Masteroppgave

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

Julie Nymark Eikeland
Heidi Olsen

Tidsforsinkelse av vannføring i elver om vinteren

Masteroppgave i vassdragsteknikk
Veileder: Knut Alfredsen
Juni 2021

NTNU
Norwegian University of
Science and Technology

Julie Nymark Eikeland
Heidi Olsen

Tidsforsinkelse av vannføring i elver om vinteren

Masteroppgave i vassdragsteknikk
Veileder: Knut Alfredsen
Juni 2021

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

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

NTNU

MASTEROPPGÅVE I VASSDRAGSTEKNIKK

Studenter: Heidi Olsen
Julie Nymark Eikeland

Tittel: **Tidsforsinkelse av vannføring i elver om vinteren**

1. Bakgrunn

Slepp av vassføring i elver på vinteren vil ofte arte seg forskjellig frå sommartilhøve då is i vassdraget kan dempe transporten av vatn gjennom ulike prosessar knytt til frysing og lokal oppdemming langs elvestrekninga.. Problemstillingar knytt til endringar i transporttid finst i fleire norske vassdrag og kan ha mange ulike effektar. Dette er kjent både frå regulerte elver og naturlege elver, men er eit fenomen som det hittil er gjort lite arbeid med å kvantifisere. Her skal vi sjå på to konkrete eksempel som er ulike i innhald men er knytt til dei same underliggande fysiske mekanismane.

Ved Golsjuvet i Hallingdal er det utfordringar knytt til tryggleik for folk som brukar området til isklatring. På vinterstid har elva i dette området ei minstevassføring på 25 l/s, men sidan strekninga ligg nedstraums inntaket til Hemsil 2 er det ein risiko for langt større vassføring ved utfall av kraftverk (32 m^3/s) og overløp i inntaksdammen. For å kunne vurdere fare for folk og for å vurdere varsling er det difor naudsynt å finne eit metode for å rekne ut kor lang tid det tar frå overløp ved dammen i Eikrebekken til vatnet når Golsjuvet når det er is i elva.

Lyse slepp minstevassføring i Årdalselva i Ryfylke ved Breiavad som er 19 km frå Kalltveit målestasjon der vassføringa vert målt. På vinteren fører dette til utfordringar på grunn av at danning av is fører til lang transporttid i vassdraget. Konsekvensen er at ein risikerer å ikkje nå minstevassføringskravet ved Kalltveit eller at ein må sleppe langt meir vatn frå Breiavad for å kompensere for tidsforseinkinga som isen fører til.

Føremålet med denne oppgåva er å skaffe oversikt over kva faktorar som påverkar transport av vatn i elver på vinteren, kva metodar som finst for å vurdere dette og så utvikle og bruke desse metodane for ei evaluering av dei to problemstillingane som er skissert i oppgåva.

2. Hovudpunkt i arbeidet

Arbeidet er eit sjølvstendig arbeid der kandidatane 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 samanstilling av kunnskap som finst om koplinga mellom transport av vatn i elver og danning av is. Kva fysiske faktorar påverkar prosessane, kva metodar kan ein anvende for å sjå på dette og kva data treng ein for å gjere desse vurderingane? Her er det og viktig å vurdere om eventuelle metodar kan brukast i norske elver. Eit utgangspunkt er at vi ønskjer å sjå på dette ved å anvende ein numerisk modell, så kva numeriske modellar som kan vere aktuelle er ein viktig del av denne vurderinga.

2. Gjere ei generell vurdering av kva data vi har tilgjengeleg for dei to studieområda og kva metodar som kan vere mogleg å bruke her. Kva tilpassingar må gjerast og kva manglar har ein i eksisterande data. For dei to områda er det då viktig å sjå på data for elvegeomtrien:
    a. I Årdalselva finst det data målt inn med grøn LiDAR som i teorien skal gi svært nøyaktige geometridata. Desse må vurderast med tanke på modelloppsett.
    b. For Golsjuvet finst det tidlegare simuleringar for dambrudssanalyser. Kan desse data nyttast for denne problemstillinga, og kan dei eventuelt komplementerast med detaljerte data frå hoydedata.no

3. Med utgangspunkt i vurderingane gjort i punkt 1 og 2 skal det settast opp ein modell og gjerast ei vurdering av transporttid av vatn i Golsjuvet. Modellen må kalibrerast mot data ein har om situasjonen i dag og så brukast i situasjonar der ein har is i vassdraget. Konsekvensen av slepp på bruken av vassdraget skal gjerast og det kan her vere viktig å vurdere om eit overløp over dammen vil føre til isgang i vassdraget og kva konsekvensar det vil ha.

4 Det skal gjerast ei tilsvarande vurdering for Årdalselva med tanke på slepp av minstevassføring.
   a. I og med at vi har målingar frå både Breiavad og målestasjonen på Kalltveit skal det gjerast ei vurdering av kor stor denne problemstillinga er basert på historiske data, og om observerte endringar kan knyttast til klimatiske eller andre fysiske tilhøve.
   b. Vurdere korleis strekninga kan modellerast og sette opp ein modell frå Breiavad til Kalltveit. Om mogleg skal modellen kalibrerast mot observerte vannlinjer og vassdekt areal.

   Utifrå dette skal det gjerast ei vurderinga av korleis slepp av minstevassføring vert gjort i dag og om der er betre måtar å gjere dette på i framtida for å sikre minstevassføring ved minst mogleg bruk av vatn.

5 Basert på funna i 3 og 4 skal det gjerast ei vurdering av metodane for vurderingar av transporttid av vatn om vinteren og likskap og ulikskap mellom løysingane skal diskuterast. Om mogleg skal det og gjerast generelle tilrådingar for korleis slike problemstillingar best kan løysast.

6 Resultata frå prosjektet skal leverast som ei masteroppgåve. I samband med rapporteringa er det særs viktig å levere alle digitale data og modellar på ei form som gjer at dei kan brukast vidare av andre.

3 Rettleiing

Professor Knut Alfredsen vil vere hovudrettleiar for oppgåva. Oddmund Brevik ved Hafslund E-CO Vannkraft er kontaktperson for oppgåva i Golsjuvet, og Trond Erik Børresen ved Lyse Produksjon er kontaktperson for oppgåva i Årdalsvassdraget.

Diskusjon med og bidrag frå kollegaer og medarbeidarar på NTNU, SINTEF 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.

4 Rapportformat, referanser og erklæring

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osb. 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 Inspera 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.

Innleveringsfrist er 11. juni 2021

Trondheim, Januar 2021

Knut Alfredsen
Professor
Institutt for bygg og miljøteknikk
NTNU

Sammendrag

Transport av vann i islagte elver er et komplekst tema, hvor det ikke er utført mye forskning. Det er vanskelig å forutse hvordan tilløpende vann oppfører seg inn i et islagt vassdrag, og det er mange faktorer som spiller inn. Dette arbeidet ser nærmere på hvilke faktorer dette er, hvor stor sammenheng det er mellom temperatur, isdannelse og vannføring og måter å forutse tidsforsinkelse på vannføring i islagte vassdrag.

Arbeidet inneholder to områder, Golsjuvet og Årdalsvassdraget, og har som hovedmål å utvikle metoder for å estimere tidsforsinkelse av vannføring grunnet isdannelse og forhindre for lite slipp av minstevannføring. De to områdene har samme problemstilling, men vil ha ulik praktisk utførelse av løsning. Programvarene HEC-RAS, Excel og R har blitt anvendt for å gjennomføre oppgaven. For Golsjuvet er det utviklet en enkel kalkulator for å estimere transporttid ved hjelp av regresjon. For Årdalsvassdraget er det satt opp et forslag til hvordan man kan estimere tidspunkt for når vannføringen går under minstevannføringskravet og hvor mye mer som må tappes.

Det er utviklet tre forskerspørsmål som skal hjelpe å løse oppgaven på en oversiktlig måte. Disse tar for seg hvilke faktorer som påvirker transporten av vann i elver på vinteren, samt metoder som finnes for å vurdere dette og hvordan disse kan utvikles og brukes. Å besvare disse spørsmålene er grunnlaget for arbeidet med oppgaven som leder til en konklusjon om hvordan man kan se på islagte elver.

Usikkerhetene i resultatene er store, grunnet flere antakelser som blir gjort. Det er nødvendig med videre arbeid for å redusere usikkerhetene, men arbeidet gir en oversikt over hvor omfattende problemstillingen med tidsforsinkelser av vannføring i islagte elver er.

Abstract

Transportation of water in ice-covered rivers is a complex topic that is not discussed a lot in research. It is hard to predict how approaching water behaves when the river is covered with ice, and many factors affects it. This work investigates these factors and looks at the connection between temperature, ice formation, flow, and ways to predict the time delay of flow in ice-covered rivers.

This work contains two cases, Golsjuvet and Årdalsvassdraget, which aim to develop a method to estimate the time delay of flow based on ice formation and prevent less than minimum flow at a checkpoint. The two areas have the same problem, but the practical solution will differ. The softwares HEC-RAS, Excel, and R has been used to accomplish the work in this task. It is developed a simple calculator for the case of Golsjuvet, which estimates time delay. To make this regression is used. A suggestion is made of how to estimate time and the volume of flow to release when the flow is below minimum flow in Årdalsvassdraget.

Three research questions are developed to help solve the task in a perspicuous way. These questions address which factors affect the transportation time of water in rivers in wintertime and which methods are already out there to consider these problems, and how the methods can be used and developed. Answering these questions will be the foundation of the work, leading to a conclusion of how to address transportation time in ice-covered rivers.

The insecurity in the results is significant because of several assumptions which were made. It is necessary with further work to reduce the insecurities. However, the work overlooks how comprehensive the thesis question with time delays of flow in ice-covered rivers is.

Forord

Masteroppgaven *Tidsforsinkelse av vannføring i elver om vinteren* er skrevet av Julie Nymark Eikeland og Heidi Olsen våren 2021 og tilsvarer 30 studiepoeng. Dette er det avsluttende verket etter et to-årig masterprogram i Bygg- og miljøteknikk ved NTNU i Trondheim.

Oppgaven har inneholdt oppgaver som litteratursøk, modellering, statistikk og programmering. Det har blitt foretatt dataanalyser og hydrauliske modelleringer.

Arbeidet i denne masteroppgaven har vært både utfordrende og lærerikt, og ved å kombinere ulike temaer til et verk i et forsøk på å lage et innovativt produkt har det vært en bratt læringskurve. Å sette seg inn i nye vertøy å utvikle hydrauliske modeller og drive med regresjon er noe vi tar med oss videre inn i det kommende arbeidslivet. Å løse utfordringer knyttet til oppgaven har gjort at vi har utviklet oss innen fagfeltet.

Professor Knut Alfredsen ved NTNU har bistått med veiledning gjennom hele perioden og hans bidrag både som veieleder og støttespiller blir satt stor pris på. Oppgaven er utarbeidet av Hafslund E-CO Vannkraft ved Oddmund Breivik og Bjørn Otto Dønnum og av Lyse Produksjon ved Trond Erik Børresen og Torbjørn Ims Østby. Vi vil takke dere for god oppfølging og tilgjengelighet. Ellers ønsker vi å takke gode støttespillere på Verkstedloftet, venner og familie for støtte og motivasjon gjennom masterperioden.

Julie Nymark Eikeland

Heidi Olsen

Innhold

Figurer xvi
Tabeller xviii
1 Innledning 1
1.1 Dannelse av is og dens påvirkning av transporttid 1
1.2 Viktigheten av arbeidet 2
1.3 Formål, omfang og begrensninger 2
1.4 Struktur på oppgave 3
2 Teori 4
2.1 Vassdragshydraulikk 4
2.1.1 Strømning 4
2.1.2 Hydraulisk beregning 4
2.1.3 Hydraulisk modellering 4
2.2 HEC-RAS 5
2.2.1 Simulering av turbulent strømning 5
2.2.2 2D modellering stasjonær og ikke-stasjonær strømning 5
2.2.3 1D modellering stajonær strømning 5
2.2.4 1D modellering ikke-stasjonær strømming i HEC-RAS 5
2.3 Mannings n 7
2.4 Dambruddbølgeberegning 7
2.5 Bølgehastighet 8
2.6 Arealskalering 8
2.7 Overløp 8
2.8 Regresjonsanalyse 8
2.8.1 Lineær regresjon 9
2.8.2 Logaritmisk regresjon 9
2.8.3 R^2 Statistic 9
2.9 Isdannelse 9
2.9.1 Istyper 11
2.9.2 Istykkelse 12
Graddagsmetode 12
Stefans formel 12
2.9.3 Isoppstuving og isreduksjon 14
2.9.4 Påvirkning av snø i innfrysing 14
2.9.5 Isdannelse og sirkulasjon av vann i innsjøer 15

2.10 LiDAR 15
2.10.1 Rød LiDAR 16
2.10.2 Grønn LiDAR 16
2.11 Programvarer 16
2.11.1 R og RStudio 16
2.11.2 LAStools 16
2.11.3 ArcMap 16
2.11.4 NVE Atlas 16
2.11.5 NEVINA 16
3 Områdebeskrivelse 17
4 Metode 20
4.1 Verktøy 20
4.1.1 Innhenting fra høydedata.no 20
4.1.2 Konvertering i LAStools 21
4.1.3 Konvertering i ArcMap 21
4.1.4 HEC-RAS 22
4.2 Geometri for Golsjuvet 23
4.2.1 Modifisering av terreng 24
4.3 Geometri for Årdalsvassdraget 25
4.3.1 Dele opp i flere geometrimodeller 25
4.3.2 Modifisering av tverrprofil på grunn av sjødybde 26
4.3.3 Legge til terskel grunnet bratt terreng 27
4.3.4 Valg av Mannings n 28
4.4 Stasjonær strømningsanalyse 29
4.5 Ikke-stasjonær strømningsanalyse 30
4.5.1 Konstant ikke-stasjonær strømningsanalyse 30
4.5.2 Varierende ikke-stasjonær strømningsanalyse Golsjuvet 34
4.5.3 Ikke-stasjonær strømningsanalyse Årdalsvassdraget 36
4.6 Datainnhenting temperatur og snødybde 39
4.6.1 Excel-arket «Estimering av tid» 42
4.7 Dokumentasjon og regresjon av volum av minstevannføring 43
5 Resultat og diskusjon 48
5.1 Golsjuvet 48
5.1.1 HEC-RAS 48
5.1.2 Isutvikling 54
5.1.3 Kalkulator 57
5.2 Årdalsvassdraget 58

5.2.1 Minstevannføring....58
5.2.2 HEC-RAS....64
5.3 Felles.... 77
5.3.1 Grønn og rød laser....78
5.3.2 Utfordrende terreng....78
5.3.3 Tilgang til data....79
5.3.4 Tidsforsinkelse av vannføring....79
5.3.5 Feilkilder....79
6 Konklusjon....81
6.1 Videre arbeid.... 82
6.1.1 Golsjuvet....82
6.1.2 Årdalsvassdraget....82
Referanser....84
Vedlegg 1 – Testing av terskel i HEC-RAS
Vedlegg 2 – Ulike regresjoner utført i Excel
Vedlegg 3 – Oversikt digitale vedlegg

Figurer

Figur 2-1: Illustrasjon av hvordan sarr dannes. Utklipp fra *Hvordan is i vassdrag dannes* (Asvall, 2010). 10
Figur 2-2: Vanntemperatur og vannhastighet i råker. Utklipp fra *Hvordan is i vassdrag dannes* (Asvall, 2010). 11
Figur 2-3: Hydroklimatiske regioner for ulike graddagsfaktorer (Brooks, 2010). 13
Figur 3-1: Oversiktskart som viser vassdragene 17
Figur 3-2: Illustrasjon av isklatring i Golsjuvet, bildet hentet fra golinfo.no (Kvambekk, 2021)....18
Figur 3-3: Oversiktskart over nedre del av Hemsil, utsnitt hentet fra norgeskart.no (Norgeskart.no, u.å.-b) 18
Figur 3-4: Høydeprofil fra Eikredammen til utløpet i Hallingdalselva. 18
Figur 3-5: Oversiktskart over strekningen Breiavatnet - Kalltveit, hentet fra norgeskart.no (Norgeskart.no, u.å.-a)....19
Figur 3-6: Høydeprofil fra Breiavatnet til utløpet i Årdalsfjorden. 19
Figur 4-1: Utsnitt av område fra høydedata.no 20
Figur 4-2: Utsnitt fra LAStools....21
Figur 4-3: Utsnitt fra ArcMap 22
Figur 4-4: Terreng for Golsjuvet med gjennomsiktig kartlag, utsnitt fra RAS Mapper....23
Figur 4-5: Terreng med geometri, utsnitt fra RAS Mapper....24
Figur 4-6: Utsnitt fra RAS Mapper som viser et typisk vannspeil 24
Figur 4-7: Utsnitt fra HEC-RAS som viser hvordan tverrprofil er blitt modifisert 25
Figur 4-8: Utsnitt fra RAS Mapper som viser originalt terreng til venstre og modifisert terreng til høyre 25
Figur 4-9: Utsnitt fra Ineffective Flow Area redigeringsvindu 26
Figur 4-10: Utsnitt fra Cross Section Data, tverrprofil med dødlagring 27
Figur 4-11: Utsnitt fra HEC-RAS, til høyre er data som plottes inn for terskelen, til venstre er tverrprofil med terskel 28
Figur 4-12: Utsnitt fra HEC-RAS, terskel i Geometry Editor 28
Figur 4-13: Utsnitt fra HEC-RAS av stasjonær strømningsdata og tilhørende grensebetingelser 29
Figur 4-14: Utsnitt av HEC-RAS, Stasjonær strømningsanalyse 30
Figur 4-15: Utsnitt fra HEC-RAS, tabell for tverrprofilsegenskaper 31
Figur 4-16: Utsnitt fra HEC-RAS, punktfilter for tverrprofil 31
Figur 4-17: Utsnitt fra HEC-RAS, Steg 1 for å få bort overkritisk strømning, rød ring viser steder med overkritisk strømning og grønn ring viser hvor energilinja topper.....32
Figur 4-18: Utsnitt fra HEC-RAS, Steg 2 for å få bort overkritisk strømning, rød ring viser steder med overkritisk strømning. 32
Figur 4-19: Utsnitt fra HEC-RAS, Steg 3 for å få bort overkritisk strømning, rød ring viser steder med overkritisk strømning. 33
Figur 4-20:Utsnitt fra HEC-RAS, ingen overkritisk strømning....33
Figur 4-21: Utsnitt av vinduet for å redigere isdekke....36
Figur 4-22: Presentasjon av parametere og formler. 40
Figur 4-23: Oppsett av Excel-ark....40
Figur 4-24: Utsnitt fra regresjonsvindu i Excel....41
Figur 4-25: Utsnitt fra Excel-arket "Estimering av tid" 43
Figur 4-26. Viser eksempel på hvor vannføring går under krav 44

Figur 4-27: Utsnitt fra Excel som viser hvordan modellen er satt opp og rød ramme viser formelen som er brukt i kolonne K. 47
Figur 5-1: Venstre: Sluppet vannføring = 1 m^3/s, Høyre: Sluppet vannføring = 3 m^3/s .49
Figur 5-2: Venstre: Sluppet vannføring = 5 m^3/s, Høyre: Sluppet vannføring = 8 m^3/s .49
Figur 5-3: Venstre: Sluppet vannføring = 16 m^3/s, Høyre: Sluppet vannføring = 25 m^3/s 50
Figur 5-4: Sluppet vannføring = 32 m^3/s 50
Figur 5-5: Forholdet mellom vannføring og tid ved ulike ruheter.....52
Figur 5-6: Forholdet mellom ruhet og tid ved forskjellige vannføringer 53
Figur 5-7: Korrelasjonstabell som viser sammenhengen mellom frostdøgn, istykkelse, snødybde og gjennomsnittstemperatur.....55
Figur 5-8: 1) Regresjon mellom gjennomsnittstemperatur og istykkelse, 2) Regresjon akkumulerte frysegraddager og istykkelse, 3) Regresjon mellom akkumulert snødybde og istykkelse 55
Figur 5-9: Regresjon mellom to punkter. 56
Figur 5-10: Utsnitt fra Excel-ark av kalkulator for estimering av tid 57
Figur 5-11: Grafisk fremstilling av sammenhengen mellom simulert tid og kalkulert tid ved n=0.05 og n=0.16 med usikkerhet 58
Figur 5-12. Sammenhengen mellom tapping, vannstand, vannføring og temperatur for tidlig januar 16.....61
Figur 5-13. Sammenhengen mellom tapping, vannstand, vannføring og temperatur for midten av januar 16 62
Figur 5-14. Sammenhengen mellom tapping, vannstand, vannføring og temperatur for tidlig mars 17.....63
Figur 5-15: Forskjellige forsøk på kalibrering av den hydrauliske modellen 64
Figur 5-16: Kalibrert sommertilfelle 65
Figur 5-17: Effekten resttilsig kan ha på vannføringsmålinger 66
Figur 5-18: Virkningen resttilsig kan ha på simulert vannføring 67
Figur 5-19: Simulering uten is, januar 2016.....68
Figur 5-20: Forskjell på simulert og observert vannstand i Musdalsvatn 68
Figur 5-21: For mye volum i modellen mot slutten av tidsperioden 70
Figur 5-22. Justert volum i slutten av simuleringsperioden.....70
Figur 5-23. Hopp i vannstand og tapping fra magasin 71
Figur 5-24: Vinterperiode simulert med mindre vannføring ved enden av perioden 72
Figur 5-25: Vannstandsøkning grunnet is, ikke tapping 72
Figur 5-26: Observert akkumulert volum plottet mot simulert akkumulert volum fra regresjon med riktige data.....74
Figur 5-27: Utsnitt fra modell i Excel som brukes til å estimere manglende akkumulert volum, time for time med tilhørende graf som viser usikkerheten. 75
Figur 5-28. Tiden Q tappet bruker fra utslippspunkt til Kalltveit, sommertilfelle øverst og vintertilfelle nederst 76
Figur 5-29: Eksempel på hvordan det er mulig å sette opp en modell som gir ut hydrograf for tapping. Utsnitt fra Excel.....77

Tabeller

Tabell 2-1: Utdrag fra tabell 4-18 i Inntakshåndboka med tilhørende Mannings n verdier (Jenssen, Tesaker, Lund & Huber, 2006). 7
Tabell 2-2: Typiske α verdier, stammer fra Stefans formel (Michel, 1971).....12
Tabell 2-3: Graddagskoeffisienter (Brooks, 2010). 13
Tabell 4-1: Sammenligning av observerte gjennomsnittsverdier og verdier fra Brooks studie. 40
Tabell 4-2: Parametere brukt i Excel-ark og i RStudio 45
Tabell 5-1: Resultat av ulike tester for å få HEC-RAS modellen stabil 48
Tabell 5-2: Simuleringer av observert vannføring for å få en finjustert modell 49
Tabell 5-3: Ulike vannføringer og ulike ruheter med tilhørende tider. 51
Tabell 5-4: Resultater fra beregning av istykkelse sammen med observerte parametere fra 2000-2021.....54
Tabell 5-5: Utregnet istykkelse kombinert med simulert ruhet.....56
Tabell 5-6: Sammenhengen mellom simulert tid og kalkulert tid ved n=0.05 og n=0.1657
Tabell 5-7. Vinterepisoder med minstevannføring i løpet av 2015-2021 59
Tabell 5-8. Tidsforsinkelse av vannføring grunnet isoppstuving i sjøene.....60
Tabell 5-9: Verdier for konstant strømningssituasjon ved ikke-stasjonær strømning for Årdalsvassdraget.....64
Tabell 5-10: Mannings n for nedre modell i Årdalsvassdraget 65
Tabell 5-11. Dødlager i sjøene i Årdalsvassdraget.....69
Tabell 5-12. Regresjon for å finne sammenheng mellom lukeåpning og lufttemperatur..73
Tabell 5-13. Regresjonsligninger for Q, Vannstand og Volum.....73
Tabell 5-14: Resultat fra regresjon, R^2=0.56.....74

1 Innledning

1.1 Dannelse av is og dens påvirkning av transporttid

Mange av Norges vassdrag er regulert og styrt av kraftselskaper. Når vassdrag blir regulert vil miljøet i og rundt elva bli påvirket. Derfor har enkelte vassdrag krav om minstevannføring. Ifølge vannressursloven fra 2000 skal det minimum være den alminnelige lavvannføring tilbake ved uttak og bortledning av vann som endrer vannføringen i elver og bekker eller ved tilbakeholding av vann ved oppdemming. Det skal legges vekt på å sikre vannspeil, vassdragets betydning for plante- og dyreliv, vannkvalitet og grunnvannsforekomster (Helleraker & Rosvold, 2021). Det er derfor viktig at kravet om minstevannføring opprettholdes.

Vassdrag vil ha ulike egenskaper på vinteren og på sommeren. Snø og is vil være med å påvirke transporttiden av vannføringen på vinteren. Is i vassdraget vil påvirke prosesser knyttet til frysing og lokal oppdemming av vann langs elvestrekningen, og kan ha betydelig påvirkning på transporten av vannet. Ved grunne områder i elva vil alt vann fryse, og det vil dannes kanaler hvor vannet renner. Steder hvor tykk is utvikles i utløp fra sjøer vil dette kunne demme opp hele elveløpet (Prowse, 2001). Disse utfordringene vil altså påvirke transporttiden, enten ved at elven fryser til og Mannings n blir større som gjør at hastigheten på vannet går ned eller ved at det dannes terskler av is som demmer opp vannet (Ghareh Aghaji Zare et al., 2016) (Z. Meyer, 2010).

Hafslund E-CO har et behov for å anslå tiden det tar fra vannet slippes ut ved Eikredammen til det passerer Golsjuvet, og dette spesielt på vinteren. Ved å finne en måte å estimere dette på vil det føre til at det er sikrere å bruke Golsjuvet til aktiviteter som isklatring. Om kraftverket Hemsil II skulle få en feil og måtte stoppe vil det gå uplanlagte overløp i elva. Dette vil være svært farlig da de som isklatrer i Golsjuvet risikerer å bli skylt bort. Det er mange faktorer som påvirker forholdene i elveløpet. Lufttemperatur, vind, skydekke og nedbør sammen med vannføring, vannhastighet, vanntemperatur og batymetri er de faktorene som påvirker isdannelse (Asvall, 2010). Isen vil, sammen med snø, påvirke friksjonen i elven og føre til lokal oppdemming av vann.

Lyse Produksjon ønsker å kartlegge hvordan de kan beregne tidspunkt når det kommer til å gå under pålagt minstevannføring ved en målestasjon i Kalltveit 19 km nedstrøms for slippunktet for minstevannføringen fra Breiavad. Isdannelse i elveløpet og i sjøene påvirker transporttiden i vassdraget og kan føre til oppdemminger. Hvor mye som må slippes ekstra ved Breiavad er noe Lyse ønsker å få svar på for å kunne begrense kostnadene sine ved å ikke slippe mer enn de må, men unngå bøter for å gå under minstevannføring ved Kalltveit.

For å kunne løse oppgaven på er det satt opp noen forskerspørsmål som gjennom oppgaven skal besvares. Målet med spørsmålene er å undersøke og utvikle en eller flere metoder for å kunne bidra til å løse problemstillingen til de to kraftselskapene.

- Hvilke data finnes for de ulike hendelsene og hvordan kan disse dataene brukes?
- Hvilke faktorer påvirker transport av vann i elver på vinteren?
- Hvilke metoder finnes for å vurdere isdannelse og transport av vann i elver på vinteren og hvordan kan man utvikle og bruke disse metodene?

Ved å løse disse problemene vil det være med på å utvikle metoder som bedrer og sikrer drift om vinteren.

1.2 Viktigheten av arbeidet

Ettersom det drives med isklatring i Golsjuvet på vinterstid kan det være svært farlig om det kommer store vannmengder nedover elva. Om kraftverket Hemsil II faller ut vil det gå 32 m^3/s direkte i elveløpet. Om man vet hvor lang tid en gitt vannmengde bruker fra den blir sluppet ved Eikredammen til den passerer Golsjuvet vil man i praksis vite hvor lang tid man har til varsling og evakuering av folk som oppholder seg i juvet for å unngå at det skjer ulykker.

I Årdalsvassdraget er det krav om minstevannføring ved Kalltveit. Det er derfor viktig at det alltid kommer frem riktig vannmengde, ellers står elva i fare for å kunne tørke ut og dette vil påvirke økosystemet. Kraftselskapet får bøter om kravet ikke overholdes, men vil heller ikke slippe unødig mye vann ved Breiavad, da dette også koster dem penger. Det vil derfor være fordelaktig å se på problemstillingen både med økonomiske og økologiske øyne. Det er et problem på vinterstid at ikke alltid minstevannføringskravet i Kalltveit overholdes. Om det er mulig å finne ut hvilke faktorer som påvirker dette kan det være mulig å si hvor mye ekstra vann som må slippes ved ulike forhold for at det ikke skal gå under minstevannføring i Kalltveit samtidig som man unngår å «sløse» med vannet.

1.3 Formål, omfang og begrensninger

Det skal foretas innhenting av kunnskap om koblingen mellom transport av vann i elver og isdannelse. For å finne hvilke metoder som kan anvendes og hvilke data som trengs for å utføre disse, skal det utføres et litteratursøk.

Det skal settes opp hydrauliske modeller i HEC-RAS for begge vassdrag og det må derfor innhentes kunnskap om programmet og metodene programmet bruker. Eksisterende data brukes for å sette opp modellene, og det må avgjøres hvilke data som må hentes inn og hvor man finner dem.

Transporttiden for Golsjuvet skal undersøkes og evalueres opp mot observerte data. I Årdalsvassdraget skal også transporttiden undersøkes, men det skal ses på om det kan kalibreres mot vannlinjer og vanndekket areal. Det skal så vurderes hvordan slipp av minstevannføring blir gjort i dag og hvordan dette kan gjøres i fremtiden for minst mulig bruk av vann.

Det er kun blitt sett på vinterperioder hvor minstevannføringskravet ikke blir overholdt. Om sommeren finnes det også perioder hvor dette skjer, men de tilfellene er påvirket av andre faktorer enn frost og is i vassdraget, som er det som er interessant for dette arbeidet.

I februar 2021 hadde Hafslund ECO planlagt stans av Hemsil II på grunn av vedlikehold. I forbindelse med dette skulle det utføres feltarbeid når det ble sluppet vann i overløpet, for å få flere målinger til arbeidet med Golsjuvet. Grunnet høye kraftpriser i februar ble stans og vedlikeholdsarbeidet utsatt til høsten 2021, og feltarbeidet kunne derfor ikke gjennomføres. Dette førte til at mengden data og målinger for Golsjuvet ble færre enn ønsket.

1.4 Struktur på oppgave

Oppgaven er satt opp på en måte som skal gjøre det mest mulig behagelig å lese. Det starter med en innledning hvor problemstilling blir presentert og hvilke begrensninger oppgaven har. Teorikapittelet tar for seg ulik teori og litteratur knyttet opp mot problemstillingen. I metodekapittelet blir det beskrevet hva og hvordan arbeidet er utført gjennom hele prosessen. Kapittelet er bygget opp etter kategori og begge vassdragene er felt inn under hver kategori. Noen ting er gjort for begge vassdragene, mens noen ting er separate, dette er beskrevet nærmere i metodekapittelet. Resultat- og diskusjonskapittelet er slått sammen til et felles kapittel. Dette er for å gjøre lesingen enklere og for å få en sammenheng mellom resultatet av hver enkelt del av oppgaven og diskusjonen. Her er resultatene for de ulike vassdragene presentert og diskutert hver for seg, før det kommer en felles diskusjon. I den felles diskusjonen diskuteres det likheter og ulikheter ved metodene som er brukt i de to vassdragene. Resultatene diskuteres også opp mot hverandre. Hele oppgaven avsluttes i en konklusjon med videre arbeid som et av underpunktene. Alt av materiell som er relevant å ha med er lagt til som vedlegg.

2 Teori

I dette kapittelet presenteres ulik teori og litteratur knyttet til utførelsen av oppgaven. Teori om vassdragshydraulikk, regresjon, programvaren HEC-RAS og hvordan den fungerer, isdannelse av ulike typer is og litt om de andre programvarene som er brukt. Teorien skal bygge under oppgaven og brukes til å diskutere resultatene som kommer ut av den.

2.1 Vassdragshydraulikk

2.1.1 Strømning

Vannføring, utforming av vassdrag og masser i og langs vassdraget er det som definerer hvordan et vassdrag oppfører seg. Endres en av disse tre, endres vannhastighet og vannstand. Massetransport, drivgods og is kan påvirke både strømningsforhold, vannstand og vannhastighet i et vassdrag.

Det finnes flere typer strømning og de kan være satt sammen på ulike måter. Om vannføringen forandrer seg over tid blir den definert turbulent. Det betyr at både vannføring, vannstand og strømningsforhold kan forandres over tid. Er disse forholdene konstante er vannføringen laminær. Turbulens sier noe om hvor uregelmessig vannpartikler beveger seg. I vassdrag er nesten all strømning turbulent. Strømningen er variert om strømningstverrsnittet endres i kanalens lengderetning, variert strømning kan være både laminær og turbulent. Variert strømning kan videre bli karakterisert som underkritisk og overkritisk (Chow, 1959). Froudetallet (F) er forholdet mellom vannhastighet og bølgehastighet. Om F<1 er strømningen underkritisk, er F>1 er den overkritisk og er F=1 er strømningen kritisk. Underkritisk strømning karakteriseres ved lav hastighet og høy vannstand, mens overkritisk vil opptre omvendt. Vannføring strømmer enten under- eller overkritisk. Det er energiforholdene som bestemmer hvilken type strømning som opptrer (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2020).

2.1.2 Hydraulisk beregning

En hydraulisk beregning sier noe om vannivået som vil oppstå under en gitt vannføring, og hvilke hastigheter som kan forventes ved denne vannføringen. Resultatet av denne beregningen vises ofte som vannlinjer over en lengdeprofil av elva. Den vises ofte i sammenheng med energilinja for beregnet vannføring. Forskjellen på vann- og energilinja er hastighetshøyden $\frac{v^2}{2g}$ (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2020).

Anbefalt datagrunnlag for å utføre en hydraulisk analyse kan være topografi, hydrologi, data fra tidligere hendelser og hydrauliske observasjoner, befaringsrapport, overflateruhet, prosesser som påvirker vassdraget og annen kunnskap knyttet til vassdraget. Alle disse er ikke nødvendig for å foreta en analyse, men stedlige målinger vil være nyttig (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2020).

2.1.3 Hydraulisk modellering

Hydraulisk modellering er en fysisk form for modellering som brukes for å utforske utforming og driftsproblemer innen hydraulikk. Det brukes en skalert modell for å gjenskape strømning og vanntransport i naturlige strømningsystemer og for å evaluere hvordan hydrauliske konstruksjoner og maskiner opptrer (Ettema, Arndt, Roberts & Wahl, 2000). En

hydraulisk modell er en modell som beregner hydrauliske forhold i elver eller innsjøer. Ulike hydrauliske forhold er for eksempel vannstand, vannhastighet, vanndybde, krefter som oppstår i vannmassene, og krefter som oppstår mellom vannmassene og konstruksjoner i og ved vassdragene (Bakken, 2020).

2.2 HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) er et integrert system av programvare. Det består av et miljø hvor det kan gjøres flere oppgaver samtidig og er designet for interaktivt bruk. Systemet er bygget opp av grafisk brukergrensesnitt, separate analyse-, datalagrings- og datastyringskomponenter, grafikk og kartleggings- og tilbakemeldingsfasiliteter. Programmet er designet til å utføre en- og to-dimensjonale hydrauliske kalkuleringer for et nettverk av naturlige og konstruerte kanaler, elvebredder og oversvømmelsesområder, områder beskyttet av diker osv. (US Army Corps of Engineers, 2020b).

2.2.1 Simulering av turbulent strømning

En del av HEC-RAS sitt modelleringssystem er i stand til å simulere en-dimensjonal, todimensjonal og kombinert en- og to-dimensjonal turbulent strømning gjennom et fullt nettverk av åpne kanaler, oversvømmelsesområder og sedimentvifter. Den turbulente strømningen kan bli brukt til å vise kalkulasjoner av underkritisk, overkritisk og blandede strømningsmønstre. Hydrauliske kalkulasjoner av tverrsnitt, broer, kulverter og andre hydrauliske strukturer som er laget som laminære strømningskomponenter er bygget inn i modulen for turbulent strømning (US Army Corps of Engineers, 2020b).

2.2.2 2D modellering stasjonær og ikke-stasjonær strømning

En todimensjonal modell (2D) brukes for å detaljprosjektere hvor digitale terrengmodeller er tilgjengelig. Brukes ofte hvor man ikke har en veldefinert vannvei eller hvor man kan få store variasjoner i sideveis strømningsretning. 2D-modellen krever forarbeid med terrengdataene og det kan derfor være lurt å begrense området for beregningene. Resultatet fra en todimensjonal beregning er to hastigheter og en vannstand per celle. Størrelsen på cellene vil påvirke nøyaktigheten og beregningstida (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2020).

2.2.3 1D modellering stajonær strømning

Hensikten med en endimensjonal modell (1D) er å beregne vannivået for stasjonær strøm. 1D modeller er basert på geometrien til tverrsnitt av elva, avstanden mellom tverrsnittene, ruheten til tverrsnittene og startbetingelser (Alfredsen, 2020). Fra en 1D-modell får man kun ut én vannstand og én strømningshastighet for et tverrsnitt. Endimensjonal beregning tar ikke hensyn til sekundærstrømminger, og det må være god plassering på tverrsnittene for å få et godt resultat. Det må lages profiler tett nok i kritiske snitt for å fange opp mulig oppstuving. 1D-modeller gir lavere nøyaktighet enn en todimensjonal modell, men er raskere og krever mindre regnekraft (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2020).

2.2.4 1D modellering ikke-stasjonær strømming i HEC-RAS

Det er to fysiske lover som omfatter strømning i strykende vann: (1) prinsippet om massebevaring (kontinuitet) og (2) prinsippet om bevaring av moment. Lovene utrykkes matematisk som partielle differensialligninger, heretter omtalt som kontinuitets- og momentligningen (US Army Corps of Engineers, 2020c). HEC-RAS Hydraulic Reference Manual

versjon 6.0 Beta beskriver dette mer detaljert, kun endelig form av ligningene er presentert her.

Kontinuitetsligningen

Kontinuitetsligningen beskriver bevaring av masse for et endimensjonalt system (US Army Corps of Engineers, 2020c):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \tag{1}$$

Hvor:

$x =$ avstand langs vassdraget
$t =$ tid
$Q =$ strømning
$A =$ areal av tverrsnitt
$q_l =$ sideinstrømning per lengdeenhet

Momentligningen

Momentligningen sier at endringshastigheten i moment er lik de eksterne kreftene som virker på systemet (US Army Corps of Engineers, 2020c).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right) = 0 \tag{2}$$

Hvor:

$Q =$ strømning
$t =$ tid
$V =$ fart
x = avstand langs vassdraget
$g =$ tyngdekraften
$A =$ areal av tverrsnitt
z = høyde på vannoverflaten
$S_f =$ friksjonshelling

Oppstrøms grensebetingelser

Oppstrøms grensebetingelser er nødvendig ved oppstrøms ende av en strekning som ikke er knyttet sammen med andre strekninger eller lagringsområder. Det brukes en strømningshydrograf som viser vannføring mot tid. Ligningen for en strømningshydrograf for en strekning er (US Army Corps of Engineers, 2020c):

$$\Delta Q_k^{n+1} = Q_k^n - Q_k \tag{3}$$

Hvor:

$k =$ oppstrøms knutepunkt for strekningen

Nedstrøms grensebetingelser

Nedstrøms grensebetingelser er nødvendig ved nedstrøms ende av en strekning som ikke er tilknyttet andre strekninger eller lagringsområder. Her kan det være ulike betingelser, blant annet normal dybde fra Mannings formel. Bruk av Mannings formel med friksjonshelning angitt av bruker produserer et steg antatt å være normal dybde om uniforme

strømningsforhold eksisterer. Dette er ikke realistisk i naturlige strekk så grensebetingelsen må bare brukes om nedstrøms grensesnitt er langt nedenfor området som skal studeres. Mannings formel kan bli skrevet slik (US Army Corps of Engineers, 2020c):

$$\boldsymbol{Q = K\left(S_f\right)^{0.5}} \tag{4}$$

Hvor:

$K =$ overføringskapasitet
$S_f =$ friksjonshelling

HEC-RAS Mapper

HEC-RAS Mapper er en modul i hovedprogrammet HEC-RAS. Modulen forsyner programmet med geospatiale visualiseringer av HEC-RAS-geometrien, simuleringsresultater, og annen relevant geospatial data som hjelper brukeren å effektivisere prosessen med å lage hydrauliske modeller for elver (US Army Corps of Engineers, 2020a).

2.3 Mannings n

Mannings n er ruhetskoeffisienten og brukes når det skal regnes friksjon i strømmende vann ved bruk av Mannings formel (Arcement & Schneider, 1989). Det er ingen eksakt måte å finne Mannings n på så dette er en utfordrende prosess. Det å finne rett koeffisient er basert på kvalifisert gjetting og blir påvirket at fire tilnærminger; (1) ulike faktorer som påvirker ruheten, (2) en tabell med typiske verdier for ruhet, (3) å bli kjent med typiske opptredener i vassdrag hvor ruheten er kjent, og (4) analytisk prosedyre for å bestemme verdien av n basert på teoretisk hastighetsfordeling i tverrsnitt og av gitte data for hastighet eller ruhet. En elvestrekning har ikke kun en n-verdi, men er svært variabel og er avhengig av ulike faktorer (Chow, 1959). Ruhet i elver kan defineres som vist i Tabell 2-1. Det vil også være ulike Mannings n om det blir dannet et isdekke på elva, her varierer det fra n = 0.013 til 0.040 som vintergjennomsnitt (Li, 2012).

Tabell 2-1: Utdrag fra tabell 4-18 i Inntakshåndboka med tilhørende Mannings n verdier (Jenssen, Tesaker, Lund & Huber, 2006).

Materiale	M [m1/3/s]	n [1/M]
Rett, fri for vegetasjon, finkornede masser	30-40	0.033-0.025
Som over, men noe stein og vegetasjon	25-33	0.04-0.03
Buktende elv, kulper, stein og vegetasjon	20-30	0.05-0.033
Bratt elv med grus, stein og noe blokk	20-33	0.05-0.03
Bratt elv med stein og blokk	14-25	0.07-0.04

En måte å regne ut Mannings n i elver på er Jarretts ligning:

$$\boldsymbol{n = 0.39 * S^{0.38} * R^{-016}} \tag{5}$$

Hvor S er energihelningen og R er den hydrauliske radiusen til elva. Her kan verdier for Mannings n variere mellom 0.032 til 0.21 (Jarrett, 1985).

2.4 Dambruddbølgeberegning

En dambruddbølge er en flom som oppstår på grunn av et dambrudd. I noen tilfeller vil flommen kunne oppfattes som en bølge. En dambruddbølgeberegning (DBBB) har som mål å danne grunnlaget for beredskaps- og evakueringsplaner i kommuner som blir berørt og

for beredskapsplaner for den ansvarlige dammen. De viktigste resultatene fra en DBBB er maksimal vannstand, vannhastigheter og vannstandstigning. Hvordan bølgen utvikler seg beskrives ved å gjennomføre teoretiske DBBB som bygger på ikke-stasjonære beregningsmetoder (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2009).

2.5 Bølgehastighet

Bølgehastigheten i elver ligger vanligvis mellom 0.25 m/s og 10 m/s (Allen, David, Andreadis, Hossain & Famiglietti, 2018). Bølgehastigheten varier ofte i sammenheng med vannføring. Om elva har flomsletter vil hastigheten gå ned ved større flommer, mens om det ikke er andre steder vannet kan gå vil hastigheten på bølgen øke (A. Meyer, Fleischmann, Collischonn, Paiva & Jardim, 2018).

Bølgehastighet regnes ut ved å bruke lengden av elvestrekningen *x* og dele på tiden *t* bølgen bruker på strekingen:

$$\boldsymbol{c = \frac{x}{t}} \tag{6}$$

2.6 Arealskalering

Ved å arealskalere antas det at feltkarakteristikk for ett område, tilsvarer et annet hvor det finnes flere verdier og data. Dette gjøres for å finne for eksempel avrenning fra et område uten målinger (Alfredsen, 2021). Da brukes formelen:

$$\boldsymbol{Q_A = \frac{F_A * A_A}{F_B * A_B} * Q_B} \tag{7}$$

Hvor område A er det område som ønskes data på, og område B er feltet med målte data som antas likt område A. Variabelen F er spesifikk avrenning, A er feltarealet og Q er avrenning.

