen mellom to timer, helst større enn  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , slik at denne hyppige endringen vises på vannføringen ved målestasjonen.
- Konstant vanntemperatur og lufttemperatur.
- Hvis mulig; ingen nedbør i tidsrommet eller dagen før. Nedbør vil endre vannføringen i elva.

Ut i fra disse forbeholdene er data analysert og det er funnet tre serier hvor tidsforsinkelsen vises med god margin. Dette resultatet ligger i delkapittel 4.1.

#### 3.2 Vurdering av minstevannføring

En vurdering av minstevannføringen av vannet i Årdalselva gjøres hovedsakelig ved å analysere data i Excel. Det første som må gjøres er å slette de periodene med data som har støy, eksempelvis



datapunkter med verdien -9999. For å kunne trekke sammenheng med minstevannføring og klima, må det være korrekt data fra alle faktorer som påvirker vannføringen i elva. Dette er lufttemperatur, tapping av vann fra Breiavatnet, vannføring fra Lysåna og nedbør. Vanntemperatur er hovedsakelig viktig for analysen av vintersesongene. Lufttemperatur er en viktig faktor som ikke er inkludert i datasettet fra Lyse Produksjon. Denne dataen må hentes fra senorge.no. På denne nettsiden velges først målestasjonen Kalltveit i Årdal. Her hukes lufttemperatur av under *Stasjoner*. Under *tidsperiode* skrives ønsket dato inn, og under *visning* kan dataene vises som enten graf eller tabell. Det finnes flere mulige måter å eksportere dataene over til Excel. Her ble det valgt å kopiere tallene som tekst, for så å bruke *tekst til kolonne* funksjonen i Excel. For å finne minstevannføringen uten å se igjennom all data time for time, ble funksjonen *marker celler mindre enn* brukt. Her er det viktig å skille mellom sommer og vinter siden det er to forskjellige krav for vannføringen. For sommeren (15.05-14.10) er kravet for minstevannføring  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$  og for vinteren (15.10-14.05) er kravet for minstevannføring  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

For hver periode hvor vannføringen går under kravet om minstevannføring, ble det regnet ut varighet og gjennomsnittsverdier for alle faktorene som påvirker elva. Oppsummeringen av dette resultatet ligger i delkapittel 4.2.

### 3.3 Vurdering av 1D vs 2D modell

Før oppsettet av HEC-RAS modellen kan gjøres, må det vurderes om modellen skal settes opp som en endimensjonal (1D) eller todimensjonal (2D) hydraulisk modell og hvilke områder denne modellen skal dekke. I *HEC-RAS 2D Modeling User's Manual* [3] side 6-3 og 6-4 er fordeler med både 1D- og 2D-modellering listet. Kun relevante punkter blir nevnt videre. For dette prosjektet er det kun nødvendig med en modell som dekker delen av elva fra Breiavatnet til målestasjonen Kalltveit for å simulere tidsforsinkelsen av vannet.

En 2D modell gir bedre resultat i elver med mye forgreininger og elvebanker. Spesifikt er 2D bedre enn 1D til å modellere vannføring i flere retninger og ulike hastigheter. I Årdalselva er det flere områder hvor vannføringen forgreiner seg. Det er også flere mindre elvebanker og en bred elvebank ved innløpet til Viglesdalsvatnet.

Forskjellen er stor for beregningstiden til de to modellene [2]. Ved en sammenligning av modelltypene for samme område kommer 1D best ut. 1D modellen utførte en simulering for en måneds-lang periode, på under ett minutt, mens 2D modellen brukte flere timer på en simulering for noen dager. Likevel hadde 2D modellen mindre stabilitetsproblemer enn 1D modellen.

En 2D modell har fordeler når LiDAR-datasettet fra TerraTec skal gjøres komplett ved manglende data. En 1D modell kan ikke interpolere elvebatymetrien direkte i HEC-RAS, men det kan en 2D modell.

Med dette tatt i betrakning, i tillegg til erfaring med 2D modellering, er det besluttet å modellere Årdalselva i 2D.

### 3.4 LAStools (LAZ til LAS)

LiDAR-dataene som ble levert av TerraTec AS var overført på filformatet LAZ. For at de skal kunne leses av ArcMap må de dekomprimeres til filformatet LAS. Dette ble gjort i LAStools-verktøyet kalt las2las. Laserdataene som er levert er klassifisert i programvaren TerraScan/TerraModeler og står oppført i rapporten til TerraTec. Til modellen i dette prosjektet er kun klassifisering 2 (terreng) og 26 (elvebunn) nødvendig. De andre klassifiseringene blir ekskludert før neste steg. Dette kan også gjøres senere i ArcMap, men er en mer komplisert prosess. Det er også en fordel at unødvendig data fjernes med en gang for å minke filstørrelsen.

Etter programmet las2las er åpnet, velges LAZ-filene som skal dekomprimeres under *browse*. Under *filter* og *by classification or return* velges *keep\_classification*. I boksen for *number or value* skrives det inn 2 og trykkes *Add*. Det samme gjøres for nummer 26. Huk av for *merge files into one* som samler alle LAZ-filene i en LAS-fil. Deretter velges hvilken mappe LAS-filen skal bli lagret i under *output* og navngir filen. Til slutt velges *LAS* under *format* og *RUN64* hvis datamaskinen har et 64-bit operativsystem.

### 3.5 LAS til ArcMap

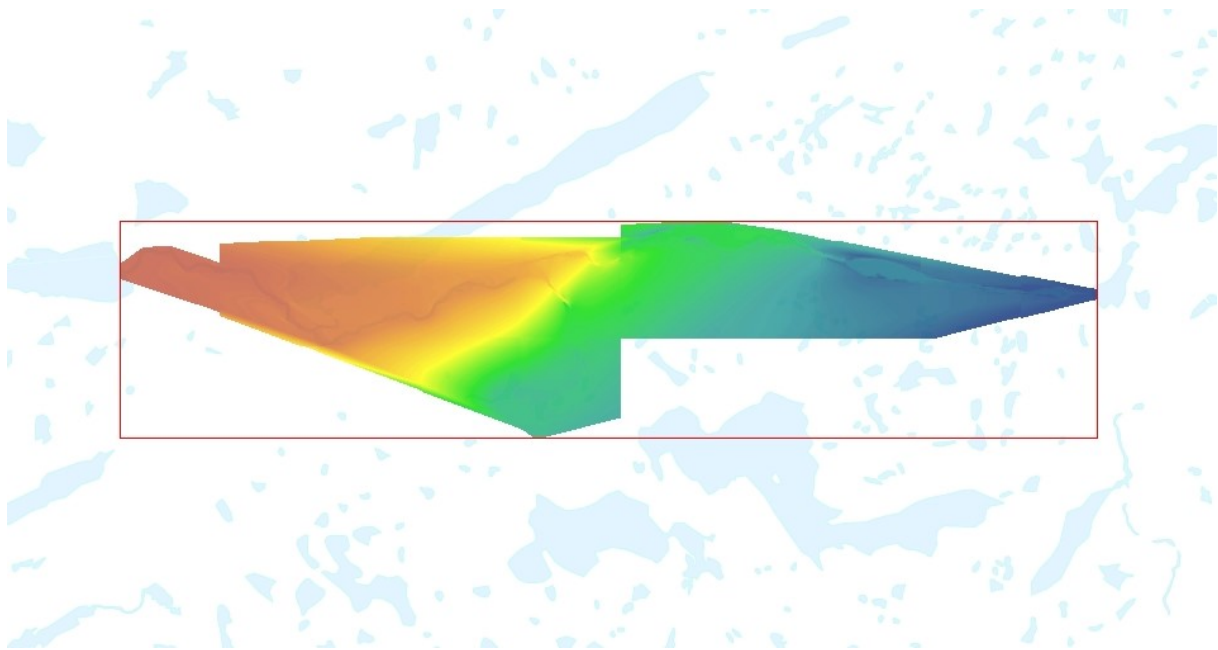
Etter konverteringen av LAZ-filene til LAS-format kan neste steg startes i ArcMap. *Connect to folder* velges under *Catalog* og her velges den mappen hvor LAS-filen ligger. Høyreklikk på mappen og velg *New* for så å velge *Las Dataset*. I noen tilfeller må mappen oppdateres ved å høyreklikke på mappen og velge *refresh*. Høyreklikk så på *Las Dataset* som nettopp er blitt laget og trykk på *Properties*. Under *Files* trykk på *Add files* og velg LAS-filen som skal brukes. Under *XY Coordinate System* kan *ETRS 1989 UTM Zone 32N* velges eller søkes opp. Dette er koordinatsystemet for Europa som blir brukt under dette prosjektet.

Nå skal *Las Dataset*-filen transformeres til en raster. Søk opp og velg *Las Dataset to Raster*. Et nytt vindu vil komme opp hvor ønsket fil velges under *Input LAS Dataset*. Velg ønsket mappe- og filnavn til den nye raster-filen under *Output Raster*. Under *Value Field* velges *ELEVATION*. Under *Interpolation Type* velges *Binning* hvor det påfølgende velges *AVERAGE* under *Cell Assignment Type* og *NATURAL\_NEIGHBOR* under *Void Fill Method*. De ulike interpolasjonsmetodene gir svært like og gode resultatet, men det anbefales å benytte interpolasjonsmetoden *Binning* hvor *Void Fill Method* og *NATURAL\_NEIGHBOR* gir lavest gjennomsnittlig avvik og median [14]. Denne metoden er derfor valgt fordi den har lavest tid- og plass-kompleksitet.

Under *Output Data Type* velg *Float* og under *Sampling Type* velg *Cellsize*. Under *Sampling Value* skal cellestørrelsen til rasteren bestemmes. En raster med mindre cellestørrelse vil være mer detaljert enn en med større cellestørrelse, men den vil også ha ulempen med at behandlingstiden blir lengre. I dette prosjektet er det viktigere med en mer detaljert modell så først ble en raster med 1x1 m cellestørrelse laget. Skriv inn 1 under *Sampling Value* og la 1 stå under *Z Factor*. Selve prosessen med å lage en raster tar lang tid.

En raster med cellestørrelse 1x1 m funket, men i dette prosjektet er det ønskelig med en mindre cellestørrelse hvis mulig. En raster med cellestørrelse 0.5x0.5 m er derfor fordelaktig. Gjør samme steg som beskrevet over, men skriver 0.5 under *Sampling Value*. Denne cellestørrelsen produserte en detaljert raster, så videre i prosjektet vil denne rasteren bli brukt. Den ferdige rasteren av Årdalselva vises i Figur 6 hvor rasteren går fra utløpet av Breiavatnet til munningen av elva i Årdalsfjorden ved Årdal.

Etter rasteren er laget, må rasteren lagres og eksporteres slik at filen har TIFF-format og kan brukes i

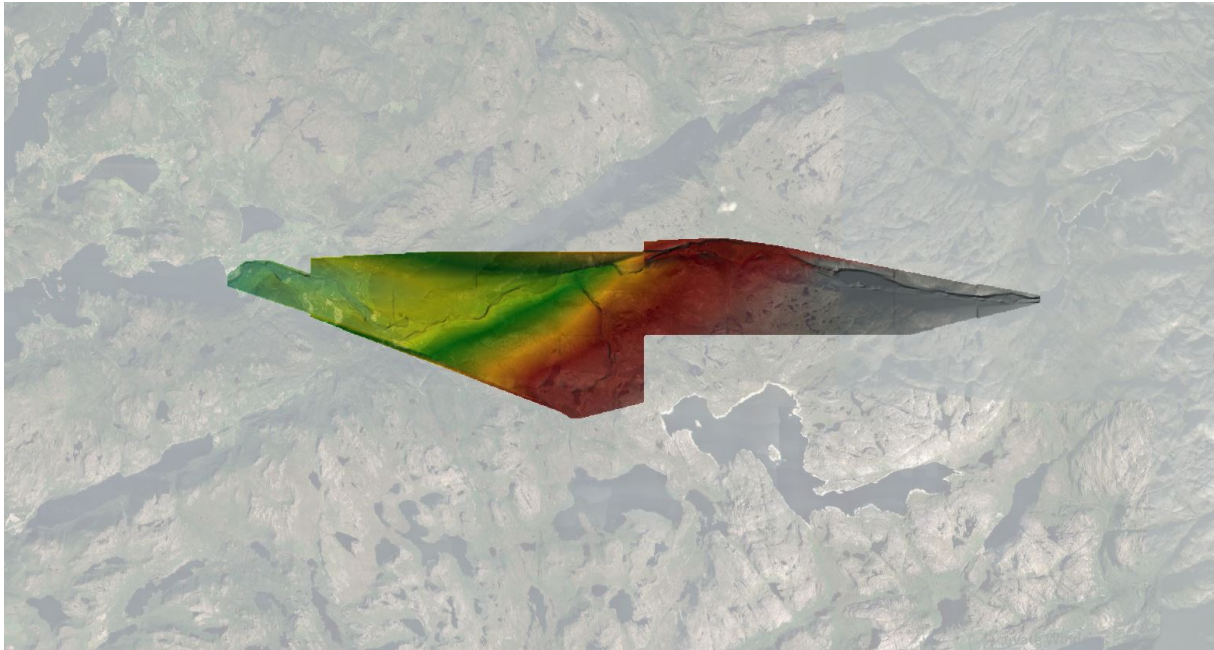


**Figur 6:** Utsnitt fra ArcMap som viser rasteren for Årdalselva.

HEC-RAS. Under *Table of contents* og *Layers* er rasteren listet. Høyreklikk og gå videre til *Data* og velg *Export data*. Nå vil et nytt vindu komme opp. Velg her *Raster Dataset* under både *Extent* og *Spatial Reference*. På *Location* velges hvilken mappe som filen skal lagres i, og under *Name* navngis filen. På *Format* velg *TIFF* og *Compression Type* er *None*. De resterende valgmulighetene er uendret. Viktig å trykke *Save*.

### 3.6 HEC-RAS

Etter åpning av programmet bør *Unit System* endres til *System International/Metric* under *Options*. Det første som må gjøres er å sette koordinatsystemet til prosjektet. Gå til *RAS Mapper*-vinduet hvor *Set Projection for Project* ligger under *Tools*. For *ESRI Projection File* velges filen som ble laget av ArcMap. Trykk *Apply* og *OK*. Under *Tools* igjen vil det nå kunne legges til en terrengfil, altså den rasteren som ble laget i ArcMap. Trykk på pluss-tegnet her, velg ønsket fil og *Open*. Verdien  $1/32$  velges for *Rounding*, som vil si at programmet runder av til nærmeste 0.03125 m. Ønskes høyere presisjon velges det en lavere verdi, for eksempel  $1/128$ . *Use Input File* og *Create Stitches* er standardvalg for programmet. Deretter velges et filnavn og *Create* trykkes. Terrenget kommer nå listet opp til venstre i *RAS Mapper*. For visningsinnstillinger, høyreklikk og gå til *Image display properties*. Her kan blandt annet farger, hvor transparent terrengfilen skal vises, eller for eksempel *Plot Contours* som plottes konturene i terrenget for valgt intervall, velges. En nyttig valgmulighet her er *Update per Screen* under *Surface*. Da vil fargen for høydeprofilen oppdatere seg kontinuerlig, som medfører at det blir lettere å se endringene i terrenget. For å se om elven er riktig plassert er det gunstig å åpne et satellittbilde av området. Gå da til *Tools*, videre til *Add Web Imagery* og velg *Google Satellite*. Nå vil terrenget i området til elva vises. Figur 7 viser en transparent terrengfil med Google satellittbilde som bakgrunn.

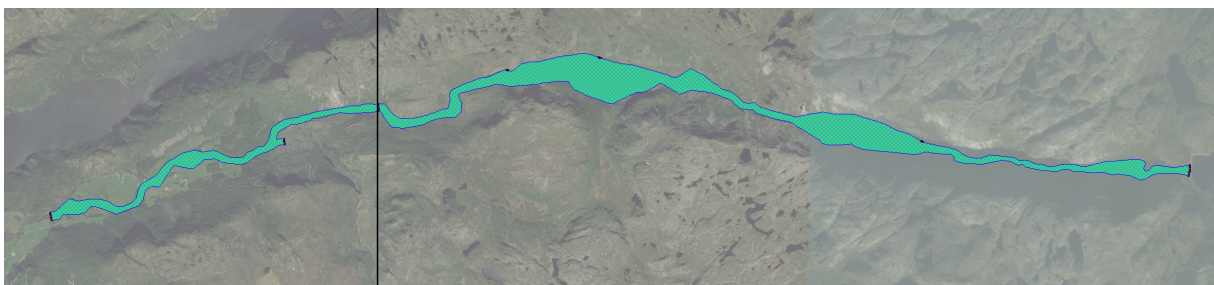


**Figur 7:** En transparent terrengfil med Google satelittbilde som bakgrunn.

I *Geometric Data*-vinduet må den nye terrengfilen velges som bakgrunn for å kunne vises. Dette gjøres ved å trykke på *Select layers to view in background* og velg ønsket terreng. Geometrifilen må navngis og lagres under *File*. Og det samme må gjøre for prosjektfilen i hovedvinduet.

### 3.6.1 Beregningsnett

Det ble valgt å dele 2D-området i to deler siden modellen skal strekke seg fra Breiavatnet til målestasjonen Kalltveit, hele 19 km. Dette forenkler tegneprosessen. Første del består av alle sjøene og fossene, og andre del består av den roligere delen av elva som sammenflettes med Lyngsåna, se Figur 8.



**Figur 8:** Beregningsnett for både del 1 og del 2 av modellen. Til høyre vises del 1 og til venstre vises del 2.

2D områdene tegnes i *Geometric Data*-vinduet. Ved å trykke på *2D Flow Area* gis det mulighet til å bruke tegneverktøy. Dobbelklikk når området er ferdig tegnet, og et vindu hvor 2D-området navngis dukker opp. Ved et høyreklikk på 2D-området og *View Options* vil et nytt vindu dukke opp hvor *Fill in Storage Areas/2D Flow Areas* er huket av som standard. Dette er greit for å se over om 2D-området faktisk dekker hele elva, men *2D Flow Areas Cell Points* velges for å kunne se terrenget under.

For å generere et beregningsnett, venstreklikk på 2D området og *Edit 2D Flow Area* kommer opp som et alternativ. Her kan *Default Mannings n Value* velges til 0.03. Dette er en standardverdi som senere vil bli endret på. Under *Generate Computation Points on Regular Interval with All Breaklines* bestemmes det hvilken avstand punktene i beregningsnettet skal ha. *Spacing DX* og *Spacing DY* fylles begge ut til 3.0 da det er ønskelig med 3x3 meter cellestørrelse for denne modellen. Trykk så på *Generate Points in 2D Flow Area* og *Force Mesh Recomputation*. Nå vil beregningspunktene genereres for hele 2D området med gitt cellestørrelse. Hvis cellebetingelsene beskrevet i underkapittelet 2.7.1 ikke er møtt, vil disse cellene vises som røde prikker i *Geometric Data*-vinduet. Dette kan endres som beskrevet tidligere med valgene under *Edit*. Lagre geometrifilen med et navn under *File*. I *Geometric Data*-vinduet må filen alltid lagres etter endringer er gjort. Det er også viktig å ikke ha både *RAS Mapper*- og *Geometric Data*-vinduet åpne samtidig.

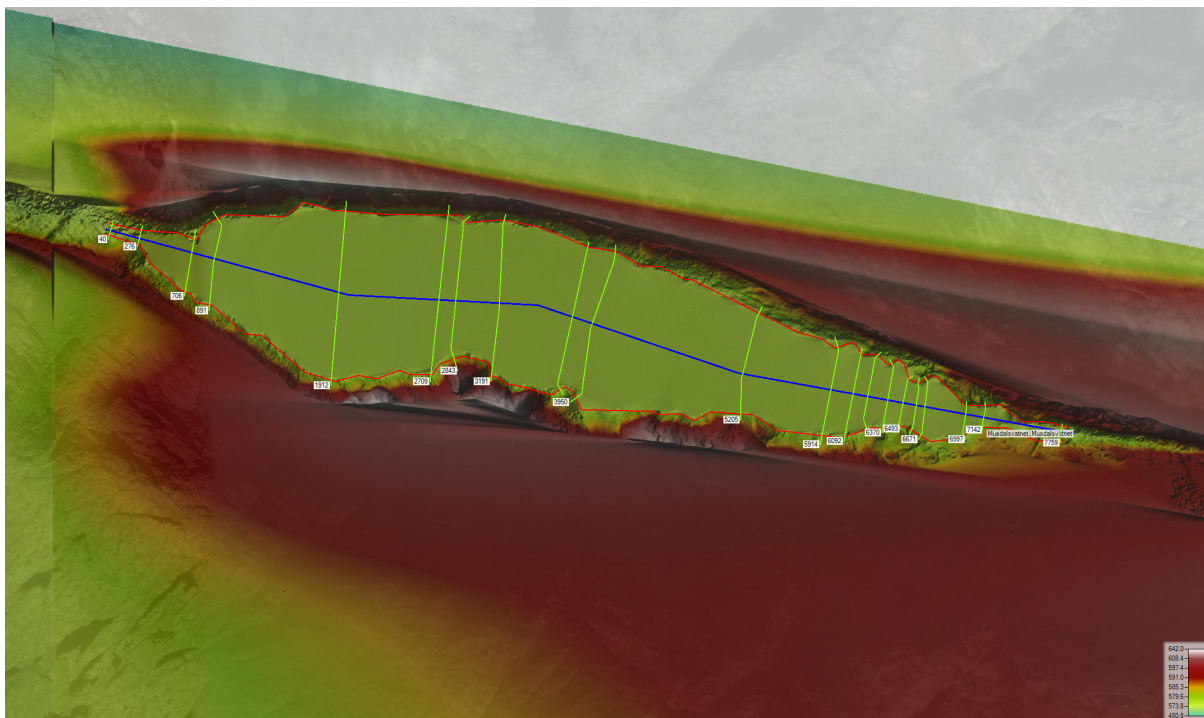
I senere tid ble det forsøkt å binde de to 2D områdene sammen ved hjelp av *SA/2D Area Conn* i *Geometric Data*-vinduet. HEC-RAS kan bare binde to 2D områder sammen ved hjelp av en struktur. Dette ble forsøkt ved hjelp av en lavhodedam (*Weir*) mellom grensene til 2D områdene hvor lavhodedammen ble satt til en høyde lik cellene i terrengprofilen. Dette ble gjort ved å kopiere cellehøyden i terrengprofilen over til tabellen i *Weir data*-vinduet. Under en test-simulering oppstod feilmeldinger og forsøket på å koble 2D områdene lyktes ikke.

### 3.6.2 Konstruksjon av manglende batymetri

Tidligere ble det opplyst at TerraTec ikke samler inn data av elvebunnen dypere enn 6 m under vannoverflaten. I vedlegg B vises utsnitt fra alle områdene i modellen som er større enn 50 m og som mangler data. En batymetri må derfor konstrueres manuelt for disse områdene. Områdene under 50 m vil ikke bli endret på fordi de har liten innvirkning på modellen, så lenge det ikke skjer en lekkasje av vann ved disse områdene under simulering.

Under *RAS Mapper*-vinduet, klikk på *Geometries* og *Add New Geometry*. Den nye geometrifilen navngis og vil dukke opp i listen. Huk så av for *Rivers*, høyreklikk og velg *Edit Geometry (BETA)*. Nå skal strømningslinjen (*Centerline*) tegnes for området uten batymetri. For en strømningslinje er det viktig at den følger vannføringen i elva så den bør tegnes etter en antagelse om hvor terrenget er på sitt dypeste. Dobbelklikk når linjen er ferdig og et vindu hvor *River Name* og *Reach Name* skal angis dukker opp. Høyreklikk på *Rivers* igjen, trykk på *Stop Editing* og *Save*. Trykk så på boksen *Bank Lines*, høyreklikk og velg *Edit Geometri (BETA)*. Tegn så elvebanker på begge sidene av strømningslinjen, følg konturen av sjøen eller manglende data og dobbelklikk for å avslutte. Her er det viktig at linjene tegnes i samme retning, som da er nedstrøms. Høyreklikker på *Bank Lines* og trykk *Stop Editing* og *Save*. Nå skal tverrsnitt (*Cross Section*) tegnes. Kryss av boksen for *Cross Sections*, høyreklikk og trykk *Edit Geometry (BETA)*. Det er viktig at hvert enkelt tverrsnitt krysser begge elvebankene og strømningslinjen. Tverrsnitt skal også alltid tegnes fra venstre til høyre i nedstrøms retning, i tillegg til å være mest mulig rettvinklet på alle linjene. Det er også viktig at et tall vises for hvert tverrsnitt som er tegnet. Hvis ikke er ikke dette tverrsnittet lagret. Når alle tverrsnittene er tegnet, høyreklikk på *Cross Sections*, trykk *Stop Editing* og *Save*. I Figur 9 vises et utsnitt av Årdalselva hvor tverrsnitt, elvebanker og strømningslinjen er tegnet for Musdalsvatnet. Alle områdene med manglende batymetri kan bli tegnet i samme fil. For dette prosjektet har totalt 94 tverrsnitt blitt tegnet. I vedlegg C vises alle strømningslinjer, elvebanker og tverrsnitt som er tegnet for hvert område med manglende batymetri.

