

Anders Holm Astad

# Flomsonekartlegging av Bismo, Skjåk

En hydraulisk analyse gjort i HEC-RAS

Masteroppgave i Geografi

Veileder: Jan Ketil Rød

November 2020



Anders Holm Astad

# **Flomsonekartlegging av Bismo, Skjåk**

En hydraulisk analyse gjort i HEC-RAS

Masteroppgave i Geografi  
Veileder: Jan Ketil Rød  
November 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for samfunns- og utdanningsvitenskap  
Institutt for geografi



Kunnskap for en bedre verden



# Summary

---

From 13 to 16 October 2018, there was a flood event in Otta greater than any previous flood event that NVE is aware of. The Norwegian Natural Perils Pool registered compensation payments of NOK 64,287,000 due to damage from floods in Skjåk municipality in 2018.

Climate projections show a possible future for our society, and the need for adaptation to this future. Flood inundation maps and water velocity maps have thus been prepared for Bismo, Skjåk for 200-year flood in current climatic conditions, and for 200-year flood in the year 2100 with a 20% increase in flood value, as a representation of climatic conditions predicted in RCP 8.5.

The results show that a 200-year flood in today's climatic conditions will expose buildings and roads that lie along Otta, as well as in the western and south-eastern part of Bismo. Here, the flood will find new paths through Bismo and may cause significant damage to buildings and infrastructure. The flood inundation map shows that 609 km<sup>2</sup> of area will be flooded, and that 95 buildings and 6.5 km of road will be subjected to the forces of the water.

In the occurrence of a 200-year flood in the year 2100 with climatic conditions predicted in RCP 8.5, the results show that there are more flooding, more exposed buildings and infrastructure, and that they are exposed to deeper floods with higher water velocities that can lead to even greater damage. In such an event, the results show that the flood will cover areas of 720 km<sup>2</sup>, and that 126 buildings and 7.5 km of road will be exposed to flooding.

Only floods related to Otta have been mapped. Any streams flowing through Bismo are not considered, flood associated with these are not included.



# Sammendrag

---

Fra 13. til 16. oktober 2018 var det en flomhendelse i Ottavassdraget større enn tidligere flomhendelser som NVE har kjennskap til. Norsk Naturskadepool registrerte erstatningsutbetalinger på 64 287 000 NOK grunnet skader fra flom i Skjåk kommune i 2018.

Klimaframskrivninger viser en mulig fremtid for samfunnet vårt, og behovet for tilpasning til denne fremtiden. Det er dermed utarbeidet flomsonekart og vannhastighetskart for Bismo, Skjåk for 200-årsflom i dagens klimatiske forhold, og for 200-årsflom i år 2100 med 20% klimapåslag, som representasjon for klimatiske forhold predikert i RCP 8.5.

Resultatene viser at en 200-årsflom i dagens klimatiske forhold vil eksponere bygninger og veg som ligger langs Otta, samt i vestre og sør-østre del av Bismo. Her vil flomvannet ta seg inn på elvesletten og kan føre til store ødeleggelser på bebyggelse og infrastruktur. Flomsonekartet viser at områder på 609 km<sup>2</sup> vil bli oversvømt, og at 95 bygninger og 6,5 km veg vil være eksponert for vannets krefter.

Ved en 200-årsflom i år 2100 med 20% klimapåslag viser resultatene at det er mer oversvømmelser, mer eksponerte bygninger og infrastruktur, og at de er utsatt for dypere oversvømmelser med høyere vannhastighet som kan føre til enda større ødeleggelser. Ved en slik flomhendelse viser resultatet at oversvømmelsene vil dekke områder på 720 km<sup>2</sup>, og at 126 bygninger og 7,5 km veg vil være eksponert for flom.

Kun oversvømmelser knyttet til Otta er kartlagt. Eventuelle bekker som renner gjennom Bismo er ikke tatt i betraktning, oversvømmelser knyttet til disse er ikke inkludert.





# Forord

---

Denne oppgaven markerer slutten på min tid som student hos geografisk institutt ved NTNU Trondheim. Det har vært en fin og lærerik tid, både faglig og sosialt.

En spesiell takk til min veileder, Jan Ketil Rød, for gode innspill og tilbakemeldinger.

Jeg vil takke mine foreldre, Bente og Jan Gunnar Astad, og Vilfrid Hjemdahl for støtte under hele arbeidsprosessen.

Takk til alle studievenner jeg har blitt kjent med for gode stunder. Og en lunken takk til Emil Krokan for at han også fikk kjenne på COVID 19 utsettelse.



# Innholdsfortegnelse

---

Summary .....	I
Sammendrag .....	III
Forord.....	V
Figurliste .....	X
Tabeller .....	XIV
Formler.....	XIV
Forkortelser og ordforklaringer.....	XV
1 Innledning .....	1
1.1 Klimaendringer.....	3
1.2 Forskningsspørsmål.....	4
2 Områdebeskrivelse.....	7
3 Teori.....	9
3.1 Flom .....	9
3.2 Erosjon, sedimenttransport og sedimentasjon.....	10
3.3 Lidar .....	11
3.4 Digital terrengmodell .....	12
3.5 Hydrauliske analyse .....	14
3.5.1 HEC-RAS .....	14
3.5.2 Ustødig-strøm .....	15
3.5.3 Underlagets ruheffisient .....	18
3.5.4 1D-geometri .....	19
3.5.5 2D-geometri .....	21
3.5.6 Redigering av 2D-cellenett .....	24
3.5.7 Grensebetingelser.....	28
3.5.8 Beregningsintervaller.....	28
4 Data.....	31
4.1 Høydedata.....	31
4.2 Flomdata.....	31
4.3 Arealdekket .....	33
4.4 Bygninger og veg .....	33
5 Metode .....	35

5.1	Batymetri.....	35
5.2	Arealtypenes ruhekkoeffisient.....	40
5.2.1	Bygninger.....	41
5.3	2D-geometri .....	43
5.4	Hydrauliske parametere.....	45
5.4.1	Grensebetingelser.....	45
5.4.2	Beregningsparametere.....	48
5.5	Diffusion Wave og Full Momentum .....	50
5.6	Usikkerhet og sensitivitetsanalyse .....	54
6	Resultater .....	57
6.1	Flomsonekart for 200-årsflom i Otta ved Bismo .....	58
6.1.1	Vannhastighetskart for en 200-årsflom i Otta ved Bismo .....	61
6.2	Flomsonekart for 200-årsflom i Otta ved Bismo i år 2100 med 20% klimapåslag...64	
6.2.1	Vannhastighetskart for en klimajustert 200-årsflom i Otta ved Bismo .....	67
6.3	Differanser i flomsonekartene .....	69
7	Diskusjon .....	73
7.1	Validering av modellen .....	73
7.1.1	Område 1.....	74
7.1.2	Område 2.....	77
7.1.3	Område 3.....	78
7.1.4	Område 4.....	80
7.2	Usikkerheter .....	82
7.2.1	Klimaframskrivninger.....	83
7.2.2	Data for vannføring.....	84
7.2.3	Terrengmodell og batymetri .....	85
7.2.4	Flommodellering.....	86
8	Avslutning.....	91
8.1	Forslag til videre arbeid.....	91
8.2	Konklusjon .....	91
	Referanser .....	93
	Vedlegg.....	97



# Figurliste

---

Figur 1.1: Døgnmiddeltemperatur i området rundt Skjåk kommune fra 9. til 14. oktober 2018 (NVE, 2020a).....	1
Figur 1.2: Bilde tatt under oktoberflommen i 2018 i Bismo (Rognstrand, Bugge, & NTB, 2018). .....	2
Figur 1.3: Global middeltemperatur siden 1850 vist som avvik fra perioden 1961-1990, fra datasettet HadCRUT4 (Benestad, Mamen, Harstveit, & Fuglestad, 2020) .....	3
Figur 1.4: Prosentvis endring i størrelse for 200-årsflom ifølge RCP 8.5 (Hanssen-Bauer, et al., 2016) .....	5
Figur 2.1: Oversiktskart over Ottaelvas løp gjennom Ottadalen, med innrammet studieområde ved Bismo dekt i gult. ....	7
Figur 3.1: Hjulstrøms diagram med grenser mellom erosjon, transport og sedimentering. Partikkelstørrelse langs x-aksen og vannhastighet langs y-aksen (Fergus, Hoeseth, & Sæterbø, 2010). ....	11
Figur 3.2: Lidarmåling av et tre med 5 retursignaler, hvor 1-4 er forskjellige punkter i treet og 5 er bakkenivå (NOAA, 2012).....	12
Figur 3.3: Bak: Punktsky med data for høyden på hele overflaten. Foran: En generert terrengmodell uten vegetasjon med punktskyen fortsatt synlig (NOAA, 2012). ....	12
Figur 3.4: Bildet viser hvordan forskjellige cellestørrelser (grått) representerer topografi (svart) (Hengl & Evans, 2009).....	13
Figur 3.5: Strømningshydrograf for oktoberflommen i 2018 i Otta, oppmålt ved Ofossen målestasjon.....	15
Figur 3.6: Definisjon av symboler bruk i ligningene (Brunner, Savant, & Heath, 2020, redigert av forfatter). ....	17
Figur 3.7: Eksempel fra Brunner (2016c) med oversikt over plassering av de forskjellige lagene i 1D-geometri.....	19
Figur 3.8: Et tverrsnitt fra Otta før inkludering av batymetri med tverrsnittet i svart og røde prikker indikerer hvor elvebanke-linjene krysser tverrsnittet. ....	21
Figur 3.9: Cellestrukturen i HEC-RAS 2D-cellenett (Brunner, 2016b, redigert av forfatter). ..	22
Figur 3.10: Utsnitt av en celles hydrauliske egenskaper beregnet ved førprosessering. ....	23
Figur 3.11: Flyten av vannet følger det underliggende terrenget selv med store celler ved bruk av subgrid-modellen (Brunner, 2016b).....	24
Figur 3.12: Cellenett med bruddlinjer med finere oppløsning, plassert som senterlinje i elveløpet og ved elvebankene (Brunner, Savant, & Heath, 2020).....	25

Figur 3.13: Bildet viser hvordan vannet vil ikke ta hensyn til blokkeringen på grunn av cellens størrelse (venstre), og hvordan bruddlinjer lagt oppå strømningsbarrieren vil "tette igjen" terrenget (høyre) (CivilGEO, U.å.).	26
Figur 3.14: Fragmentert oversvømmelse (Goodell, 2015b).	27
Figur 3.15: Hvordan HEC-RAS kartlegger grunt vann i helning (Goodell, 2015b, redigert av forfatter)	27
Figur 5.1: Utsnitt av 1D-geometrien bruk for å redigere batymetri med tverrsnittenes stasjonsnummer, som viser tverrsnittets plassering langs elv-senterlinje.	36
Figur 5.2: Utsnitt av flyfotoet av Otta med lav vannføring i 2015 ved Skeisøyi, skjermdump fra norgebilder.no.	37
Figur 5.3: Tverrsnitt 5504 ved Skeisøyi sett fra oppstrøms med opprinnelig terrengmodell i svart og modifisert i rødt.	38
Figur 5.4: Utsnitt av terrengmodellen ved Skeisøyi før (venstre) og etter (høyre) modifiseringen.	39
Figur 5.5: Avgrensning av studieområdet rammet inn i gult, med Ofossen målestasjon markert med gul prikk.	40
Figur 5.6: AR5 med bygninger.	42
Figur 5.7: Oversikt over hele 2D-cellenettet med bruddlinjer langs elvebanker, elveløpets senterlinje og relevante strømningsbarrierer som vegger. Elveløpet er dekt av en refinement region.	44
Figur 5.8: Utsnitt av bruddlinjer og Refinement Region ved Skamsar bro. De røde linjene langs elvebankene er kanten til RR, og de andre røde strekene er bruddlinjer.	45
Figur 5.9: Strømningshydrograf for oktoberflommen 2018 (venstre) og nedskalert for modell (høyre). Simulerings tid langs x-aksen og vannføring langs y-aksen.	46
Figur 5.10: Simulert vannstand ved test av flomvarighet, mørk blå viser 24 timer, grønn viser 72 timer, rød er terrengprofil.	47
Figur 5.11: Innstillingene for automatiske justerte beregningsintervall.	49
Figur 5.12: Forskjeller i modellert vannstand ved start av oktoberflommen i 2018. Mørk blå viser Full Momentum og grønn viser Diffusion Wave.	51
Figur 5.13: Forskjeller i modellert vannstand ved flomtoppen under oktoberflommen. Mørk blå viser Full Momentum, grønn viser Diffusion Wave.	51
Figur 5.14: Forskjeller i modellert vannstand i hele elveløpet. Mørk blå viser Full Momentum og grønn viser Diffusion Wave. Lilla strek viser lokasjon for Ofossen målestasjon.	52
Figur 5.15: Forskjeller i vannhastighet langs en senterlinje. Mørk blå viser Full Momentum og grønn viser Diffusion Wave.	53
Figur 5.16: Oversvømte områder med bruk av Diffusion Wave og Full Momentum.	54
Figur 5.17: Forskjeller i simulert vannstand ved bruk av to forskjellige n-verdier i hele elveløpet. 0,035 n-verdi (mørk blå) og 0,05 n-verdi (lys blå).	55

Figur 6.1: Flomsonekart for 200-årsflom i Otta ved Bismo. ....	58
Figur 6.2: Flomsonekart for 200-årsflom i dagens klima med markerte områder hvor flommen når langt inn på elvesletta. ....	59
Figur 6.3: Vannhastighetskart for en 200-årsflom i Otta ved Bismo.....	61
Figur 6.4: Vannhastighet ved en 200-årsflom ved Bismo i dagens klima med markerte områder. ....	62
Figur 6.5: Flomsonekart for 200-årsflom i Otta ved Bismo i år 2100 med 20% klimapåslag	64
Figur 6.6: Utsnitt av flomsonekart for en 200-årsflom med klimapåslag med markerte områder. ....	65
Figur 6.7: Vannhastighetskart for en klimajustert 200-årsflom i Otta ved Bismo.....	67
Figur 6.8: Vannhastighet ved en klimajustert 200-årsflom ved Bismo med markerte områder. ....	68
Figur 6.9: Kartet viser differansen i modellert dybde mellom flomsonekart med og uten klimapåslag. Område med høy gradient markert med blå sirkel. ....	69
Figur 6.10: Kartet viser differansen i modellert vannhastighet mellom flomsonekart med og uten klimapåslag .....	70
Figur 7.1: Skjermdump fra dronevideo filmet under oktoberflommen. Markert med oransje figur er antatt posisjon av dronen (Lilleengen, 2018).....	75
Figur 7.2: Bilde fra oktoberflommen og utsnitt av kartet for en modellert 200-årsflom, med bedriften Glasopor markert med grønn sirkel. Markert med oransje figur er antatt posisjon av kamera (Rognstrand, Bugge, & NTB, 2018, redigert av forfatter).....	75
Figur 7.3: Flomvann ved bedriften Glasopor (Silseth, Rognstrand, & Jæger, 2018). ....	76
Figur 7.4: Utsnitt flyfoto hentet fra norgebilder.no av nederste del av område 1, med Glasopor markert med grønn sirkel, og annen eksponert bygning med oransje sirkel.....	77
Figur 7.5: Område 2 vist i utsnitt av flyfoto fra norgebilder og modellert flomhendelse. ....	78
Figur 7.6: Oversvømt areal ved område 3 under oktoberflommen og ved modellert 200-årsflom, område med forskjell i oversvømmelser markert med oransje sirkel. Markert med oransje figur er antatt posisjon av kamera (Rognstrand, Bugge, & NTB, 2018, redigert av forfatter). ....	79
Figur 7.7: Flyfoto fra norgebilder over område 3 med oransje sirkel rundt et område med markant forskjell mellom oktoberflommen og modellert flomhendelse. ....	80
Figur 7.8: Oversvømt areal ved område 4 under oktoberflommen og ved modellert 200-årsflom (Rognstrand, Bugge, & NTB, 2018, redigert av forfatter). ....	81
Figur 7.9: Flyfoto fra norgebilder over område 4 med mulig flomgrense under oktoberflommen markert med rød pil, og modellert flomgrense vist med gul pil.....	82
Figur 7.10: Utsnitt av flommodell med partikkelsporing, røde sirkler viser bygningspolygonenes lokasjon hvor partiklenes hastighet senkes. ....	87



Figur 7.11: Forskjellig i modellert flomgrense i DSW (grønn pil) og FM (rød pil) med antatt flomgrense fra oktoberflommen (gul pil). .....89

## Tabeller

---

Tabell 1: Flomverdier hentet fra NEVINA for 200-årsflom med og uten klimapåslag i Otta ved Bismo. ....	32
Tabell 2: Oversikt over arealtype, beskrivelse i Chow (1959) og n-verdi. ....	41
Tabell 3: Gjennomsnittsdybde i oversvømt areal ved markerte områder ved en 200-årsflom i dagens klimatiske forhold. ....	60
Tabell 4: Gjennomsnittsvannhastighet i oversvømt areal ved markerte områder ved en 200-årsflom i dagens klimatiske forhold. ....	63
Tabell 5: Gjennomsnittsdybde i oversvømt areal ved markerte områder ved en 200-årsflom med 20% klimapåslag. ....	66
Tabell 6: Gjennomsnittsvannhastighet i oversvømt areal ved markerte områder ved en 200-årsflom med 20% klimapåslag. ....	68
Tabell 7: Differanse i gjennomsnittsdybde mellom en 200-årsflom i dagens klima og en 200-årsflom med 20% klimapåslag. ....	70
Tabell 8: Differanse i gjennomsnittsvannhastighet mellom en 200-årsflom i dagens klima og en 200-årsflom med 20% klimapåslag. ....	71

## Formler

---

Formel 1: 2D masse bevarelse (kontinuitet) .....	17
Formel 2: Saint-Venant Full Momentum.....	17
Formel 3: Diffusion Wave .....	18
Formel 4: Courant betingelsen.....	29

# Forkortelser og ordforklaringer

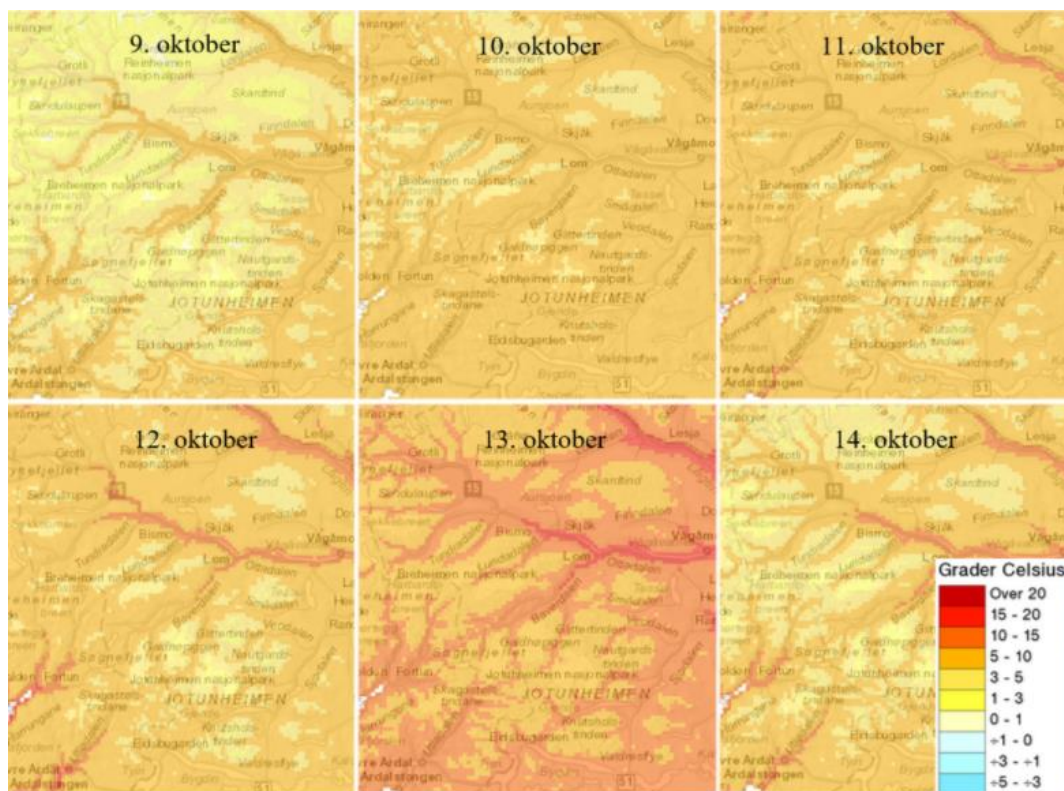
---

<b>1D</b>	En-dimensjonal
<b>2D</b>	To-dimensjonal
<b>AR5</b>	Arearessurskart
<b>Batymetri</b>	Bunn i sjø, elv og innsjø
<b>DSW</b>	Diffusion Wave
<b>DTM</b>	Digital terrengmodell
<b>FM</b>	Full Momentum
<b>FN</b>	Forente nasjoner
<b>GIS</b>	Geografiske informasjonssystemer
<b>HEC-RAS</b>	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
<b>LIDAR</b>	Light detection and ranging
<b>NEVINA</b>	Nedbørfelt- og vannføringsindeksanalyse
<b>NIBIO</b>	Norsk Institutt for Bioøkonomi
<b>NVE</b>	Norges Vassdrags- og Energidirektorat
<b>Raster</b>	Data representert med rutenettstruktur bestående av piksler
<b>RCP</b>	Representative Concentration Pathways
<b>Vector</b>	Data representert med punkter, linjer og polygoner



# 1 Innledning

I september 2018 var det kjølige vinterlige forhold i fjellet, med nysnø i Jotunheimen og Breheimen. Estimert snømengde antyder at det hadde akkumulert mye mer snø enn normalt for denne tiden av året, og et mildere vær var meldt 10. oktober. Snøen på fjellet førte mest sannsynlig ikke til økt vannføring de neste dagene da den tørre snøen har stor lagringskapasitet for vann, som gjorde at den holdt på smeltevannet. Som vist i figur 1.1 økte temperaturen ytterligere den 13. oktober og nedbøren satte inn, som betraktelig reduserte snøens evne til å holde på vannet (NVE, 2020a).



Figur 1.1: Døgnmiddeltemperatur i området rundt Skjåk kommune fra 9. til 14. oktober 2018 (NVE, 2020a).

Fra 13. til 16. oktober 2018 var det en flomhendelse på Vestlandet og i Otta som var forårsaket av regn og snøsmelting, samtidig var det kraftig vind og stor temperaturøkning. På Vestlandet var flommen knyttet til regn og i Ottavassdraget stod snøsmelting for mesteparten av vanntilførselen. Motstridende til tidligere hendelser bevegde vestlandsværet seg over vannskillet i fjellene. Vestlandsværet førte med seg fuktige og varme luftmasser over områder

med mye snø. Dette førte til en flomhendelse i Ottavassdraget større enn tidligere flomhendelser som NVE har kjennskap til (NVE, 2020a).

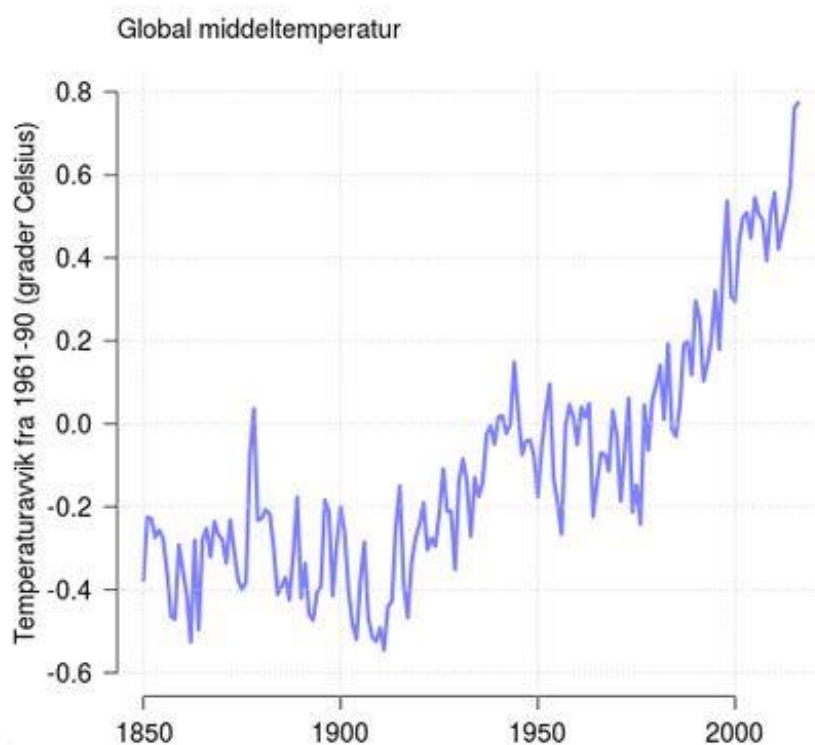
Oktoberflommen i Ottavassdraget ble ikke varslet om. Det var ukjent med så store flommer på denne tiden av året med denne typen vær, samtidig som flommen kom på et tidspunkt hvor situasjonen ikke var overvåket. Søndag 14. oktober ble det i flere vassdrag meldt flomvarslinger på rødt nivå, som betyr mulighet for vannføring over 50-årsflom. Nedstrøms Bismo ligger Ofossen målestasjon, her var det målt godt over normalvannføring i dagene før flommen. Vannføringen ved Ofossen i dagene før var mellom 100-140 m<sup>3</sup>/s, og ved flomtoppen 15. oktober nådde vannføringen 850 m<sup>3</sup>/s. Infrastruktur og bebyggelser ved Ottavassdraget opplevde store skader, i figur 1.2 vises oversvømmelser ved Blåbærmyra i Bismo. Norsk Naturskadepool registrerte erstatningsutbetalinger på 64 287 000 NOK grunnet skader fra flom i Skjåk kommune i 2018 (ClimRes, 2018; NVE, 2020a).



*Figur 1.2: Bilde tatt under oktoberflommen i 2018 i Bismo (Rognstrand, Bugge, & NTB, 2018).*

## 1.1 Klimaendringer

Klimaendringer har alltid forekommet på planeten vår, helt enkelt er klimaendringer knyttet til ubalanse i energiutvekslingen mellom jorden og verdensrommet. For knappe 200 år siden var denne ubalansen basert på naturlige årsaker. FNs klimapanel viser til en klar trend i utviklingen av global middeltemperatur fra 1880 til 2012 på 0,85 °C, hvor de nordligste breddegradene har hatt størst økning, samt sterkere oppvarming over kontinentene enn havområdene. Miljødirektoratets rapport legger fram at ifølge FNs klimapanel er det ikke mulig å si nøyaktig hvor stor del av oppvarmingen som kan knyttes til menneskelig aktivitet, men at klimagassutslippene fra menneskelig aktivitet er høyst sannsynlig hovedårsaken til den observerte globale temperatur økningen siden 1950 (Hanssen-Bauer, et al., 2016). Figur 1.3 viser endringer i global middeltemperatur siden 1850 som avvik fra perioden 1961-1990. Figuren viser at det er en bestemt økning av globaltemperatur, spesielt ved midten av 1900-tallet. Temperaturen på jordoverflaten har økt med 0,8 °C.



Figur 1.3: Global middeltemperatur siden 1850 vist som avvik fra perioden 1961-1990, fra datasettet HadCRUT4 (Benestad, Mamen, Harstveit, & Fuglestad, 2020)

Videre global oppvarming vil mest sannsynlig fortsette, spørsmålet er hvor stor økningen blir. FNs klimapanel viser til forskjellige utslippsscenarioer for framtidig utvikling av

klimagassutslipp på global skala i form av RCP. RCP står for *Representative Concentration Pathways* og er scenarioer for hvordan en mulig fremtid kan utvikle seg basert på hvordan vi håndterer klimagassutslipp (Bjørnæs, 2015). RCPene viser til predikert temperaturøkning i forhold til perioden 1850-1900 (Hanssen-Bauer, et al., 2016). Tre av disse presenteres under.

**RCP 2.6:** RCP 2.6 baserer seg på at vi minker utvinningen av olje og energi betraktelig, og at vi har ved enden av århundret en stabil verdensbefolkning på omtrentlig 9 milliarder mennesker. Klimagassutslipp må være kraftig redusert fra 2020 og ved 2080 må utslippene være redusert til 0. Menneskeskapte utslipp må kompenseres for ved å fjerne klimagasser fra atmosfæren. RCP 2.6 er et lavt utslippsscenario hvor en forventer en global oppvarming på mindre enn 2 °C (Hanssen-Bauer, et al., 2016).

**RCP 4.5:** Dette utslippsscenarioet legger opp til svakt økende utslippsmengde fram til år 2040, og deretter en kraftig reduksjon ved 2080 hvor utslippene tilsvarer 40% av nivået i 2012. Reduksjonen av menneskeskapte utslipp må skje samtidig som befolkningsvekst og behov for matproduksjon øker. Temperaturøkningen ved år 2100 i RCP 4.5 er anslått å være rundt 2,5 °C (Hanssen-Bauer, et al., 2016).