2.7 Overløp

Overløp er en del av et flomløp. Flomløp er laget for å avlede avløpsflom ved dimensjonerende flomvannstand (DFV). Kapasitet av overløp beregnes ut fra basisformelen (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2005):

$$\boldsymbol{Q = CLH^{\frac{3}{2}}} \tag{8}$$

Hvor Q er total kapasitet i m^3/s, C er overløpskoeffisient, L er effektiv lengde på overløpsterskel og H er den dimensjonerende overløpshøyden.

2.8 Regresjonsanalyse

I en regresjonsanalyse blir det sett på sammenhengen mellom en avhengig variabel og en eller flere uavhengige variabler. Det er en metode som tillater å kontrollere for ulike faktorer, og om de korrelerer eller samvarierer (Braut & Dahlum, 2018).

Det lineære forholdet mellom Y og X blir beskrevet slik:

$$\boldsymbol{Y \approx \alpha + \beta_1 X} \tag{9}$$

Hvor α og β er ukjente konstanter som representerer krysningspunkt og helling i modellen. Målet blir å finne koeffisientestimat $\hat{\alpha}$ og $\hat{\beta}$ slik at modellen passer tilgjengelige data, altså:

$$\boldsymbol{y_i \approx \hat{\alpha} + \hat{\beta}_i X \; for \; i = 1, \dots, n} \tag{10}$$

2.8.1 Lineær regresjon

Det finnes to typer lineær regresjon: Simple og Multiple. Simple er nyttig dersom man bare har en variabel. Ved flere variabler vil Multiple være bedre å bruke. Da vil alle variablene være i samme modell, men med egne hellingskoeffisienter (James, Witten, Hastie & Tibshirani, 2013).

$$\boldsymbol{Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_p X_p + \epsilon} \tag{11}$$

2.8.2 Logaritmisk regresjon

I en lineær regresjon vil det vanligvis være enhetsforandring mellom x- og y-variablene. Ved å gå fra lineær til logaritmisk regresjon vil det gå fra en enhetsforandring til en prosentforandring mellom variablene (Andy, 2019).

Logaritmisk transformering er nyttig når datasettet er skeivfordelt i distribueringen av data, og når det finnes en ikke-lineær sammenheng mellom de avhengige og uavhengige variablene. Ved å implementere en slik transformering vil datasettet bli mer normalfordelt. En lineær ln-modell ser slik ut (Benoit, 2011):

$$\boldsymbol{Y_i = \alpha + \beta_i ln X_i + \epsilon_i} \tag{12)13}$$

Det lineær ln-modellen sier er at en enhetsøkning i $\boldsymbol{lnX}$ produserer en forventet økning av Y for $\boldsymbol{\beta}$ (Benoit, 2011).

2.8.3 R^2 Statistic

For å finne ut om regresjonsanalysen har en god passform er det ulike metoder man kan bruke. Den vanligste er minste kvadraters metode.

$$\boldsymbol{R^2 = \frac{TSS - RSS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS}} \tag{14}$$

Hvor:

$$TSS - Total\ sum\ of\ squares$$

$$RSS = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y_i})^2$$

R^2-verdien vil alltid ligge mellom 0 og 1, og er en måling av det lineære forholdet mellom X og Y.

2.9 Isdannelse

Faktorene som spiller inn på isdannelse er i hovedsak lufttemperatur, vind, skydekke og nedbør sammen med vannføring, vannhastighet og vanntemperatur. Frysepunktet til vann er 0 °C, og ved frysing vil volumet øke ca. 9 %. Is som flyter i vann vil vanligvis romme 10% av vannoverflatevolumet, mens de resterende 90% vil være under vann (Asvall, 2010).

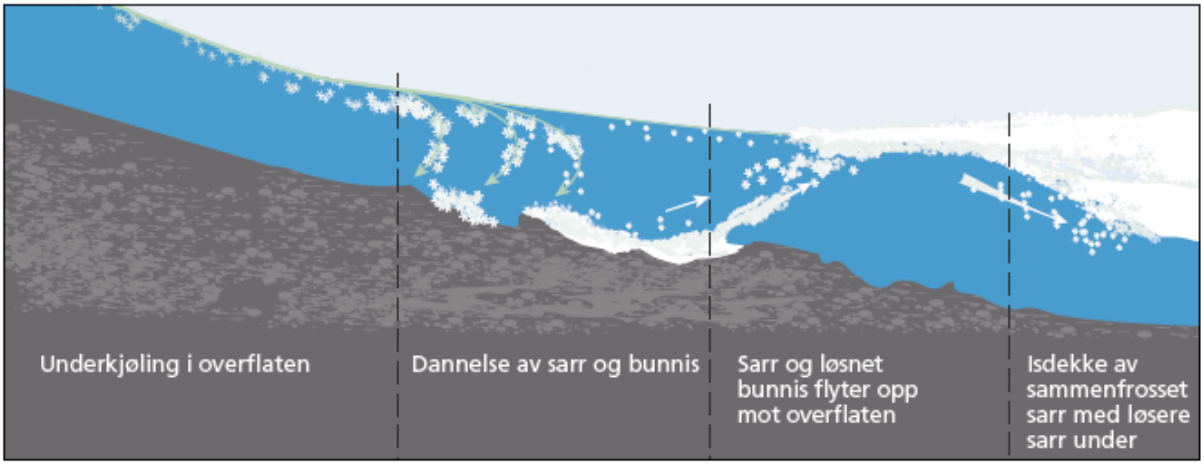
Vann kan i hovedsak være i to situasjoner når is skal dannes: laminær eller turbulent strømning. De to situasjonene fører til to ulike prosesser, statisk og dynamisk isdannelse. For at isdannelse skal skje må vannoverflaten være underkjølt, altså må temperaturen være under 0 °C, og det må være krystallisasjonskjerner til stede (Asvall, 2010) (Flatjord, 1963).

Statisk isdannelse skjer ved at den første isen enten skytes ut fra punkter på strandlinjen eller fra krystallisasjonskjerner når vannoverflaten er underkjølt. Det blir da dannet et

nettverk av isnåler, og områdene mellom disse vil raskt bli islagte. Utfra dette dannes det stålis, og prosessen blir kalt kraving. Ved snøfall vil denne prosessen skje enda raskere, da varmetapet fra vannoverflaten vil bli større. Etter at det er blitt sammenhengende isdekke, vil isen ha en temperatur på 0 °C. For at isen skal tykne må overflaten bli avkjølt til under denne temperaturen, og da vil varme fjernes fra grenseflaten mellom vannet og isen og det vil dannes mer is på undersiden (Asvall, 2010).

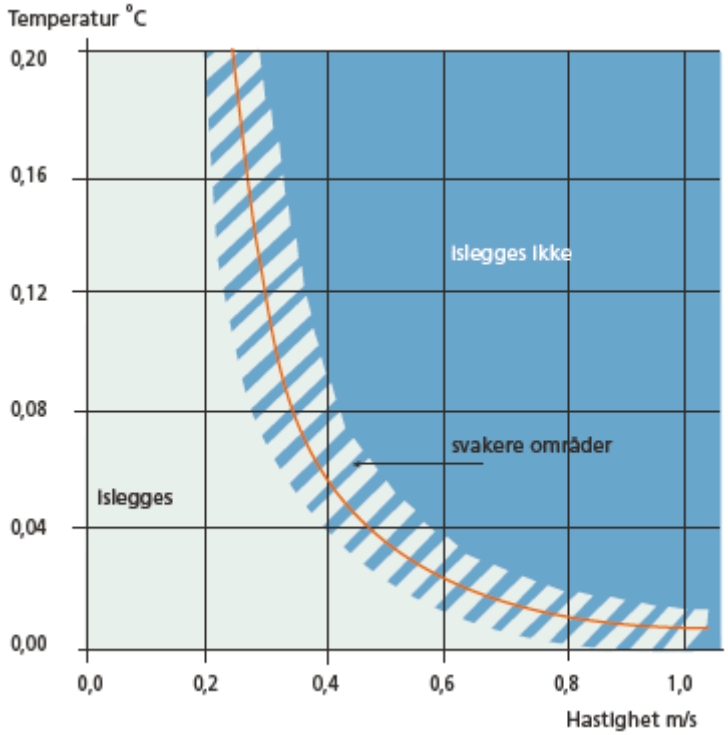
Dynamisk isdannelse skjer ved turbulent strømning, der det er tilnærmet fullstendig blanding av vannmasser. Over en lengre kuldeperiode vil hele vannmassen kjøles ned til nær 0 °C, og det vil dannes et tynt lag med overflatevann som er underkjølt. Når dette underkjølte vannet roteres rundt i vannmassen og kommer i kontakt med krystallisasjonskjerner vil det dannes iskrystaller som enten havner på overflaten eller ned i dypere lag. Disse iskrystallene kalles sarr, og kan være med på å danne bunnis. Sarr og bunnis blir ofte kalt undervannsis og prosessen blir kalt kjøving (Asvall, 2010).

Undervannsis og stålis skiller seg veldig fra hverandre. Undervannsis har en svampaktig funksjon, der den er gjennomtrukket av vann og kan fungere som et fint filter. Sarr kan igjen deles inn i to tilstander: Aktivt og passivt. Aktivt sarr er underkjølt og kleber seg lett. Når sarret blir passivt har det mistet underkjølingen, og vil heller ikke klebe seg eller kunne danne bunnis. Det passive sarret vil da flyte nedstrøms og samle seg ved roligere partier. Når det ikke lenger er tilgang til aktivt sarr eller underkjølt vann vil bunnisen til slutt løsne og flyte nedstrøms. Sarr kan også dannes i vann, som magasin og innsjøer, dersom det er kaldt og mye vind. Da vil det øverste laget få en hinne med omrørt, underkjølt vann som det kan dannes sarr i som vist i Figur 2-1 (Asvall, 2010).



Figur 2-1: Illustrasjon av hvordan sarr dannes. Utklipp fra *Hvordan is i vassdrag dannes* (Asvall, 2010).

Vannhastigheten sammen med temperaturen i elva har mye å si for om isen vokser, blir liggende eller vil løse seg opp. Dersom disse to faktorene er for høye vil det ikke være egnet for isdannelse. For at sarr skal feste seg på langsgående iskanter må ikke hastigheten være større enn 0.4 m/s. Økes hastigheten til 0.6 m/s vil sarret stanse ved tverrgående kanter og isdekket vil bli bygget oppover elva. Dersom hastigheten øker over dette vil ikke sarr feste seg, men heller dykke under isfronten. Dette vil altså si at dersom det er råker i isen, vil disse holde seg åpne ved hastighet på 0.6 m/s eller over. Sammenhengen mellom lufttemperatur, vannhastighet og isdannelse er vist i Figur 2-2 (Asvall, 2010).



Figur 2-2: Vanntemperatur og vannhastighet i råker. Utklipp fra *Hvordan is i vassdrag dannes* (Asvall, 2010).

2.9.1 Istyper

Det finnes ulike typer is. De vil ha ulike egenskaper og dannes på ulike måter.

Stålis

Stålis er alltid det nederste laget på et isdekke og er den sterkeste typen is. I starten av sesongen kan isen på vann kun være stålis. Energileddene som styrer isveksten til denne typen is er varmetap til luft og tilførsel av varme fra vannet under isen. Om varmetapet til luften er større enn varmetilførselen fra vannet vil isen vokse og er det omvendt vil den smelte. Hvor vannet beveger seg under isen vil man altså ha mer varmetilførsel fra vannet og det vil være vanskeligere å danne is. Stålis vokser hvor det er vann tilgjengelig for frysing. Det er under isen og isen blir da et isolerende lag mellom vann og luft. Derfor vil det bli forsinkelse på dannelse av ny stålis. Hvor vannet strømmer under isen kan stålisen kun vokse om det er veldig lav temperatur. Om det er plussgrader eller moderate minusgrader vil isen smelte fra bunnen. Tykkelsen på denne typen is vil derfor være forskjellig i slike områder (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2021b).

Sørpeis

Når det kommer et snødekke på et allerede etablert isdekke vil den nedre delen av snøen bli veldig våt, med konsistens som sørpe. Sørpen fryser fra toppen og det dannes sørpeis. Det vil i en periode fungere som to islag, men om det komme flere snølag kan lagene fryse sammen til et islag. Områder som har mye snø vil ha store mengder sørpeis, og det kan bli opptil et par meter fra toppen av is-/snødekke til bunnen hvor det er stålis. Grunnen til at isdekket blir så tykt er at det fryser fra oversiden ved at det kommer snø, og/eller overvann som fryser på toppen. Ved store snøfall kan det være overvann nederst i snødekket over lengre tid før det fryser til sørpeis. Sørpeis har et stort innhold av snø og luft og har derfor lavere styrke enn stålisen (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2021b).

2.9.2 Istykkelse

Graddagsmetode
En graddagsmetode ses i utgangspunktet på som en statistisk metode, da graddagstall først har en sammenheng med fenomenet i en studie, og etterpå er brukt til å forutsi hvordan fenomenet vil endres ettersom graddagstallet endres. Frysegraddager (FDD) og tinegraddager (TDD) er definert som forekomster av temperaturer under og over frysepunkt. Akkumulerte frysegraddager (AFDD) er en summering av frysegraddagene over en gitt periode, ofte en vintersesong. Det er to måter å beregne AFDD på, den ene er å kun ta utgangspunkt i FDD og den andre måten er å inkludere både FDD og TDD hvor temperaturene under frysepunkt blir gitt positivt fortegn og temperaturene over frysepunkt får negativt fortegn (Brooks, 2010).

Stefans formel
Stefans graddagsmetode (Stefan 1891) har lenge blitt brukt for å finne istykkelse på sjøer og i elver. Ligningen fungerer ikke så bra i innfrysning, men veldig bra når det er dannet et stabilt isdekke. Derfor er den mest kompatibel ved estimering av sesongtykkelse på isdekke fremfor førstegangsinnfrysning (Ashton, 1986). I metoden er istykkelsen h gitt som (Washantha Lal & Shen, 1991):

$$\boldsymbol{h = \alpha_h * \sqrt{S}} \tag{15}$$

Hvor:

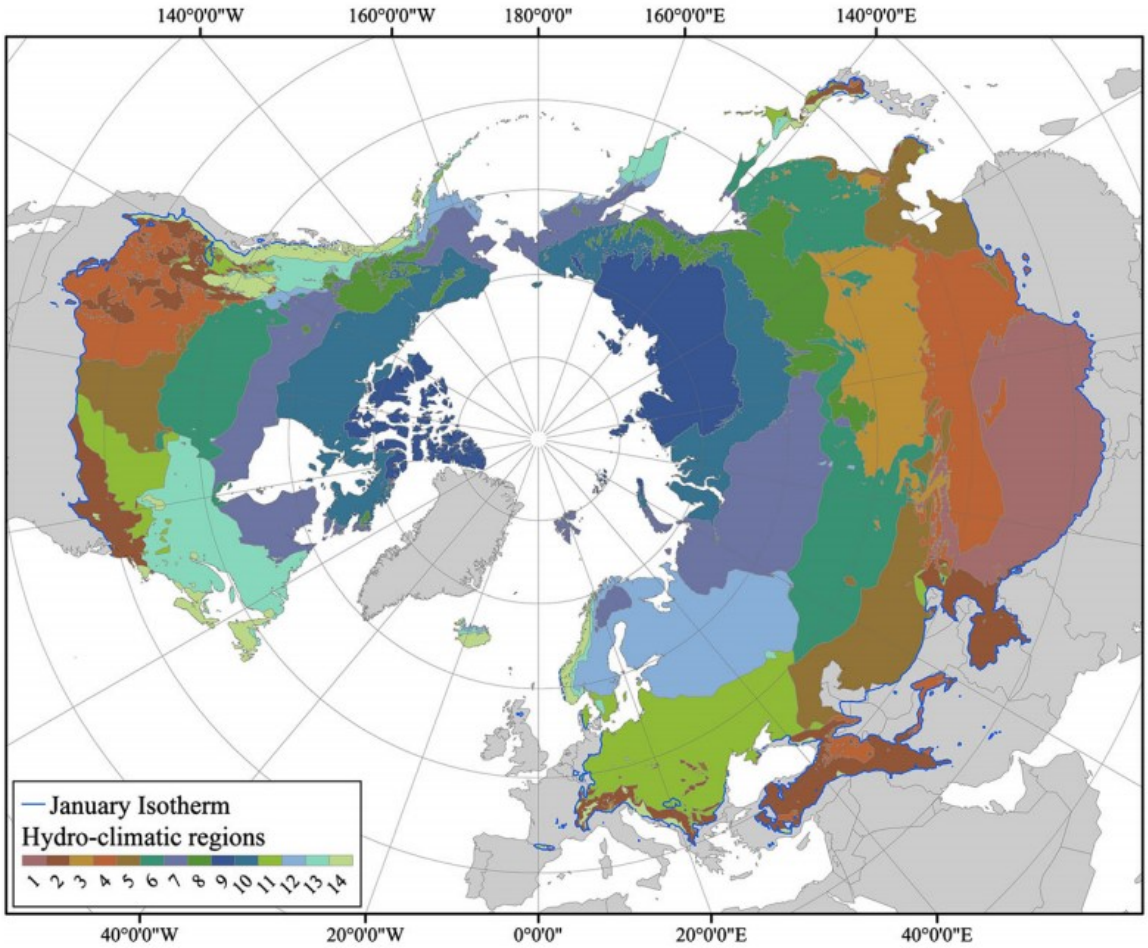
$$\alpha_h = empirisk\ graddagsfaktor\ (m°C^{-\frac{1}{2}}dag^{-\frac{1}{2}})$$
$$S = Akkumulerte\ frostdøgn\ (AFDD)\ (°C)$$

I 1971 definerte Michel typiske verdier av α_h. Faktoren har et område fra maksimum på 34 til minimum på 7, og tykkelsen på isdekket vil være større ved høyere faktor og mindre ved lavere faktor under samme hydroklimatiske forhold. Det er også forskjell på faktorene i sjøer og i elver, dette på grunn av turbulensen i elva som tvinger hele vannsøylen til frysepunkt for så å danne et isdekke på overflaten av elva. Har den hydroklimatiske regionen mye nedbør og lave temperaturer vil det dannes et tykt isdekke og kreve høy graddagsfaktor, er det lite nedbør og høye temperaturer vil det produseres et tynt islag og kreve lav graddagsfaktor (Brooks, 2010). Tabell 2-2 viser slike typiske verdier for graddagsfaktorer.

Tabell 2-2: Typiske α verdier, stammer fra Stefans formel (Michel, 1971).

Tilstand på isdekket	α_h
Teoretisk maksimum	34
Vindfulle sjøer uten snø	27
Gjennomsnittlig sjø med snø	17-24
Gjennomsnittlig elv med snø	14-17
Liten elv i ly med stri strøm	7-14

En studie ble utført i 2010 på graddagsfaktorer. Det ble modellert frem en oversikt for faktorene for den nordlige halvkule. Det ble brukt over 400 ulike elver og sjøer av forskjellig størrelse for å kalibrere graddagsfaktorer for de ulike hydroklimatiske regionene. Det ble brukt 14 hydroklimatiske regioner og modellvalideringen fikk R^2 = 0.44 for elver (Brooks, 2010). I Figur 2-3 vises de 14 ulike regionene for graddagsfaktorer og i Tabell 2-3 tilhørende graddagskoeffisienter.



Figur 2-3: Hydroklimatiske regioner for ulike graddagsfaktorer (Brooks, 2010).

Tabell 2-3: Graddagskoeffisienter (Brooks, 2010).

Region	Gj.snitt januar Nedbør Regionsgj.snitt [mm/mnd]	Gj.snitt januar Temperatur Regionsgj.snitt [°C/mnd]	Store sjøer- og maga-sinkoeff.	Små til me-dium sjøer- og magasinkoeff.	Elvekoeff.
1	5	-14.6	19.4*	21.2*	19.9*
2	61	-4.8	19.4*	21.2*	16.7
3	4	-21.7	19.4*	21.2*	19.9*
4	9	-7.5	19.4*	21.2*	19.9*
5	13	-7.2	9.2	21.2*	19.9*
6	17	-17.7	23.2	19.6	20.7
7	27	-21.6	19.4*	19.7	22.0
8	15	-29.8	19.4*	17.7	17.0
9	11	-37	19.4	24.6	18.2
10	16	-30	21.7	23.7	20.7
11	41	-4.9	17.8	20.1	18.8
12	37	-12.3	20.7	21.7	20.5
13	66	-15.1	20.7	18.2	21.7
14	145	-6.1	19.4*	21.2*	27.5

* Merker hydroklimatisk regioner som mangler observert data.

2.9.3 Isoppstuving og isreduksjon

Om vinteren vil tilsiget i en elv variere svært lite, mens vannstanden kan variere mye. Ved samme vannføring vil det være forskjell mellom vannstanden i islagt elv og elv uten is. Dette er fordi det vil være friksjon mot istaket, og isen vil heve vannstanden i elva. Denne situasjonen kalles isoppstuving. Denne oppstuvingen avhenger av forholdene i elva, og det vil være lokale variasjoner. Dersom sarr smelter vil vannstanden reduseres, men vannføringen øker. Det er derfor ikke riktig å bruke sammenhengen mellom vannstand og vannføring om sommeren til å finne samme sammenhengen om vinteren. For å få riktig vannføring må man foreta en isreduksjon, der man trekker fra islaget. For å få til en god isreduksjon er det nødvendig med direkte målinger av vannføring, kunnskap om området og meteorologiske og hydrologiske forhold og sammenligning med ikke-isoppstuvede målestasjoner i nærheten (Asvall, 2010) (Fergus, Hoseth & Sæterbø, 2010).

Vann har stor varmekapasitet, og temperaturen vil variere mye mindre enn lufttemperaturen. Varmeutvekslingen mellom vannet og atmosfæren hender kontinuerlig, og dersom lufttemperaturen ikke varierer på en stund, vil vanntemperatur og lufttemperatur bli nærmere og nærmere hverandre (Asvall, 2010). Ved varmeutveksling er det noen viktige prosesser:

- Kort- og langbølget inn- og utstråling:

Den største varmeutvekslingen skyldes dette. Kortbølget stråling kommer av solen, men om vinteren har betydningen av denne mindre å si grunnet den lave solhøyden. Vannoverflaten utstråler langbølget stråling, men vil også motta stråling fra skyer og luft. Ved klarvær vil denne strålingen avta betydelig, og det blir et signifikant varmetap om vinteren og netter.

- Fordunstning og konveksjon
- Omdanning av fallenergi til varme
- Varmeutveksling ved tilsig, avløp og nedbør
- Varmeutveksling med bunnen

Særlig vil varmetapet fra åpen vannflate når temperaturen er lav, være interessant å se på. En tommelregel i norske elver er at man kan regne avkjøling ved middels kulde til å være 0.1 °C/km. Hvis det i tillegg snør/sludder/hagler vil dette trekke enda mer varme fra vannet (Asvall, 2010).

2.9.4 Påvirkning av snø i innfrysing

Snødekke påvirker dannelsen av isdekke og det er derfor viktig å ta hensyn til dette når man driver med ismodellering. Snø på is reduserer formasjonen av is kraftig på grunn av redusert varmeledning. For eksempel vil et snødekke som har en tiendedel av dybden til et isdekke, ha en varmeledning redusert til mellom 75 til 40 % for snødensitet på 0.15 – 0.40 g cm^{-3} (Lundberg, 2009). Lundberg gjorde målinger som fant følgende sammenheng:

$$\boldsymbol{K_s = 10^{2.65\rho_s - 1.652}} \tag{16}$$

Hvor:

$$K_s = Termisk\ konduktivitet\ av\ snø\ [Wm^{-1}K^{-1}]$$
$$\rho_s = Snødensitet\ [kg\ m^{-3}]$$

For å kalkulere temperaturen på grensen mellom to materialer kan følgende formel brukes (Heggen, 2013):

$$\boldsymbol{T_b = T_1 + \left[(T_2 - T_1) * \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right]} \tag{17}$$

Hvor:

$$T_b = Temperaturen\ mellom\ to\ materialer\ [℃]$$
$$T_1 = Temperaturen\ i\ ytterkant\ på\ materiale\ 1 [℃]$$
$$T_2 = Temperaturen\ i\ ytterkant\ på\ materiale\ 2\ [℃]$$
$$R_1 = Termisk\ motstand\ av\ materiale\ 1\ [Wm^{-2}\ ℃^{-1}]$$
$$R_2 = Termisk\ motstand\ av\ materiale\ 2\ [Wm^{-2}\ ℃^{-1}]$$

Termisk motstand er definert som forholdet mellom temperaturforskjellen mellom to flater av et material til varmens strømningshastighet per arealenhet. Høyere termisk motstand gir lavere varmetap. Termisk motstand kan defineres som (Mishra, Militky & Venkataraman, 2019):

$$\boldsymbol{R_i = \frac{h_i}{K_i}} \tag{18}$$

Hvor:

$$h_i = Tykkelse\ på\ materialet$$
$$K_i = Materialets\ konduktivitet$$

2.9.5 Isdannelse og sirkulasjon av vann i innsjøer

På grunn av tetthetsforholdene til vann ved ulike temperaturer vil det være sirkulasjon av vann i innsjøer. Dette gjør også at innsjøer mottar eller taper varme til omgivelsene, avhengig av værforhold. Om vinteren vil gjennomstrømmingen i de fleste innsjøer være moderat til liten, siden tilsiget er lite i denne årstiden (Asvall, 1977).

Ved høstsirkulasjon vil hele vannmassen ha en temperatur på rundt 4 °C. Dette er ved den temperaturen vannet har størst tetthet. Utover vinteren vil sjiktingen i vannet være slik at det kaldeste og letteste vannet ligger øverst. Før islegging er værforholdene avgjørende for temperaturforholdene i vannet resten av vinteren. Dette er fordi temperaturen i vannet vil synke svakt etter at isen har lagt seg, da denne har en isolerende effekt (Asvall, 1977).

Grunne innsjøer vil avkjøles og bli islagt raskere enn dype innsjøer. Det vil ofte være gjenstående åpne områder, og her kan vind føre til bølger som gjør at varmere vann kommer til overflaten. Ved disse partiene må isleggingen starte på nytt når det igjen blir værforhold for isdannelse. Dette fører til forsinkelse av islegging på innsjøen (Asvall, 1977). Det er ofte en forsinkelse fra første dato hvor lufttemperaturen faller under frysepunktet til isleggingen på innsjøen starter. Dette avhenger av dybden på innsjøen. For hver ekstra meter dybde, vil det bli en ekstra dag med forsinkelse (Kirillin et al., 2012).

2.10 LiDAR

LiDAR kommer fra engelsk *Light Detection and Ranging* og er en fjernmålingsteknikk som baserer seg på tilbakespredning av lys (Holtet, 2018). Teknologien bak LiDAR er basert på å beregne tiden mellom et lasersignal blir sendt og til refleksjonen blir mottatt. Sensoren bruker avanserte og presise bevegelser med innebygde speil og hjelpemekanismer for å kunne måle opp til én million unike punkter per sekund. Resultatet blir raske og nøyaktige tredimensjonale bilder. Avstanden LiDAR skanneren dekker er opp til flere kilometer og har nøyaktighet ned til én centimeter (Norges Geotekniske Institutt, 2021).

2.10.1 Rød LiDAR

Rød LiDAR er en topografisk, luftbåren laserteknologi, hvor det brukes infrarød bølgelengde på 1064 nm til å tilegne seg informasjon om terrenget. Rød LiDAR trenger ikke gjennom vannoverflater (Tapken, 2021).

2.10.2 Grønn LiDAR

Grønn LiDAR er en batymetrisk, luftbåren laserteknologi, og i motsetning til rød LiDAR brukes det her en grønn bølgelengde på 532nm. Hovedforskjellen på disse to typene er at grønn laser kan penetrere vannflater. Dette gjør det mulig å laserskanne sjøbunnen i tillegg til vannoverflaten og annet terreng (Tapken, 2021).

2.11 Programvarer

2.11.1 R og RStudio

R er et programmeringsspråk med åpen kildekode, og er spesielt utviklet for statistisk programmering og fremstilling. Det fungerer spesielt bra til plotting av grafer, og har også gode statistiske teknikker. Blant disse skiller regresjon og tidsserieanalyser seg ut (R Core Team, 2021). RStudio utvikler verktøy for R, og er avhengig av R for å kunne brukes. RStudio har et mer brukervennlig grensesnitt enn R, og har et stort antall statistiske pakker, i tillegg til høyere kvalitet på grafene som produseres (St. Olaf College, 2021).

2.11.2 LAStools

LAStools er en programvare utviklet av rapidlasso for å filtrere, overlappe, lage raster, triangulere, konvertere, klippe, kvalitetssjekke og lignende for LiDAR data. Programvaren kombinerer en robust algoritme med effektiv input/output og smart arbeidslagerorganisering for å oppnå høy gjennomstrømming av datasett som inneholder milliarder av punkter (rapidlasso, 2021).

2.11.3 ArcMap

ArcMap er en sentral applikasjon som blir brukt i ArcGIS. Man viser og utforsker GIS-datasett for områder og setter inn symboler og layouter for utskrift eller publikasjon. ArcMap brukes også til å lage eller redigere datasett. Det vil si at ArcMAP primært brukes til å vise, redigere, opprette og redigere geografiske data (esri, 2021).

2.11.4 NVE Atlas

Kartverktøy som er utarbeidet av NVE. Gir tilgang til mye geografisk kartdata. Kartverktøy som er utarbeidet av NVE. Gir tilgang til mye geografisk kartdata (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2021a).

2.11.5 NEVINA

NEVINA står for Nedbørfelt-Vannføring-INdeks-Analyse, og er en karttjeneste som er utviklet av NVE. Det har det samme brukergrensesnittet som NVE Atlas, men med utvidete funksjoner. Det er her mulig å genere og redigere nedbørfelt, samt generere feltparametere og indekser for naturlige feltgrenser. Disse kan igjen eksporteres til shape-filer eller pdf og brukes til ulike utregninger. Verdiene vil inneholde en viss grad av usikkerhet, da de beregnes automatisk, og bør ikke oppfattes som eksakte (Norges vassdrag- og energidirektorat, 2019).

3 Områdebeskrivelse

Det skal i denne oppgaven ses på to vassdrag som er lokalisert på ulike steder i Norge. Det ene vassdraget er Hemsil som ligger i Hallingdal i Viken fylke. Området er avgrenset til strekningen mellom Eikredammen og utløpet av Hemsil i Hallingdalselva ved Gol sentrum. Det andre er Årdalsvassdraget som ligger i Ryfylke i Rogaland fylke. Dette området er avgrenset mellom dam Breiavad som demmer opp Breiavatnet og utløpet i Årdalsfjorden. Figur 3-1 viser hvor vassdragene ligger. Begge områdene er preget av isproblematikk med tanke på vannføring, men av forskjellige årsaker.

Figur 3-1: Oversiktskart som viser vassdragene

Golsjuvet i Hallingdal

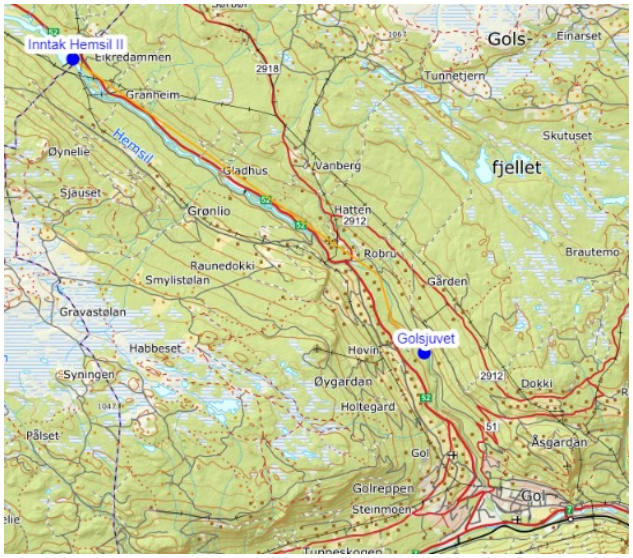
Golsjuvet ligger i Hallingdal i Viken og er en populær destinasjon for isklatrere om vinteren. Det ligger nedstrøms for inntaket til kraftverket Hemsil II, som Hafslund ECO drifter. Om vinteren ligger minstevannføringen på 0.025 m^3/s, men ved utfall av kraftverket kan en betydelig større vannføring gå i elva. Kraftverket driftes vanligvis på 32 m^3/s. Hvis kraftverket faller ut, medfører dette en betydelig risiko for isklatrere i Golsjuvet. Fra kraftverksinntaket til Golsjuvet er det ca. 11 km.

22. februar 2001 ble det målt vannføring fra Eikredammen til Golsjuvet. Bakgrunnen var en feil i en bryter i Hemsil II. Den gangen gikk det ca. 8 m^3/s i elva, og den vannføringen brukte om lag 8 timer. Hafslund ECO legger til grunn at en mindre vannføring bruker lengre tid på å fylle småkulper, etablere snø/isdammer med påfølgende brudd nedover i vassdraget enn ved større vannføringer.

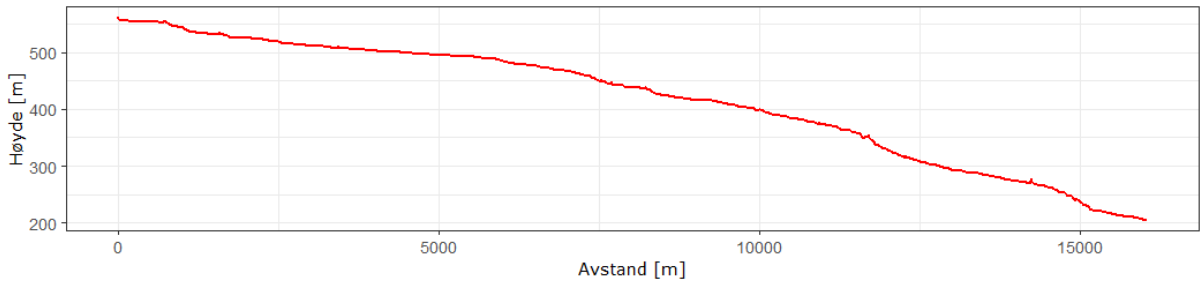
Det er utført dambruddbølgeberegning for vassdraget som sier en startvannføring på 281 m^3/s og kulminert vannføring på 626 m^3/s bruker om lag 26-34 minutter fra Eikredammen til Golsjuvet. Dette kan ikke sammenlignes med produksjonsvannføringa på 32 m^3/s da den er mye mindre. Denne ble derfor beregna separat ved hjelp av Saint-Venant-ligningene (1D). Det er lagt til grunn lav startvannføring. Utregningen viser at det vil ta 20

minutter før første vannmengde treffer Golsjuvet, og 30 minutter til alt vannet har kommet frem.

Figur 3-2: Illustrasjon av isklatring i Golsjuvet, bildet hentet fra golinfo.no (Kvambekk, 2021).



Figur 3-3: Oversiktskart over nedre del av Hemsil, utsnitt hentet fra norgeskart.no (Norgeskart.no, u.å.-a)



Figur 3-4: Høydeprofil fra Eikredammen til utløpet i Hallingdalselva.

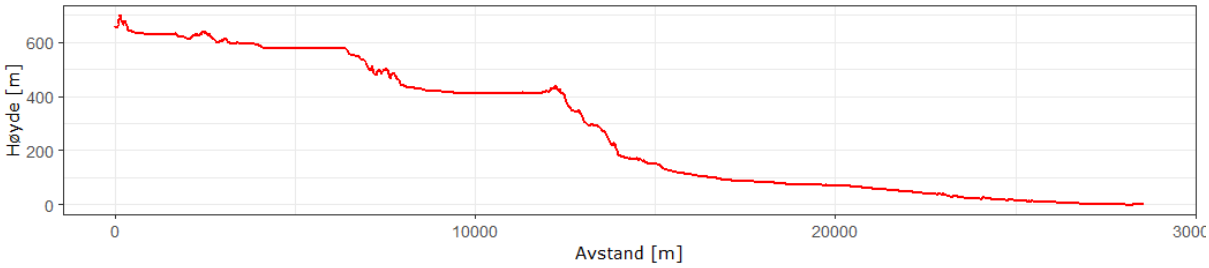
Årdalsvassdraget i Ryfylke

Årdalsvassdraget, også kalt Storåna, ligger i Ryfylke i Rogaland fylke. Ved Breiavatnet er det inntak til Lysebotn kraftverk. Det er Lyse Produksjon AS som drifter dette kraftverket og påser at riktig minstevannføring blir sluppet. For å kontrollere at minstevannføringen når frem til Årdal har NVE en målestasjon ved Kalltveit i Årdal. Fra utslippspunkt til

målestasjonen er det litt over 19 km, vist i Figur 3-5. Vassdraget har et bratt og vanskelig terreng, vist i Figur 3-6. Fra Breiavatnet renner elva gjennom sjøene Kråkeholsvatnet, Musdalsvatnet, Viglesdalsvatnet og Hiavatnet. I tillegg går elva gjennom Granefossane, Hiafossen og Sendingsfossen. Det kommer også noen sideelver, Lyngsåna, Ullestadåna og Bjørg, inn i Storåna før den munner ut i fjorden ved Årdal. Det er plassert ut trykksensorer i to av sjøene, Musdalsvatn og Hiavatn. I tillegg er det utført vannstand- og vannførings-målinger. Lyngsåna har et betydelig resttilsig, noe som er viktig å ta med i simuleringen av vannføringen i Storåna.

Alle disse tilleggsfaktorene gjør det vanskelig å beregne eksakt hvor mye eller lite vann som må tappes fra utslippspunkt for at vannføringen ikke skal gå under minstekravet ved målepunktet i Kalltveit. Dette problemet blir større ved vinterstid, da det kan legge seg is i utløpene av de mange sjøene, eller fossene og tilløpende elver kan fryse til.

Figur 3-5: Oversiktskart over strekningen Breiavatnet - Kalltveit, hentet fra norgeskart.no (Norgeskart.no, u.å.-b)



Figur 3-6: Høydeprofil fra Breiavatnet til utløpet i Årdalsfjorden.

4 Metode

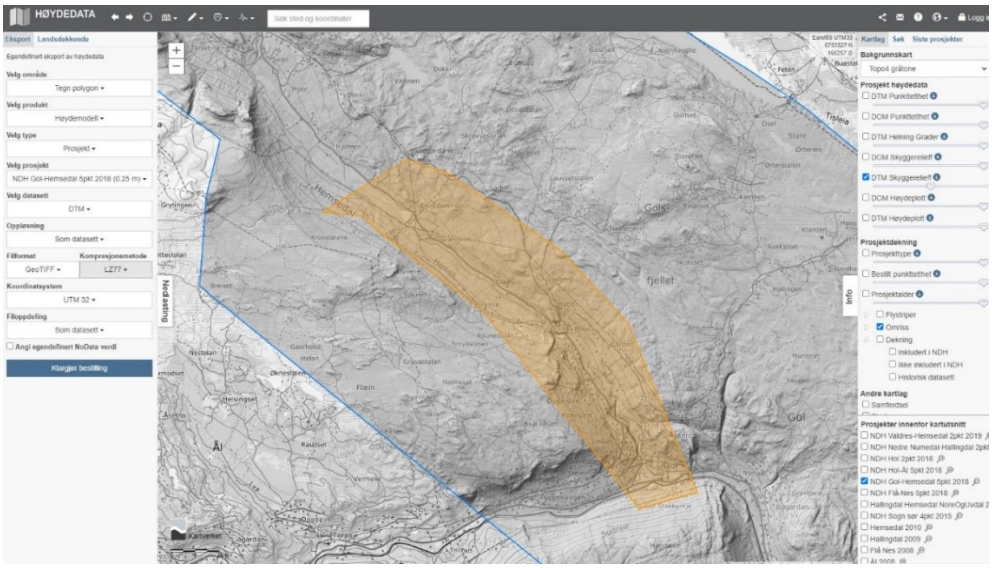
Metoden er brukt for å svare på de tre forskerspørsmålene på best mulig måte. Det er innhentet terrengdata og værdata, brukt analyseverktøy slik som Excel og R, samt elveanalysesystemet HEC-RAS. Her er det laget hydrauliske modeller til begge vassdragene. Metoden er utarbeidet for å være mest mulig praktisk og anvendelig for videre bruk. Modellene er kalibrert, og ut fra resultat fra disse er det utarbeidet en kalkulator som beregner tidsforsinkelse av vannføringer og hvor mye tappet volum som må suppleres.

4.1 Verktøy

For å starte et prosjekt må det innhentes et datagrunnlag. I dette tilfellet trengs en terrengprofil av elva og området rundt. For å kunne få dette inn i HEC-RAS er det ulike prosesser som må gjennomgås. Innhenting av data fra høydedata.no, konvertering av filformat fra LAZ til LAS i LAStools og fra LAS til raster i ArcMap. LAS er LASer format, mens LAZ er en komprimert type LAS. Fra høydedata.no er det rød laserdata som blir hentet. Dette kommer i geoTIFF-format som er rasterdata og inneholder det som er nødvendig for å etablere en nøyaktig romlig referanse.

4.1.1 Innhenting fra høydedata.no

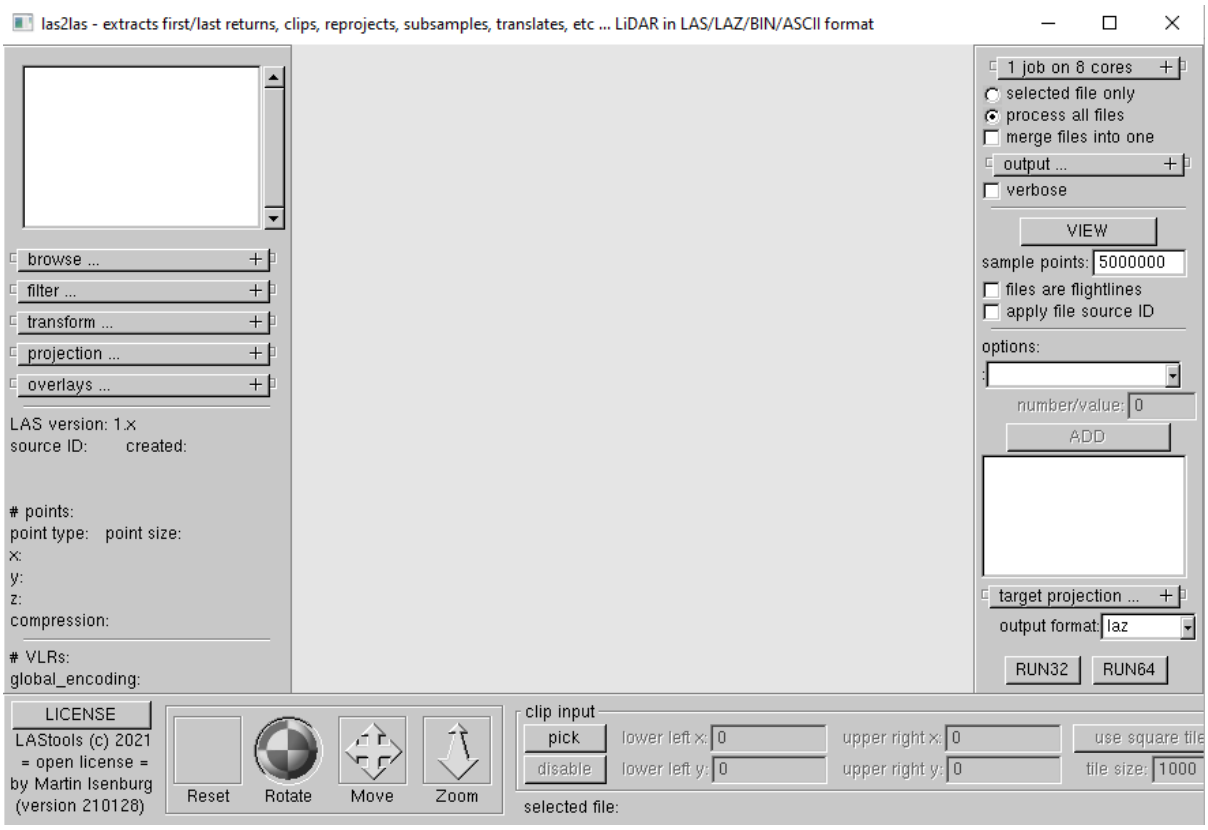
For Golsjuvet må man laste ned en terrengmodell fra høydedata.no. Denne kommer i rød LiDAR-data. Først så finner man området hvor elva ligger og tegner området inn som en polygon for å slippe overflødig terreng. Velger høydemodell som produkt og prosjekt som type. Som prosjekt så velges NDH Gol-Hemsedal 5pkt 2018 (0.25m) som er det nyeste prosjektet med best oppløsning. Velger DTM (Digital terreng modell), samme oppløsning som datasettet, GeoTIFF som filformat og LZ77 som kompresjonsmetode. Som koordinatsystem velges UTM 32 og filoppdelingen blir den samme som datasettet. Høydedataen blir eksportert som filformatet man valgte til e-post hvor man så kan importere den direkte inn i HEC-RAS. Figur 4-1 viser et utsnitt fra høydedata.no.