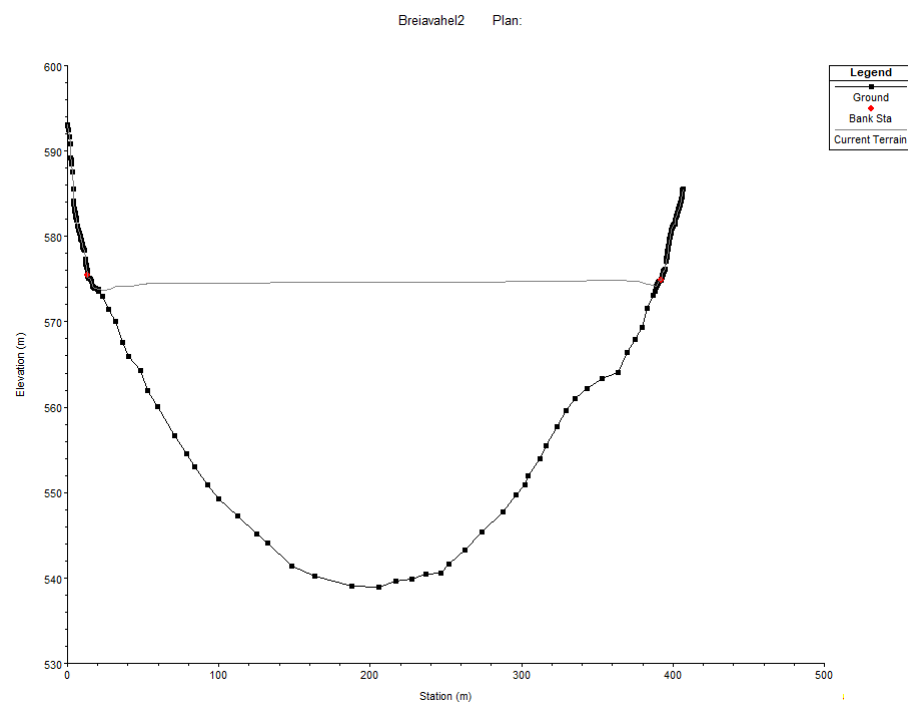




**Figur 9:** Oversiktsbilde av Musdalsvatnet. Her vises strømningslinjen, de to elvebankene og de 21 tverrsnittene som har blitt tegnet for denne sjøen.

Den nye batymetrien vil bli endret som følge av helningen til terrenget rundt i tillegg til en studering av andre sjøer i Norge med likheter til den gjeldende sjøen. De studerte sjøene har likheter i form av terrenget omkring sjøen, arealflate og form. Informasjon og dybde- og terrengkart for disse sjøene ligger i vedlegg D. For å endre på terrenget må *RAS Mapper*-vinduet krysses ut og *Geometric Data*-vinduet må åpnes. Gå til *File*, trykk *Open Geometry Data* og velg den nye geometrifilen som nettopp har blitt lagret. For å se alle punktene for hvert tverrsnitt, trykk på *Cross Section*-bildet. Velg hvilket tverrsnitt som skal vises under *River Station*. Det er to ulike alternativer for hvordan terrenget blir konstruert. Koordinatene til punktene kan endres i tabellen *Cross Section Coordinates* ved å slette og legge til egne punkter. Her er det viktig å trykke på *Apply Data*. Det andre alternativet er å gå til *Jump to the Graphical Cross Section Editor*. Her kan punktene bli endret ved å gå til *Options* og *Delete points* eller *Add sta/elev points*. Alltid trykk *Save Geometry Data* under *File* før *Geometric Data*-vinduet krysses ut.

Figur 10 viser hvordan terrenget har blitt endret for ett tverrsnitt. Den rette linjen viser hvordan terrengdataen fra TerraTec ikke fremstilte terrenget korrekt lavere enn seks meter under vannoverflaten. De punktene som ligger under denne rette linjen er de nye punktene som har blitt tegnet for tverrsnitt nr. 14 fra innløpet av Musdalsvatnet. Av de totalt 94 tverrsnittene som har blitt tegnet, har 85 blitt endret på. Det er altså 9 tverrsnitt som ikke har blitt endret.

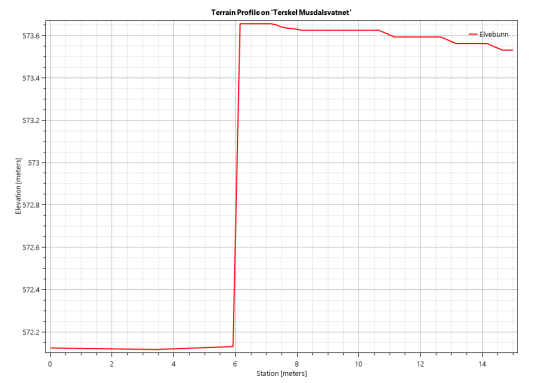
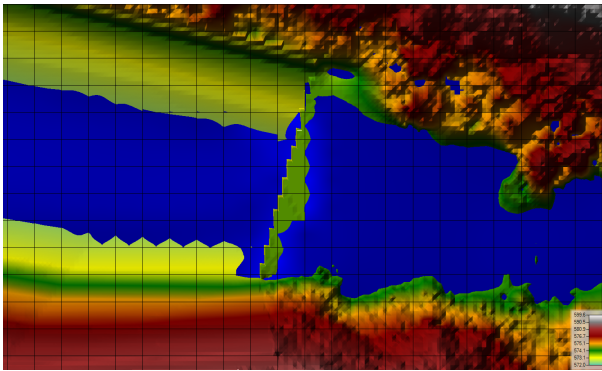


**Figur 10:** Utsnitt av Cross Section-vinduet som viser plottet av terrenget for tverrsnitt nr. 14 fra innløpet av Musdalsvatnet. Den rette linjen uten punkter er hvor terrenget gikk før. Punktene under viser de interpolerte verdiene for terrenget.

Neste steg er å flette sammen det nye terrenget med det gamle. Gå til *RAS Mapper* og det nye terrenget som ligger under *Geometries*. Høyreklikk og gå til *Export Layer*. Her er det to alternativer, enten *Create Terrain GeoTIFF from XS's (Overbanks and Channel)* eller *Create Terrain GeoTIFF from XS's (Channel Only)*. Velges *Overbanks and Channel* vil all data som er fra ende til ende mellom hvert tverrsnitt bli interpolert. Dette er ikke gunstig for dette prosjektet så *Channel Only* blir valgt. Oppløsningen (*raster cell size*) blir valgt til 0.5 m, lik rasteren som ble lagret av ArcMap.

Høyreklikk på *Terrain* i *RAS Mapper*-vinduet og trykk på *Create a New RAS Terrain*. Trykk på pluss-tegnet og velg terrengefilene, både det nylig interpolerte og originalen. Det er viktig at filene står i riktig rekkefølge her, slik at de nye verdiene overstyrer den feilaktige batymetrien. Det nye terrenget står øverst. Velg *Rounding (Precision)* til  $1/32$  som er lik det originale terrenget. Det er mulig å velge en lavere oppløsning for den nye filen, men velges det en høyere oppløsning vil det forårsake problemer. Navngi så den nye terrengefilen og trykk *Create*. For at terrenget skal vises i *Geometric View* må den assosieres med riktig geometri. Høyreklikk på *Terrains* og *Manage Terrain Associations* hvor riktig terreng velges for geometrien. Den nye batymetrien for terrenget vises i delkapittel 4.3.

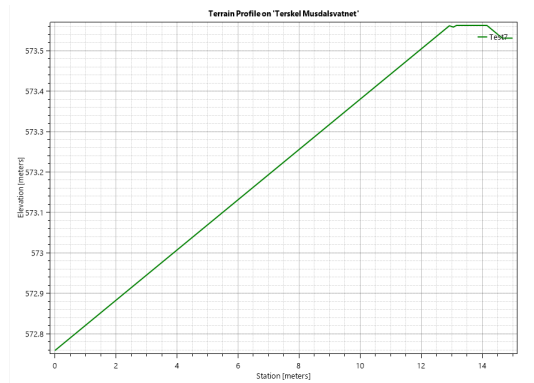
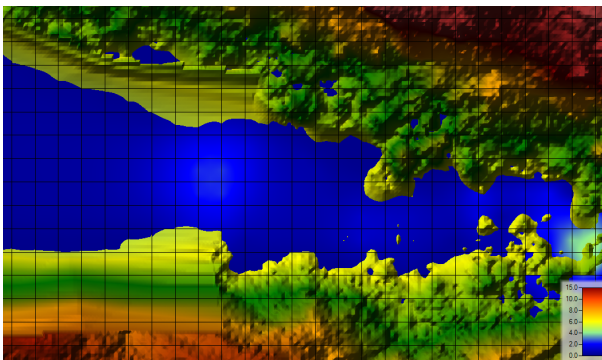
Under en test-simulering ble det oppdaget at interpolasjonen av terrenget har skapt en terskel i terrenget flere steder. Den mest fremtredende terskelen var lokalisert i innløpet av Musdalsvatnet, se Figur 11. Denne terskelen hindret vannføringen og krevde derfor forbedring.



**Figur 11:** En terskel har oppstått i terrenget etter interpolering av terrenget. Til venstre vises terskelen under en simulering hvor den hindrer vannføringen. Til høyre vises terrengprofilen som bekrefter at terskelen har en høyde på ca. 1.5 m.

Mellom disse to terrengfilene som flettes sammen blir det skapt såkalte *TIN stitch edges*. Disse kommer av at HEC-RAS runder av høyden til hver enkelt celle. I bratt terreng oppstår det en trappelignende kant, som kan være en kombinasjon av tverrsnitt med for lang avstand, for liten avrundning eller plassering av elvebanklinjer. En mulig løsning er å bruke en mer presis avrundning. I alle terrengfilene som er lagret for denne modellen er det brukt en avrundning på 1/32 som vil si en avrundning til nærmeste 0.03125 m. Det er ikke mulig å bruke en mer presis avrundig enn det som allerede er brukt fra før av. Dette vil si at om *TIN stitch edges* skal bli mindre fremtredende, må det brukes en avrundning på 1/128 (den høyeste oppløsningen). Dette ville medført at mange av filene og modelloppsettet måtte gjøres på nytt.

Den beste løsningen med tanke på tidsbruken var å endre og legge til ekstra tverrsnitt til de som allerede var tegnet. Dette ble gjort i den originale terrengfilen som hadde manglende batymetri. Tre nye tverrsnitt ble lagt til, en oppstrøms og to nedstrøms for terskelen. I tillegg ble det gamle tverrsnittet over denne terskelen flyttet lengre nedstrøms. Filen ble lagret og samme steg som forklart over ble fulgt på nytt. Resultatet av denne endringen kan ses i Figur 12. Ved å legge til de nye tverrsnittene gikk terskelen fra 1.5 til 0.8 m i høyde, i tillegg til mindre helning. Etter en ny simulering ble det kontrollert at terskelen ikke hindret vannføringen.



**Figur 12:** Terskelen i terrenget etter endringen. Til venstre vises terskelen etter en simulering, hvor vannføringen ikke blir hindret. Til høyre vises terrengprofilen som bekrefter at terskelen er forbedret.



Andre fremgangsmåter for å fjerne denne terskelen ble også utført. Dette inkluderer valg av andre alternativer når terrengfilene ble flettet sammen, men det utgjorde ingen betydelig forskjell på terskelen eller de andre trappekantene. Disse valgendingene inkluderer å endre avrundingen til *NONE*, skape en fil uten *Create Stitches*, skape en GeoTIFF-fil med *Channel and Banks*, og å endre rekkefølgen på terrengfilene.

### 3.6.3 Bruddlinjer i modellen

Årdalselva har flere områder med for eksempel elvebanker hvor det er nødvendig med bruddlinjer for å gjøre modellen mest mulig nøyaktig. I denne modellen ble bruddlinjene tegnet manuelt ved å bruke *2D Area Break Lines* som ligger i *Geometric Data*-vinduet. Ved et dobbeltklikk avsluttes bruddlinjen og den må navngis. Ved et venstreklikk kommer det opp alternativ hvor cellestørrelsen kan endres under *Edit Break Line Cell Spacing* og cellene i beregningsnettet kan justere seg etter bruddlinjen ved bruk av *Enforce Breakline in 2D Flow Area*. Dette kan også gjøre for alle bruddlinjene samtidig ved å høyreklikke på grensen for 2D området, velge *Edit 2D Flow Area* og *Enforce Selected Breaklines*.

### 3.6.4 Håndtering av sjøene i modellen

Sjøene i Årdalselva utgjør omtrent 5855 meter av den totale strekningen på 19 kilometer som skal modelleres. De fire sjøene er viktig med tanke på tidsforsinkelsen av vannet om vinteren. For en todimensjonal modell i HEC-RAS er det flere muligheter for hvordan sjøene i Årdalselva kan håndteres. Selve sjøene kan enten tegnes som et eget *Storage Area*, videre referert til som vannregion, eller de kan tegnes inn som en del av 2D-området hvor cellestørrelsen kan endres med justerte regioner hvis ønskelig.

Sjøene kan legges til i modellen som vannregioner som er sjø-lignende regioner hvor vannet kan bli ført til eller fra. De kan være plassert i starten av en elv, i enden eller på siden av elva. To vannregioner kan kobles sammen med en forbindelse (*SA/2D Connection*) eller en vannregion og et 2D-område kan kobles ved hjelp av en struktur. Ved bruk av vannregion kan en konstant vannflatehøyde bli satt før simuleringen slik at sjøen ikke starter tørr [7]. Det ble forsøkt å håndtere sjøene i Årdalselva som vannregioner, men dette fungerte ikke og ga feilmeldinger.

Et annet alternativ er å bruke en grensebetingelse (kalt *Boundary Condition Line* i HEC-RAS) plassert på utsiden av 2D-området, som ved en simulering fyller sjøen med ønsket vannmengde for hver time. Dette forhindrer at mye av simuleringstiden går til å fylle sjøene med vann før vannet kan strømme videre i elva.

### 3.6.5 Justerte regioner

I noen områder av elva, spesielt sjøene, er det hensiktsmessig å bruke justerte regioner, fordi endringene i terrenget er mindre enn i andre områder. Ved å øke cellestørrelsen i disse områdene, blir totalt antall celler betydelig redusert som fører til at simuleringstiden minker.

I *RAS Mapper*-vinduet gå til *2D Flow Area* under *Geometries*. Høyreklikker på *Refinement Regions*, og trykk så på *Edit Geometry (BETA)*. Det vil dukke opp en ny bar med verktøy. Trykk på *Add New Feature* for å starte å tegne polygonet og dobbeltklikker for å avslutte. Navngi så regionen. Under *Edit Refinement Region Properties* endres ønsket cellestørrelse i kolonnene *Cell Size X* og *Cell Size Y*.

*Enforce Refinement Regions* vil generere de nye cellene i dette området. Hvis en eller flere av kravene til cellen ikke er møtt vil det dukker opp en feilmelding. Kryss ut *RAS Mapper* og gå til *Geometric Data*-vinduet. Her vises problemceller merket med rødt. I denne modellen dukket det kun opp noen få problemceller hvor alle hadde for mange sider (mer enn 8). Dette ble fikset ved å legge til flere celler i de utsatte områdene.

For de justerte regionene i Musdalsvatnet og Viglesdalsvatnet ble det valgt en cellestørrelse på 10x10 m fordi helningen i dette terrenget ligger på 1/10. Dette gjør at cellene fortsatt er små nok til å vise endringene i terrenget. For den justerte regionen i området bak Kyrkjesteinane (som ligger i Viglesdalsvatnet) ble det valgt en cellestørrelse på 7x7 m fordi dette terrenget har en mindre helning. Og for det justerte området i Hiavatnet ble det valgt en cellestørrelse på 5x5 m. Alle valgte cellestørrelser i de justerte regionene ble visuelt kontrollert ved å se på konturlinjene (plottet med en meters intervall) til terrenget som kan velges i *RAS Mapper*-vinduet.

### 3.7 Simuleringsvalg

Dette delkapittelet inneholder ulike beslutninger for simulering av modellen.

#### 3.7.1 Grensebetingelser

Før en simulering kan starte må både start og ende av beregningsnettet ha hver sin grensebetingelse (kalt *Boundary Condition Lines* i HEC-RAS). I *Geometric Data*-vinduet velges *SA/2D Area BC Lines*. Her er det viktig at linjen tegnes tett på 2D området. Som alltid avsluttes tegningen ved et dobbeltklikk og grensebetingelsen navngis.

I hovedvinduet til HEC-RAS velges *Unsteady Flow Data*. I dette vinduet legges all data som skal inn til de ulike grensene. For dette prosjektet velges *Flow Hydrograph* for alle oppstrøms grensebetingelser og *Normal Depth* for alle nedstrøms grensebetingelser.

#### 3.7.2 Restart Fil

En restart fil er en fil som blir brukt til å etablere en startbetingelse for en simulering. Ved bruk av en slik fil vil hver celle i 2D området inneholde en vannoverflatehøyde i tillegg til hastighet, som betyr at modellen ikke starter simuleringen tørr. Fordelen med dette er at simuleringen blir mer stabil [3].

Før en restart fil ble laget, var det ønskelig med to ulike geometrifiler som inneholdt hver sitt 2D område for modellen; del 1 og del 2. Dette ble gjort for å holde en bedre oversikt over filene. Før de to nye geometrifilene ble tatt i bruk måtte region-innstillingen på datamaskinen endres til *English (US)* igjen. Uten denne endringen dukket en feilmelding opp under simuleringen.

De to nye geometrifilene ble laget i *RAS Mapper*-vinduet ved å høyreklikke på geometrifilen som inneholdt begge 2D områdene. Ved å trykke på *Save Geometry As* kopieres denne geometrifilen under et nytt navn. Deretter kan det ene 2D området slettes. Under *Terrain* og *Manage Terrain Associations* assosieres de nye geometrifilene med riktig terrengfil.

Restart filen lagres ved å gå til *Unsteady Flow Analysis* fra hovedvinduet i HEC-RAS. Under *Options* velges *Output Options*. Her velges tidspunktet av simuleringen som restart filen skal lagre. For dette prosjektet ble *Write Initial Condition file at the end of the simulation* valgt fordi restart filen kun skal brukes for å unngå en simuleringsstart med tørre celler.

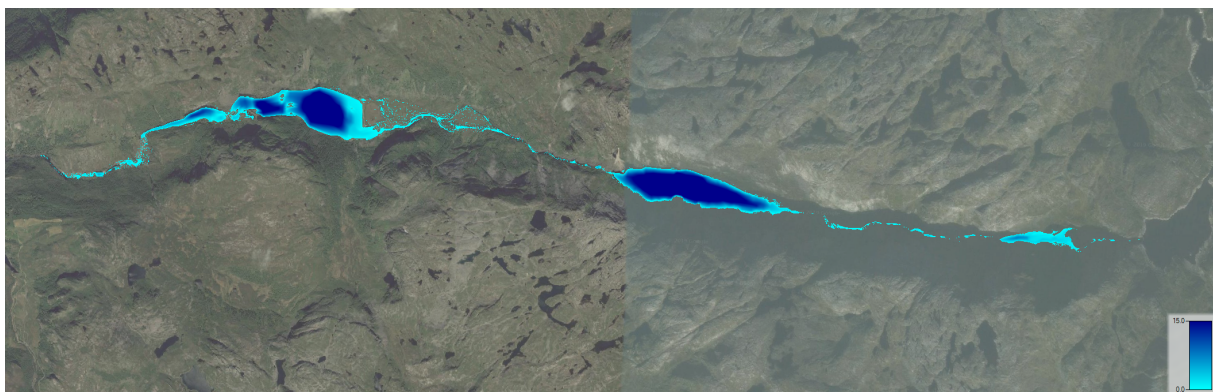
Før en restart fil for del 1 ble simulert, var det viktig å finne volumet av sjøene i Årdalselva, slik at disse ble fylt og vannet kan strømme videre. Dette ble funnet ut ved å teste ulike vannføringer for hver sjø under simuleringer. Den første restart filen ble simulert med en vannføring på totalt  $6903 \text{ m}^3/\text{s}$  fordelt over fire grensebetingelser og fire timer. Etter endt simulering kunne vannføringen i elva vises i RAS Mapper-vinduet.

Restart filen fylte elva med for mye vann på kort tid. Det ble derfor simulert en ny restart fil for del 1 av modellen. Denne simuleringen ble kjørt med en vannføring på totalt  $6870 \text{ m}^3/\text{s}$  fordelt på 2-3 timer, etterfulgt av 7-8 timer med ingen vannføring, se Tabell 2. De siste timene med null vannføring vil resultere i at elven til slutt stabiliserer seg på en normal vannstand.

**Tabell 2:** Vannmengden i  $\text{m}^3/\text{s}$  som slippes for de første tre timene ved grensebetingelsene i del 1 av modellen. Det ble også kjørt null vannføring i syv timer i etterkant for å stabilisere vannføringen i elva. Denne vannmengden brukes for å fylle elva og spesielt sjøene med hensikten å lagre en restart fil.

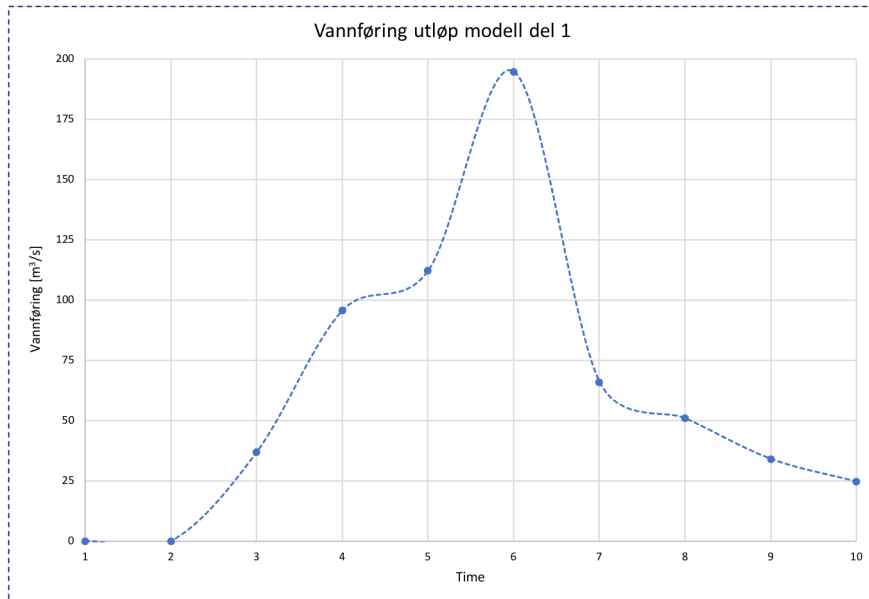
Time	Breiavatnet	Musdalsvatnet	Viglesdalsvatnet	Hiavatnet
1	100	1400	750	100
2	100	1400	750	100
3	0	1420	750	0

Restart filen ble simulert med tidssteg lik 1 s og hadde en total varighet på 16t 13m 39s. Figur 13 viser dekningsområdene til vannet i elva.



**Figur 13:** Vanndybden etter simulering av restart filen for del 1 av HEC-RAS modellen som viser dekningsområdene av vannet etter endt simulering.

Resultatet fra denne simuleringen vises i Figur 14 hvor vannføringen ut av modellen var på  $24.64 \text{ m}^3/\text{s}$  den siste timen. Denne restart filen ble brukt videre i simuleringer for del 1 av modellen uten videre finjustering, grunnet tidsbegrensing.



**Figur 14:** Vannføringen ved utløpet til del 1 av modellen etter simulering med hensikt om å lagre en restart fil.

Del 2 av modellen inneholder ingen sjøer. Det er derfor valgt å simulere restart filen med konstant vannføring fra to grensebetingelser. Vannføringen fra Lyngsåna ble satt til en konstant verdi på  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  og vannføringen fra del 1 ble satt til en konstant verdi på  $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Intervallet for kartleggingen av denne hydrografen ble satt til en time. Resultatet fra simuleringen viser i RAS Mapper-vinduet og DSS-filen at tidsforsinkelsen for vannet gjennom del 2 av modellen er på tre til fire timer. På grunn av intervallet som er satt, kan ikke eksakt tidspunkt bestemmes. Etter de første fire timene ligger vannføringen konstant på  $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Restart filen ble simulert med tidssteg basert på Courant nummer satt til maksimum 1.0 og hadde en varighet på 3t 12m 51s. Figur 15 viser del 2 av modellen hvor den valgte vannføringen dekker hele strekningen av elva. Ved bruk av denne restart filen som startbetingelse for en simulering vil ikke elva starte tørr og simuleringen vil være mer stabil.



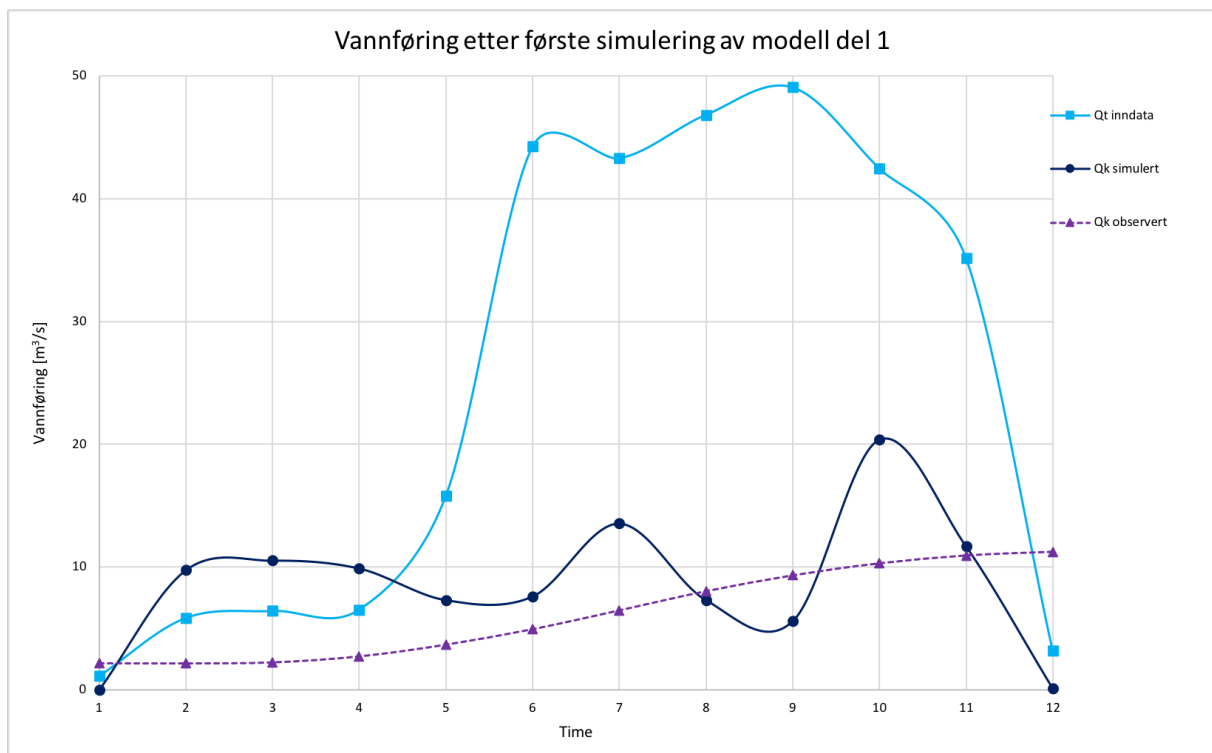
**Figur 15:** Dekningsområdet til vannet i restart filen for del 2 av HEC-RAS modellen.