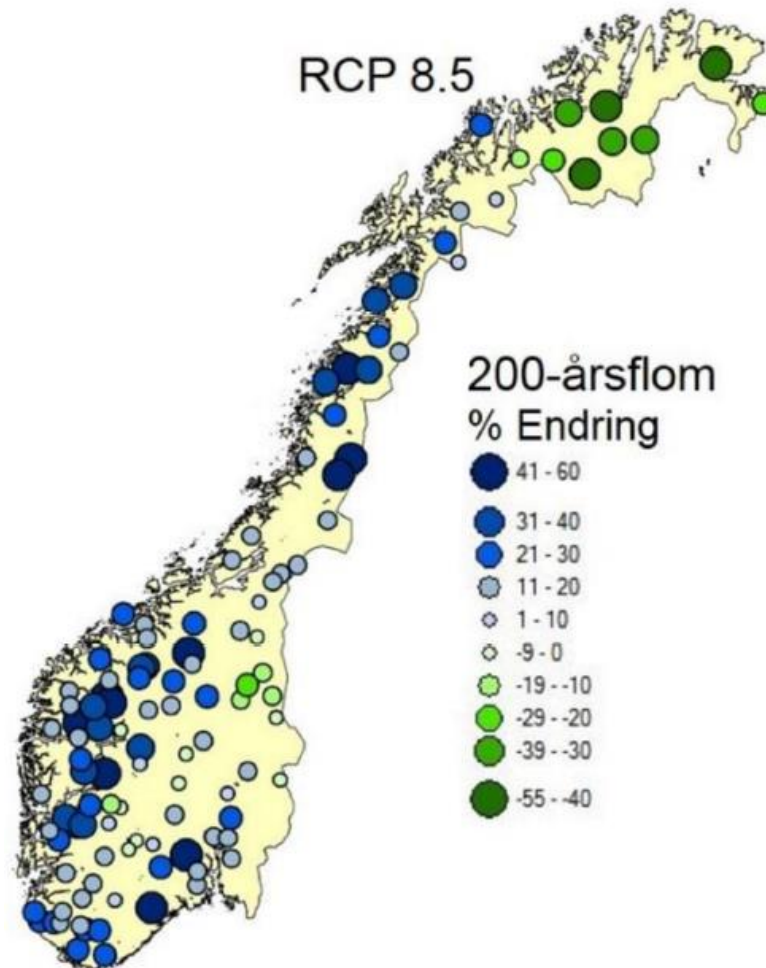
**RCP 8.5:** Utslippsscenarioet er kjent som «Business as usual»-scenarioet og er basert på kontinuerlig vekst i klimagassutslipp. RCP 8.5 følger samme utvikling i menneskeskapte utslipp som samfunnet har hatt de siste tiårene. Innen år 2100 viser RCP 8.5 at metanutslipp har en rask økning, samt at dagens CO<sub>2</sub>-utslipp tredobles. I tillegg vil befolkningsveksten øke til omtrent 12 milliarder mennesker innen år 2100. Dette utslippsscenarioet vil mest sannsynlig ha en temperaturøkning ved år 2100 på mer enn 4 °C, og føre til videre global oppvarming deretter. Per 2016 følger de reelle utslippene RCP 8.5 (Hanssen-Bauer, et al., 2016).

## 1.2 Forskningsspørsmål

Klimaframskrivninger viser en mulig fremtid for samfunnet vårt og behovet for tilpasning til denne fremtiden. Klimatilpasning er planlegging som tar hensyn til hvordan klimaet kan forandre seg i fremtiden og er viktig for en rekke sektorer i Norge. Her til lands er det viktig at vi bygger infrastruktur som kan tåle belastningene av økt fare for naturhendelser som ekstrem nedbør, flom og skred. Klimatilpasning gjelder ikke bare fremtiden, men innebærer også det å være oppmerksom på naturhendelser som kan skje i dagens klima og planlegge rundt disse. Med FNs klimapanelers klimaframskrivninger er det ikke lenger tilstrekkelig å basere klimatilpasning for de neste 50-100 årene på kun historisk data (Hanssen-Bauer, et al., 2016).



I Miljødirektoratets rapport 'Klima i Norge 2100' vises det til at klimaframskrivninger har ført til et behov for beskrivelser av hvilke klimaendringer vi bør være forberedt på i Norge (Hanssen-Bauer, et al., 2016).



Figur 1.4: Prosentvis endring i størrelse for 200-årsflom ifølge RCP 8.5 (Hanssen-Bauer, et al., 2016)

Figur 1.4 viser et kart med prosentvis endring i flomstørrelse for 200-årsflom i hele Norge. I de fleste steder i Innlandet er det forventet små økninger i flomstørrelse på omtrentlig 10% eller en reduksjon, bortsett fra i høytliggende nedbørsfelt i de nordligste delene av fylket hvor det er forventet økninger på 20-30% (Lawrence, 2016). For å forebygge flomskader på materielle verdier og menneskeliv er det viktig med god planlegging og utbygning. Kartlegging av mulig eksponerte områder er en viktig del av denne prosessen (NVE, 2020c).

Jeg har tatt utgangspunkt i flomhendelser i elva Otta ved Bismo i Skjåk kommune og vil i denne masteroppgaven forsøke å gi svar til følgende forskningsspørsmål:

- *Hvordan vil Bismo være eksponert for en 200-årsflom under dagens klimatiske forhold?*

- *Hvordan vil Bismo være eksponert for en 200-årsflom i år 2100 med klimatiske forhold resultert fra RCP 8.5 scenariet?*

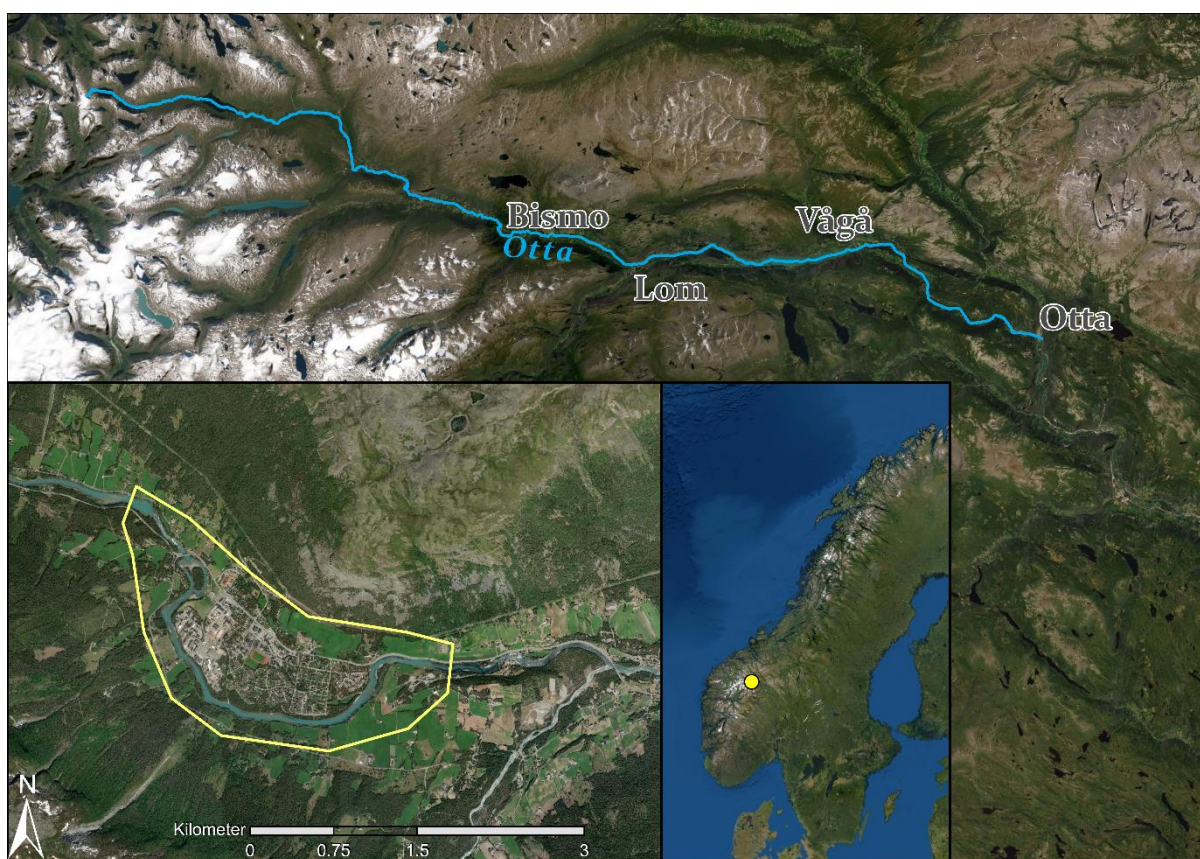
Det er tidligere ikke laget et detaljert flomsonekart for Bismo. Det er derimot laget et forenklet flomaksomhetskart av NVE som ikke er egnet til bruk i reguleringsplanarbeid eller for å vurdere flomsikkerhet ved utbygninger (NVE, 2020d). Dette motiverte meg for å lage et mer detaljert flomsonekart for Bismo for en 200-årsflom ved dagens klimatiske forhold som undersøker mulig utsatt infrastruktur som bygninger og veg.

Ved endringer knyttet til global oppvarming er det ikke lenger bare nødvendig med kartlegging av flomhendelser slik vi forventer de i dag, men hvordan de vil se ut i år 2100. Det er da laget et flomsonekart for hvordan en 200-årsflom i år 2100 med klimapåslag tilhørende RCP 8.5 vil eksponere Bismo. Dette klimapåslaget blir representert med 20% økning av flomverdi for en 200-årsflom.

Kartleggingen av oversvømte områder er gjort med to-dimensjonal flommodellering i HEC-RAS versjon 5.0.7, resultatene er behandlet i ArcGIS.

## 2 Områdebeskrivelse

Skjåk er en jordbrukskommune i Innlandet fylke som omfavner den øverste delen av Ottadalen. Som sett i figur 2.1 befinner studieområdet seg der hvor Otta renner forbi Bismo, et tettsted med omtrentlig 640 innbyggere og som er kommunens administrasjonssenter (Thorsnæs, 2019; Svendsen, 2020). Bismo, som mange andre tettsteder og byggefelt i dalløp, ligger på en elveslette som er utsatt for flomhendelser. I Bismo er hovedelva Otta og diverse bekker som renner gjennom tettstedet fra de bratte dalsidene mulig flomutsatte løp (Norsk klimaservice, 2017; NVE, U.å.).



Figur 2.1: Oversiktskart over Ottaelvas løp gjennom Ottadalen, med innrammet studieområde ved Bismo dekt i gult.

Otta er et 135 km langt sidevassdrag for Gudbrandsdalslågen. Vassdragets nedbørsfelt er på 4066 km<sup>2</sup> med sitt høyeste punkt Galdhøpiggen i Jotunheimen med 2469 moh. Løpet starter fra Djupvatnet ved 1035 moh. like ved vannskillet mot Geiranger og renner øst gjennom kommunene Skjåk, Lom og Vågå til elva møter Gudbrandsdalslågen ved tettstedet Otta i Sel kommune ved 300 moh. Omtrentlig 80% av vassdraget ligger over 1000 moh. (Vinjar & Thorsnæs, 2020; Drageset, 2000). Otta er et regulert vassdrag med fire reguleringsmagasiner;

Breiddalsvatnet, Raudalsvatnet, Aursjøen og Tesse. Disse reguleringsmagasinene bidrar med en reguleringsprosent på omtrentlig 12% (NVE, 2020b).

Store deler av Ottadalen ligger i regnskyggen og dette fører til at Skjåk kommune er den tørreste kommunen i Norge med en årsnedbør på om lag 278 millimeter, 28 millimeter over Peveril Meigs definisjon av ørken, som er områder med under 250 millimeter årsnedbør (Svendsen, 2020; Hjermann, 2018). Selv bare noen få millimeter årsnedbør unna å være definert som en ørken er Bismo flomutsatt, som vist av oktoberflommen i 2018. Normalt sett vil Otta være preget av vårflom sent juni grunnet høytliggende og brerikt nedbørsfelt, dette er typisk for dagens forhold i resten av gamle Oppland fylke hvor er det vanligst med snøsmelteflommer (Vinjar & Thorsnæs, 2020; Norsk klimaservice, 2017). Klimaframskrivninger for 2100 viser at klimaendringer vil føre til økt gjennomsnittlig årlig vannføringen i gamle Oppland fylke på grunn av økt nedbør samt innvirkninger på snøakkumulasjon, snøsmelting og fordampning (Norsk klimaservice, 2017). Vinternedbøren vil oftere komme som regn i stedet for snø, økt temperatur i vinter- og vårmånedene vil gi reduserte snømagasin og tidligere smelting av disse som vil føre til mindre og sjeldnere snøsmelteflommer (Norsk klimaservice, 2017; Lawrence, 2016). Klimaframskrivninger for nedbør viser også til at vinternedbøren kan øke og føre til større snømagasin i fjellområder på Østlandet (Hanssen-Bauer, et al., 2016). Om sommeren vil vannføringen være redusert på grunn av lite tilgang til snø i fjellet, og om høsten vil nedbøren øke og føre til større vannføring (Norsk klimaservice, 2017).

## 3 Teori

---

### 3.1 Flom

Flom er definert som høyere vannstand enn normaltstanden i vannmagasin som bekker, elver, innsjøer etc. Flom defineres også etter gjentaksintervall. Gjentaksintervall er et mål på gjennomsnitt antall år mellom hver gang normaltstanden av en bestemt flomvannføring overskrides. Gjentaksintervallet sier noe om sannsynligheten for at en flomhendelse vil forkomme, et høyere gjentaksintervall vil bety større vannføring og mindre sannsynlighet. En flomhendelse med flomvannføring lik en 200-årsflom vil gjennomsnittlig forekomme en gang hvert to-hundrede år, dette betyr at det er 0,5% sannsynlighet for at en slik flomhendelse oppstår i et gitt år. Gjentaksintervallet utelukker ikke at en 200-årsflom kan inntreffe to år på rad (Varsom, u.å.; Wasrud, 2015; Stenius, Glad, Wang, & Væringstad, 2015).

Flom deles inn i to sesongbaserte flomtyper; vårflom eller sommer/høstflom, hvor disse flomtypene er igjen knyttet opp mot flomregimer. Flomregimer er en indikasjon på hvilke prosesser som forårsaker flomhendelsene. Vårflommer har gjerne lang varighet og stort volum da mesteparten av vannføringen kommer fra snøsmelting forårsaket av økt temperatur i vårmånedene. Vårflomhendelsene kan oppstå i en kombinasjon med regn som vil føre til store flomhendelser. Sommer/høstflommer er knyttet til intens nedbør som gir flomhendelsene kortere varighet og kan føre til vanskeligheter for varsling da nedbørshendelsene kan være vanskelig å forutse (Midttømme, et al., 2011; Stenius, Glad, Wang, & Væringstad, 2015).

Flomforholdene i et område er avhengig av områdets klima og geografiske egenskaper. Høydefordeling og helningsforhold i nedbørsfeltet er betydelig for flomforholdene. Ved stor høydeforskjell i nedbørsfeltet vil snøsmeltingen som oftest skje ved forskjellige tidspunkt og da ikke føre til større flom. Ved lavere høydeforskjell kan snøsmelting skje samtidig og føre til intens vannføring. Store nedbørsmengder alene behøver ikke å føre til flom. Det er som oftest i en kombinasjon med et mettet underlag fra tidligere nedbør, frossen mark eller snøsmelting at det inntreffer flomhendelser (Stenius, Glad, Wang, & Væringstad, 2015).

Når underlagets infiltrasjonsevne, altså dens evne til å ta til seg vann, overskrides av nedbørintensiteten vil overflateavrenning oppstå, og faren for flom er stor ved høy overflateavrenning (Selby, 2005). Underlaget i nedbørsfeltet har stor betydning for hvordan vannet oppfører seg da det får kontakt med overflaten. Asphalt og betong er impermeable underlag som er vanlige i bebygde strøk, dyrkamark har en noe større grad av impermeabilitet

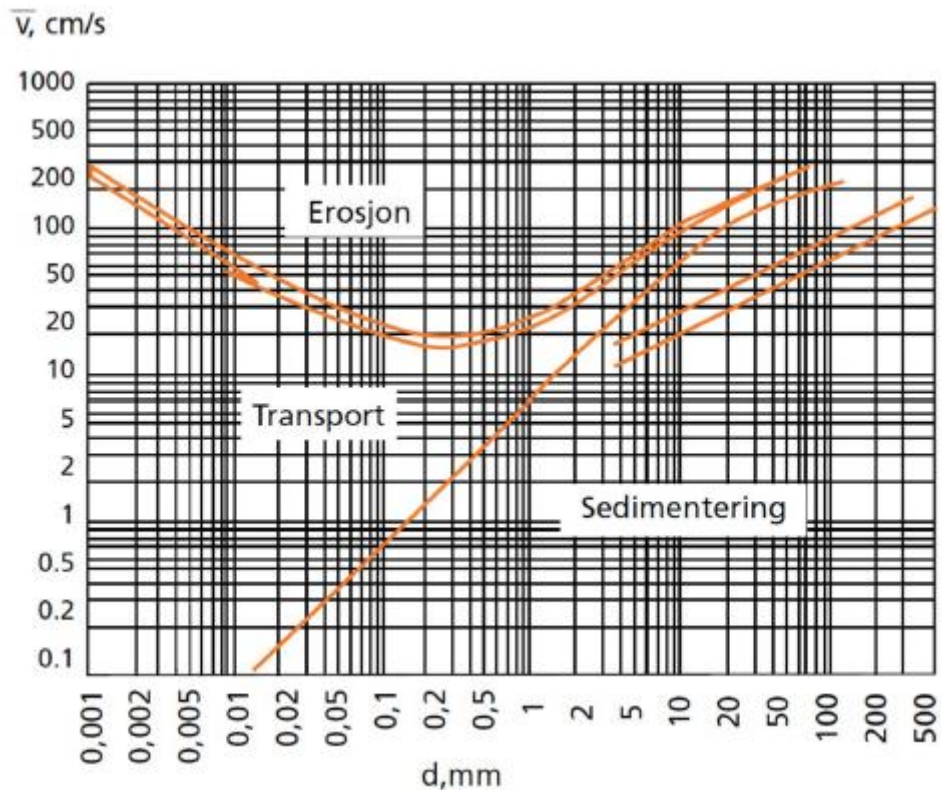
enn udyrkamark da jorda er tett pakket, ved disse underlagene vil nedbør raskt føre til overflateavrenning. Skog og vegetasjon har en flomdempende effekt da det vil være et lag med jord hvor vann kan infiltrere, samt at nedbør vil legge seg på blader og grener som vil føre til økt transpirasjon (Carlson, 2004; Stenius, Glad, Wang, & Væringstad, 2015).

## 3.2 Erosjon, sedimenttransport og sedimentasjon

*Erosjon, sedimenttransport og sedimentasjon* er prosesser som flytter på og avsetter materiale i elver og former elveløp. Prosessene er knyttet til vannhastighet og vannmengde i vassdraget. Disse prosessene foregår kontinuerlig i alle vassdrag og har skapt avsetninger som elvesletter, hvor vi finner de beste jordbruksarealene. Dette har ført til at det er bygd bebyggelser og infrastruktur på disse flomutsatte arealene (Fergus, Hoseth, & Sæterbø, 2010).

Erosjon er når vannets krefter fjerner mer materiale enn det tilføres ved å rive løs og flytte på partikler. Sedimenttransport er en prosess som er uavhengig av erosjon og innebærer at partikler kan gli og hoppe langs elvebunnen, holde seg svevende i vannmassene, eller bli oppløst i vannet. Sedimentasjon er når vannets evne til å frakte partikler i transport avtar slik at partiklene blir avsatt (Fergus, Hoseth, & Sæterbø, 2010).

Flomhendelser kan føre til mye erosjon og transport av løsmasser. Hvor mye erosjon og hvor hurtig det graves ut og forflyttes er avhengig av hvilken type løsmasser og hvor store vannets krefter er i det gitte området. I figur 3.1 vises det til Hjulstrøms diagram som gir en oversikt over hvordan størrelsen på partikler og vannets hastighet bestemmer om det oppstår erosjon, sedimenttransport, og sedimentasjon. Diagrammet viser at små partikler vil kreve høyere vannhastighet før erosjon oppstår, da de holdes sammen av kohesive krefter mellom kornene (Fergus, Hoseth, & Sæterbø, 2010).



Figur 3.1: Hjulstrøms diagram med grenser mellom erosjon, transport og sedimentering. Partikkelstørrelse langs x-aksen og vannhastighet langs y-aksen (Fergus, Hoseth, & Sæterbø, 2010).

### 3.3 Lidar

Lidar, eller Light detection and Ranging, er en fjernmålingsteknologi basert på lys som har gjort mulighetene for kartlegging av jorden på små og store skala mye bedre når det kommer til treffsikkerhet, presisjon og fleksibilitet. Kartlegging gjort med lidar kan oppnå centimeter presisjon, har mulighet for høy oppløsning og kan filtrere vegetasjon (NOAA, 2012). Denne fjernmålingsteknologien har mange bruksområder, relevant for denne oppgaven danner lidar grunnlaget for utvikling av digitale terrengmodeller (DTM) og brukes til å kartlegge landdekket (Lim, Treitz, Wulder, St-Onge, & Flood, 2003).

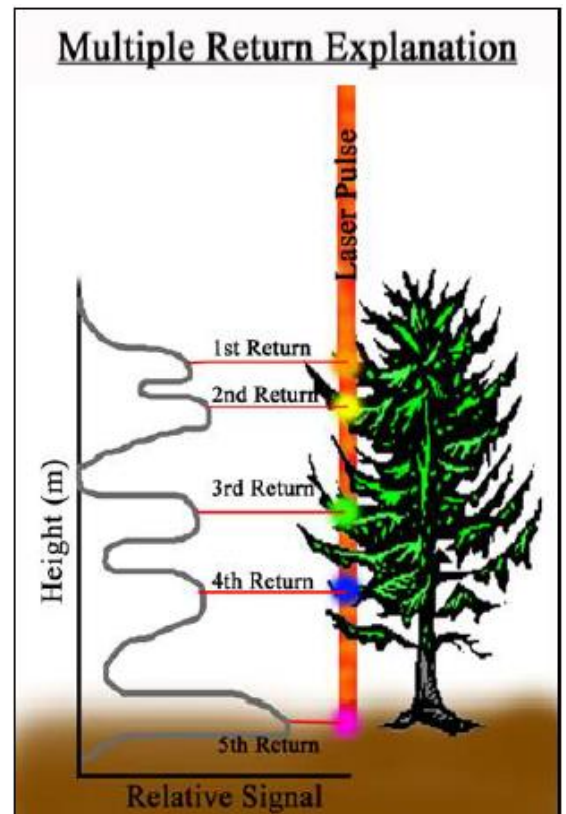
Lidar fungerer lik radar, men i stedet for lydbølger brukes lys for å måle avstand til objektet. Avstanden måles gjennom tidsforsinkelser mellom utsendelsen av lys i form av en laser og mottagelsen av det som reflekteres tilbake (Holtet, 2018; Lim, Treitz, Wulder, St-Onge, & Flood, 2003).

Lidars mulighet til å kartlegge bakken under vegetasjon kommer fra de diskrete retursensorene som kan ta imot flere retursignaler fra utsendinger. Figur 3.2 viser at når laseren sendes mot et tredekke vil noe av utsendingen treffe den øverste delen av trærne og bli reflektert tilbake, resten av utsendingen vil fortsette ned mot bakkenivå og blir reflektert av andre objekter på vei dit. Denne dataen blir lagret og fremvist i en tredimensjonal punktsky som representerer høydemålinger av hvert enkelt reflekterte punkt, videre kan en filtrere vekk punkter over bakkenivå for å lage en terrengmodell (se figur 3.3) (NOAA, 2012).

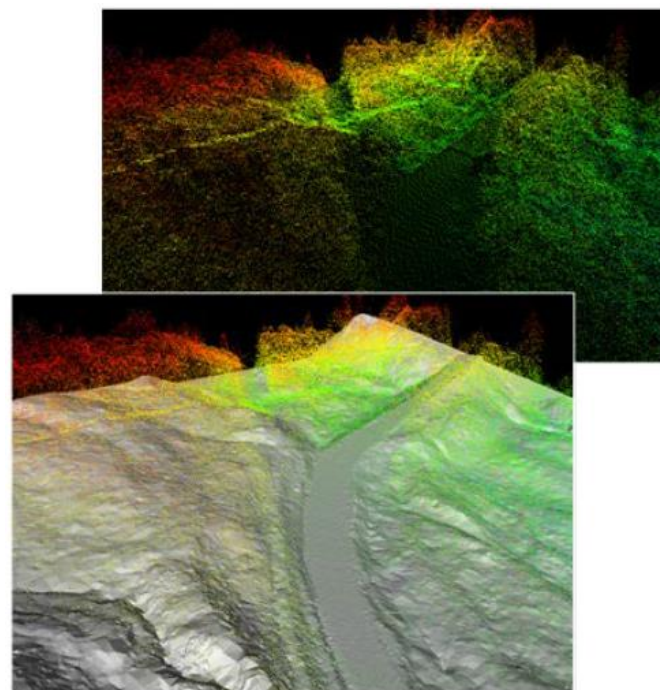
Hovedsakelig pleier lidarsystemer å bruke lasere som opererer nær den infrarøde delen av det elektromagnetiske spekteret, men noen systemer opererer ved den grønne delen. Infrarøde lasere penetrerer ikke tåke, røyk eller regn. Grønne lasere har muligheten til å penetrere vann, noe som gjør det mulig å kartlegge batymetri, altså bunner av sjø, elv og innsjø, om vannet er klart nok (NOAA, 2012). Terrengmodellen brukt i flommodelleringen fulgte ikke med batymetri, som førte til utfordringer for modelleringen da elvebunnen ikke er kartlagt, dette forklares nærmer i kapittel 5.1.

### 3.4 Digital terrengmodell

DTM, eller digital terrengmodell, er en kontinuerlig flate som inneholder data om terrengets høyde. Terrengmodeller blir representert i et raster- eller vektorformat, jeg skal ta for meg raster baserte terrengmodeller da det er dette som er brukt i flommodelleringen. Raster er et format med en rutenettstruktur som inneholder celler med informasjon, i en DTM vil disse cellene inneholde et tall som representerer høyden i området denne cellen



Figur 3.2: Lidarmåling av et tre med 5 retursignaler, hvor 1-4 er forskjellige punkter i treet og 5 er bakkenivå (NOAA, 2012).

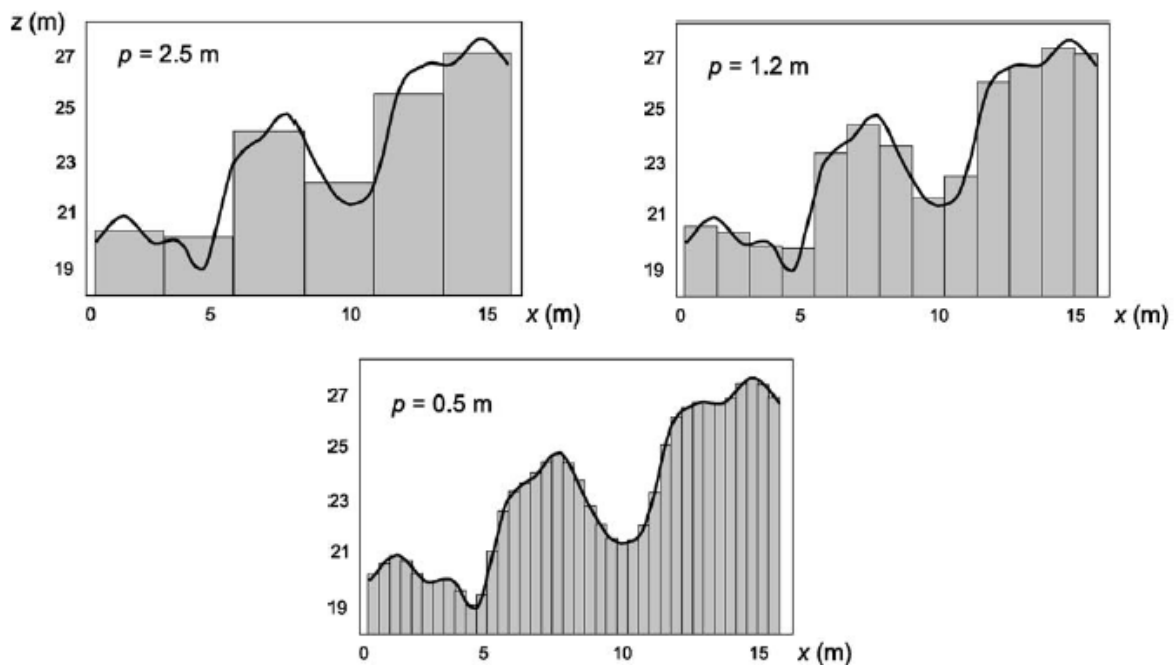


Figur 3.3: Bak: Punktsky med data for høyden på hele overflaten. Foran: En generert terrengmodell uten vegetasjon med punktskyen fortsatt synlig (NOAA, 2012).



dekker. I en DTM vil størrelsene på cellene være viktig for kvaliteten og egenskapene til terrenngmodellen, dette er terrenngmodellens oppløsning. Ved lav oppløsning vil cellene være store og generalisere større områder, altså ikke inneholde detaljer om det underliggende terrenget (se figur 3.4), men filen vil være mindre og raskere å prosessere. I DTM-er med høy oppløsning vil cellene være mindre og dekke mindre områder, terrenngmodellen vil da vise mer detaljert det underliggende terrenget, men vil også føre med seg større filstørrelse og lengre prosesseringstid (Hengl & Evans, 2009).

I digitale terrenngmodeller kan det oppstå problemer med celledstørrelsen ved helninger da større celler vil generalisere området og en kan ende opp med en slakere helning enn det er i realiteten og da gå glipp av markante detaljer (Hengl & Evans, 2009).



Figur 3.4: Bildet viser hvordan forskjellige celledstørrelser (grått) representerer topografi (svart) (Hengl & Evans, 2009).

Terrenngmodeller kan inneholde feil i dataen hvor høyden i celler runder av til nærmeste heltall som skaper dype groper eller høye topper. Disse feilene må rettes på for at en terrenngmodell skal være fungerende for en hydrologisk analyse, da dype groper i terrenngmodellen vil føre til at vann dreneres vekk på en urealistisk måte (ESRI, U.å.). I HEC-RAS har en mulighet til å tette igjen disse gropene ved bruk av «Create Stitches» som triangulerer terrenngdataen og interpolerer mellom nærliggende celler i terrenngmodellen (Brunner, 2018).