Figur 4-1: Utsnitt av område fra høydedata.no

4.1.2 Konvertering i LAStools

For Årdalsvassdraget leverte Lyse AS grønn LiDAR-data for det aktuelle området, og det var ikke nødvendig å laste ned ekstra data. Formatet på filene fra Lyse A/S er i formatet LAZ. For å kunne lage raster må formatet være i LAS-format. Til dette brukes konverteringsverktøyet LAStools. Bruker las2las.exe for å gjøre denne operasjonen. Figur 4-2 viser programvaren til LAStools. For å få filene inn i verktøyet trykkes det på *Browse* og så finner man mappen hvor filene er lagret. For å legge til alle filene i mappen trykkes det på *Add*. Det hukes av på *Process all files* og det trykkes på *Output location* for å bestemme hvor LAS-filene skal lagres. *Output format* endres til LAS. For å kjøre konverteringen trykkes det på *RUN64* og så på *START* i pop-up-vinduet. Om det er mange filer som skal konverteres så tar det lang tid. LAS-filene finnes i mappen man valgte for *Output location*.

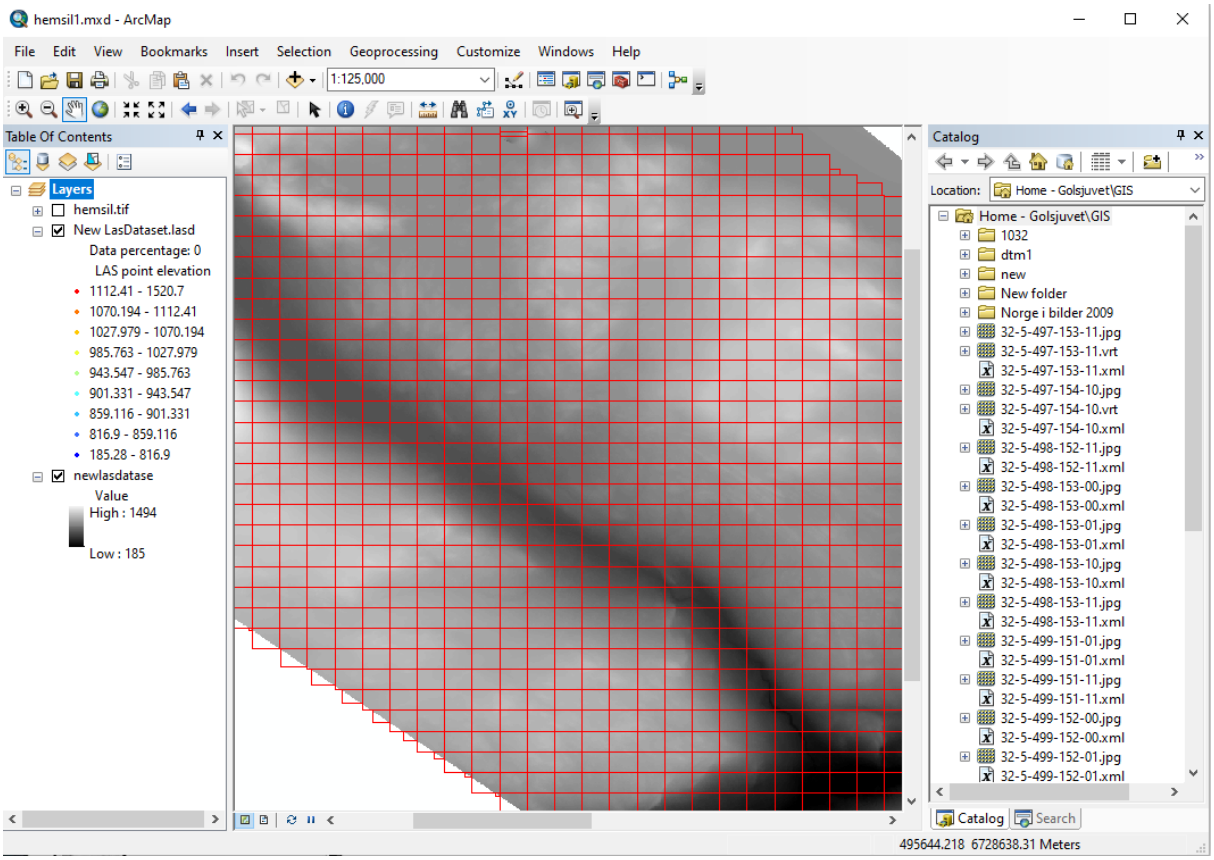


Figur 4-2: Utsnitt fra LAStools

4.1.3 Konvertering i ArcMap

Siste steg for å få formatet HEC-RAS ønsker på filene er å konvertere fra LAS til raster. Dette gjøres ved hjelp av ArcMap. Åpne *Catalog* på høyre side i vinduet og finn mappen hvor LAS-filene er lagret. Høyreklikk på mappen og opprett *New LAS dataset*. Bruk et passende navn og dobbeltklikk på det. Under *XY coordinate system* søker man på *UTM Zone 32* og velger dette i menyen under. Under *Z coordinate system* søker man på *NN2000* og velger dette. Dette er for at koordinatene skal stemme overens i terrenget og i programmet så man for eksempel kan legge et kartlag på toppen. Under *Files* klikker man på *Add* for å laste opp LAS-filene, og trykker på *OK*. På venstre side i vinduet høyreklikker man på *Layers* og legger inn koordinatsystem *UTM Zone 32* her også. LAS dataset-mappen som ble laget dras nå over til *Layers*. I søkefunksjonen på høyre side i vinduet søkes det på *LAS dataset to Raster* velger den. Velg datasettet som ble laget som *Input*. Under *Value Field* velges *ELEVATION*, under *Cell Assignment Type* velges *AVARAGE*, under *Void Fill*

Method velges *NATURAL_NEIGHBOR*, *FLOAT* velges under *Output Data Type* og *Cellsize* velges ut fra skjønn, 1 er vanlig. Trykk *OK* og vent til det er ferdig prosessert. Et utsnitt av resultatet viser i Figur 4-3.

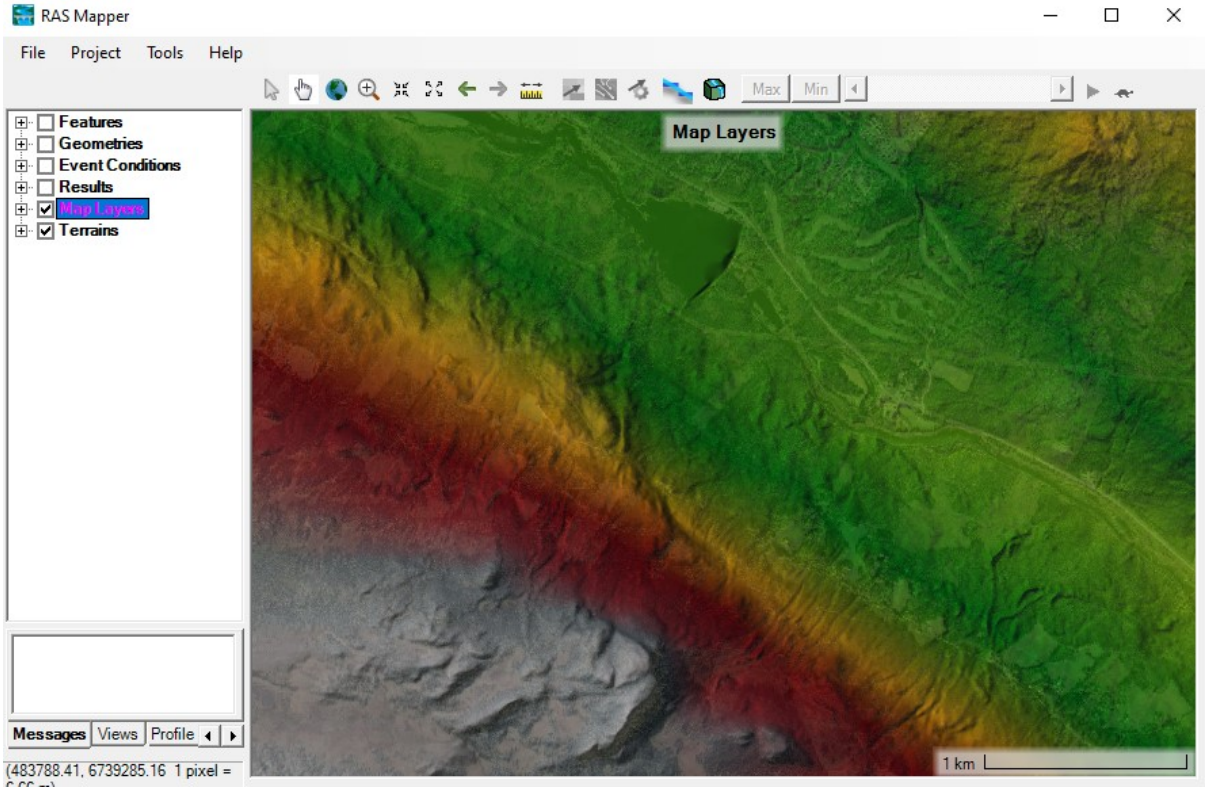


Figur 4-3: Utsnitt fra ArcMap

4.1.4 HEC-RAS

Når HEC-RAS åpnes må prosjektet som skal jobbes i opprettes. Dette gjøres ved å trykke på *Files* og deretter *New Project.* Velg et passende navn og klikk *OK.*

For å konstruere geometrien brukes RAS Mapper. Det første som gjøres er å legge inn riktig projeksjon så det stemmer overens med terrenget man skal sette inn. En projeksjonsfil lastes enkelt ned fra nettet ved å søke på projeksjonsfil og deretter søke på den projeksjonen man ønsker. Etter at det er på plass, laster man inn terrenget man har klargjort. Bruker 1/128 som *Rounding* og velger filnavn som passer prosjektet. For å sjekke at terrenget ligger riktig geografisk kan man legge på et kartlag fra Google ved å høyreklikke på *Map Layers* og så velge fra lista under *Add Web Imagery Layer*. Om man da gjør kartlaget gjennomsiktig ser man at terrenget ligger korrekt som vist i Figur 4-4. Det er også greit å bruke denne funksjonen når man skal legge inn geometrien da man kan se elvebankene bedre enn ved kun bruk av terrengmodellen.

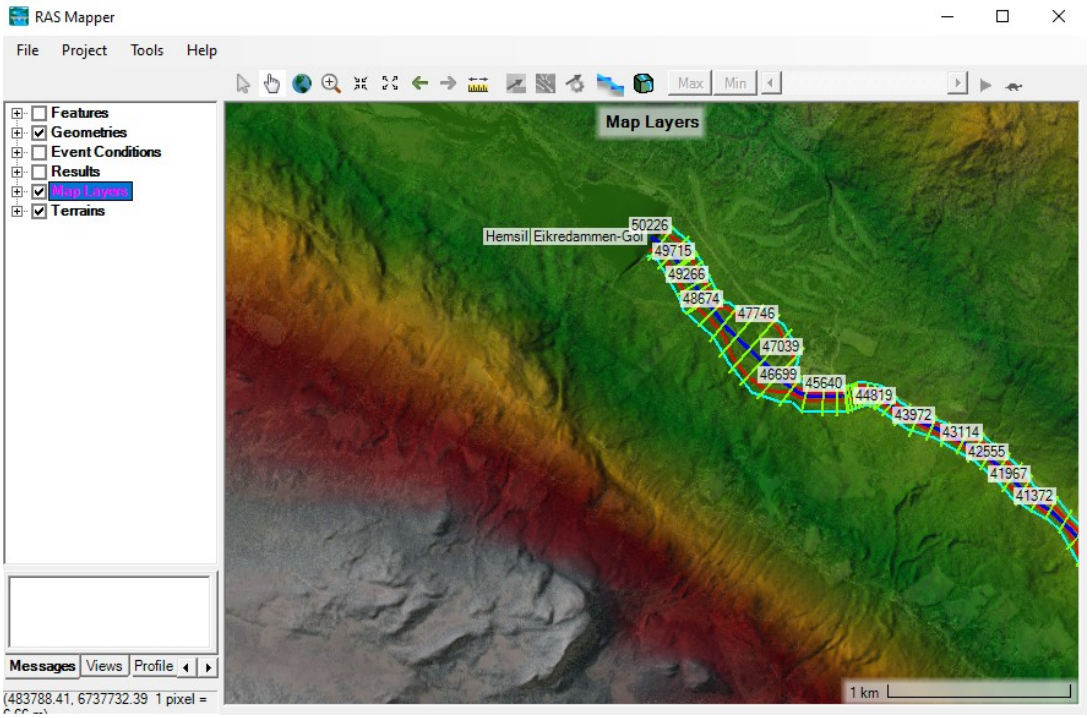


Figur 4-4: Terreng for Golsjuvet med gjennomsiktig kartlag, utsnitt fra RAS Mapper

4.2 Geometri for Golsjuvet

Geometrien i vassdraget fra Eikredammen til Gol sentrum er bratt. Skanningen er gjort når det har vært overløp noe som gjør at det er litt vann i elva og da kreves det mer for å få geometrien til å stemme. Utgraving av terreng hvor det er vannspeil og justering av manningstall er tiltak som er utført for å løse utfordringene.

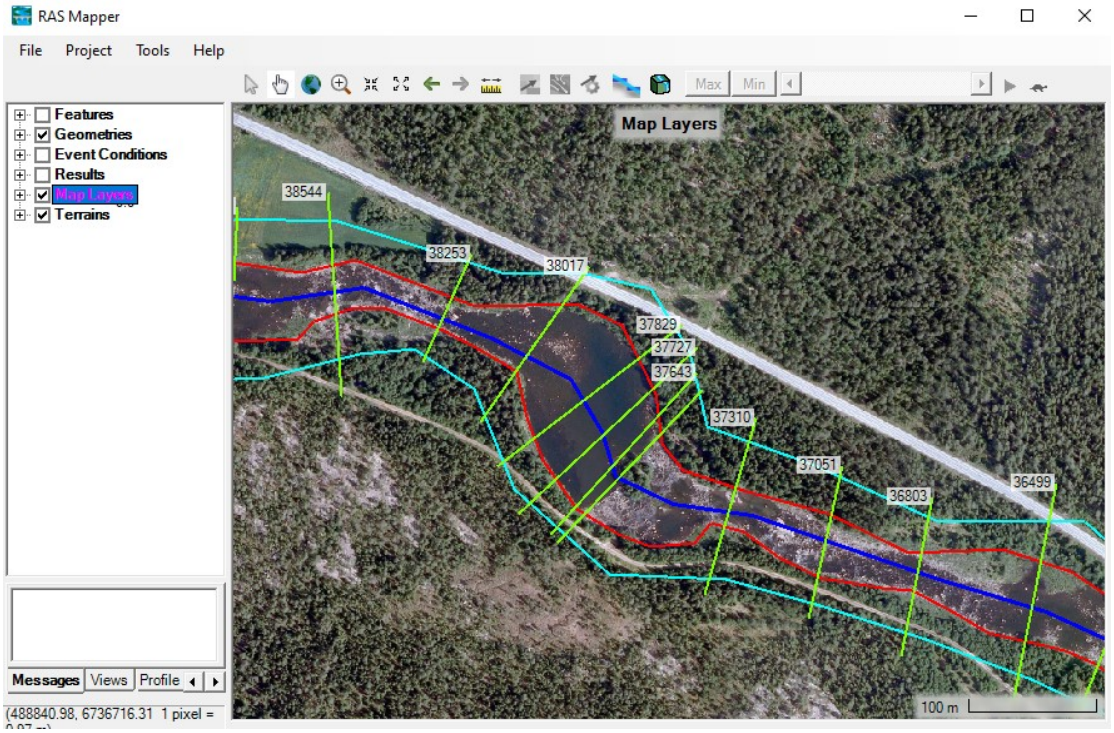
I HEC-RAS legges så inn geometri, med elv, elvebanker og flomveier fra Eikredammen ned til Gol sentrum. Her er det greit å bruke både terrengmodell, satellittbilde og ordinært kartlag for å få det så riktig som mulig. Implementerer også tverrprofiler her. De legges inn med ca. 40m avstand for å bruke det som utgangspunkt. Prøver å legge de inn hvor det er noe som skjer i terrenget. Om man bruker satellittbildet eller en skanning fra norgeibilder.no kan man kartlegge hvor det er vannspeil. Hvor dette er tilfellet legges det inn noen ekstra tverrprofil. Problemet ved skanning med rød LiDAR er at den ikke penetrerer vannoverflater. Dette fører til at om det er terskler eller kulper hvor vann samler seg vil terrenget bli som toppen av vannoverflaten. I denne elva er det ikke så stort problem da det er en grunn elv, men det er noen terskler hvor det gjøres forbedringer i modellen. Dette beskrives i kapittel 4.2.1. I Figur 4-5 ser man et utsnitt fra RAS Mapper hvor det er lagt inn geometri.



Figur 4-5: Terreng med geometri, utsnitt fra RAS Mapper

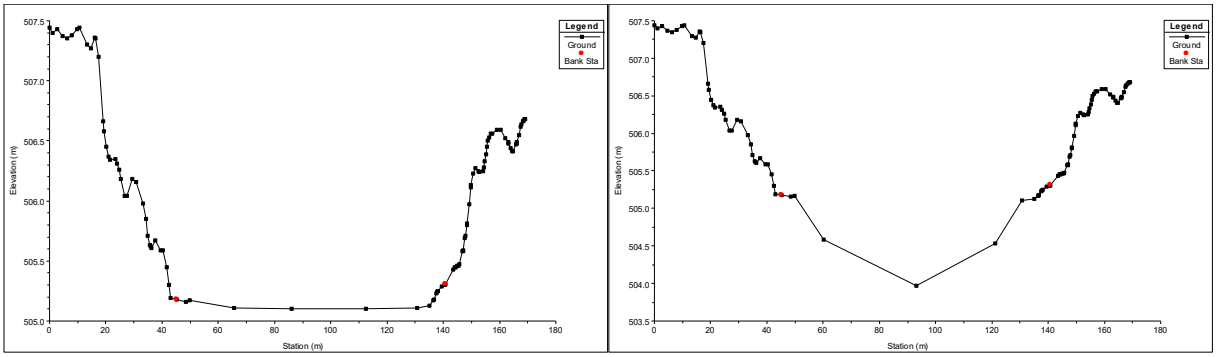
4.2.1 Modifisering av terreng

For å unngå problemet som kommer av skanning med rød laser kan man endre på tverr-profil som går gjennom områdene hvor det er vannspeil for så å interpolere tverrprofil etterpå. Tverrprofilene endres på under *Geometric Data* og *Cross sections.* I Figur 4-6 ser man at det er en terskel som demmer opp vannet hvor det dannes et vannspeil.



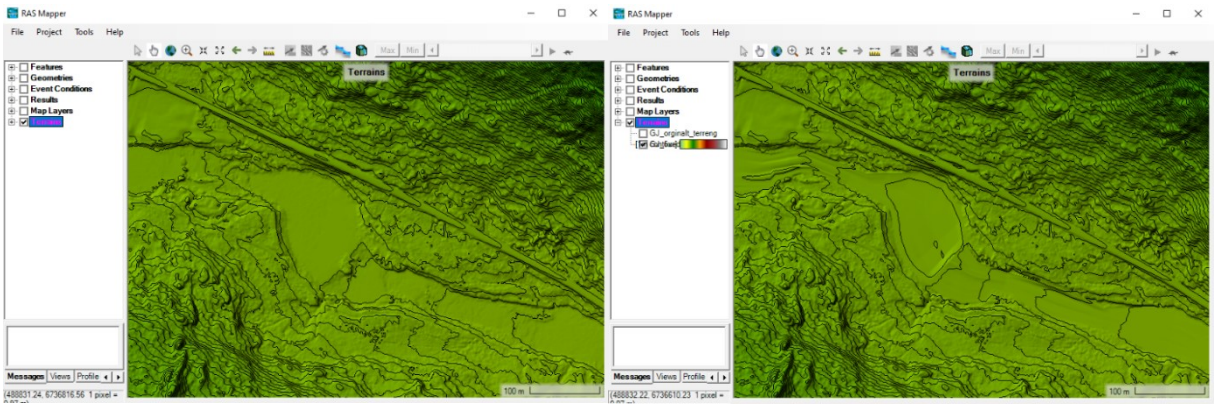
Figur 4-6: Utsnitt fra RAS Mapper som viser et typisk vannspeil

Figur 4-7 viser hvordan tverrprofil 37643 er blitt modifisert. Dette gjøres på flere tverrprofil over vannspeilene i hele elva. Man lager så et nytt terreng for modellen ved å lagre de nye geometridataene som en ny fil i *Geometric Data* vinduet.



Figur 4-7: Utsnitt fra HEC-RAS som viser hvordan tverrprofil er blitt modifisert

Man går så tilbake i RAS Mapper og høyreklikker på den nye geometrien man akkurat laget og trykker på *Export Layer -> Create GeoTiff from XS's (Channel only)* da man kun trenger selve elva. Man legger på et nytt terreng ved å legge til Tiff-filen man akkurat laget og Tiff-filen man har av terrenget, og slår de sammen. Det er viktig at filen for kanalen legges inn først for at sammenslåingen skal fungere. Man får da et terreng med en mye jevnere elvebunn som er greiere å simulere på. Figur 4-8 viser forskjellen på originalt terreng og modifisert terreng.



Figur 4-8: Utsnitt fra RAS Mapper som viser originalt terreng til venstre og modifisert terreng til høyre

4.3 Geometri for Årdalsvassdraget

Geometrien i Årdalsvassdraget er preget av bratt terreng, sjøer, tilsig fra elver og flere fosser. Dette gjør det krevende å lage en geometri i HEC-RAS som kjører feilfritt. Det er derfor flere triks som er blitt brukt for at modellen skal kunne kjøre. Dette er blant annet å dele opp i flere geometrimodeller, modifisere tverrprofiler på grunn av sjødybde og legge inn terskel grunnet bratt terreng.

4.3.1 Dele opp i flere geometrimodeller

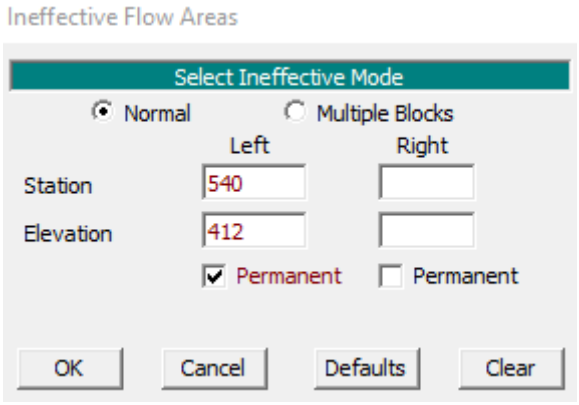
På grunn av de tre fossene i Årdalsvassdraget ble det vanskelig å ha bare én modell i HEC-RAS. Derfor ble det laget to geometrimodeller for hele vassdraget. For å lage ny geometrimodell, brukes *RAS mapper*. Høyreklikk på *Geometries* og deretter *Add New Geometry.* Gi den nye geometrien et passende navn, i dette tilfelle *Ovre_Aardalselva*. Når det er laget

en ny geometri kommer det tilhørende meny til denne under *Geometries*. Legger så inn geometridata på samme måte som for Golsjuvet. Denne geometrien går fra utslipp fra dam ved Breiavatn til oppstrøms Granefossane.

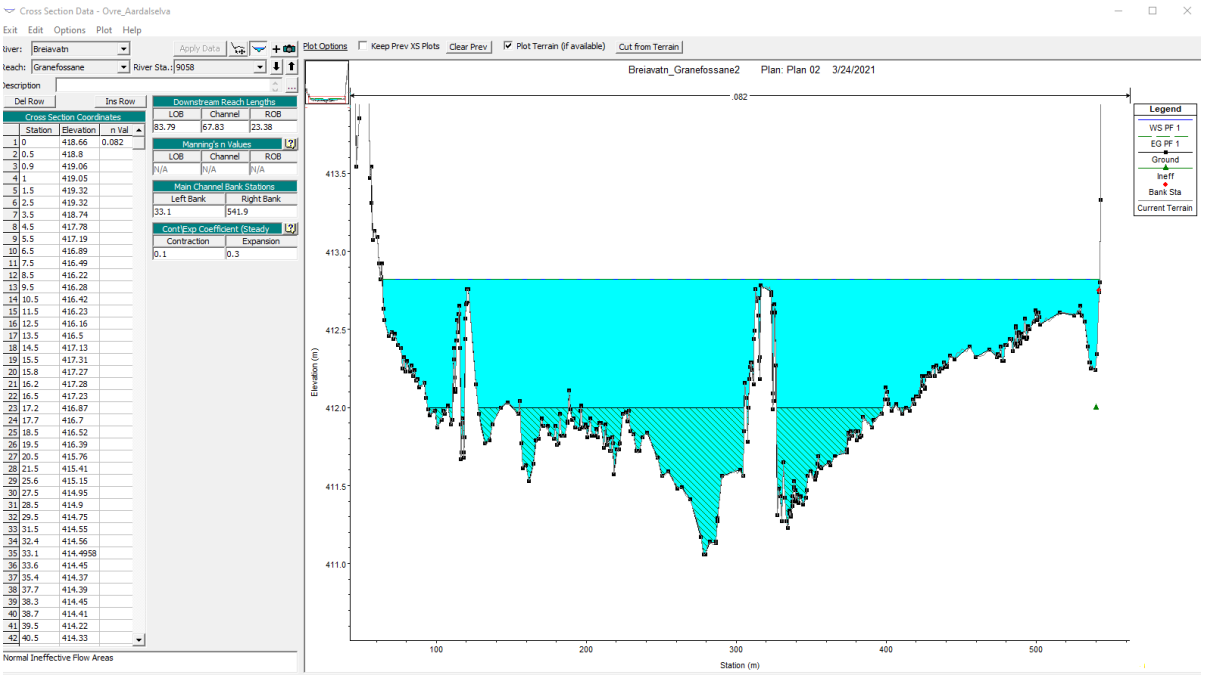
Den samme prosessen gjøres for terrenget nedstrøms fossene. Denne modellen kalles *Nedre_Aardalselva,* og går fra nedstrøms Sendingfossen til Årdal.

4.3.2 Modifisering av tverrprofil på grunn av sjødybde

Selv om terrenget er skannet med grønn laser kan det være et problem å få skannet sjøbunnen der hvor det er en betydelig dybde på vannspeilet, for eksempel i sjøene som befinner seg i den øvre delen av Storåna. Dette blir gjort på samme måte som for tverr-profilene skannet med rød laser i Golsjuvet-modellen. For at resultatene i modellen skal bli riktige må det også legges inn dødlager i tverrprofilene til sjøene. Finn ett og ett tverrprofil som inneholder sjø i *River Sta.*-kolonnen. Det er en fordel om det ikke er interpolerte tverrprofiler over sjøene når dødlager skal legges inn, da dette gjør at man må gjøre det for mange flere profiler. Gå til *Options*, deretter *Ineffective Flow Areas.* Vinduet vist i Figur 4-9 vil da åpne seg. *Ineffective Flow Areas* brukes til å sette deler av vannet i et tverrprofil som inaktivt. I et inaktivt område vil det akkumuleres vann, som ikke blir transportert videre (US Army Corps of Engineers, 2021). I vinduet fra Figur 4-9 er det mulig å legge inn et inaktivt område på både venstre og høyre side. Ved den *Station* man velger i profilet vil det være inaktivt område til venstre, dersom den skrives innunder *Left*. Dersom det velges *station* som er langt nok til høyre vil det bli et inaktivt område gjennom hele tverr-profilet. Det legges så inn en høyde hvor det vil være inaktivt under denne høyden. For at dette området ikke skal bli aktivt ved overskriding av denne høyden må *Permanent* hukes av. Klikk *OK.* Da vil tverrprofilet se ut som i Figur 4-10. Dette gjøres så for alle tverrprofil som inneholder sjø.



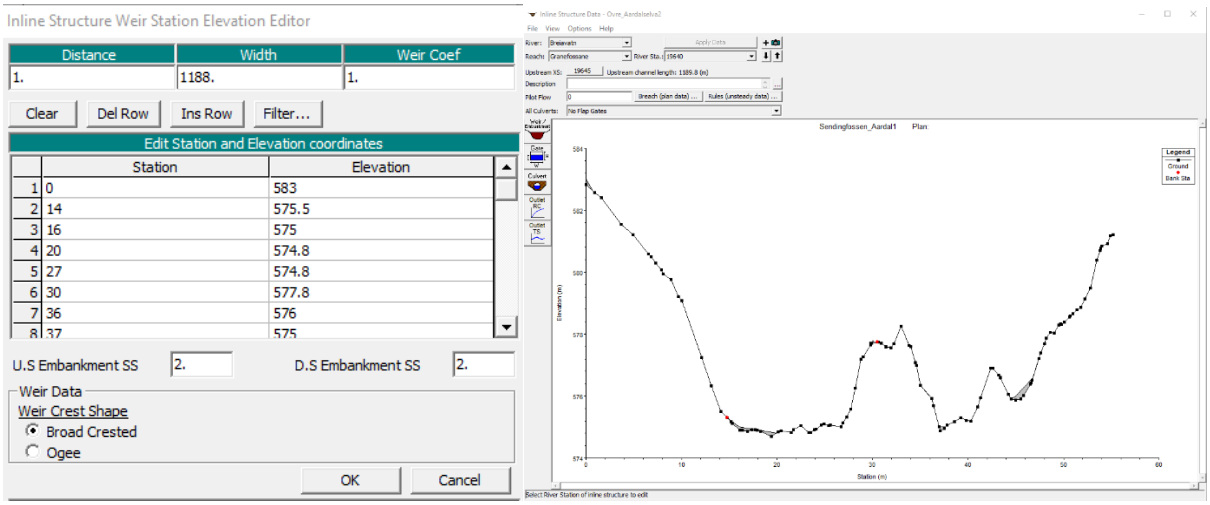
Figur 4-9: Utsnitt fra Ineffective Flow Area redigeringsvindu



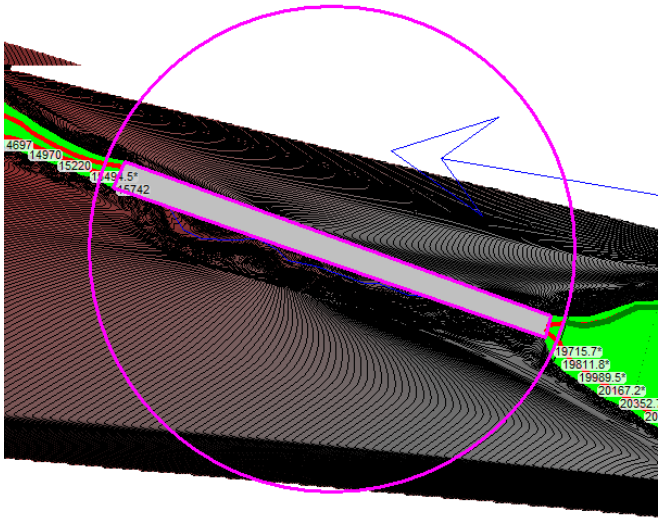
Figur 4-10: Utsnitt fra Cross Section Data, tverrprofil med dødlagring

4.3.3 Legge til terskel grunnet bratt terreng

Siden terrenget i *Ovre_Aardalselva* på et sted var så bratt at det ble mer enn HEC-RAS klarte å håndtere, ble det lagt inn en *Weir/Embankment,* heretter kalt terskel, mellom to tverrprofiler. Dette gjøres ved å gå inn i *View/Edit Geometric Data*, deretter på *Inline Structure* i menyen på venstre side. På *Options* trykker man på *Add an Inline Structure* hvor det skrives inn et nytt tverrprofil, der terskelen skal plasseres. Gå deretter til *Weir/Embankment* i menyen på venstre side. I Figur 4-11 vises vinduet hvor informasjon om terskelen skal legges inn. *Distance* inneholder avstanden mellom oppstrøms terskel og tverrprofil rett oppstrøms av terskel. Her skrives inn verdien *1. Width* brukes til å beskrive bredden av toppen på terskelen langs elva, og settes her til 1188m. Dette er avstanden ned til neste tverrprofil nedstrøms av terskelen. *Weir Coef* er koeffisienten som brukes i overløpsligningen $Q = CLH^{\frac{3}{2}}$, og settes til *1.* Deretter legges det inn hvordan terskelen ligger i forhold til terrenget, og hvordan helningen er oppstrøms og nedstrøms terskelen. Endelig terskel vises i Figur 4-12.



Figur 4-11: Utsnitt fra HEC-RAS, til høyre er data som plottes inn for terskelen, til venstre er tverrprofil med terskel



Figur 4-12: Utsnitt fra HEC-RAS, terskel i Geometry Editor

4.3.4 Valg av Mannings n

Ettersom at det er to veldig bratte elver foreslår HEC-RAS Hydraulic Reference Manual å bruke Jarrets ligning for Mannings n.

For Golsjuvet blir dette:

$$n = 0.39 * 0.02^{0.38} * 0.5^{-0.16} = 0.099 \approx 0.1$$

Hvor:

$$S = \frac{335m}{15000m} = 0.02$$

$$R = 0.5m$$

Regner ut en gjennomsnittshelning ut ifra data fra høydedata, og antar en gjennomsnitts-dybde i elva på 0.5 m. Får da en Mannings n på 0.1 og bruker dette som utgangspunkt for simuleringene videre.

For Årdalsvassdraget må man ha to forskjellige n-er for de to modellene. For øvre modell blir dette:

$$n = 0.39 * 0.02^{0.38} * 0.5^{-0.16} = 0.099 \approx 0.1$$

Hvor:

$$S = \frac{240m}{12000m} = 0.02$$

$$R = 0.5m$$

For nedre modell blir dette:

$$n = 0.39 * 0.013^{0.38} * 0.5^{-0.16} = 0.084$$

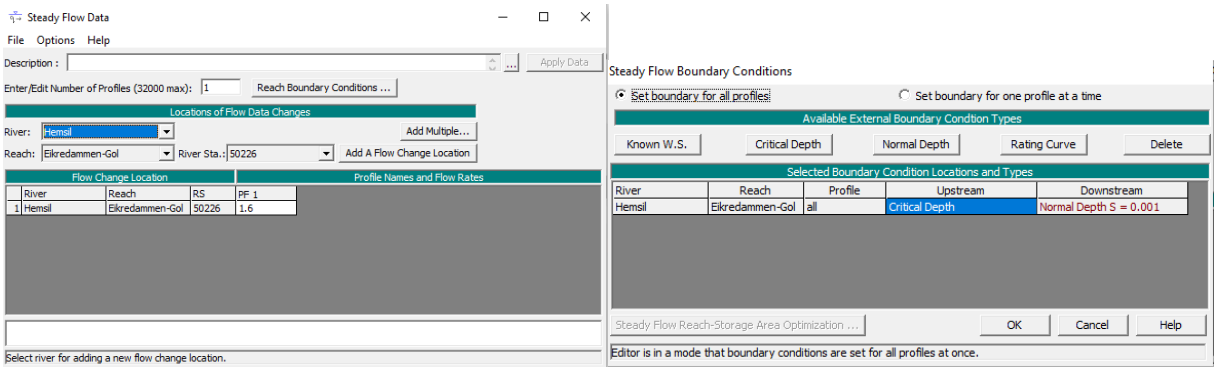
Hvor:

$$S = \frac{190m}{14500m} = 0.013$$

$$R = 0.5m$$

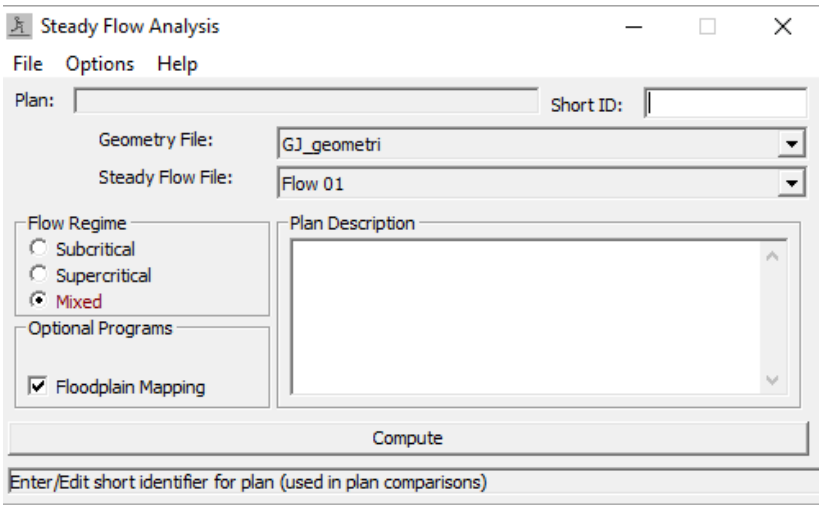
4.4 Stasjonær strømningsanalyse

For å teste terreng og geometri utføres det først en stasjonær strømningsanalyse for å få modellen opp å gå. Parameterne som ble brukt i den stasjonære strømningsanalysen for Golsjuvet vises i Figur 4-13. Vannføringen er et gjennomsnitt av vannføringen dagen bilde på Figur 4-6 ble tatt for å kunne bruke det til sammenligning av vannlinje. Datoen bildet er tatt er 28.06.2009 og er hentet fra norgeibilder.no. Grunnen til at dette bildet er valgt er at det er det eneste flyfotoet hvor det er overløp. Dagen skanningen av området ble gjort var det som nevnt tidligere også overløp. Eksempelet er fra Golsjuvet, men det samme ble gjort for begge vassdragene.



Figur 4-13: Utsnitt fra HEC-RAS av stasjonær strømningsdata og tilhørende grensebetingelser

Utfører en stasjonær strømningsanalyse og velger *Mixed på Flow Regime* for å unngå at den divergerer. Figur 4-14 viser vinduet for analysen.



Figur 4-14: Utsnitt av HEC-RAS, Stasjonær strømningsanalyse

4.5 Ikke-stasjonær strømningsanalyse

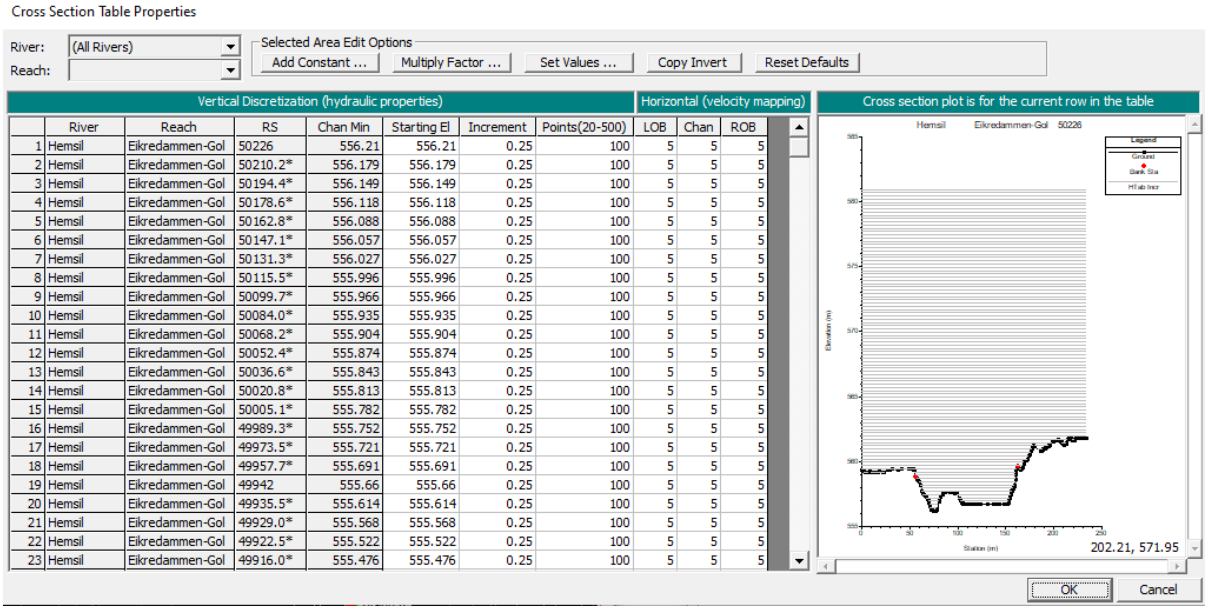
For å kunne simulere en situasjon hvor det først er minstevannføring i elva før det kommer en stor vannføring som en bølge, må det brukes ikke-stasjonær strømningsanalyse.

4.5.1 Konstant ikke-stasjonær strømningsanalyse

For å få modellen så stabil som mulig så startes det med å sette opp en konstant strømningssituasjon. De første forsøkene stopper før de har startet og setter i gang en lang prosess med feilsøking. Her vises det hvordan feilsøkingen ble utført for Golsjuvet, men mange av de samme operasjonene ble gjort for Årdalsvassdraget.

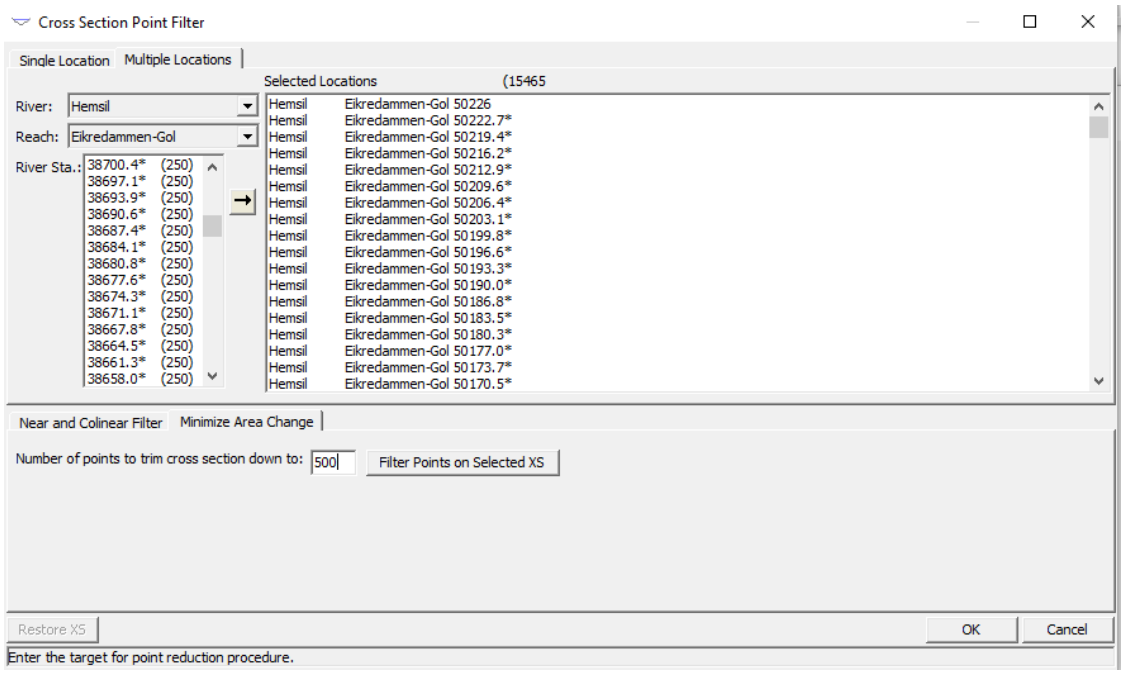
Feilsøking

Feilmelding om ekstrapolering fikses ved å endre på de hydrauliske egenskapene til tverrprofilene. På et forum ble det sagt at om man setter antall punkt til 100 og økningen til 0.25 vil problemet med ekstrapolering forsvinne da man kommer til å dekke hele tverrprofilet ved utregning (Goodell, 2013). Dette vinduet brukes også for å korrigere feilen hvor starthøyden ikke matcher kanalhøyden. Om man markerer hele kolonnen med starthøyde og trykker på *Copy Invert* så løser man det problemet. Vinduet som brukes til å løse problemene er vist i Figur 4-15.