### 3.7.3 Simulering før kalibrering

All simulering av både del 1 og del 2 av modellen ble utført med diffusiv bølge som anbefalt i *HEC-RAS 2D Modeling User's Manual* [3].

For å simulere del 1 av modellen ble vannføringer for dagene 06.07.2017 og 07.07.2017 brukt. Disse dagene ble valgt på bakgrunn av den store differansen i tapping fra Breiavatnet.

Figur 16 viser simulert vannføring inn og ut av modellen mot observert vannføring ved Kalltveit. Simulert vannføring er vann tappet fra Breiavatnet. Observert vannføring er vannføringen ved Kalltveit 12 timer senere enn tappingen fra Breiavatnet. I tillegg er observert vannføringen subtrahert vannføringen fra Lyngsåna 3 timer før. Forklart varians er regnet ut til  $R^2=0.0009$  for denne simuleringen, som er en uakseptabel verdi for modellen da  $R^2$  nærmere 1.0 indikerer en optimal modell.



**Figur 16:** Vannføring etter første simulering av modell del 1 hvor  $Q_t$  inndata er simulert vannføring fra Breiavatnet,  $Q_k$  simulert er vannføring ut av modellen og  $Q_k$  observert er vannføring ved Kalltveit 12 timer senere og subtrahert vannføring fra Lyngsåna.

TerraTec tok ortofoto over tre dager ved lav vannføring i elva da de samlet inn LiDAR-data. Første simulering for modell del 2 ble gjort med data for 22. og 23. mai 2018. Vannføringen fra tapping fra Breiavatnet ble gitt en tidsforsinkelse på 12 timer, og vannføringen fra Lyngsåna ble gitt en tidsforsinkelse på 3 timer. Resultatet fra denne simuleringen vises i Tabell 3 hvor inndata er vannføringen fra både Breiavatnet og Lyngsåna med gitt tidsforsinkelse. Simulert  $Q_k$  er vannføring ut av modellen og observert  $Q_k$  er den målte vannføringen ved Kalltveit.

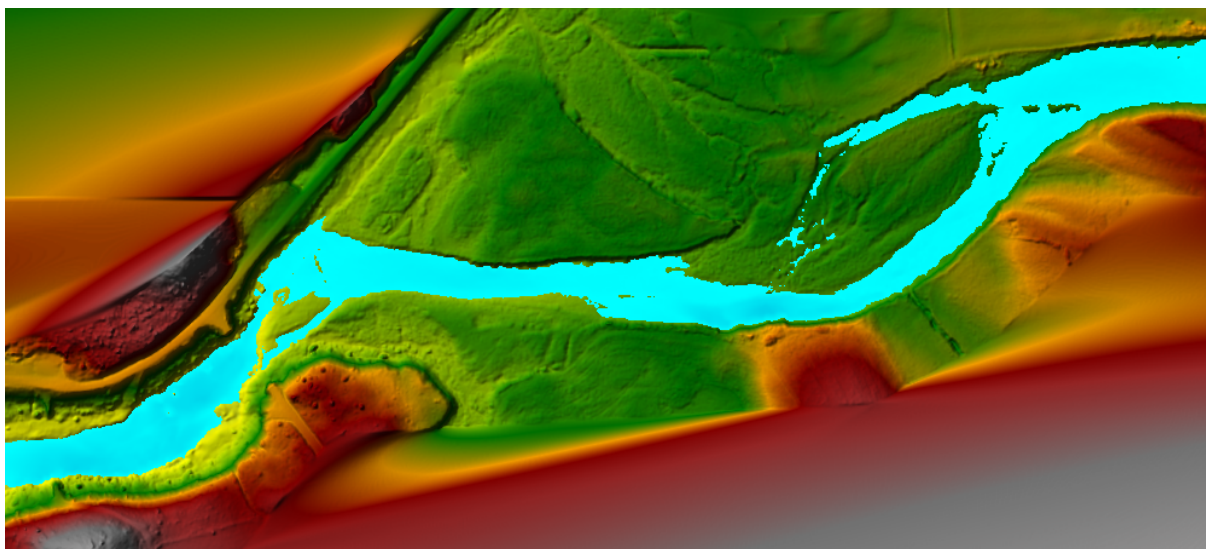


**Tabell 3:** Første simulering av modell del 2 viser en differanse mellom simulert  $Q_k$  og observert  $Q_k$  når inndata for modellen er tapping fra Breiavatnet,  $Q_t$ , og vannføring fra Lyngsåna,  $Q_l$ .

Time	Inndata ( $Q_t + Q_l$ )	Simulert $Q_k$	Observert $Q_k$
1	2.00	2.03	3.50
2	2.00	2.01	3.48
3	2.02	2.00	3.47
4	1.99	2.01	3.45
5	1.98	2.01	3.43
6	1.98	1.99	3.41
7	1.99	1.98	3.38

Det er en stor differanse på simulert og observert vannføring ved Kalltveit, som tilsier at det forekommer tilsig av vann fra nedslagsfeltet til Årdalselva. For de simulerte verdiene har tilsiget en gjennomsnittlig verdi på  $1.44 \text{ m}^3/\text{s}$  for de simulerte timene. Nedbørsmengden for de tre dagene er totalt 0.88842 mm. Vannføringer fra Grytetjørna som er regulert er ukjent og dermed en usikker faktor for simulerte verdier. Det ble derfor besluttet å kjøre modell del 2 med observerte verdier som inndata istedenfor tappet verdier. Det er også et alternativ å legge til tilsiget av vann ved oppstrøms grensebetingelse eller fordelt gjennom 2D området.

Som verifisering av modell del 2 ble simulert vannføring i modellen sammenlignet med observert vannføring fra ortofoto. Tidspunktet for innsamling av ortofoto for de tre dagene er ikke kjent. Vannføringen under denne perioden er tilnærmet konstant,  $Q_k$  ligger mellom  $3.25 \text{ m}^3/\text{s}$  og  $3.50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Det ble derfor besluttet å regne ut gjennomsnittlig vannføring for de tre dagene. Gjennomsnittlig vannføring ved Kalltveit er  $3.38 \text{ m}^3/\text{s}$  og  $0.48 \text{ m}^3/\text{s}$  for Lyngsåna. Som gir oppstrøms vannføring på  $2.9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Resultatet fra denne simuleringen vises i Figur 17. Simuleringen ble utført med et tidssteg basert på Courant nummer maksimum 1.0 og hadde en varighet på 2t 12m 11s.



**Figur 17:** Dekningsområdet til vannet i elva under simulering av gjennomsnittlig vannføring for 22. til 24. Mai 2018.

En sammenligning av dekningsområdet til vannet i Figur 17 mot ortofoto av elva med samme vannføring i Figur 18, viser kun en liten forskjell. Modellen blir likevel kalibrert med Mannings  $n$  verdier for en mulig forbedring av simulert vannføring.



**Figur 18:** Ortofoto fra TerraTec som viser dekningsområdet til vannet i elva under innsamling av LiDAR data 22. til 24. mai 2018.

### 3.8 Kalibrering av Mannings $n$

I *HEC-RAS 5.0 Hydraulic Reference Manual* [4] side 3-14 til 3-16 ligger en tabell for anbefalte Mannings  $n$  verdier. Valg av Mannings  $n$  verdi for del 1 og del 2 av modellen er besluttet med disse verdiene som utgangspunkt. Ved oppsett av 2D områdene ble standardverdien for Mannings  $n$  satt til 0.03 for hele elva. Denne verdien gjelder for en naturlig rett elv uten dype basseng. For å endre denne verdien, må nye områder tegnes manuelt inn i 2D området. Disse områdene blir gitt en Mannings  $n$  verdi og vil da overstyre standardverdien.

Dette gjøres i *RAS Mapper*-vinduet. Høyreklikk på *Map Data Layers*, *Create New RAS Layer* og *Mannings n Polygon Layer*. Navngi det nye Mannings-laget. Det nye laget vil dukke opp i listen og nå skal polygonene til de nye Mannings-områdene tegnes. Ved dobbeltklikking avsluttes tegningen, og en beskrivelse og Mannings  $n$  verdi skal bli satt. Når alle områdene er tegnet, høyreklikk på Mannings-laget og trykk *Stop Editing*. Da dukker opp et nytt vindu hvor filen skal navngis og cellestørrelsen for Mannings-områdene skal velges. For denne modellen blir cellestørrelsen valgt til 3 meter, samme som for resten av 2D området. Trykk *Create*. Det nye laget dukker opp i listen. Hvis det er ønskelig å endre farge og grad av gjennomsiktighet laget skal være så høyreklikk på laget og *Mannings n Value Colors (and defaults)*. Mannings-laget må nå assosieres til geometrifilen. Høyreklikk på *Terrain* og *Manage Terrain Associations* og velg riktig Mannings-lag.

For del 1 av modellen ble Mannings  $n$  verdien endret i åtte områder av elva, se Figur 19. Områdene ble gitt verdier mellom 0.04 og 0.055 grunnet varierende helning og størrelsen på stein og bulder i terrenget. Den største Mannings verdien er bestemt for fossene i Årdalselva.



**Figur 19:** Endring av Mannings  $n$  verdi for ulike områder av modell del 1.

For del 2 av modellen ble Mannings  $n$  verdien endret i tre områder av elva. To av Mannings-områdene fikk verdien 0.04 fordi det er mye småstein, stein og få buldere. Ett område får verdien 0.05 fordi det har større buldere. Se Figur 20 for en oversikt over plasseringen til Mannings-områdene.



**Figur 20:** Endring av Mannings  $n$  verdi for ulike områder av modell del 2.





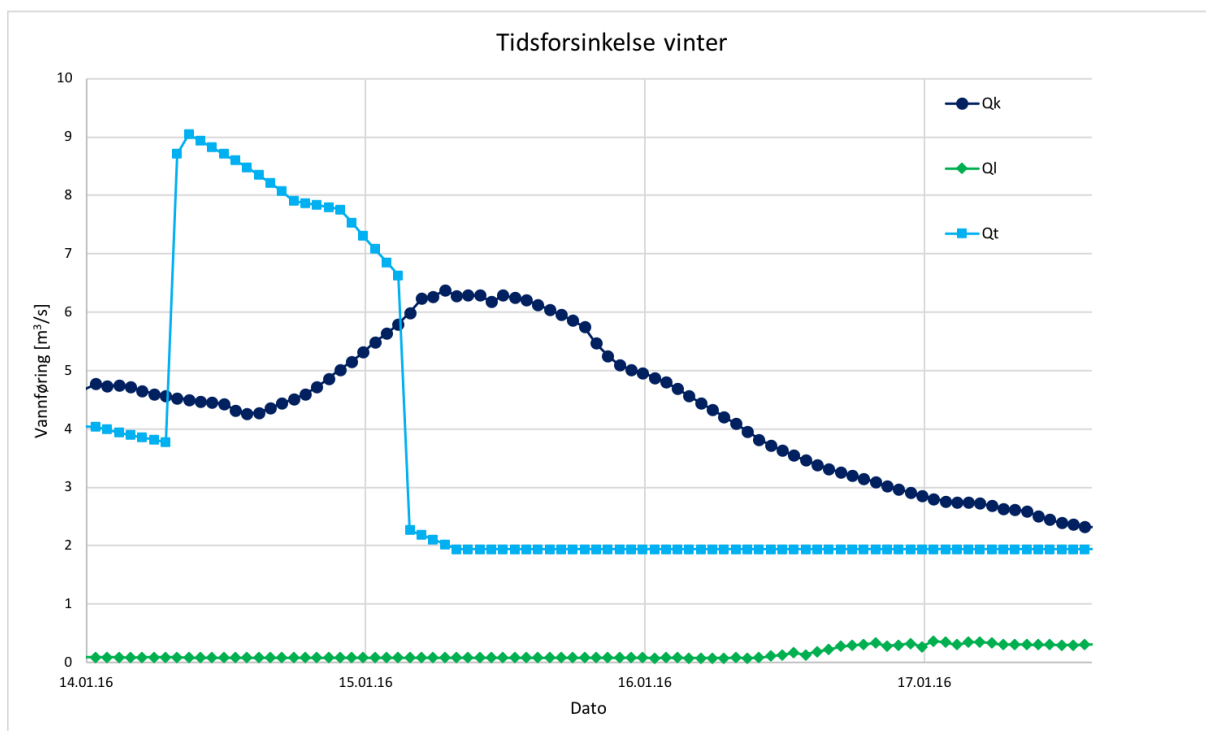
## 4 Resultat og diskusjon

I dette kapittelet presenteres resultater fra modelloppsettet av Årdalselva i HEC-RAS og resultatene fra analysen av data for å vurdere tidsforsinkelsen samt sammenhengen mellom minstevannføring og klima. Til sist blir mulige løsninger for slipp av minstevannføring i elva uten tap av vann, diskutert.

### 4.1 Vurdering av tidsforsinkelsen av vannet i Årdalselva

Data av vannføringen fra Breiavatnet, Kalltveit og Lyngsåna ble analysert for å vurdere tidsforsinkelsen av vannet for de 19 kilometerne av Årdalselva som går fra Breiavatnet til målestasjonen.

For vinteren er det vanskelig å estimere korrekt tidsforsinkelse da is i elva kan føre til at vannet blir holdt tilbake. Kun en serie som tydelig viser tidsforsinkelsen ble funnet for vinteren, 14.01.16 til og med 17.01.16, se Figur 21. En serie er lite data å estimere fra, da forhold i elva kan variere mye for hver uke eller hvert år.



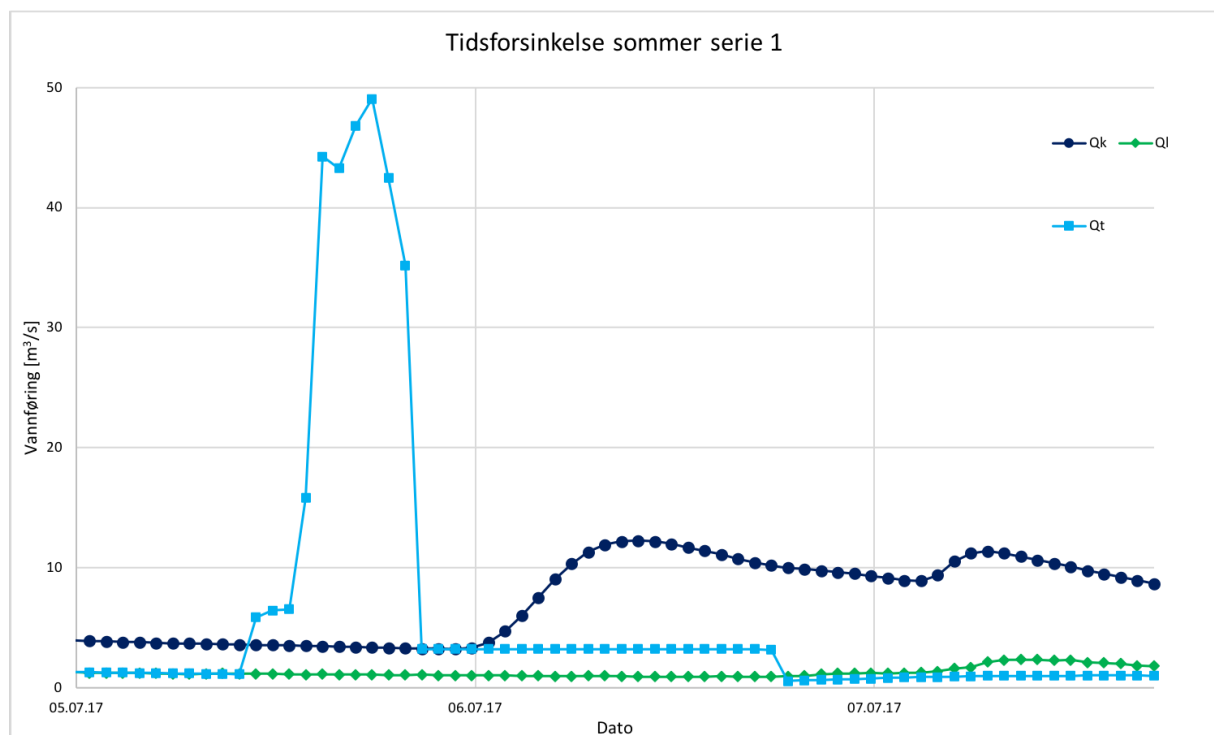
**Figur 21:** Tidsforsinkelsen av vannføringen for vinteren.  $Q_k$  (mørkeblå) er vannføringen målt ved Kalltveit,  $Q_t$  (blå) er tappet vann fra Breiavatnet og  $Q_l$  (grønn) er vannføringen fra Lyngsåna.

14.01.16 kl 15.00 øker tappingen fra  $3.77 \text{ m}^3/\text{s}$  til  $8.71 \text{ m}^3/\text{s}$  på en time, altså en differanse på  $4.93 \text{ m}^3/\text{s}$ . Før denne tappingen hadde vannføringen ved Kalltveit en synkende differanse på opptil  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  hvor det samme dag kl. 21.00 var den minste registrerte vannføringen i dette tidsrommet. Fra 14.01.16 kl. 22.00 stiger vannføringen med en differanse på opptil  $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tidspunktet hvor vannet definitivt har nådd målestasjonen er 15.01.16 kl. 02.00. Da har vannet brukt 11 timer på gå fra Breiavatnet til målestasjonen. En annen måte å vurdere tidsforsinkelsen på er ved å se på amplituden til seriene. Ved å se på antall timer mellom toppen av  $Q_t$  til toppen av  $Q_k$  viser dette en

annen estimering av tidsforsinkelsen. Den 14. kl. 16.00 tappes  $9.04 \text{ m}^3/\text{s}$ , og den 15. kl. 14.00 måles det  $6.38 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dette utgjør en tidsforsinkelse på 22 timer.

Danning av is oppstår som regel i november eller desember hvert år, men varierer fra år til år og for hvert sted. I dagene før tidsforsinkelsen av vannet, som plottet i Figur 21, ligger lufttemperaturen for det meste mellom  $-2.0$  og  $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ . I november og desember år 2015 synker lufttemperaturen til minusgrader for tre lengre perioder. Disse kuldeperiodene er nok til at vannet i elva fryser til is. Ved vekslende lufttemperaturer vil det kunne oppstå flere episoder hvor isdannelse og isganger oppstår flere ganger for en vintersesong. Og ved lufttemperaturer opptil ca.  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ , er dette fullt mulig. En sikker vurdering av tidspunktet for isdannelse i elva er vanskelig uten måling av vannhastighet, der kritisk hastighet for isdannelse spiller en viktig rolle.

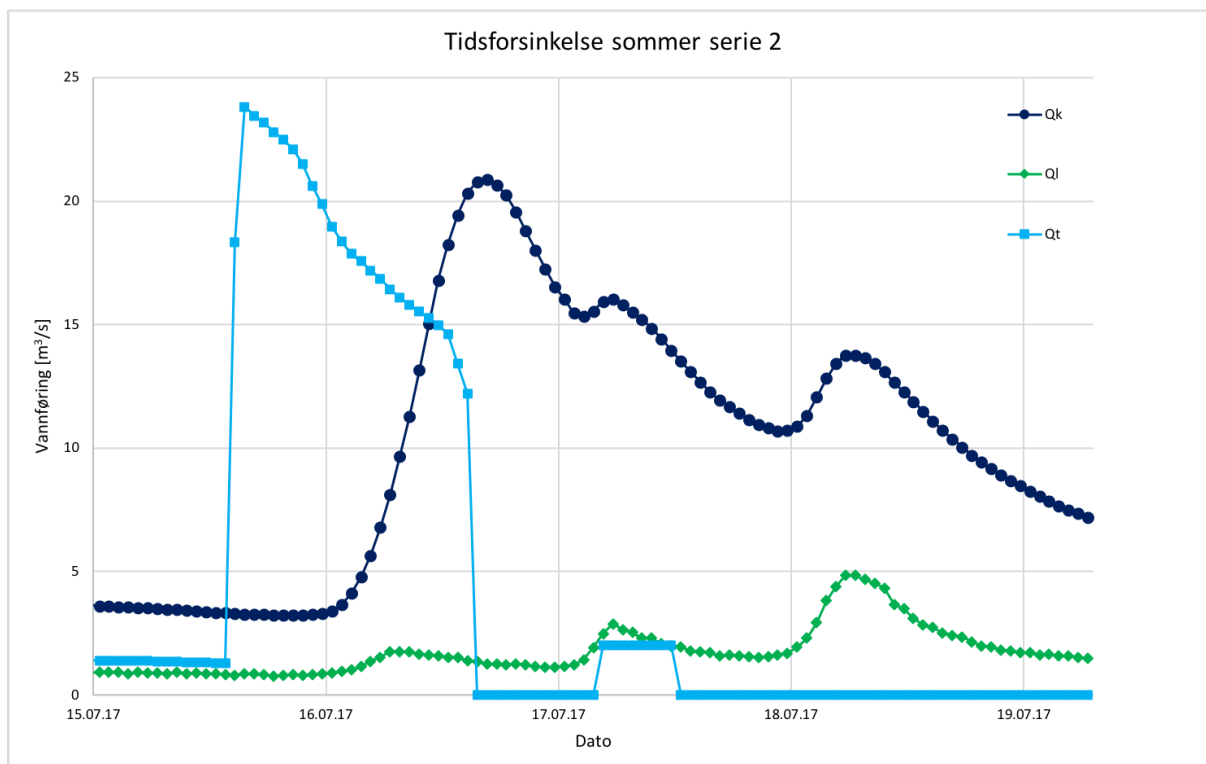
Flere serier ble funnet for sommeren, men det er valgt å fremvise to da de gir de største differansene av tappingen som resulterer i det mest konkrete beviset på tidsforsinkelsen av vannet. Figur 22 viser tidsforsinkelsen for den første serien, 15.07.17 til 17.07.17.



**Figur 22:** Tidsforsinkelsen av vannføringen,  $Q$  for serie 1 på sommeren.  $Q_k$  (mørkeblå) er vannføringen fra Kalltveit,  $Q_t$  (blå) er tappet vann fra kraftverket og  $Q_l$  (grønn) er vannføringen fra Lyngsåna.

15.07.17 kl. 17.00 går tappingen fra  $1.29 \text{ m}^3/\text{s}$  til  $18.35 \text{ m}^3/\text{s}$ , altså en differanse på  $17.06 \text{ m}^3/\text{s}$ . Før denne tappingen hadde vannføringen ved Kalltveit en synkende differanse på opptil  $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ . Lyngsåna øker vannføringen med ca  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ . 16.07.17 kl. 04.00 observeres en økning av vannføringen med  $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$ , timen etter skjer det en økning med  $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ . Denne økningen er større enn økningen som skjer ved Lyngsåna. Derfor blir dette tidspunktet, altså kl. 05.00 satt som da vannet fra tapping har nådd målestasjonen. Dette vil si at vannet har brukt 12 timer på å nå målestasjonen.

Figur 23 viser tidsforsinkelsen for den andre serien, 06.07.17 til 08.07.17.



**Figur 23:** Tidsforsinkelsen av vannføringen,  $Q$  for serie 2 på sommeren.  $Q_k$  (mørkeblå) er vannføringen fra Kalltveit,  $Q_t$  (blå) er tappet vann fra kraftverket og  $Q_l$  (grønn) er vannføringen fra Lyngsåna.

06.07.17 kl. 06.00 går tappingen fra  $1.14 \text{ m}^3/\text{s}$  til  $5.87 \text{ m}^3/\text{s}$ , altså en differanse på  $4.73 \text{ m}^3/\text{s}$ . Før denne tappingen hadde vannføringen ved Kalltveit en synkende differanse på opptil  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ . 06.07.17 kl. 19.00 skjer det en økning på  $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$ . Først kl. 21.00 skjer det en økning på  $0.95 \text{ m}^3/\text{s}$ , derfor kan det med sikkerhet sies at vannet har nådd målestasjonen ved dette tidspunktet. Likevel settes tidspunktet til kl. 19.00, 13 timer senere.

## 4.2 Vurdering av minstevannføring

Alle episoder hvor vannføringen ikke møter kravet om minstevannføring i Kalltveit, ble uthevet etter første analyse av datasettet som beskrevet i delkapittel 3.2. Tabell 4 viser en oversikt over alle disse episodene for årene 2014 til 2017. En episode regnes som sammenhengende timer hvor minstevannføringen ikke er møtt. Dette skjer totalt 31 ganger fordelt på 3128 timer. Grunnet støy i datasettet er data for år 2018 og 2019 slettet for å representere analysen med korrekte verdier.

Tabell 4 er delt opp slik at hver periode inneholder episoder hvor det kun er en time eller noen dager som skiller episodene.  $Q_l$  og  $Q_t$  er gjennomsnittlig vannføring i  $\text{m}^3/\text{s}$ . Vann- og lufttemperatur er gjennomsnittlig grader i celsius, og gjennomsnittlig nedbør er i millimeter.

**Tabell 4:** Alle separate episoder hvor vannføringen ved Kalltveit går under minstevannføringskravene. Varighet er oppgitt som totalt antall timer og resten av faktorene er gjennomsnittlige verdier for den separate episoden.