Oppløsningen er knyttet til terrenngmodellens detaljer og både høye og lave oppløsninger har sin bruk. I studieområder ved mindre målestokker, for eksempel landsdekkende, kan DTM-er

med lav oppløsning brukes da det ikke behøver ivareta de finere detaljene i terrenget. Ved større målestokk, som i denne flommodelleringen, er ofte DTM-er med høy oppløsning passende da det er viktig med godt representert terreng for en mest mulig realistisk modell (Hengl & Evans, 2009). Ifølge Brunner (2016b) er det essensielt med en detaljert og nøyaktig terrengmodell for å skape en detaljert og nøyaktig flommodell i HEC-RAS, da kvaliteten av terrengmodellen kan være en begrensende faktor for flommodelleringen.

## 3.5 Hydrauliske analyse

Hydrauliske analyser brukes til å undersøke vannstand og vannhastigheter i elver for ulike vannføring, for eksempel 100-, 200- og 1000-årsflom, slik at vi kan prøve å forstå vassdraget. Klimaendringer medfører større farer langs vassdrag og behovet for å forstå skadepotensialet til elver økes.

### 3.5.1 HEC-RAS

Flommodelleringen for denne oppgaven og generering av modellens geometriske data er gjort i et program utviklet av US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center; HEC-RAS versjon 5.0.7. HEC-RAS er et av de mest anvendte programmene for hydrauliske beregninger i naturlige og kanaliserte elver og bekker (Fjelstad & Hansen, 2016). Programmet brukes til å kalkulere vannflaten ved ønskede lokasjoner ved bruk av geometriske data og data for vannføring. Geometrisk data i flommodellering er en form for rammer som programvaren bruker for å forstå hvor og hvordan beregninger skal gjøres

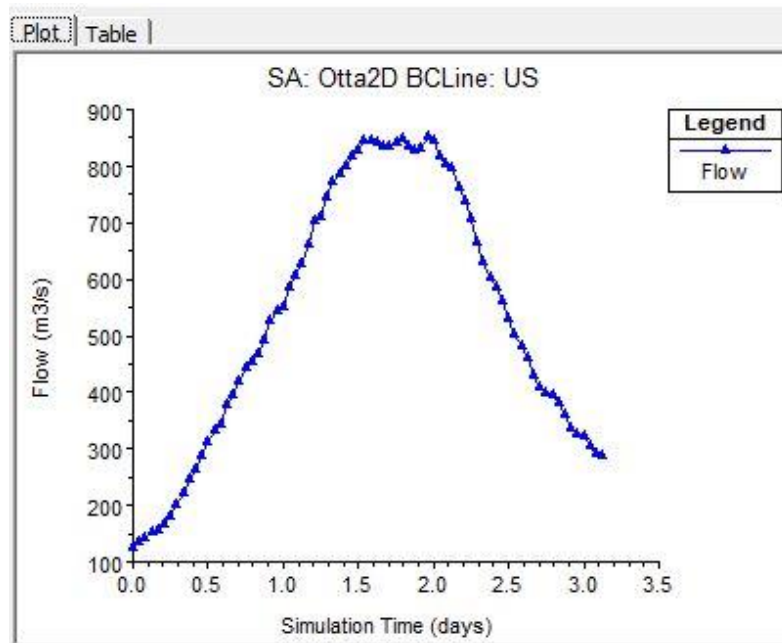
Flommodelleringen kan gjøres som en-dimensjonal (1D), to-dimensjonal (2D) eller kombinert 1D og 2D analyser (Brunner, 2016c). Hovedforskjellen mellom 1D og 2D er at 1D beregner én vannstand for hvert enkelt tverrsnitt, og 2D beregner unik vannstand for hver enkelt celle i cellenettet, disse elementene blir forklart henholdsvis i kapittel 3.5.4 og 3.5.5. 1D modeller er egnet til bruk ved tilfeller hvor kreftene som påvirker vannet er dominant i én retning, langsgående elveløpet. 2D derimot er velegnet til å ta flere retninger inn i beregningene, langs elveløpet og på tvers av elveslettene. I situasjoner hvor det er nødvendig med en rask vurdering av flomutsatte områder kan det være veldig lett og raskt med en enkel 2D flommodell. I en enkel 2D flommodell vil ikke den to-dimensjonale geometrien innad i HEC-RAS nødvendigvis være godt tilpasset det underliggende terrenget i terrengmodellen, samt data for vannføring, underlagets ruhetskoeffisient og andre parametere som beregningsintervall og

grensebetingelser vil ikke være kalibrerte som vil føre til et unøyaktig resultat. En rask og enkel flommodell er ikke en detaljert flommodell (Brunner, Savant, & Heath, 2020).

### 3.5.2 Ustødig-strøm

HEC-RAS har to forskjellige måter for å introdusere vannføring inn i modelleringen, i form av *stødig-strøm* (eng: Steady Flow) eller *ustødig-strøm* (eng: Unsteady Flow). Om strømmingen i elva er antatt konstant gjennom det aktuelle tidsintervallet eller om strømningsdybden ikke forandrer seg over tid, kan en si at strømmingen er stødig (Chow, 1959). I en stødig-strøm-analyse vil flyteregimet være et sett med stødige nivåer for vannføring med gradvis forandring til ulike situasjoner, for eksempel 5-, 10- og 50 års flom (Brunner, 2016c).

Strømmingen vil være ustødig om vannføringen i form av strømningsdybden, fart og/eller utslipp forandrer seg med tid (Chow, 1959). I en ustødig-strøm-analyse vil flyteregimet være i form av en strømningshydrograf, som viser vannføring over tid fra kilder oppstrøms eller fra interne kilder. Figur 3.5 viser en strømningshydrograf for oktoberflommen i 2018 oppmålt ved Ofossen målestasjon. I strømningshydrografen representerer vannføringen fra 13. – 16. oktober med varighet langs x-aksen og vannføring i y-aksen. For 2D-flommodeller i HEC-RAS er kun ustødig-strøm tilgjengelig (Brunner, 2016c).



Figur 3.5: Strømningshydrograf for oktoberflommen i 2018 i Otta, oppmålt ved Ofossen målestasjon..

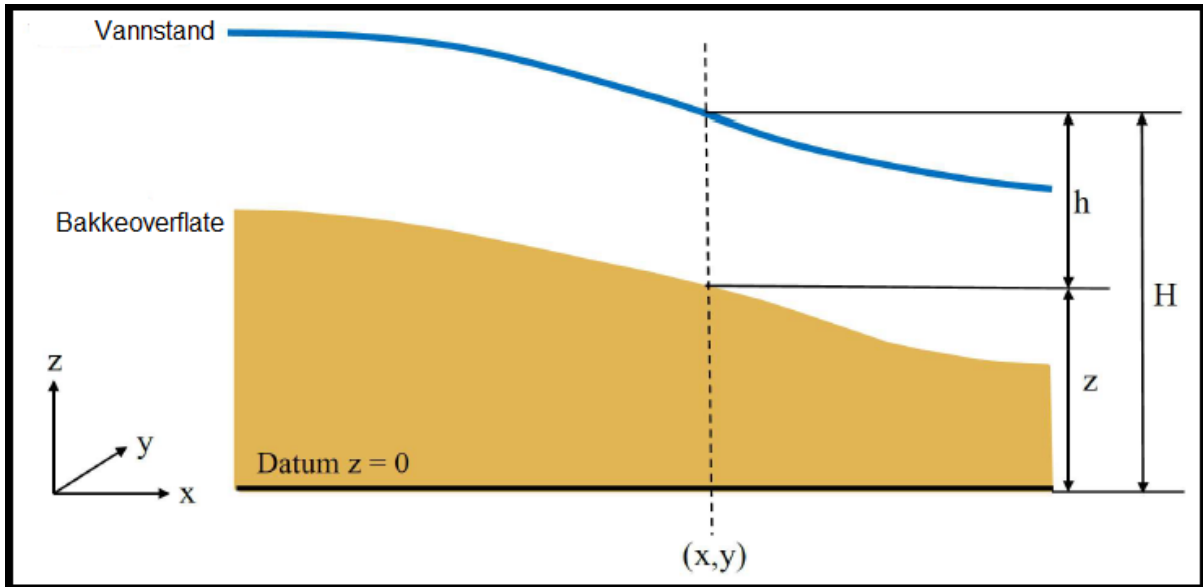
### 3.5.2.1 Diffusion Wave og Saint-Venant Full Momentum

Ved ustødig-strøm modellering i HEC-RAS har en valget mellom to sett med beregningsmetoder for å simulere strømming av vann, *Diffusion Wave* (DSW) og *Shallow Water Equations*. Shallow Water Equations blir ofte kalt *Saint-Venant Full Momentum*, eller bare *Full Momentum* (FM) innad i HEC-RAS. Full Momentum stammer fra Navier-Stokes-ligningene som beskriver bevegelser i væsker i tre dimensjoner, for flommodellering blir disse forenklet, hvor Diffusion Wave er en videre forenkling av Full Momentum (Brunner, 2016c).

I ustødig-strøm varierer bevegelsen av vann i tid og rom. Bevegelsen av vann bestemmes av lover som; massens bevarelse (kontinuitet), og massefart. Ved ustødig-strøm blir disse uttrykt matematisk i form av partielle differensialligninger med noen antagelser (Brunner, Savant, & Heath, 2020; Betsholtz & Nordlöf, 2017):

- Vann er ukomprimerbart: Volum er proporsjonalt med masse da tettheten er antatt konstant. Forskjeller i krefter knyttet til tettheten i vann er ignorert.
- Spredningen av trykk er hydrostatisk: Den vertikale akselerasjonen er ubetydelig.
- Gradienten i elveløpet er mindre enn 1:10.
- Friksjon ved delvis våte overflater, som elvebunnen, kan vises med Mannings n-verdi.

**Saint-Venant Full Momentum:** Full Momentum er en forenklet versjon av Navier-Stokes-ligningene. I forenklingene antar en at den vertikale bevegelsen er relativt mindre enn den horisontale bevegelsen (Collier, Radwan, Dalcin, & Calo, 2011). Full Momentum kan ta flere av vannets egenskaper i betraktning enn Diffusion Wave, som Coriolis-effekten og turbulens (forandring i momentum). For å bruke Full Momentum i HEC-RAS kreves mer beregningskraft fra maskinen som fører til lengre prosesseringstid. Dessuten kan Full Momentum føre til ustabiliteter i modellen ved områder hvor vannføringen ofte skifter retning, dette kan bli redusert ved å bruke et 2D nett med høyere oppløsning, altså mindre størrelse på cellene i disse områdene, og et lavere tall på beregningsintervallene (Brunner, 2016c; CivilGEO, U.å.). Parametere for turbulens blir ikke forandret på i denne modelleringen, og Coriolis effekten blir ikke tatt hensyn til.



Figur 3.6: Definisjon av symboler bruk i ligningene (Brunner, Savant, & Heath, 2020, redigert av forfatter).

### 2D masse bevarelse (kontinuitet):

Formel 1: 2D masse bevarelse (kontinuitet)

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

Massefluxen beregnes i to dimensjoner, hvor  $H$  er vannstand,  $h$  er dybde,  $u$  og  $v$  er gjennomsnittsfart i henholdsvis  $x$ - og  $y$ -retning,  $t$  er tid og  $q$  er strømming (Brunner, 2016c).

### Saint-Venant Full Momentum;

Formel 2: Saint-Venant Full Momentum

i retning  $x$ :

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

i retning  $y$ :

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

hvor  $H$  er vannstand,  $h$  er dybde,  $u$  og  $v$  er gjennomsnittsfart i  $x$ - og  $y$ -retning,  $v_t$  er turbulens koeffisienten,  $g$  er gravitasjon,  $c_f$  er friksjons koeffisient,  $f$  er for Coriolis effekten. Venstre del av ligningen viser til akselerasjon og høyre viser til effekten av interne og eksterne krefter på vannet (Brunner, 2016c).

I følge Brunner (2016b) egner Full Momentum seg til modellering ved flere situasjoner blant annet:

- Dynamiske flomhendelser som ved rask skiftende vannføring, eksempelvis ved en damkollaps.
- Brått skiftene terreng i elveløpet hvor vannet presses inn i smalere eller med utvidete løp, eksempelvis ved bruer, stikkrenner, trange passasjer i elva.
- Ved modellering av områder hvor vannet er påvirket av tidevann.
- Ved hendelser med bølgeforplantning knyttet til bevegelser gjort av undervannsporter og vannføring rundt objekter eller ved vegger.
- Det kreves Full Momentum hvis en vil undersøke om vannet presses ut i svinger.
- Detaljert fart og overflate høyde for vann ved bygninger og bebyggelser.
- Hendelser hvor flyteregimet har varierende høy og lav vannføring.

**Diffusion Wave:** DSW er en videre forenkling av Saint-Venant Full Momentum. I DSW brukes gravitasjon og bunnfriksjon som de dominante effektene på vannets bevegelse. DSW tar ikke med lokal akselerasjon (forandring i fart over tid) og konvektiv akselerasjon (forandring i fart over distanse), som er viktige parametere for dynamiske flomhendelser (Collier, Radwan, Dalcin, & Calo, 2011). DSW er en enklere og mer beregningseffektiv modell for å simulere grunt vann (Brunner, 2016c; CivilGEO, U.å.).

#### DSW:

*Formel 3: Diffusion Wave*

$$c_f = -g \frac{\partial H}{\partial x}$$

hvor  $c_f$  er bunnfriksjon og  $g$  er gravitasjon (Brunner, Savant, & Heath, 2020; Førli, 2019).

DSW er standardinnstillingen i HEC-RAS da den er regnet som mer stabil og krever ikke lave beregningsintervaller som gjør den raskere. Siden DSW generaliserer og forenkler vil FM forventes å være mer nøyaktig om det er betydelige forskjeller i resultatene mellom DSW og FM (Brunner, 2016b).

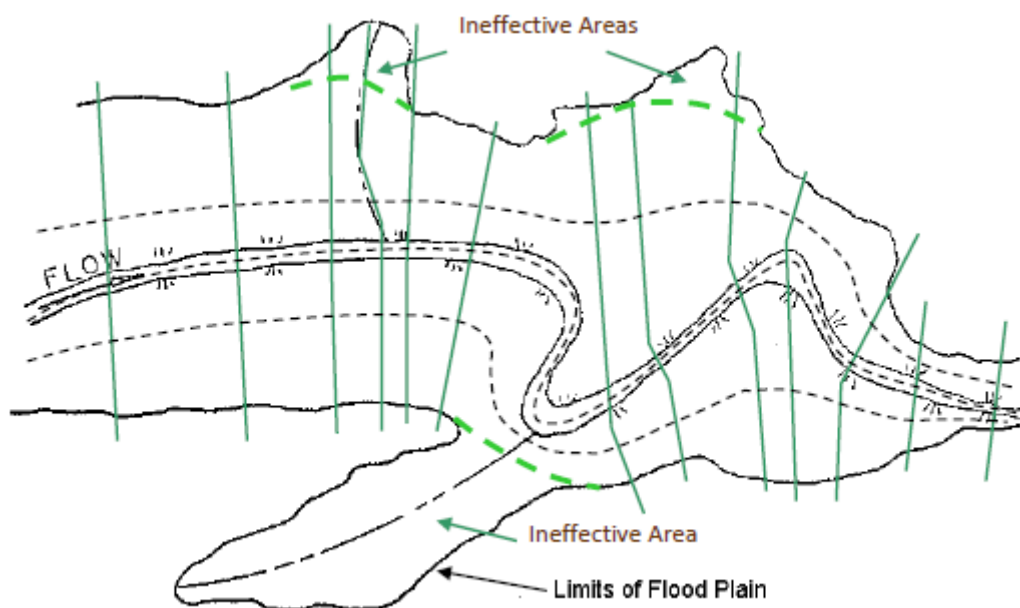
### 3.5.3 Underlagets ruhetskoeffisient

Underlagets ruhetskoeffisient er viktig for nøyaktigheten til flommodellen. Denne ruhetskoeffisienten vises ved Mannings  $n$ -verdi. Ruhetskoeffisienten stammer fra Mannings ligningen som forsøker å beskrive internt energitap og eksterne krefter koblet til friksjon.

Verdien på Mannings N varierer stort og baserer seg på mange forskjellige faktorer som ruheten til underlaget, vegetasjon, kanalens irregulariteter, størrelse og forandringer knyttet til sesong m. f. (Brunner, 2016c).

### 3.5.4 1D-geometri

Elvens geometriske data forteller programmet hvordan elva ligger i terrenget, slik at flomberegningene gjort av HEC-RAS blir gjort på riktige lokasjoner. Denne dataen kan importeres fra andre GIS-programmer eller den kan lages i RAS Mapper innad i HEC-RAS. Det brukes forskjellige geometriske data ved 1D- og 2D-flommodeller. 1D-geometri består hovedsakelig av *elv-senterlinje*, *elvebanke-linjer*, *strømningsbaner*, og *tverrsnitt*.



Figur 3.7: Eksempel fra Brunner (2016c) med oversikt over plassering av de forskjellige lagene i 1D-geometri.

Figur 3.7 viser hvordan de ulike en-dimensjonale geometriske lagene blir plassert:

- Elv-senterlinje, vist som stiptet linje midt i elveløpet, blir plassert i massesenteret til elva ved normal vannføring.
- Ved skillet mellom elv og elveslette plasseres elve-banke-linjene, vist som heltrukken linje på hver side av elveløpet.
- Videre ser man hvordan strømningsbaner, vist som stiptet linje utenfor elveløpet, blir plassert i det antatte massesenteret for vann ved venstre og høyre banke.
- Tverrsnittene, i grønt, blir plottet inn vinkelrett til de tidligere lagene ved hjelp av en teknikk kalt «doglegging» som innebærer å lage bøy i linjene ved å sette flere punkter (Brunner, 2016a).

I en en-dimensjonal flomsonmodellering i HEC-RAS behøver man først å konstruere *elv-senterlinje* (eng: River Centerline), som er det geometriske laget som representerer elvas hovedløp, altså hvor det er mest vannføring i vassdraget. Dette laget må plottes inn oppstrøms til nedstrøms, da HEC-RAS antar at første punkt er oppstrøms. Det er også mulig å lage geometriske data for sideløpene i ei elv ved hjelp av *elve-kryss* (eng: Junctions) som vil binde sammen flere elveløp. Elv-senterlinje blir bruk sammen med *tverrsnitt* (eng: Cross Section Cut Lines) for å danne *elve-stasjoner* (eng: River Stationing) til hvert tverrsnitt, som viser til tverrsnittenes lokasjoner i elveløpet. Elv-senterlinje organiserer også annen 1D-geometriskdata, disse er *elvebanke-linjer* (eng: Bank Lines) og *strømningsbaner* (eng: Flow Paths) (Brunner, 2018).

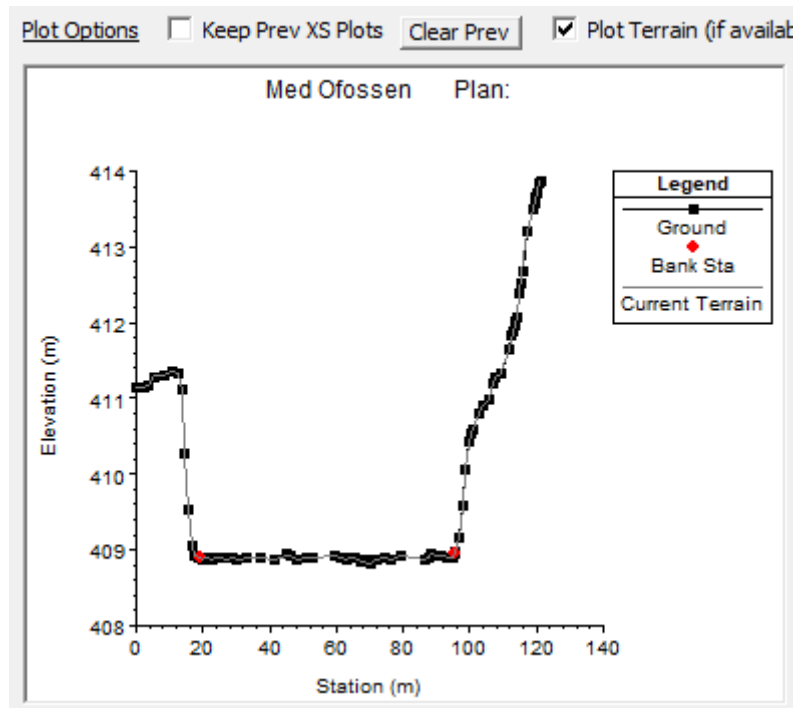
*Elvebanke-linjer* plottes inn ved skille mellom elv og elvebankene fra venstre til høyre sett fra oppstrøms. Disse linjene vil danne punkter i tverrsnittene som skiller hovedløpet fra elvebankene på hver side av elva slik at kalkuleringer gjort med energitapskoeffisientene fra underlaget blir plassert riktig (Brunner, 2018).

*Strømningsbaner* er lik som *elv-senterlinje*, men for områdene ved elvebankene. Disse linjene blir plottet inn på høyre og venstre elvebanke, der hvor det antatte massesenteret for vann som flommer over er. Dette laget brukes til å definere tverrsnittenes lokasjoner ved elvebankene (Brunner, 2018).

*Tverrsnitt* er linjer som kutter de tidligere lagde geometriske lagene på tvers. Disse tverrsnittene henter ut høydeprofiler av terrenngmodellen samt forskjellig data basert på hvilke av de tidligere geometriske lagene tverrsnittene krysser. Figur 3.8 viser et tverrsnitt og hvordan det danner punkter hvor det krysser elvebanke-linjene. Hvert tverrsnitt vil ha egne hydrauliske egenskaper som beskriver hvordan vannet beveger seg mellom hvert tverrsnitt, slik at HEC-RAS kan bruke tverrsnittene til å beregne strømmingen av vann. Disse linjene plottes inn fra venstre til høyre sett fra oppstrøms, så vinkelrett som mulig til de tidligere geometriske lagene, med en lengde som dekker mulig utsatte områder ved elva. Når en plasserer tverrsnittene må man ta orientering, lokasjoner og mellomrom mellom tidligere tverrsnitt i betraktning. Brunner (2018) anbefaler å bruke terrenget, andre geometriske lag og tidligere flomanalyser for å plassere tverrsnittene mest mulig riktig. Ved lange, slake deler av elvesystemet kan en komme unna med mindre antall tverrsnitt enn i deler med større dynamikk i elveløpet, som ved brattere helning, svingete områder, ved broer og stikkrenner, eller forandringer i form. Med flere



tverrsnitt i dynamiske områder vil man ha muligheten til å få med detaljer som ville ha blitt utelatt med få tverrsnitt. Ved lange, slake parti er det som oftest ikke nødvendig med mange tverrsnitt for å ivareta detaljene i elveløpet (Brunner, 2016c).



Figur 3.8: Et tverrsnitt fra Otta før inkludering av batymetri med tverrsnittet i svart og røde prikker indikerer hvor elvebanke-linjene krysser tverrsnittet..

Ved områder hvor vann vil samle seg og ikke nødvendigvis fortsette å renne lengre ned i modellen kan en lage polygoner for *ineffektiv-strømnings-områder* (eng: Ineffective Flow Areas). Vannet i disse områdene vil da ikke bli tatt med i det aktive flomområdet (Brunner, 2016c)

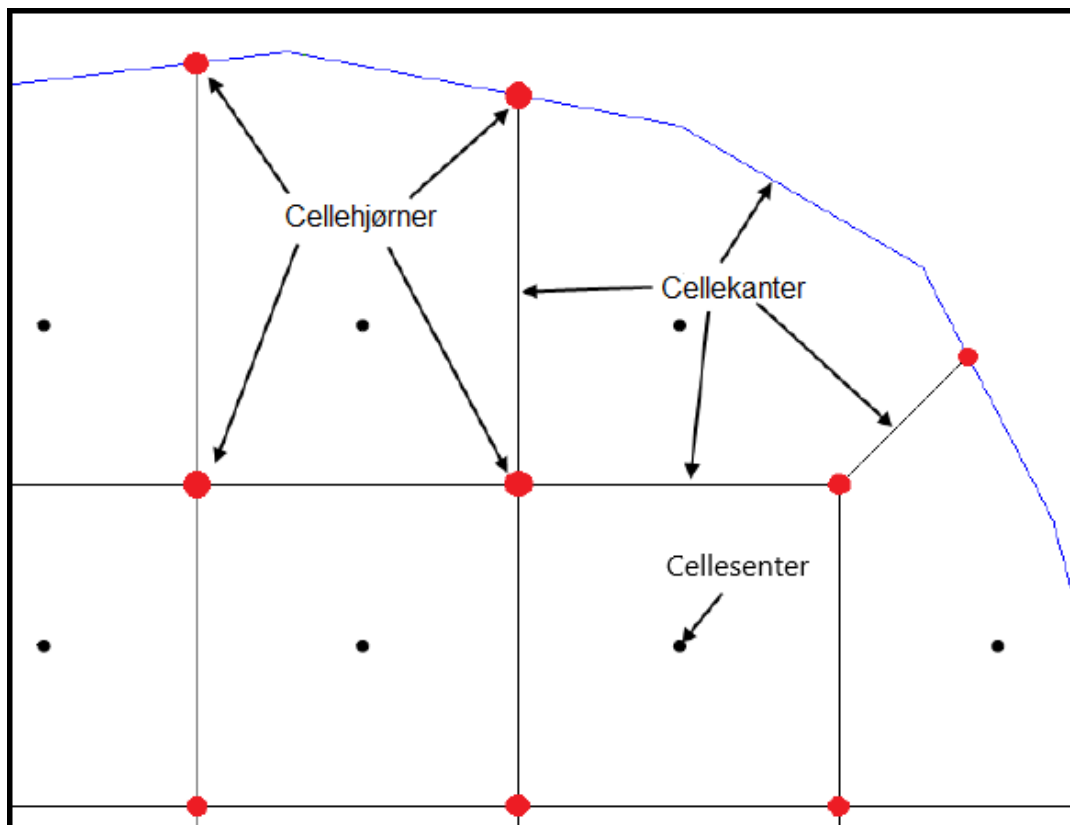
### 3.5.5 2D-geometri

Geometrien for en to-dimensjonal HEC-RAS modell er basert på et cellenett som bestemmer den romlige avgrensningen av flommodelleringen. Cellenettet består av celler med varierende størrelse og form, og er lik 1D-tverrsnitt hvor de brukes til å beregne strømmingen av vann mellom cellene. Figur 3.9 viser hvordan cellene i et cellenett består av *cellesenter*, *cellekanter* og *cellehjørner*, Brunner (2016b) viser til disse elementene:

**Cellesenter** (eng: Cell Center): Dette er beregningscenteret for cellen hvor vannets overflatehøyde vil bli kalkulert. Cellesenteret behøver ikke å være i cellens midtpunkt. En celle i et cellenett kan bare ha ett sellesenter.

**Cellekant** (eng: Cell Face): Dette er cellens avgrensninger innad i cellenettet. Cellekanter er rette linjer ved andre celler, eller det kan være linjer med knekk mot cellenettets avgrensning. En celle kan maksimalt grense til 8 andre celler.

**Cellehjørne** (eng: Cell Face Point): Cellehjørne er endene av cellekantene. Disse punktene brukes til å koble cellenettet sammen med 1D-elementer eller *grensebetingelse* (eng: Boundary conditions).

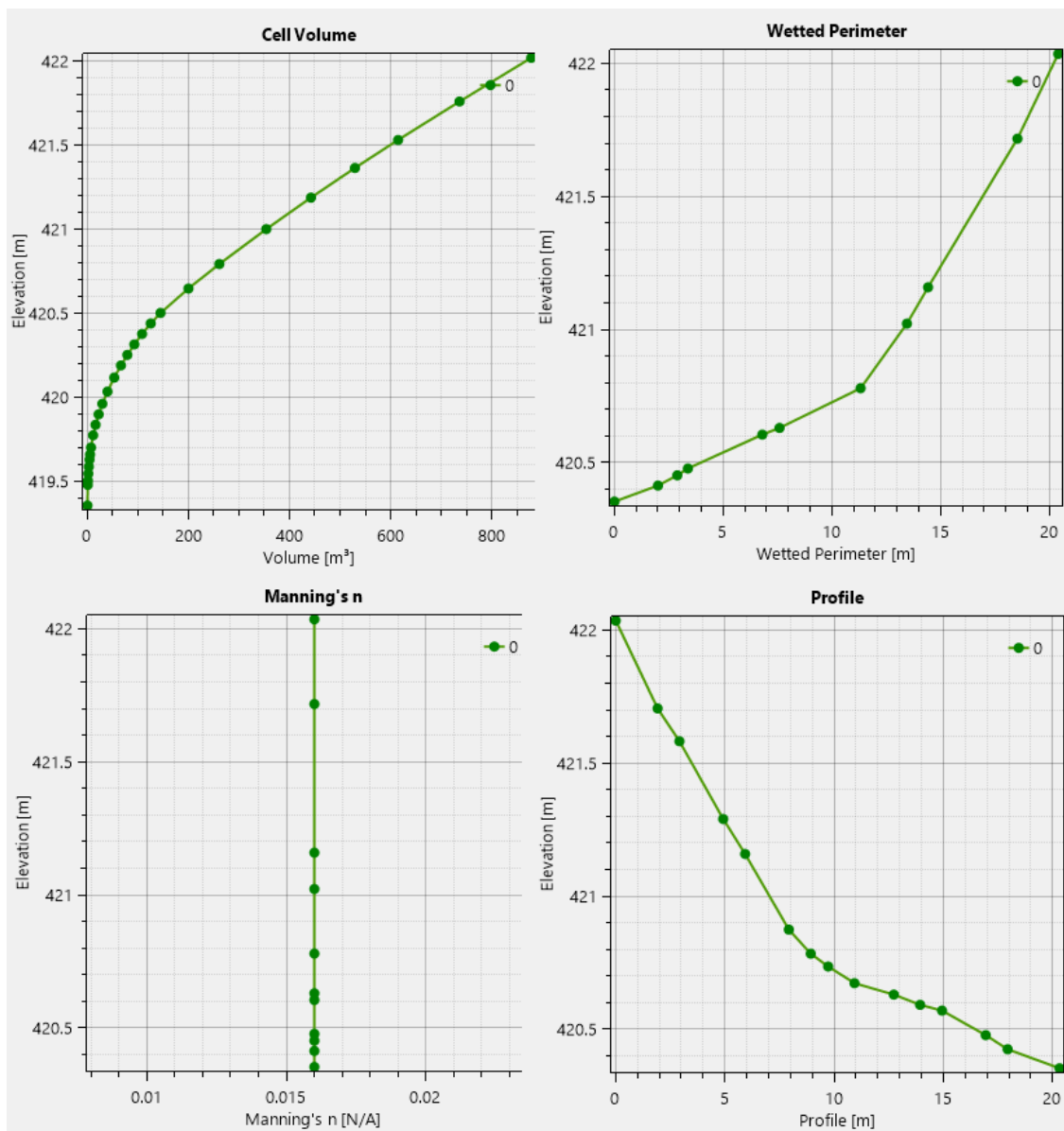


Figur 3.9: Cellestrukturen i HEC-RAS 2D-cellenett (Brunner, 2016b, redigert av forfatter)

I 2D-geometri trenger en ikke å definere ineffektive-strømnings-områder da disse blir automatisk beregnet i ligningene brukt for 2D ustødig-strøm (Brunner, Savant, & Heath, 2020).