Figur 4-15: Utsnitt fra HEC-RAS, tabell for tverrprofilsegenskaper

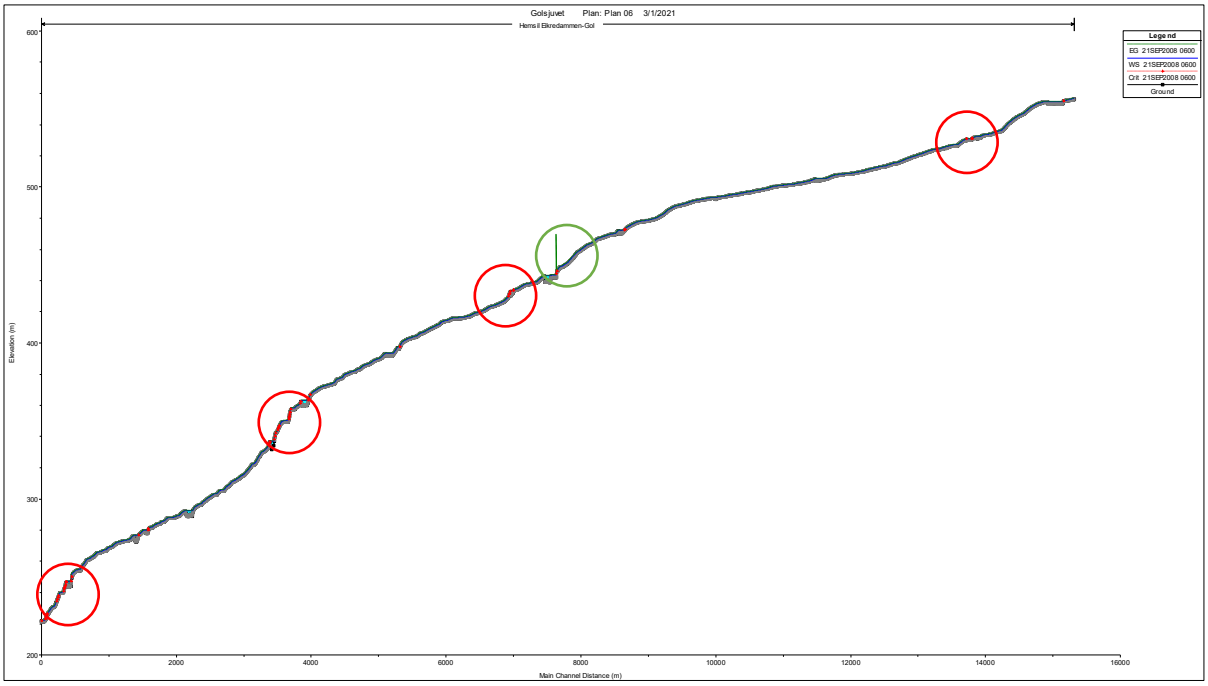
En annen feil som oppstår er at det er for mange punkter i tverrprofilene, da det kan være maksimum 500. For å løse dette finnes det en funksjon i geometrivinduet som heter *Cross Section Point Filter* under *Tools*. Figur 4-16 viser vinduet som brukes til å trimme antall punkter i tverrprofil med flere enn 500 punkter.



Figur 4-16: Utsnitt fra HEC-RAS, punktfilter for tverrprofil

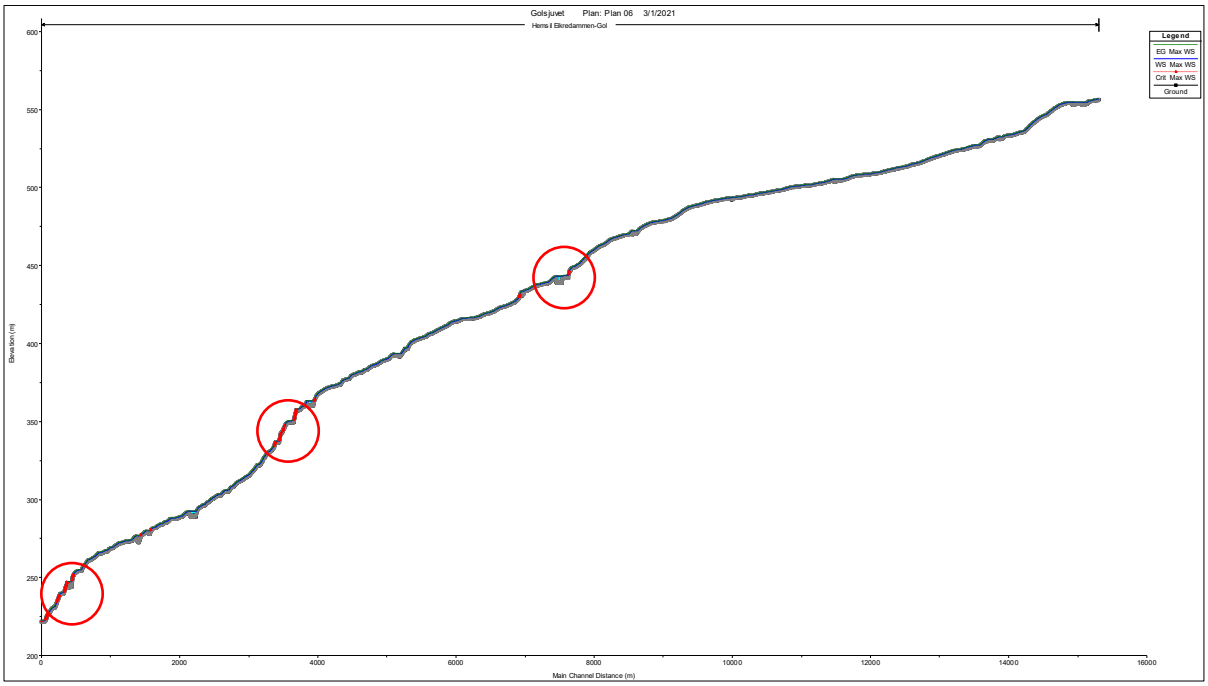
Ved å bruke vinduet *Profile Plot* kan man spille av vannføringen og se etter kritisk strømning. For å prøve å kartlegge hvor det oppstod kritisk strømning på elvestrekningen ble dette vinduet brukt. Første utsnitt er vist i Figur 4-17 og dette er før det er gjort noen forbedringer. Man kan se det er en topp på energilinja ca. på midten av strekket, og det vises flere sånne om man spiller av vannføringen, dette er første prioritet å få fikset. Får

feilmeldingen om at maks antall iterasjoner er utført som betyr at ligningen divergerer. Vannføringen som er brukt på disse simuleringene er 5m^3/s.



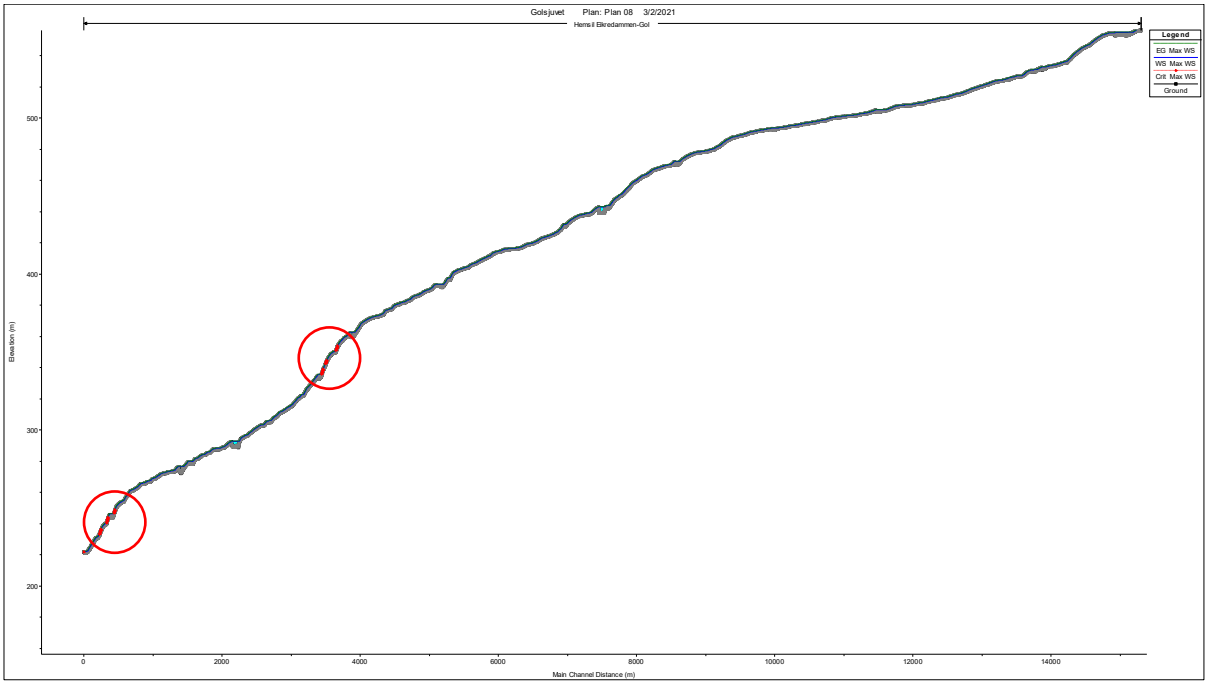
Figur 4-17: Utsnitt fra HEC-RAS, Steg 1 for å få bort overkritisk strømning, rød ring viser steder med overkritisk strømning og grønn ring viser hvor energilinja topper.

Første steg for å forbedre dette er å interpolere flere tverrprofil de stedene hvor det er tydelig at ligningene divergerer og energilinja topper. Her er det bratt terreng og vannet får for høy fart. Ved å interpolere vil man få en bedre gjengivelse av terrenget og modellen vil kanskje holde seg stabil. I Figur 4-18 ser man at dette hjalp veldig på de høye toppene til energilinja og det er ingen feilmeldinger lengre.



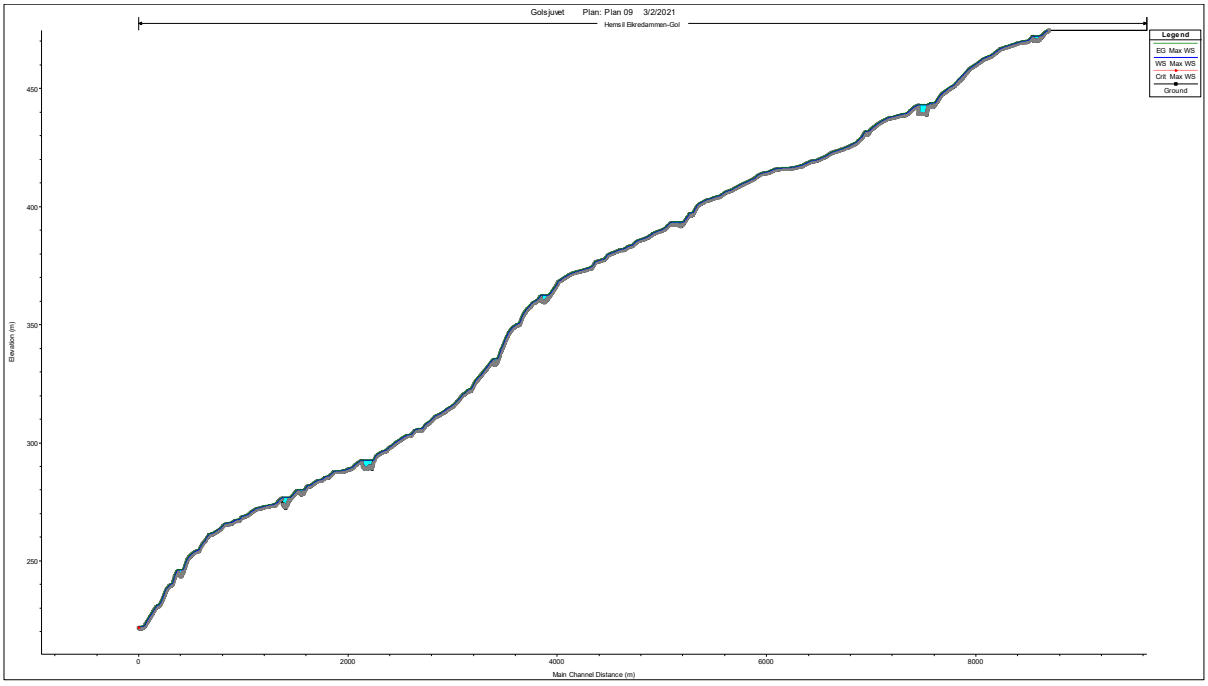
Figur 4-18: Utsnitt fra HEC-RAS, Steg 2 for å få bort overkritisk strømning, rød ring viser steder med overkritisk strømning.

Man ser fortsatt at det er kritisk strømning noen steder, dette er hvor elva er på det bratteste. Ved å justere tverrprofiler i de bratteste strekkene noe, for å få en jevnere helning fikk man fjernet flere av stedene med overkritisk strømning, vist i Figur 4-19.



Figur 4-19: Utsnitt fra HEC-RAS, Steg 3 for å få bort overkritisk strømning, rød ring viser steder med overkritisk strømning.

For å fjerne de siste stedene med overkritisk strømning blir Mannings n justert opp 5 %. Figur 4-20 viser nå at det det ikke er overkritisk strømning noen plass på elvestrekningen ved konstant ikke-stasjonær strømning på 5m^3/s.



Figur 4-20:Utsnitt fra HEC-RAS, ingen overkritisk strømning

4.5.2 Varierende ikke-stasjonær strømningsanalyse Golsjuvet

Etter at simuleringen er stabil og uten feilmeldinger ved konstant vannføring er det på tide å prøve med varierende strømning. Ettersom modellen først settes opp for en sommerhendelse brukes minstevannføringen for sommeren som basisvannføring. Denne er 0.1m^3/s. Først kjøres det et døgn med basisvannføring for å fylle elva med vann, før aktuell hydrograf blir simulert. Det avsluttes så med et døgn med basisvannføring for å kunne observere tidsforsinkelsen. Legger inn en hydrograf med jevn stigning til 32 m^3/s over 5 døgn og prøver først med 2 sekund som tidsintervall. Dette divergerer umiddelbart og det blir testet med både 1 sekund og 0.5 sekund som tidsintervall, men det konvergerer like fort. Ulike metoder for å få ligningene til å konvergere testes for å finne ut hvorfor de divergerer.

Første test er å lage et hydrogram med slakere stigning. For å slippe å ha så lang periode prøves det med basisvannføring 0.1 m^3/s opp til 15m^3/s topp over 5 dager. Dette divergerer like fort og blir ustabilt fra starten.

Ut ifra testene ser man at når man går bort fra 0.1 m^3/s som basisvannføring så konvergerer det. Det ble gjort en test på minstevannføringen som konstant vannføring i ikke-stasjonær strømning og det viser seg at det er der problemet ligger. Siden dette er en elv med veldig lav vannføring ser man at programmet har vanskeligheter med å simulere. I versjon 6.0 Beta 2 er det kommet en ny funksjon som skal ta hensyn til bratte og grunne elver, *1D finite volume*. På test 6 testes denne funksjonen og resulterer i at den klarer å konvergere, men volumavviket blir stort. Denne funksjonen prøves også på test 7 som da konvergerer, men også her er volumavviket stort. Løsningen blir å teste om man kan ha en større basisvannføring og at det likevel er innafor. Starter med å teste 5-, så 1-, så 0.5 m^3/s, alle konvergerer helt fint, og kan gå helt ned til 0.2 m^3/s på basisvannføring. Dette vurderes til å være tilstrekkelig for å få et realistisk resultat. Deretter må det testes å stige til 32 m^3/s. Prøver ulike simuleringstider og må opp på 11 døgn for at det skal konvergere. Ser at det er et tverrprofil hvor det divergerer og prøver å finne ut hva som er årsaken til dette. Er ikke noe som tyder på at akkurat det profilet skal divergere. Prøver så å fjerne profilet og da kjører simuleringen uten store feil. Vil nå prøve å få ned simuleringstiden og starter med å prøve 5 døgn igjen og ser at den nå konvergerer. Prøver 3 døgn og da divergerer den. Prøver å endre tidsintervallet til 1 sekund, men den divergerer da også. Prøver med 4 døgn, men dette divergerer også. Går da tilbake til 5 døgn og 2 sekunder, og bruker dette videre. Får tilgang på en bedre datamaskin og kan kjøre simuleringer ned på tidsintervall 0.1 sekund. Simuleringstiden går ned til mindre enn et døgn og kan gå direkte fra 0.2 m^3/s til 32 m^3/s på en time.

Det prøves å etterligne beregningene av tidsforløpet til 32 m^3/s som Hafslund Eco har gjort ved hjelp av Saint-Venant likningene (1D), der bølgen ankommer Golsjuvet etter 20 min. Det oppsto problemer med å kjøre hydrogrammet fra forrige punkt. HEC-RAS håndterer de tørre forholdene dårlig. For å løse dette ble en startvannføring på 1.5 m^3/s lagt inn for så å starte med en litt lengre periode med 0.2 m^3/s for at det skal stabilisere seg.

Det gjøres et forsøk på å redusere ruheten til 0.10. Det kjører greit frem til det har gått 3 timer på 32 m^3/s, da divergerer det. Det divergerer kun på tverrprofiler fra 0-10 000 så prøver derfor å justere opp ruheten til 0.15 i kun dette strekket og bruker 0.10 for 10 000 – 50 000. Det samme skjer igjen, bare det nå skjer ovenfor tverrprofil 10 000. Det som ikke var forventet er at den ikke krasjer i selve oppkjøringa, men etter at den har kjørt på maksimal vannføring i 3 timer. Prøver uansett å lage en mer trappelignende form på

hydrogrammet. Dette gir ikke bedre resultat. Konkluderer med at det må være noe med selve modellen som er feil som gjør at simuleringen ikke går gjennom.

Starter med å inspisere noen av profilene som divergerer og ser at det de ikke stemmer. Mest sannsynlig har noe skjedd ved mye interpolering og redigering av tverrprofiler. Ser at dette er tilfelle for mange av profilene så velger å lage helt nye tverrprofiler. Terrenget skal være utgravd etter endringene som ble gjort tidligere så det er tilstrekkelig å tegne inn nye tverrprofiler for så å interpolere mellom disse.

Velger å først prøve med Mannings n = 0.15 da den forrige geometrien klarte å kjøre det. Dette kjører greit, men ser her at tiden vannføringen bruker er ulik fra den forrige geometrien. Kjører derfor en test med 8 m^3/s og n = 0.19 for å sjekke om det fortsatt tar 8 timer, noe det gjør. Det testes så med ulike ruheter, først med 0.16, så 0.10, så 0.07 og deretter med 0.05. Det testes også med 0.04, men her divergerer simuleringen. Tiden vannet bruker fra det blir sluppet ved Eikredammen til det passerer Golsjuvet blir logget i et Excel-ark. For å få litt flere referansepunkter lages det to kjøringer til, en med 16 m^3/s og en med 24 m^3/s.

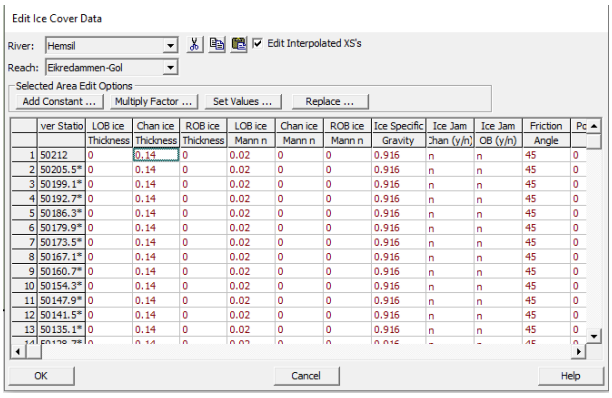
Simulere flere vannføringer

Ettersom ruheten vil påvirke tiden i mindre grad ved høyere vannføring så testes det noen lavere vannføringer for å sjekke om regresjonen fortsetter å være like lineær. Det testes på vannføringene 1-, 3- og 5m^3/s på alle de forgående ruhetene som er brukt. Dette gjøres på samme måte som er beskrevet tidligere. For å simulere lavere vannføringer må man redusere *computational interval* for at simuleringen ikke skal bli ustabil. Resultatene av dette blir ført inn i et Excel-ark som brukes for å finne sammenhenger mellom vannføring, ruhet og tid.

Det utføres så en regresjon på verdiene for å se sammenhengen og for å lage et oppsett av ligninger for å kunne estimere tid ut ifra vannføring og sesong.

Isdekke i HEC-RAS

I HEC-RAS er det en funksjon i geometri-vinduet hvor man kan legge på et isdekke. Dette testes for å se om man kan få samme resultat som å gå fra sommerforhold til vinterforhold. Det settes derfor opp modell med n = 0.05 og vannføring på 8 m^3/s for å se om man får samme resultat, 8 timer, som det var observert i 2001. Bruker noen eksempeltall for verdiene som legges inn for å sjekke om det har effekt i det hele tatt. Istykkelsen som blir brukt er den som er utregnet ved hjelp av Stefans formel. Figur 4-21 viser hvordan oppsettet var. Simuleringen blir ustabil med en gang. Prøver med ulike istykkelser og ulike manningstall for isen, men det samme skjer uansett, selv med *computational interval* på 0.1 sekund. Velger derfor å ikke gå videre med denne metoden.



Figur 4-21: Utsnitt av vinduet for å redigere isdekke.

4.5.3 Ikke-stasjonær strømningsanalyse Årdalsvassdraget

Etter å ha utført en stasjonær strømningsanalyse for Årdalsvassdraget for å få modellen opp å gå, var det neste steget å gjennomføre en ikke-stasjonær strømningsanalyse. Siden Årdalsvassdraget er delt i to modeller, må det gjøres ikke-stasjonær strømningsanalyse for begge modellene. På samme måte som for Golsjuvet ble det først satt opp en konstant strømningssituasjon for å få modellen stabil. Her ble det gjort ulik testing av n- og Q-verdier, og den samme feilsøkingsprosessen som i Golsjuvet ble gjennomgått.

Kalibrering av modellen på en sommersituasjon

Etter at modellen konvergerte ved konstant ikke-stasjonær strømningsanalyse skulle det testes for en reell situasjon, der det fantes data for å få kalibrert modellen. Her ble det hentet en sommersituasjon, 19. August 2016 kl 12.00 til 21. August 2016 kl 12.00. I *Ovre_Aardalselva* brukes data fra Q_tapping, med n = 0.1, som er regnet ut spesifikt for dette strekket. Når modellen går feilfritt gjennom brukes Q fra tredjesiste tverrprofil, *RS 216*, til å fylles inn i *Flow Hydrograph* for Nedre_Aardalselva. Når denne kjøres gjennom, skal målingene tatt på Kalltveit stemme med modellens beregninger i tverrprofil ved Kalltveit. I første omgang stemmer ikke dette overens. Det kommer flere elver som tilfører vannføring til vassdraget. Disse ble lagt til ved å legge til en *Lateral Flow.* Dette gjøres ved å gå på *Unsteady Flow Data* og *Add RS.* Legg til ønsket tverrprofilnummer, i dette tilfelle der elva Lyngsåna treffer Storåna. Trykk så på *Lateral Inflow Hydr.* på *Boundary Condition* og legger inn Q_Lyngsaana for disse datoene.

Dette gjør at de beregnede verdiene er likere de faktisk målte verdiene, men det er fortsatt ikke helt likt. Målestasjonen for Lyngsåna ligger 560 meter fra samløpet, og dette gjør at verdiene må arealskaleres mer for at det skal stemme overens. Dette gjøres ved hjelp av NEVINA og formelen:

$$Q_{samløp} = \frac{F_{samløp} * A_{samløp}}{F_{Lyngsåna} * A_{Lyngsåna}} * Q_{Lyngsåna}$$

Hvor de ulike verdiene er:

$$F_{samløp} = 89.9 \frac{l}{s} * km^2$$

$$A_{samløp} = 70.9 km^2$$

$$F_{Lyngsåna} = 90.2 \frac{l}{s} * km^2$$

$$A_{Lyngsåna} = 70.6km^2$$

$$Q_{Lyngsåna} = målte\ vannføringer\ i\ Lyngsåna$$

Dette tiltaket førte til at beregnet Q i Kalltveit ble lik 3.01, mens den målte er lik 3.11, noe som betyr at det fortsatt er nødvendig med noe justering. Siden det er flere elver og bekker som renner ut i Storåna, kan det være mer resttilsig som ikke er tatt hensyn til. For å ta hensyn til disse, brukes Nevina på nytt. Finner areal for nedbørsfeltet for Kalltveit, $A_{Kalltveit,Nevina}$, Lyngsåna, $A_{Lyngsåna,Nevina}$ og samløpet med Lyngsåna, $A_{Samløp,Nevina}$. For å finne arealet for resttilsiget settes ligningen opp slik:

$$A_{resttilsig} = A_{Kalltveit,Nevina} - A_{Lyngsåna,Nevina} - A_{Samløp,Nevina}$$

For å finne restvannføringen, $Q_{resttilsig}$, settes ligningen opp slik:

$$Q_{resttilsig} = \frac{F_{Lyngsåna} * A_{resttilsig}}{F_{Lyngsåna} * A_{Lyngsåna,Nevina}} * Q_{Lyngsåna}$$

Det ble valgt å bruke $F_{resttilsig} = F_{Lyngsåna}$ da det var disse to feltene som virket mest like. Adderer så sammen $Q_{resttilsig}$ og $Q_{Lyngsåna}$ for å få med all ekstra vannføring, og legger dette inn som *Lateral Inflow Hydrograph* i *Unsteady Flow Data* i tverrprofilet hvor Lyngsåna treffer Storåna.

Grunnet at de beregnede vannføringene ikke stemte med de målte, og det ikke hadde noen virkning å endre på Mannings *n*, ble det sjekket om det kunne fungere med noen andre målte vannføringer. Det ble da sett på datoene 14. Juli 2017 kl. 16:00 til 16. Juli 2017 kl. 16:00. Disse dagene ble det sluppet en større vannføring enn tidligere testede verdier, og det kunne være mulig å se om *n* hadde en virkning på de simulerte verdiene. *Q_tapping* går fra 1.4 m^3/s kl. 13:00 til 18 m^3/s kl. 14:00 15.juli. Dette slet modellen med å simulere med $n = 0.07$, og det ble mye feilmeldinger og divergering. Det var spesielt ved noen tverrprofiler det var store problem. Gikk da inn og så på disse tverrprofilene om det var noe som så rart ut. Slettet og interpolerte nye tverrprofil i de problematiske områdene, da det kunne virke som at det var på grunn av at det var for bratt terreng det oppstod komplikasjoner.

Prøvde deretter med n = 0.15 og *Computational Interval* = 0.1s. Prøvde deretter å kjøre simulering med n = 0.1 og *Computational Interval* = 0.2s. Dette divergerte ved de samme profilene som ved n = 0.07. Setter i gang en ny simulering med n = 0.086 og *Computational Interval* = 0.1s. Divergerte med det samme. Prøver ny simulering med n = 0.1 og *Computational Interval* = 0.1s. Siden det var vanskelig å få simulert vannføring til å stemme med observert vannføring i Kalltveit, ble det sett på om hydrografene fulgte hverandre. Alternativet hvis de ikke hadde gjort det hadde vært å se på om det forsvant noe volum av vann i feilberegninger i modellen.

Økte så tidslengden på simuleringen til 72 timer, og ruhet før Kalltveit til n = 0.15. Prøvde deretter å justere resttilsiget, da det så ut som at det kom for lite vannføring inn. Valgte først å gange med en faktor på 1.2, slik at det blir en 20% økning i resttilsiget.

Det kunne tenkes at dødlagringen i sjøene var med på å gjøre vannføringen mindre enn det den skulle, og dette ble endret slik at mer av vannet i sjøene ble regnet som dødlagring.

Det siste som ble gjort var å legge til ekstra resttilsig ved topp-tidspunktet og ved enden av perioden, i tillegg til finjustering på dødlagring i sjøene.

Når modellen var ferdig kalibrert på sommertilfelle var det neste steget å finne et vintertilfelle å simulere. Det ble da sett på hvilke perioder vannføringen i Kalltveit var gått under minstekravet på grunn av isoppstuving. Dette var det blitt gjort analyser på i *RStudio*, og ved en hendelse i januar 2016 er det tydelige tegn på at isoppstuving ved Musdalsvatnet kan ha hatt en klar sammenheng med at vannføringen i Kalltveit gikk under kravet.

Den første simuleringen foregikk uten å endre på noe annet enn å prøve å legge inn terskler ved Kråkevatn, Musdalsvatn og Hiavatn. Tersklene ble lagt til samme vannstandsnivå som i de observerte dataene. Simuleringen viste at modellen slet med å føre samme vannføring som observert på det tidspunktet hvor vannføringen går under kravet. Det ble da prøvd ulike metoder for å se om det gikk an å gjøre noe for å etterligne eller strupe vannføringen i Kalltveit. Disse metodene var blant annet routing og regresjon.

Regresjon for å finne en sammenheng mellom lukeåpning og lufttemperatur

For å simulere riktig vannføring ved is ble det sett på om det å bruke *Gate Curves* kunne være en mulig løsning. Det som var ønskelig var å finne en sammenheng mellom temperatur, og da spesielt kulde, og åpningen av luka, for å kunne gjenskape virkningen av is.

Det ble først brukt observerte data fra perioden 14. januar til 21. januar 2016. I regresjonen ble først *Q_Kalltveit* brukt som y-verdi og *Lufttemp_Kalltveit* brukt som x-verdi, deretter ble *Vannstand_Kalltveit* brukt som y-verdi. Når dette ikke ga gode R^2-verdier ble det i tillegg sett på frysegradtimer som en x-verdi. Det ble også sett på om volum vannføring som går under minstekravet i Kalltveit kunne være en y-verdi.

Deretter ble det brukt observerte data fra vinteren 2015/16, det vil si fra 15. november 2015 til 15. mars 2016. De samme faktorene ble brukt som y- og x-verdi. Å se på hele vinteren istedenfor bare en enkelt periode ble gjort for å få en mer generell ligning for lukeføringen.

Terskel for å demme opp vann slik at minstekravet ikke blir oppnådd

En annen mulighet for å få modellen til å etterligne observerte data var å sette inn en terskel oppstrøms Kalltveit som demte opp og holdt igjen volum av vann ved kalde perioder. Denne terskelens høyde skulle være en funksjon av temperatur og frysegradtimer, slik at den kunne styres i kalde perioder. Tanken var å se hvor mye mer tapping fra utslippet som krevdes for at vannføringen skulle gå over kravet.

På grunn av problemer som oppstod med terskelen i HEC-RAS ble dette aldri testet ut. Terskelen demmet opp vann oppstrøms, men slapp samme vannføring gjennom uansett hvilken høyde den hadde. I Vedlegg 1 vises simulering ved terskel i vannstandshøyde 72 m og vannstandshøyde på 85 m, som er 13 meter over normal vannstand. Man kan se hvordan vannføringen ikke blir påvirket hverken oppstrøms eller nedstrøms. Dette gjorde at det ble umulig å regulere høyde på terskelen etter kulde, slik som tersklene virket nå.

Det ble også testet om det var mulig å sette inn terskler lengre oppstrøms, men dette hadde samme effekt som terskelen ved Kalltveit.

4.6 Datainnhenting temperatur og snødybde

Hente data fra senorge.no

Lyse Produksjon AS leverte målinger og data av vannføringer, vannstand, vanntemperatur og nedbør fra perioden 2015 til februar 2021 for Årdalsvassdraget. Blant målingene var også lufttemperatur fra Fister og Nilsebu, men ikke direkte fra Kalltveit. For å få temperaturmålinger målt på Kalltveit ble nettsiden senorge.no brukt. Her var det mulig å få timedata fra Kalltveit stasjon helt tilbake til 2011. For å få ut disse dataene, måtte Årdal lokaliseres på kartet og gå innpå *Stasjoner,* og deretter huke av for *lufttemperatur.* Kalltveit stasjon kommer så opp med stasjons-ID 33.4.0. Når stasjonen trykkes på, kommer det opp et nytt vindu. Videre kan man trykke på *vis grafside*. Da vil en ny side åpne seg hvor man kan huke av for *temperatur* og velge tidsrom man vil ha tidsserien i. Her var tidsseriene der minstevannføring ikke var nådd og perioden som ledet opp til dette, spesielt interessante.

Bruker senorge.no for å hente ut data på temperatur og snødybde. Snødybden hentes fra Gol – Stake målestasjonen. Det finnes svært dårlige temperaturserier fra stasjonene rundt Golsjuvet så det blir satt sammen en serie av nærliggende stasjoner. Fra 2000-2005 må man helt til Fagernes for å få en temperaturserie, men sammenligner med senere serier og ser at det ikke er så ulikt. Temperaturene som er hentet fra Fagernes justeres for å korrelere bedre med forholdene i Gol/Hemsedal. Fra 2005 til 2021 brukes temperaturserie i fra Hemsedal som er beskrivende for området. Det hentes ut data fra perioden 1. november til 22. februar for alle årene og så regnes det middeltemperatur for alle døgn i dette tidsrommet.

For å finne istykkelsen benyttes *Stefans formel for tykkelse av isdekker*. For å lage en mest mulig oversiktlig fremstilling av hvordan denne metoden brukes er det laget et Excel-ark for hver sesong. I Figur 4-22 blir de ulike parameterne som er brukt presentert. Konduktivitetsfaktoren for is er hentet fra Lundbergs artikkel til å være:

$$k_i = 2.03 \frac{W}{m\,^{\circ}\mathrm{C}}$$

Konduktivitetsfaktoren for når snø kommer vil ifølge litteratur ligge mellom 0.08-0.6 W m-1 C-1 (Sturm, 2002). For å bestemme hvilken verdi som brukes i denne oppgaven så gjøres en kalibrering av modellen i Excel. Analysefunksjonen *Solver* brukes. Det er satt opp en celle som inneholder R^2 verdien mellom istykkelse og frysegraddag, og en celle med konduktivitetsfaktoren for snø. Disse cellene er koblet til alle arkene, dvs. alle årene. I Solver settes det opp at man skal få R^2 så nær 1 som mulig ved å endre k_s. Ender da opp med en:

$$k_s = 0.54 \frac{W}{m\,^{\circ}\mathrm{C}}$$

Bestemme graddagsfaktor

For å bestemme graddagsfaktoren for fullt isdekke så brukes studien til Brooks. Starter med å se i hvilken region området ligger, noe som er litt vanskelig da det ser ut til å ligge på grensa mellom tre regioner. Det fortas da en analyse av gjennomsnittlig nedbør og gjennomsnittstemperatur i januar for det gitte området for å kunne sammenligne dette med verdiene som er brukt i studien. Gjennomsnittet er regnet fra år 2001-2021. Tabell 4-1 viser sammenhengen mellom observert nedbør og temperatur og de som er gitt i Brooks forskning.

Tabell 4-1: Sammenligning av observerte gjennomsnittsverdier og verdier fra Brooks studie.

Region	Gj.snitt. nedbør januar [mm/mnd]	Gj.snitt temperatur januar [°C/mnd]
Gol-Stake	37	-7.7
Brooks 12	37	-12.3
Brooks 13	66	-15.1
Brooks 14	145	-6.1

Ser i Tabell 4-1 at det er region 12 som stemmer best overens med de observerte verdiene, så dette brukes som utgangspunkt for graddagsfaktoren for fullt isdekke. Fra Tabell 2-2 er elvekoeffisient 2.05 hentet. Graddagsfaktor for dannelse av is er satt til 0.60.

Tykkelse på isdekke

Stefan formula

Symbol	Enhet	Beskrivelse	Avgjørelse av parametre og formler
T_a (mid)	°C	Middeltemperatur luft	Hentet fra målestasjon
h_s	cm	Snødybde	Hentet fra målestasjon
$R_{snø}$	W m^{-2} $°C^{-1}$	Termisk motstand i snø	$R_{snø}=h_s/k_s$
R_{tot}	W m^{-2} $°C^{-1}$	Termisk motstand i snø og is	$R_{tot}=R_{snø}+h_{n-1}/k_i$
T_{is}(mid)	°C	Middeltemperatur på toppen av isdekke	$T_{is}(mid)=T_a(mid)$ når $h_s>0$
FDD	°C	Frysegraddag	$FDD = -T_{is}(mid)$
S(AFDD)	°C	Akkumulerte frysegraddager	$S(AFDD)=FDD+S(AFDD)_{n-1}$ når $FDD>0$
h	cm	Tykkelse på isdekke	$h=\alpha_h*S(AFDD)^{0.5}$

Graddagsfaktor		Konduktivitetsfaktor		
$\alpha_{h,\ dannelse}$	0.60	k_i	2.03	W/m °C
$\alpha_{h,\ fullt\ isdekke}$	2.05	k_s	0.54	W/m °C

Figur 4-22: Presentasjon av parametere og formler.

		[°C]	[cm]	[W m^{-2} $°C^{-1}$]	[W m^{-2} $°C^{-1}$]	[°C]	[°C]	[°C]	[cm]
Beskrivelse	**Dato**	**T_a (mid)**	**h_s**	**$R_{snø}$**	**R_{tot}**	**T_{is}(mid)**	**FDD**	**S(AFDD)**	**h**
Snødekke						0.00	0.00	0.00	0.00
< 4 cm						0.00	0.00	0.00	0.00
								0.00	
Snødekke				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
> 4 cm				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figur 4-23: Oppsett av Excel-ark

I Figur 4-23 ser man hvordan Excel-arket er satt opp. Modellen skiller mellom snødekke under 4 cm og over 4 cm. Det er satt denne dybden på snødekket for det antas da at det har en innvirkning på isdannelsen når den passerer 4 cm. Her er det brukt skjønn i utførelse, da det ikke alltid stiger jevnt med snø og det ikke er helt sikkert når 4 cm passeres. Utslagene på en dag fra eller til med dannelse av stålis eller sørpeis er minimale i dette tilfellet. Tykkelsen på isdekket 22. februar brukes så videre i en regresjonsanalyse for å prøve å finne sammenhenger.

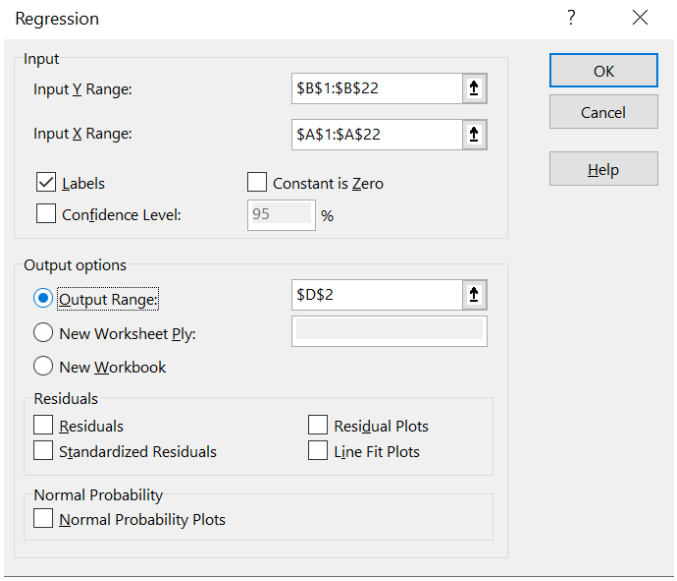
Sette parametere opp mot hverandre

Det første som gjøres er å utføre en sammenligning av alle parameterne fra alle årene. Dette gjøres enkelt i R Studio med funksjonen *ggpairs*. Man får en enkel oversikt over alle

parameterne satt opp mot hverandre ved bruk av denne funksjonen. Under er det vist hvordan dette er programmert i RStudio i tillegg til innlasting av de viktigste funksjonene som er brukt videre gjennom hele oppgaven. De viktigste var funksjonene fra pakkene *ggplot2, patchwork* og *scales*.

```
# Importere fil
dat<-read.csv("istyk.csv", sep=";", header=TRUE)

# Importere nødvendige bibliotek
library(ggplot2)
library(patchwork)
library(scales)
library(ggforce)
library(reshape)
library(extrafont)

#Vis at resultat er riktig
head(dat)

# Importer bibliotek for fremvisning av grafer
library(GGally)

# Plott sammenligningsgraf
ggpairs(dat)
```

Videre brukes regresjon i Excel for å se nærmere på de enkelte parameterne opp mot istykkelse. For å utføre regresjon i Excel brukes *Data Analysis* under *Data* og *Analysis*. Her velges *Regression*, og kolonnene med verdiene som skal brukes legges inn som *Input Y Range* og *Input X Range*. Om man vil ha med merket så huker man av på *Label* og velger stedet man ønsker regresjonstabellen skal plasseres. En oversikt over regresjonsvinduet i Excel er vist i Figur 4-24.



Figur 4-24: Utsnitt fra regresjonsvindu i Excel

For en mer oversiktlig fremstilling av regresjonene av de ulike parameterne ble RStudio brukt. Plottingen ble utført på følgende måte:

```
# Importere fil
temptyk<-read.csv("temptyk.csv", sep=",", header = TRUE)

# Lage regresjonslinje
rtt<-lm(formula = Istykkelse~Temper, data=temptyk1)
temptyk1$predicttt<-predict(rtt)

#Plotte
Library(ggplot2)
ttplot<-ggplot(data = temptyk1) + geom_point(aes(x=Temper, y=Istykkelse))
+ geom_line(aes(x=Temper, y=predicttt), size=1, colour= "red")
ttplot

#Endre navn på akser
ttplot<-ttplot + xlab("Gj.snittstemp. [gr.C]") + ylab(("Istykkelse
[cm]"))
ttplot

#Endre font og størrelse
ttplot1 <- ttplot + theme(plot.title = element_text(family = "Verdana",
size = 14), axis.title.x = element_text(family = "Verdana", size = 11),
axis.title.y = element_text(family = "Verdana", size = 11))
ttplot1

#Plotte flere grafer ved siden av hverandre og nummerere dem
library(patchwork)
ttplot2+fdplot2+asplot2+plot_annotation(tag_levels = "1")
```

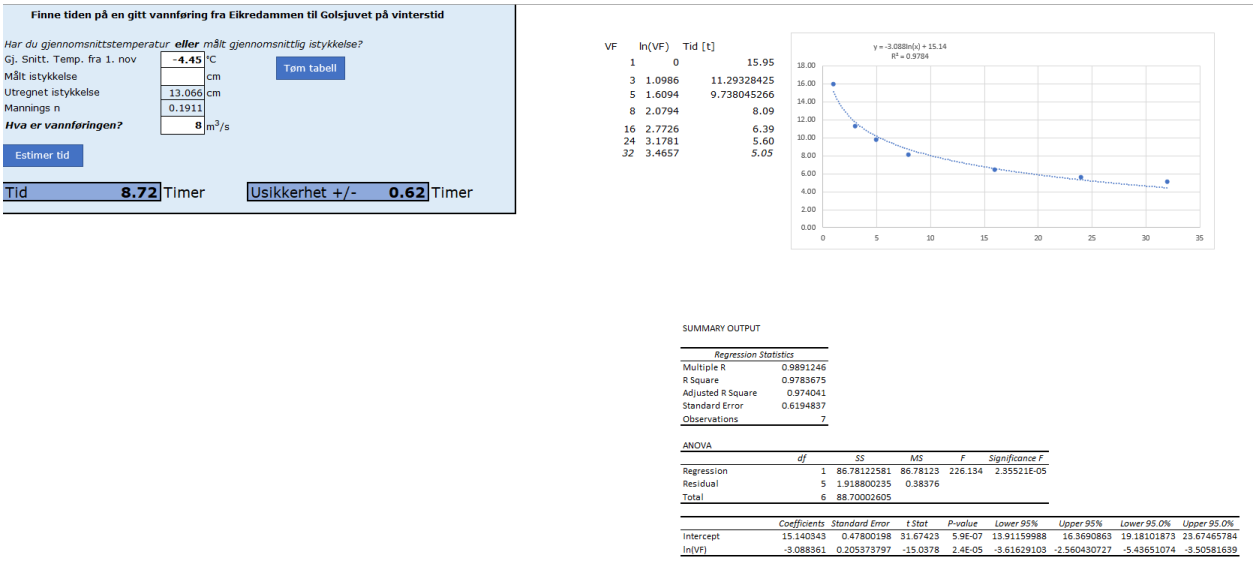
4.6.1 Excel-arket «Estimering av tid»

Excel har mange hendige innebygde funksjoner hvor *Data Analysis* er en av dem. Ved å programmere Excel kan man få programmet til å gjøre det man vi ved hjelp av makroer. Målet er å lage en brukervennlig kalkulator for å beregne hvor lang tid det tar for en gitt vannføring å nå fra Eikredammen til Golsjuvet. For å få til dette må man bruke de ulike sammenhengene fra tidligere og sette dem sammen. Det er også foretatt testing av Excel-arket for å sjekke at det ikke inneholder feil og at kalkulatoren gir fornuftige resultater.