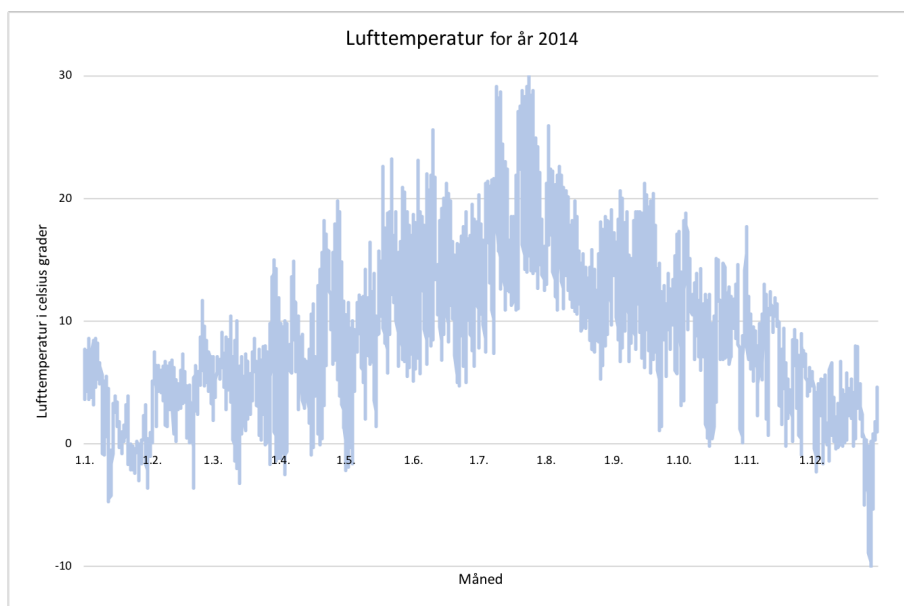
Periode	Dato fra	Dato til	Varighet (Timer)	Ql ( $m^3/s$ )	Qt ( $m^3/s$ )	Vanntemp (Celsius)	Lufttemp (Celsius)	Nedbør (Millimeter)
1	26/01/14	26/01/14	13	0.92	0	4.07	-0.80	0.15
	26/01/14	09/02/14	333	0.3	0	3.8	2.80	0.27
	11/02/14	13/02/14	50	0.22	0	3.48	3.34	0.88
	14/02/14	14/02/14	10	0.23	0	3.56	3.75	1.05
2	07/06/14	08/06/14	7	0.19	0	6.94	13.56	0
	08/06/14	12/06/14	102	0.17	0	7.17	16.55	0.17
	15/06/14	15/07/14	734	0.11	0	8.85	15.49	0.25
	17/07/14	31/07/14	334	0.1	0.86	11.17	20.11	0.35
	07/08/14	10/08/14	61	0.17	0	11.52	17.59	0.58
	10/08/14	11/08/14	9	0.33	0	11.67	18.80	1.46
	29/08/14	07/09/14	215	0.34	0	9.82	14.50	0.45
	10/09/14	26/09/14	395	0.2	0	9.56	11.97	0.2
3	18/11/14	23/11/14	122	0.26	0	7.1	4.77	0.13
	28/11/14	07/12/14	202	0.27	0	6.41	3.39	0.35
4	04/02/15	04/02/15	7	0.53	0	4.5	-9.27	0.08
	16/02/15	16/02/15	7	0.41	0	4.13	4.17	0.12
	16/02/15	17/02/15	19	0.4	0	4.11	3.02	1.13
5	04/04/15	04/04/15	4	0.43	0	4.22	-3.40	0
	05/04/15	07/04/15	44	0.44	0	4.25	4.05	0.15
6	05/01/16	06/01/16	30	3.2	3	5.08	-3.46	0
	07/01/16	08/01/16	22	9.73	5.54	4.92	-2.21	0.002
	19/01/16	20/01/16	11	0.3	2.37	4.06	-15.82	0.01
7	25/02/16	25/02/16	4	0.24	2.37	3.84	-5.48	0.25
	26/02/16	26/02/16	10	0.41	2.37	3.76	-6.30	0.09
	27/02/16	27/02/16	4	0.79	2.37	3.7	-7.03	0
	29/02/16	29/02/16	7	0.5	2.37	3.58	-6.73	0
	02/03/16	14/03/16	301	0.21	2.37	3.39	1.90	0.11
8	06/03/17	07/03/17	3	0.22	1.8	4.14	0.70	0.01
	07/03/17	07/03/17	3	0.45	1.82	4.09	0.87	0
	07/03/17	08/03/17	13	0.67	1.92	4.02	1.13	0.24

År 2014 har 2639 antall timer med minstevannføring, år 2015 har 81 timer, år 2016 har 389 timer og år 2017 har totalt 19 timer. Dette er en ganske stor variasjon fra år til år, men den kan forklares med at Breiavatnet tappet 16 ganger så mye vann år 2017 kontra år 2014.  $496.16 m^3/s$  er den totale mengden vann som er tappet fra Breiavatnet i år 2014.  $8056.94 m^3/s$  er den totale mengden vann som er tappet fra Breiavatnet i år 2017.

Det skal også trekkes frem at periode 2 viser til de eneste episodene hvor minstevannføringskravet ikke er møtt under sommermånedene i Årdalselva. Resten av episodene oppstår under vintermånedene.

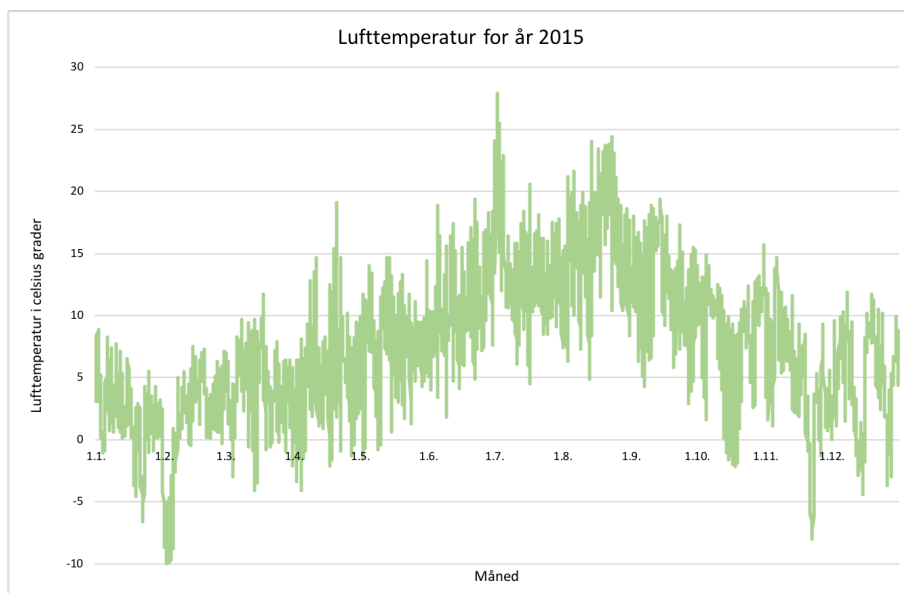
I figurene under er lufttemperaturen plottet for årene 2014, 2015 og 2016. Lufttemperatur for år 2017

ble ekskludert grunnet støy i datasettet hentet fra senorge.no. Figur 24 viser lufttemperatur for år 2014 hvor trenden viser en merkbar forskjell mellom vinter- og sommermånedene.



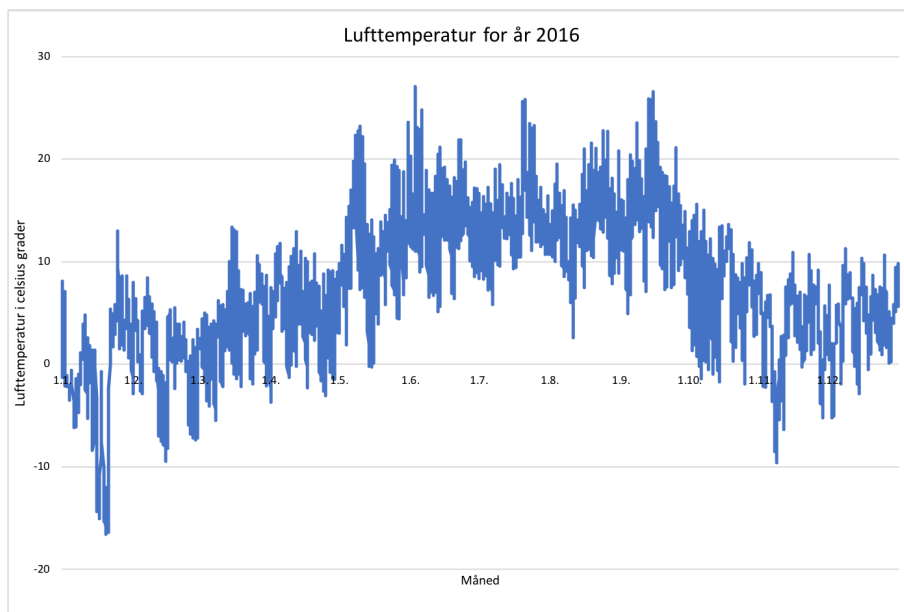
**Figur 24:** Lufttemperatur i grader celsius for Årdalselva i år 2014.

Figur 25 viser lufttemperaturen for år 2015 hvor temperaturen i vintermånedene, spesielt november og desember, er høyere enn fra året før.



**Figur 25:** Lufttemperatur i grader celsius for Årdalselva i år 2015.

Figur 26 viser lufttemperaturen for år 2016 hvor lufttemperaturen for sommermånedene er mer stabil og langvarig sammenlignet med år 2014 og 2015. År 2016 er likt år 2015 ved at temperaturen i november og desember er høyere enn for år 2014.

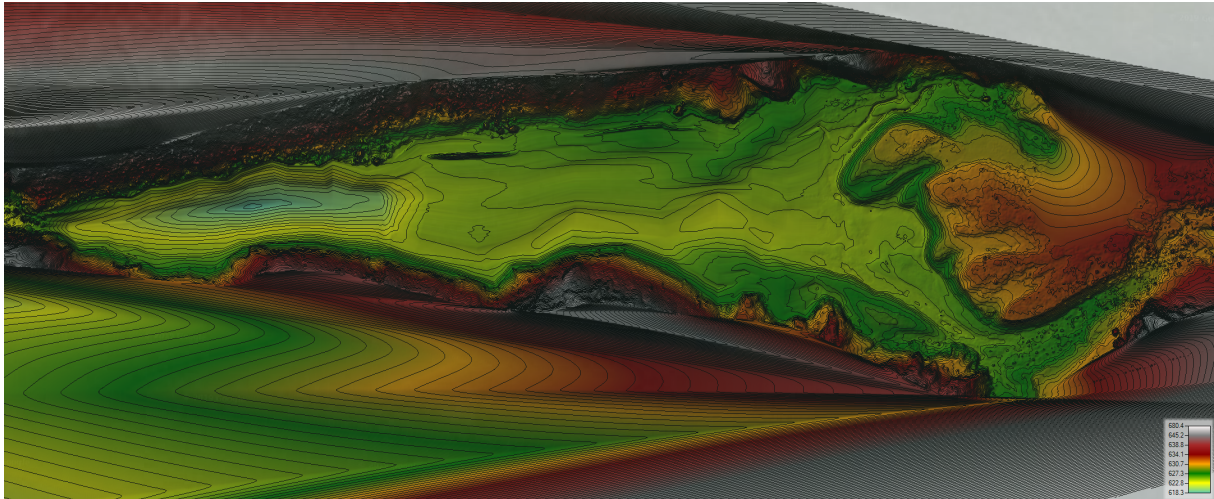


**Figur 26:** Lufttemperatur i grader celsius for Årdalselva i år 2016.

Det er vanskelig å koble en sammenheng mellom klima og episoder hvor minstevannføringskravet ikke er møtt, da vannføringen i Årdalselva er regulert fra Breiavatnet, Grytetjørna og Lyngsåna. I tillegg skaper nedbør et tilsig av vann fra nedslagsfeltet som utgjør en faktor ved analysen. Av de tre årene som er fokusert på, altså år 2014 til og med år 2016, viser trenden at det blir en lengre varmeperiode på sommeren og en mildere temperatur i november og desember.

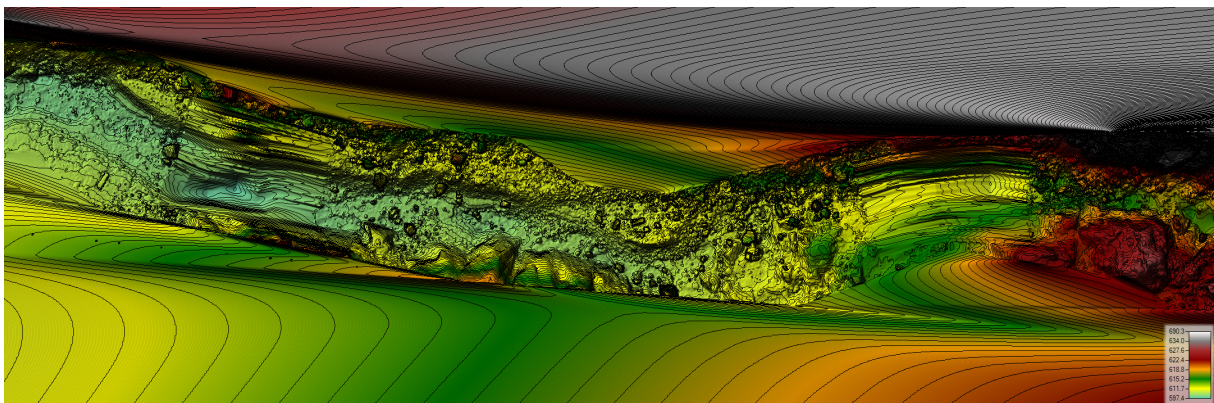
### 4.3 Konstruksjon av manglende batymetri

Som opplyst tidligere leverte ikke TerraTec LiDAR-data for terrenget dypere enn seks meter under vannoverflaten. En batymetri måtte derfor konstrueres manuelt i HEC-RAS. Resultatet av det nye terrenget blir vist i figurene under. Noen detaljer i terrenget, slik som høye stener, er blitt fjernet eller forandret på grunn av interpoleringen mellom tverrsnittene. Dette er vanskelig å unngå. I Figur 27 vises det nye terrenget for Kråkeholsvatnet.



**Figur 27:** Kråkeholsvatnet med konturlinjer med 0.5 meters intervall.

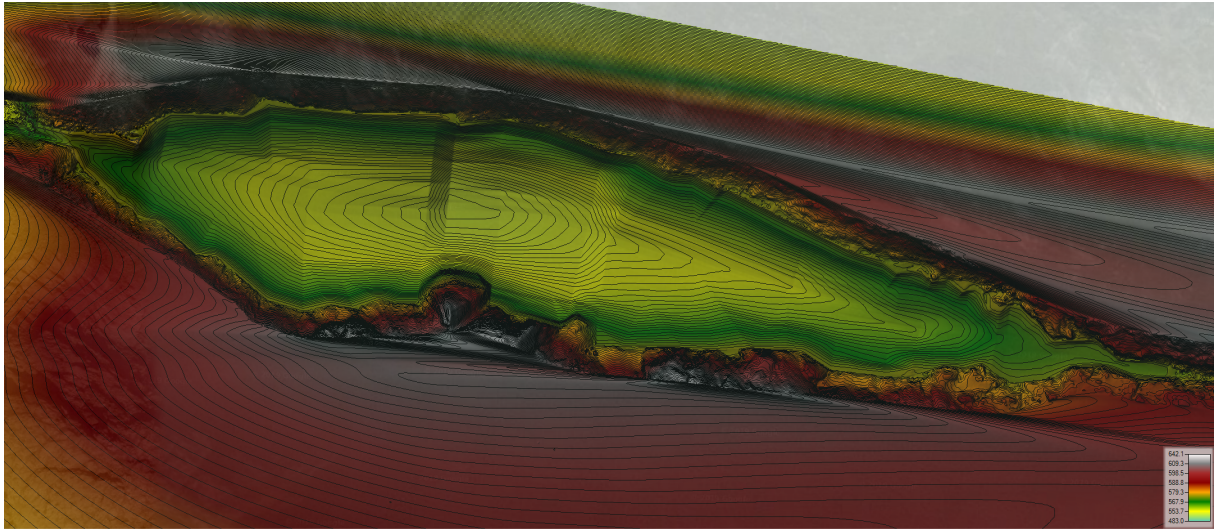
I Figur 28 vises det nye terrenget for de to mindre områdene nedstrøms Kråkeholsvatnet.



**Figur 28:** De to mindre områdene nedstrøms Kråkeholsvatnet med konturlinjer med 0.5 meters intervall.

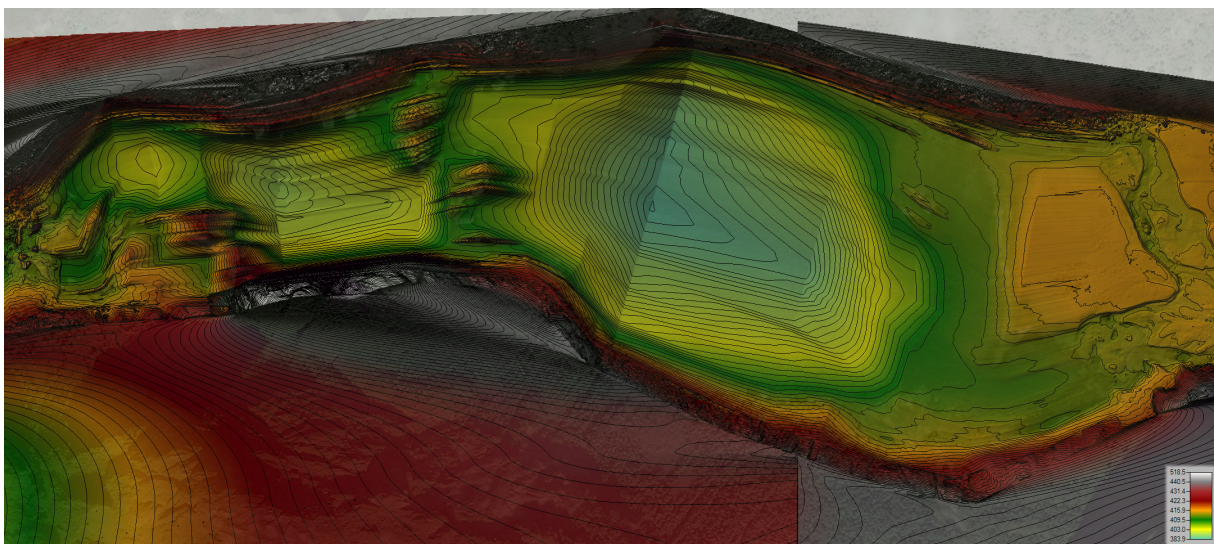
I Figur 29 vises det nye terrenget for Musdalsvatnet. Her ble ytterligere endringer gjort da det oppstod en terskel i terrenget som hindret vannføringen til innløpet av sjøen.





**Figur 29:** Musdalsvatnet med konturlinjer med 1 meters intervall.

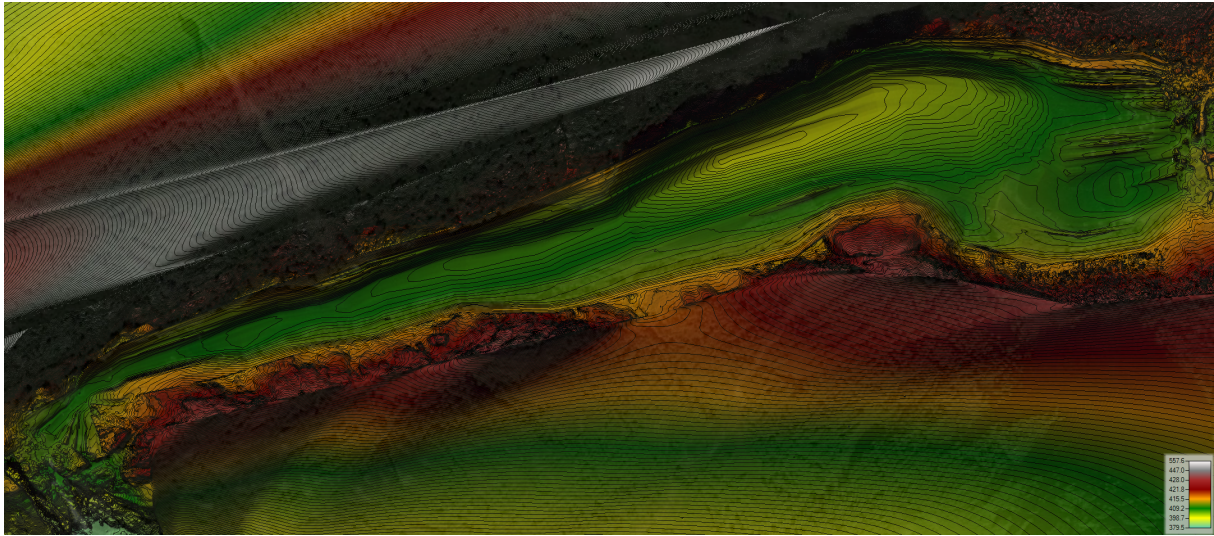
I Figur 30 vises det nye terrenget for Viglesdalsvatnet.



**Figur 30:** Viglesdalsvatnet med konturlinjer med 1 meters intervall.

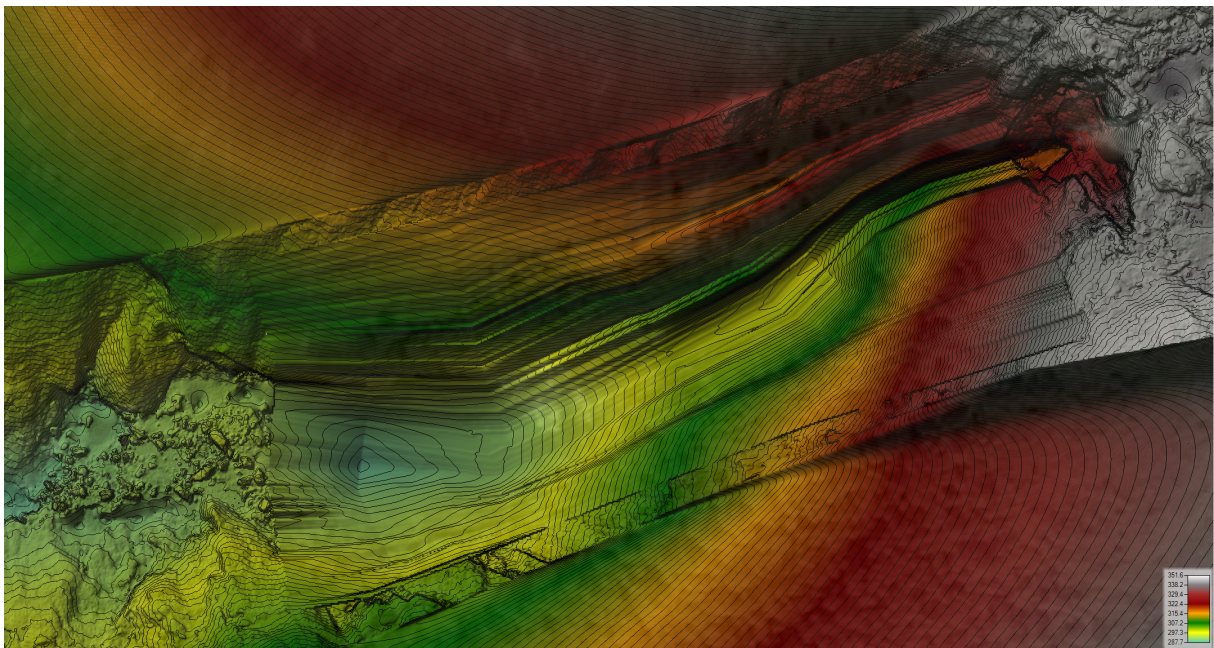
I Figur 31 vises det nye terrenget for Hiavatnet.





**Figur 31:** Hiavatnet med konturlinjer med 0.5 meters intervall.

I Figur 32 vises det nye terrenget for det mindre området nedstrøms Hiavatnet.

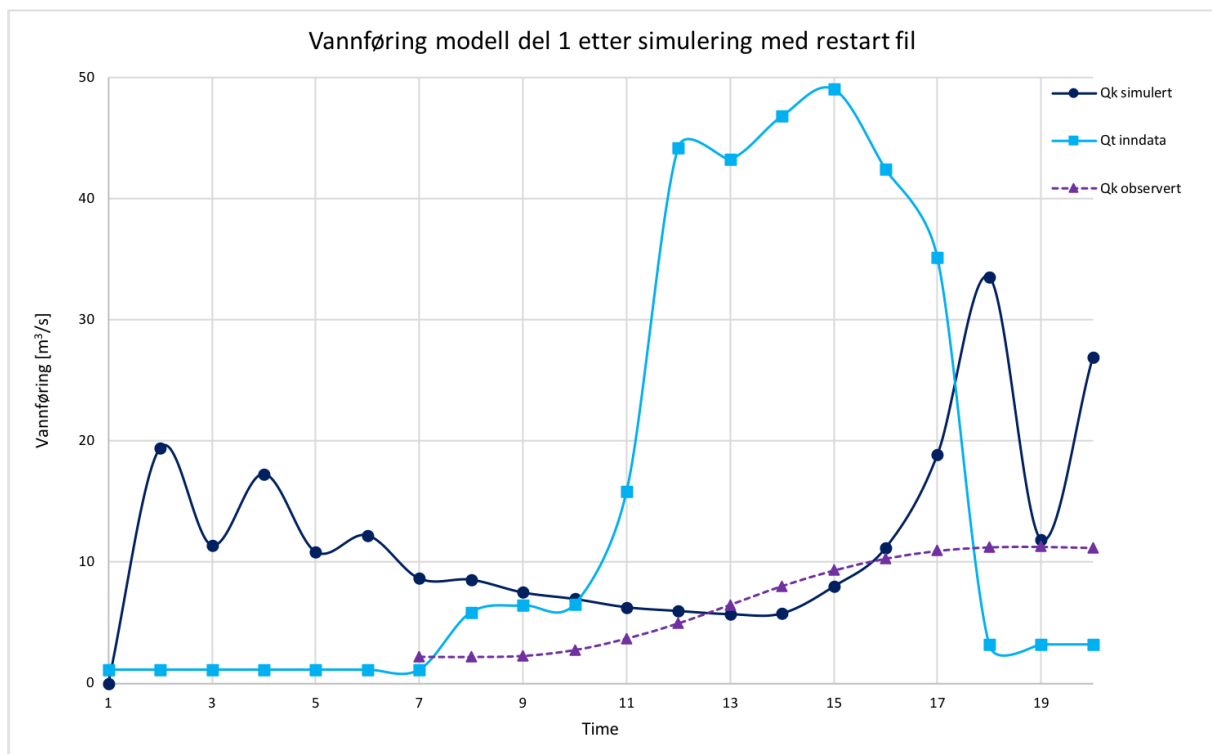


**Figur 32:** Det mindre området nedstrøms Hiavatnet med konturlinjer med 0.5 meters intervall.

For alle områdene i det nye terrenget oppstod det en trappelignende kant (*TIN stitch edges*) mellom det nye og det originale terrenget. Dette var spesielt fremtredende i terreng med høy helning. Årsaken kommer av at HEC-RAS runder av høyden til hver enkelt celle for den valgte avrundingen når terrengfilen blir lagret. For alle filene i dette prosjektet ble avrundingen 1/32 valgt. Den mest presise avrundingen er 1/128. Det var ikke tid til å undersøke om valg av avrunding utgjorde en forskjell for *TIN stitch edges* da mye arbeid allerede var gjennomført i terrengfilen med avrunding lik 1/32.