Prosesseringstid er direkte tilknyttet antall celler i cellenettet, jo flere celler jo lengre prosesseringstid. Størrelsen på cellene bør være små nok for å oppnå nøyaktige beregninger, men store nok for å unngå unødvendig lang prosesseringstid. Cellesystemet i HEC-RAS baserer seg på en modell kalt *high resolution subgrid model* (nor: høyoppløselig-undernettmodell). Denne modellen betyr at HEC-RAS bruker representasjoner av det underliggende terrenget, altså digitale terrengmodeller, for å skape geometriske og hydrauliske egenskaper for cellene. Ved genereringen av 2D-cellenettet skjer en førprosessering hvor cellers hydrauliske egenskaper beregnes. Her blir forholdet mellom høyde og form, areal, fuktet-

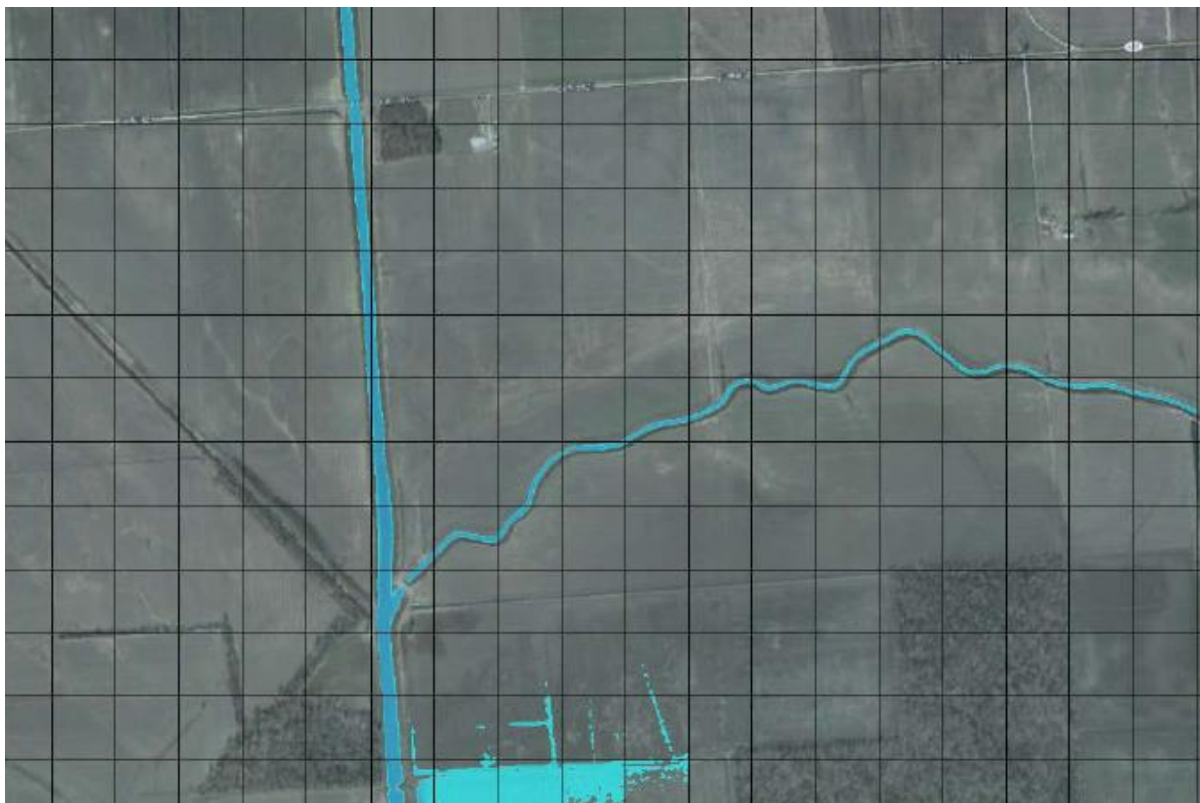
område og Mannings n-verdi beregnet for hver enkelt cellekant i cellenettet, noen av disse blir vist til i figur 3.10. Strømningen av vann styres av de hydrauliske egenskaper og det underliggende terrenget, samt vannets momentum ved inngang og utgang av celler. Vannets momentum beregnes ved cellekantene som opererer likt 1D tverrsnitt, som tar inn informasjon om det underliggende terrenget (Brunner, 2016b; Forest, 2020).



Figur 3.10: Utsnitt av en celles hydrauliske egenskaper beregnet ved forprosessering.

Denne subgrid-modellen fører til at HEC-RAS kan oppdage veien vannet «ønsker» å ta inn og ut av cellen. Dette betyr at i HEC-RAS kan det brukes større celler uten å miste for mye viktig informasjon om det underliggende terrenget. Figur 3.11 viser hvordan vannet holder seg i elveløpet selv med store celler. Større celler betyr redusert prosesseringstid. For store celler i områder hvor vannoverflategradienten er høy vil det føre til feil i beregningene av vannstanden

og energitap. Ved 2D flommodellering i HEC-RAS kan det brukes relativt store celler, så lenge cellene er veltilpasset det underliggende terrenget (Brunner, 2016b; Forest, 2020).



*Figur 3.11: Flyten av vannet følger det underliggende terrenget selv med store celler ved bruk av subgrid-modellen (Brunner, 2016b).*

### 3.5.6 Redigering av 2D-cellenett

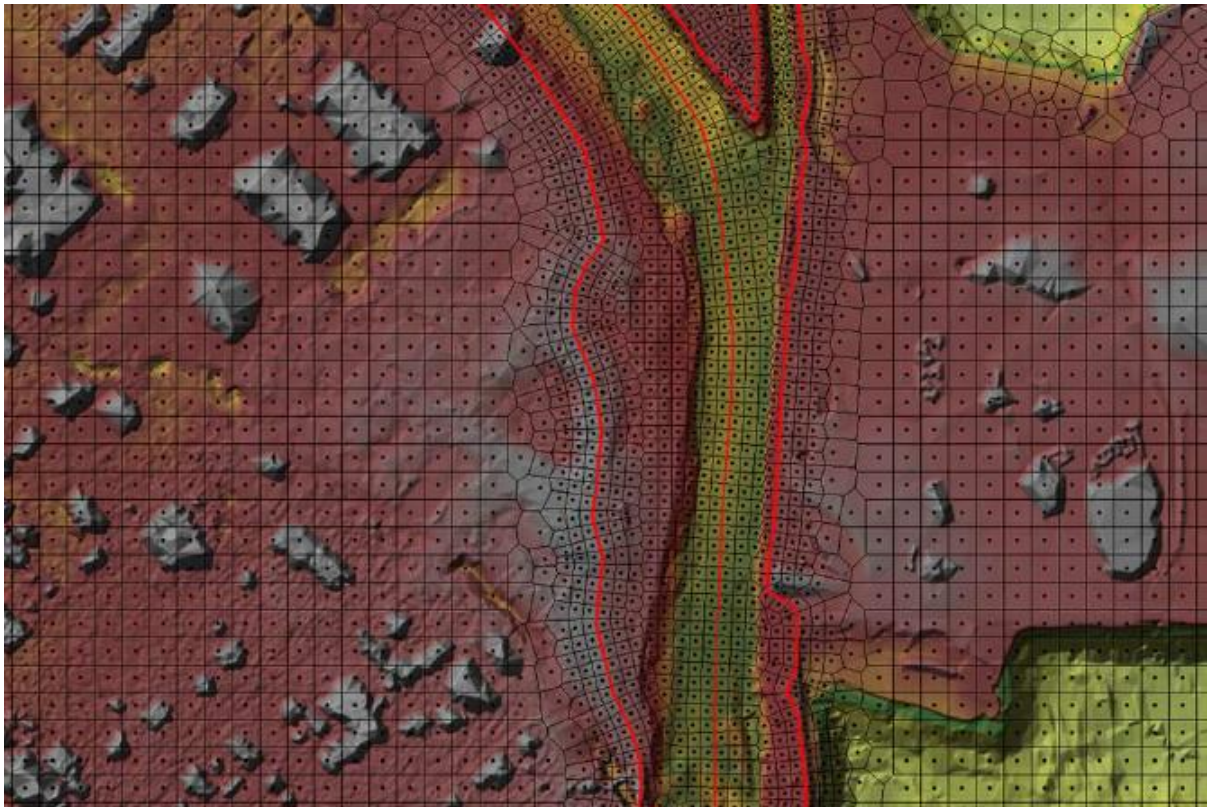
*Bruddlinjer* (eng: breaklines) er linjer en tegner inn over 2D-cellenettet for å definere brå forandringer i terrenget og hvor det er mulige forstyrrelser av vannstrømmen. Bruddlinjene tvinger celle-fjesene i cellenettet til å tilpasse seg til bruddlinjen slik at ingen celler krysser over den tegnede linjen. For at cellenettet best mulig skal representere det underliggende terrenget brukes det bruddlinjer (Brunner, 2016b). Eksempelvis kan bruddlinjer bli brukt ved:

- Flomvoller, veger og andre former som kan virke som en barriere for vannet.
- Plutselig forandringer i terrenget ved for eksempel elvebanker.
- Bruddlinjer kan bli tegnet inn for å øke nøyaktigheten av cellenettet ved å finjustere celler langs bruddlinjene, som ved å tegne inn en senterlinje i elveløpet.

Finjusteringen av cellenettet ved bruk av bruddlinjer muliggjøres ved at en kan spesifisere cellestørrelsene langs bruddlinjen. Dette kan brukes i områder hvor det er nødvendig med mer detaljer, som i brattere eller smalere terreng hvor vannhastigheten kan øke. Elveløpet kan

representeres med store celler, men vil ikke nødvendigvis være veldig nøyaktig eller klare å beregne informasjon om fart. Det er anbefalt å bruke 3-4 celler i bredden av elveløp i 2D-modellering, og 5-10 celler for at modellen skal inneholde god informasjon om gjennomsnitt fart i områder. Ved å tilpasse cellenettet til strømningsveien kan en også redusere diverse numeriske feil som kan skje i løpet av beregningene (Brunner, Savant, & Heath, 2020). I figur 3.12 vises et eksempel på hvordan bruddlinjer kan bli plassert. *Refinement Regions* (RR) er polygoner som kan plottes inn over cellenettet. Dette er et område hvor kanten oppfører seg likt bruddlinje og eventuell finjustering av cellestørrelser skjer inne i polygonen.

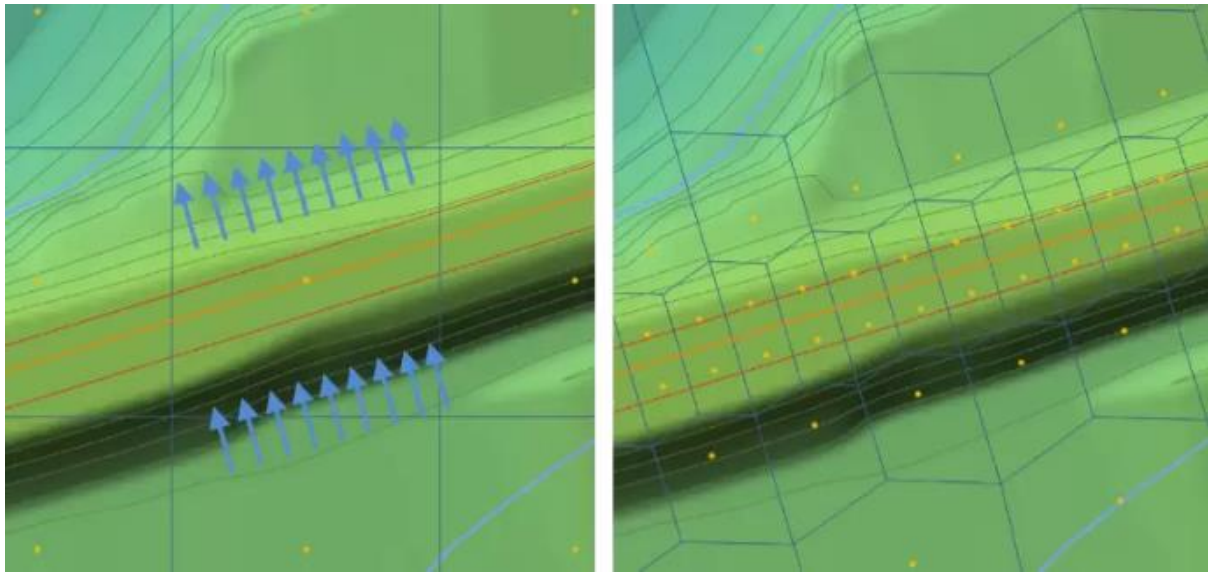
Bruddlinjer brukes til å forme cellenettet etter det underliggende terrengets former, som veger og flomvoller. Disse geometriske linjene hjelper til slik at strømmen skjer i det forventede løpet og at overflommingen skjer først når vannstanden har økt nok til å renne over og ikke ved *lekkasjer* (Brunner, 2016b; CivilGEO, U.å.).



*Figur 3.12: Cellenett med bruddlinjer med finere oppløsning, plassert som senterlinje i elveløpet og ved elvebankene (Brunner, Savant, & Heath, 2020).*

*Lekkasjer* oppstår hvor cellene ikke er tilpasset det underliggende terrenget eller om cellene er for store, og som fører til at vann renner gjennom terreng som burde fungert som strømningsbarrierer. Lekkasjer kan oppstå fordi HEC-RAS bruker høyde-volum forhold for

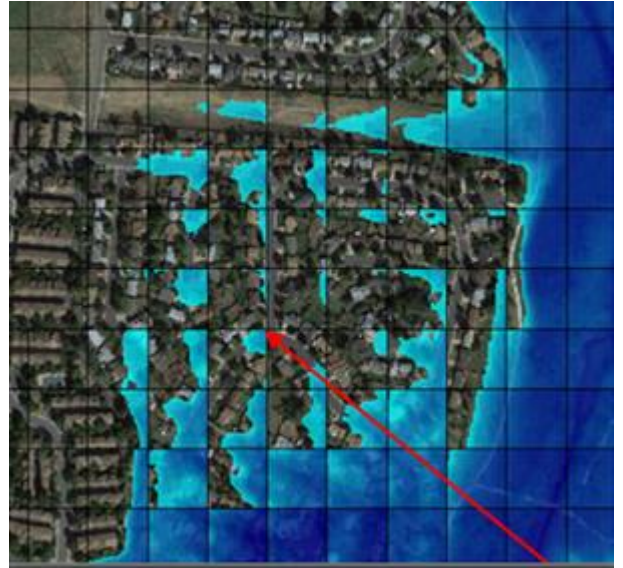
hele cellen ved beregninger av vannets bevegelser. Ved lekkasjer vil HEC-RAS løse beregningene i cellen ved at den er våt på en viss høyde som fører til at programmet markerer resten av cellen i den høyden som våt, da HEC-RAS ikke vet hvor strømningsbarrieren er om den ikke er ved cellekantene. Dette løses med høyere oppløsning i cellenettet eller bedre tilpasset celler ved bruk av bruddlinjer (se figur 3.13). Lekkasjer kan også oppstå av feil i terrenngmodellen, hvor strømningsbarrierer ikke er «tette» etter prosesseringen av lidardata (Goodell, 2015a).



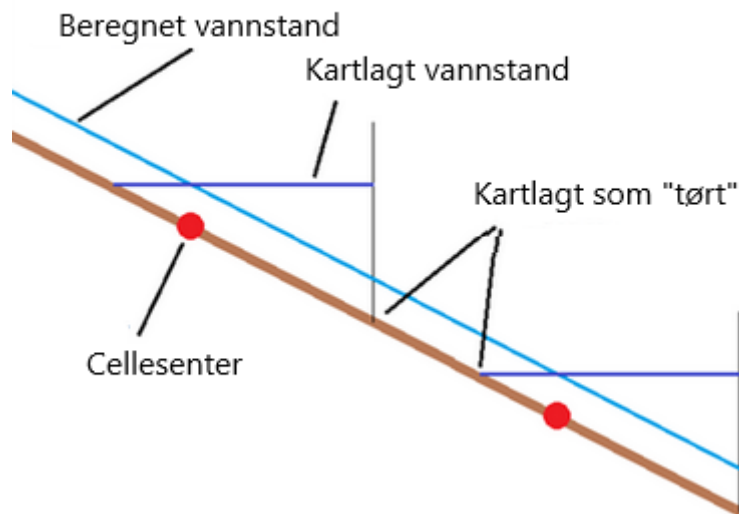
*Figur 3.13: Bildet viser hvordan vannet vil ikke ta hensyn til blokkeringen på grunn av cellens størrelse (venstre), og hvordan bruddlinjer lagt oppå strømningsbarrieren vil "tette igjen" terrenget (høyre) (CivilGEO, U.å.).*

Redigering av cellenettet ved bruk av bruddlinjer er en iterativ prosess hvor en undersøker tidligere resultater av flommodellen for å finne områder hvor det kreves mer detaljer, eller forhindre lekkasjer (Brunner, 2016b; CivilGEO, U.å.).

*Fragmentert oversvømmelse* (eng: *Fragmented inundation*) er noe som likner på lekkasjer ved at det fremstilles som flekkete dannelse av vann i modellen (se figur 3.14). Dette betyr derimot at det ikke er nødvendigvis noe galt med modelleringen, dette fenomenet er stort sett knyttet til noe grafisk som skjer da celler blir våte ved lav vannstand, gjerne i områder med helning. Hovedårsaken til fragmentert oversvømmelse er at HEC-RAS beregner én vannstand for hver enkelt celle. Ved høyere vannstand vil fragmentert oversvømmelse ikke ha stor betydning da området vil ofte være helt eller delvis oversvømt (Goodell, 2015b).



Figur 3.14: *Fragmentert oversvømmelse* (Goodell, 2015b)



Figur 3.15: *Hvordan HEC-RAS kartlegger grunt vann i helning* (Goodell, 2015b, redigert av forfatter)

Som vist i figur 3.15 vil en korrekt vannstandsgradient blir kalkulert av HEC-RAS, men blir plottet inn i kartet som oppdelte stykker. Dette kan løses med høyere oppløsning av cellenettet. I nyere utgaver av HEC-RAS har en mulighet til å interpolere resultatet av flommodelleringen som da vil da fjerne noe av de fragmenterte oversvømmelsene (Goodell, 2015b).

### 3.5.7 Grensebetingelser

Grensebetingelser (eng: boundry condition) er hvor vannet føres inn eller tas ut av modellen. I en to-dimensjonal flommodell kreves grensebetingelser ved kilde av vannstrømning og ved utgang av modellen. Grensebetingelsene kan være eksterne eller interne. Eksterne grensebetingelser tegnes inn som en linje utenfor cellenettet oppstrøms og nedstrøms, hvor de fester seg til cellekantene ytterst i cellenettet. Interne grensebetingelser kan være områder med nedbør. Det er flere typer grensebetingelser og disse er; *Flow Hydrograph*, *Stage Hydrograph*, *Normal Depth*, *Rating Curve*, og *Precipitation* (Brunner, 2016b). I denne flommodelleringen er det brukt *Flow Hydrograph* (nor: Strømningshydrograf) for oppstrøms og *Normal Depth* (nor: Normal dybde) for nedstrøms.

**Flow Hydrograph:** En strømningshydrograf viser vannføring over tid og behøver parametere som vannføring ved gitte tidspunkt og en energigradient. Energigradienten brukes til å beregne normal dybden ved oppstrøms grensebetingelse, som videre brukes til å distribuere vann til cellene ved grensebetingelsen. For høy energigradient gjør at beregningene vil føre til lavere vannstand og høyere strømningsfart, som kan videre føre til ustabiliteter i beregningene. Vannføringen i en strømnings-hydrograf krever tall for hvert enkelt tidsintervall, hvor den temporale oppløsningen bestemmes av bruker eller følger med data for vannføring. I HEC-RAS kan man interpolere mellom gitte tall for vannføring og dermed fylle hydrografen om en ikke har tall for hvert enkelt intervall (Brunner, 2016b).

**Normal Depth:** Normal dybde brukes til å ta vann ut fra modellen. Her plotter man inn en energigradient for området som brukes i Mannings ligning for å beregne normal dybde for cellekantene ved grensebetingelsen. Likt som i oppstrøms grensebetingelse vil for høy energigradient føre til høyere strømningsfart og lavere vannstand som kan føre til ustabiliteter (Brunner, 2016b).

### 3.5.8 Beregningsintervaller

HEC-RAS løser ligningene presentert i kapittel 3.5.2.1 med intervaller basert på distanse og tid, dette beregningsintervallet heter innad i programmet *Computational Time Step*. Modellens stabilitet og numerisk nøyaktighet avhenger av et beregningsintervall som passer for de hydrauliske egenskapene i cellenettet. Beregningsintervallet er en av de viktigste parameterne i modelleringen, og er ofte en av hovedgrunnene til lang prosesseringstid i to-dimensjonale flommodeller. For store beregningsintervaller kan føre til unøyaktige resultater, og ustabiliteter



i modellen. For små beregningsintervaller kan føre til veldig lang prosesseringstid, ustabiliteter, og numeriske feil ved ekstremt små intervaller. Et passende beregningsintervall vil være stort nok til å ikke føre til unødvendig lang prosesseringstid, og være lite nok for nøyaktige resultater (Brunner, 2016c; Renkenberger, 2020).

En måte å finne et passende beregningsintervall på er å bruke *Courant betingelsen*, også kjent som Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) betingelsen. Courant tallet er en stabilitets verdi i kalkulering av fluiddynamikk ved bruk av partielle differensialligninger (Renkenberger, 2020).

*Formel 4: Courant betingelsen*

$$C = \frac{V_w \Delta T}{\Delta X}$$
$$\Delta T = \frac{C \Delta X}{V_w}$$

hvor  $C$  er Courant tallet,  $V_w$  er strømningshastighet,  $\Delta T$  er beregningsintervallet, og  $\Delta X$  er den gjennomsnittlige størrelsen på cellene i cellenettet.

I HEC-RAS er standardinnstillingen å bruke et fast beregningsintervall for hele modelleringen, men en kan bruke et automatisk justert beregningsintervall basert på Courant tallet. Ved bruk av denne innstillingen kan en ha fordelene med lavere prosesseringstid og mer nøyaktige beregninger ved å plote inn et maksimum og minimum Courant tall. Under prosesseringen av flommodellen vil beregningstallet variere basert på hva som ble plottet inn. Ved lavere vannføring hvor det ikke er mye hydraulisk aktivitet vil et høyere Courant tall bli brukt som gir et høyere beregningsintervall, og ved høyere vannføring brukes et lavere Courant tall slik at beregningsintervallene blir tilpasset den økende hydrauliske aktiviteten. Ved bruk av beregningsmetoden Full Momentum kan Courant tallet være så høyt som 3, og opp til 5 ved bruk av Diffusion Wave (Brunner, 2018).



## 4 Data

---

For detaljert flommodellering med høy nøyaktighet er det viktig med data av god kvalitet, spesielt viktig er terrengdata, batymetrisk data, godt tilpasset 1D eller 2D geometri i modellen, og hydrologisk data. Resultatet vil være avhengig av kvaliteten på dataen brukt (Brunner, Savant, & Heath, 2020).

Data brukt i denne flomsonekartleggingen er hentet fra diverse nettkilder som blir vist til senere i kapittelet. Tall og justeringer for parametere innad i HEC-RAS er basert på anbefalinger fra brukermanualene som følger med programvaren, tips og råd fra blogginnlegg og forumtråder fra nettstedet «The RAS Solution» (<https://www.kleinschmidtgroup.com/the-ras-solution/>) laget av Chris Goodell, en tidligere utvikler av HEC-RAS. I tillegg har jeg brukt tips til innstillinger og redigering av batymetri fra diverse opplæringsvideoer laget av Krey Price fra Surface Water Solutions, et firma for konsultasjon og opplæring av modellering med HEC-RAS. Noe av dataen og tallene brukt i denne flomanalysen fører med seg usikkerheter ved høy grad av estimering fra min side på bakgrunn av enten utilgjengelig data, lite kunnskap til enkelte deler av analysen, eller usikkerheter i selve datasettet.

### 4.1 Høydedata

Høydedata er hentet fra Statens Kartverks nettjeneste [hoydedata.no](http://hoydedata.no) i form av en DTM i GeoTiff filformat med oppløsning på 1 meter. Datasettet er fra skanninger gjort i 2013. Detaljer i terrengdataen er viktig for at HEC-RAS skal muliggjøre en så detaljert og nøyaktig hydraulisk analyse som mulig (Brunner, 2016b). Det var muligheter for nedlastning av terrengdata med 0.25 meter oppløsning, som betyr enda mer detaljer i terrenget, men også lenger prosesseringstid (Hengl & Evans, 2009). Jeg valgte å bruke 1 meters oppløsning på terrengdataen fordi denne oppløsningen fulgte med gode nok detaljer i terrenget samt reduserte noe av prosesseringstiden.

### 4.2 Flomdata

Flomtallene er hentet fra NVEs NEVINA (Nedbørsfelt- og vannføringsindeksanalyse) (<https://nevina.nve.no/>). Dette er en karttjeneste hvor en kan finne ett punkts tilhørende nedbørsfelt med feltparametere, klima- og hydrologiske parametere, og estimat av lavvannsindekser og flomverdier. NEVINA er et automatisk system som beregner verdier ut fra rutiner og regler som kan føre til feil i data. Vassdragene blir antatt uregulerte da NEVINA

beregner feltparameterne basert på naturlige feltgrenser, dermed er reguleringsprosenten ikke tatt hensyn til. Særlig tallene for lavvannsindekser og flomverdier har en høy grad av usikkerhet da de avhenger mye av områdets geografiske beliggenhet og hydrologiske forhold. NVE anbefaler NEVINA som et utgangspunkt i analyser og planleggelser av tiltak, men behøver supplementer av hydrologiske vurderinger og analyser før endelig tiltak (NVE, 2019).

Ifølge Lawrence (2016) vil ekstremnedbør og regnflommer øke i hele landet, mens det vil bli mindre og færre snøsmelteflommer, da snøen vil smelte oftere og ikke klare å akkumulere til store masser. NVE anbefaler 0%, 20% eller 40% klimapåslag i flomverdier ved kartlegging av flomfarer knyttet til en 200-årsflom i år 2100 langs vassdrag i Norge (Lawrence, 2016). Generelt på Østlandet vil det være en reduksjon i flomstørrelse i større vassdrag, fra rundt 20-29% for vassdrag i gamle Hedmark. I gamle Oppland er det varierende endringer fra liten reduksjon til betydelig økning på 21-30%, økningen befinner seg særlig i den nordligste delen av fylket (Lawrence, 2016). Lawrence (2016) nevner at ved kartlegging for Gudbranddalslågen, ei elv som renner på nordre side av Reinheimen og møter Ottaelva ved tettstedet Otta i Sel kommune, vil det være anbefalt et klimapåslag på 20%.

Tallene for 200-årsflom i Otta ved Bismo med og ut klimapåslag hentet ut fra NEVINA vises til i tabell 1. Disse tallene er automatisk genererte og en velger selv et klimapåslag på 0%, 20% eller 40% for flomdataen. Jeg valgte 20% da Lawrence (2016) viser til 20% økning i flomsonekartene for Vågåmo, som består av vassdragene Finna og Otta, og for tettstedet Otta, som består av vassdragene Lågen og Otta. Jeg valgte å følge tallene vist i tabell 1 da jeg ikke har funnet noe som sier annet om utviklingen av flom i Ottaelva ved Bismo.

*Tabell 1: Flomverdier hentet fra NEVINA for 200-årsflom med og uten klimapåslag i Otta ved Bismo.*

<b>Flomberegning</b>	<b>200-årsflom</b>
Flom i dagens klima (m <sup>3</sup> /s)	780
Flom med 20% klimapåslag (m <sup>3</sup> /s)	936

Historisk data for vannføring og vannstand ved Ofossen målestasjon (nr.2.434.0) er hentet fra NVE (2020e).