Sette opp en kalkulator for utregning av tid

Steg 1 i prosessen er å velge de parameterne som er mest relevante og bruke dem videre. Ut ifra R^2-verdiene så er det gjennomsnittstemperatur sammen med istykkelse som skiller seg ut. Velger å sette opp en kalkulator basert på denne situasjonen. Regresjonsligningen $y = -2.2381x + 3.1068$ blir brukt for å regne ut istykkelse basert på gjennomsnittstemperatur. Om man har målt gjennomsnittlig istykkelse kan dette puttes direkte inn og brukes framfor for temperatur. Steg 2 er å sette opp de virkelige verdiene og sammenligne de med de simulerte n-verdiene. Det antas at det er logisk å tenke at n=0.05 eller M=20 vil være ok i forhold til isfri elv og elvas hydrauliske utforming. Derfor er dette brukt som et nullpunkt for å kunne ha to punkter å benytte. Ligningen for linjen er $y = 0.0108x + 0.05$. Denne ligningen brukes videre for å bestemme ruhet ut ifra istykkelse som ble regnet ut i forrige steg. Steg 3 er basert på simuleringene som er gjort med ulike vannføringer og ulike manningstall. For de ulike vannføringene er tid satt opp mot ruhet. Ut ifra disse regresjonene er ligningene hentet ut og plassert i en tabell. Fra denne tabellen lages det en graf som har logaritmisk utforming. Steg 4 er å sette opp en kolonne for utregning av

logaritmen til vannføringen. Dette er for å kunne utføre regresjon og få en logaritmisk funksjon. Steg 5 er å lage en makro i Excel for å utføre en regresjon på verdiene i tabellen når vannføringen endres. Makroen knyttes til en boks for å kunne aktiveres. Ved å aktivere makroen oppdateres regresjonen og tiden blir oppdatert som en ln-funksjon av vannføringen. *Standard Error* blir lagt til som usikkerhet. Steg 6 er å ordne utformingen på Excel-arket så det blir brukervennlig. Figur 4-25 viser et utsnitt av Excel-arket «Estimering av tid» med et eksempel.



Figur 4-25: Utsnitt fra Excel-arket "Estimering av tid"

For å få ut resultat så må man fylle inn enten gjennomsnittstemperatur eller istykkelse og vannføring som er sluppet ved Eikredammen. Når verdiene fylles ut, vil modellen regne ut Mannings n og tiden ved ulike vannføringer og føre disse inn i tabellen til høyre. Et plott av verdiene er vist i grafen. Ved å trykke på Estimer tid vil modellen foreta en regresjon av tabellen, så må man godkjenne at resultatet overkjører det forrige. Tiden blir da regnet ut av regresjonsligningen som blir dannet og usikkerheten blir ført inn.

Testing av Excel-arket

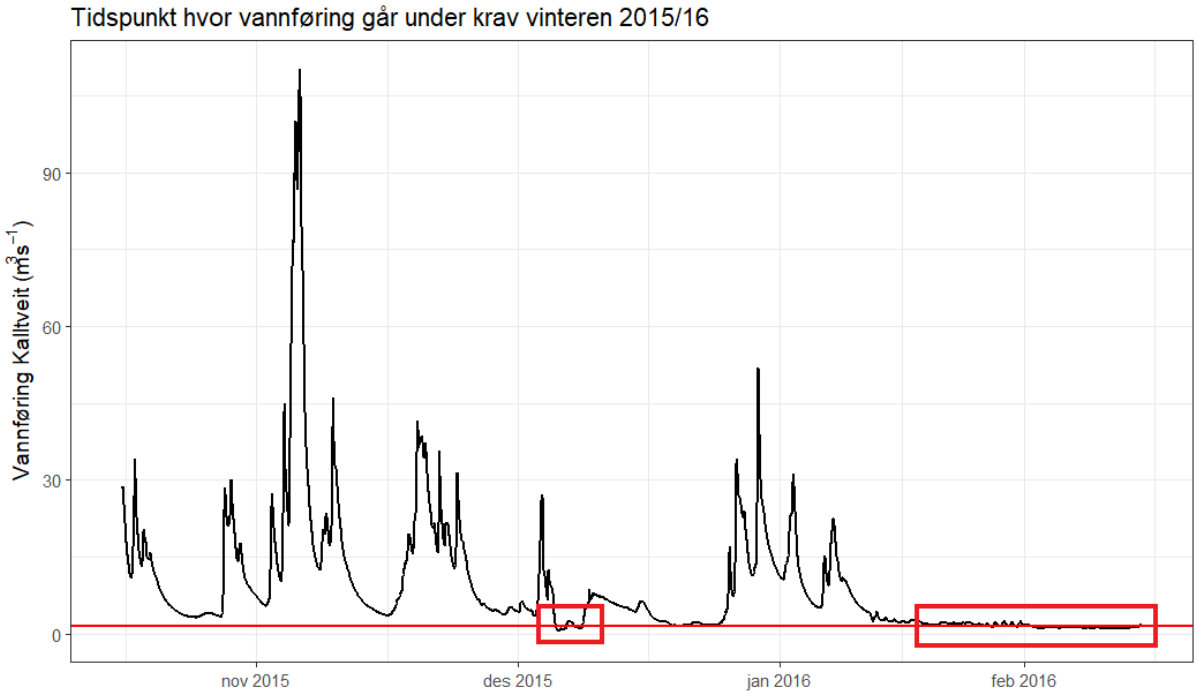
For å teste Excel-arket ble det testet med ulike manningstall og vannføringer, da det er dette som er tilgjengelig simulerte data. Testen er gjennomført for å sjekke om kalkulatoren gir fornuftige resultater ved flere ulike vannføringer og ruheter. Det er testet på fem ulike ruheter, 0.05, 0.07, 0.10, 0.16 og 0.19. Ved alle disse ruhetene er også alle de simulerte vannføringene testet. For å sammenligne disse resultatene er de satt opp i en tabell som viser vannføring, simulert tid, kalkulert tid, kalkulert tid med usikkerhet og om simulert tid er innenfor usikkerhetsvinduet. Dette er så plottet i en graf som viser sammenhengen.

4.7 Dokumentasjon og regresjon av volum av minstevannføring

For å finne periodene hvor kravet til minstevannføring ikke ble oppnådd, ble programmet *RStudio* brukt. Dataseriene hadde data hver time fra 1. januar 2015 til 12. Februar 2021. Det ble uoversiktlig, og i tillegg var det vinterperiodene som var interessante å se på. Brukte funksjonen *subset* for å begrense datasettene til å kun vise fra 15. november til 15. mars hvert år. Hvert år ble da plottet, med en rød strek som markerte krav til

minstevannføring. Plottet er vist under. Om vinteren er kravet til minstevannføring 1.5 m^3/s. Der grafen gikk under den røde streken har ikke kravet blitt oppnådd. Et eksempel er vist i Figur 4-26.

```
# Importere fil og fikse på dato
aardal <- read.csv("Aardal_2015-01-01_to_2021-02-
12_new2.csv",sep=";",header=TRUE)
aardal <- transform(aardal,RDateTime=strptime(ï..Datetime,format="%Y-%m-
%d %H:%M"))
aardal <- transform(aardal,RYear=as.POSIXlt(RDateTime)$year+1900)

#Plotte minstevannføring 15. Nov til 15. mars
h201516 <- ggplot(aardal) +
  geom_line(aes(x=RDateTime,y=Q_Kalltveit), size=1) +
  geom_hline(yintercept = 1.5,colour="red",size=1) +
  scale_x_datetime(limits = as.POSIXct(c("2015-11-15 00:00", "2016-03-15
00:00")), labels = date_format("%b %Y")) +
  labs(y=expression(paste("Vannfoering Kalltveit (m"^3*s^-1*")")), x=ex-
pression(paste("")))

h201516
```



Figur 4-26. Viser eksempel på hvor vannføring går under krav

Dette ble gjort for å finne alle perioder om vinteren hvor kravet ikke ble overholdt, for å så se på mulige faktorer som kunne ha en innvirkning på dette. For å finne ut hvilke faktorer som hadde størst korrelasjon, og som kunne være verdt å ta med i en regresjonsanalyse ble funksjonen *ggpairs* brukt i *RStudio*. I denne prosessen var det viktigst å se på hvilke andre faktorer *Volum* korrelerte mest med.

Etter å ha sett hvilke faktorer som kunne ha en sammenheng med *Volum*, ble det foretatt regresjonsanalyser i *RStudio* ved hjelp av funksjonen *lm*. Denne funksjonen er brukt til å

tilpasse lineære modeller, deriblant gjennomføring av regresjonsanalyser. Det ble gjort flere analyser, men avhengighetsvariabelen var alltid *Volum*. Det ble gjort flere for å se forskjellen på ulike tilhørende variabler, og virkningen de hadde.

Først ble det gjort noen regresjoner med én avhengighetsvariabel og én tilhørende for å sjekke om noen skilte seg ut. Etter at det var sjekket for ulike variabler, ble flere variabler satt sammen.

Det er veldig mange ting som kan påvirke om det dannes isterskler som demmer opp vannet. For å utføre en regresjon brukes parameterne som er presentert i Tabell 4-2 under.

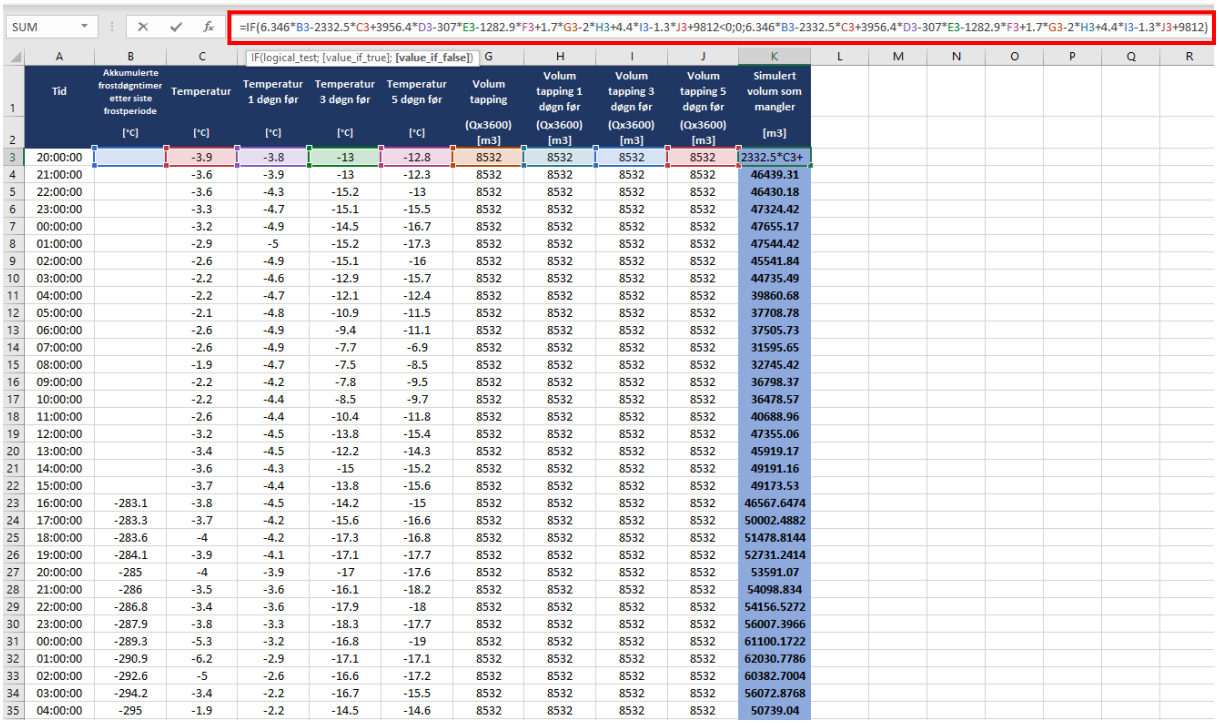
Tabell 4-2: Parametere brukt i Excel-ark og i RStudio

Parameter	Beskrivelse
Volum	Volumet som mangler i Kalltveit hver time
Volum_akkumulert	Akkumulert volum hver periode hver time
Tot_akk_FD	Totalt akkumulerte frysegradtimer fra sesongstart
Akkumulerte_frostdogn	Akkumulerte frysegradtimer i siste kuldeperiode
Temperatur	Temperatur dagen for hendelse
Temp1	Temperatur 1 døgn før hendelse
Temp3	Temperatur 3 døgn før hendelse
Temp5	Temperatur 5 døgn før hendelse
VS1	Vannstand i Kalltveit 1 døgn før hendelse
VS2	Vannstand i Kalltveit 3 døgn før hendelse
VS5	Vannstand i Kalltveit 5 døgn før hendelse
V_tap	Tappet volum dagen for hendelse
V_tap1	Tappet volum 1 døgn før hendelse
V_tap3	Tappet volum 3 døgn før hendelse
V_tap5	Tappet volum 5 døgn før hendelse

Det er antatt at alle disse parameterne spiller inn ved innfrysing av terskler i elva. Det første som testes er *Volum_akkumulert* mot *Tot_akk_FD* + alle under tykk strek. Dette gir en R^2 verdi på 0.45. Det testes flere ulike kombinasjoner for å finne ut hvilke som gir best resultat. Ved å bruke *Akkumulerte_frostdogn* i stedet for *Tot_akk_FD* får man et mye bedre resultat, R^2=0.57. Dette har nok med at spredningen i *Tot_akk_FD* er veldig stor, og at *Akkumulerte_frostdogn* gir et mer riktig bilde av når hendelsen skjer fordi det ser ut som at hendelsen ikke er påvirket av hvor langt ut i sesongen det er, men mer av hvor langt ut i en frostperiode det er. For å sjekke sammenheng er det fint å se på vannstand, men om man skal kunne lage en modell som forutser om vannføringen går under minstevannføring i Kalltveit er det vanskelig å si noe om hvor mye vannstanden er i dagene opp mot hendelsen om man vil forutsi opp til 14 dager frem i tid. Disse forsøkes derfor fjernet fra regresjonen. Dette er en suksess, og R^2 blir kun redusert til 0.56 som ses på som akseptabelt. Det forsøkes også å fjerne flere parametere, men da synker R^2 verdien ytterligere og det avgjøres derfor å bruke de resterende parameterne. Regresjonen er utført i RStudio før den blir testet opp mot observerte verdier i Excel for å sjekke korrelasjonen. Sammenhengen mellom observert og simulert akkumulert volum blir plottet i RStudio som vist under.

```
# Importere data
regdat<-read.csv("Kopi2.csv", sep = ";", header = TRUE)

# Vise data
regdat

# Utføre regresjon
res <- lm(formula= Volum_akkumulert~Akkumulerte_frostdogn+Tempera-
tur+Temp1+Temp3+Temp5+V_tap+V_tap1+V_tap3+V_tap5, data=regdat)

summary(res)

# Sette opp regresjonstabell
stargazer(res, type="html", out = "regresjonsammensatt.html",title =
"Regresjonsresultat", align=TRUE)

# Plotte grafer med formatering
riktig<-ggplot(data = regdat)+ geom_line(aes(y=Volum_akkumulert, x=Tall,
colour="red"), size=1) + geom_line(aes(x=Tall, y = Sim_riktig, co-
lour="blue"),size=1)

riktig<-ggplot(data = regdat)+ geom_line(aes(y=Volum_akkumulert, x=Tall,
colour="red"), size=1) + geom_line(aes(x=Tall, y = Sim_riktig, co-
lour="blue"),size=1)

riktig<- riktig + labs(x="", y="Akkumulert volum") + scale_co-
lour_discrete(name= "Type:", breaks=c("blue", "red"), labels=c( "Simu-
lert", "Observert"))+theme(plot.title = element_text(family = "Verdana",
size = 18), axis.title.x = element_text(family = "Verdana", size = 14),
axis.title.y = element_text(family = "Verdana", size = 14), axis.text =
element_text(size=11), legend.title = element_text(size=14, fami-
liy="Verdana"), legend.text = element_text(size = 11, family = "Ver-
dana"))

riktig
```

Det settes så opp et forslag på hvordan en modell i Excel kunne sett ut hvor man kan føre inn de ulike parameterne og som gir ut manglene akkumulert volum. Denne er bygget opp ved hjelp av regresjonsligningen. Alle cellene er knyttet opp mot ligningen som produserer manglene akkumulert volum. Dette er vist i Figur 4-27.



SUM

=IF(6.346*B3-2332.5*C3+3956.4*D3-307*E3-1282.9*F3+1.7*G3-2*H3+4.4*I3-1.3*J3+9812<0;0;6.346*B3-2332.5*C3+3956.4*D3-307*E3-1282.9*F3+1.7*G3-2*H3+4.4*I3-1.3*J3+9812)

IF(logical_test; [value_if_true]; [value_if_false])

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Tid	Akkumulerte frostdøgntimer etter siste frostperiode	Temperatur	Temperatur 1 døgn før	Temperatur 3 døgn før	Temperatur 5 døgn før	Volum tapping	Volum tapping 1 døgn før	Volum tapping 3 døgn før	Volum tapping 5 døgn før	Simulert volum som mangler							
2		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	(Qx3600) [m3]	(Qx3600) [m3]	(Qx3600) [m3]	(Qx3600) [m3]	[m3]							
3	20:00:00		-3.9	-3.8	-13	-12.8	8532	8532	8532	8532	2332.5*C3+							
4	21:00:00		-3.6	-3.9	-13	-12.3	8532	8532	8532	8532	46439.31							
5	22:00:00		-3.6	-4.3	-15.2	-13	8532	8532	8532	8532	46430.18							
6	23:00:00		-3.3	-4.7	-15.1	-15.5	8532	8532	8532	8532	47324.42							
7	00:00:00		-3.2	-4.9	-14.5	-16.7	8532	8532	8532	8532	47655.17							
8	01:00:00		-2.9	-5	-15.2	-17.3	8532	8532	8532	8532	47544.42							
9	02:00:00		-2.6	-4.9	-15.1	-16	8532	8532	8532	8532	45541.84							
10	03:00:00		-2.2	-4.6	-12.9	-15.7	8532	8532	8532	8532	44735.49							
11	04:00:00		-2.2	-4.7	-12.1	-12.4	8532	8532	8532	8532	39860.68							
12	05:00:00		-2.1	-4.8	-10.9	-11.5	8532	8532	8532	8532	37708.78							
13	06:00:00		-2.6	-4.9	-9.4	-11.1	8532	8532	8532	8532	37505.73							
14	07:00:00		-2.6	-4.9	-7.7	-6.9	8532	8532	8532	8532	31595.65							
15	08:00:00		-1.9	-4.7	-7.5	-8.5	8532	8532	8532	8532	32745.42							
16	09:00:00		-2.2	-4.2	-7.8	-9.5	8532	8532	8532	8532	36798.37							
17	10:00:00		-2.2	-4.4	-8.5	-9.7	8532	8532	8532	8532	36478.57							
18	11:00:00		-2.6	-4.4	-10.4	-11.8	8532	8532	8532	8532	40688.96							
19	12:00:00		-3.2	-4.5	-13.8	-15.4	8532	8532	8532	8532	47355.06							
20	13:00:00		-3.4	-4.5	-12.2	-14.3	8532	8532	8532	8532	45919.17							
21	14:00:00		-3.6	-4.3	-15	-15.2	8532	8532	8532	8532	49191.16							
22	15:00:00		-3.7	-4.4	-13.8	-15.6	8532	8532	8532	8532	49173.53							
23	16:00:00	-283.1	-3.8	-4.5	-14.2	-15	8532	8532	8532	8532	46567.6474							
24	17:00:00	-283.3	-3.7	-4.2	-15.6	-16.6	8532	8532	8532	8532	50002.4882							
25	18:00:00	-283.6	-4	-4.2	-17.3	-16.8	8532	8532	8532	8532	51478.8144							
26	19:00:00	-284.1	-3.9	-4.1	-17.1	-17.7	8532	8532	8532	8532	52731.2414							
27	20:00:00	-285	-4	-3.9	-17	-17.6	8532	8532	8532	8532	53591.07							
28	21:00:00	-286	-3.5	-3.6	-16.1	-18.2	8532	8532	8532	8532	54098.834							
29	22:00:00	-286.8	-3.4	-3.6	-17.9	-18	8532	8532	8532	8532	54156.5272							
30	23:00:00	-287.9	-3.8	-3.3	-18.3	-17.7	8532	8532	8532	8532	56007.3966							
31	00:00:00	-289.3	-5.3	-3.2	-16.8	-19	8532	8532	8532	8532	61100.1722							
32	01:00:00	-290.9	-6.2	-2.9	-17.1	-17.1	8532	8532	8532	8532	62030.7786							
33	02:00:00	-292.6	-5	-2.6	-16.6	-17.2	8532	8532	8532	8532	60382.7004							
34	03:00:00	-294.2	-3.4	-2.2	-16.7	-15.5	8532	8532	8532	8532	56072.8768							
35	04:00:00	-295	-1.9	-2.2	-14.5	-14.6	8532	8532	8532	8532	50739.04							

Figur 4-27: Utsnitt fra Excel som viser hvordan modellen er satt opp og rød ramme viser formelen som er brukt i kolonne K.

Det ble også sett på om det kunne være sammenheng mellom temperatur, vannstandsøkning i sjøene tilknytta Årdalsvassdraget og minkende vannføring ved Kalltveit. Dette ble gjort ved å sammenligne grafer for de ulike periodene hvor vannføringen var for lav. Deretter ble det regnet på i Excel dersom det kom fram at det hadde en sammenheng. All denne informasjonen ble så sammenstilt i en tabell slik at det skulle være lettere å analysere.

5 Resultat og diskusjon

I dette kapittelet presenteres resultatene fra arbeidet som er utført og beskrevet i kapittel 4. Resultatene fra Golsjuvet presenteres først og diskuteres før resultatene fra Årdalsvassdraget presenteres og diskuteres. Til slutt diskuteres resultatene fra de to vassdragene opp mot hverandre.

5.1 Golsjuvet

I dette delkapittelet er det presentert de ulike resultatene som er funnet for Golsjuvet. Resultater fra simuleringer, utregning av istykkelse og hvordan dette til slutt dannet en kalkulator for å estimere tiden det tar for en gitt vannføring å komme seg fra Eikredammen til Golsjuvet. Resultatene diskuteres opp om teori og mot hverandre.

5.1.1 HEC-RAS

For å få en fungerende modell ble det utført flere tester. Resultatene fra testene er vist i Tabell 5-1.

Tabell 5-1: Resultat av ulike tester for å få HEC-RAS modellen stabil

Test nr.	Basisvannføring [m^3/s]	Topp [m^3/s]	Tidsinter-vall [s]	Simuleringstid [døgn]	Konverge-rer/diverge-rer
1	0.1	32	2	5	Divergerer
2	0.1	32	1	5	Divergerer
3	0.1	32	0.5	5	Divergerer
4	0.1	15	1	5	Divergerer
5	0.1	15	0.5	5	Divergerer
6	0.1	0.1	1	3	Divergerer
7	0.1	15	2	5	Konvergerer
8	5	15	2	5	Konvergerer
9	1	15	2	5	Konvergerer
10	0.5	15	2	5	Konvergerer
11	0.3	15	2	5	Konvergerer
12	0.2	15	2	5	Konvergerer
13	0.2	32	2	5	Divergerer
14	0.2	32	2	7	Divergerer
15	0.2	32	2	11	Konvergerer
16	0.2	32	2	5	Konvergerer
17	0.2	32	2	3	Divergerer
18	0.2	32	1	3	Divergerer
19	0.2	32	2	4	Divergerer
20	0.2	32	1	4	Divergerer
21	0.2	32	0.1	< 1	Konvergerer

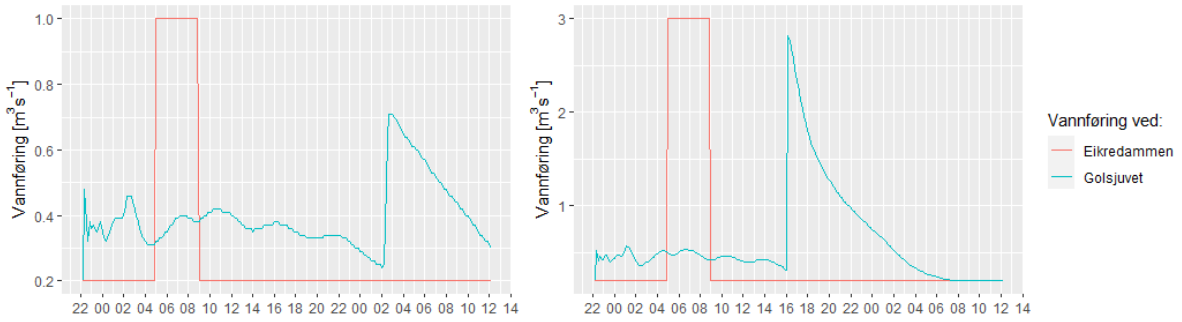
Man ser at det er gjort tester for mange ulike kombinasjoner av parameterne hvor man ønsker å oppnå en så effektiv modell som mulig. Klarer til slutt å finne den optimale sammensetningen som gjør at modellen kjører med de verdiene man vil.

Observasjonene Hafslund Eco har fra 2001 viser at 8 m^3/s brukte 8 timer (480 min) fra Eikredammen ned til Golsjuvet. I Tabell 5-2 vises hvor lang tid en vannføring brukte fra toppen og ned til Golsjuvet ved forskjellige ruheter.

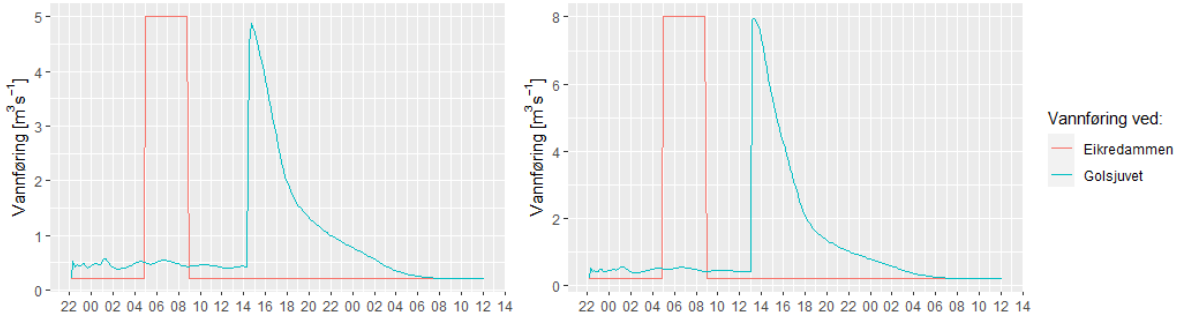
Tabell 5-2: Simuleringer av observert vannføring for å få en finjustert modell

Vannføring [m3/s]	Ruhet [-]	Tid [min]
8	0.15	380
8	0.16	420
8	0.20	470
8	0.18	450
8	0.19	480
32	0.19	110

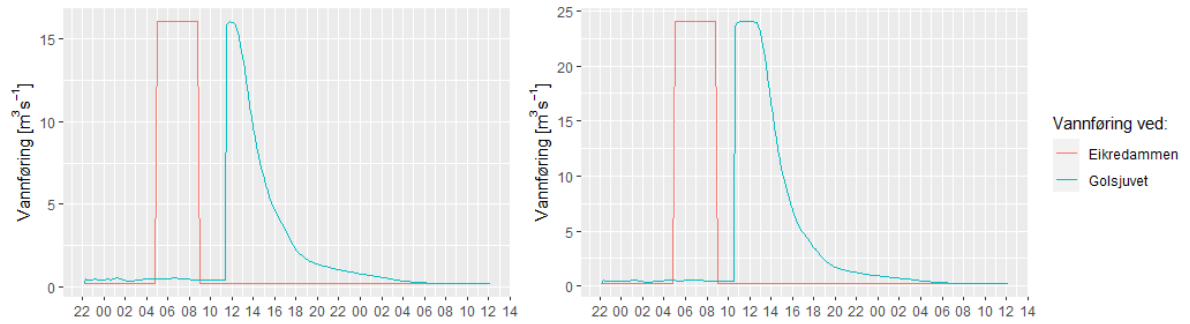
Figurene under viser eksempler på noen kjøringer hvor rød linje er det som blir sluppet ved Eikredammen og blå linje er vannføringen ved Golsjuvet. Det er en kjøring fra hver av de testede vannføringene og alle har en ruhet n = 0.19, altså et vintertilfelle. Basisvannføringen er på Q = 0.2 m^3/s og det er et tidsintervall på 4 timer hvor det blir sluppet ulike verdier av Q_{max}.



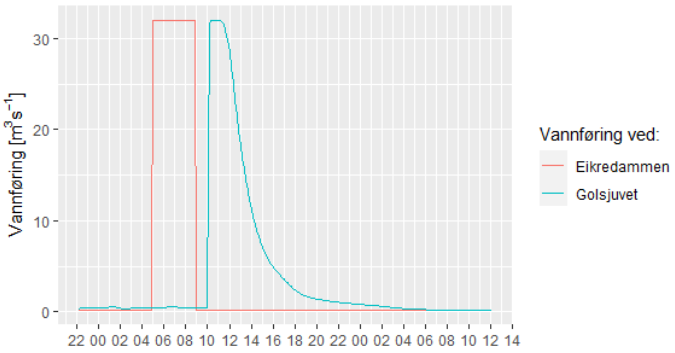
Figur 5-1: Venstre: Sluppet vannføring = 1 m^3/s, Høyre: Sluppet vannføring = 3 m^3/s



Figur 5-2: Venstre: Sluppet vannføring = 5 m^3/s, Høyre: Sluppet vannføring = 8 m^3/s



Figur 5-3: Venstre: Sluppet vannføring = 16 m³/s, Høyre: Sluppet vannføring = 25 m³/s



Figur 5-4: Sluppet vannføring = 32 m³/s

Det er valgt å vise et utdrag av simuleringene som grafer for å se hvordan «bølgen» oppfører seg ved ulike vannføringer. Det er tatt utgangspunkt i samme ruhet og samme tidsintervall på slipp for at vannføringene skal kunne sammenlignes. Det er en klar trend ved økning av vannføring. Ved veldig lav vannføring tar det lang tid før «bølgen» når Golsjuvet og toppen har ikke samme vannføring som hva som ble sluppet. Grunnen til at dette skjer er at det som kjøres som minstevannføring er så lite at elva ikke blir fylt opp, og en del av vannet som blir sluppet vil være med på å fylle den opp. Ved de minste vannføringene vil man derfor se at en del av vannet forsvinner på toppen av bølgen. Man ser også at ved lave vannføringer vil toppen være mye spissere enn når vannføringen øker. Dette er fordi «bølgen» vil være mindre og forsvinne fortere. Ved høyere vannføring vil vannstanden vedvare over lengre tid. Dette er selvfølgelig noe som også vil variere ut fra hvor lenge det blir sluppet en gitt vannføring i elva. I denne oppgaven er det bare brukt et eksempel for å kunne illustrere effekten av «bølgen». Ved lengre perioder med utslipp i elva vil vannstanden øke og så vil den vedvare til det ikke slippes lengre. Resultatene fra disse- og de resterende kjøringene er vist i Tabell 5-3 og diskutert under. Tilhørende grafer er vist i Figur 5-5 og Figur 5-6. Regresjonstabeller for forholdene ligger i Vedlegg 2.

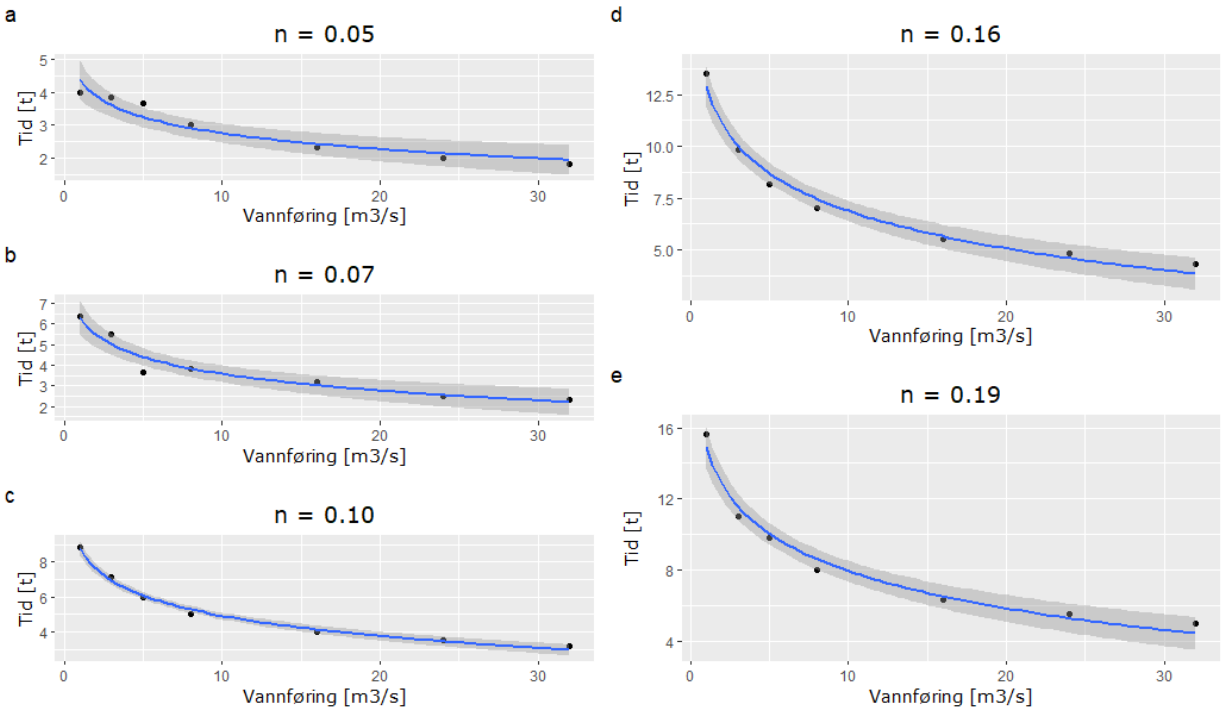
Tabell 5-3: Ulike vannføringer og ulike ruheter med tilhørende tider.

Vannfø-ring [m3/s]	Ruhet [-]	Tid [min]	Vannføring [m3/s]	Ruhet [-]	Tid [min]
1	0.07	380	**16**	0.07	190
1	0.10	530	**16**	0.10	240
1	0.16	810	**16**	0.16	330
1	0.19	940	**16**	0.19	390
3	0.05	230	**24**	0.05	120
3	0.07	330	**24**	0.07	150
3	0.10	430	**24**	0.10	210
3	0.16	590	**24**	0.16	300
3	0.19	660	**24**	0.19	340
5	0.05	220	**32**	0.05	110
5	0.07	280	**32**	0.07	140
5	0.10	360	**32**	0.10	190
5	0.16	490	**32**	0.16	260
5	0.19	590	**32**	0.19	310
8	0.05	180			
8	0.07	230			
8	0.10	300			
8	0.16	420			
8	0.19	480			

Sammenligning av simulerte verdier og dambruddbølgeberegning

Dambruddbølgeberegningen (DBBB) viser at en vannføring på 32 m^3/s bruker ca. 30 minutter fra Eikredammen til Golsjuvet, noe som gir en hastighet på 6.11 m/s. Dette er opp mot maksimal hastighet på en bølge i vassdrag. Simuleringen som er gjort for isfritt tilfelle viser at samme vannføring vil bruke 110 minutter fra Eikredammen til Golsjuvet. For det simulerte tilfelle vil hastigheten på bølgen bli 1.67 m/s. DBBB er utført med mye mer unøyaktige tverrprofiler enn i modellen som er brukt til simulering i denne oppgaven. Dette kan ha innvirkning på resultatet. En DBBB er i utgangspunktet beregnet for veldig store vannføringer og antas derfor å ikke være helt representativ for en vannføring på 32 m^3/s. Utformingen på profilene vil ha større påvirkning jo mindre vannføringen er. Det antas derfor at det er fornuftig at ruheten n = 0.05 ved isfri elv. En bratt elv med stein og blokk er antatt at har en n-verdi på mellom 0.04 og 0.07 så det stemmer bra i dette tilfellet.

Tiden er gjort om fra minutter til timer og grafene er plottet med disse verdiene. I Figur 5-5 er forholdet mellom transporttid og vannføring vist i forskjellige grafer ut ifra ruheten. Det er foretatt en logaritmisk regresjon og grafene viser regresjonslinja og tilhørende usikkerhet.



Figur 5-5: Forholdet mellom vannføring og tid ved ulike ruheter

Fra regresjonstabellene som er vedlagt i Vedlegg 2 er disse ligningene utarbeidet med tilhørende R^2-verdier og usikkerhet.

Ligninger for figuren over fra a) til e):

$$y = -0.704\,ln(x) + 4.3808 \quad R^2 = 0.9148 \quad Std.Err. = 0.29$$

$$y = -1.18\,ln(x) + 6.2991 \quad R^2 = 0.939 \quad Std.Err. = 0.41$$

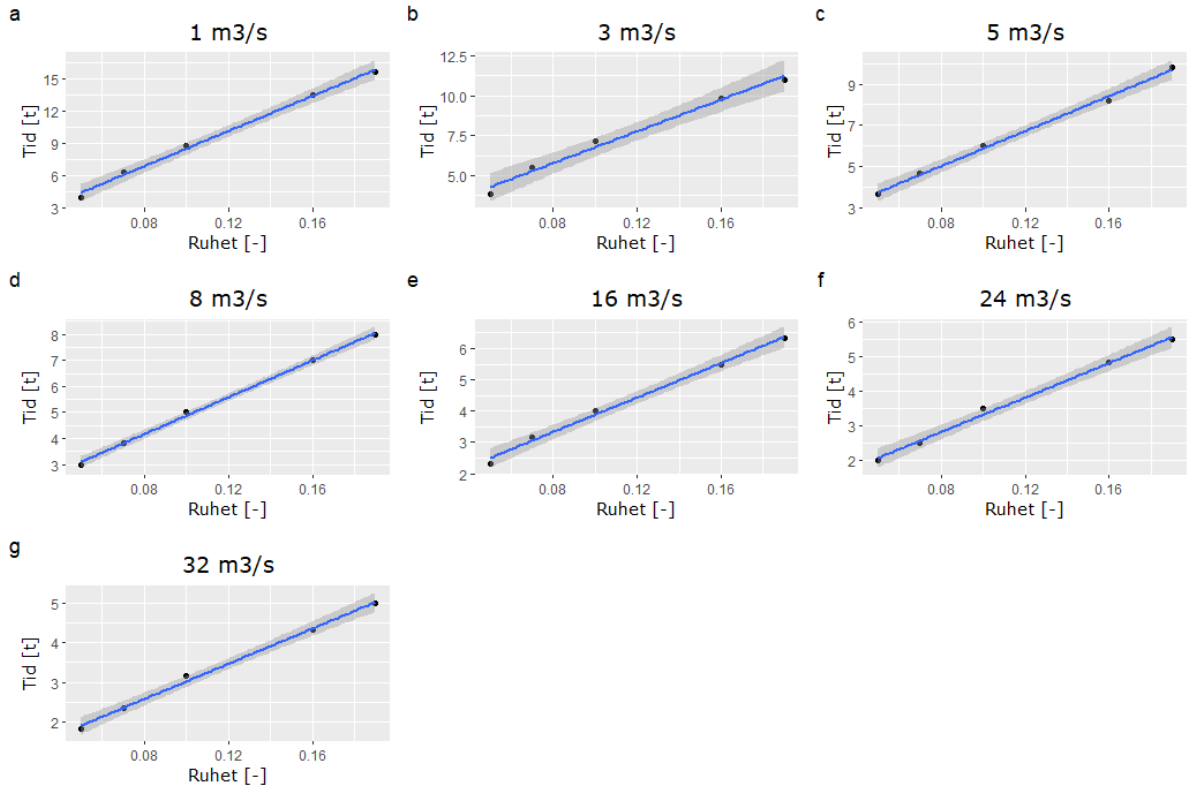
$$y = -1.638\,ln(x) + 8.7964 \quad R^2 = 0.9921 \quad Std.Err. = 1.31$$

$$y = -2.61\,ln(x) + 12.892 \quad R^2 = 0.9808 \quad Std.Err. = 2.01$$

$$y = -3.027\,ln(x) + 14.904 \quad R^2 = 0.9794 \quad Std.Err. = 0.59$$

Man ser på R^2-verdiene at en logaritmisk tilnærming egner seg godt og illustrerer effekten ruhet har på transporttid. Om vannføringen er lav og øker, vil tiden minke raskere enn om vannføringen øker ved høyre vannføring. Ser at det er samme trend ved alle de ulike ruhetene, men at jo høyere n-verdien blir jo mer tydelig blir droppet ved økning av vannføring. Grafen flater mer og mer ut jo høyere vannføringen blir, dette er fordi vannføringen blir mindre avhengig av ruheten. Om det er lite vann i elva vil derfor alt vannet som kommer nedover bli påvirket av ruheten på elvebunnen. Er det mye vann vil ikke utformingen av elvebunnen påvirke i samme grad.

I Figur 5-6 ser man forholdet mellom transporttid og ruhet for de sju ulike vannføringene som ble simulert.



Figur 5-6: Forholdet mellom ruhet og tid ved forskjellige vannføringer

Ligninger for vannføring fra a) til g) med tilhørende R^2-verdi og usikkerhet:

$$y = 81.681x + 0.3551 \quad R^2 = 0.9957 \quad Std.Err. = 0.37$$

$$y = 49.622x + 1.8097 \quad R^2 = 0.9865 \quad Std.Err. = 0.40$$

$$y = 42.422x + 1.6305 \quad R^2 = 0.9956 \quad Std.Err. = 0.19$$

$$y = 35.364x + 1.3352 \quad R^2 = 0.9983 \quad Std.Err. = 0.10$$

$$y = 27.597x + 1.1206 \quad R^2 = 0.9947 \quad Std.Err. = 0.14$$

$$y = 25.024x + 0.814 \quad R^2 = 0.9947 \quad Std.Err. = 0.13$$

$$y = 22.309x + 0.7901 \quad R^2 = 0.996 \quad Std.Err. = 0.10$$

Om man setter opp forholdet mellom ruhet og tid ved de ulike vannføringene som i Figur 5-6 ser vi at forholdet er lineært. Å bruke denne sammenhengen er gunstig om man vil beregne tid ut ifra ruhet. Sammenhengen her er svært god som det kommer frem av R^2-verdiene fra regresjonen og hadde det vært flere observerte hendelser, kunne man ha sammenlignet disse for å validere metoden. Ligningene fra denne regresjonen brukes videre til å utvikle kalkulatoren for estimering av tid. Det brukes til å estimere tiden for de sju ulike vannføringene basert på ruhet.