#### 4.4 Modell del 1

Etter kalibrering av Mannings  $n$  verdier i åtte områder av Årdalselva for del 1 av modellen, ble det kjørt en simulering med vannføringen fra restart filen som oppstart. Restart filen viste en for høy vannføring ut av elva,  $24.64 \text{ m}^3/\text{s}$ , som vil påvirke resultatet for simuleringen som blir kjørt med denne filen. En simulering med vannføringen  $Q_t$  i Figur 33 ble kjørt med seks timer lav vannføring lik  $1.14 \text{ m}^3/\text{s}$  i et forsøk på å stabilisere den høye vannføringen fra restart filen til et lavere nivå. De første syv timene med vannføring for  $Q_k$  simulert er vannføringen fra restart filen. Totalt ble det simulert 20 timer med et tidssteg lik to sekunder som resulterte i en varighet på 16t 13m 39s. Det oppstod en feilmelding for konvergens i modellen under simuleringen, men dette gjelder kun en celle og har derfor liten påvirkning for resultatet.



**Figur 33:** Vannføring modell del 1 etter simulering med restart fil hvor inndata er kjørt med lav vannføring seks timer for økning for å stabilisere vannføringen etter den høye vannføringen i restart filen.  $Q_t$  inndata er vann tappet fra Breivatnet,  $Q_k$  simulert er vannføringen ut av modellen og  $Q_k$  observert er målt vannføring ved Kalltveit (subtrahert vannføring fra Lyngsåna).

Fra Figur 33 viser  $Q_k$  simulert vannføring en svingning på slutten av simuleringen som betyr at det er en ustabilitet i modellen. Grunnet lang simuleringstid for både restart filen og selve kjøringen med ulike vannføringer, er ikke denne delen av modellen ferdig kalibrert.

Manglende batymetri i terrenget er kun gjeldende for del 1 av modellen. Spesielt utgjør dette en forskjell ved at *TIN stitch edges* oppstod i terrenget etter interpoleringen av ny batymetri. En unøyaktig terrengetmodell kan føre til en dårlig hydraulisk modell som er en mulig forklaring på dårlige resultater fra del 1 av modellen.

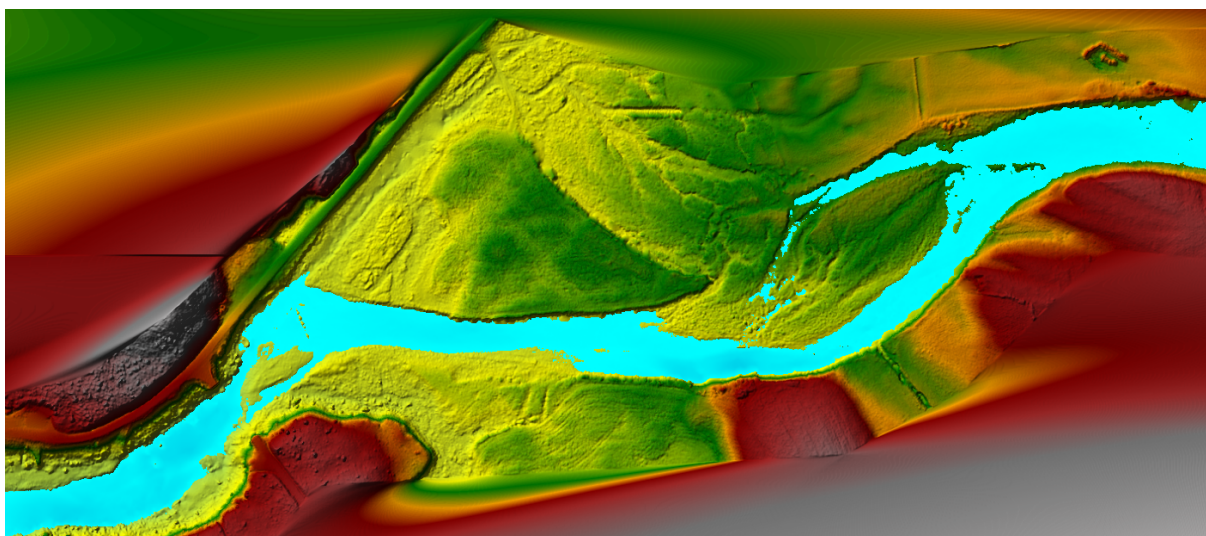
Ved en analyse av datasettet for vannføringen i Årdalselva som ble valgt til simuleringene, er det observert at tapping av vann fra Breivatnet har en kraftig økning (maksimum  $49.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) fordelt på syv timer. Derimot stiger vannføringen ved Kalltveit kun til maksimum  $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , men fordelt på 39



timer (all vannføring over  $9 \text{ m}^3/\text{s}$  i etterkant av tapping fra Breiavatnet). En mulig forklaring kan være lav vannstand i sjøene som holder mye av vannet igjen slik at det forekommer en stor differanse mellom tappet og målt vannføring. Et bedre resultat fra modellen kan muligens oppnås ved bedre valg av data for vannføring.

#### 4.5 Modell del 2

Verifisering av modell del 2 ble gjennomført ved bruk av ortofoto for sammenligning av dekningsgraden av vannet i elva. Etter kalibrering med Mannings  $n$  verdier ble det kjørt en ny simulering med like verdier som tidligere, altså en oppstrøms vannføring på  $2.9 \text{ m}^3/\text{s}$  og vannføring fra Lyngsåna på  $0.48 \text{ m}^3/\text{s}$ . Resultatet fra denne kalibreringen vises i Figur 34.



**Figur 34:** Dekningsområdet til vannet i elva under simulering av gjennomsnittlig vannføring for 22. til 24. Mai 2018 etter kalibrering av Mannings  $n$  verider for tre områder i modell del 2.

En sammenligning av dekningsområdet til vannet i Figur 34 mot ortofoto av elva med samme vannføring i Figur 35, viser en god korrelasjon mellom målt og simulert vannføring. Spesielt om 34 blir sammenlignet opp mot dekningsområdet til vannet etter simuleringen før kalibreringen av Mannings  $n$  verdier.



**Figur 35:** Ortofoto fra TerraTec som viser dekningsområdet til vannet i elva under innsamling av LiDAR data 22. til 24. mai 2018.

Modell del 2 ga et godt resultat for simulert vannføring når tilsig av vann fra nedslagsfeltet er inkludert i inndata. For videre bruk av denne modellen må altså en faktor for tilsig av vann fra nedslagsfeltet inkluderes med tapping av vann fra Breiavatnet.

Modell del 2 inneholder den roligste delen av Årdalselva som er grunn og har liten helning i forhold til oppstrøms strekning (modell del 1). Ingen data for batymetrien manglet for denne strekningen, og en korrekt terrengmodell er avgjørende for en nøyaktig hydraulisk modell [3]. Dette er en mulig forklaring på hvorfor modell del 2 ga bedre resultater enn modell del 1.

#### **4.6 Slipp av minstevannføring med minst mulig tap av vann**

Opphopning av sarr og dannelse av bunnisdammer hindrer vannføringen i elva som resulterer i at minstevannføringskravet ikke blir oppfylt på vinteren eller at mye vann må tappes fra Breiavatnet for å holde kravet. Dette er som regel et resultat av turbulente elvestryk, hastigheter over  $0.6 \text{ m/s}$  og en lengre kuldeperiode. For en konkret vurdering av tidspunktet for isdannelse i elva, er det nødvendig med målinger av vannhastighet. Kritisk hastighet for isdannelse er målt til  $0.6 \text{ m/s}$ .

*NVE rapport 20-2010 -Hvordan is i vassdrag dannes*[1] har utarbeidet en rekke tiltak for å minske isproblemer i elver. Rapporten konkluderer med at isproblemer kan unngås ved å få de mest sarrproduserende elvestrekningene islagt raskest mulig. Dette kan gjøres ved å holde en redusert og jevn vannføring i elva og en hastighet under  $0.6 \text{ m/s}$  på vinteren idet isleggingen starter. En stor og varierende vannføring vil føre til sarr, bunnisdammer og flere isganger og islegginger.

Etter modellen i HEC-RAS blir ferdigstilt, er det mulig å bruke modellen for å simulere ulike scenario med minstevannføring og dannelse av is i elva. En nøyaktig modell vil også kunne vise vannhastigheten i de forskjellige elvestrykene slik at det er mulig å forutse områder hvor kritisk hastighet blir overgått og isdannelse vil skape problemer for vannføringen.

## 5 Oppsummering og konklusjon

En modell for Årdalselva er satt opp i HEC-RAS med to ulike 2D områder. Det første 2D området utgjør strekningen fra Breiavatnet til Sendingfossen som inkluderer de fire sjøene Kråkehølsvatnet, Musdalsvatnet, Viglesdalsvatnet og Hiavatnet. Det andre 2D området utgjør strekningen fra Sendingfossen til målestasjonen Kalltveit i Årdal. Denne strekningen inkluderer sammenflettingen med elven Lyngsåna.

Terrengmodellen ble satt opp med LiDAR-data samlet inn av TerraTec, men inkluderte kun terrenget inntil 6 m under vannoverflaten. Konstruksjon av manglende batymetri ble gjort for å gjøre dette datasettet komplett. Etter interpolering av den nye batymetrien oppstod det en trappelignende kant spesielt i terreng med mye helning som følge av at HEC-RAS avrunder høyden til hver celle. Dette kommer av valg av avrunding når terrengfilen blir lagret, og kan ikke endres i etterkant uten tap av allerede gjennomført arbeid.

Sjøene i Årdalselva utgjør en stor faktor for tidsforsinkelsen av vannet mellom Breiavatnet og målestasjonen Kalltveit. For oppsettet av modellen ble det valgt å håndtere sjøene ved å justere cellestørrelsen ved bruk av justerte regioner. Dette reduserte antall beregningspunkt betraktelig og fører til en kortere simuleringstid for modellen.

Todimensjonal modellering ble valgt fremfor endimensjonal som resulterte i lang simuleringstid hovedsaklig for del 1 av modellen. Dette førte til at del 1 av modellen ikke ble ferdig kalibrert.

En restart fil ble lagret for modell del 1 grunnet store sjøer som bør fylles med vann for å minke simuleringstiden og gjøre simuleringen mer stabil. Grunnet lang simuleringstid for modellen ble det ikke tid til en finjustering av vannføringen i elva. Restart filen ble brukt som startbetingelse for senere simuleringer, noe som har påvirket resultatet negativt. Restart filen hadde for mye vann etter endt simulering, og et forsøk på å senke denne vannføringen ble gjort. Simuleringen startet med lav vannføring i 6 timer før inndata ble kjørt, men resultatet viste en ustabilitet i modellen.

Modell del 2 gir gode resultater både før og etter kalibrering, om tilsig av vann fra nedslagsfeltet er inkludert i inndata. En visuell verifikasjon ble gjort ved å sammenligne vanndekt areal etter simuleringen mot vanndekt areal fra ortofoto både før og etter kalibrering. Det ble observert en god korrelasjon mellom vanndekt areal før og etter kalibreringen. Modell del 2 gir gode resultater, men tilsig av vann må inkluderes som en faktor ved fremtidige simuleringer med modellen.

Grunnet lang simuleringstid og problemer med oppsettet av modell del 1, ble ikke et isdekke lagt til i modellen. Etter en kalibrering av modell del 1 og oppsett av et isdekke i elva, er det mulig å bruke modellen for å simulere ulike scenario med minstevannføring og dannelse av is i elva. En nøyaktig modell vil også kunne vise vannhastigheten i de forskjellige elvestrykene slik at det er mulig å forutse områder hvor kritisk hastighet blir overgått og isdannelse vil skape problemer for vannføringen.

En vurdering av tidsforsinkelsen av vannet om vinteren ble gjort ved å analysere data av vannføringen fra Breiavatnet, Kalltveit og Lyngsåna. En tidsforsinkelse av vannet ble funnet for vinteren og to for sommeren etter krav om ulike forbehold. Disse forbeholdene inkluderer en differanse i tapping fra Breiavatnet på minimum  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$  mellom to timer, i tillegg til tilnærmet konstante verdier for de andre faktorene. Analysen tilsier en tidsforsinkelse av vannet på 22 timer på vinteren og 12-13 timer på sommeren. Det er vanskelig å koble sammenhengen mellom tidsforsinkelsen og danning av is i elva på vinteren ved å kun analysere en hendelse. For en grundigere vurdering er data for flere år nødvendig, i tillegg til data for vannhastigheten i elva.

Vannføringen i elva gikk under minstevannføringskravene ved 31 ulike episoder fordelt gjennom år 2014 til og med år 2017. De fleste episodene forekom i år 2014 grunnet lite tapping av vann fra

Breiavatnet. Trenden for lufttemperaturen for årene 2014 til og med 2016 viser en forlengelse av varmeperioden på sommerene og en trend mot mildere temperaturer i november og desember. Mildere vintertemperatur kan føre til isproblemer i elva ved at den holdes åpen lengre og sarr og bunnisdammer dannes. Dette fører til at vannet holdes tilbake i elva, og minstevannføringskravet ikke blir møtt med mindre mer vann tappes fra Breiavatnet.

## 6 Videre arbeid

Med bakgrunn i arbeidet utført under dette prosjektet foreslås følgende tiltak til videre arbeid med modellen og temaet.

LiDAR-data for elva manglet for elvebunnen dypere enn seks meter under vannoverflaten. Det er anbefalt å kartlegge og samle inn data for denne batymetrien slik at modellen blir mest mulig nøyaktig. *TIN stitch edges* som oppstod etter interpoleringen av den nye batymetrien vil muligens bli mindre fremtredende ved valg av en mer presis avrunding enn det som ble valgt for dette prosjektet.

Del 1 av modellen må kalibreres ytterligere og et isdekke bør legges til i modellen og simulert mot målte verdier på vinteren. Dette bør gjøres for å oppnå en hydraulisk modell som viser sammenhengen mellom danning av is om vinteren, tidsforsinkelsen i elva og nødvendig vannføring for å overholde minstevannføringskravet ved målestasjonen Kalltveit.

Ytterligere målinger og observasjoner er ønskelig for å undersøke dannelse av is i Årdalselva. Spesielt gjelder dette målinger av vannhastigheten og data av vann tappet fra Grytetjørna som utgjør en usikker faktor for vannføringen målt ved Kalltveit.

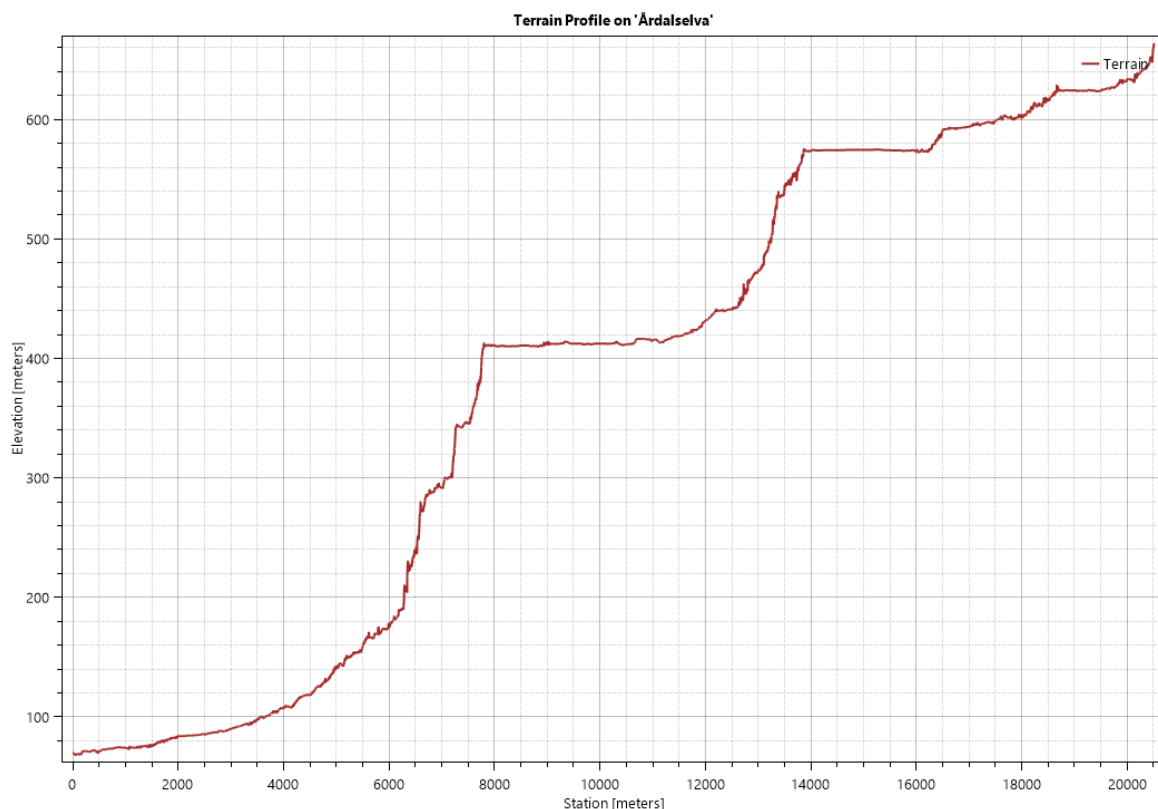


## Referanseliste

- [1] Randi P. Asvall. *Hvordan is i vassdrag dannes – og hvordan vassdragsreguleringer påvirker isen i norske vassdrag*. URL: [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2010/rapport2010\\_20.pdf?epslanguage=no](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2010/rapport2010_20.pdf?epslanguage=no).
- [2] Alexander Betsholtz og Beatrice Nordlöf. *Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS, A case study on Høje river*. 2017. URL: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8904721&fileId=8904723>.
- [3] Gary W. Brunner. *HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0*. Feb. 2016. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%202D%20Modeling%20Users%20Manual.pdf>.
- [4] Gary W. Brunner. *HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual Version 4.1*. Jan. 2010. URL: [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS\\_4.1\\_Reference\\_Manual.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf).
- [5] Gary W. Brunner. *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0*. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>.
- [6] Gary W. Brunner. *HEC-RAS River Analysis System Supplemental to HEC-RAS Version 5.0.4 User's Manual*. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC), apr. 2018. URL: [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS\\_5.0.4\\_Supplemental\\_UsersManual.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_5.0.4_Supplemental_UsersManual.pdf).
- [7] Gary W. Brunner. *HEC-RAS River Analysis System, User's Manual Version 5.0*. Feb. 2016. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%5C%205.0%5C%20Users%5C%20Manual.pdf>.
- [8] esri. 2019. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/conversion/las-dataset-to-raster.htm>.
- [9] esri. 2019. URL: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>.
- [10] Evelyn G. Hutchinson. *A treatise on limnology: 1 : Geography, physics, and chemistry*. eng. New York, 1957.
- [11] Miljødirektoratet. *Vassdragsutbygging*. 2019. URL: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/ferskvann/vassdragsutbygging/>.
- [12] *Minstevannføring*. Jan. 2009. URL: <https://www.nve.no/vann-vassdrag-og-miljo/miljotilsyn/minstevannforing/?ref=mainmenu>.
- [13] The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. Jul. 2019. URL: [http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS\\_1\\_4\\_r15.pdf](http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf).
- [14] Lars Skeie. *Hydraulisk modellering av kraftverksdrift i Tokkeåi*. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2476073>.
- [15] *Vassdragshåndboka : håndbok i forbygningsteknikk og vassdragsmiljø*. nob. Trondheim, 1998.

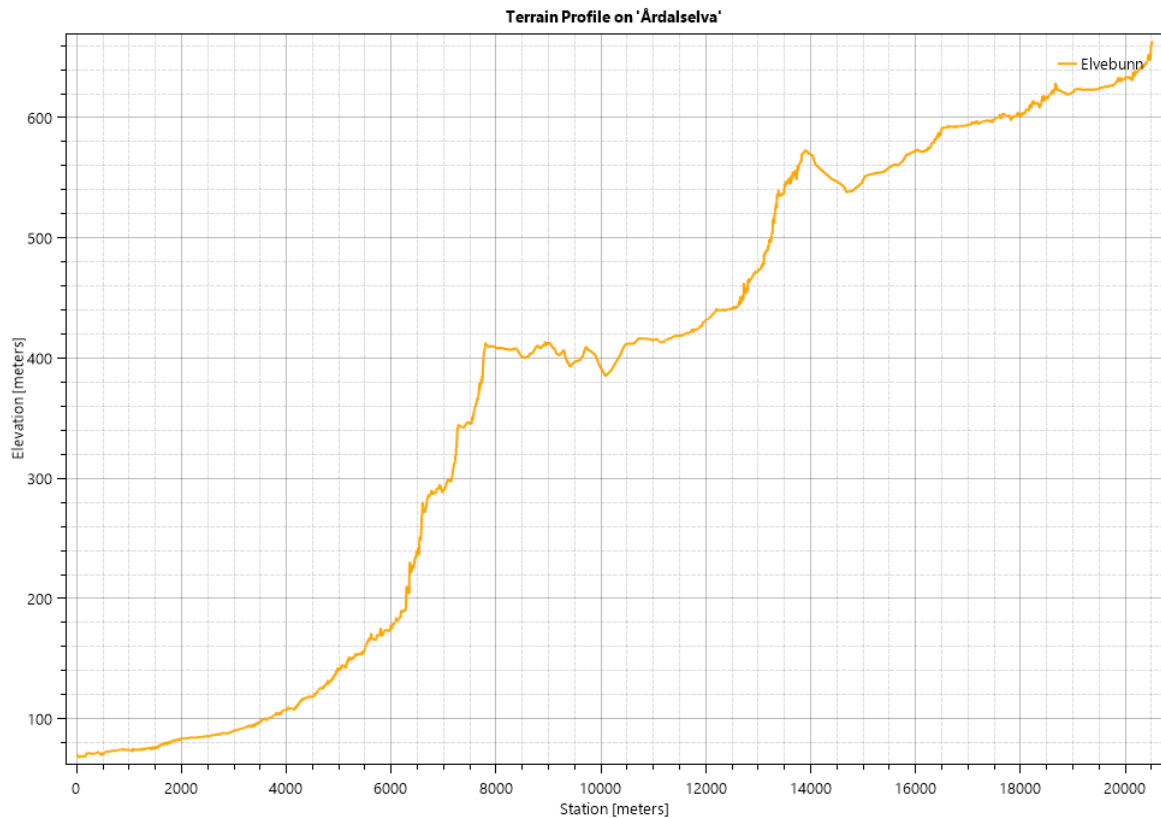
## A Høydeprofil av Årdalselva

Figur A.1 viser høydeprofilen til Årdalselva som starter ved målestasjonen Kalltveit i Årdal og går til Breiavatnet. Høydeprofilen er kun enkelt tegnet i funksjonen *Profile Lines* under *RAS Mapper*-vinduet til HEC-RAS. Elva går fra ca 70 m.o.h til 665 m.o.h.



**Figur A.1:** Høydeprofil av Årdalselva fra målestasjonen Kalltveit til utløpet av Breiava før dataene blir etterfylt (?).

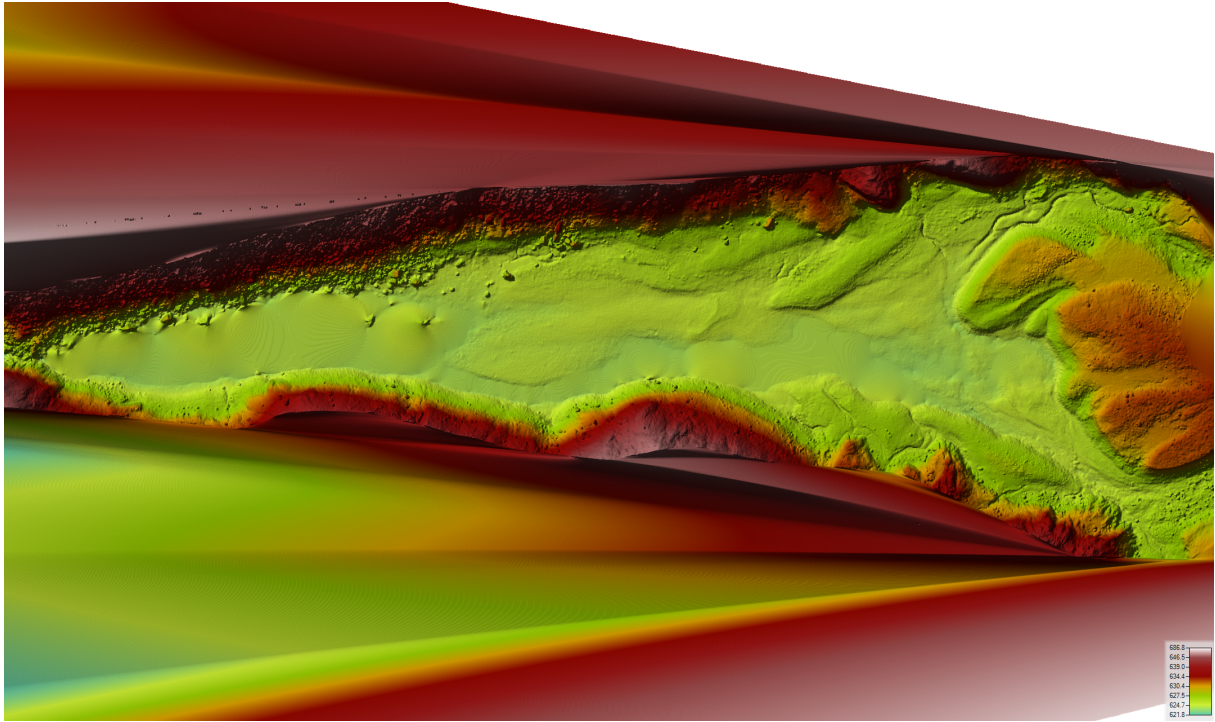
Figur A.2 viser samme profil men for det nye terrenget hvor dataene er etterfylt på grunn av manglende batymetri fra LiDAR-datasettet.