## 4.3 Arealdekket

Data for arealdekket i studieområdet er hentet fra NIBIO (Norsk institutt for bioøkonomi). Datasettet er FKB-AR5 og inneholder data om hovedarealtypene innenfor ett gitt område delt inn i opptil tolv arealressursklasser i målestokk 1:5 000. AR5 inneholder en viss grad av generalisering hvor jordbruksarealer under 0,5 dekar ikke registreres, normalt blir ikke andre arealer mindre enn 2 dekar og striper smalere enn 2 meter registrert som egne områder (Ahlstrøm, Bjørkelo, & Fadnes, 2019). I HEC-RAS behøves et lag med arealtyper for å definere områder for underlagets ruhetskoeffisient, en kan definere områder innad i programmet eller importere arealdata.

## 4.4 Bygninger og veg

Data for veger og bygninger er hentet fra FKB (Felles kartdatabase) og er brukt til å vise utsatte veger og bygninger ved Bismo. Bygninger er også blitt slått sammen med AR5 for å sette en ruhetskoeffisient innad i bygningspolygonene, dette forklares nærmere i kapittel 5.2.1.



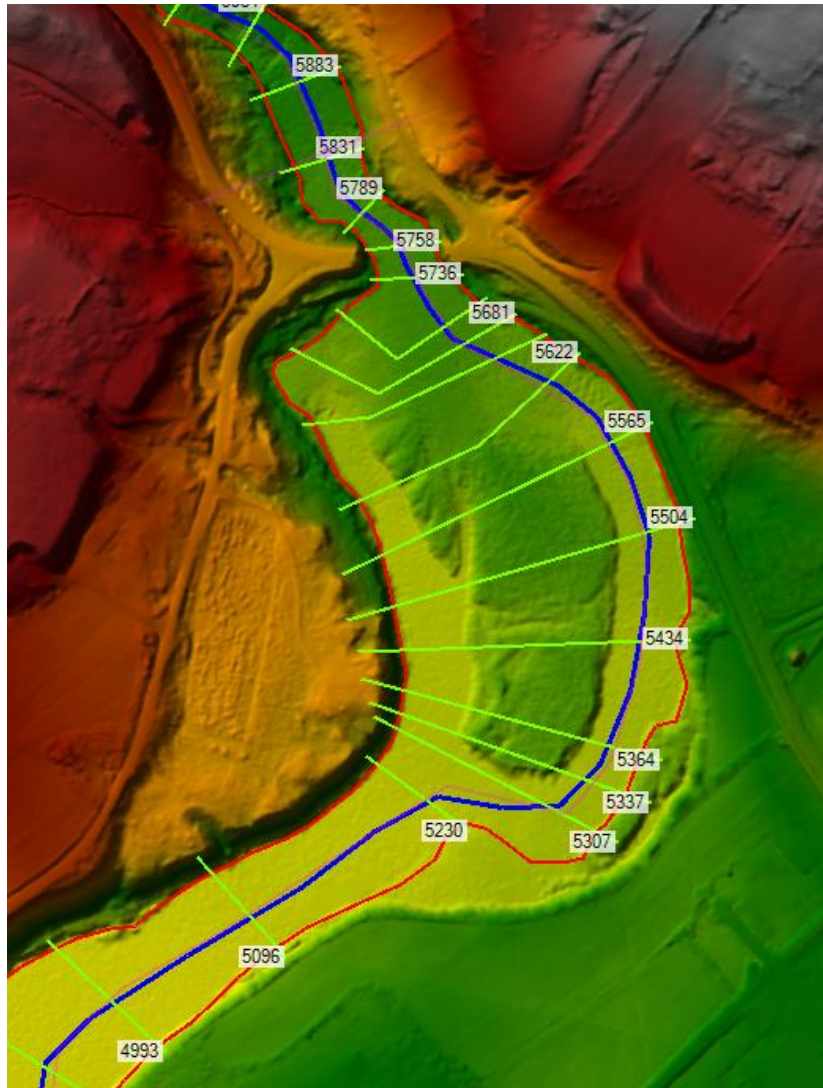
## 5 Metode

---

### 5.1 Batymetri

Terrengmodellen over studieområdet inkluderte ikke bunndata for Otta da lidarskanningene ikke har penetrert vannet. Dette fører til at vannoverflaten blir betraktet som en del av terrenget og bunnen av elva ikke blir tatt i betraktning av HEC-RAS. Mangel på batymetrisk data skaper trøbbel for flomsonekartleggingen da elvekantene vil ha mindre betydning og lettere føre til overflomming ved lavere vannføring, som da fører til et unøyaktig og urealistisk resultat. I HEC-RAS er det mulig å redigere terrengmodeller ved å bruke 1D elvegeometri til å interpolere terrenget mellom tverrprofiler. I brukermanualene er det beskrevet en måte å interpolere mellom tverrsnittene om en allerede har oppmålte tverrsnitt av elva (Brunner, 2016b). Det er ikke laget offentlige tverrsnitt av Otta ved Bismo så langt jeg har funnet, dermed måtte jeg estimere tverrsnittene selv. Denne teknikken er hentet fra en opplæringsvideo av Krey Price, som også nevner at det vanskeligste med batymetrisk data er tilgang (The RAS Solution, 2018a).

Først lagde jeg ett sett med 1D elvegeometri i RAS Mapper som jeg senere kunne redigere og eksportere som en egen terrengmodell før jeg så kunne sette den sammen med den originale terrengmodellen. Beskrivelsene av 1D-geometrien videre blir vist til i figur 5.1. Den blå linjen er elv-senterlinje som representerer hovedløpet til elva og ble plassert der hvor jeg antar midten av elveløpet er, samt der hvor det er mest vannføring som anbefalt av brukermanualen (Brunner, 2016a). De røde linjene blir opprinnelig brukt til å definere elvebankene slik at ruhekkoeffisienten kan defineres for forskjellige deler av tverrprofilene i en 1D modell. Her blir de brukt til å avgrense «utgravningen» av terrengmodellen da interpoleringen skjer mellom de to røde linjene. De ble plassert så nære elvebankene som mulig og ved vannoverflaten for å ikke grave ut noe av terrenget rundt. De grønne linjene er tverrsnittene som gir et bilde av terrengmodellen i profil og brukes til beregningen av vannstander i en 1D flommodell i HEC-RAS. Her blir de brukt for å lage punkter i elva som den nye elvebunnen skapes ut fra gjennom å interpolere posisjonsdataen for tverrsnittene (Brunner, 2016b). I lange strake deler av elva var det ikke nødvendig å tegne inn mange tverrsnitt da det ikke er store forandringer mellom hvert tverrsnitt. I områder med svinger, brattere helning og områder hvor elva blir smalere satt jeg inn flere tverrsnitt for å sørge for at noe av detaljene i området ble ivaretatt.



Figur 5.1: Utsnitt av 1D-geometrien bruk for å redigere batymetri med tverrsnittenes stasjonsnummer, som viser tverrsnittets plassering langs elv-senterlinje.

Et utfordrende område var ved Skeisøyi, vist i figur 5.1. Her deler Otta seg med to løp rundt øya. Jeg har tolket at hovedløpet er i venstre kanal sett fra oppstrøms, basert på flyfoto fra norgebilder.no. Jeg valgte å lage tverrsnitt som dekket hele bredden av elva for å få med punkter for begge elveløpene, dette betyr at interpoleringen vil ta med Skeisøyi. Dette valget ble gjort etter å ha kommet over en kommentar fra Goodell på bloggen The RAS Solution om en situasjon lik den i Otta, som forteller at det er opp til den enkelte situasjon om en tar med hele elveløpet eller bare tar den ene kanalen (Goodell, 2014). Jeg valgte å ta hele elveløpet da Skeisøyi ikke har noe bebyggelse eller andre objekter av interesse.

Jeg forsøkte å få tverrsnittene i begge elveløpene rundt Skeisøyi vinkelrett til elveløpene, dette ble gjort ved å sette et ekstra punkt da jeg tegnet inn tverrsnittene. Ved å sette tverrsnittene vinkelrett til elveløpene rundt øya var det lettere å redigere tverrsnittene senere, og sørge for at



elveløpene ble best mulig representert. Ved en tidligere iterasjon av batymetrien plottet jeg inn tverrsnittene vinkelrett til elveløpet i sin helhet. Dette skapte en kantete representasjon av elvebunnen i visse områder da det var vanskelig å lage en naturlig kanal i svingene. Siden jeg valgte å plote inn tverrsnittene over hele elveløpet førte dette til at redigeringen dekket også øya da alt mellom elvebanke-linjene blir interpolert.

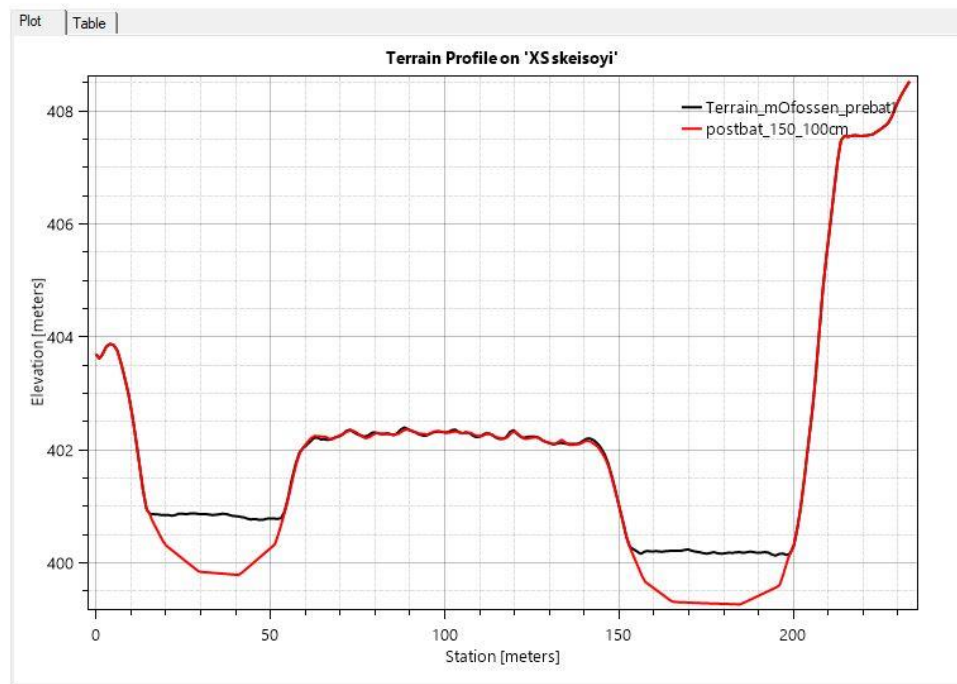
Etter å ha lagd en 1D elvegeometri begynte jeg å redigere tverrsnittene, det ble gjort ved å gå gjennom hvert enkelt tverrsnitt for å plassere punkter på en lavere høyde enn opprinnelig. Jeg brukte et flyfoto fra norgebilder.no vist i figur 5.2. Flyfotoet er tatt ved lav vannføring som gjorde det mulig å se noe av konturene i elva. Siden jeg ikke hadde noe informasjon om hvor dyp elva er, valgte jeg å ta et forsiktig utgangspunkt ved å sette dybden midt i elveløpet på 1 meter lavere enn vannoverflaten i terrengmodellen. Etter testing av den nye elvebunnen endte jeg opp med å la dybden være 1-2 meter i midten av elveløpet basert på hvordan jeg tolket flyfotoet. Denne dybden ga ingen overflomming ved normalvannføring i modellen.



*Figur 5.2: Utsnitt av flyfotoet av Otta med lav vannføring i 2015 ved Skeisøyi, skjermdump fra norgebilder.no.*

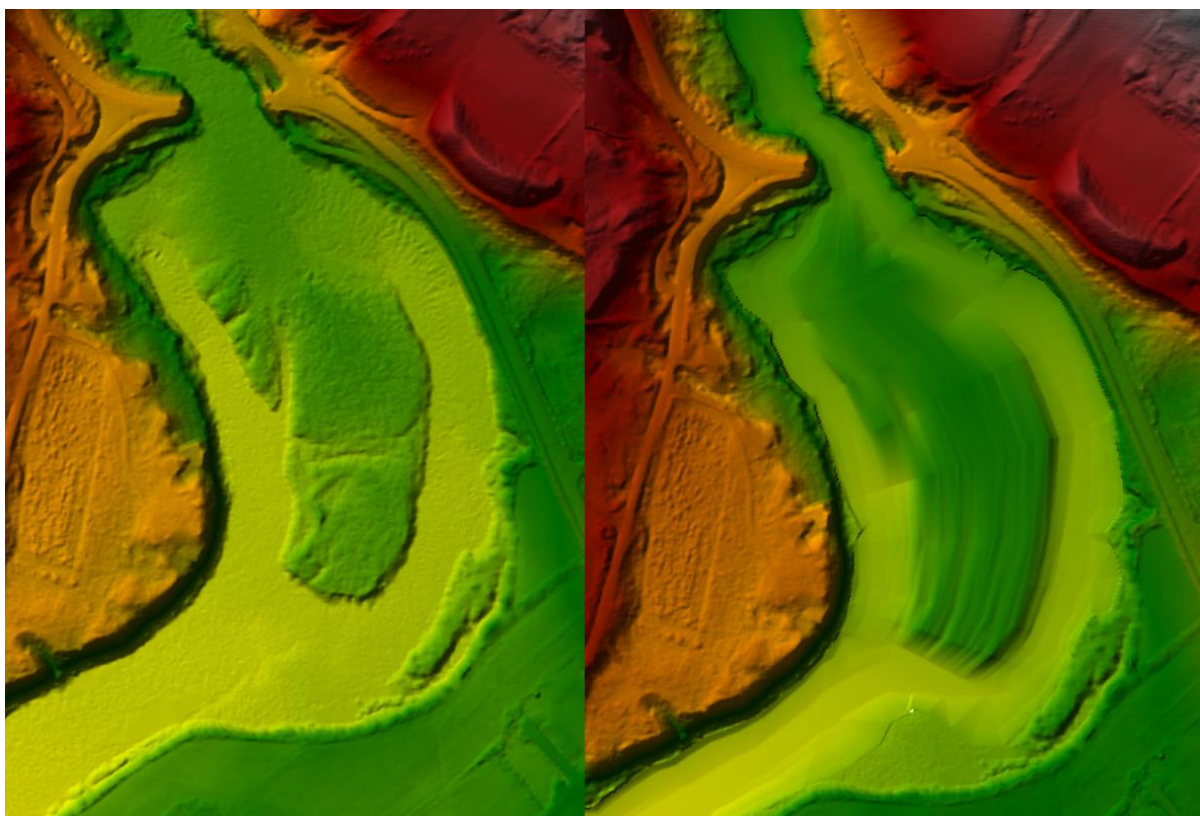
Etter justeringene i tverrsnittene eksporterte jeg de redigerte tverrsnittene som et GeoTiff-lag med 1x1 meter oppløsning, for å ha samme oppløsning som resten av terrengmodellen. Videre måtte jeg kombinere den redigerte elvebunnen med den opprinnelige terrengmodellen. Dette

gjøres innad i HEC-RAS hvor en har mulighet til å legge til flere terrengmodeller og slå disse sammen. Rekkefølgen lagene ligger i bestemmer hvilken pikselverdi rasterlaget skal ha i eventuelle overlappende områder. Den nye terrengdataen ble lagt over den opprinnelige terrengmodellen som overskriver terrenget i områdene der det hadde blitt gjort forandringer. I figur 5.3 vises terrengmodellen ved tverrsnitt 5504 (se figur 5.1 for lokasjonen til tverrsnitt 5504) før og etter redigering av batymetri.



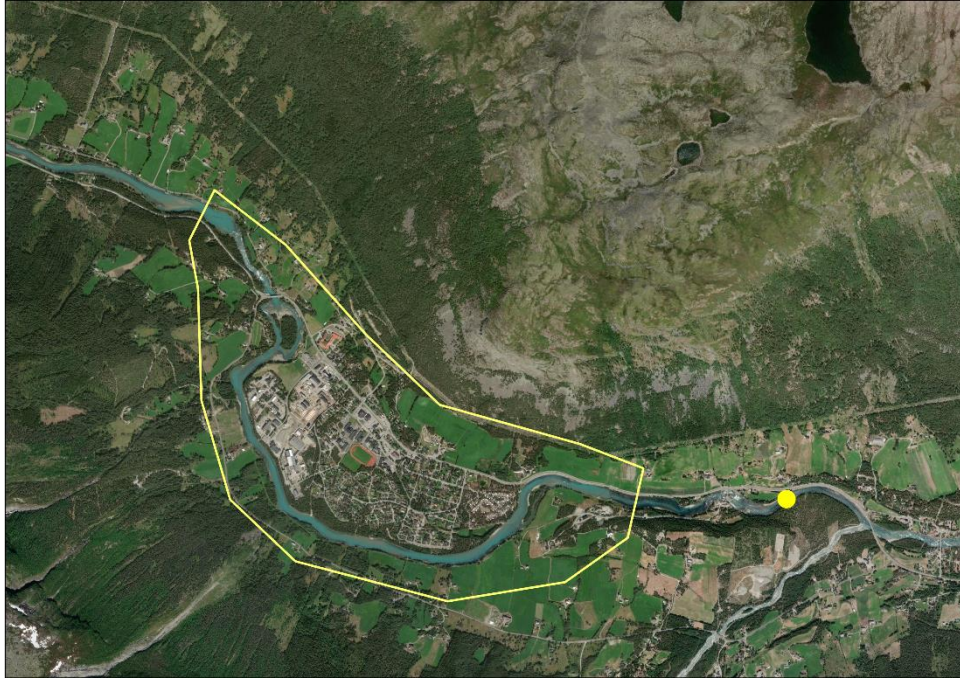
Figur 5.3: Tverrsnitt 5504 ved Skeisøyi sett fra oppstrøms med opprinnelig terrengmodell i svart og modifisert i rødt.

Elvebunnen etter denne sekvensen er forenklet, men inneholder et estimat av dybde i vassdraget. Noe av detaljene i den opprinnelige terrengmodellen forsvinner da denne prosessen danner en ny overflate i terrengmodellen basert på interpoleringen av de nye punktene jeg la inn i tverrsnittene. Her blir detaljene ved områder i den opprinnelige terrengmodellen utelukket. Dette fører til at hele elvebunnen blir «glattet ut», inkludert Skeisøyi. Figur 5.4 viser til terrengmodellen ved Skeisøyi før og etter redigering av batymetri. Denne glattheten har lite til ingen påvirkning på flomberegningen da terrenget brukes til å kalkulere høyde-volum forholdet for cellene og Mannings n-verdi tar underlagets egenskaper i betraktning. Disse områdene inneholder ingen bygninger, veg eller liknende objekter av interesse for denne flomanalysen.



Figur 5.4: Utsnitt av terrengmodellen ved Skeisøyi før (venstre) og etter (høyre) modifiseringen.

Jeg hadde ingen data for vassdragets dybde i studieområdet som ledet til at jeg måtte prøve meg fram med forskjellige dybder for å finne ut hva som fungerte best. Nedstrøms Bismo ligger Ofossen målestasjon (nr.2.434.0) som er kontrollert av NVE (se figur 5.5). Jeg hentet ut data for vannføring og vannstand slik at jeg kunne kalibrere redigeringen av batymetrien. Jeg kalibrerte med vannføring og vannstand fra rett før oktoberflommen i 2018 og ved flomtoppen. Med disse data kunne jeg finne en batymetri hvor vannstanden i modellen var nokså nær dokumentert vannstand ved Ofossen målestasjon. En svakhet her er at vannføringen ved målestasjonen er høyere enn oppstrøms Bismo på grunn av bekkene som renner inn i Otta ved Bismo. Dette fører til at jeg ikke kan kalibrere batymetrien til lik nøyaktighet i resten av elveløpet som jeg kunne ved målestasjonen. Vannstand ved målestasjon Ofossen var vist i meter over havet uten desimaler, som gjorde det vanskelig å si hvorvidt tallet er rundet opp eller ned.



Figur 5.5: Avgrensning av studieområdet rammet inn i gult, med Ofossen målestasjon markert med gul prikk..

Oppmålt vannstand ved start av oktoberflommen er 388 meter over havet, vannstanden ved flomtoppen under oktoberflommen er 391. Modellert vannstand med vannføring lik start av oktoberflommen ligger på omtrentlig +12 cm fra oppmålt vannstand. Ved flomtopp under flommen i 2018 er modellert vannstand -42 cm under oppmålt. Siden den oppmålte vannstanden ved Ofossen er vist som heltall var det vanskelig å si noe om hvor realistisk kalibreringen er. Ifølge en rapport for vannlinjeberegning i Bøvra vises det til at en simulert vannstand innenfor  $\pm 30$ cm nøyaktighet er regnet som god representasjon (Fjelstad & Hansen, 2016). Denne kalibreringen er gjort med DSW.

## 5.2 Arealtypenes ruhetskoeffisient

Tallene for arealtypenes ruhetskoeffisient ble hentet fra en tabell vist til i Brunner (2016c) med en oversikt over n-verdier satt av Chow (1959) da jeg ikke hadde data for underlagets faktiske ruhetskoeffisient (vedlegg 5). Valgene for n-verdi ble tatt ved å se på flybilder og bilder fra Google Street View over området, og deretter velge verdier fra listen i Brunner (2016c) som beskrev området til beste kapasitet. Tallene for n-verdi blir vist til i tabell 2. Noen av valgene var mer opplagte enn andre. Åpen fastmark (50) fikk verdien for asfalt da definisjonen av disse områdene er veldig forskjellige, fra ubrukte jorder til søppelplasser (Ahlstrøm, Bjørkelo, & Fadnes, 2019). Asfalt ble valg da idrettsarealet midt i Bismo er definert som åpen fastmark. Tallene ble lagt til i tilhørende polygoner i ArcGIS.

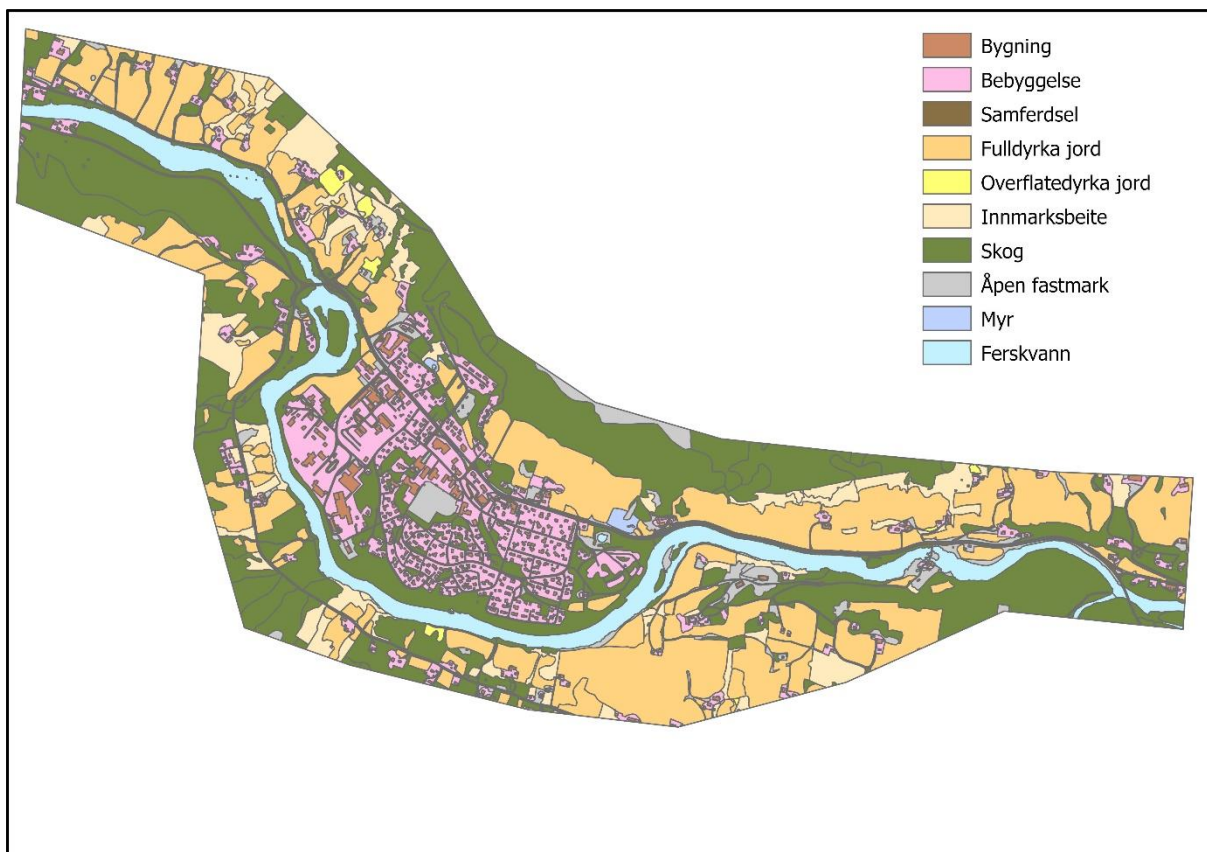
Tabell 2: Oversikt over arealtype, beskrivelse i Chow (1959) og n-verdi.

<b>Arealtype (NIBIO-kode)</b>	<b>Beskrivelse i tabell</b>	<b>Mannings n-verdi</b>
Bebyggelse (11)	Asphalt, rough	0.016
Samferdsel (12)	Asphalt, rough	0.016
Fulldyrka jord (21)	Cultivated areas, no crop	0.030
Overflatedyrka jord (22)	Cultivated areas, no crop	0.030
Innmarksbeite (23)	Pasture no brush, short grass	0.030
Skog (30)	Trees, Heavy stand of timbre, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.100
Åpen fastmark (50)	Asphalt, smooth	0.013
Myr (60)	Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush.	0.100
Ferskvann (81)	Clean, straight, full, no rifts or deep pools, with more stones and weeds	0.035

### 5.2.1 Bygninger

Ved en flomhendelse i urbane strøk vil vann renne langs husveggene eller gjennom husene hvor vannet får trengt inn. I kartlegging av flom vil det være av interesse å se hvordan vannet vil bevege seg med hensyn til bygninger. Vann kan være helt blokkert av bygninger og det må finne en annen vei rundt, men ofte vil vannet trenge inn i hus gjennom vindu, dører, garasjer etc. Syme (2008) viser til noen forskjellige metoder å ta bygninger med i betraktningen ved flommodellering, hvor av to er relevante for modellering i HEC-RAS; 1. Redigere bygningsformer i DTM, og 2. bruke Mannings n-verdi for å vise vannets energitap ved å ta seg inn i bebyggelser. Ved å redigere bygninger inn i terrengmodellen vil de blokkere vannet helt

fra å trekke inn som vil være urealistisk i mange tilfeller da vannet renner ofte inn i bygninger. Dette gjøres med lik metode som redigering av batymetrien, hvor en bruker 1D geometri til å modifisere terrengmodellen, eller å redigere rasterverdiene i ArcGIS. Jeg valgte å bruke Mannings n-verdi da dette var en metode som tar vannets infiltrasjon inn i bygninger i betraktning ved å sette en høyere energitapskoeffisient i bygningspolygonene. Utfordringen i denne metoden er å finne den mest realistiske n-verdien (Syme, 2008). Syme (2008) viser til observerte n-verdier fra 0.08 til 20.0, hvor en n-verdi på 0.3 vil la 21% av passerende vann trenge inn i bygningspolygonen og det resterende vannet renne utenfor. For å ikke la bygninger være for store strømningsbarrierer, og fortsatt ha betydning for energitap ved disse polygonene valgte jeg å bruke 0.3 som n-verdi for bygninger. Det er valgt én n-verdi for alle bygninger da det ville vært veldig tidskrevende å undersøke alle bygningers estimerte n-verdi. Bygningspolygonene ble redigert inn i AR5-laget i ArcGIS ved bruk av *Erase* for å fjerne tidligere data i lokasjonen til bygningspolygonene og *Merge* for å spleise sammen FKB-bygning og AR5 lagene slik at de kunne føres inn i HEC-RAS som ett lag (se figur 5.6).



Figur 5.6: AR5 med bygninger.

## 5.3 2D-geometri

De hydrauliske beregningene gjort av HEC-RAS er som tidligere vist til avhengig av et 2D-cellenett bestående av celler med informasjon om de hydrauliske egenskapene til det underliggende terrenget. Etter at den redigerte terrengmodellen med batymetrisk informasjon var klargjort, opprettet jeg et 2D cellenett. Cellenettet strekker seg fra noe oppstrøms Bismo og nedstrøms ved Ofossen målestasjon, samt dekker potensielt flomutsatte områder basert på NVEs flomaktsomhetskart (NVE, U.å.).

Etter anbefalinger fra brukermanualen lagde jeg først et enkelt cellenett uten bruddlinjer eller andre redigeringer og med relativt høy celle oppløsning, 40x40 meter (Brunner, 2016b). Dette ble gjort for å få en grov oversikt over hvordan vannet vil oppføre seg slik at jeg videre kunne legge bruddlinjer hvor det trengtes. Bruddlinjene ble lagt ved strømningsbarrierer, samt elvebanker og som senterlinje i elveløpet for å tilpasse cellene til strømningsveien.

Jeg gjorde redigeringer i cellenettet etter iterasjoner av flommodellen. For å tette igjen lekkasjer ved noen av strømningsbarrierene ble cellestørrelsen rundt bruddlinjene gjort mindre, slik at flere cellekanter ligger ved strømningsbarrieren. Her ble cellestørrelsen satt til 5x5 meter langs bruddlinjene slik at cellekantene i cellenettet ikke ignorerer strømningsbarrierene. For at modellen skal kunne beregne en mer nøyaktig gjennomsnittlig fart er det anbefalt 5-10 celler i bredden av elveløpet, dermed er cellestørrelsen i elva satt til 5x5 meter med en bruddlinje langs senterlinjen i elveløpet, hovedsakelig på grunn av partiet oppstrøms Skamsar bro. Her er det en brattere helning enn ellers i elveløpet hvor cellestørrelse 5x5 meter vil redusere feil i beregningene under høyere hydraulisk aktivitet. Det er anbefalt at det ikke er store forskjeller mellom naboliggende celler, da det kan føre til feil i beregningene (Brunner, 2016b). Dette førte til at resten av cellenettet fikk en størrelse på 15x15 meter.