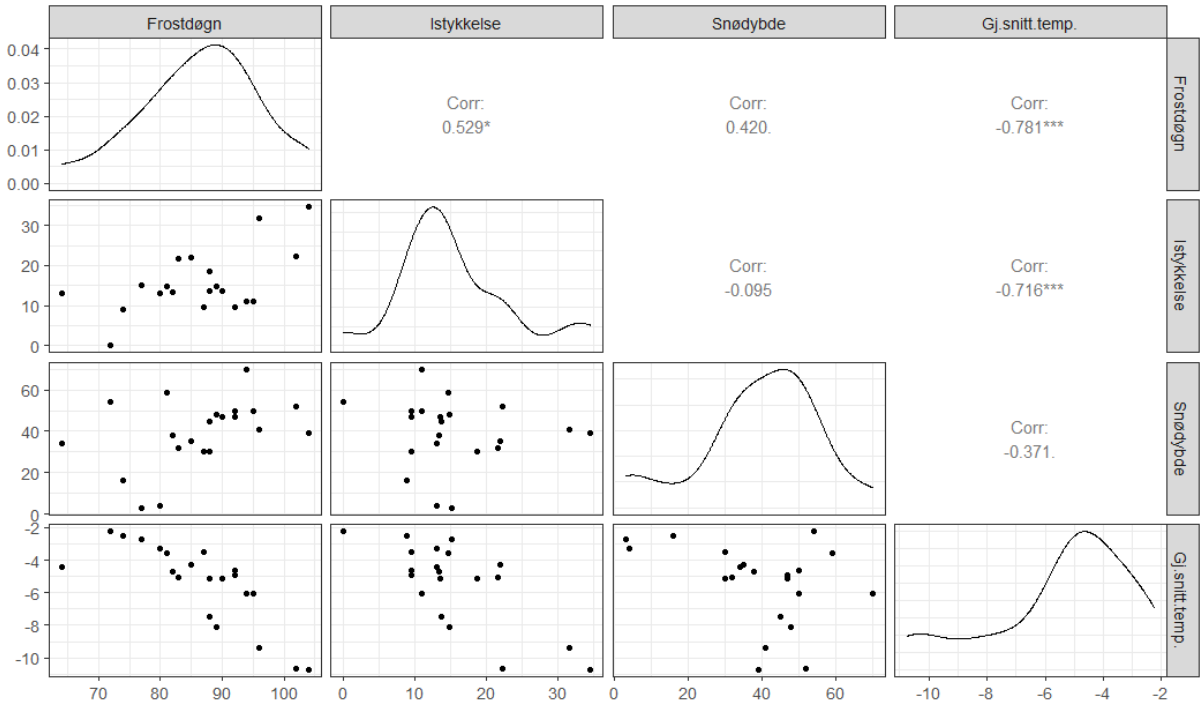
5.1.2 Isutvikling

Resultatene fra utregning av istykkelse er presentert i Tabell 5-4 sammen med observerte data fra respektive år. Antall frostdøgn, akkumulert snø og gjennomsnittstemperatur fra 1. november til 22. Februar, som er tidspunkter hvor den eneste observasjonen er.

Tabell 5-4: Resultater fra beregning av istykkelse sammen med observerte parametere fra 2000-2021

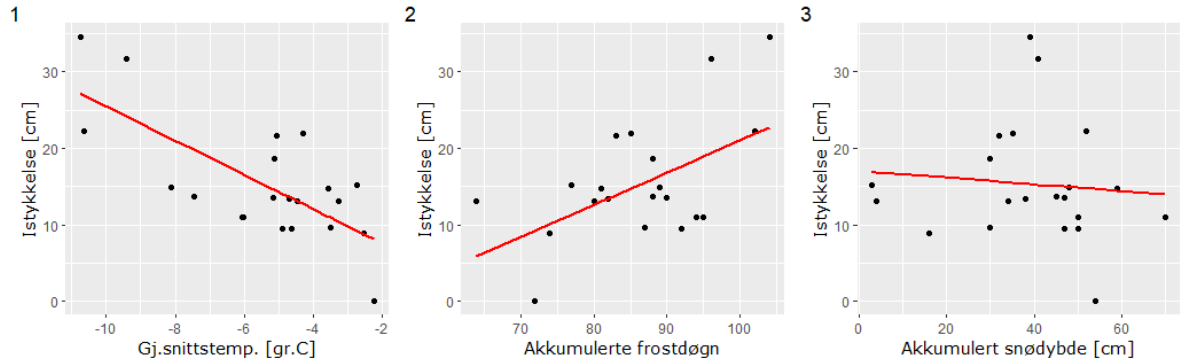
Sesong [1.nov-22.feb]	Istykkelse [cm]	FDD [antall]	Akkumulert snø [cm]	Gj.snitt temperatur [°C]
2000-2001	13.05	64	34	-4.45
2001-2002	13.54	90	47	-5.16
2002-2003	14.82	89	48	-8.11
2003-2004	9.52	92	47	-4.89
2004-2005	15.18	77	3	-2.74
2005-2006	21.98	85	35	-4.3
2006-2007	0.00	72	54	-2.24
2007-2008	9.55	92	50	-4.64
2008-2008	10.93	95	50	-6.03
2009-2010	22.20	102	52	-10.64
2010-2011	34.62	104	39	-10.74
2011-2012	18.68	88	30	-5.14
2012-2013	31.71	96	41	-9.4
2013-2014	14.68	81	59	-3.55
2014-2015	9.57	87	30	-3.51
2015-2016	21.65	83	32	-5.06
2016-2017	13.06	80	4	-3.28
2017-2018	11.00	94	70	-6.06
2018-2019	13.45	82	38	-4.7
2019-2020	8.91	74	16	-2.53
2020-2021	13.67	88	45	-7.45

Korrelasjonstabell som er vist i Figur 5-7 er uthentet fra R. Den viser sammenhengen mellom frostdøgn, istykkelse, snødybde og gjennomsnittstemperatur. Det er sammenhengen med istykkelse som er interessant i denne oppgaven og figuren viser at den korrelerer best med gjennomsnittstemperatur.



Figur 5-7: Korrelasjonstabell som viser sammenhengen mellom frostdøgn, istykkelse, snødybde og gjennomsnittstemperatur.

En nærmere undersøkelse av korrelasjonen mellom istykkelse og de andre parameterne er vist som regresjon i Figur 5-8, med tilhørende ligninger. Regresjonstabellene ligger i Vedlegg 2.



Figur 5-8: 1) Regresjon mellom gjennomsnittstemperatur og istykkelse, 2) Regresjon akkumulerte frysegraddager og istykkelse, 3) Regresjon mellom akkumulert snødybde og istykkelse

$$y = -2.2381x + 3.1068 \quad R^2 = 0.513 \quad Std.Err. = 5.59$$

$$y = 0.421x - 21.065 \quad R^2 = 0.2793 \quad Std.Err. = 6.80$$

$$y = -0.442x + 17.063 \quad R^2 = 0.009 \quad Std.Err. = 7.97$$

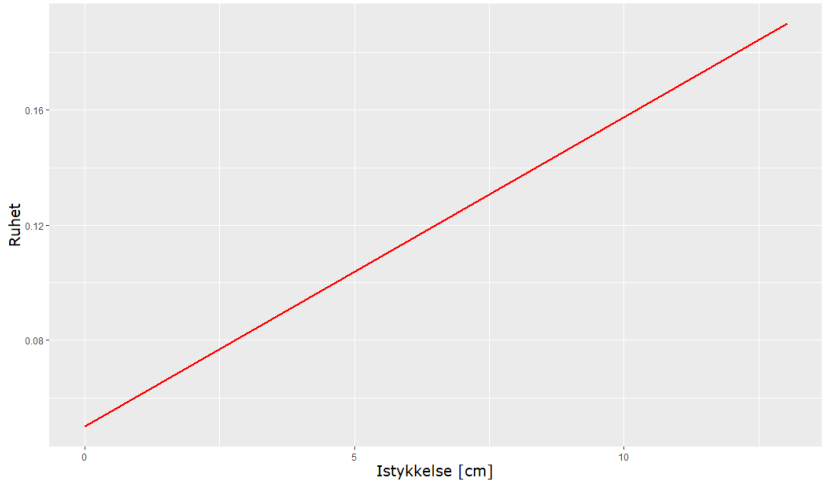
Istykkelsen er regnet ut med en metode fra Heggen sin masteroppgave som baserer seg på ulike teorier og tolkninger av Stefans formel. Dette er en forenklet måte å regne istykkelse på og det må tas forbehold om at denne kan være unøyaktig med tanke på ulike valg som er gjort. Det er valgt parametere ut ifra kvalifisert gjetting. Ettersom det er dårlig tilgang på hydrologiske data fra området rundt Gol, er disse også hentet fra nærliggende steder og tilpasset, noe som også må tas i betraktning. Istykkelsen som er beregnet virker fornuftig og brukes derfor videre. Istykkelsen i en elv med lite vann er også noe som er vanskelig å avgjøre. Det er antatt at om temperaturen tillater det, vil hele elva fryse igjen og vannet vil renne på toppen av is og snø. Ruheten som er kalibrert til n = 0.19 er da antatt å være på toppen av isdekket, med en blanding av is og snø.

Sammenligningen av de ulike verdiene gir en pekepinn på hvilke parametere som korrelerer. Det ses kun videre på sammenhengen mellom istykkelse og gjennomsnittstemperatur selv om korrelasjonen mellom frostdøgn og gjennomsnittstemperatur er bedre. Det er vanskelig å bruke sammenhengen mellom de andre parameterne utenom istykkelse da de ikke har en direkte korrelasjon med ruhet. Istykkelsen er regnet ut som et resultat av alle de andre parameterne og det er antatt at det er denne som gjengir og kan sammenlignes best med ruhet.

I Tabell 5-5 og Figur 5-9 vises en enkel sammenligning av beregnet istykkelse og simulert ruhet. Dette er kun antagelser og er ikke validert. Det er vedlagt en regresjonstabell i Vedlegg 2.

Tabell 5-5: Utregnet istykkelse kombinert med simulert ruhet.

Istykkelse	Ruhet
0	0.05
13.02	0.19



Figur 5-9: Regresjon mellom to punkter.

Her er det antatt at n = 0.05 når det ikke er is og snø, dette er noe som må valideres. For å validere dette kreves det observasjoner ved flere tider i sesongen. Hvor mye vann som er i elva før det blir overløp virker også inn på ruheten, men er ikke tatt i betraktning i dette eksempelet. Dette vil gi et bredere bilde på hvordan is og snø påvirker ruheten. Ved å kunne simulere flere tilfeller hvor man har tiden en gitt vannføring bruker, kan man bruke dette til å få flere punkter på grafen i Figur 5-9. Ettersom det ene punktet er data fra en observert hendelse og det andre punktet er en antatt verdi kan man risikere at med flere

observasjoner vil grafen endres. Det er viktig at man ikke bruker data fra denne grafen uten å ta hensyn til at man mangler data.

5.1.3 Kalkulator

Som endelig resultat blir det i Figur 5-10 presentert en kalkulator hvor man kan estimere tiden vannet/bølgen bruker ned til Golsjuvet. Dette gjøres ved hjelp av enten gjennomsnittstemperatur til nå i vintersesongen fra 1. november eller ved målt gjennomsnittlig istykkelse og vannføringen som blir sluppet ved Eikredammen. Kalkulatoren bruker ligningen fra sammenhengen mellom istykkelse og gjennomsnittstemperatur for å regne om fra temperatur til istykkelse og ligningen fra regresjonen mellom istykkelse og ruhet for å regne om fra istykkelse til Mannings n. Mannings n brukes for å sette opp tiden vannet bruker ved sju ulike vannføringer for så å utføre en regresjon. Resultatet fra regresjonen brukes sammen med vannføringen for å estimere tiden «bølgen» bruker fra Eikredammen til Golsjuvet.

Finne tiden på en gitt vannføring fra Eikredammen til Golsjuvet på vinterstid

Har du gjennomsnittstemperatur ***eller*** *målt gjennomsnittlig istykkelse?*

Gj. Snitt. Temp. fra 1. nov		°C
Målt istykkelse		cm
Utregnet istykkelse	0	cm
Mannings n	0.05	
Hva er vannføringen?		m^3/s

Tøm tabell

Estimer tid

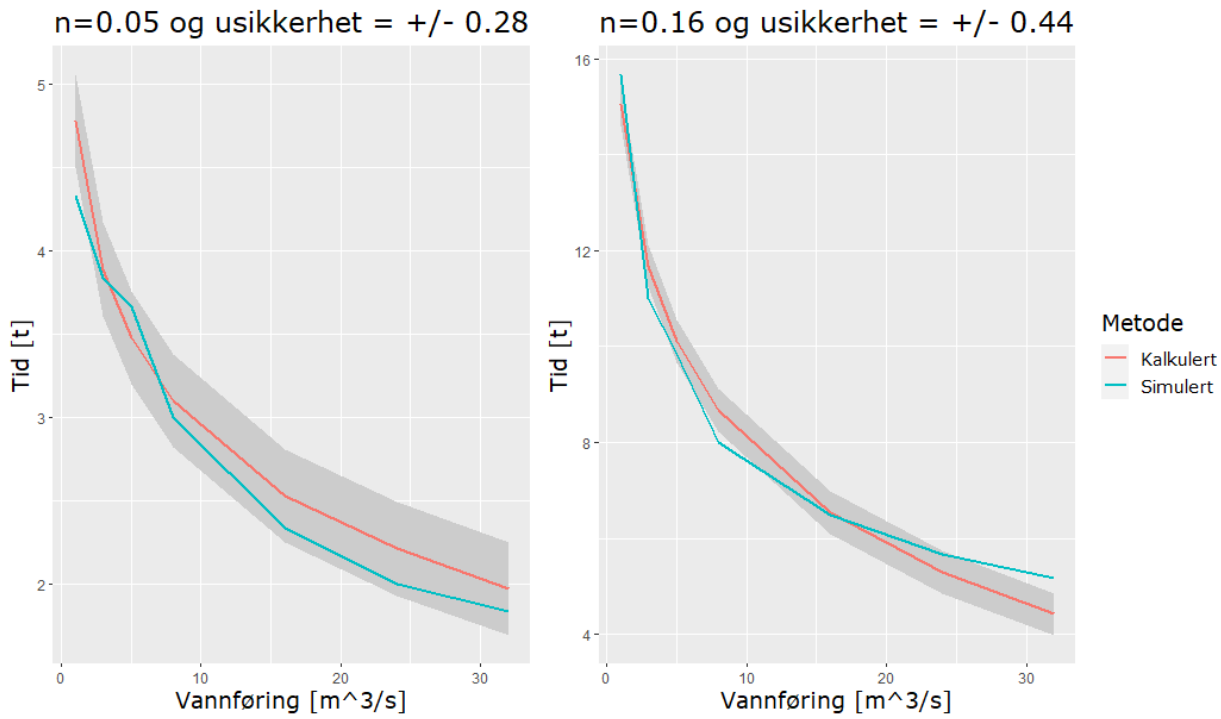
Tid Timer Usikkerhet +/- Timer

Figur 5-10: Utsnitt fra Excel-ark av kalkulator for estimering av tid

Tabell 5-6 og Figur 5-11 viser et eksempel på to av testene som ble gjort av Excel-arket som brukes til kalkulatoren.

Tabell 5-6: Sammenhengen mellom simulert tid og kalkulert tid ved n=0.05 og n=0.16

n = 0.05					n = 0.16				
Vannføring	**Simulert tid**	**Kalkulert tid**	**Diff. fra 0.28**	**Innenfor diff.**	**Vannføring**	**Simulert tid**	**Kalkulert tid**	**Diff. fra 0.44**	**Innenfor diff.**
1	4.33	4.78	-0.45	-0.17	1	13.5	12.93	0.57	-0.13
3	3.83	3.89	-0.06	OK	3	9.83	10.07	-0.24	OK
5	3.67	3.48	0.17	OK	5	8.17	8.74	-0.57	-0.13
8	3	3.1	-0.10	OK	8	7	7.52	-0.52	-0.08
16	2.33	2.53	-0.20	OK	16	5.5	5.71	-0.21	OK
24	2	2.21	-0.21	OK	24	5	4.66	0.34	OK
32	1.83	1.97	-0.14	OK	32	4.5	3.91	0.59	-0.15



Figur 5-11: Grafisk fremstilling av sammenhengen mellom simulert tid og kalkulert tid ved n=0.05 og n=0.16 med usikkerhet

Resultatet av testene virker lovende, og kalkulatoren gir ut verdier som er innenfor usikkerheten i de fleste tilfellene. Den virker stabil på lav Mannings n, litt mer ustabil på høyere, men er ikke langt utenfor variasjonsbredden. Usikkerheten ligger på +/- et kvarter for n = 0.05, og på underkant av +/- en halvtime for n = 0.16. Dette er tidsintervaller som er så korte at det i en eventuell varsling burde være en sikkerhetsmargin på rundt en halvtime. Ettersom dette kun er en test mellom kalkulert tid og simulert tid kreves det observerte data for å verifisere kalkulatoren. Kalkulatoren må derfor ikke brukes før den er kalibrert med flere og bedre data. Om man får tilgang på disse dataene så må det gjøres nye tester i alle ledd.

5.2 Årdalsvassdraget

Dette delkapittelet inneholder resultat og tilhørende diskusjon for Årdalsvassdraget. Det blir presentert resultat av kalibrering og simulering av sommer- og vintertilfeller, regresjonsanalyser, funn som er gjort med tanke på minstevannføring, resttilsig og demping av vann ved is i elv.

5.2.1 Minstevannføring

Det var flere episoder i løpet av årene 2015 til 2021 at kravet til minstevannføring ikke ble nådd. Vinterperioden er klassifisert som perioden fra 15. november til 15. mars hvert av årene. Episodene er samlet i Tabell 5-7. Middelvannføring er i m^3/s, vanntemperatur og lufttemperatur er i C^o og er gjennomsnittet for hele episoden og nedbør er gjennomsnittet for hele episoden i mm.

I 2015 var det 32 timer i vinterperiode 1, som gikk fra 4. februar til 17. februar, at kravet ikke ble møtt. Ved disse episodene var middellufttemperaturen over frysepunktet og det var ingen frysegradtimer som ledet opp til episodene. Ved den tredje episoden i perioden var det 0.11 mm i middelnedbør. Ellers var det 0 mm nedbør i perioden.

Vinterperiode 2 går fra 5. januar til 20. januar i 2016, og inneholder 63 timer hvor minstevannføringskravet ikke er nådd. Ved den lengste episoden på 30 timer lå middelvannføringen på 0.96 m^3/s med en middellufttemperatur på -3.35 C^o. Den neste episoden skjedde rett etter første episode, og varte i 22 timer. Da lå vannføringen på 1.24 m^3/s og hadde en middellufttemperatur på -2.26 C^o. Ved den siste episoden i samme periode ligger middelvannføringen på 1.49 m^3/s, som er rett under kravet på 1.5 m^3/s. Her er middeltemperaturen nede i -15.75 C^o. Det kommer ikke noe nedbør i hele perioden. I februar/mars 2016 kommer den lengste perioden hvor vannføringen ligger under minstekravet. Da er det 322 timer fra 25. februar til 14. mars vannføringen går under. Vinteren 2015/16 er det da totalt 385 timer hvor kravet ikke blir holdt.

6. mars til 8. mars 2017 er det 19 timer hvor kravet ikke blir nådd. Middelvannføringen ligger her mellom 1.1 og 1.41 m^3/s, og middellufttemperatur er mellom -1.6 og -4.5 C^o. Det kommer ikke nedbør i perioden.

Den nyligste perioden hendte i 2018 og varte fra 13. desember til 14. desember og var på 14 timer. Middelvannføring lå mellom 1.3 og 1.48 m^3/s, med en middellufttemperatur mellom -5.04 og -0.15 C^o. Heller ikke i denne perioden var det nedbør.

Tabell 5-7. Vinterepisoder med minstevannføring i løpet av 2015-2021

Periode	Fra	Til	Varighet [timer]	Middel-vannføring [m^3/s]	Vann-temp [^oC]	Lufttemp [^oC]	Nedbør [mm]
1	04.02.2015 01:00	04.02.2015 07.00	7	1.486107	4.5	-9.3	0
	16.02.2015 08:00	16.02.2015 11:00	4	1.479	4.12	4.15	0
	16.02.2015 13:00	16.02.2015 14:00	2	1.469	4.13	3.95	0
	16.02.2015 16:00	17.02.2015 10:00	19	1.4286	4.105	3.152	0.1105
2	05.01.2016 11:00	06.01.2016 17:00	30	0.9585	5.0783	-3.3467	0
	07.01.2016 18:00	08.01.2016 15:00	22	1.2397	4.9214	-2.2636	0
	19.01.2016 21:00	20.01.2016 07:00	11	1.48778	4.0568	-15.746	0
3	25.02.2016 06:00	25.02.2016 09:00	4	1.44461	3.8406	-5.55	0
	26.02.2016 00:00	26.02.2016 09:00	10	1.412714	3.7575	-6.24	0
	27.02.2016 02:00	27.02.2016 05:00	4	1.472673	3.7013	-6.825	0
	29.02.2016 00:00	29.02.2016 06:00	7	1.421709	3.5775	-6.5	0
	02.03.2016 01:00	05.03.2016 09:00	81	1.209355	3.6225	1.49263	0.0765
	05.03.2016 11:00	08.03.2016 10:00	72	1.205403	3.4159	-0.4028	0.0013
	08.03.2016 14:00	14.03.2016 13:00	144	1.159466	3.2403	3.31042	0.0042

4	06.03.2017 21:00	06.03.2017 23:00	3	1.341847	0.15	-1.583	0
	07.03.2017 07:00	07.03.2017 09:00	3	1.40597	0.158	-3.8167	0
	07.03.2017 20:00	08.03.2017 08:00	13	1.159991	0.1154	-4.5308	0
5	13.12.2018 04:00	13.12.2018 08:00	5	1.298112	0.1	-5.04	0
	13.12.2018 22:00	14.12.2018 02:00	5	1.272046	0.1	-0.65	0
	14.12.2018 06:00	14.12.2018 09:00	4	1.48041	0.1	-0.145	0

Når det ett år er over 300 timer hvor vannføringen ikke oppfyller kravet for minstevannføring, er det et tydelig tegn på at det faktisk er et problem.

For at kravet ikke skal bli nådd, vil det være en eller flere faktorer som spiller inn på forhånd av disse periodene. Det er rimelig å anta at en slik faktor kan være temperatur, både i luft og i vann.

Tidsforsinkelse av vannføring på grunn av isoppstuving i sjøene

Det er ikke nødvendigvis slik at problemet må ligge i Kalltveit. Noe annet som kan være med på å si noe om situasjonen ved Kalltveit er sjøene oppstrøms. Der vannstanden stiger i vannene, men kravet ikke blir overholdt kan det tyde på at det er isoppstuving. Dette kan ofte ses på tidsforsinkelsen fra vannstandsstigningen til nedgangen i vannføringen lenger nedstrøms. En oversikt over disse hendelsene vises i Tabell 5-8. For hver sjø er det vist hvor mange timer det tar fra vannstandsstigning til vannføringen går under i Kalltveit. Det må også ses på om det har vært nedbør i samme periode, da dette kan gi støy for datasettene. I alle periodene har det vært lite eller ingen nedbør, som vist i Tabell 5-7.

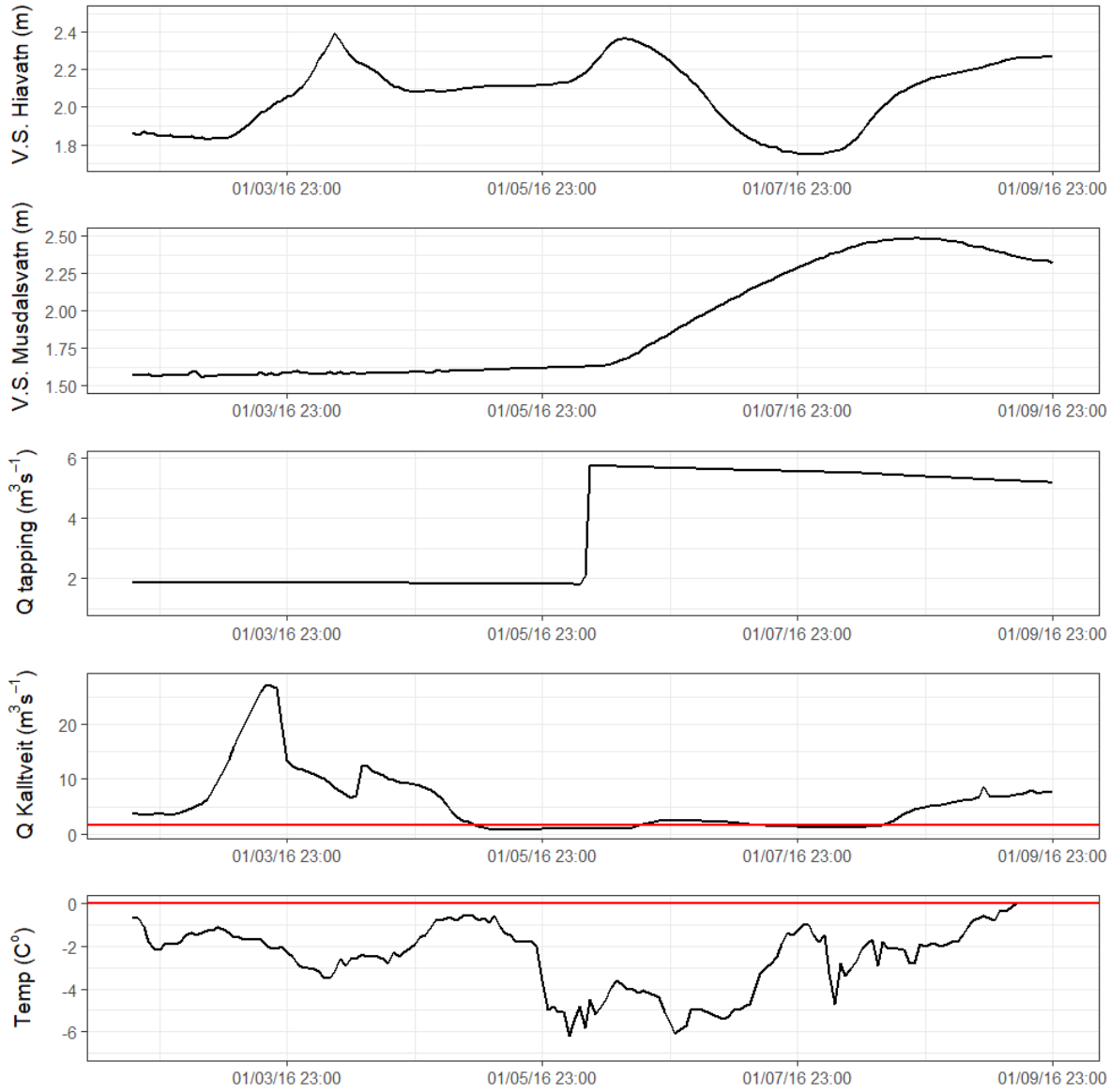
Tabell 5-8. Tidsforsinkelse av vannføring grunnet isoppstuving i sjøene

Fra	Til	Musdalsvatn [timer]	Viglesdalsvatn [timer]	Hiavatn [timer]
05.01.2016 11:00	06.01.2016 17:00	10		26
07.01.2016 18:00	08.01.2016 15:00			27
19.01.2016 21:00	20.01.2016 07:00	43	106	103
06.03.2017 21:00	06.03.2017 23:00	16	74	77
07.03.2017 07:00	07.03.2017 09:00			87
07.03.2017 20:00	08.03.2017 08:00	11		100

Det mangler data for sjøene frem til sommeren 2015. Får derfor ikke sett på sammenhengen for den første perioden fra Tabell 5-7.

For perioden 02.01.16 til 09.01.16 kan man se en tydelig tidsforsinkelse grunnet isoppstuving. Ved Hiavatn treffer toppen på vannstanden 26 timer før vannføringen går under minstekravet. Ved Musdalsvatn tar det kortere tid fra topp til krav ikke er oppnådd. Ved Musdalsvatn er det en rundere topp, som kan være noe av grunnen til at tidsforsinkelsen bare er 10 timer. Det er to episoder hvor vannføringen går under kravet. I slutten av første episode øker tappingen fra rundt 1.8 m^3/s til 5.75 m^3/s. Likevel kommer det en ny episode

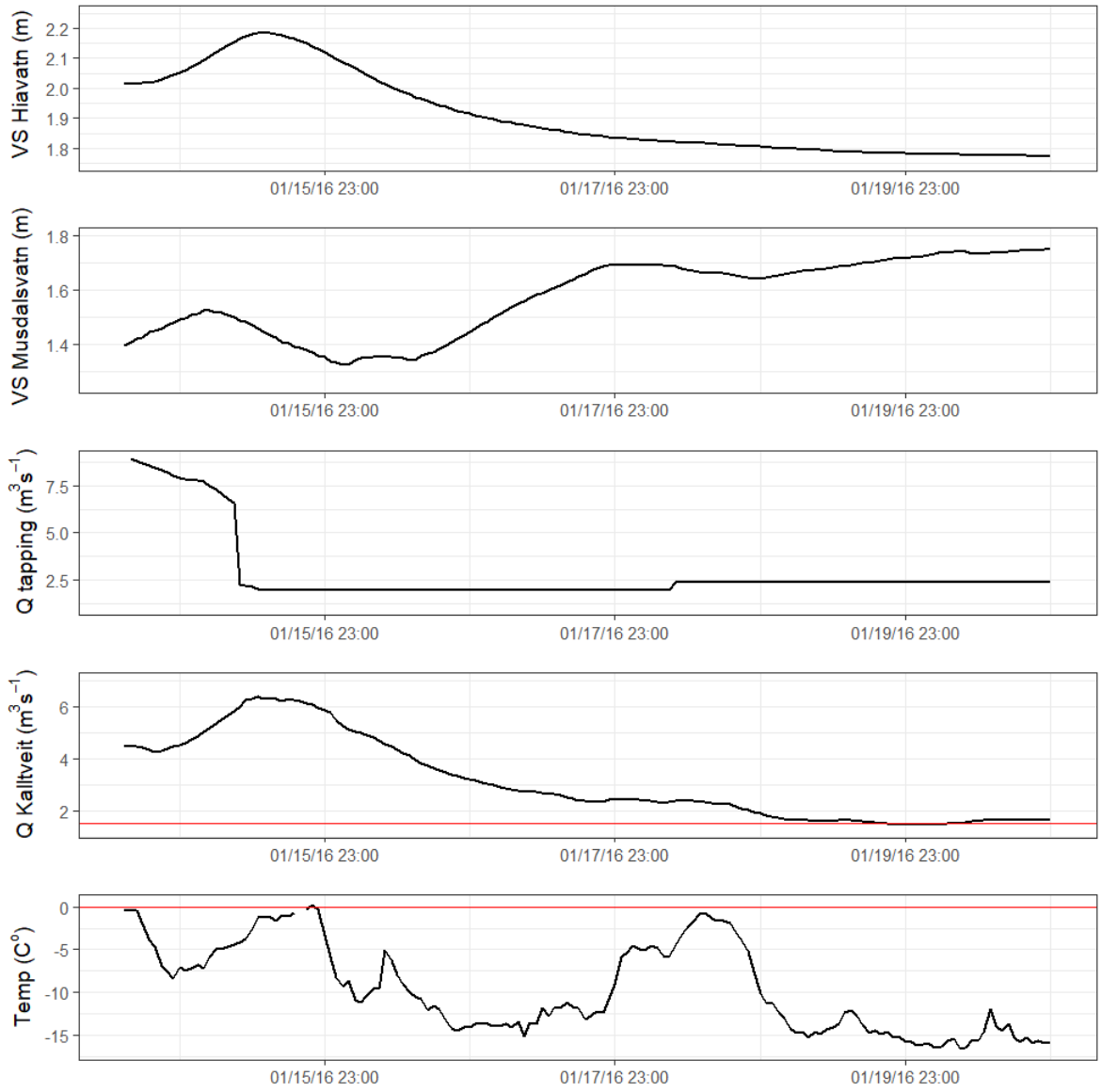
med for lite vannføring. Det vises på temperaturmålingene at det er en lenger kuldeperiode. Dette kan være grunnen til at minstekravet ikke klarer å overholdes, selv med mer tapping. Sammenhengen mellom tapping, vannstand, vannføring og temperatur for denne perioden kan sees i Figur 5-12.



Figur 5-12. Sammenhengen mellom tapping, vannstand, vannføring og temperatur for tidlig januar 16

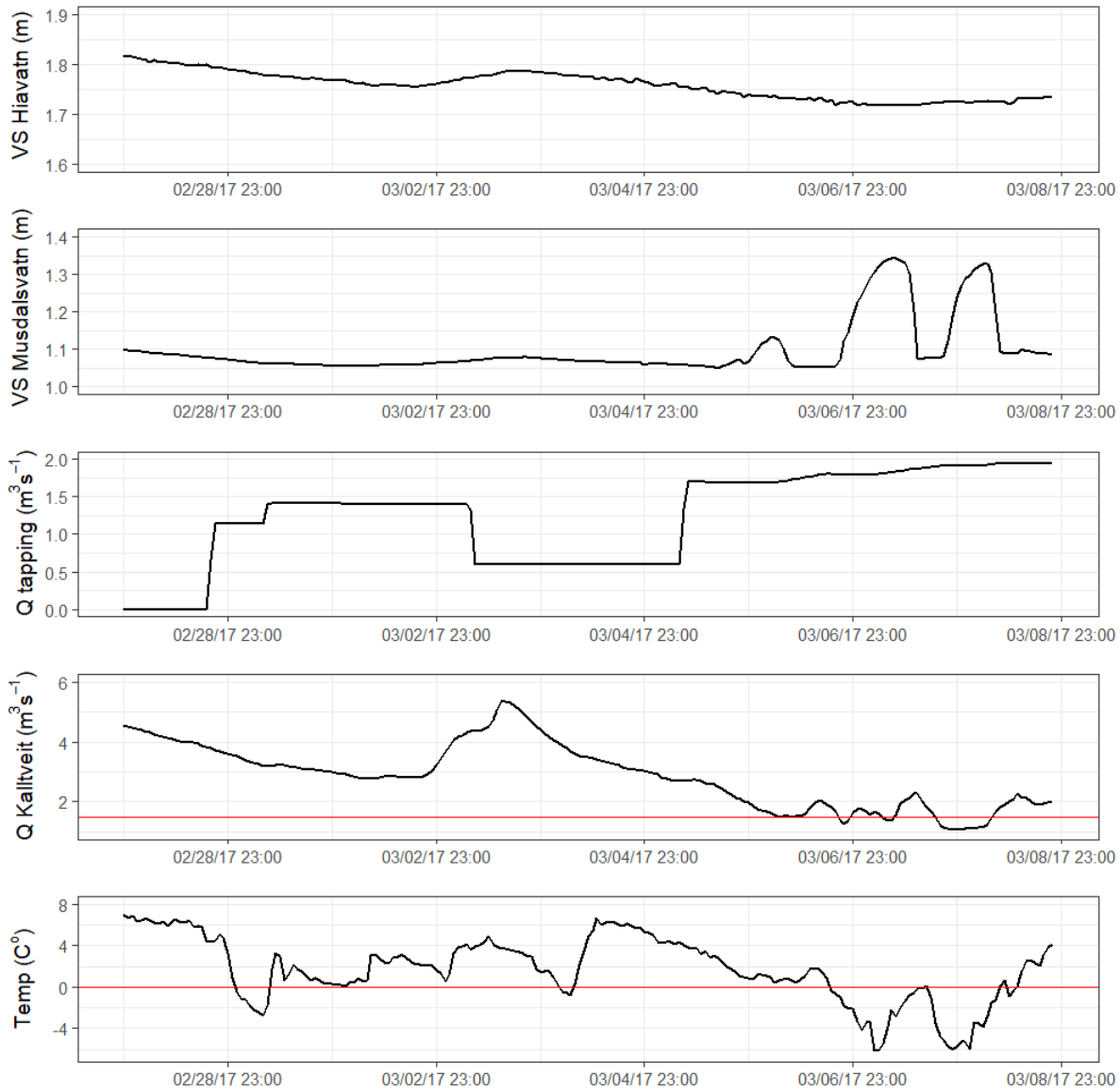
Senere i januar, 15.01.16 til 20.01.16 oppstår det også en slik tidsforsinkelse. Det er en stor nedtrapping i tapping fra 9 m^3/s til 1.94 m^3/s. Etter denne nedtrappingen blir det først en økning i vannstand, som mest sannsynlig stammer fra den høye tappeverdien, før vannstanden synker drastisk. Samtidig som dette kommer det en lang kuldeperiode. Før vannføringen går under kravet kommer det en dupp i temperaturen, hvor den synker fra –1 °C til –16 °C. Deretter går vannføringen under i en periode på elleve timer. Musdalsvatn har en ny topp på vannstanden, selv om tappingen er nedtrappet. Det kommer ikke nedbør i perioden, og denne vannstandstigningen må komme fra is. Tidsforsinkelsen fra toppen på vannstanden til vannføringen går under er på 103 timer for Hiavatn og 43 timer for

Musdalsvatn. Sammenhengen vises i Figur 5-13. Resten av 2016 er det ingen flere slike tydelige tidsforsinkelser.



Figur 5-13. Sammenhengen mellom tapping, vannstand, vannføring og temperatur for midten av januar 16

I 2017 har Musdalsvatn i perioden 6. mars til 8. mars tre hopp i vannstanden. Disse endringene kommer samtidig som at temperaturen synker ned til, og under frysepunktet. Fra den første vannstigningen er det 16 timer til vannføringen går under minstekravet. Ved neste topp er det 11 timer til kravet ikke blir holdt. Fra Figur 5-14 ser vi at dette har en tydelig sammenheng med temperaturen. Tappingen ligger på litt over 1.5 m^3/s. I Hiavatn er det ikke noen betydelig økning i vannstand eller tidsforsinkelse grunnet dette.



Figur 5-14. Sammenhengen mellom tapping, vannstand, vannføring og temperatur for tidlig mars 17

Det man ser fra disse hendelsene er at det er tydelige tegn til at is ved utløp av sjøene påvirker vannføringen i Kalltveit.

Forbedre slipp av minstevannføring

Fra Tabell 5-7 er det fem perioder i løpet av vinteren årene 2015 til 2021 hvor minstevannføringskravet ikke blir nådd. Totalt i løpet av disse årene er det da snakk om 450 timer om vinteren hvor vannføringen går under 1.5m^3/s. Dette betyr at slipp av minstevannføring har et forbedringspotensial. I spesielt kalde perioder hvor sjøene fryser og vannføringen blir demmet opp av is, vil det være nødvendig å slippe mer vann ved Breiavatn. I disse periodene vil resttilsiget også være redusert, da det er lite nedbør og det som kommer ned kommer som snø. I løpene hvor resttilsiget kommer vil det også dannes is som forhindrer vannet i å nå Årdalsvassdraget.

I smelteperioder og andre perioder hvor resttilsiget er økende/større er ikke minstevannføringen så avhengig av slipp fra kraftverket. Ved flere tilfeller ser man at det ikke trenger

slippes noe vannføring fra kraftverket for å oppnå kravet fordi resttilsig fra tilløpende elver er stort nok i seg selv.

5.2.2 HEC-RAS

I HEC-RAS ble det utført både stasjonær- og ikke-stasjonære strømningsanalyser. I tillegg ble det utført kalibrering og validering av den hydrauliske modellen.

Stasjonær strømningsanalyse

Etter å ha gjort flere endringer ved modellen gikk til slutt ruhetsverdiene og vannføringene som er ført opp i Tabell 5-9 gjennom simuleringen uten å divergere. Det var viktig å få modellen til å gå på vannføring 1.5 m^3/s, da det er dette som er minstevannføringen i vassdraget.

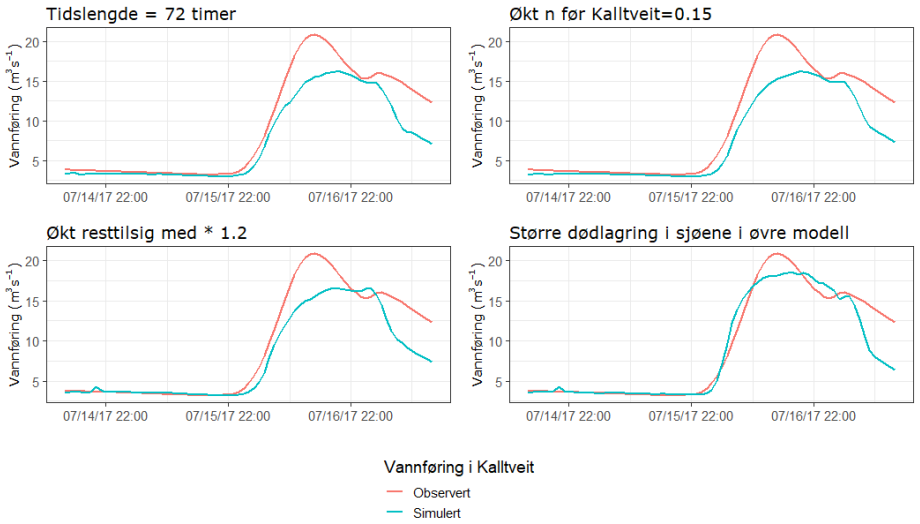
Tabell 5-9: Verdier for konstant strømningssituasjon ved ikke-stasjonær strømning for Årdalsvassdraget

Ruhet [-]	Vannføring [m^3/s]	Computation interval [sek]	Konvergerer/divergerer
0.2	1.5	0.5	Konvergerte
0.1	1.5	0.5	Konvergerte
0.085	1.5	0.5	Konvergerte

Sommertilfelle/Kalibrert modell

I Figur 5-15 vises ulike forsøk på å kalibrere modellen. Den første grafen viser simulering uten noen endringer på modellen. Deretter ble Mannings n økt til 0.15. Dette gjorde at vannføringen ble litt høyere, men også forsinket. Økte resttilsiget med 20%, noe som gjorde at vannføringen økte, men det var fortsatt den samme avrunda toppen.

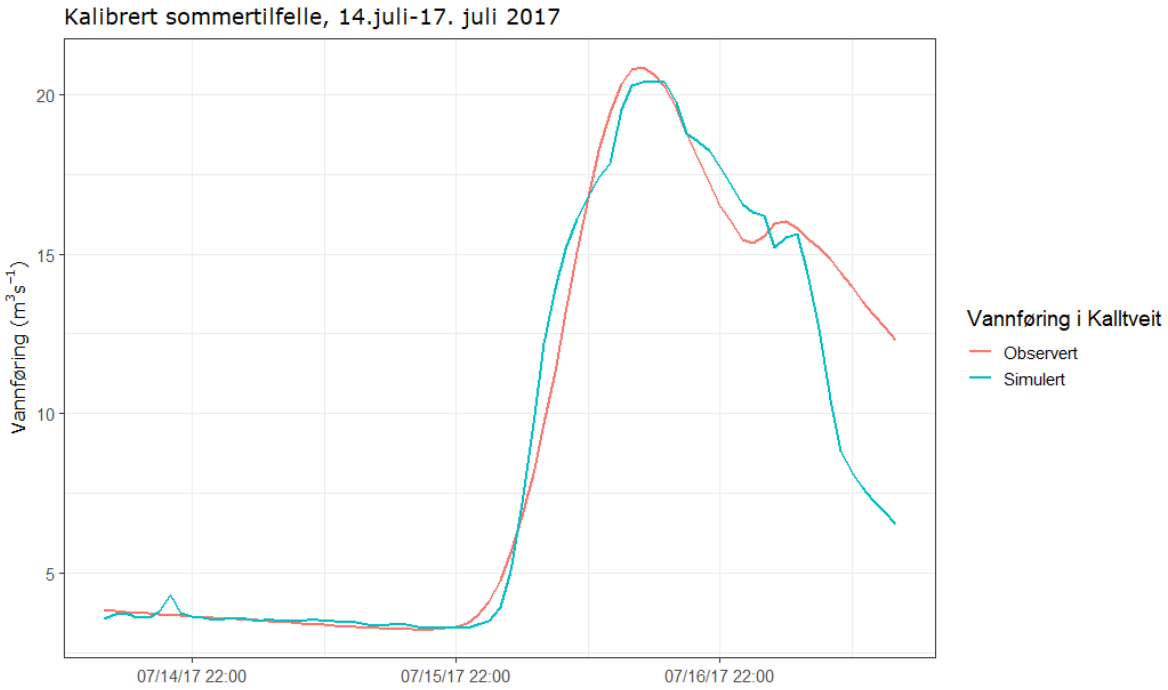
Å endre på dødlagringen i sjøene hadde en betydelig endring på hydrografen for Kalltveit. Det gjorde at vannføringen fikk en brattere kurve, men toppen ble fortsatt for rund, og avtakingen etter toppen ble for rask i forhold til observert vannføring. Ser at simulert treffer likt som begynnelsen på observert og har en akseptabel stigning før det runder av. Flere endringer av ruheten ville også ha endret formen og tidspunkt for topp. Dette betyr at ulikhetene har noe med vannmengden å gjøre.



Figur 5-15: Forskjellige forsøk på kalibrering av den hydrauliske modellen

For å få lik topp på simulert hydrograf som observert hydrograf, ble det lagt til ekstra resttilsig ved topp-tidspunktet og ved enden av tidsperioden. Det er godt mulig at det her har kommet inn ekstra vannføring fra andre elver eller bekker som samles opp i Storåna.