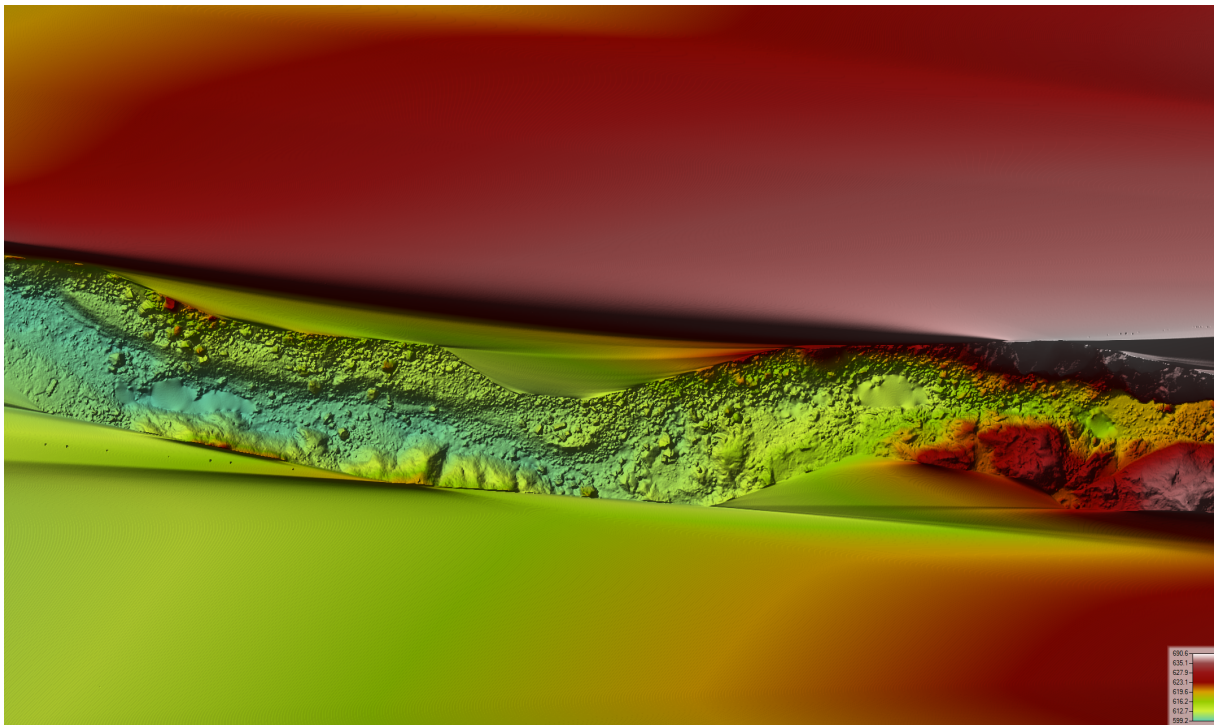
*Figur A.2: Høydeprofil av Årdalselva fra målestasjonen Kalltveit til utløpet av Breiavatnet etter konstruering av manglende batymetri.*

## **B Områder med manglende batymetri**

Dette vedlegget er en oversikt over utsnitt fra terrengfilen for områdene som mangler batymetri. Manglende batymetri under 50 m er ikke vist i figurene under, da det ble besluttet at de ikke skulle endres så lenge en lekkasje av vann ikke oppstod under simulering.

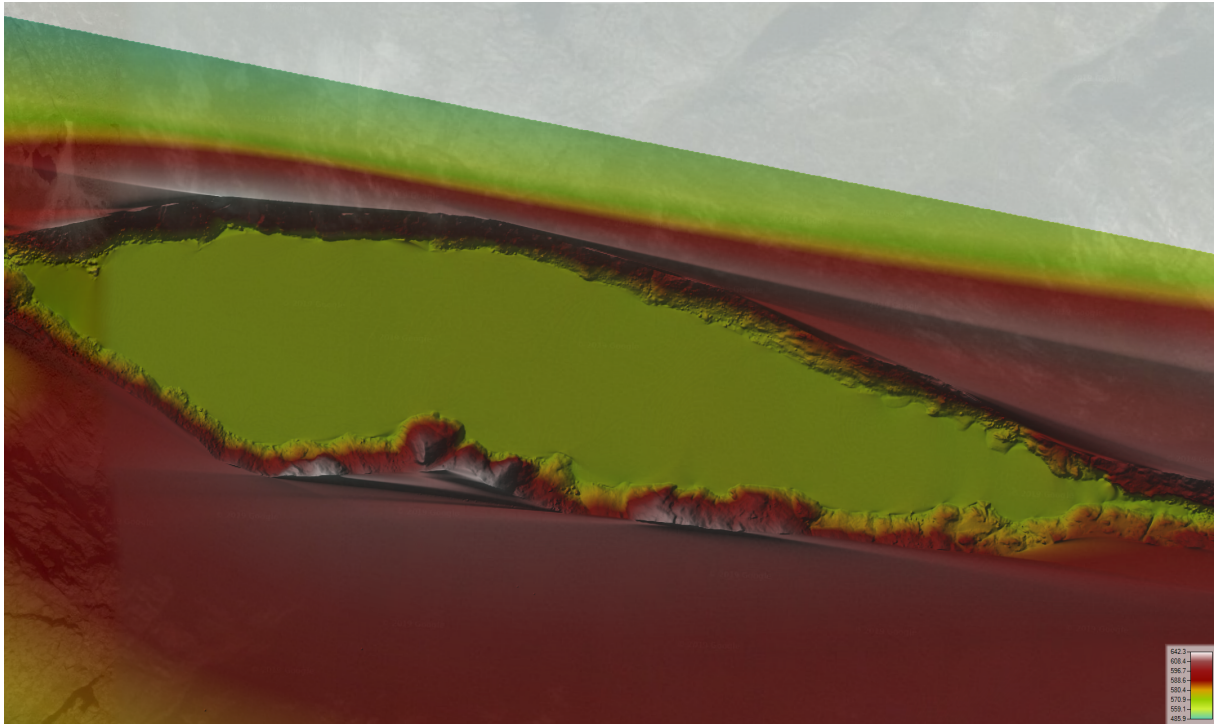


**Figur B.1:** Manglende batymetri for Kråkeholsvatnet.

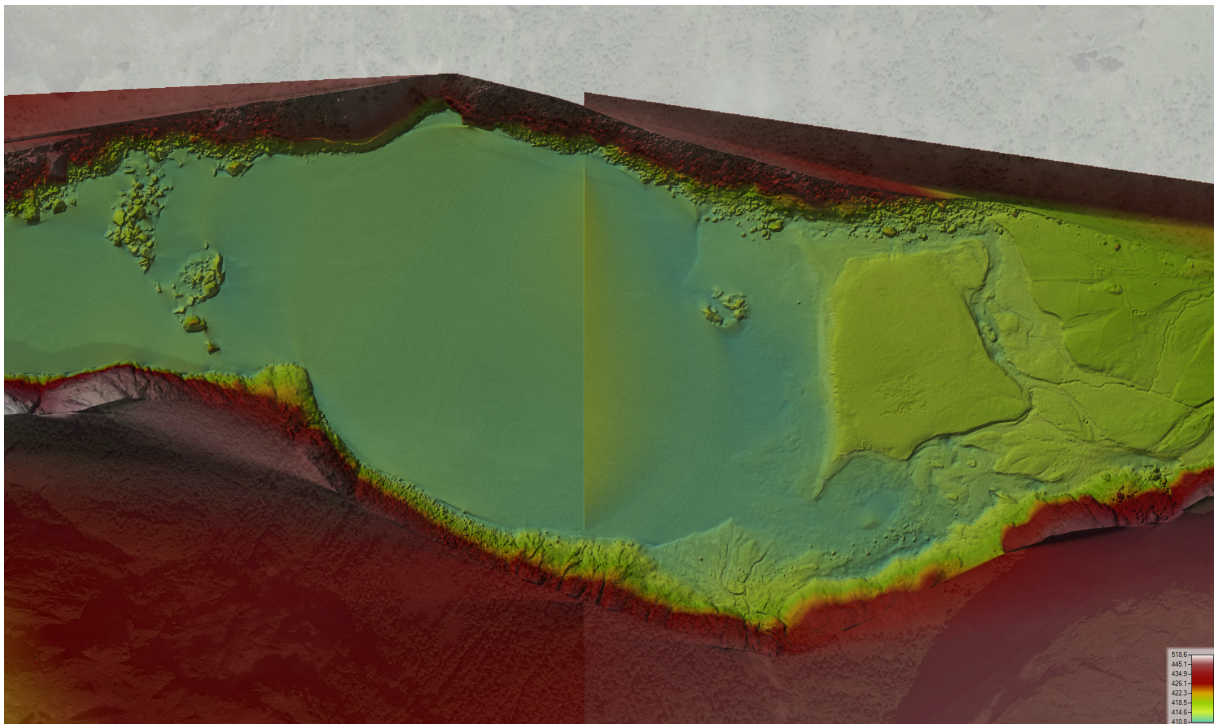


**Figur B.2:** Manglende batymetri nedstrøms Kråkeholsvatnet.



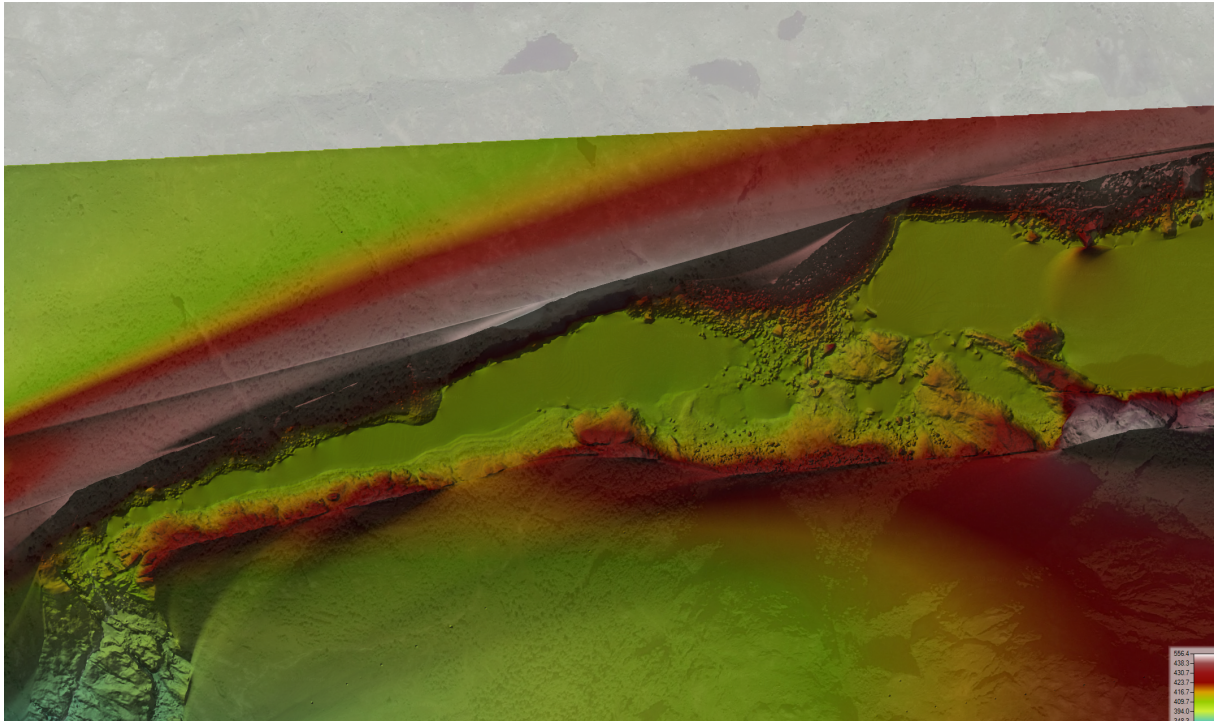


*Figur B.3: Manglende batymetri i Musdalsvatnet.*

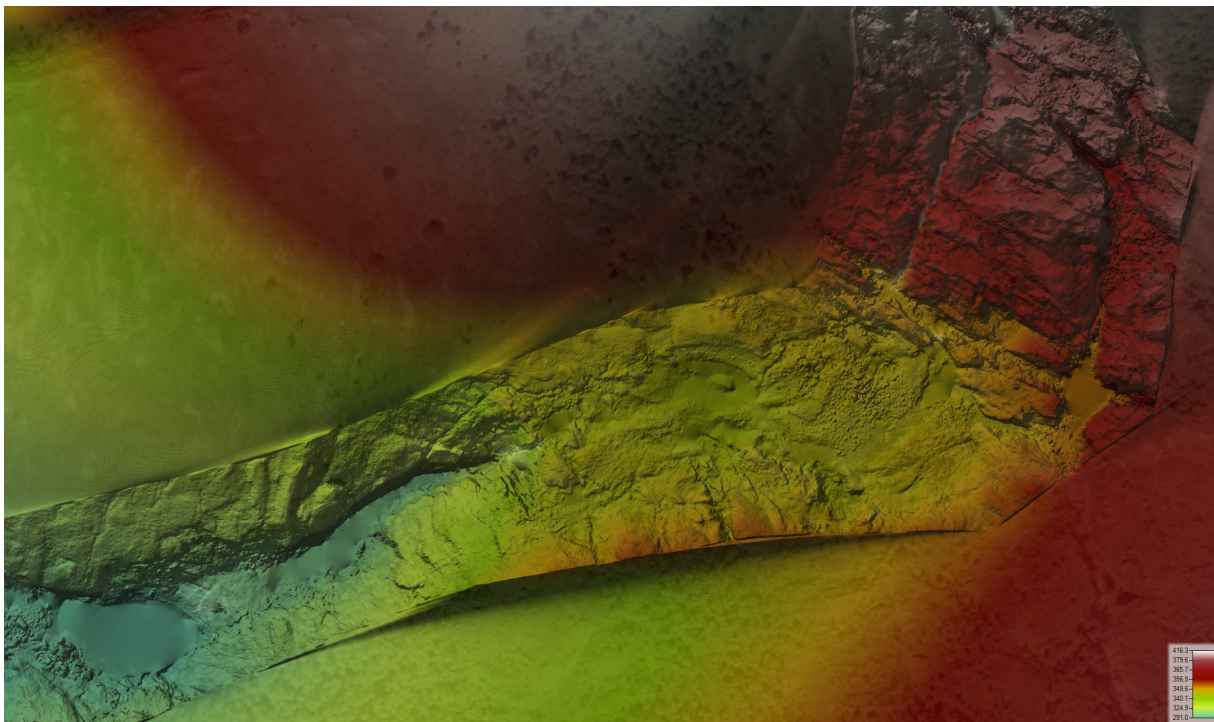


*Figur B.4: Manglende batymetri i innløpet til Viglesdalsvatnet.*





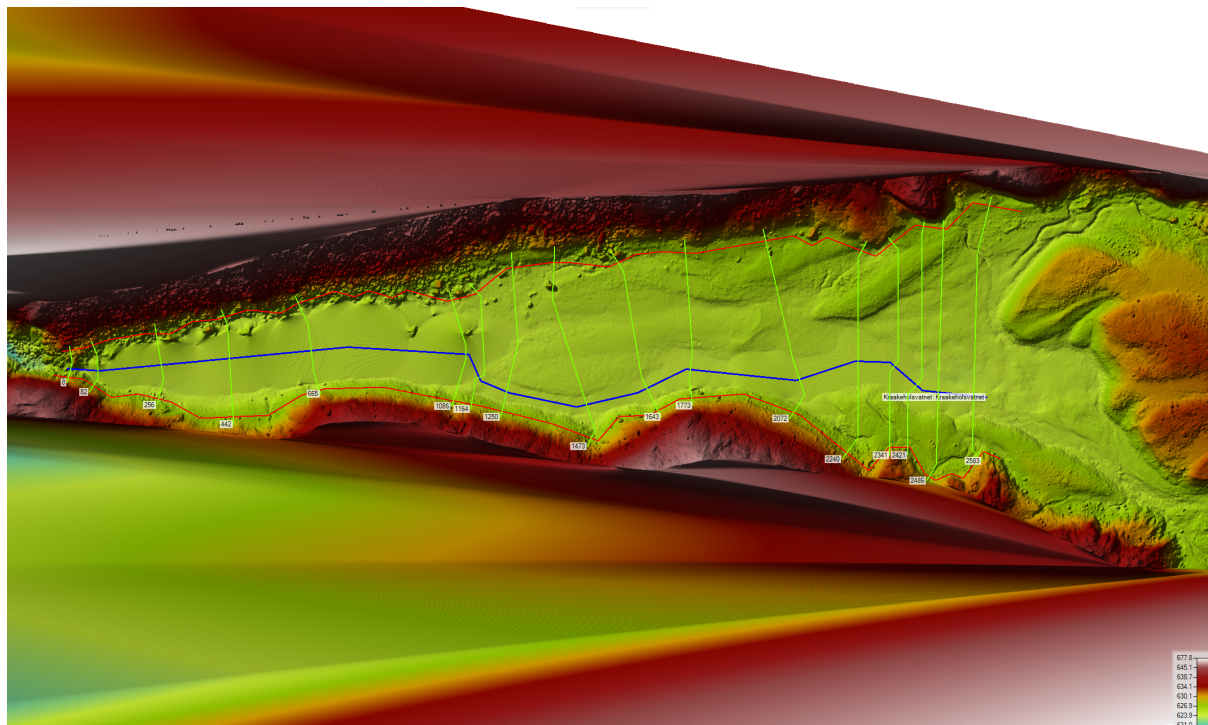
**Figur B.5:** Manglende batymetri i utløpet av Viglesdalsvatnet og Hiavatnet



**Figur B.6:** Manglende batymetri i Granefossane og Hiafossen som ligger nedstrøms Hiavatnet.

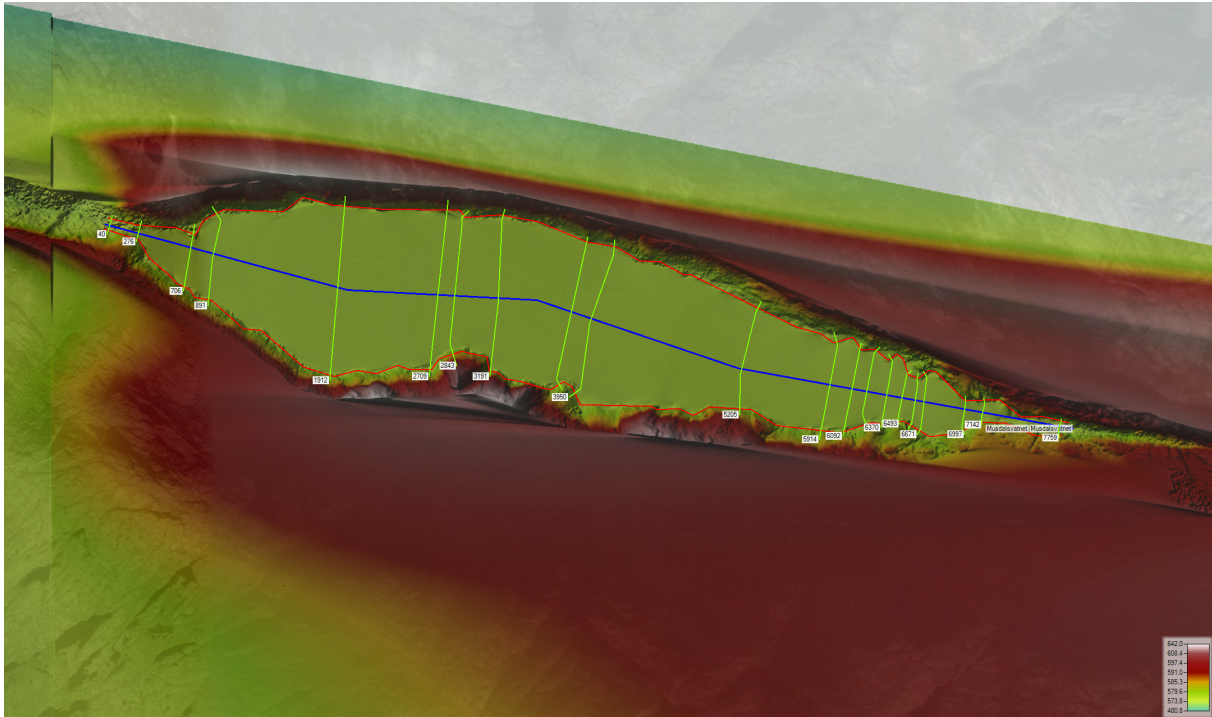
## C Konstruksjon av manglende batymetri

Dette vedlegget viser figurer av alle områdene hvor strømningslinjer, elvebanker og tverrsnitt er blitt tegnet for hensikten av å konstruere en batymetri manuelt.