Noen partier i elveløpet er veldig vide hvor 5x5 meter cellestørrelse kan være for mange celler i elveløpet slik at det kan føre til ekstra lang prosesseringstid. Det er dermed laget en *Refinement Region* (RR) for hele elveløpet med 10x10 meter. RR er en polygon variant av bruddlinjer hvor cellekantene tilpasser seg ytterkanten til RR og eventuell finjustering av cellestørrelser vil skje inne i polygonen. I figur 5.7 vises en oversikt over det to-dimensjonale cellenettet med bruddlinje langs elveløpets senterlinje, elvebanker, ved strømningsbarrierer på elvesletten, og en RR som dekker hele elveløpet. Ved å ikke bruke cellestørrelser på 5x5 meter på hele elveløpet gikk antall celler ned betraktelig, fra omtrentlig 44 000 celler til omtrentlig

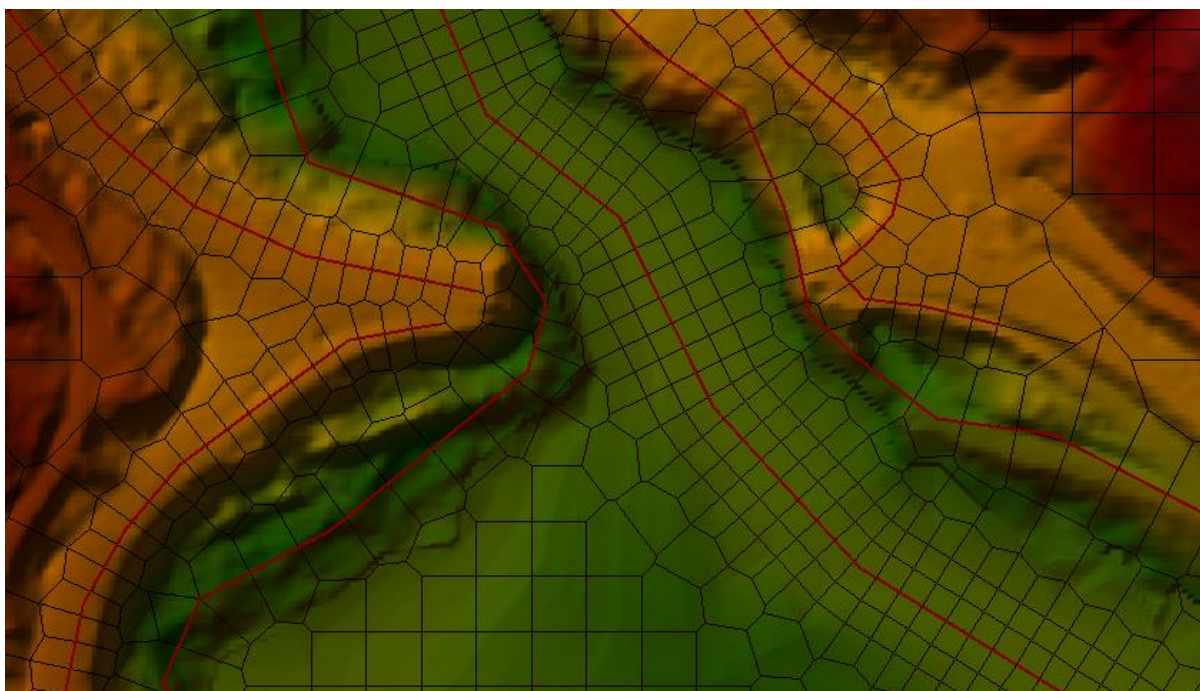
27 000 med ingen forandring i modellert vannstand. Med denne forandringen i cellenettet ble omtrent 50 minutter i prosesseringstid spart.



*Figur 5.7: Oversikt over hele 2D-cellenettet med bruddlinjer langs elvebanker, elveløpets senterlinje og relevante strømningsbarrierer som veier. Elveløpet er dekt av en refinement region.*

En to-dimensjonal flommodell i HEC-RAS har ikke muligheten til å ta broer inn i beregningene. Goodell (2016) viser til en metode for å simulere et estimat av en bro ved å legge bruddlinjer på toppen av oppkjørslene til broen. Denne metoden vil ikke kunne ta med selve broen i modelleringen, men om vannet topper over ved oppkjørslene burde man vurdere en nøyere undersøkelse av broen ved bruk av en 1D-modell (Goodell, 2016). I figur 5.8 vises det til hvordan det er lagt bruddlinjer ved Skamsar bro med en cellestørrelse på 5x5 meter for å sørge for at kanten ned mot elva ble oppfattet som en strømningsbarriere.





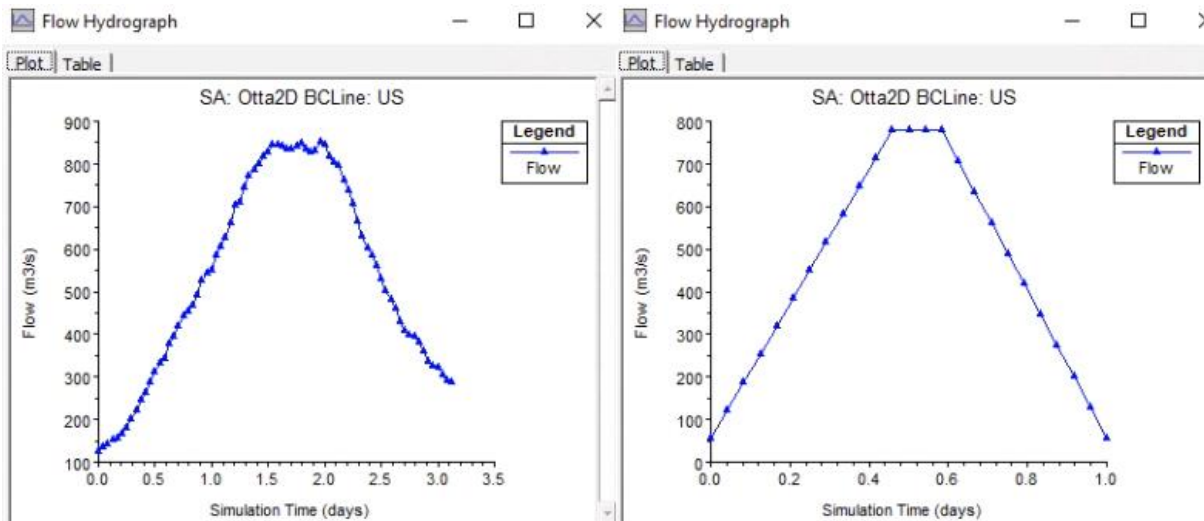
Figur 5.8: Utsnitt av bruddlinjer og Refinement Region ved Skamsar bro. De røde linjene langs elvebankene er kanten til RR, og de andre røde strekene er bruddlinjer.

## 5.4 Hydrauliske parametere

### 5.4.1 Grensebetingelser

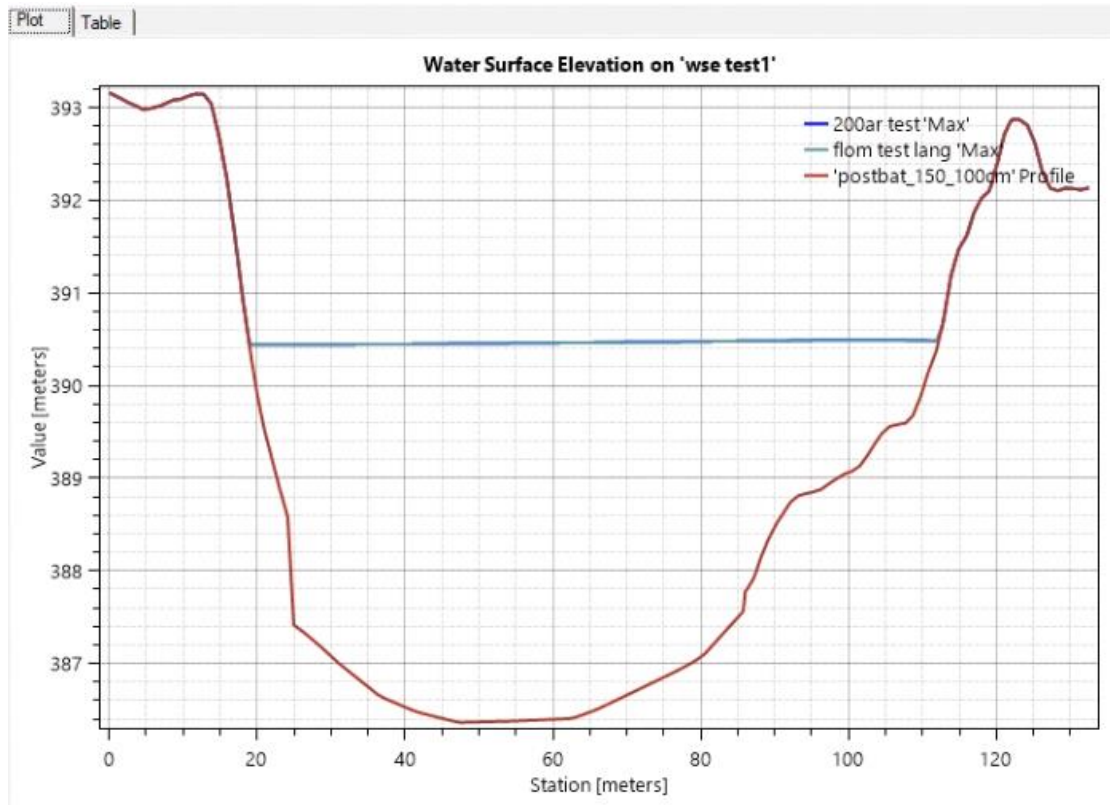
Grensebetingelsen for introduisering av vann oppstrøms er en strømningshydrograf. Denne grensebetingelsen fører vann inn i modellen basert på tall for vannføring over en gitt tid. Vannføringen er hentet fra NVEs NEVINA. Oppstrøms grensebetingelse er tegnet inn et stykke oppstrøms Bismo, og nedstrøms grensebetingelse er tegnet noe nedstrøms Ofossen målestasjon. Dette er gjort for å la vannet renne inn i interesseområdet og tas ut etter at det har passert, og det lot meg bruke vannstand og vannføring ved Ofossen til kalibrering av modellen. Å ha grensebetegnelse et stykke unna interesseområdet reduserer mulig beregningsfeil som kan forekomme om grensebetingelsene ligger for nært (Brunner, 2016c). Vannføringen i strømningshydrografen går fra normalvannføring på  $55 \text{ m}^3/\text{s}$  til flomverdi tilsvarende det gjentaksintervallet som skal kartlegges, vist i tabell 1, og ned til normalvannføring ved strømningshydrografens slutt. For tidsintervallene mellom start, topp, og slutt blir strømningshydrografen fylt med interpolerte verdier. Det er anbefalt at varigheten til simulerte flomhendelser er basert på varigheten av tidligere flommer (Brunner, 2016c). Strømningshydrografen er basert på oktoberflommen i 2018 som hadde en varighet på omtrent 72 timer, hvor flomtoppen varte i omtrent 12 timer. Dette er blitt nedskalert for å spare

prosesserings tid. Varigheten i strømhdrografen er satt til 24 timer, med en temporal oppløsning på 1 time, hvor flomtoppen varer i 4 timer. Figur 5.9 viser til strømningshydrograf for oktoberflommen og etter nedskalering.



Figur 5.9: Strømningshydrograf for oktoberflommen 2018 (venstre) og nedskalert for modell (høyre). Simulerings tid langs x-aksen og vannføring langs y-aksen.

Nivået av nedskaleringen ble bestemt ved en sensitivitetsanalyse for strømningshydrografen. Det ble først simulert en flomhendelse med tidsriktig strømningshydrograf for oktoberflommen. Deretter ble tiden nedskalert til å passe en strømningshydrograf på 24 timer. Begge simuleringene viste de samme oversvømte områdene og vannstanden var lik, som vist til i figur 5.10. Nedskaleringen kuttet prosesserings tiden betraktelig fra omtrent 4 timer ved bruk av 72 timers flomvarighet, til 1 time og 16 minutter med 24 timers flomvarighet. Denne sensitivitetsanalysen ble utført med DSW.



Figur 5.10: Simulert vannstand ved test av flomvarighet, mørk blå viser 24 timer, grønn viser 72 timer, rød er terrengprofil.

For nedstrøms grensebetingelse er det brukt normal dybde. Energigradierten brukt i grensebetingelsene oppstrøms og nedstrøms er satt til 0,01. Tallet for energigradierten kan en komme fram til ved å lage en linje gjennom hele elveløpet fra oppstrøms til nedstrøms i RAS mapper og lese av verdien for *Slope* som vil være lik energigradierten. En annen måte er å måle slope-verdien like oppstrøms og nedstrøms av grensebetingelsene (Goodell, 2010; Brunner, 2016b). Ved bruk av disse metodene fikk jeg slope-verdier på omtrent -0,005 ved oppstrøms grensebetingelse, -0,004 nedstrøms, og -0,003 for hele elveløpet. HEC-RAS vil ikke kjøre simuleringer om en plotter inn negative tall, som førte til at jeg plottet inn tallene som positive verdier. Simuleringer kjørt med disse energigradiertene førte til ustabile og urealistiske resultater hvor mye av elveslettene er allerede blitt oversvømt under oppvarmingen av modellen. Dette førte til at jeg brukte 0,01 for energigradierten ved oppstrøms og nedstrøms. Det er vist til i en tidligere masteroppgave at dette er et akseptabelt «tommelfingerregeltall» for energigradienter (Førli, 2019).

Det er ikke brukt *precipitation* (nor: nedbør) som en intern grensebetingelse da det er lite årsnedbør i Skjåk kommune og flommer i Otta skjer som oftest ved snøsmelting.

## 5.4.2 Beregningsparametere

### 5.4.2.1 Beregningsintervall

Det er i denne modelleringen brukt innstillingen for automatisk justert beregningsintervall basert på Courant betingelsen som lar HEC-RAS tilpasse forskjellige beregningsintervaller i løpet av en simulering ved behov. Denne innstillingen er brukt for spare beregningstid i modelleringen hvor det ikke er stor hydraulisk aktivitet, samtidig øke nøyaktigheten i deler av modelleringen hvor et lavt beregningsintervall er gunstig. Først måtte jeg finne et beregningsintervall som utgangspunkt for den automatiske justeringen. For å finne et stabilt beregningsintervall er Courant betingelsen brukt. Formelen for å finne et beregningstall med Courant tallet er som vist i formel 4:

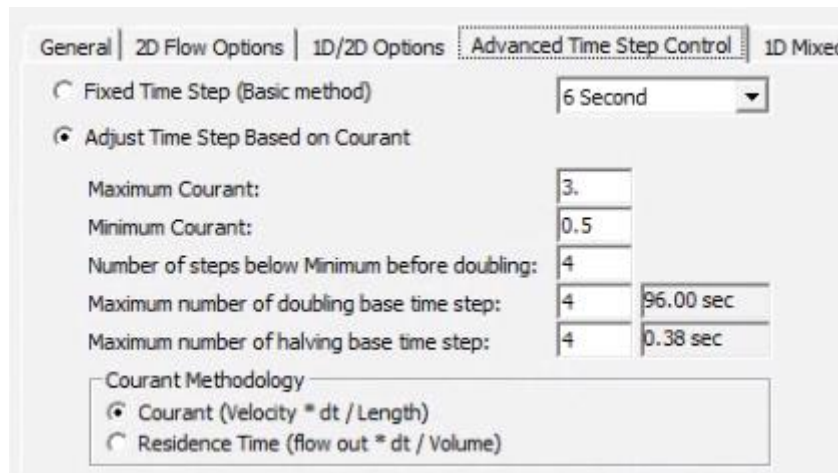
$$\Delta T = \frac{C \Delta X}{V_w}$$

Courant tallet kan være opp til 3 ved bruk av Full Momentum og så høyt som 5 ved bruk av Diffusion Wave. For utregningen av Courant tallet kreves et tall for vannets hastighet,  $V_w$ , men jeg hadde ikke funnet data for vannhastigheten i Otta ved Bismo. Brunner (2016c) viser til at en kan ta utgangspunkt i et estimat for vannføringshastighet for denne utregningen. Renkenberger (2020) viser til et konkret estimat for vannføringshastigheten ved normalvannføring på 1,5 m<sup>3</sup>/s. Jeg valgte å bruke dette estimatet da jeg ikke har funnet andre tall for vannhastigheten. Dette viste seg å være et passende estimat ut ifra hastigheten beregnet i flommodellen. Modellert normalvannføring ligger omtrentlig mellom 1 m<sup>3</sup>/s og 2 m<sup>3</sup>/s ved flate områder og opp til 3 m<sup>3</sup>/s ved områdene med høyere gradient. Videre plottet jeg inn gjennomsnittlig cellestørrelse,  $\Delta X$ . Jeg valgte å bruke cellestørrelsen fra oppstrøms Skamsar bro, 5x5 meter. Dette er et område med større gradient enn ellers i elveløpet, som vil føre til større hydraulisk aktivitet ved høyere vannføring hvor nøyaktigheten av resultatet da kan være mer avhengig av et lavere beregningsintervall. Siden Full Momentum støtter et Courant tall opp til 3, valgte jeg å ta utgangspunkt i 2 slik at beregningsintervallet ikke starter veldig lavt eller høyt. Satt inn i formel 4 gir følgende beregningsintervall i sekunder:

$$\frac{2 \times 5}{1,5} = 6,66666$$

Svaret fra utregningen blir rundet til nærmest mulige beregningsintervall jeg kan velge innad i HEC-RAS som er 6 sekunder. Etter en sensitivitetstest viste det seg at det automatiske justerte beregningsintervallets laveste verdi var 0,391 sekunder, for original beregningstall på både 6

og 3 sekunder, som tilsvarer Courant tall på 2 og 1. Videre ble det plottet inn diverse tall i innstillingene for det automatiske justerte beregningsintervallet.



Figur 5.11: Innstillingene for automatiske justerte beregningsintervall.

I figur 5.11 vises de forskjellige parameterne tilgjengelig for det automatisk justerte beregningsintervallet. Jeg har tatt utgangspunkt i tallene brukt av Krey Price i en opplæringsvideo (The RAS Solution, 2018b) og anbefalinger fra Brunner (2018).

*Maximum Courant* er det største tillatende Courant tallet i en 2D-celle. Hvis dette tallet overstiges, vil beregningsintervallet bli halvert. Ved lite hydraulisk aktivitet, altså ved lav vannføring og hastighet kan et høyt Courant tall bli brukt. Her er det satt til 3 da det er anbefalt maksimal verdi ved bruk av Full Momentum.

*Minimum Courant* er det laveste Courant tallet tillat i cellene, om beregningene går under dette tallet vil beregningsintervallet dobles. Dette tallet er satt til 0,5 da det må være lavere enn halvparten av *Maximum Courant*.

I *Number of steps below Minimum before doubling* plotter man inn hvor mange beregningsintervaller med lavere Courant enn minimum skal tillates før intervallet dobles. Denne innstillingen forhindrer HEC-RAS å skifte mellom beregningsintervaller for kjapt. Her er det satt til 4.

*Maximum number of doubling base time step* bestemmer hvor mange ganger det originale beregningsintervallet kan dobles. Eksempelvis med et beregningsintervall på 10 sekunder og en vil tillate beregningsintervallet å gå opp til 40 sekunder, da plotter en inn 2 som dobler intervallet to ganger, 10s til 20s til 40s. Jeg har satt dette tallet til 4 hvor det kan dobles helt opp til beregningsintervaller på 96 sekunder.

Den siste innstillingen er *Maximum number of halving base time step*. Dette tallet avgjør hvor mange ganger det originale beregningsintervallet kan halveres. Eksempelvis hvis beregningsintervallet er på 10 sekunder og en vil at det lavest mulige intervallet skal være 2,5 sekunder, plotter man inn 2 som halverer beregningsintervallet to ganger, 10s til 5s til 2,5s. Dette tallet er satt til 4 som lar beregningsintervallet gå så lavt som 0.38 sekunder.

#### 5.4.2.2 Modellens oppvarming

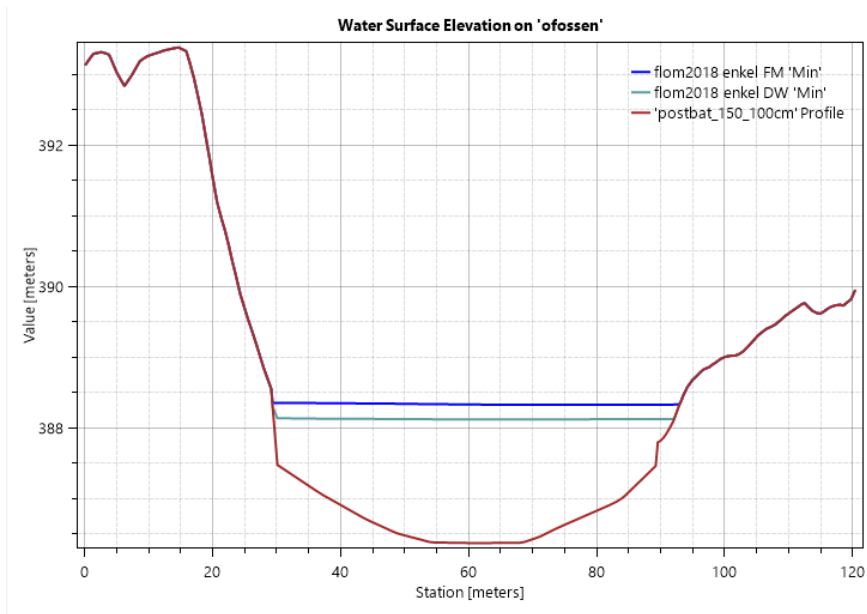
For modellens stabilitet bør cellene i elva være våte før simulering av flomhendelse. I HEC-RAS har en tre muligheter for oppvarming av modellen; ved å sette en vannstand for hele elveløpet, bruke vannstand fra en tidligere simulering, eller la modellen øke vannføring til starten av simuleringen. For denne flommodelleringen er den siste metoden brukt. Innad i HEC-RAS heter den *Initial Conditions Ramp Up*. Denne innstillingen lar modellen starte med veldig lav vannføring som gradvis øker over et spesifisert antall timer til den når den første verdien i strømningshydrografen, for å så holde den der til oppvarmingen er ferdig. Denne innstillingen krever to parametere, en for hvor mange timer oppvarmingen skal foregå, og en for hvor mye tid av oppvarmingen skal brukes på økning av vannføring. Eksempelvis ved å sette *Initial Condition Time* til 10 timer og *Initial Conditions Ramp Up Fraction* til 0.5 vil 50% av oppvarmingen bli brukt på økning av vannføring og de resterende 5 timene vil holde strømningshydrografens første verdi (Brunner, 2016a). Jeg satte oppvarmingen til 6 timer med økning på 0.5, som gir 3 timer med økning av vannføring og 3 timer med stabil første verdi. Jeg tok utgangspunkt i tallene brukt i et eksempel gitt på The RAS Solution (Goodell, 2015c). I dette eksempelet var tiden satt til 4 timer, dette viste seg å være for kort for modelleringen ved Bismo da vannet ikke nådde nedre grensebetingelse, dermed økte jeg til 6 timer som ga oppvarmingen nok tid til å renne gjennom hele modellen.

## 5.5 Diffusion Wave og Full Momentum

Brukermanualen viser til at om det er betydelige forskjeller mellom DSW og FM er det anbefalt å bruke FM, da det er antatt at denne beregningsmetoden er mer nøyaktig (Brunner, 2016b). Brukermanualen viser ikke til hva som menes med forskjeller, som førte til at jeg tolket det som forskjeller i modellert vannstand, vannhastighet og oversvømte områder. Undersøkelser viste at det var betydelige forskjeller, dermed er FM brukt i den endelige modellen.

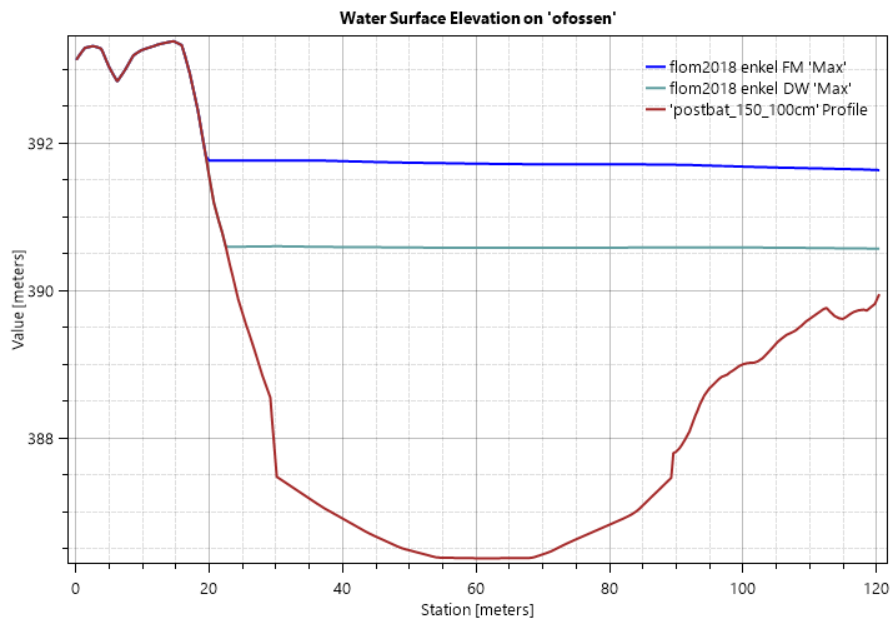
Det ble sammenliknet mellom modellert vannstand og oppmålt vannstand ved Ofossen målestasjon. Ved starten av oktoberflommen var vannstanden oppmålt til 388 moh. ved

Ofossen målestasjon. Figur 5.12 viser at modellert vannstand med DSW viste +12 cm og FM viste +30 cm.



Figur 5.12: Forskjeller i modellert vannstand ved start av oktoberflommen i 2018. Mørk blå viser Full Momentum og grønn viser Diffusion Wave.

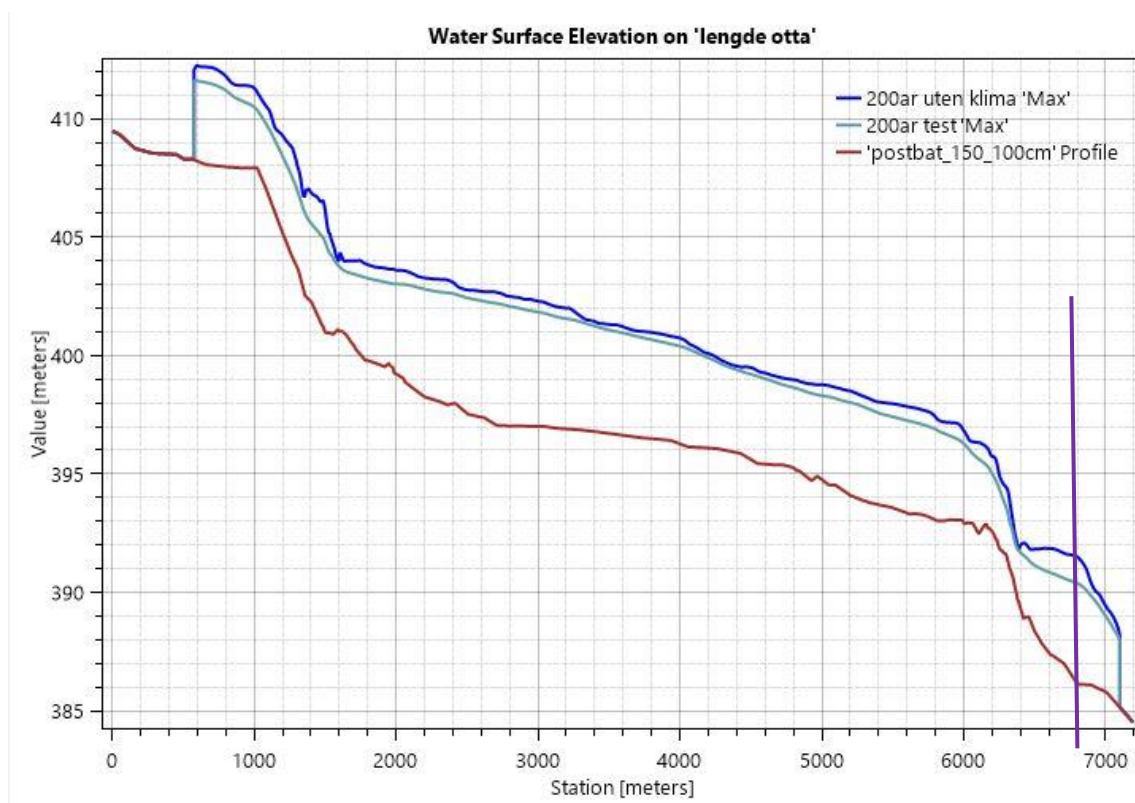
Flomtoppen under oktoberflommen var målt til 391 moh. Modellert vannstand ved flomtoppen med DSW viste -42 cm, FM viste +72 cm (se figur 5.13).



Figur 5.13: Forskjeller i modellert vannstand ved flomtoppen under oktoberflommen. Mørk blå viser Full Momentum, grønn viser Diffusion Wave.