Resultat av kalibrert modell vises i Figur 5-16. Her er startverdier de samme, simulert og observert har lik stigning, og topp av vannføring skjer ved samme tidspunkt. Ved slutten av simuleringsperioden kan det diskuteres om det skulle vært lagt til ekstra resttilsig, da det er en betydelig forskjell i stigning og volum de siste timene av perioden.



Figur 5-16: Kalibrert sommertilfelle

For den øvre modellen er ruheten lik 0.15 gjennom hele modellen. Ruheten er såpass høy grunnet bratt og varierende terreng, hvor det til tider er lav vannføring.

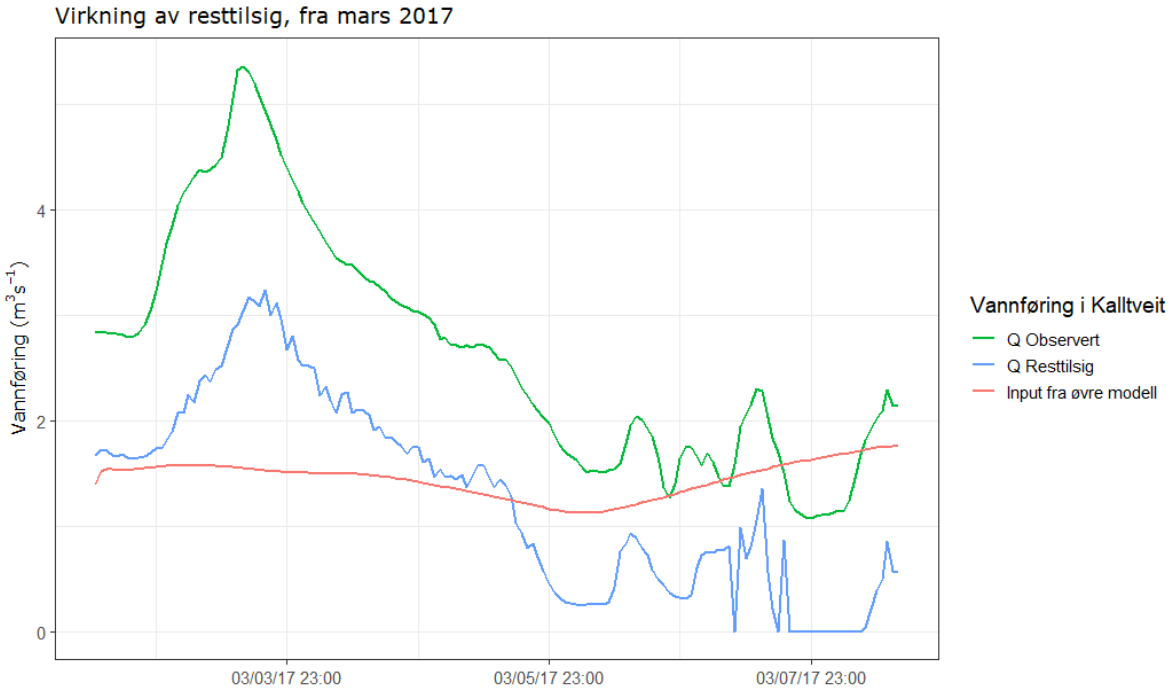
Som Tabell 5-10 viser er det ulik ruhet gjennom den nedre modellen. Terrenget er også her bratt og varierende. I begynnelsen av modellen er Mannings n lik 0.15, deretter endres det til 0.1, før det igjen stiger til 0.17 og deretter til 0.2 før målepunktet ved Kalltveit. Etter målepunktet er det en slakere elv, med ruhet lik 0.1.

Tabell 5-10: Mannings n for nedre modell i Årdalsvassdraget

RS		**Ruhet [-]**
Fra	*Til*	
47838	46994	0.15
46929	33567	0.1
33287	28587	0.17
28478	27904	0.2
27834	205	0.1

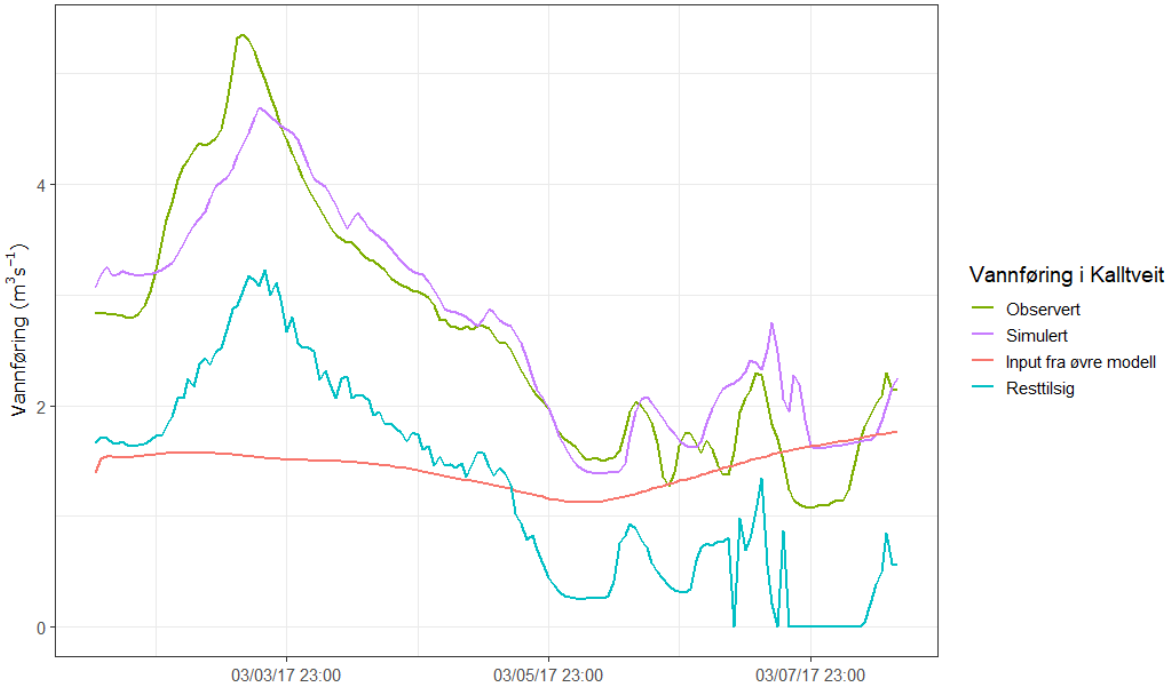
Resttilsig og hvordan implementere dette ved kalibrering

Fra kalibreringen av modellen tyder det på at resttilsiget fra Lyngsåna og andre tilløpende elver har mye å si for vannføringen i Storåna. Denne varierer mye fra årstid til årstid, og vil øke ved større vannføringer. Hvor mye resttilsig som skal legges til og justeres vil altså variere gjennom tidsperioden. Dersom det er tydelig at det kommer en større topp, vil det være naturlig å justere inn litt mer resttilsig i samme periode. I smelteperioder vil det også være lurt å justere resttilsiget opp. I de kaldeste periodene om vinteren vil det være mindre resttilsig, da dette blir holdt igjen på grunn av is/snø, eller at det er perioder med lite nedbør. Dersom det i tillegg kommer nedbør i form av snø kan dette føre til at vannet i de tilsigende elvene fryser til raskere, på grunn av varmetapet.



Figur 5-17: Effekten resttilsig kan ha på vannføringsmålinger

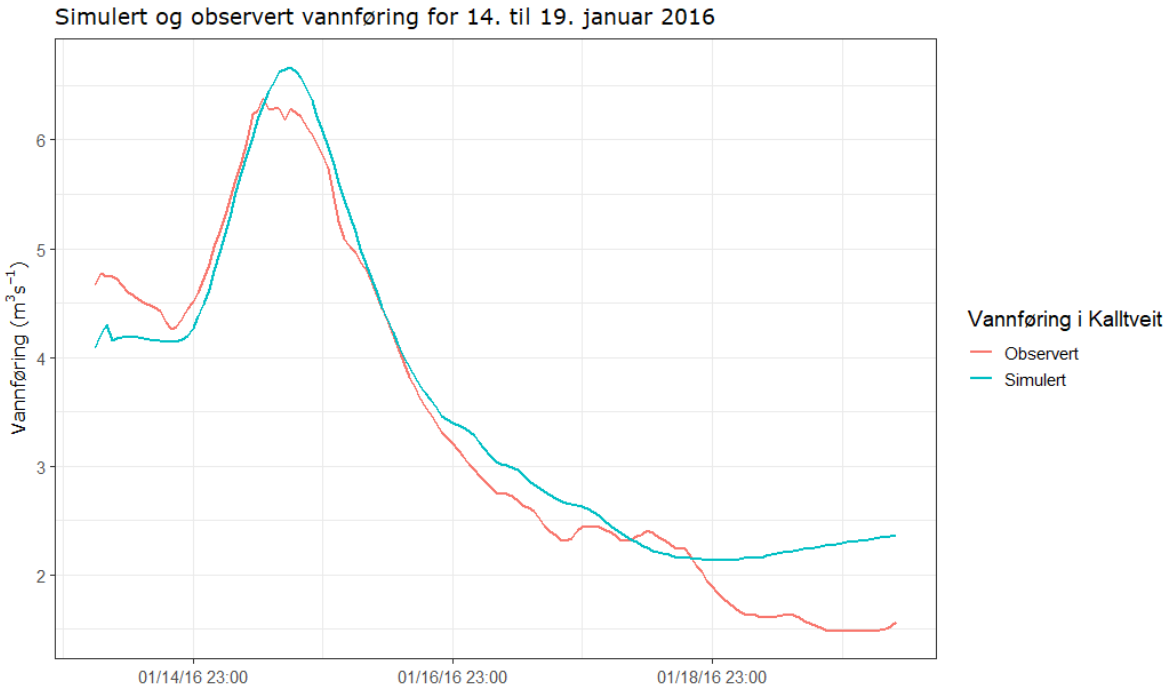
Figur 5-17 viser hvor mye resttilsiget kan ha å si for vannføringen i en modell. Grønn linje er observert vannføring i Kalltveit, rød linje er vannføring som kommer inn i nedre modell fra øvre modell og blå linje er vannføring fra resttilsig. Her er det tydelig at resttilsiget har en stor påvirkning på vannføringen. Dersom resttilsiget ikke hadde blitt lagt til i simuleringen ville simulert vannføring i Kalltveit sett mer ut som den røde linja. I stedet er simulert vannføring slik som i Figur 5-18. Ser at den følger resttilsigets form mer enn input fra øvre modell.



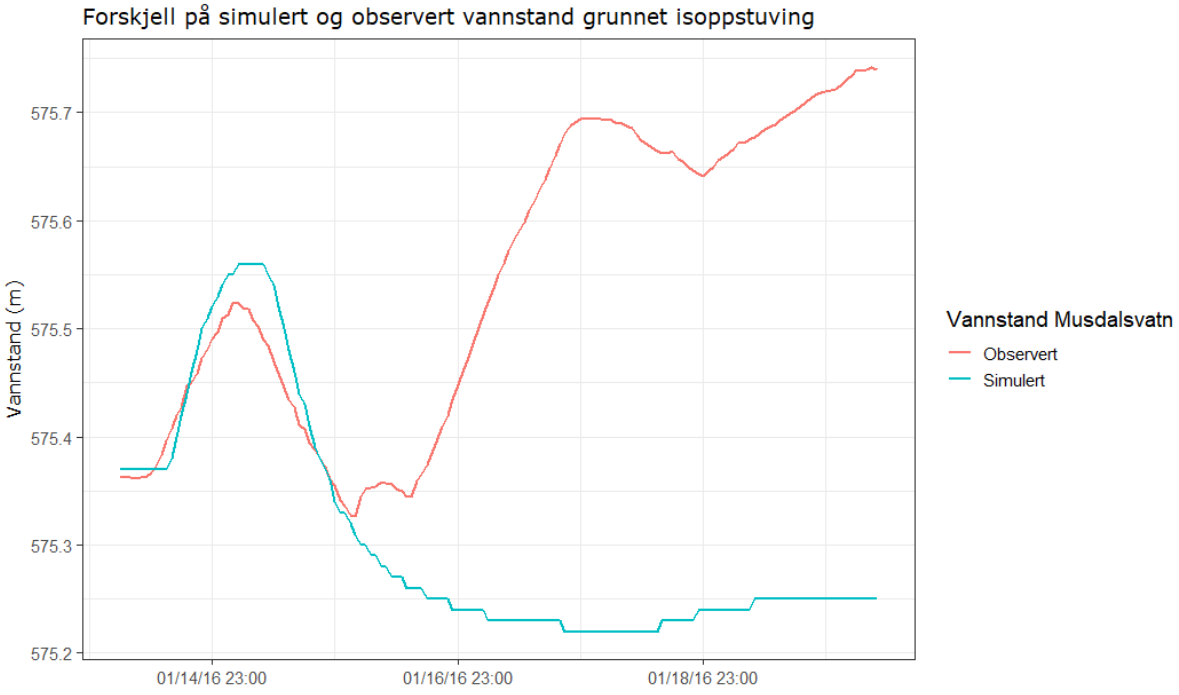
Figur 5-18: Virkningen resttilsig kan ha på simulert vannføring

Vintertilfelle

Modellen simulerer vannføringen slik den hadde vært dersom det ikke var kuldeperiode, vist i Figur 5-19. I Figur 5-20 vises simulert og observert vannstand i Musdalsvatn. Her er det tydelig at modellen ikke klarer å gjenskape vannstandsøkningen som skjer grunnet isoppstuving. Det at modellen ikke klarer å gjenskape dette kommer igjen ved simuleringen av vannføringen i Kalltveit. Grunnet problemer med å få modellen til å simulere oppdemming forårsaket av is var det utfordrende å få riktige vinterresultater ut av HEC-RAS-modellen for Årdalsvassdraget.



Figur 5-19: Simulering uten is, januar 2016



Figur 5-20: Forskjell på simulert og observert vannstand i Musdalsvatn

Det ble prøvd mange ulike teknikker både for å demme opp oppstrøms Kalltveit og strupe vannføringen i Kalltveit, men det var ingen som ga resultater. Hadde metodene som ble testet for å demme opp Musdalsvatn eller Kalltveit fungert kunne dette vært med på å finne en sammenheng mellom isdannelse og tapt volum i Kalltveit, og det kunne vært laget en hydraulisk modell som kunne brukes til å regne ut hvor mye mer tappet vannføring som trengtes å slippes ved så og så mye oppdemmet vann.

Det at modellen ikke ble slik som håpet er et resultat av flere faktorer. Hovedfaktorer var teknisk svikt i HEC-RAS der terskel ikke holdt igjen vann og at feil ble oppdaget for sent til at det var mulig å finne en løsning i tidsrommet som var igjen.

Dødlagring i sjøene og påvirkningen av vannføringen

Ved å øke dødlagringen i sjøene i den øvre modellen, økte også volumet av vannføringen i hele modellen. Dette kommer av at jo mer dødlager det er, jo mindre vann trengs det til å fylle opp sjøene, og mer av vannet vil da også komme ut av dem.

Elevation er her total vannflatehøyde over havet. I hver sjø er det mellom 0.4 til 0.7 meter med fritt vann over dødlagerne. Dette er vist i Tabell 5-11.

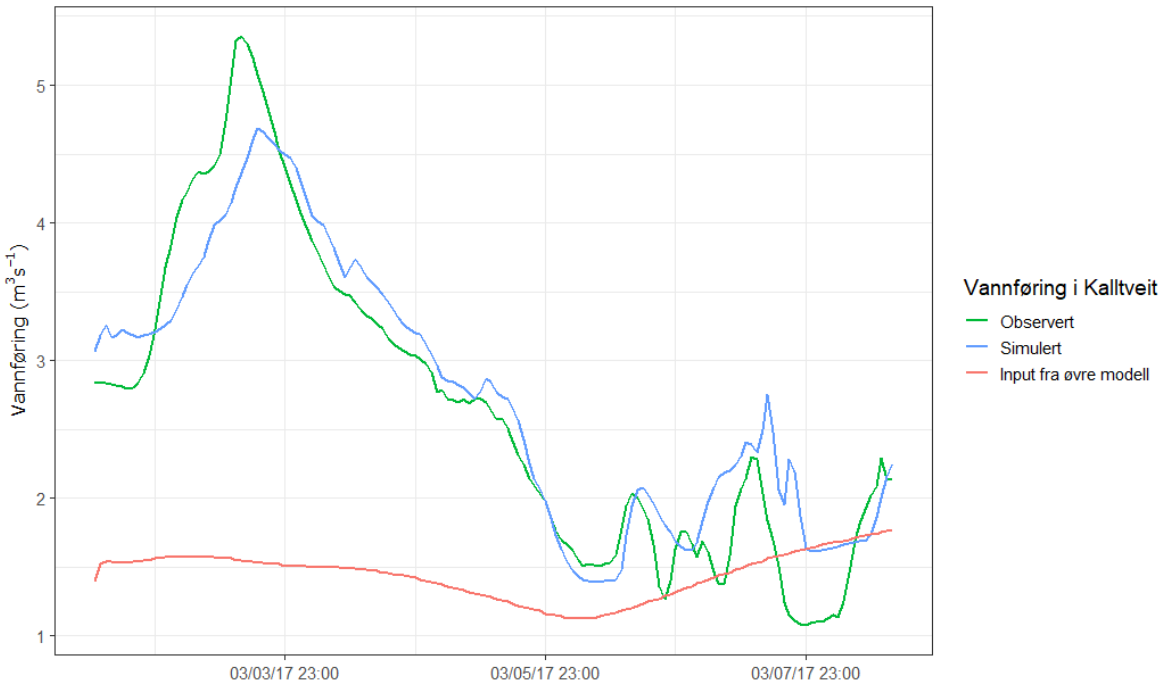
Tabell 5-11. Dødlager i sjøene i Årdalsvassdraget

Vann	Fra RS	Til RS	*Elevation* [m.o.h.]
Kråkevatn	38301	36084	626
	36084	35980	625.5
	35980	35532	625
Musdalsvatn	26869	19920	575.6
	19920	19780	575
	19780	19780	574.5
Hiavatn	9058	3364	413
	3364	1300	412.5
	1300	1095	412
	1095	826	411

Med disse verdiene for dødlager fulgte simulert vannføring den observerte vannføringen for flere tilfeller, og ble ansett som nær nok virkeligheten til å bli brukt.

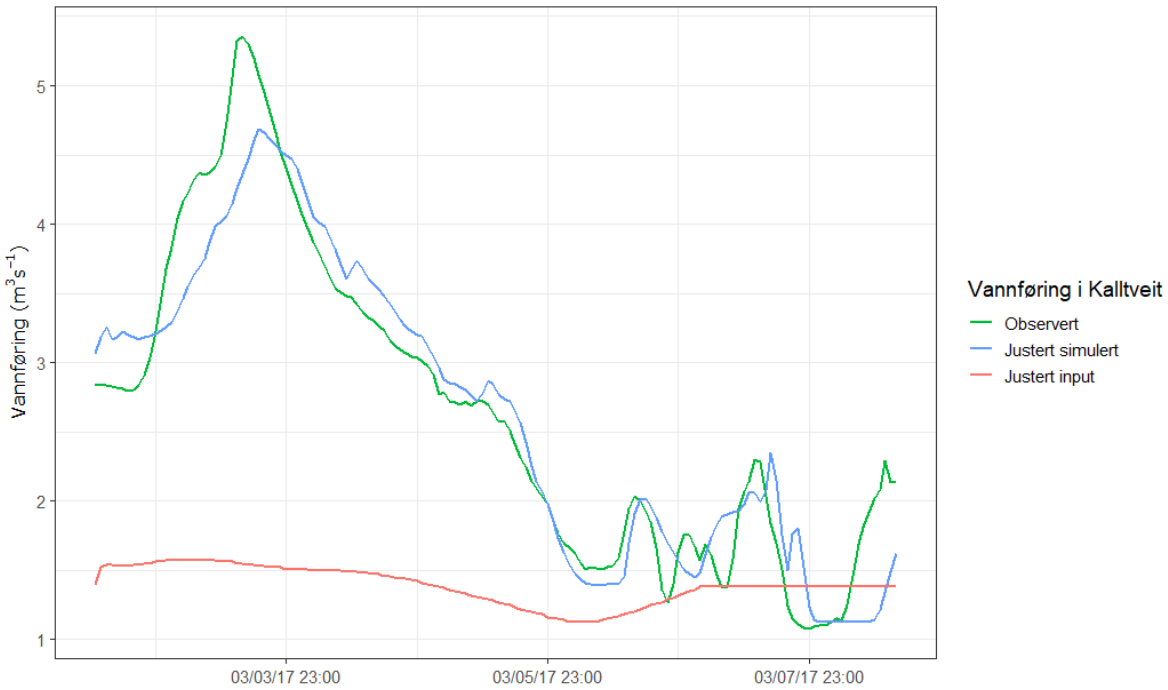
Vannføring som forsvinner/blir holdt tilbake

Ved en annen kuldeperiode i Årdal, i mars 2017, gikk også vannføringen under minste-vannkravet i Kalltveit. Ved simulering av dette kan det se ut som at det er noe av vannet fra den øvre modellen som enten blir holdt tilbake eller fryser til is ut i tidsperioden. Fra Figur 5-21 kan det tyde på at det er for mye volum i modellen rundt 7. mars kl. 23:00. Hydrografen til simulert vannføring følger den observerte hydrografen, men den har for høy vannføring.

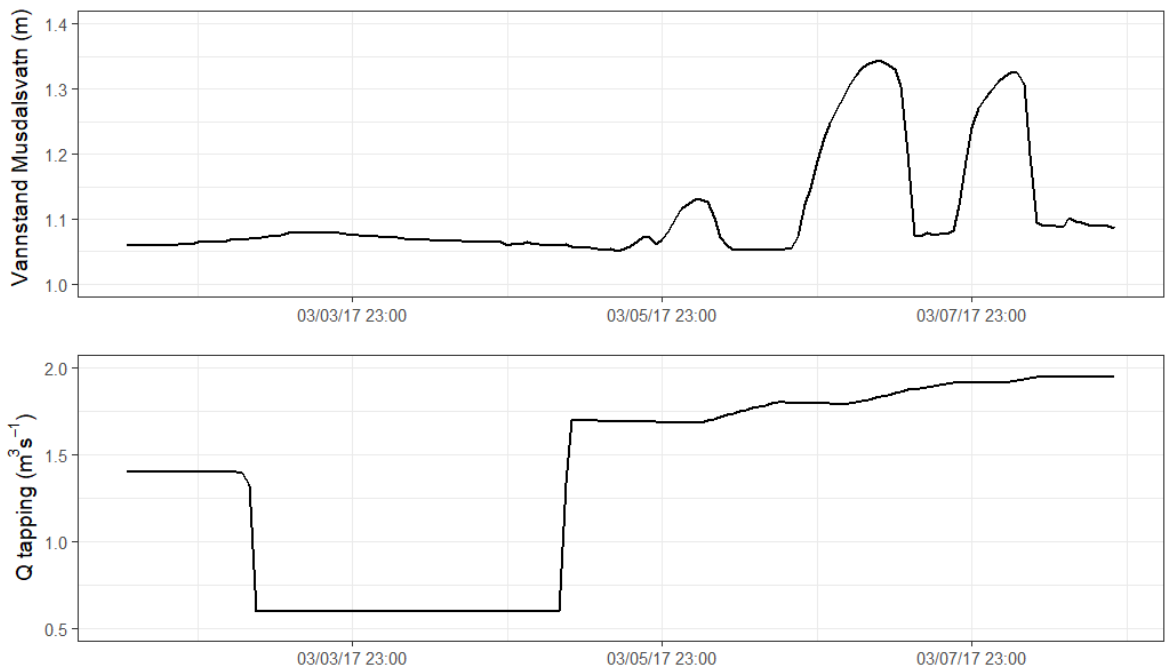


Figur 5-21: For mye volum i modellen mot slutten av tidsperioden

Dersom input fra den øvre modellen blir justert ned i det ovennevnte tidspunktet følger simulert hydrograf den observerte mer, som vist i Figur 5-22. Det er ikke usannsynlig at vann blir holdt tilbake i en av sjøene i den øvre modellen. Fra Figur 5-23, som viser nedstrøms vannstand av Musdalsvatn fra samme periode kan man tydelig se store hopp i vannstanden som ikke stammer fra tapping. Disse hoppene stammer mest sannsynlig fra isoppstuving, som kan gi forsinkelse på vannføring nedstrøms, som da igjen vises i den nedre modellen.

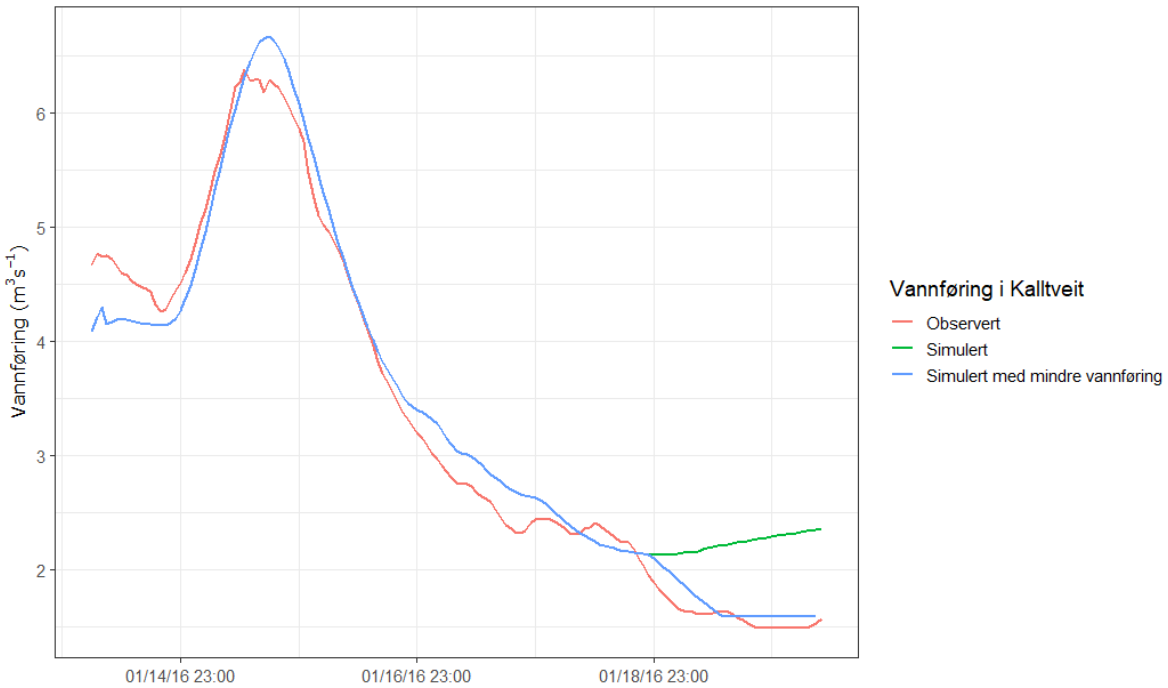


Figur 5-22. Justert volum i slutten av simuleringsperioden

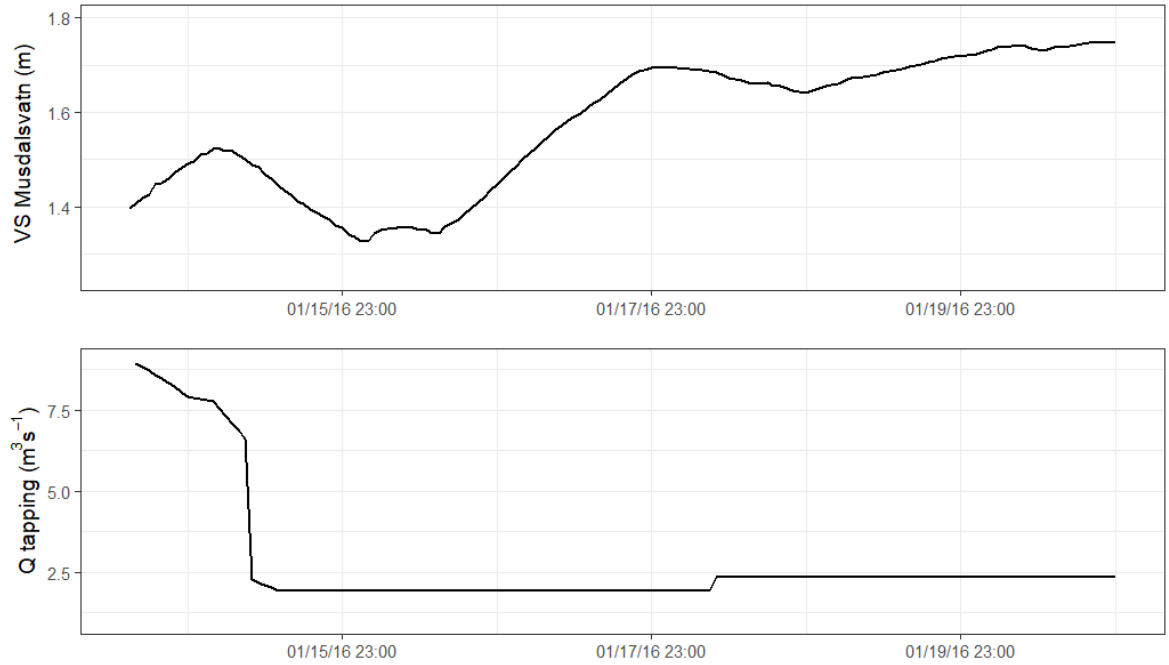


Figur 5-23. Hopp i vannstand og tapping fra magasin

Det samme kan man se skjer i vinterperioden som er simulert fra 14. januar til 20. januar 2016, Figur 5-24. For den grønne simulerte grafen er det ikke gjort noen endringer ved vannføringen, det er bare blitt kjørt gjennom den originale inputen. For blå simulert graf, er det gjort manuelle endringer ved inputdata på slutten av tidsperioden. Da synker vannføringen grunnet at det blir holdt vann tilbake i sjøene i den øvre modellen, to og et halvt døgn ut i simuleringen. Fra vannstanden nedstrøms Musdalsvatn kommer det frem at det kan være opphoping av vann grunnet is. Man ser at tappingen ikke har en sammenheng med hvordan vannstanden øker fra Figur 5-25.



Figur 5-24: Vinterperiode simulert med mindre vannføring ved enden av perioden



Figur 5-25: Vannstandsøkning grunnet is, ikke tapping

Regresjon for å finne en sammenheng mellom lukeåpning og lufttemperatur

Hadde man klart å konstruere en terskel som hadde fungert som en oppdemmer slik som opprinnelig tenkt, ville denne regresjonen vært med på å finne en sammenheng mellom en overløpsterskel og temperatur. Dette kunne blitt brukt til å simulere vannføring grunnet isoppstuving, og deretter funnet nødvendig tapping for at vannføring i Kalltveit ikke skulle gått under minstevannføringskravet. Denne regresjonen er gjort for vintertilfellet som skjedde i midten av januar 2016. Tallene som står i parentes, er for å systematisere de ulike regresjonene. For eksempel er (1) gjort med Vannføring på Kalltveit som avhengig variabel og Temperatur som uavhengig variabel.

Best korrelasjon har Vannstand på Kalltveit med temperatur og frysegradtimer, med en R^2 på 0.878, som vises i Tabell 5-12 (6). Dersom Vannføring på Kalltveit blir kombinert med Temperatur og Frysegradtimer (3), blir R^2 0.843, som også er en høy verdi. Volum kombinert med Temperatur og Frysegradtimer (7) får også en høy R^2-verdi på 0.843.

Tabell 5-12. Regresjon for å finne sammenheng mellom lukeåpning og lufttemperatur

	Dependent variable:						
	Vannføring på Kalltveit			**Vannstand på Kalltveit**			**Volum**
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Temperatur	0.188***		0.048***	0.007***		0.002***	-171.100***
	(0.020)		(0.012)	(0.001)		(0.0004)	(44.835)
Frysegradti-mer		0.004***	0.003***		0.0001***	0.0001***	-12.572***
		(0.0002)	(0.0002)		(0.00000)	(0.00001)	(0.628)
Constant	4.970***	5.276***	5.509***	0.610***	0.623***	0.631***	-14,433.4***
	(0.211)	(0.096)	(0.110)	(0.008)	(0.003)	(0.004)	(396.195)
Observations	140	140	140	140	140	140	140
R^2	0.384	0.826	0.843	0.385	0.865	0.878	0.843
Adjusted R^2	0.380	0.825	0.841	0.381	0.864	0.876	0.841
Residual Std. Error	1.239 (df = 138)	0.658 (df = 138)	0.628 (df = 137)	0.045 (df = 138)	0.021 (df = 138)	0.020 (df = 137)	2,259.099 (df = 137)
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01						

Resultatene i Tabell 5-12 gir følgende ligninger for vannføring, vannstand og volum, vist i Tabell 5-13.

Tabell 5-13. Regresjonsligninger for Q, Vannstand og Volum

Dependable variable	Regresjons-nummer	R^2	Ligning
Q i Kalltveit	(1)	0.384	$Q = 4.870 + 0.188 * Temp$
	(2)	0.826	$Q = 5.276 + 0.004 * Frostdøgntimer$
	(3)	0.843	$Q = 5.509 + 0.048 * Temp + 0.003 * Frostdøgntimer$
Vannstand i Kalltveit	(4)	0.385	$V.S. = 0.610 + 0.007 * Temp$
	(5)	0.865	$V.S. = 0.623 + 0.0001 * Frostdøgntimer$
	(6)	0.878	$V.S. = 0.631 + 0.002 * Temp + 0.0001 * Frostdøgntimer$
Volum Q som går under Q_{min} tillatt	(7)	0.843	$V = -14433.43 - 171.1 * Temp - 12.57 * Frostdøgntimer$

Det som viste seg når ligningene skulle prøves på andre tilfeller, var at de ikke klarte å følge hendelsene. Dette betyr at regresjonsligningene kun er brukelig for hendelsen i januar 2016, noe som hjelper lite for å hindre fremtidige hendelser. For å finne en løsning for alle slike fremtidige hendelser er det gjort et forsøk på å finne en korrelasjon mellom alle tidligere hendelser.

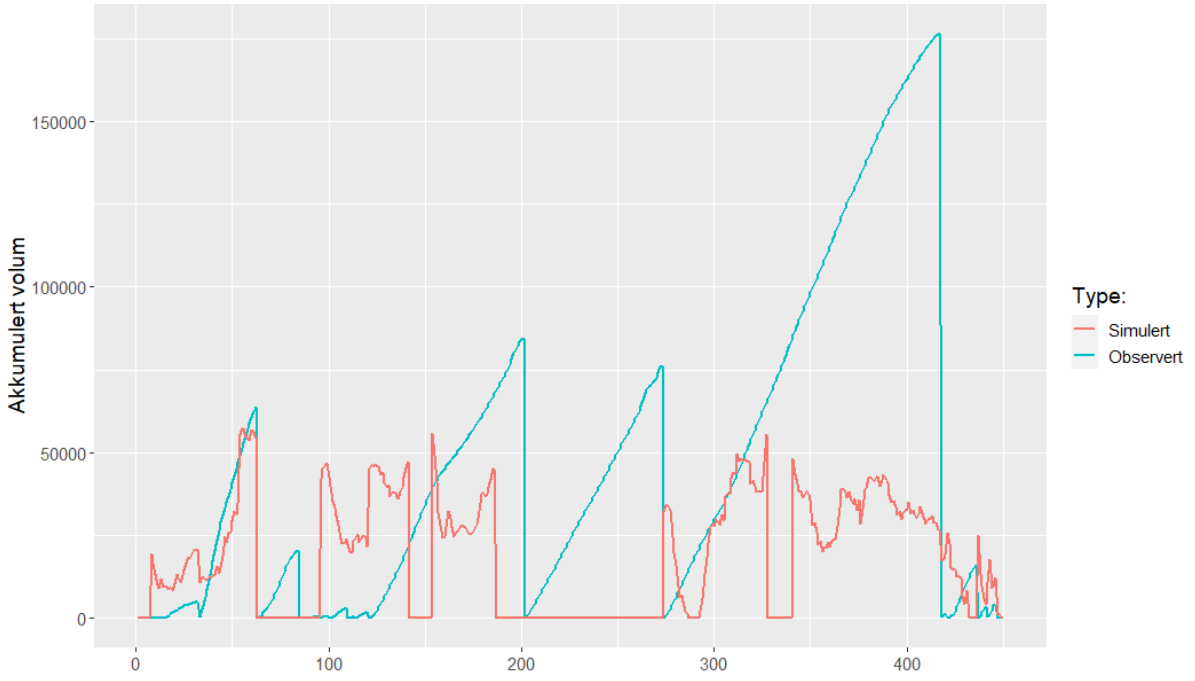
Sammenheng mellom alle observerte hendelser

Tabell 5-14 viser det endelige resultatet. I Figur 5-26 er simulert akkumulert volum satt opp mot observert akkumulert volum.

Tabell 5-14: Resultat fra regresjon, R^2=0.56

Regresjonsresultat

	Dependent variable:	
	Volum_akkumulert	**Usikkerhet**
Akkumulerte_frostdogn	6.346	14.375
Temperatur	-2332.452***	616.733
Temp1	3956.351***	625.021
Temp3	-307.033	464.527
Temp5	-1282.872**	521.968
V_tap	1.729***	0.472
V_tap1	-2.014***	0.607
V_tap3	4.367***	0.988
V_tap5	-1.344**	0.559
Constant	9812.044*	5644.095
Observations	240	
R^2	0.556	
Adjusted R^2	0.538	
Residual Std. Error	18703.030 (df = 230)	
F Statistic	31.941*** (df = 9; 230)	
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01	



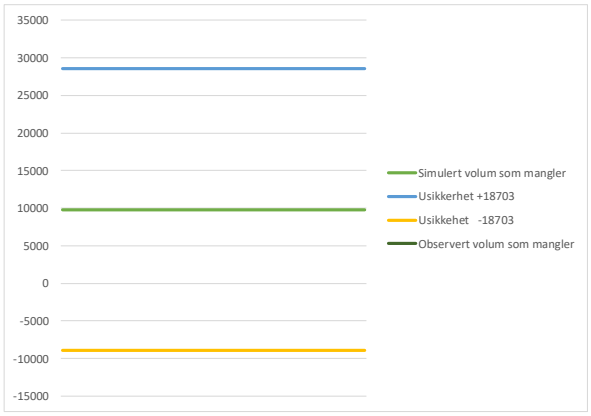
Figur 5-26: Observert akkumulert volum plottet mot simulert akkumulert volum fra regresjon med riktige data

I Figur 5-27 er et utsnitt av en tom modell. Man kan her fylle inn for så lang tidsperiode man ønsker, så vil det bli produsert hvor mye akkumulert volum som mangler. Om det ikke mangler volum vil modellen produsere tallet 0. Det er lagt inn felt for usikkerhet som er presentert sammen med det simulerte volumet som mangler i en graf. For videre testing

av modell er det lagt inn et ekstra felt for observert volum som mangler, som også er tatt med i grafen. På denne måten kan man sjekke om den observerte verdien er innenfor usikkerheten. Hvite felt må fylles ut for å få resultat.

Tid	Akkumulerte frostdøgntimer etter siste frostperiode	Temperatur	Temperatur 1 døgn før	Temperatur 3 døgn før	Temperatur 5 døgn før	Volum tapping	Volum tapping 1 døgn før	Volum tapping 3 døgn før	Volum tapping 5 døgn før	Simulert volum som mangler	Usikkerhet +18703	Usikkehet -18703	Observert volum som mangler
[timer]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	(Qx3600) [m3]	(Qx3600) [m3]	(Qx3600) [m3]	(Qx3600) [m3]	[m3]			For testing
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	
										9812	28515	-8891	

Tøm tabell



Figur 5-27: **Utsnitt fra modell i Excel som brukes til å estimere manglende akkumulert volum, time for time med tilhørende graf som viser usikkerheten.**

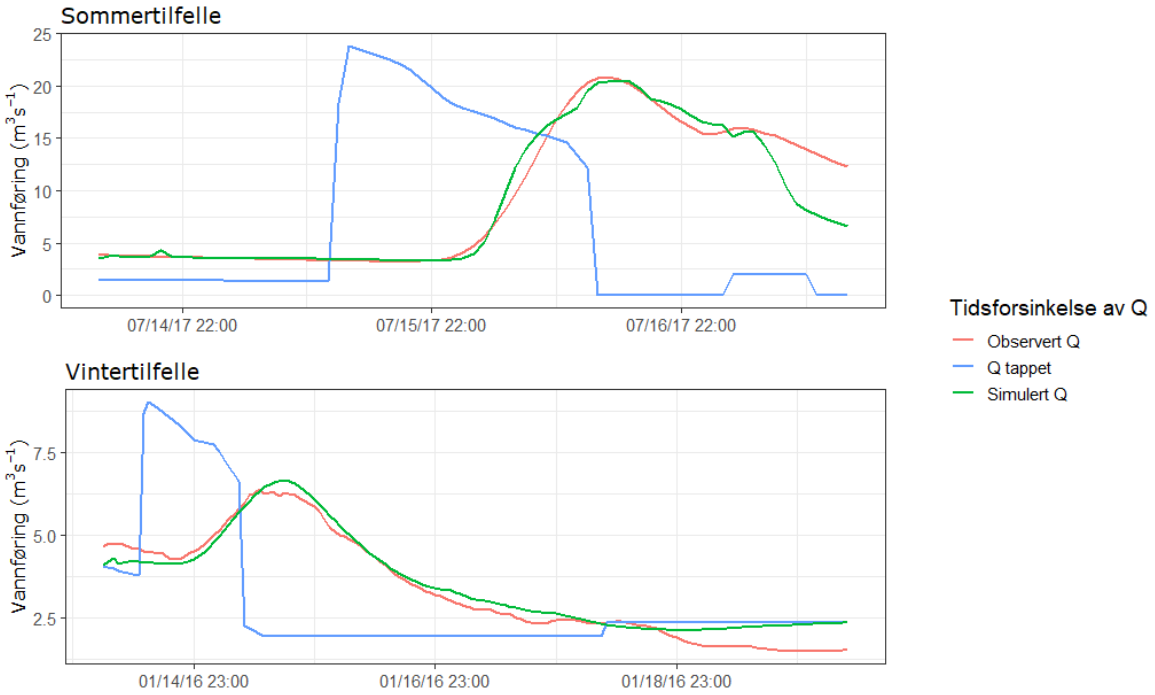
Resultatene som er presentert her er ikke gode nok til å kunne tas i bruk. Usikkerheten er alt for stor og sammenhengen mellom de ulike parameterne er ikke veldig god. Det er også brukt mange ulike parametere for å få sammenhengen så god som mulig, noe som igjen krever en del jobb for å ta i bruk modellen. Ettersom det er såpass få hendelser og noen av dem er veldig korte, så kan det diskuteres at det kreves mer data eller flere hendelser for å få bedre resultater. Å se på hva som skjer i dagene før hendelsen inntreffer burde være forklaringen på hvorfor vannføringen går under minstevannføring. Det viser seg ut ifra de dataene som er tilgjengelig her at den sammenhengen ikke er så stor som først antatt, men at den finnes. Sammenhengen er ikke god nok til å bruke som en sikker kilde på når og hvor mye vannføringen går under i Kalltveit, men kan gi en pekepinn på når det kan skje. Modellen trenger videre testing og kalibrering for å kunne fungere som tenkt.

Som man ser i forrige avsnitt så er det ganske enkelt å finne sammenheng mellom ulike parametere om man kun ser på enkelt hendelser, men disse sammenhengene er ikke mulig å bruke på noen av de andre hendelsene. Korrelasjonen når man bruker alle hendelsene er på langt nær like god og passer dårlig med de fleste tilfeller. Dette tyder på at det er mange ting som spiller inn når det dannes terskler av is. En ting som ikke er brukt i denne sammenhengen er vanntemperatur, men dette har også stor innvirkning på om det dannes is eller sarr, da vann har større varmekapasitet enn luft. Ellers vil skydekke og vind ha innvirkning på innfrysing som heller ikke er diskutert i denne oppgaven.

Det regresjonene viser er at jo flere faktorer som blir sett på, jo større sammenheng blir det, og det vil være nyttig å se på forholdene i vassdraget noen døgn i forveien. Dette er mye på grunn av tidsforsinkelsen fra sjøene.