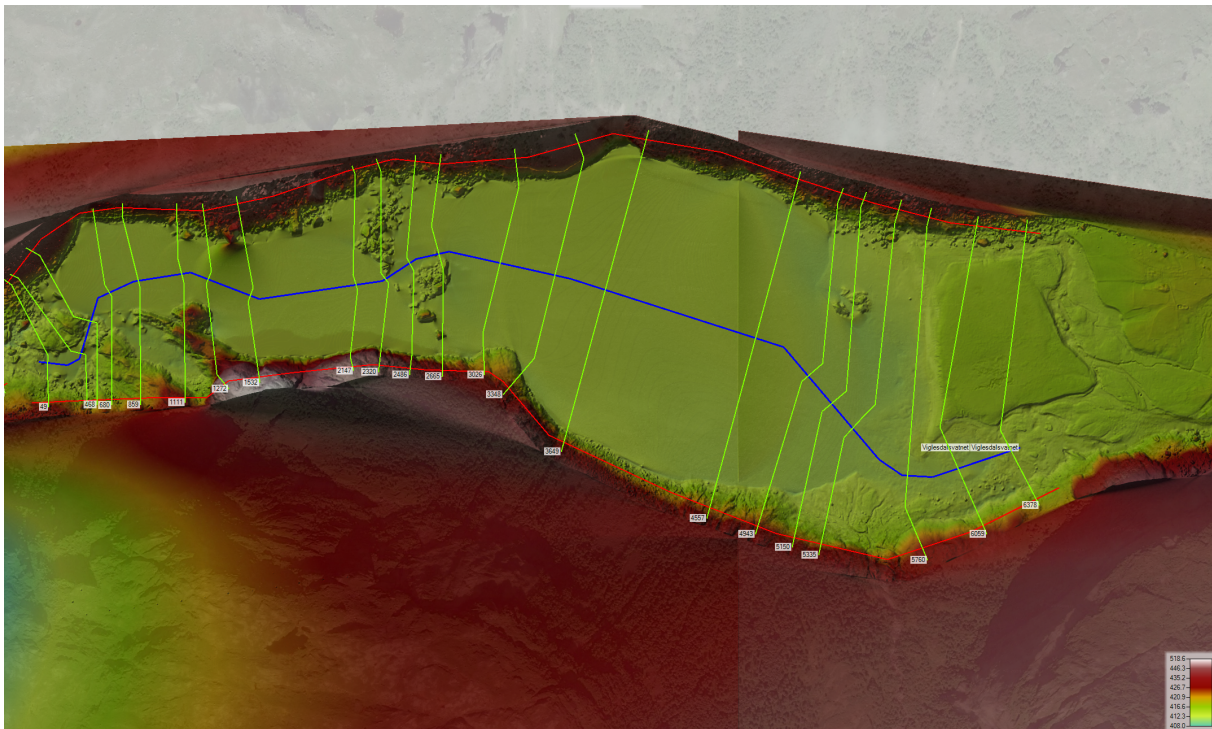


*Figur C.1: Oversiktsbilde av Kråkeholsvatnet. Her er 17 tverrsnitt tegnet.*



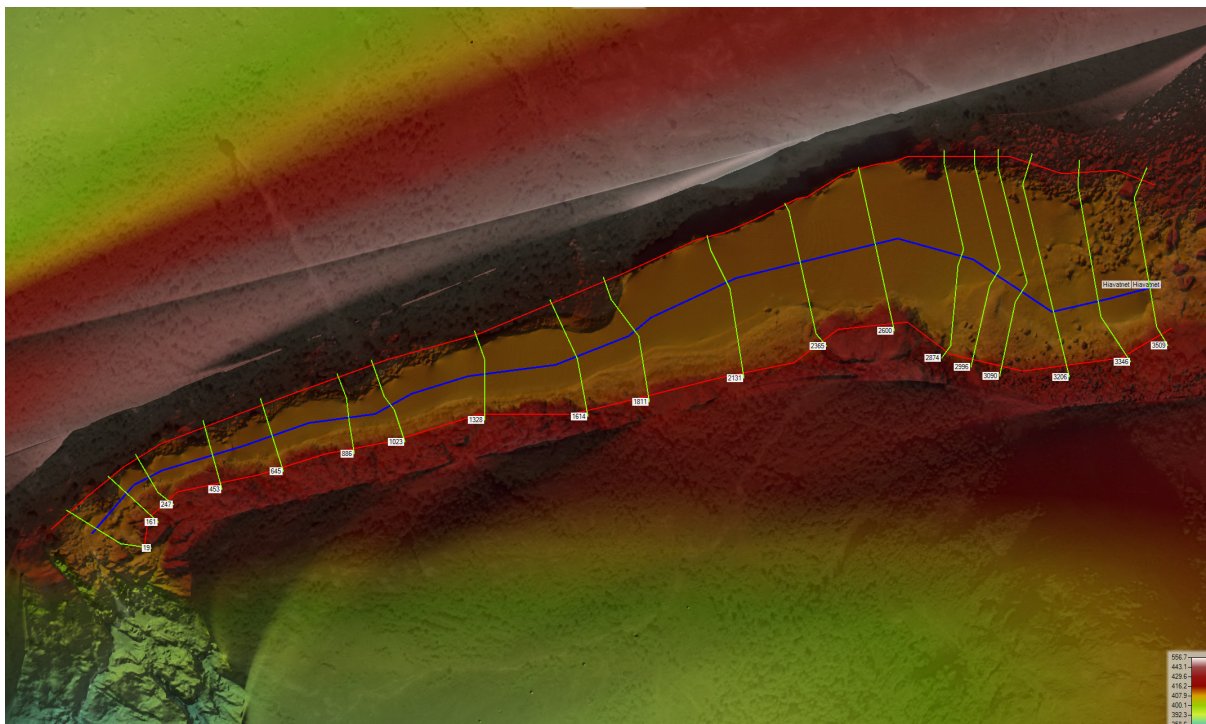


**Figur C.2:** Oversiktsbilde av Musdalsvatnet. Her er 21 tverrsnitt tegnet.



**Figur C.3:** Oversiktsbilde av Viglesdalsvatnet. Her er 22 tverrsnitt tegnet.





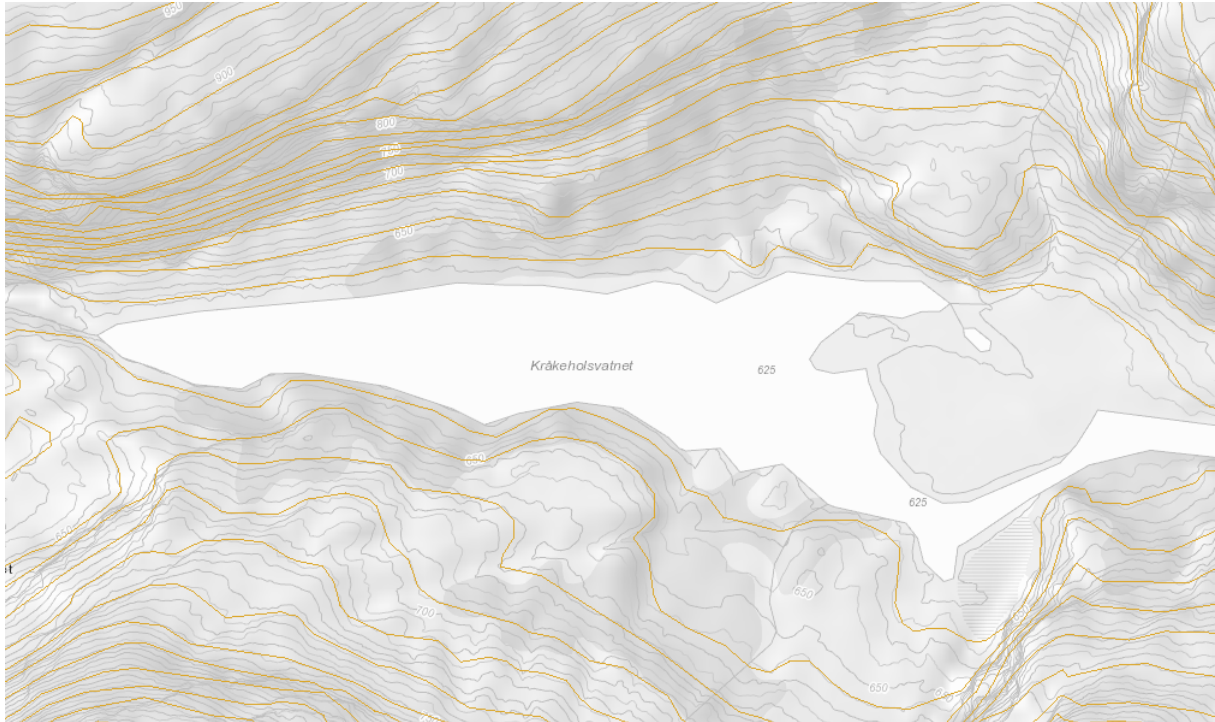
*Figur C.4: Oversiktsbilde av Hiavatnet. Her er 19 tverrsnitt tegnet.*

## D Grunnlag for valg av konstruert batymetri

Dette vedlegget viser kartutsnitt av sjøene som mangler batymetri med terrenget rundt i Årdalselva. I tillegg vises både terreng- og dybdekart for de sjøene som er studert på grunn av lignende terreng, form og arealflate. Alle kartutsnittene fra NVE Atlas er plottet med høydeprofil N50, som vil si at de oransje konturlinjene i terrenget representerer hver 50 m. For de sjøene som ikke har dybde data i NVE Atlas, har informasjonen blitt hentet fra dybdekart.no.

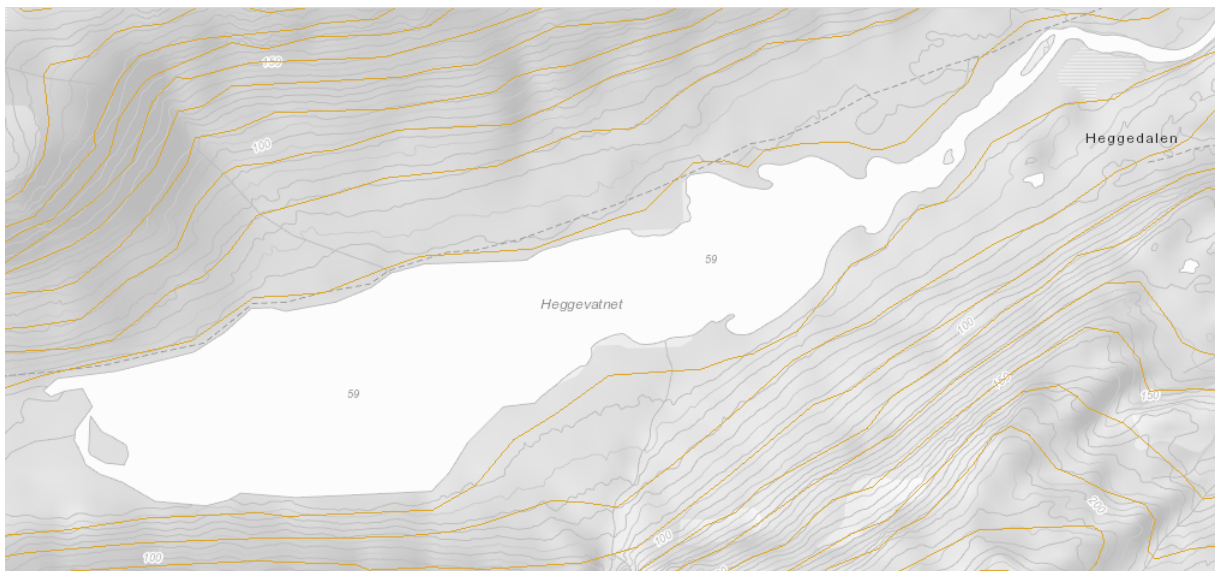
### D.1 Kråkeholsvatnet

I Figur D.1 vises et terrengkart for Kråkeholsvatnet. Kråkeholsvatnet er den første sjøen i elva og ligger ca. 830 m nedstrøms Breiavatnet. Den har en lengde på ca. 840 m og et flateareal på 0.142 km<sup>2</sup> og er derfor også den minste sjøen. De sjøene som studeres for Kråkeholsvatnet er Heggvatnet (også kalt Heggvatnet) i 9372 Gibostad og Granavatnet i 7670 Inderøy.



**Figur D.1:** Terrenkart over Kråkeholsvatnet.

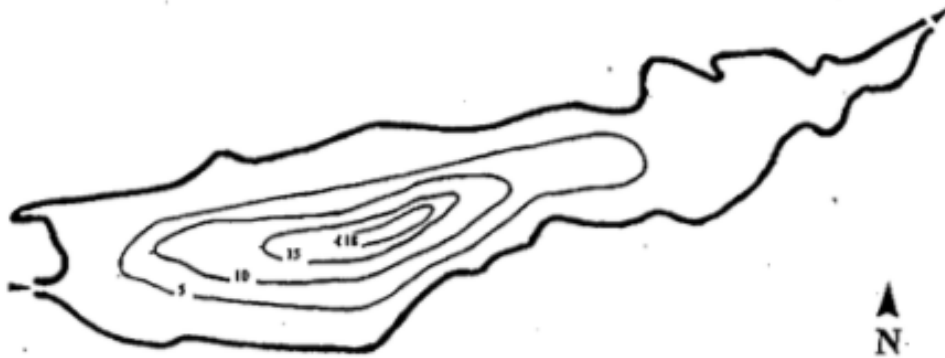
Heggvatnet har et flateareal på 0.16 km<sup>2</sup> og har en maksdybde på 18 m. I Figur D.2 vises terrenkartet for Heggvatnet.



**Figur D.2:** Terrenkart over Heggvatnet.

I Figur D.3 vises et dybdekart for Heggvatnet med en ekvidistans på 5 m for batymetrien. Ved en studering av begge kartene kan det observeres at batymetrien kun endrer seg 0-5 m i området hvor terrenget har minst helning.

Heggvatnet Lnr: 50788 Udnr: 194.362

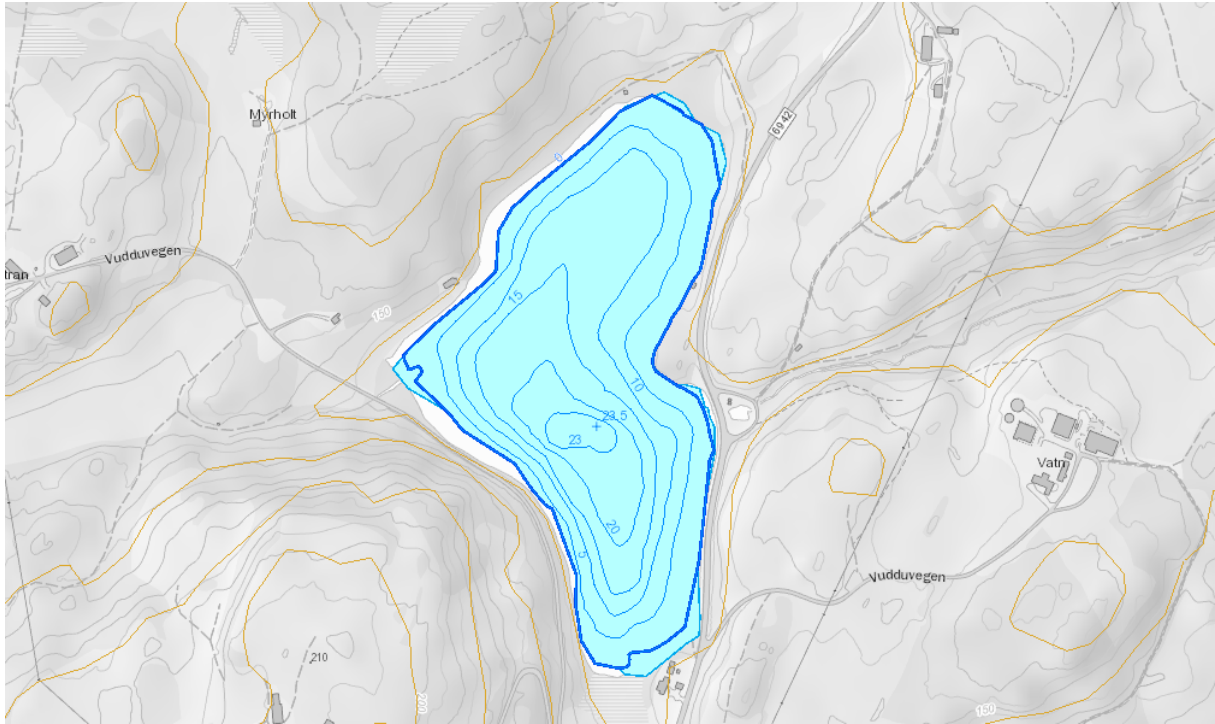


Figur 35.  
Dybdekart over Heggdalsvatn. Målestokk 1 : 6.500.

FYLKESMANNEN I TROMS

*Figur D.3: Dybdekart over Heggvatnet.*

Granavatnet har et flateareal på  $0.13 \text{ km}^2$  og har en maksdybde på 23.5 m. I Figur D.4 vises både terrenget og dybden til Granavatnet med en ekvidistanse på 5 m for batymetrien. Her vises det at maksdybden ligger hvor terrenget har størst helning.



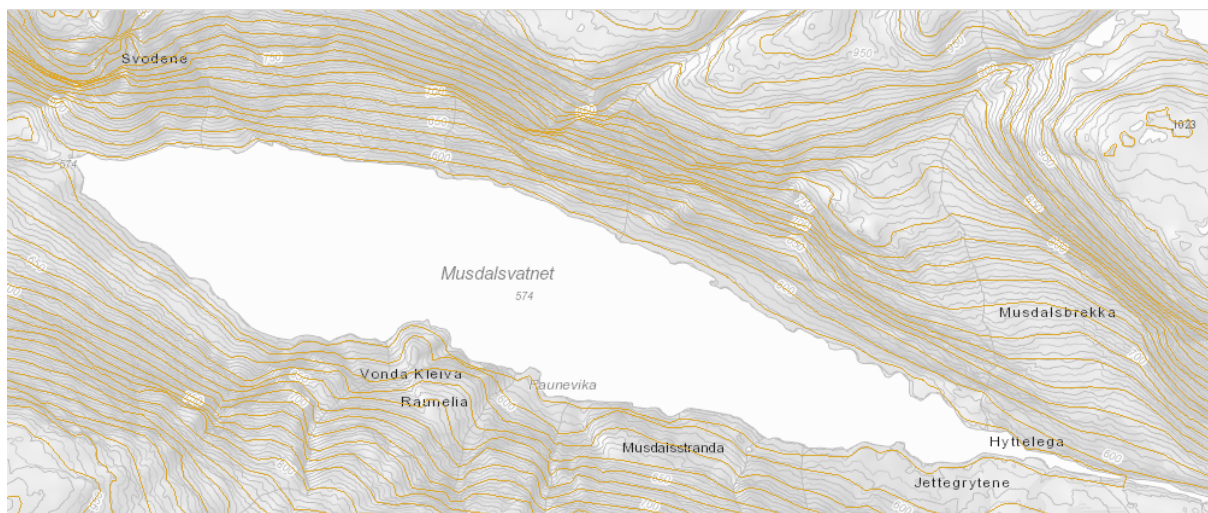
**Figur D.4:** *Terreng-og dybdekart over Granavatnet.*

For Kråkeholsvatnet ble det antatt at den dypeste batymetrien ligger nærmest utløpet fordi det bratteste terrenget ligger i dette området. Her er det antatt et stigningstall på 1:5, som gir en maksdybde på ca. 20 m, hvor den dypeste elvebunnen ligger på 618.5 m.o.h. For resten av sjøen er det mindre data som mangler på grunn av et flatere terreng. Her blir batymetrien antatt til å ha et stigningstall mellom 0.5:10 til 1:10.

## **D.2 Musdalsvatnet**

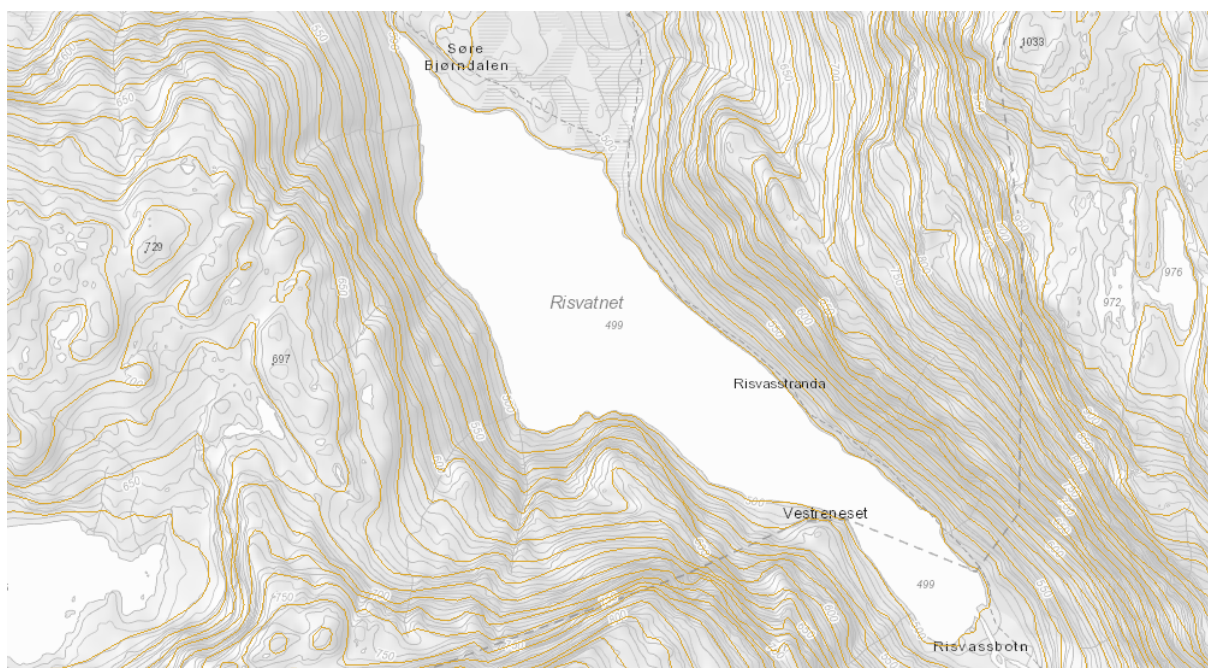
I Figur D.5 vises et terrengkart for Musdalsvatnet. Musdalsvatnet er den andre sjøen i modellen og ligger ca. 4320 m nedstrøms Breiavatnet. Den har en lengde på ca. 2150 m og har et flateareal på 0.59 km<sup>2</sup>. De sjøene som brukes for Musdalsvatnet er Risvatnet i 5583 Vikedal og Martadalsvatnet i 6871 Jostedal.





**Figur D.5:** Terrengkart over Musdalsvatnet.

Risvatnet har et flateareal på 0.47 km<sup>2</sup> og har en maksdybde på 34.5 m. I Figur D.6 vises et terrengkart for Risvatnet.



**Figur D.6:** Terrengkart over Risvatnet.

I Figur D.7 vises et dybdekart for Risvatnet med en ekvidistanse på 5 m.

Ringsland 58

1314 II

038 Vikedaloch

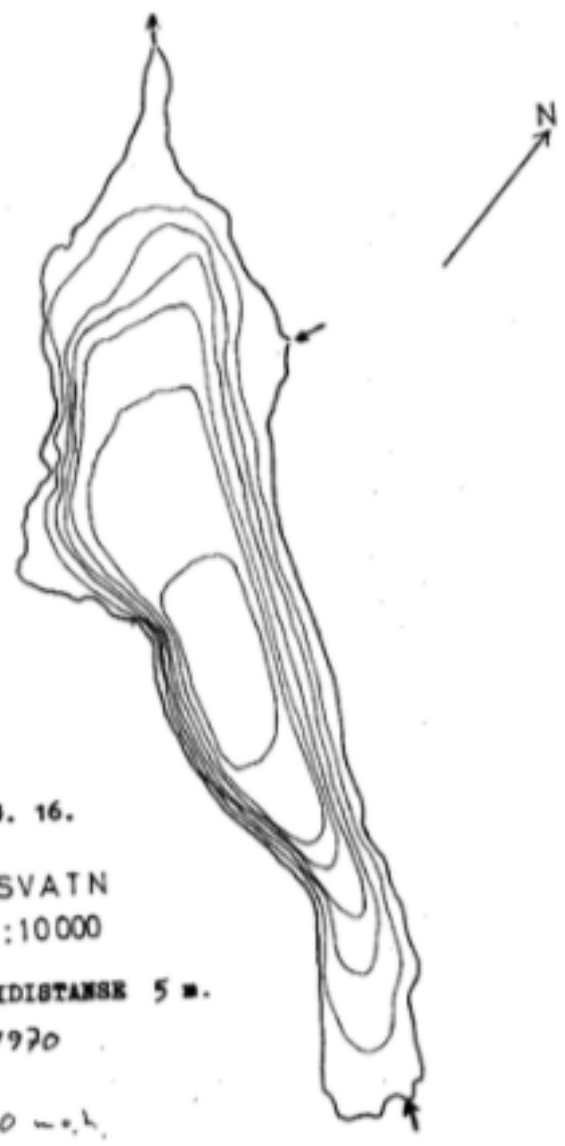
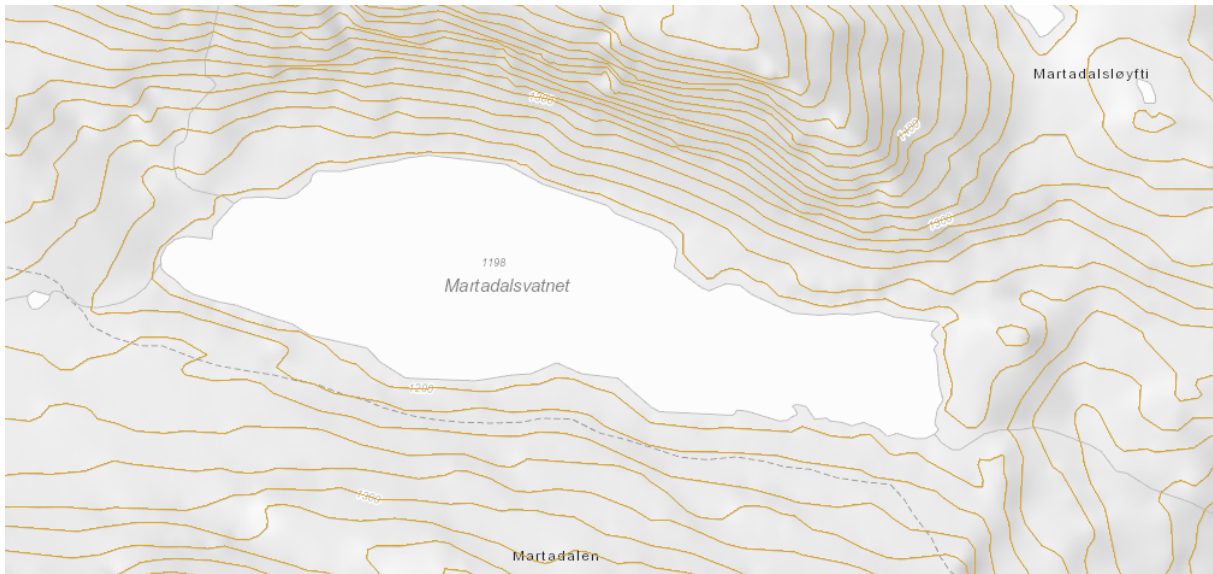


FIG. 16.  
RISVATN  
M1:10000  
EKVIDISTANSE 5 m.  
1970  
500 m.

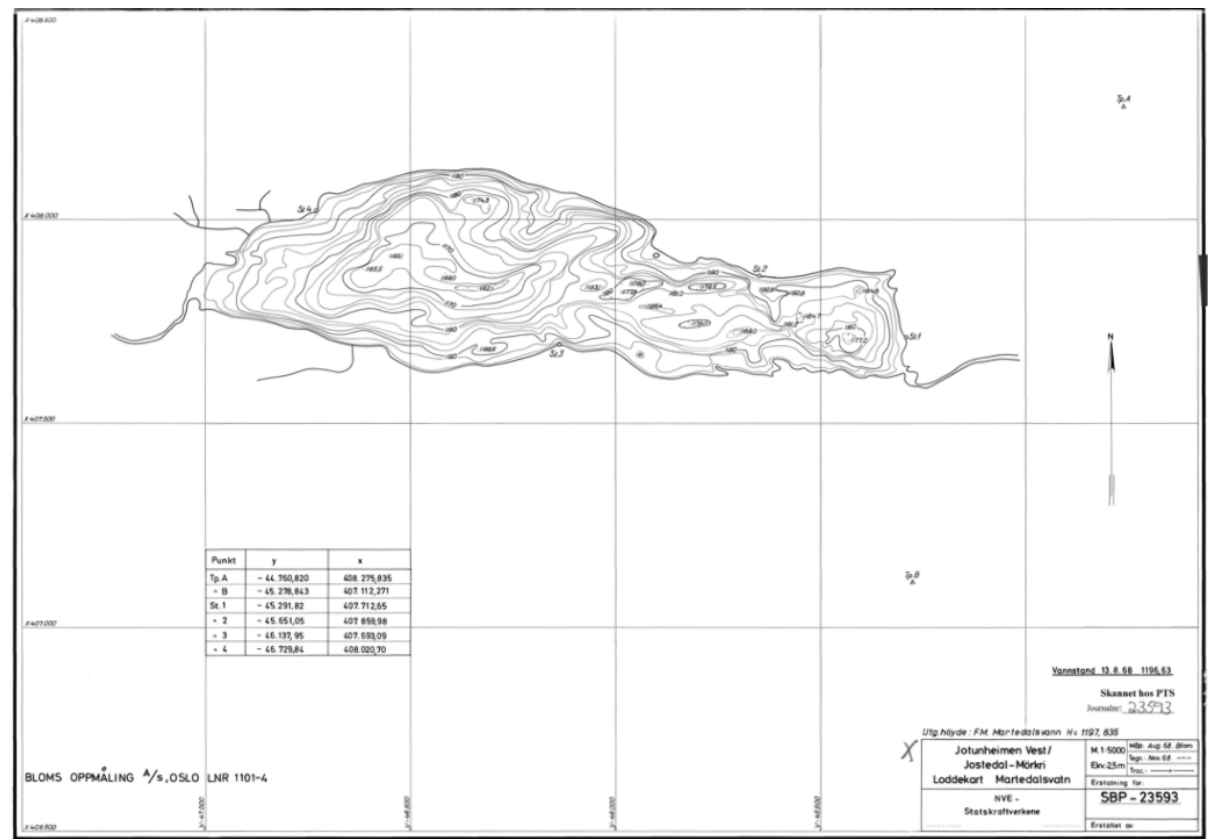
Figur D.7: Dybdekart over Risvatnet.