Disse undersøkelsene viser at jo høyere vannføring jo større forskjellig i modellert vannstand. DSW viste ved lav vannføring en høyere vannstand enn oppmålt, og ved flomtopp viste den betraktelig lavere vannstand. Differansen mellom modellert og oppmålt vannstand ved høy og lav vannføring var totalt 54 cm med DSW. FM viste høyere vannstand ved begge anledningene, men hadde en lavere differanse mellom høy og lav vannføring. Differansen i FM var 42 cm.

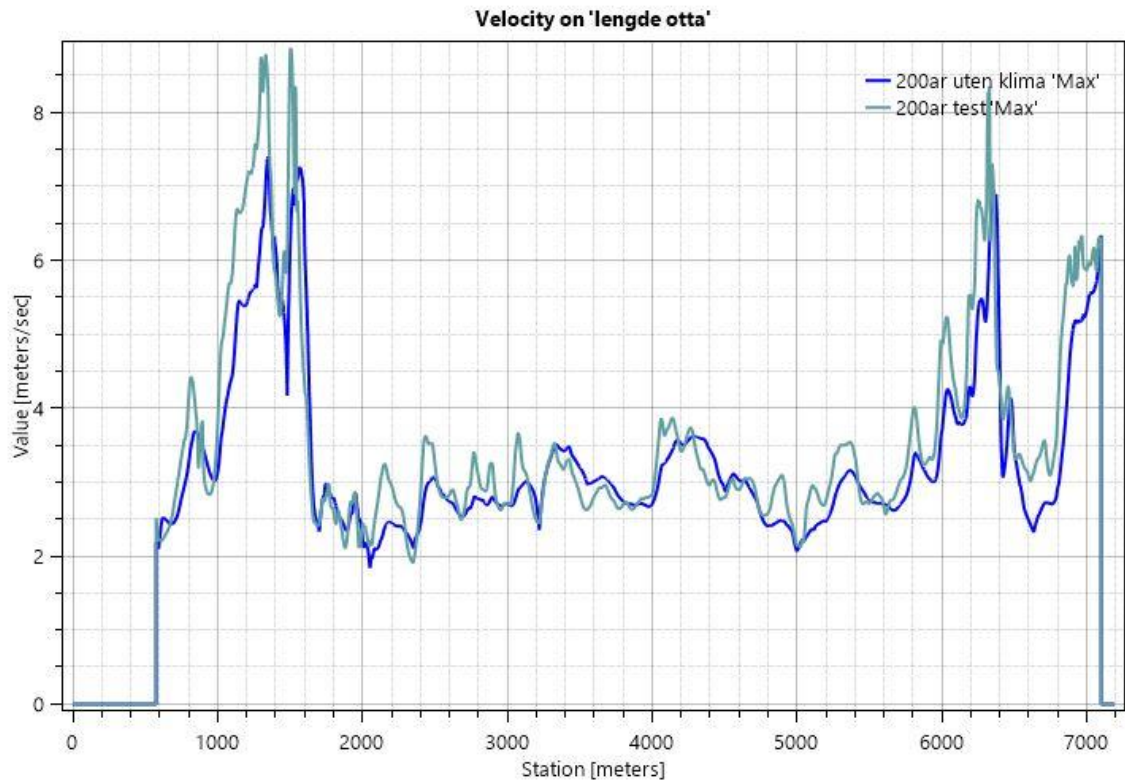
Generelt i hele elveløpet viste FM en høyere vannstand enn det DSW gjorde. I figur 5.14 vises modellert vannstand ved en senterlinje gjennom hele elveløpet i studieområdet. Vannføringen brukt her er flomverdier for en 200-årsflom hentet fra NEVINA. Figuren viser at det er en tendens til at vannstanden øker etter områder med høyere gradient, særlig ved bruk av FM. Ofossen målestasjon ligger omtrentlig ved station 6770, markert med lilla strek i figur 5.14, i dette området vises det en større differanse mellom beregningsmetodene.



Figur 5.14: Forskjeller i modellert vannstand i hele elveløpet. Mørk blå viser Full Momentum og grønn viser Diffusion Wave. Lilla strek viser lokasjon for Ofossen målestasjon.

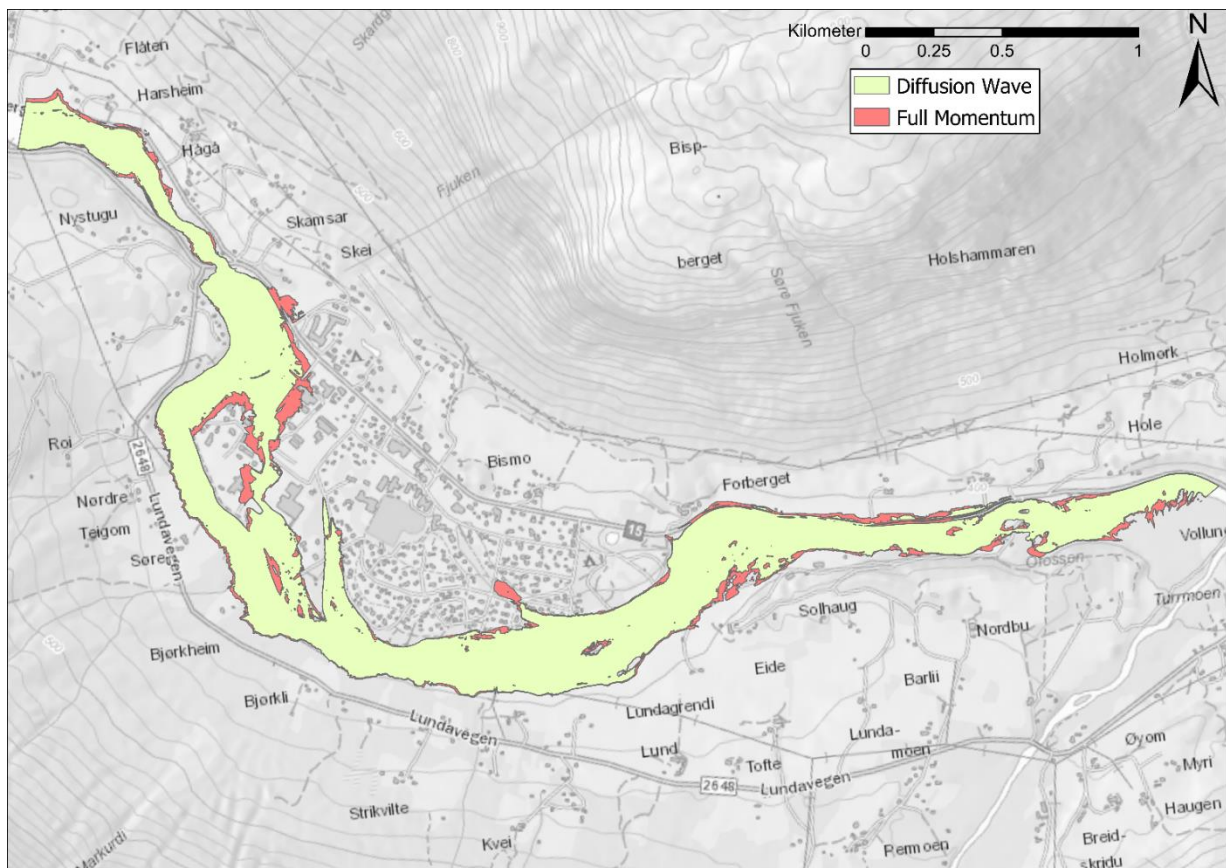
I figur 5.15 er forskjeller i modellert vannhastighet mellom beregningsmetodene vist. Figuren viser at DSW har en tendens til å beregne høyere hastighet enn det FM gjør. Dette gir en mulig forklaring for forskjellene i modellert vannstand. DSW har høyere hastighet som gjør at vann renner raskere gjennom modellen, og ved bruk av FM vil vann ha lavere hastighet og kan «samle seg opp».





Figur 5.15: Forskjeller i vannhastighet langs en senterlinje. Mørk blå viser Full Momentum og grønn viser Diffusion Wave.

Kartet i figur 5.16 viser forskjeller i oversvømte områder mellom DSW og FM. Bruk av FM fører til at mer areal blir oversvømt, dette er nok knyttet til at FM beregner en høyere vannstand som fører til at vannet topper over strømningsbarrierer oftere.



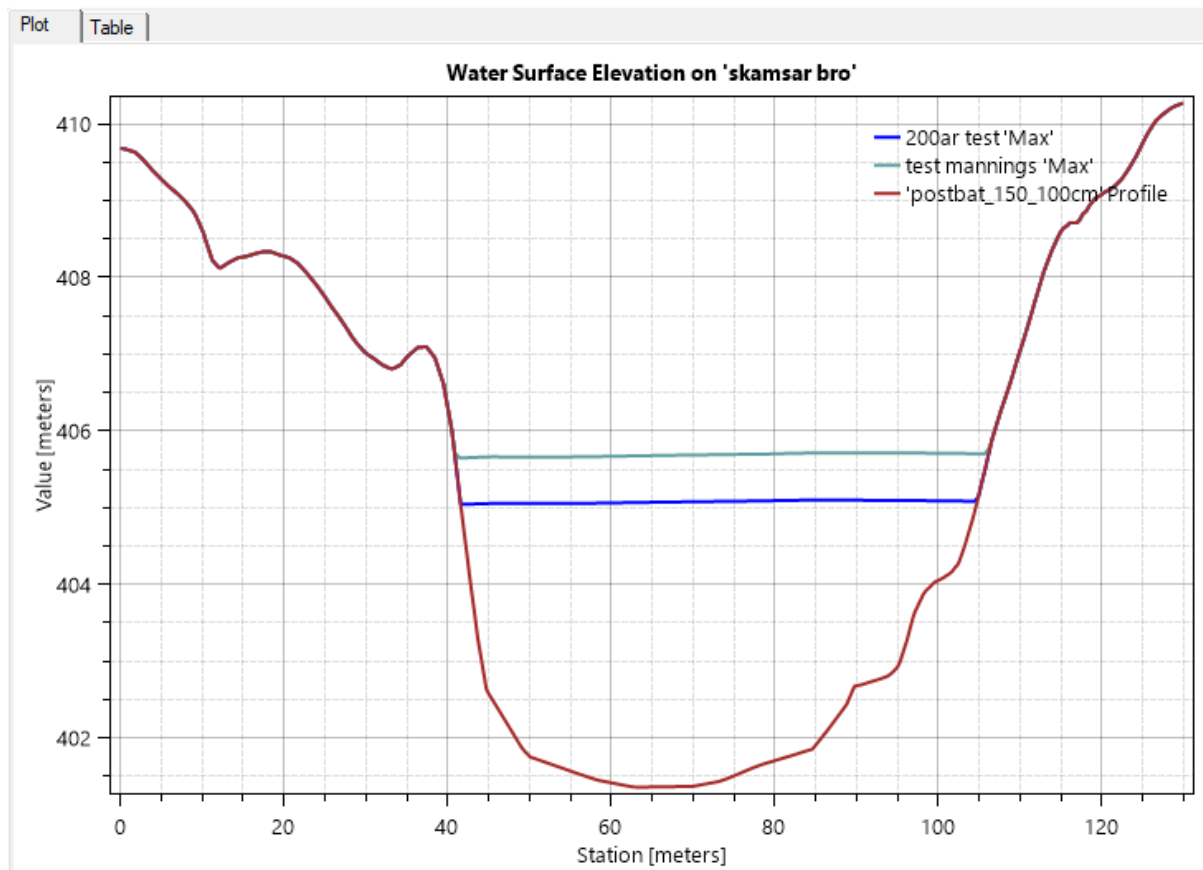
Figur 5.16: Oversvømte områder med bruk av Diffusion Wave og Full Momentum.

## 5.6 Usikkerhet og sensitivitetsanalyse

Det er diverse usikkerheter i denne flommodelleringen, blant annet knyttet til manglende data for kalibrering, usikkerhet i vannføring fra NEVINA, usikker kvalitet på terrengmodell og batymetri, og usikkerhet i nøyaktigheten for parametere brukt i HEC-RAS. Disse usikkerhetene vil bli gått næyere gjennom i kapittel 7.2.

Det ble gjort noen sensitivitetsanalyser for å sjekke hvor sensitiv modellen er til forandringer i parametere. Det viste seg at den ikke var sensitiv til varighet på strømningshydrografen, da 72 timer og 24 timer ga like resultater, og sparte mye prosesseringstid. Modellen er ikke sensitiv til antall celler som representerer elveløpet, dette førte til at jeg kunne bruke færre celler som reduserte prosesseringstiden ytterligere. Modellen viste sensitivitet ved plassering av bruddlinjer. Dette var forventet med tanke på hvordan celler håndterer det underliggende terrenget, hvor strømningsbarrierer er avhengig av at cellekantene er plassert riktig. Modellen viste ytterligere sensitivitet til Mannings  $n$ -verdi. Denne sensitivitetsanalysen er kun gjort overfladisk for å undersøke sensitiviteten, og er ikke en undersøkelse knyttet til kalibrering av  $n$ -verdi, da det er veldig tidskrevende (Brunner, 2016c). Det ble undersøkt hvor mye  $n$ -verdien

i elveløpet påvirker vannstanden. Det ble kjørt en simulering med  $n$ -verdien valgt ut fra hvordan jeg tolket diverse flyfoto og tabellen i Brunner (2016c), og en høyere  $n$ -verdi funnet i tabellen. Tallene for  $n$ -verdi er 0,035 og 0,05, en økning på 43%. I simuleringen gjort med DSW resulterte den høyere  $n$ -verdien med omtrentlig 50 – 60 cm høyere vannstand enn ved  $n$ -verdi brukt i modelleringen (se figur 5.17). Dette viser at modellen er sensitiv til valg av  $n$ -verdi som fører til ytterligere usikkerhet da  $n$ -verdiene er valgt ut fra tolkning av flyfoto og sammenliknet med beskrivelser i en tabell.



Figur 5.17: Forskjeller i simulert vannstand ved bruk av to forskjellige  $n$ -verdier i hele elveløpet. 0,035  $n$ -verdi (mørk blå) og 0,05  $n$ -verdi (lys blå).



## 6 Resultater

---

Kartlagene vist til i resultatene er hentet ut fra HEC-RAS og klargjort i ArcGIS. Kartlagene hentet ut fra hver modellert flomhendelse er *Depth* (nor: dybde), *Velocity* (nor: hastighet), og *Inundation Boundary* (nor: oversvømmelsesgrense). Dybde er hentet ut som et rasterlag for å kunne undersøke dybden i oversvømte områder. Hastighet er også hentet ut som et rasterlag, verdiene i rasterlaget viser modellert hastighet i elveløpet under flomhendelsen. Oversvømmelsesgrensen er en polygon som viser hvor flomgrensen er, og er brukt i ArcGIS for å undersøke hvilke bygninger og veger som er utsatt.

Kartene i figur 6.1 og 6.3 viser henholdsvis dybder og vannhastigheter for 200-årsflom ved dagens klimatiske forhold, og figurer 6.5 og 6.7 for 200-årsflom i år 2100 med 20% klimapåslag. Dybde- og vannhastighetskart er viktig for arealplanprosesser da det gir informasjon om hvor flomutsatte områder er, og hvor stor dybden og vannhastigheten er i disse områdene. Dermed kan flomtiltak og utbygninger ta hensyn til mulige flomhendelser. Disse kartene vil også gi en indikasjon på hvor farlig det kan være å oppholde seg i de flomutsatte områdene (Orvedal & Ortega, 2015).

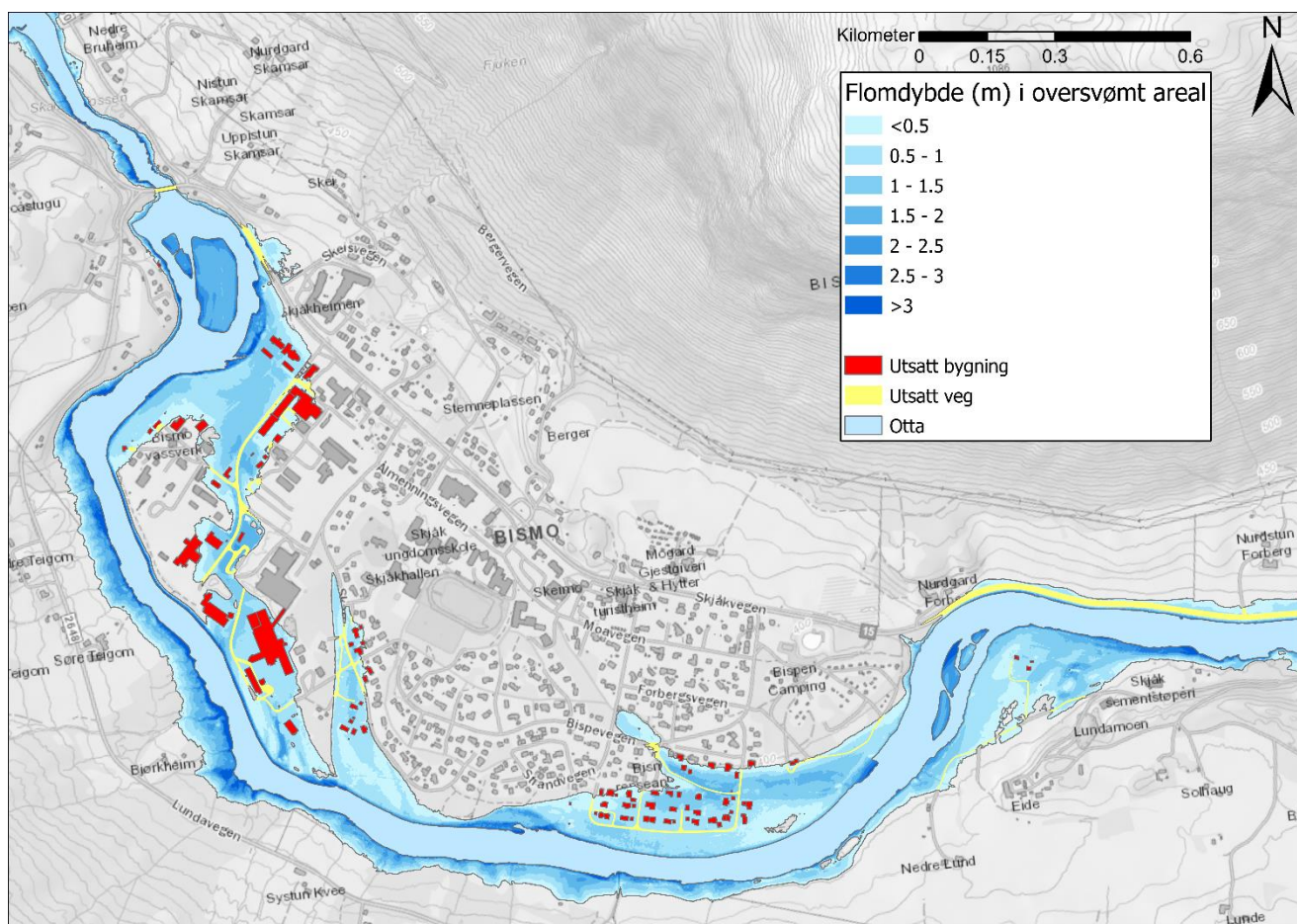
Vannhastighetskartene kan bidra til å identifisere områder med høy vannhastighet. Disse områdene bør en være ekstra oppmerksom på da det kan oppstå erosjon og massetransport som kan gjøre ytterligere skader på infrastruktur og bebyggelse. Hjulstrøms diagram (figur 3.1) viser at erosjon kan oppstå ved vannhastighet så lav som 0,2 m/s. Faren for erosjon er avhengig av vannhastigheten og underlaget, dermed kan områder i elveløpet ha høy hastighet uten at det fører til fare for erosjon. På elvesletter derimot bør en være oppmerksom på erosjonsfare i områder med vannhastigheter på omtrentlig 2 m/s (Orvedal & Ortega, 2015).

Skamsar bro er markert som utsatt i flomsonekartene selv om vannstanden ikke har nådd til kanten ved oppkjørslene til broa. Det er valgt å vise broa som utsatt da det ikke er gjort en fullstendig undersøkelse av broa i modelleringen, dermed er det usikkert om den er utsatt eller ikke.

I kartene presentert i de neste delkapitlene renner Otta fra vest til øst.

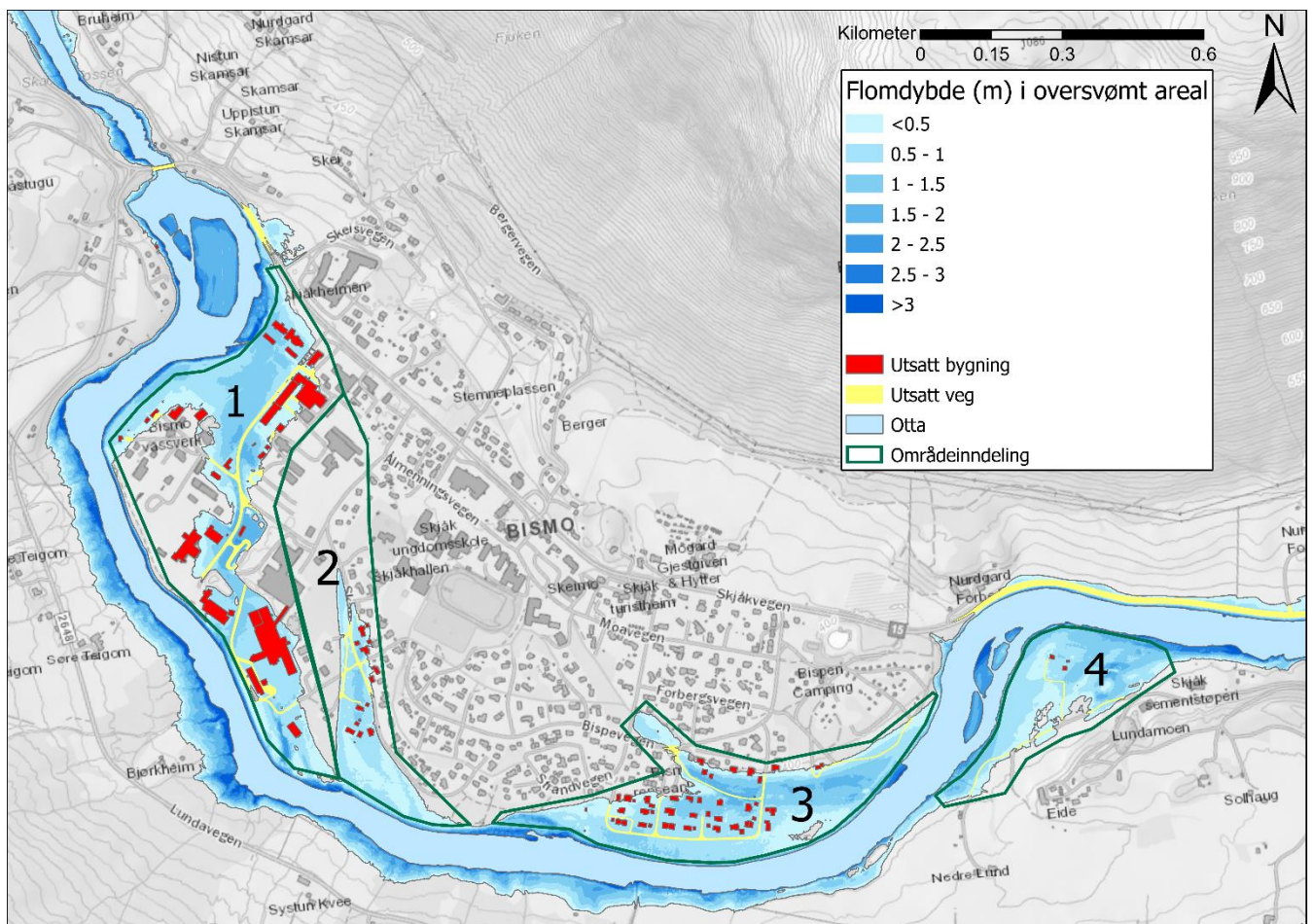
## 6.1 Flomsonekart for 200-årsflom i Otta ved Bismo

Kartet i figur 6.1 viser oversvømte areal med dybde, og utsatte bygninger og veger for en 200-årsflom i Otta ved Bismo i dagens klimatiske forhold. De oversvømte arealene er delt inn i syv klasser basert på dybden med intervaller på 0,5 meter. Dybden til kartlagte oversvømmelser er den dypeste dybden til et gitt område beregnet av HEC-RAS under flommodelleringen. Klassene er fargekodet med en skala hvor mørk blå viser den største dybden og lysere blåfarge indikerer grunnere oversvømmelse. Utsatte bygninger er vist i rødt, og utsatte veger er vist i gult.



Figur 6.1: Flomsonekart for 200-årsflom i Otta ved Bismo.

Oversvømmelser ved en 200-årsflom i Otta er knyttet til elveløpet i store deler av studieområdet, hvor de skjer i områder med nær beliggenhet til elveløpet. Det er hovedsakelig fire områder hvor oversvømmelser når langt inn på tørre elvesletter. I området etter Skeiøyi flommer store deler av nærliggende slette hvor elva finner en ny vei gjennom sentrum, vist i figur 6.2 som område 1. I dette området blir flere større bygninger utsatt av flommen. Mesteparten av oversvømmelsene i dette området har en dybde på 0,5 – 1,5 meter, med noen mindre steder med høyere og lavere dybder. Lengre nedstrøms blir et område fylt av bakvann, altså vann som ikke er en del av strømmingen i elva. Denne oversvømmingen skyldes nok at vannstanden i elva overstiger strømningsbarrierene ved elva og vannet trenger inn. Dette området er vist til som område 2 i figur 6.2.



Figur 6.2: Flomsoneskart for 200-årsflom i dagens klima med markerte områder hvor flommen når langt inn på elvesletta.

Videre nedstrøms blir et boligfelt oversvømt med dybder på 0,5 – 1,5 meter, dette vises til i figur 6.2 som område 3. Lengre nedstrøms hvor elva renner parallelt med riksveg 15 blir store deler av vegen oversvømt, samt et gårdsbruk plassert på elvesletten der hvor elva svinger, vist som område 4 i figur 6.2. Resultatet viser at ved en 200-årsflom i dagens klimatiske forhold vil

områder på 609 km<sup>2</sup> bli oversvømt, 95 bygninger og 6,5 km veg være eksponert for vannets krefter.

Tabell 3 viser gjennomsnittsdypde i oversvømte områder hvor gjennomsnittsdypden er veldig lik i områdene 1, 3 og 4 og noe lavere i område 2.