Tidsforsinkelse av tappet vannføring gjennom vassdraget

Vannføringen som blir tappet fra utslippspunkt ved Breiavatn bruker mellom 25 og 30 timer på å nå Kalltveit, som vist i Figur 5-28. Ved sommertilfellet i juli 2017 bruker tappet vannføring 25 timer fra utslippspunkt, mens det ved vintertilfellet i midten av januar 2016 bruker 27 timer fra utslippspunkt til Kalltveit.



Figur 5-28. Tiden Q tappet bruker fra utslippspunkt til Kalltveit, sommertilfelle øverst og vintertilfelle nederst

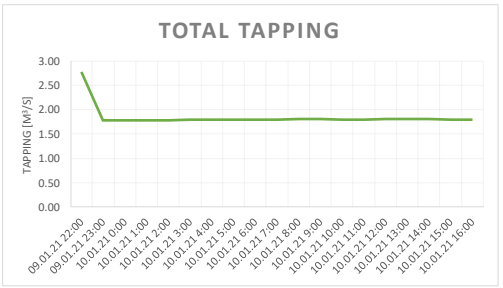
Dette kan gi en god indikasjon på hvor mye tidligere det må suppleres med mer vannføring ved mistanke om fare for at minstevannføringskravet ikke skal bli nådd.

Om sammenhengen hadde vært bedre og man kunne brukt resultatet til å faktisk anslå hvor mye volum som mangler i Kalltveit kunne man ved hjelp av tiden vannet bruker anslå hvor mye ekstra som må tappes ved Breiavatn. Volumet som mangler er bare et produkt av vannføringen og tiden. En enkel modell kunne derfor blitt satt opp som vist i Figur 5-29. Her setter man inn volumet som mangler for hver time og planlagt tapping og får ut en hydrograf som sier hvor mye som må tappes hver time. Det er også mulig å endre på hvor mange timer før man skal tappe ut ifra hvor lang tid man finner ut at vannet bruker. I

dette eksempelet er det brukt 27 timer da det var det modellen produserte. Eksempelet viser et utdrag fra et overløp med observerte verdier på volum som mangler og et forslag på hvordan det burde vært tappet for å unngå at det hadde gått under minstevannførings-kravet i Kalltveit.

Tid	Volum som mangler [m^3]	Tid for tapping	Akkumulert vannføring [m^3/s]	Ekstra tapping [m^3/s]	Total tapping [m^3/s]
11.01.2021 01:00	4593	09.01.21 22:00	1.28	1.28	**2.78**
11.01.2021 02:00	5614	09.01.21 23:00	1.56	0.28	**1.78**
11.01.2021 03:00	6652	10.01.21 0:00	1.85	0.29	**1.79**
11.01.2021 04:00	7690	10.01.21 1:00	2.14	0.29	**1.79**
11.01.2021 05:00	8728	10.01.21 2:00	2.42	0.29	**1.79**
11.01.2021 06:00	9783	10.01.21 3:00	2.72	0.29	**1.79**
11.01.2021 07:00	10839	10.01.21 4:00	3.01	0.29	**1.79**
11.01.2021 08:00	11894	10.01.21 5:00	3.30	0.29	**1.79**
11.01.2021 09:00	12950	10.01.21 6:00	3.60	0.29	**1.79**
11.01.2021 10:00	14005	10.01.21 7:00	3.89	0.29	**1.79**
11.01.2021 11:00	15112	10.01.21 8:00	4.20	0.31	**1.81**
11.01.2021 12:00	16237	10.01.21 9:00	4.51	0.31	**1.81**
11.01.2021 13:00	17310	10.01.21 10:00	4.81	0.30	**1.80**
11.01.2021 14:00	18382	10.01.21 11:00	5.11	0.30	**1.80**
11.01.2021 15:00	19507	10.01.21 12:00	5.42	0.31	**1.81**
11.01.2021 16:00	20632	10.01.21 13:00	5.73	0.31	**1.81**
11.01.2021 17:00	21739	10.01.21 14:00	6.04	0.31	**1.81**
11.01.2021 18:00	22795	10.01.21 15:00	6.33	0.29	**1.79**
11.01.2021 19:00	23850	10.01.21 16:00	6.63	0.29	**1.79**

Planlagt tapping [m^3/s]	Antall timer før
1.5	27



Figur 5-29: Eksempel på hvordan det er mulig å sette opp en modell som gir ut hydrograf for tapping. Utsnitt fra Excel.

Dette er altså en mulighet om man finner en sammenheng som er bedre enn R^2=0.56 og som faktisk gir resultater som stemmer med observerte verdier. Kanskje man måtte delt opp og sett på periode for periode, men til det trengs det mer data.

Et slikt resultat ville vært gunstig, men ettersom regresjonen ikke gir tilfredsstillende resultater er dette bare et forslag med eksempelverdier til hvordan det kunne vært gjort.

Sammenhengen mellom is, temperatur, vanntemperatur, vind o.l.

Det som vises fra alle regresjonene som er gjort, er at for å få en sammenheng, må det ses på flere variabler og faktorer. Det er ikke nok å se at lufttemperaturen blir kald, og derfor vil vannføringen bli påvirket på en viss måte. Hvilken temperatur det er på vannet har også noe å si for isdannelsen. Vannet må være underkjølt for at det skal bli dannet is. Har vannet stor hastighet, vil dette også hindre isdannelse.

Det er mange ting som må skje på samme tid for at hvert tilfelle skal utspille seg. Hvordan isen blir dannet har også noe å si. Er det stålis eller sarr/bunnis som dannes, og hvordan er strømningssituasjonen ved nedkjølingen av vannet? Dette har mye å si for hvilken type is som dannes, og dette påvirker også hvordan vannet som ikke er frossent oppfører seg.

5.3 Felles

Golsjuvet og Årdalsvassdraget har mye til felles, men også ulikheter. Begge vassdragene har vinterproblematikk som er vanskelig å forutse grunnet isforholdene i elva. De er begge bratte og lange vassdrag med utfordrende terreng. Modellene hadde som formål å finne ut hvor lang tid en vannføring bruker fra utløp til et bestemt punkt lenger nede i elva ved vinterforhold.

Ulikhetene kommer i form av tilgang til data og målinger og hendelsene som kan oppstå. I Golsjuvet er det utfall av kraftverk på vinterstid og følgene av dette som må kartlegges, mens det i Årdalsvassdraget er hvor mye som må tappes fra kraftverket og hvilken faktor resttilsig og isoppstuving har å si for dette.

5.3.1 Grønn og rød laser

Begge modellene har terreng som er bygget opp av laserdata. Golsjuvet har rød laserdata som ligger tilgjengelig på nettet, mens Årdalsvassdraget har grønn laserdata som Lyse AS har bestilt som et oppdrag. Det som er positivt med rød laser er at det ligger tilgjengelig for nedlastning, og er av god kvalitet. Problemet er at den røde laseren ikke vil klare å trenge gjennom vannspeil, og at man derfor må gå inn manuelt og endre dette i store deler av modellen. Om skanningen er gjort når det er mye vann i elva kan dette bli en omfattende prosess. Det kan være nokså tidkrevende, og en mulig kilde til feil i modellen.

Grønn laser skal kunne trenge gjennom vannspeil, men ved dype vannspeil får også denne problemer med å gjenskape terrenget under. Det kreves noen justeringer av dataene, da grønn laser måler av vannspeil i tillegg til terrenget under. For å få ønsket terrengmodell må det derfor gjøres modifikasjoner i for eksempel et GIS-program. Ved grønn laser kreves det en bestilling for å få det. Det vil altså si at en grønn laserskanning ikke er tilgjengelig på samme måten som en rød.

Det er altså både fordeler og ulemper ved begge typer laserskanninger, og i mange tilfeller vil det holde å bruke rød laser som ligger tilgjengelig på nett. Om man har veldig utfordrende terreng, en elv hvor det er høy vannføring eller oppdrag hvor det kreves stor nøyaktighet vil det være fordelaktig å bruke grønn laser.

5.3.2 Utfordrende terreng

Det har i begge elver vært utfordrende terreng å jobbe med. Lav vannføring gjør det vanskelig å simulere tørrlagte elveløp, og høy vannføring gjør det vanskelig å simulere bratt terreng. Det har vært vanskelig å få bearbeidet geometrien for at man skal kunne kjøre alle typer vannføringer gjennom modellen. Flere ulike teknikker har blitt brukt for å få modellen til å kjøre. Utfordringene knyttet til terrenget har vært til stede i stor grad i begge elver, men har opptrådt på litt ulike måter.

I Gol er det største problemet at minstevannføringen på vinterstid er på kun 0.025 m^3/s, som gjør at elveløpet er bortimot tørt. HEC-RAS har hatt store problemer med å håndtere dette og løsningen ble å bruke 0.2 m^3/s som basisvannføring for å få modellen til å gå. Dette kombinert med svært bratte partier har skapt en del problemer med å få lavt nok manningstall, for å kunne simulere et realistisk sommertilfelle.

I Årdal har de største problemene vært knyttet til flere sjøer, fosser og ellers bratte stryk nedover elva. Utfordringene her er løst på like og ulike måter som i Gol. Arbeid med manningstall og utgraving av sjøer og vannspeil er blitt gjort på begge, samtidig som modellen i Årdal er blitt delt opp i to biter for å unngå fosser og overløpsterskel er lagt inn for å unngå det bratteste partiet.

I Gol ble det brukt metoder for å rette ut bratt terreng og det ble justert med høyere manningstall for å få modellen til å konvergere, mens i Årdal ble det brukt en terskelfunksjon i HEC-RAS. Det ble gjort på denne måten da det antas at isen opptrer forskjellig i de to vassdragene. I Golsjuvet vil vannet som kommer nedover elveløpet renne på toppen av snø og is da det er så lite vann i elva at den vil være mer eller mindre tilfrosset, noe som gjør at ruheten i elva vil endres i forhold til et sommertilfelle. I Årdalsvassdraget ser man at det vil kunne dannes terskler av is som demmer opp vannet på gitte steder og det er derfor naturlig å prøve å gjenskape slike terskler istedenfor å endre på manningstallet.

Å dele opp modellen i Gol kunne også vært fordelaktig for å prøve å eliminere de bratteste partiene. Dette hadde nok gitt en mer stabil modell raskere og man kunne kanskje sluppet

mye av arbeidet med feilsøking. Det hadde samtidig krevd mer simulering da man måtte simulert flere modeller. Ved å dele opp i flere modeller risikerer man også å miste data mellom dem. Det gjøres antakelser at vannføringen i enden av den ene modellen er den samme som input i den neste modellen.

5.3.3 Tilgang til data

For de to vassdragene var det en betydelig forskjell i mengde og type data som var tilgjengelig. Golsjuvet har kun én observert hendelse med svake tilhørende data. For Årdalsvassdraget er hver time siden 2015 dokumentert med mange ulike parameter. Det er allikevel ikke så mange observerte hendelser i Årdalsvassdraget.

Dette har gitt to forskjellige utgangspunkt for løsningene av modellene. Der det er lite å kalibrere og validere opp mot i Golsjuvet, finnes det mer detaljerte data for Årdalsvassdraget. Dataseriene i Årdalsvassdraget går kun tilbake til januar 2015 og det er litt manglene data fra 2015 og 2021. Dette gjør at det ikke er veldig mange hendelser av at minstevannføringen i Kalltveit ikke blir overholdt. Noen av hendelsene er også veldig korte og er vanskelige å bruke til validering. Når noen av hendelsene er så korte fører dette til at det er vanskelig å finne sammenheng mellom dem. Noe av problemet i Årdal var at det var mulig å få en god R^2-verdi for én enkelt hendelse, men når funksjonen skal overføres til en annen hendelse klarer den ikke å gjengi den. Det er altså en utfordring for begge vassdragene at det er snevert med data, og det behøves mer for å kunne validere og kalibrere modellene best mulig.

5.3.4 Tidsforsinkelse av vannføring

Det er ikke nødvendigvis kun én terskel som demmer opp vannet i Årdalsvassdraget men flere, selv om det er forsøkt å gjenskape tidsforsinkelsen med kun én terskel. Det kan derfor tenkes at bruk av terskel også kan brukes for å gjenskape tidsforsinkelsen snø og is lager i Golsjuvet. Dette skal kunne lage en tydelig forsinkelse. Dersom det hadde vært mer data å jobbe med kunne det også her vært aktuelt med en regresjon for å finne en funksjon for høyde på terskel som en funksjon av kulde og isdannelse. Det viste seg likevel at det å justere Manningstallet i modellen fungerte godt som en forsinkelse av vannet ved dette tilfellet. Dette har nok mye med hvordan isdannelsen i Golsjuvet er i forhold til Årdalsvassdraget.

For Årdalsvassdraget fungerte ikke manningstall på samme måten for tidsforsinkelsen av vannføringen. Man ser fra resultat og observasjoner at selve toppen på vannføringen bruker like lang tid på sommeren som på vinteren. Det vil si at for dette vassdraget er det ikke snakk om å forskyve en topp, men heller å holde igjen en mengde vann lenger oppstrøms i vassdraget. Om resultatene fra regresjonen i Årdalsvassdraget hadde vært mer vellykket ville det vært interessant å kunne bruke dette til å estimere hvor høy en terskel i HEC-RAS måtte vært for å gjenskape hendelsen hvor det går under i Kalltveit. Regresjonen er en sentral del i arbeidet med å finne en sammenheng for Årdalsvassdraget, og det er mulig det finnes faktorer som ikke er sett på som spiller en sentral rolle i å finne denne sammenhengen.

5.3.5 Feilkilder

I denne oppgaven er det mange feilkilder. Mye av arbeidet er gjort ut ifra ulike antagelser. Det har vært varierende hvor mye og hvor gode dataene har vært og det kreves bedre data for å kunne validere arbeidet som er gjort.

Det er gjort flere antagelser for å bygge opp modellene i HEC-RAS og spesielt når det kommer til geometri. Utgraving av kulper og sjøer er gjort etter skjønn og vil derfor ikke gjengi virkeligheten på en fullstendig måte. Korreksjon av bratthet kan også være med å påvirke det endelige resultatet. Flere antagelser er også gjort med tanke på valg av Mannings n i modellen. Det er regnet ut empiriske verdier for å ha et sted å starte, men det er så valgt etter slik det passer best. Verdiene for resultatene er sjekket opp mot teori, men det er utfordrende å gjengi utformingen til en elv kun basert på bilder. Andre feilkilder i modellene er knyttet til implementering av terskel hvor det antas at samme vannføring som går inn på toppen kommer ut i bunnen, noe som ikke nødvendigvis er tilfelle. Verdiene som er brukt for å sette inn terskelen er også basert på antagelser.

Ettersom noen av resultatene som kommer ut av simuleringene blir brukt til videre utvikling av modeller, er det en viss usikkerhet knyttet til dette. Det finnes ikke alltid verdier å sjekke opp mot for å få testet modellene og dette er den største feilkilden i oppgaven, mangel på data for å validere de utviklede modellene.

6 Konklusjon

For å finne løsninger på problemstillinger knyttet til effekten av is i vassdraget, er det viktig å få en oversikt over hvilke problemer isen fører med seg. Dette har mye å si for hvilke data man trenger, og hvilken løsning man skal gå for. I tillegg må det ses på hvordan geometrien til elva er. Er det bratt, slakt, tørt, sjøer, fosser, mye eller lite vannføring? Dette vil påvirke hvordan is dannes, og hvordan situasjonen bør håndteres.

Det finnes varierende mengde data for de to vassdragene i dette arbeidet, som gjorde at utførelsen ble ulik hverandre. For Golsjuvet var det manglende data til å få validert modellen tilstrekkelig. Det er kun data fra én observert hendelse som har gjort kalibreringsarbeidet krevende. For Årdalsvassdraget var det store mengder data, men få hendelser hvor vannføringen gikk under minstevannføringskravet. Dette gjorde det utfordrende å knytte parameterne opp mot hverandre for å få en sammenheng.

For å sette opp de hydrauliske modellene i HEC-RAS ble data fra laserskanninger brukt. Modellene utførte deretter simuleringer både med observerte data og testdata for å undersøke ulike scenarioer. Grunnet tynt datagrunnlag ble det gjort antakelser for å få modellene mest mulig funksjonelle og reelle. Simuleringene ble utgangspunkt for å vurdere transportforsinkelser av vannføring som et resultat av is i vassdragene.

Gjennom analyse av data ble det gjort funn av ulike elementer som påvirker transporttiden til vann om vinteren. De tydeligste faktorene er sterkt knyttet til temperatur, deriblant frostdøgntimer og dannelse av is i elveløp. I tillegg vil eksisterende vannføring i vassdraget ha stor innvirkning på transporttiden. For å finne sammenheng mellom disse faktorene er det brukt regresjonsanalyse for begge vassdragene.

For Golsjuvet ble resultater fra simuleringene brukt for å finne sammenheng mellom vannføring, ruhet og tid. Det er laget en modell som regner ut istykkelse basert på temperatur og snødybde. For å knytte gjennomsnittstemperatur sammen med ruhet er istykkelse brukt som et mellomledd. Deretter ble det utarbeidet en kalkulator som estimerer hvor lang tid en implementert vannføring bruker fra Eikredammen til Golsjuvet ved å sette inn gjennomsnittstemperatur gjennom vintersesongen.

For å lage modellen for Årdalsvassdraget ble det brukt regresjonsanalyse hvor den avhengige variabelen var akkumulert volum av vannføring som har gått under minstevannføringskravet. Modellen endte i to deler, hvor første del bruker timesbaserte temperaturdata og tappet volum hver time fra opptil fem døgn før det aktuelle tidspunktet. Resultatet kommer i form av et eventuelt volum som mangler ved målepunktet i Kalltveit. Dette resultatet brukes videre i del to av modellen, hvor man får ut en hydrograf som sier hvor mye som må tappes og på hvilket tidspunkt det må tappes.

Disse to modellene gir resultater for forskjellige situasjoner hvor is i vassdraget er fellesnevneren. De har begge store usikkerheter, og krever videre arbeid.

6.1 Videre arbeid

6.1.1 Golsjuvet

Resultatene fra arbeidet som er gjort i Golsjuvet er for det meste basert på antagelser. Før metodene kan tas i bruk er det viktig at det utføres datainnhenting og videre kalibrering av modellen. For at modellen skal bli best mulig trengs det data fra mange hendelser. Det bør være et utvalg av hendelser fra vinterstid med ulike vannføringer. Det må også foretas én, gjerne flere, målinger på sommertid for å kunne kalibrere et nullpunkt. For å få de dataene som trengs kan det enkelt plasseres ut trykkceller nedover elva som fanger opp vannstandsstigningen. Dette er en billig måte å hente ut data, men man må manuelt lese av data fra trykkcellene. For å forbedre kalibreringen av modellen mer kan det logges istykkelse gjennom vinteren og sammenligne med istykkelsen som ismodellen produserer. Ved å starte å hente inn temperaturdata over en lengre periode fra Gol eller Hemsedal vil man slippe å justere temperaturen fra et annet sted. Dette vil gi mer nøyaktige prediksjoner.

Når man har samlet inn data for flere hendelser må kan man først sjekke disse mot simuleringene som er utført i denne oppgaven. Om observasjonene er ulike fra simuleringene må det utføres nye simuleringer for å anslå hvilke ruheter man må sette inn i modellen for å klare å gjenskape de observerte hendelsene. Man vil da få flere punkter med observerte verdier og det vil da være mulig å produsere en sammenheng kun basert på observerte hendelser. Om sammenhengen er like god som ved simulerte hendelser kan man bruke de nye verdiene til å sette opp kalkulatoren. Om det ikke er en sammenheng, og at de observerte hendelsen ikke samsvarer med simulerte hendelser bør hele kalkulatoren vurderes ubrukelig.

Det er da mulig å prøve å bruke andre metoder for å gjenskape is i HEC-RAS, for å få resultater som samsvarer bedre med observerte hendelser. Det kan eksperimenteres mer med *Ice cover* eller implementere ulike terskler for å demme opp vann og skape forsinkelse som er gjort i modellen for Årdalsvassdraget.

Det er altså mye jobb som gjenstår for at dette er en modell som kan tas i bruk, men med data fra flere observerte hendelser kan den prøves å kalibreres og kanskje settes ut i live.

Om det tas i bruk en modell som dette burde det også opprettes en form for varslingssystem som er knyttet opp mot tidsestimeringen. Her burde det være en grense på hvor stor vannføring som er farlig i Golsjuvet og når og hvordan det bør varsles.

Det bør også gjøres arbeid på hvilken vannføring som gjør at isen bryter og når det er isgang i elva. Dette vil påvirke tiden vannet bruker fra Eikredammen til Golsjuvet betydelig.

6.1.2 Årdalsvassdraget

Selv om det er blitt laget en modell som regner ut nødvendig tapping av volum for at minstevannføringskravet skal bli holdt, er den så usikker at det vil kreves mer arbeid. Det ville også være interessant å få brukt denne modellen opp mot den hydrauliske modellen i HEC-RAS. For at dette skal kunne gjennomføres må det gjøres mer arbeid med den hydrauliske modellen. Det må feilsøkes for å finne ut hvorfor terskelen ikke fungerer slik som tenkt, og om det er mulig å få denne til å demme opp vann uten å slippe gjennom vanlig vannføring.

Ved å få terskelen i den hydrauliske modellen skikkelig kunne det blitt gjort flere forsøk, hvor resultatene kunne blitt brukt til å forbedre modellen for tappet volum. En måte disse

forsøkene kunne blitt gjort på er å se på høyden på terskelen som måtte til for å demme opp for at simulert volum som går under minstevannføringskravet blir likt som det observerte volumet. Deretter måtte det blitt testet hvor mye mer vannføring som hadde vært nødvendig å tappe for at vannføringen skulle gått over kravet igjen. I tillegg måtte man forsøkt å finne en sammenheng mellom for eksempel frostdøgn eller kulde og høyden på terskelen. Dersom det kom prognoser om frost og kulde kunne denne informasjonen blitt brukt til å finne høyde på terskel, og på denne måten kunne det blitt estimert hvor mye mer tappet volum som hadde vært nødvendig å slippe for at vannføringen ikke skulle gått under kravet.

Dersom terskelen hadde fungert, kunne også luke i terskel blitt prøvd ut. Her kunne det blitt eksperimentert med lukeåpning, og blitt laget en sammenheng mellom åpning og frostdøgn eller lignende. Denne hadde på samme måte blitt brukt til å estimere nødvendig tappet volum for at kravet skal bli overholdt.

En annen mulighet for å finne en løsning på problemstillingen i Årdalsvassdraget er å sette opp en reell ismodell. Her kan CRISSP (Comprehensive river ice simulation system project) være en mulig løsning. Det finnes både CRISSP1D og -2D. Begge disse vil være relevante for videre arbeid, da det kan simulere isprosesser, temperaturvariasjoner, sarr og bunnis, i tillegg til andre nyttige funksjoner (CEATI, 2005).

Referanser

Alfredsen, K. (2020, 03.11). Lecture Notes Hydrological Modeling.

Alfredsen, K. (2021). Personlig meddelelse. 26.04.21

Allen, G. H., David, C. H., Andreadis, K. M., Hossain, F. & Famiglietti, J. S. (2018). Global Estimates of River Flow Wave Travel Times and Implications for Low-Latency Satellite Data. *Geophysical Research Letters, 45*(15), 7551-7560. https://doi.org/10.1029/2018gl077914

Andy. (2019). Logarithmic ransformation in Linear Regression Models: Why & When. (31.05.21 utg.). DEV Community: DEV. Hentet fra https://dev.to/rokaandy/logarithmic-transformation-in-linear-regression-models-why-when-3a7c

Arcement, G. J. J. & Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains* (Water Supply Paper).

Ashton, G. D. (1986). *River and Lake Ice Engineering* Water Resources Publication.

Asvall, R. P. (1977). *Vanntemperatur og isforhold i våre vassdrag*. Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Hentet fra https://publikasjoner.nve.no/rapport/1977/rapport1977_04.pdf

Asvall, R. P. (2010). *Hvordan is i vassdrag dannes - og hvordan vassdragsreguleringer påvirker isen i norske vassdrag* (20). NVEs hustrykkeri: Norges vassdrags- og energidirektorat. Hentet fra https://publikasjoner.nve.no/rapport/2010/rapport2010_20.pdf

Bakken, T. H. (2020). *hydraulisk modell*. I *Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 16.04.21 fra https://snl.no/hydraulisk_modell

Benoit, K. (2011). Linear Regression Models with Logarithmic Transformations. I: London School of Economics. Hentet fra https://kenbenoit.net/assets/courses/ME104/logmodels2.pdf

Braut, G. S. & Dahlum, S. (2018). Regresjonsanalyse. I *Store norske leksikon*. Hentet 12.05.21 fra https://snl.no/regresjonsanalyse

Brooks, R. N. (2010). Quantifying Peak Freshwater Ice across the Northern Hemisphere using a Regionally Defined Degree-day Ice-growth Model.

CEATI. (2005). Comprehensive River Ice Simulation System Project (CRISSP). Hentet 25.05.21 2021 fra https://www.ceati.com/projects/publications/publication-details/?pid=0401

Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.

esri. (2021). What is ArcMap? Hentet fra https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/main/map/what-is-arcmap-.htm

Ettema, R., Arndt, R., Roberts, P. & Wahl, T. (2000). Hydraulic modeling: Concepts and practice. *Manuals and Reports on Engineering Practice, American Society of Civil Engineers*, 1-390.

Fergus, T., Hoseth, K. A. & Sæterbø, E. (2010). *Vassdragshåndboka* (2. utg.). Fagbokforlaget: Norges vassdrags- og energidirektorat.

Flatjord, S. (1963). Utvikling av isdekket på norske vassdrag, samt litt om råkdannelse. I(s. 142-158). Norsk geografisk tidsskrift: Norsk Geografisk Selskap. Hentet fra https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00291956308551812

Ghareh Aghaji Zare, S., Moore, S. A., Rennie, C. D., Seidou, O., Ahmari, H. & Malenchak, J. (2016). Estimation of composite hydraulic resistance in ice-covered alluvial streams. *Water Resources Research, 52*(2), 1306-1327. https://doi.org/10.1002/2015wr018096

Goodell, C. (2013). Stabilizing a Dynamic Unsteady HEC-RAS Model. I(24.05.21 utg.): Kleinschmidt group. Hentet fra https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/stabilizing-a-dynamic-unsteady-hec-ras-model/

Heggen, S. (2013). *Ice breakup in small Norwegian streams* Norwegian University of Science and Technology.

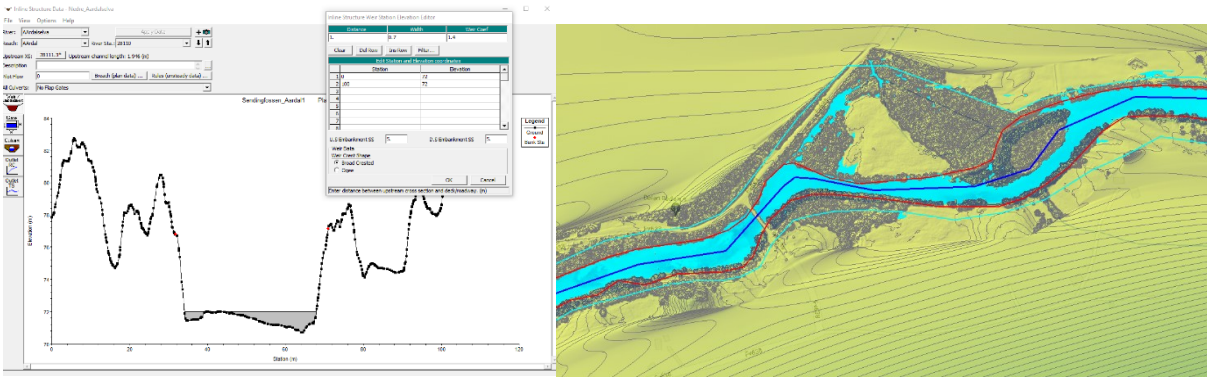
Helleraker, J. H. & Rosvold, K. A. (2021). Minstevannføring. I *Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 13.05.21 fra https://snl.no/minstevannf%C3%B8ring

Holtet, J. A. (2018). Lidar. I *Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 22.01.2021 fra https://snl.no/lidar

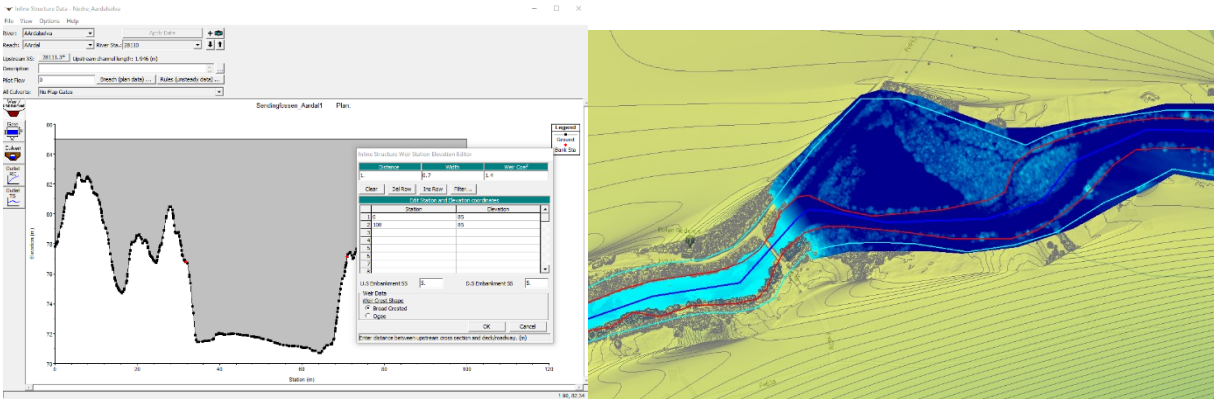
James, G., Witten, D., Hastie, T. & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning* Springer.
Jarrett, R. D. (1985). Determination of roughness coefficients for streams in colorado. I(s. 60). Lakewood, Colorado: United States Department of the Interior. Hentet fra https://pubs.usgs.gov/wri/1985/4004/report.pdf
Jenssen, L., Tesaker, E., Lund, S. & Huber, D. (2006). Inntakshåndboken. Norges vassdrags- og energidirektorat.
Kirillin, G., Leppäranta, M., Terzhevik, A., Granin, N., Bernhardt, J., Engelhardt, C., … Zdorovennov, R. (2012). Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquatic Sciences, 74*(4), 659-682. https://doi.org/10.1007/s00027-012-0279-y
Kvambekk, S. (2021). *Isklatring – Golsjuvet*.
Li, S. S. (2012). Estimates of the Manning's coefficient for ice-covered rivers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, 165*(9), 495-505. https://doi.org/10.1680/wama.11.00017
Lundberg, A. a. F. J. (2009). Sea ice growth, modeling of precipitation phase. *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC, 1*, 79-88.
Meyer, A., Fleischmann, A. S., Collischonn, W., Paiva, R. & Jardim, P. (2018). Empirical assessment of flood wave celerity–discharge relationships at local and reach scales. *Hydrological Sciences Journal, 63*(15-16), 2035-2047. https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1557336
Meyer, Z. (2010). An analysis of the mechanism of flow in ice-covered rivers. *Acta Geophysica, 58*(2), 337-355. https://doi.org/10.2478/s11600-009-0064-z
Michel, B. (1971). Winter regime of rivers and lakes. Cold Regions Research and Engineering Laboratory (U.S.) Engineer Research and Development Center (U.S.).
Mishra, R., Militky, J. & Venkataraman, M. (2019). 7 - Nanoporous materials. *The Textile Institute Book Series*, 311-353. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102609-0.00007-9
Norges Geotekniske Institutt. (2021). Geofysikk, fjernmåling og GIS, LiDAR. Hentet fra https://www.ngi.no/Tjenester/Fagekspertise/Geofysikk-fjernmaaling-og-GIS/LiDAR
Norges vassdrag- og energidirektorat. (2019). NEVINA - Beregninger av lavvannsindekser og flomverdier. I *Brukerveiledning* (s. 25). NVE: NVE. Hentet fra https://nevina.nve.no/help/Brukerveiledning_NEVINA.pdf
Norges vassdrags- og energidirektorat. (2005). Retningslinjer for flomløp. I *til §§ 4-6 og 4-13 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg* (2 utg., s. 16). nve.no: Norges vassdrags- og energidirektorat. Hentet fra https://publikasjoner.nve.no/retningslinjer/2005/retningslinjer2005_02.pdf
Norges vassdrags- og energidirektorat. (2009). *Retningslinjer for dambruddsbølgeberegninger til §2-4 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg*.
Norges vassdrags- og energidirektorat. (2020). Sikringshåndboka. I(02.03.2018 utg.). Hentet fra https://www.nve.no/sikringshandboka/
Norges vassdrags- og energidirektorat. (2021a). Karttjenester. Hentet 12.05.21 fra https://www.nve.no/karttjenester/
Norges vassdrags- og energidirektorat. (2021b). Varsom. Hentet fra https://www.varsom.no/isskolen/innledning/
Norgeskart.no. (u.å.-a). Norgeskart. (Områdebeskrivelse fra Gol og omegn). Hentet fra https://www.norgeskart.no/#!?project=norgeskart&layers=1002&zoom=9&lat=6752567.25&lon=162914.49
Norgeskart.no. (u.å.-b). Norgeskart. (Områdebeskrivelse fra Årdal og omegn). Hentet fra https://www.norgeskart.no/#!?project=norgeskart&layers=1002&zoom=9&lat=6590526.50&lon=7039.26
Prowse, T. D. (2001). River-Ice Ecology
R Core Team. (2021). R: A Language and Environment for Statistical Computing. I Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Hentet fra https://www.R-project.org/

rapidlasso. (2021). rapidlasso. Hentet 01.02.21 fra https://rapidlasso.com/
St. Olaf College. (2021). R vs. RStudio. Hentet 12.05.21 fra https://wp.stolaf.edu/it/r-vs-rstudio/
Sturm, M. (2002). Thermal conductivity and heat transfer through the snow on the ice of the Beaufort Sea. *Journal of Geophysical Research, 107*(C10). https://doi.org/10.1029/2000jc000409
Tapken, P. (2021). Bathymetric Lidar Sensors and UAVs. Hentet 22.05.2021 2021 fra https://geo-matching.com/content/bathymetric-lidar-sensors-and-uavs
US Army Corps of Engineers. (2020a). HEC-RAS Mapper User's Manual. (Vol. Version 6.0). Hentet fra https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_MapperUsersManual.pdf
US Army Corps of Engineers. (2020b). HEC-RAS River Analysis System. Hentet fra https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_UsersManual.pdf
US Army Corps of Engineers. (2020c). HEC-RAS River Analysis System. I *Hydraulic Referance Manual* (Vol. Version 6.0). Hentet fra https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_ReferenceManual.pdf
US Army Corps of Engineers. (2021). Ineffective Flow Areas. Hentet 16.05.2021 2021 fra https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rmum/latest/geometry-data/ineffective-flow-areas
Washantha Lal, A. M. & Shen, H. T. (1991). *Mathematical Model for River Ice Processes*.

Vedlegg 1 – Testing av terskel i HEC-RAS



Figur 1: Utsnitt fra HEC-RAS, terskel med høyde 72, rundt vanlig vannstand



Figur 2: Utsnitt fra HEC-RAS, terskel med høyde 85, ca. 13 meter over vanlig vannstand

Vedlegg 2 – Ulike regresjoner utført i Excel

Regresjonstabell mellom istykkelse og observerte parameter

Tabell 1: Gjennomsnittstemperatur og istykkelse

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.71622021
R Square	0.51297138
Adjusted R Square	0.4873383
Standard Error	5.5880221
Observations	21

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	624.8970729	624.9	20.012	0.00026039
Residual	19	593.2938298	31.226		
Total	20	1218.190903			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	3.10684705	2.990630894	1.0389	0.3119	-3.15261534	9.3663095	-3.1526153	9.36630945
Gj.snitt temp	-2.2381274	0.500309405	-4.4735	0.0003	-3.28528698	-1.190968	-3.285287	-1.19096774

Tabell 2: Frysedøgn og istykkelse

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.52844118
R Square	0.27925008
Adjusted R Square	0.24131587
Standard Error	6.79787505
Observations	21

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	340.1799044	340.18	7.3614	0.01379079
Residual	19	878.0109983	46.211		
Total	20	1218.190903			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	-21.065226	13.49327433	-1.5612	0.135	-49.3069736	7.1765218	-49.306974	7.17652185
FD	0.42101801	0.155174204	2.7132	0.0138	0.09623467	0.7458014	0.09623467	0.74580135

Tabell 3: Akkumulert snødybde og istykkelse

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.09462827
R Square	0.00895451
Adjusted R Square	-0.0432058
Standard Error	7.97127277
Observations	21

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	10.90830112	10.908	0.1717	0.68326953
Residual	19	1207.282602	63.541		
Total	20	1218.190903			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	17.062665	4.545296698	3.7539	0.0013	7.54924971	26.57608	7.54924971	26.5760804
Akkumulert sn?	-0.0443423	0.107020481	-0.4143	0.6833	-0.2683387	0.1796542	-0.2683387	0.17965419

Tabell 4: Ruhet og istykkelse

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	1
R Square	1
Adjusted R Square	65535
Standard Error	0
Observations	2

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	0.0098	0.0098	#NUM!	#NUM!
Residual	0	0	65535		
Total	1	0.0098			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	0.05	0	65535	#NUM!	0.05	0.05	0.05	0.05
Istykkelse	0.010753	0	65535	#NUM!	0.01075269	0.010753	0.01075269	0.01075269

Regresjonstabeller for forholdet mellom vannføring og tid ved ulike ruheter

Tabell 5: n=0.05

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.956
R Square	0.915
Adjusted R Square	0.898
Standard Error	0.290
Observations	7.000

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1.000	4.509	4.509	53.709	0.001
Residual	5.000	0.420	0.084		
Total	6.000	4.929			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	4.381	0.224	19.595	0.000	3.806	4.955	3.806	4.955
ln(VF)	-0.704	0.096	-7.329	0.001	-0.951	-0.457	-0.951	-0.457

Tabell 6: n=0.07

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.969004648
R Square	0.938970008
Adjusted R Square	0.92676401
Standard Error	0.405812895
Observations	7

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	12.66864297	12.668643	76.92693	0.000319481
Residual	5	0.823420527	0.1646841		
Total	6	13.49206349			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	6.299118634	0.313130707	20.116579	5.61E-06	5.494190526	7.104046743	5.494190526	7.104046743
ln(VF)	-1.179995091	0.134536769	-8.7708	0.000319	-1.525832866	-0.834157315	-1.525832866	-0.834157315

Tabell 7: n=0.10

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.817547416
R Square	0.668383777
Adjusted R Square	0.602060532
Standard Error	1.312764873
Observations	7

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	17.36736893	17.367369	10.07767	0.024689019
Residual	5	8.616758059	1.7233516		
Total	6	25.98412698			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	8.184389517	1.012947097	8.0797798	0.00047	5.58052611	10.78825292	5.58052611	10.78825292
ln(VF)	-1.381599499	0.435213241	-3.174535	0.024689	-2.50035075	-0.262848248	-2.50035075	-0.262848248

Tabell 8: n=0.16

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.824930535
R Square	0.680510388
Adjusted R Square	0.616612466
Standard Error	2.009791412
Observations	7

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	43.01797812	43.017978	10.64996	0.022360616
Residual	5	20.1963076	4.0392615		
Total	6	63.21428571			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	12.00737322	1.550782183	7.7427851	0.000574	8.020960705	15.99378573	8.020960705	15.99378573
ln(VF)	-2.174403554	0.666294362	-3.263428	0.022361	-3.887167738	-0.461639371	-3.887167738	-0.461639371

Tabell 9: n=0.19

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.989664567
R Square	0.979435956
Adjusted R Square	0.975323147
Standard Error	0.59161904
Observations	7

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	83.35310916	83.353109	238.1428	2.07428E-05
Residual	5	1.750065443	0.3500131		
Total	6	85.1031746			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	14.90354975	0.456501237	32.647337	5.07E-07	13.73007596	16.07702354	13.73007596	16.07702354
ln(VF)	-3.026746537	0.196135991	-15.43188	2.07E-05	-3.530930154	-2.522562921	-3.530930154	-2.522562921

Regresjonstabeller for forholdet mellom ruhet og tid ved ulike vannføringer

Tabell 10: 1m3/s

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.997852671
R Square	0.995709954
Adjusted R Square	0.994279938
Standard Error	0.367825165
Observations	5

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	94.20522506	94.205225	696.2931	0.00011941
Residual	3	0.405886056	0.1352954		
Total	4	94.61111111			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	0.355051936	0.389338481	0.9119364	0.429041	-0.883996873	1.594100745	-0.883996873	1.594100745
Ruhet	81.68083097	3.095452115	26.387367	0.000119	71.82972083	91.53194112	71.82972083	91.53194112

Tabell 11: 3m3/s

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.993227588
R Square	0.986501041
Adjusted R Square	0.982001388
Standard Error	0.398230795
Observations	5

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	34.76868115	34.768681	219.2394	0.000668355
Residual	3	0.475763299	0.1585878		
Total	4	35.24444444			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	1.809726157	0.421522472	4.2933088	0.023236	0.468253524	3.15119879	0.468253524	3.15119879
Ruhet	49.62228517	3.351332303	14.806734	0.000668	38.95685007	60.28772028	38.95685007	60.28772028

Tabell 1215: 5m3/s

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.997815466
R Square	0.995635704
Adjusted R Square	0.994180939
Standard Error	0.19268846
Observations	5

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	25.41083569	25.410836	684.3961	0.000122526
Residual	3	0.111386528	0.0371288		
Total	4	25.52222222			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	1.630547686	0.203958401	7.994511	0.004085	0.981461028	2.279634345	0.981461028	2.279634345
Ruhet	42.42209632	1.621579921	26.160965	0.000123	37.26150529	47.58268734	37.26150529	47.58268734

Tabell 13: 8m3/s

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.999132149
R Square	0.99826505
Adjusted R Square	0.997686734
Standard Error	0.101142358
Observations	5

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	17.65819956	17.6582	1726.157	3.06864E-05
Residual	3	0.03068933	0.0102298		
Total	4	17.68888889			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	1.335221907	0.10705796	12.471954	0.001111	0.994515698	1.675928117	0.994515698	1.675928117
Ruhet	35.36355052	0.851168856	41.547045	3.07E-05	32.65475134	38.0723497	32.65475134	38.0723497

Tabell 14:16m3/s

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.997334271
R Square	0.994675648
Adjusted R Square	0.992900863
Standard Error	0.138518549
Observations	5

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	10.75354895	10.753549	560.4488	0.000165152
Residual	3	0.057562166	0.0191874		
Total	4	10.81111111			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	1.120632672	0.146620206	7.6430985	0.004651	0.654021739	1.587243606	0.654021739	1.587243606
Ruhet	27.59678942	1.165710173	23.6738	0.000165	23.88697939	31.30659946	23.88697939	31.30659946

Tabell 15: 24 m3/s

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.997340657
R Square	0.994688385
Adjusted R Square	0.992917847
Standard Error	0.125451655
Observations	5

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	8.841674536	8.8416745	561.8	0.000164559
Residual	3	0.047214353	0.0157381		
Total	4	8.888888889			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	0.813975449	0.132789057	6.1298383	0.00873	0.391381405	1.236569492	0.391381405	1.236569492
Ruhet	25.02360718	1.055745032	23.702321	0.000165	21.6637553	28.38345905	21.6637553	28.38345905

Tabell 16: 32 m3/s

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.997993235
R Square	0.995990498
Adjusted R Square	0.994653997
Standard Error	0.097106928
Observations	5

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	1	7.027266289	7.0272663	745.2225	0.000107882
Residual	3	0.028289267	0.0094298		
Total	4	7.055555556			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	0.7901322	0.102786507	7.6871199	0.004574	0.46301966	1.11724474	0.46301966	1.11724474
Ruhet	22.30878187	0.817208488	27.298764	0.000108	19.70805974	24.909504	19.70805974	24.909504

Vedlegg 3 – Oversikt digitale vedlegg

- Estimering av tid Golsjuvet
- Estimering av manglende volum Årdalsvassdraget
- Istykkelse Golsjuvet
- Total tapping Årdalsvassdraget

Julie Nymark Eikeland og Heidi Olsen

Tidsforsinkelse av vannføring i elver om vinteren

NTNU
Norwegian University of
Science and Technology