Martadalsvatnet har et flateareal på 0.58 km<sup>2</sup> og har en maksdybde på 35.4 m. I Figur D.8 vises et terrengkart for Martadalsvatnet.



Figur D.8: Terrengkart over Martadalsvatnet.

I Figur D.9 vises et detaljert dybdekart for Martadalsvatnet med en ekvidistanse på 2.5 m. Begge kartene viser at terrenget har størst helning på nordsiden.

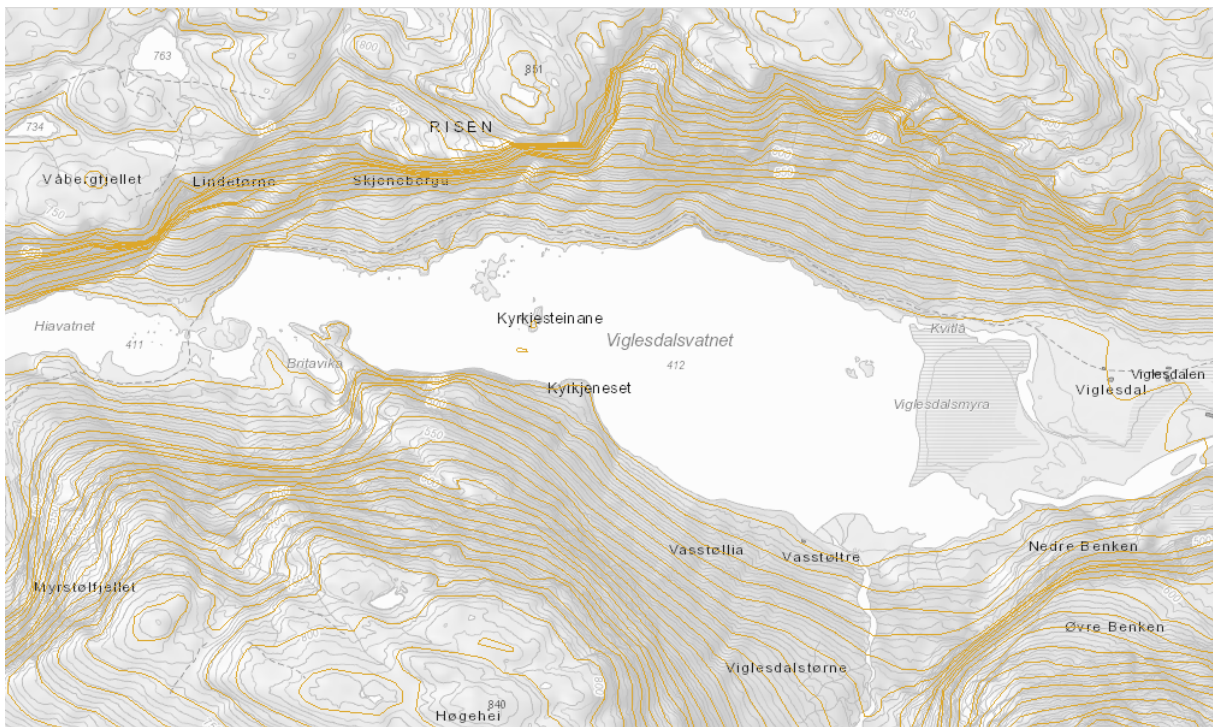


Figur D.9: Dybdekart over Martadalsvatnet.

For Musdalsvatnet ble det antatt en maksdybde på 35 m. Det bratteste terrenget ligger på nordsiden (samme som for Martadalsvatnet) så helningen ble antatt til å være større på denne siden enn på motsatt side.

### D.3 Viglesdalsvatnet

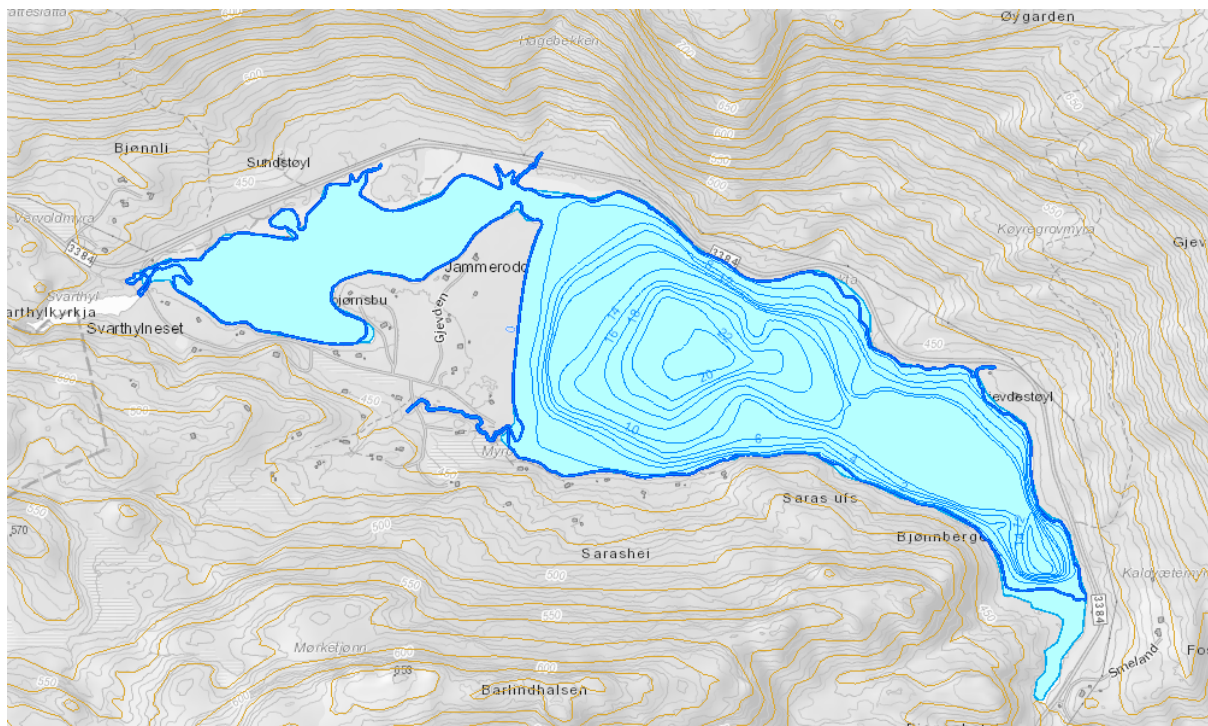
I Figur D.10 vises et terrengekart for Viglesdalsvatnet. Viglesdalsvatnet ligger ca. 9480 m nedenfor Breiava. Den har en lengde på ca. 1845 m og et flateareal på 0.67 km<sup>2</sup>. Den sjøen som studeres for Viglesdalsvatnet er Gjevden i 4865 Åmli.



**Figur D.10:** Terrengekart over Viglesdalsvatnet.

Gjevden har et flateareal på 0.71 km<sup>2</sup> og har en maksdybde på 22 m. I Figur D.11 vises både terrenget og dybden til Gjevden med en ekvidistanse på 2 m.



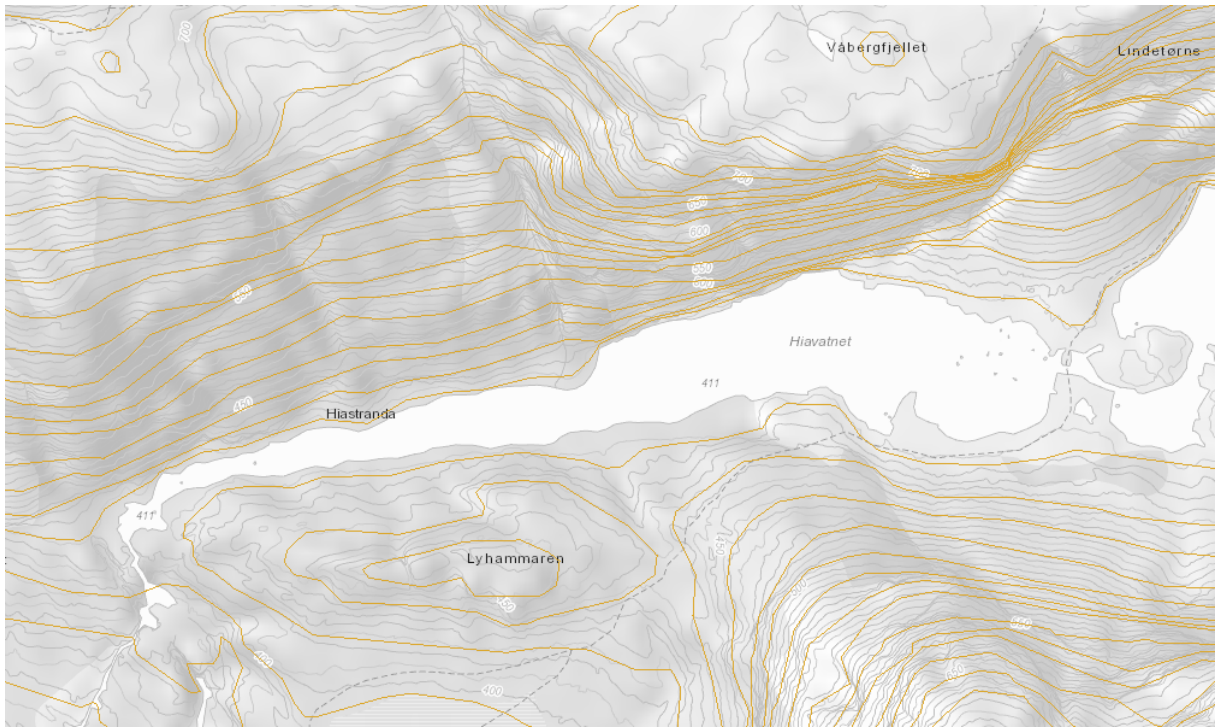


**Figur D.11:** *Terreng-og dybdekart over Gjevdalen.*

For Viglesdalsvatnet ble det antatt at området rundt Kyrkjesteinane og Viglesdalsmyra har mindre helning. Maksdybden ble satt til 28 m oppstrøms Kyrkjesteinane.

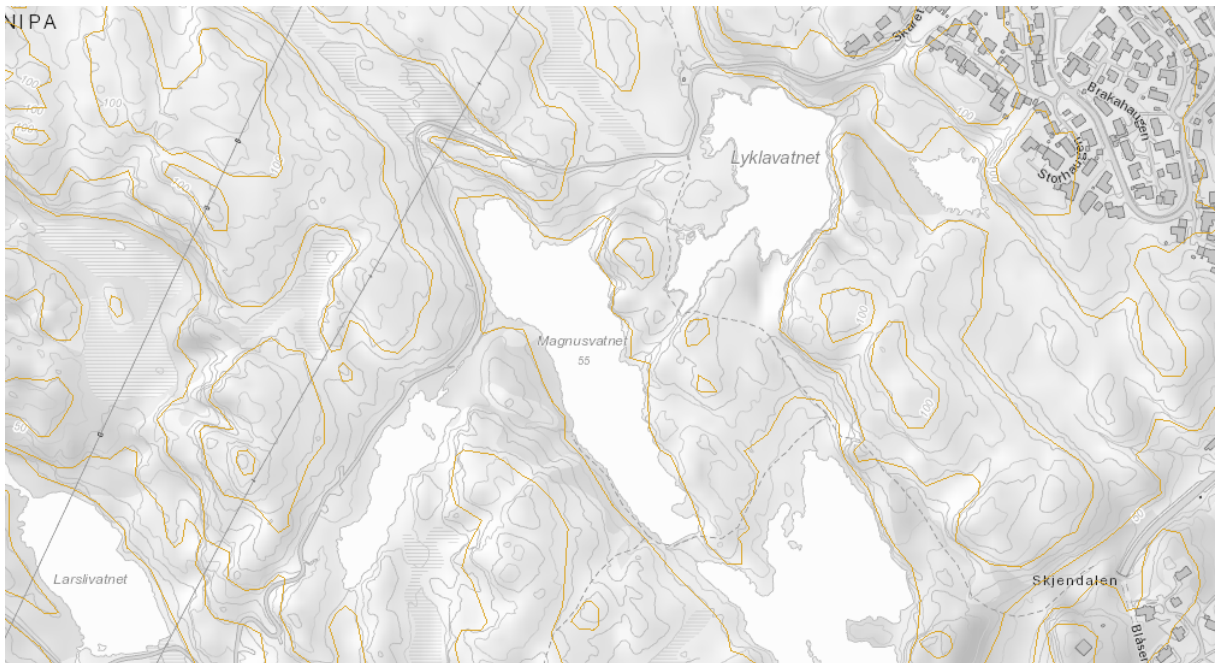
#### **D.4 Hiavatnet**

I Figur D.12 vises et terrengkart for Hiavatnet. Hiavatnet ligger ca. 11325 m nedenfor Breiava. Den har en lengde på 1020 m og har et flateareal på 0.112 km<sup>2</sup>. De sjøene som brukes for Hiavatnet er Magnusvatnet i 5355 Knarrevik, Stemtjørna (også kalt Stemtjønnna) i 8690 Hattfjelldal og Myrtjernet i 0891 Oslo.

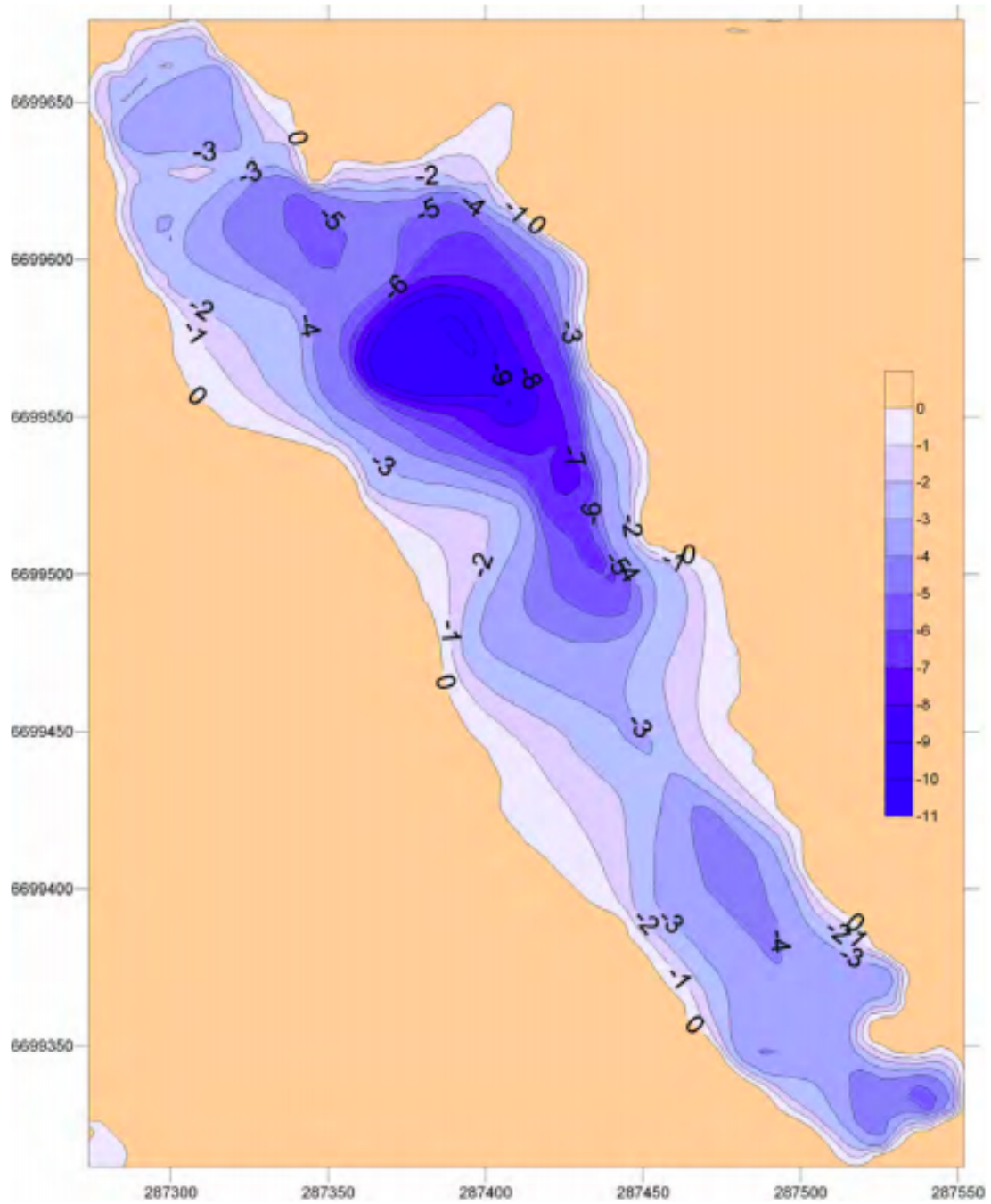


**Figur D.12:** Terrenkart over Hiavatnet.

Magnusvatnet har et flateareal på 0.034km<sup>2</sup> og har en maksdybde på 11 m. Figur D.13 viser terrenkartet for Magnusvatnet og Figur D.14 viser dybdekartet.



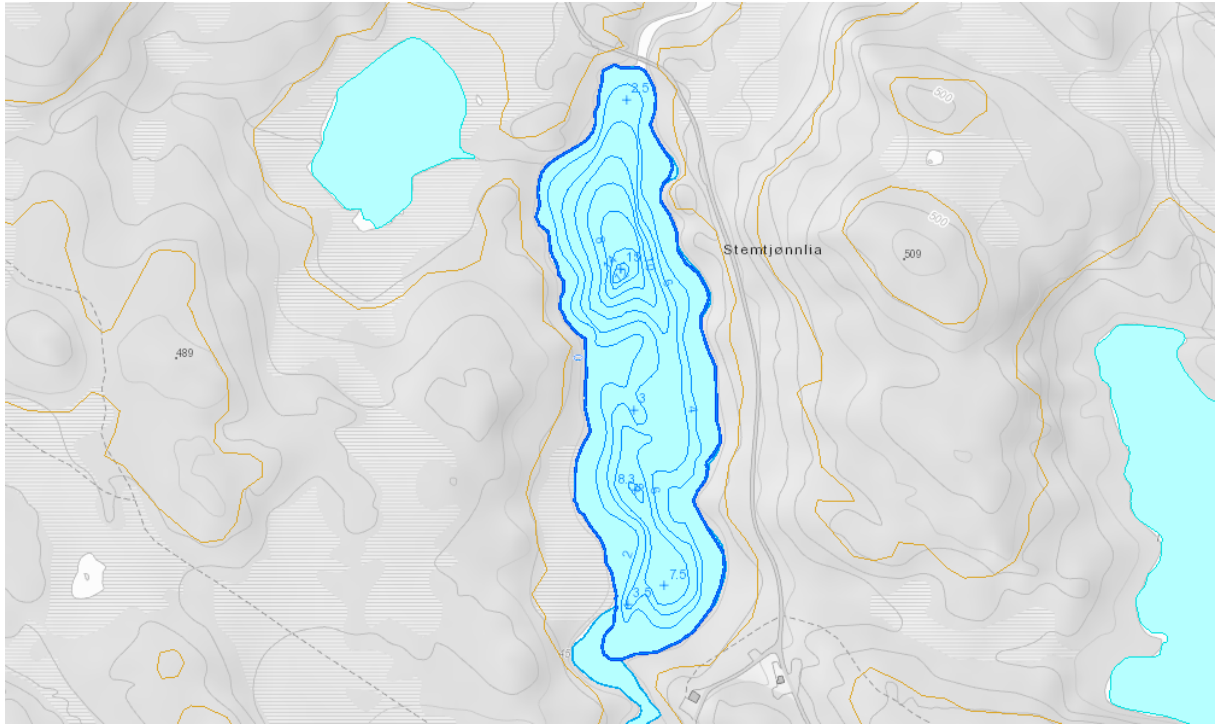
**Figur D.13:** Terrenkart over Magnusvatnet.



**Figur D.14:** Dybdekart over Magnusvatnet.

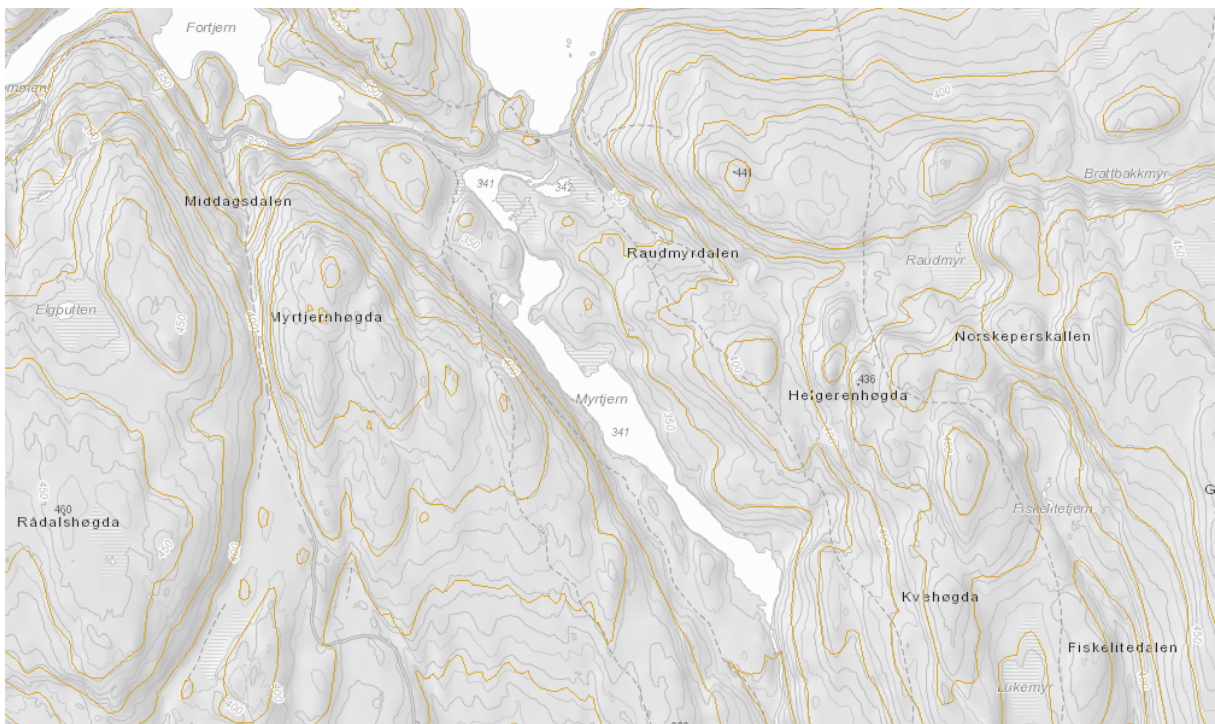
Stemtjørna har et flateareal på 0.08 km<sup>2</sup> og har en maksdybde på 15 m. I Figur D.15 vises terrenget og dybden for Stemtjørna.



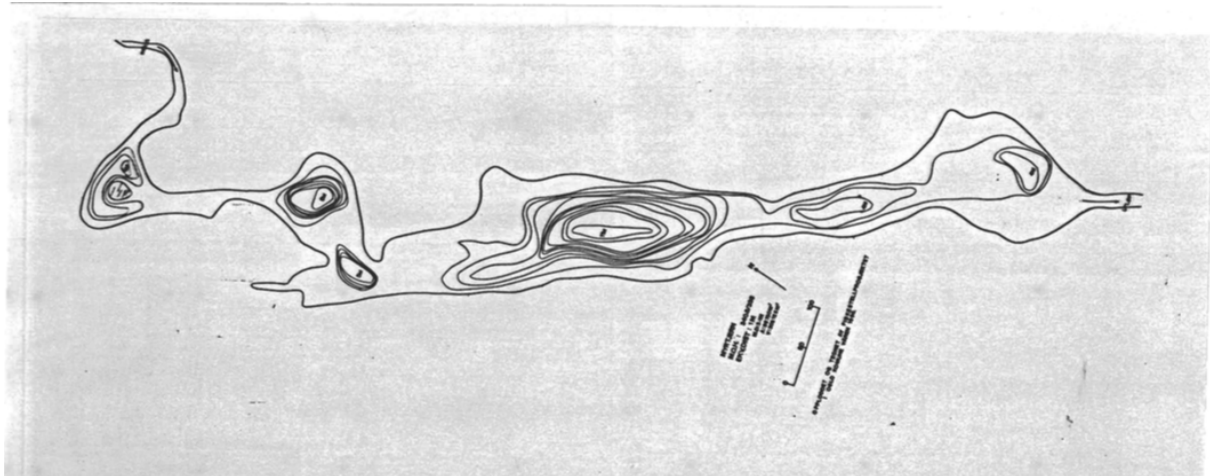


**Figur D.15:** *Terreng- og dybdekart over Stemtjørna.*

Myrtjernet har et flateareal på 0.09 km<sup>2</sup> og har en maksdybde på 11 m. Figur D.16 viser terrengkartet for Myrtjernet og Figur D.17 viser dybdekartet.



**Figur D.16:** *Terrengkart over Myrtjernet.*



**Figur D.17:** Dybdekart over Myrtjernet.

For Hiavatnet ble det antatt en maksdybde på 12 m som ligger ved det bratteste terrenget på nordsiden.