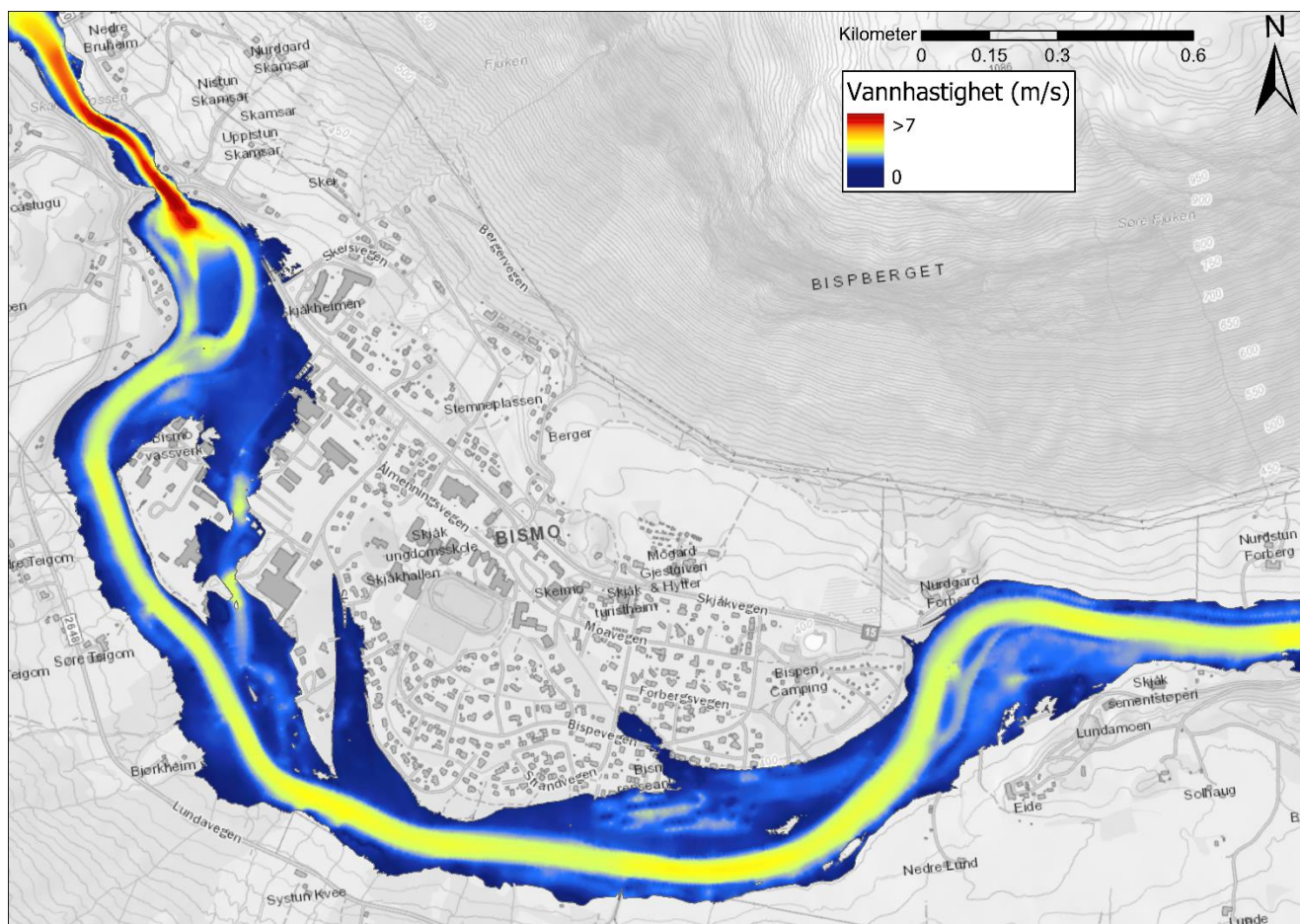
*Tabell 3: Gjennomsnittsdypde i oversvømt areal ved markerte områder ved en 200-årsflom i dagens klimatiske forhold.*

<b>Område</b>	<b>Gjennomsnittsdypde (m)</b>
1	0,80
2	0,50
3	0,81
4	0,80

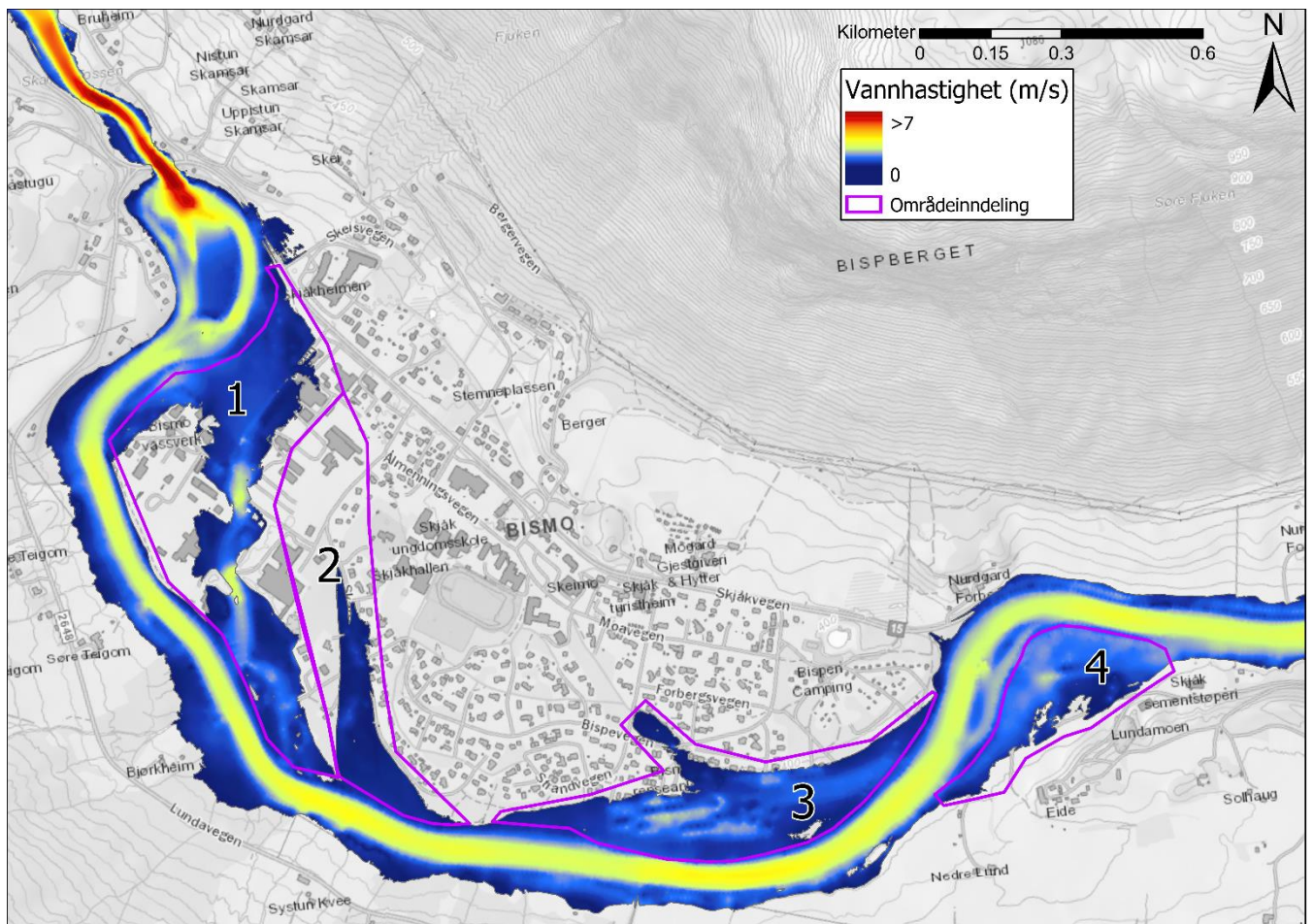


### 6.1.1 Vannhastighetskart for en 200-årsflom i Otta ved Bismo

Kartet i figur 6.3 viser vannhastigheter under en 200-årsflom i Otta. Strømningshastighetene er de høyeste verdiene beregnet under flommodelleringen i HEC-RAS. Vannhastigheten er vist med en skala hvor mørkt blått indikerer lav hastighet, grønn/gult viser medium hastighet og rødt viser høy hastighet.



Figur 6.3: Vannhastighetskart for en 200-årsflom i Otta ved Bismo.



Figur 6.4: Vannhastighet ved en 200-årsflom ved Bismo i dagens klima med markerte områder.

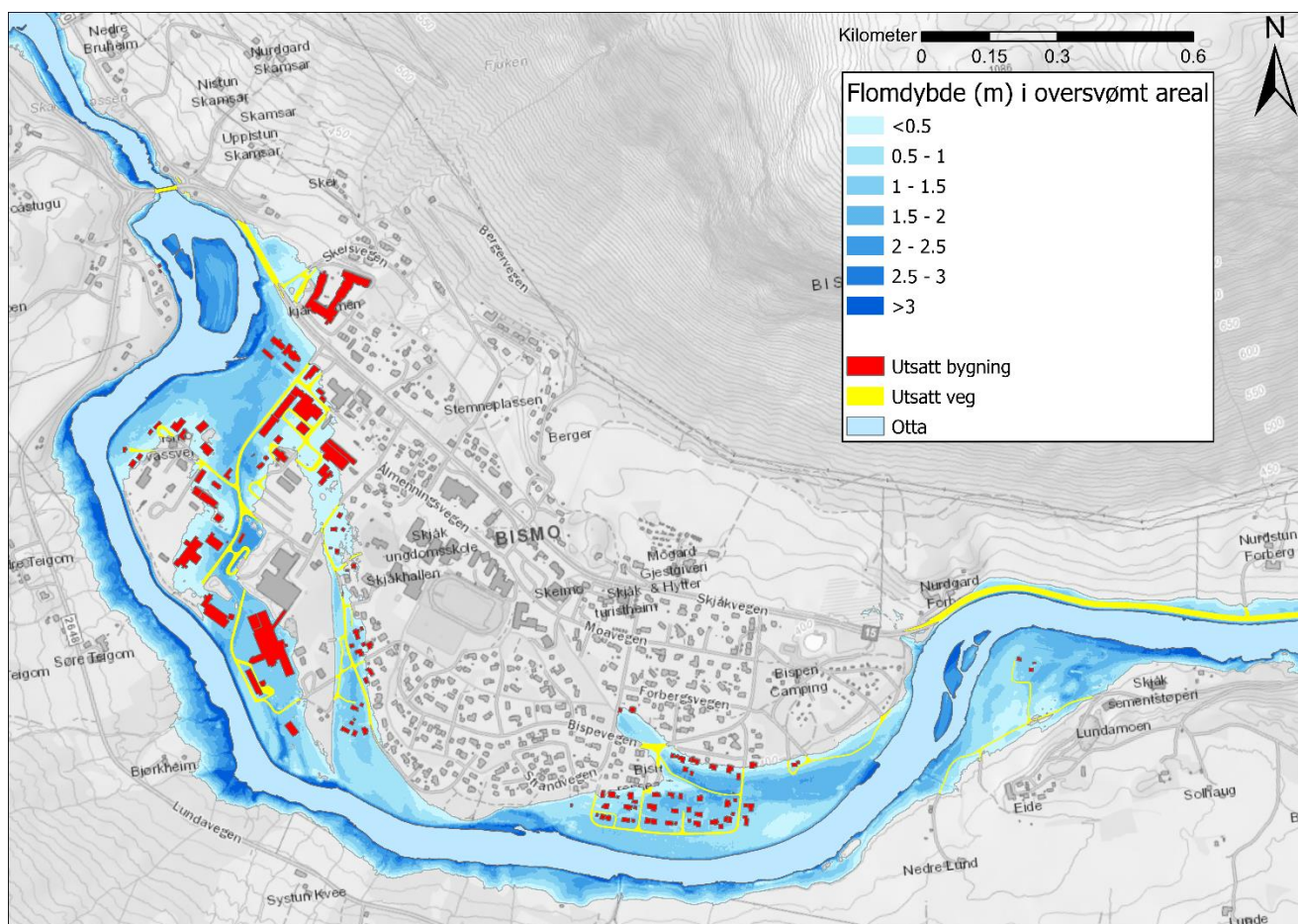
Gjennomsnittshastigheten i elveløpet ligger på omtrentlig 2,7 m/s. Hvor gradienten er spesielt høy og der hvor vannet også presses inn i trangere passasjer, når vannet omtrentlig 7 m/s, med noen små områder opp til 8 m/s (ikke kartlagt). I dette området kan det oppstå erosjon som kan undergrave skråningene. Kartet i figur 6.4 viser markerte områder og vannhastighet. I område 1, hvor vannet finner ny strømningsbane gjennom Bismo ligger vannhastigheten på omtrentlig 1 m/s, med økning opp til 2,5 m/s ved steder hvor vannet presses gjennom smalere passasjer. I disse passasjene er det en fare for erodering av underlaget. I område 2 lengre nedstrøms, er hastigheten veldig lav da dette området ikke er knyttet til flommens strømningsbane. Ved boligfeltet i område 3, har en del av gjennomstrømningen en fart på omkring 1 – 2 m/s, her bør en være varsom for erodering og massetransport i flomvannet. Ved område 4 når strømningshastigheten til omtrentlig 1,5 – 2 m/s, som medfører fare for at erosjon kan oppstå. Gjennomsnittsvannhastighet for oversvømt areal er vist til i tabell 4, her kan man se at område 4 har størst gjennomsnittshastighet og område 2 har veldig lav gjennomsnittshastighet.

Tabell 4: Gjennomsnittsvannhastighet i oversvømt areal ved markerte områder ved en 200-årsflom i dagens klimatiske forhold.

<b>Område</b>	<b>Gjennomsnittsvannhastighet (m)</b>
1	0,65
2	0,17
3	0,67
4	0,94

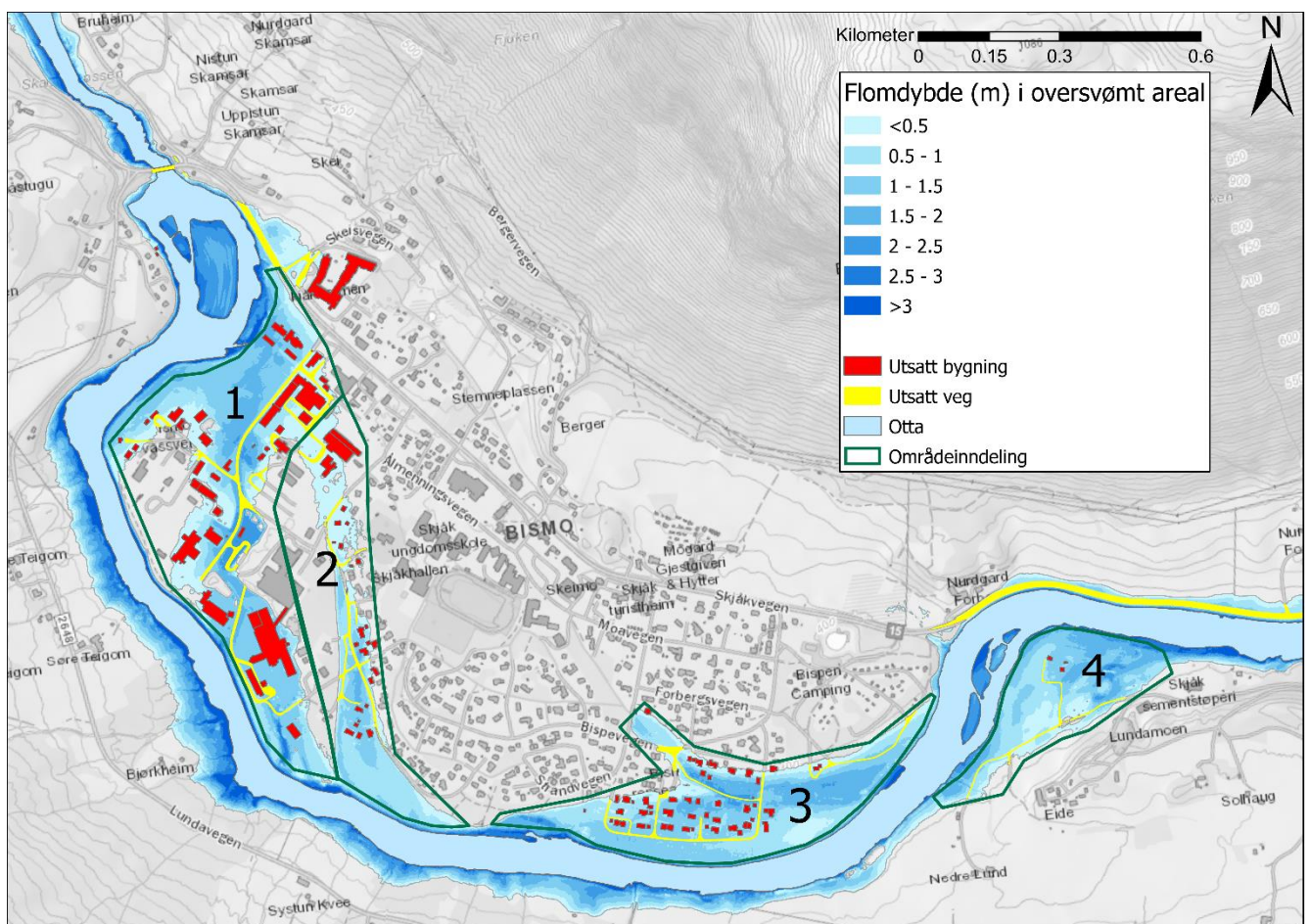
## 6.2 Flomsonekart for 200-årsflom i Otta ved Bismo i år 2100 med 20% klimapåslag

Figur 6.5 viser flomsonekartet for en 200-årsflom i Otta ved Bismo i år 2100 med 20% klimapåslag i flomverdier, etter klimaframskrivninger tilsvarende RCP 8.5. Kartpresentasjonen er lik tidligere flomsonekart, som er presentert i kapittel 6.1.



Figur 6.5: Flomsonekart for 200-årsflom i Otta ved Bismo i år 2100 med 20% klimapåslag

I flomsonekartet for en 200-årsflom med klimapåslag er mye av de samme områdene utsatt, men med dypere oversvømmelser. Vannet tar seg også lengre inn på elveslettene og eksponerer mer av Bismo til vannets krefter enn en 200-årsflom i dagens klima. Figur 6.6 viser at ved område 1 er oversvømmelsene dypere enn uten klimapåslag. I store deler av område 1 ligger dybden på 1,5 – 2 meter. Bakvannet ved område 2 blir koblet sammen med vann på avveie fra område 1. Oversvømmelsene i øvre del ligger på under 0.5 meter, mens dybden ved bakvannet ligger for det meste på 0,5 - 1,5 meter. Boligfeltet i område 3 opplever større oversvømmelse med dybder på omkring 1 – 1,5 meter. I område 4 blir mer areal dekt av oversvømmelser og dypere oversvømmelser i de områdene som er utsatt ved en 200-årsflom i dagens klima. Resultatet viser at ved en 200-årsflom med 20% klimapåslag vil oversvømmelsen dekke 720 km<sup>2</sup>, og 126 bygninger og 7,5 km veg vil være eksponert for flom.



Figur 6.6: Utsnitt av flomsonekart for en 200-årsflom med klimapåslag med markerte områder.

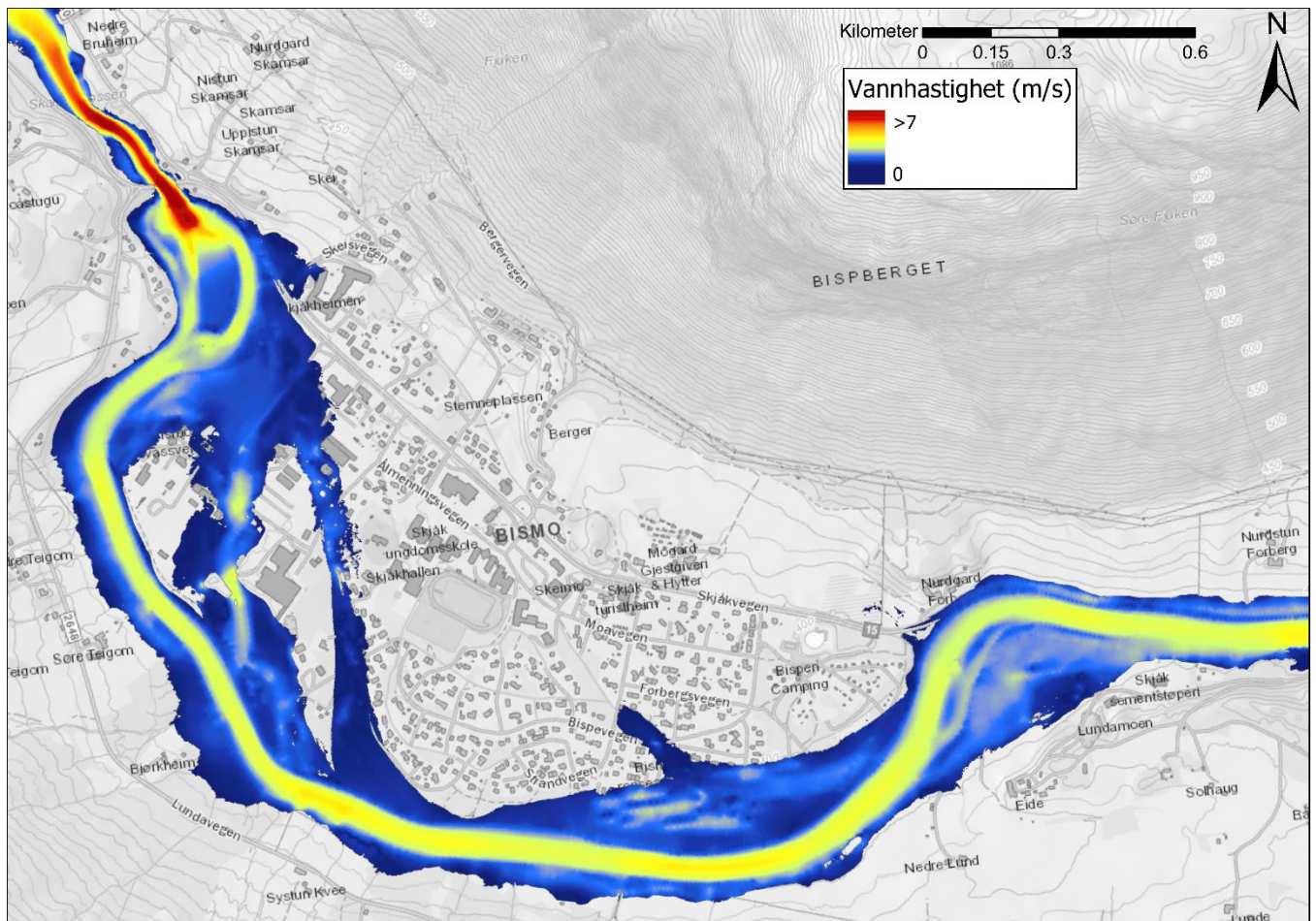
Gjennomsnittsdypden ved en klimajustert 200-årsflom er vist i tabell 5. Tabellen viser samme tendenser som ved en 200-årsflom ved dagens klima hvor område 1, 3 og 4 har lik dybde og område 2 har noe grunnere oversvømmelser

Tabell 5: Gjennomsnittsdybde i oversvømt areal ved markerte områder ved en 200-årsflom med 20% klimapåslag.

<b>Område</b>	<b>Gjennomsnittsdybde (m)</b>
1	1,04
2	0,57
3	1,04
4	1,07

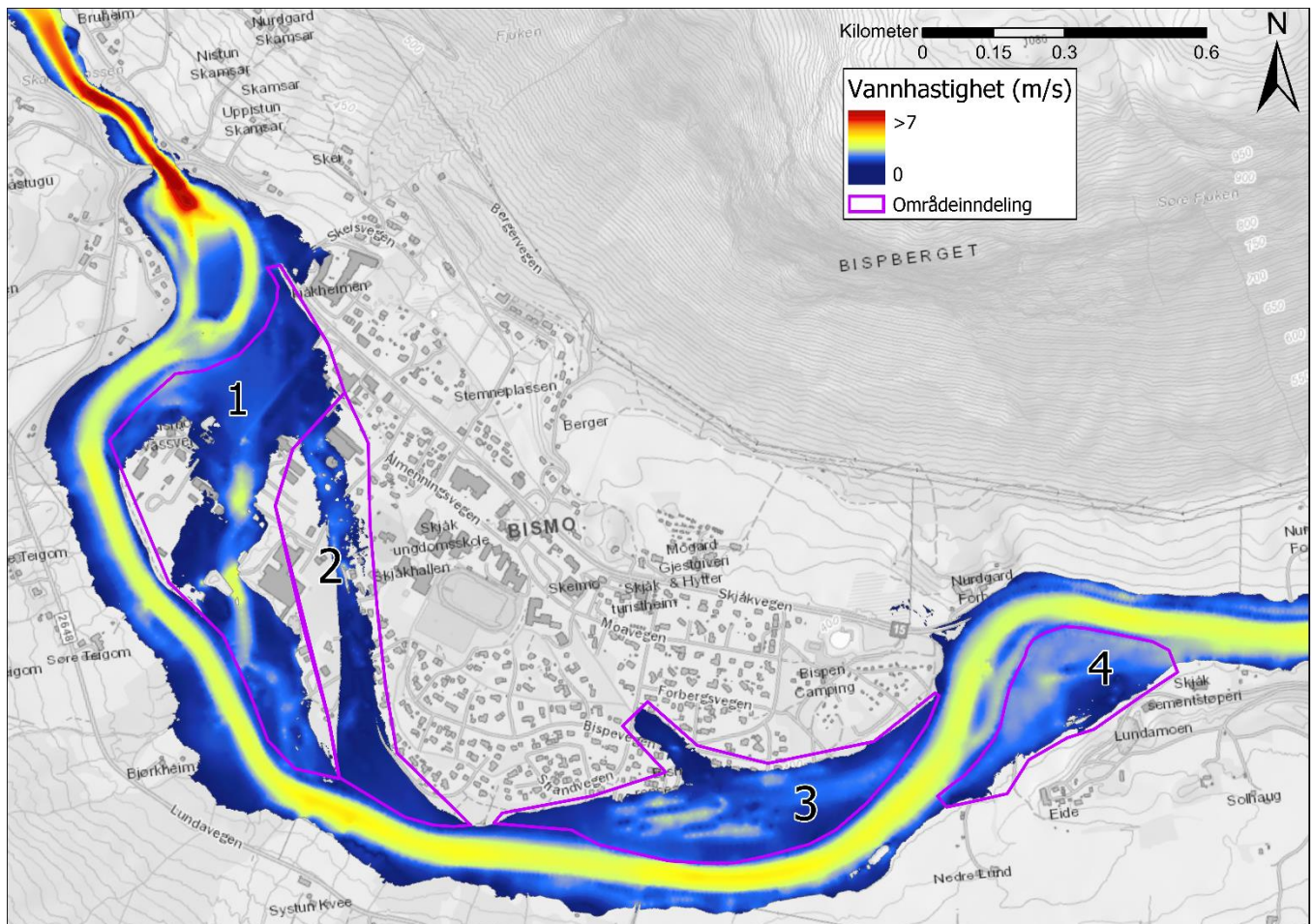
## 6.2.1 Vannhastighetskart for en klimajustert 200-årsflom i Otta ved Bismo

Kartet i figur 6.7 viser vannhastigheten for en 200-årsflom med klimapåslag ved Bismo. Kartpresentasjonen er lik tidligere vannhastighetskart, som er presentert i kapittel 6.1.1.



Figur 6.7: Vannhastighetskart for en klimajustert 200-årsflom i Otta ved Bismo.

Resultatet viser de samme tendensene som ved en flomhendelse uten klimapåslag, men med noe høyere hastighet som øker faren for erosjon og massetransport i flomvannet. I figur 6.8 viser områdene 1, 3 og 4 er hastigheten ganske lik som ved en 200-årsflom uten klimapåslag, men det er større hastighet i større deler av områdene, som vil si at mer av områdene er utsatt av vannets krefter. I område 2 er det fortsatt lav hastighet i bakvannet, men i øvre del vises det en strømningshastighet på omtrentlig 1 m/s.



Figur 6.8: Vannhastighet ved en klimajustert 200-årsflom ved Bismo med markerte områder.

Tabell 6 viser at gjennomsnittshastigheten i markerte områder er høyere enn ved en 200-årsflom i dagens klima.

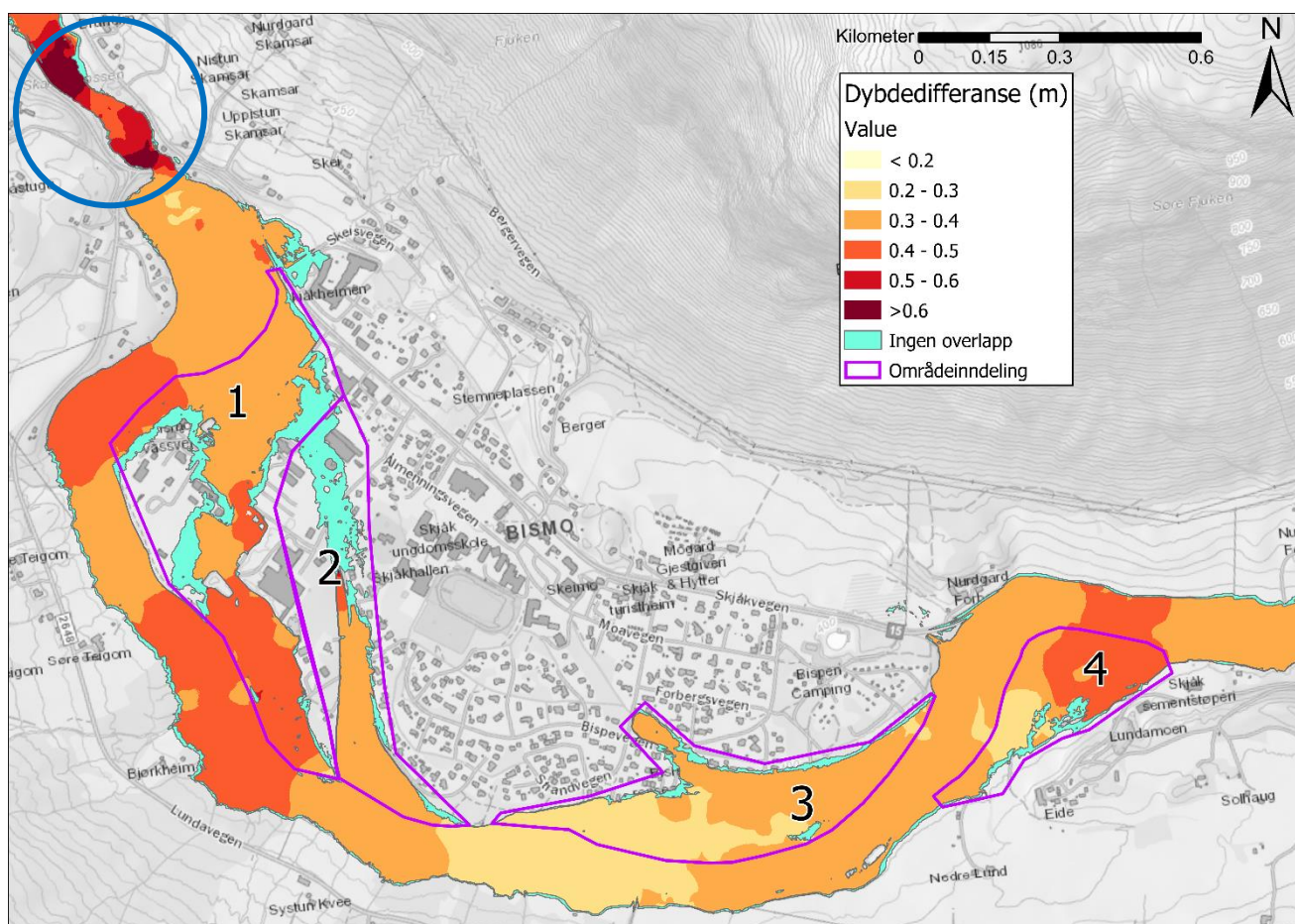
Tabell 6: Gjennomsnittsvannhastighet i oversvømt areal ved markerte områder ved en 200-årsflom med 20% klimapåslag.

Område	Gjennomsnittsvannhastighet (m)
1	0,74
2	0,34
3	0,76
4	1,1



### 6.3 Differanser i flomsonekartene

Kartet i figur 6.9 viser differansen i dybden mellom 200-årsflom med og uten klimapåslag. Dybdedifferansen er størst i partiet oppstrøms Skamsar bro, markert med blå sirkel i figur 6.9. Her holder vannet seg i elveløpet og differansen når opp til over 60 cm. I andre deler av elveløpet fører den økte vannstanden til større overflomming som sprer vannmengdene ut. Hovedsakelig i oversvømte arealer ligger dybdedifferansen på 30 – 40 cm og opp til 50 cm ved noen områder.



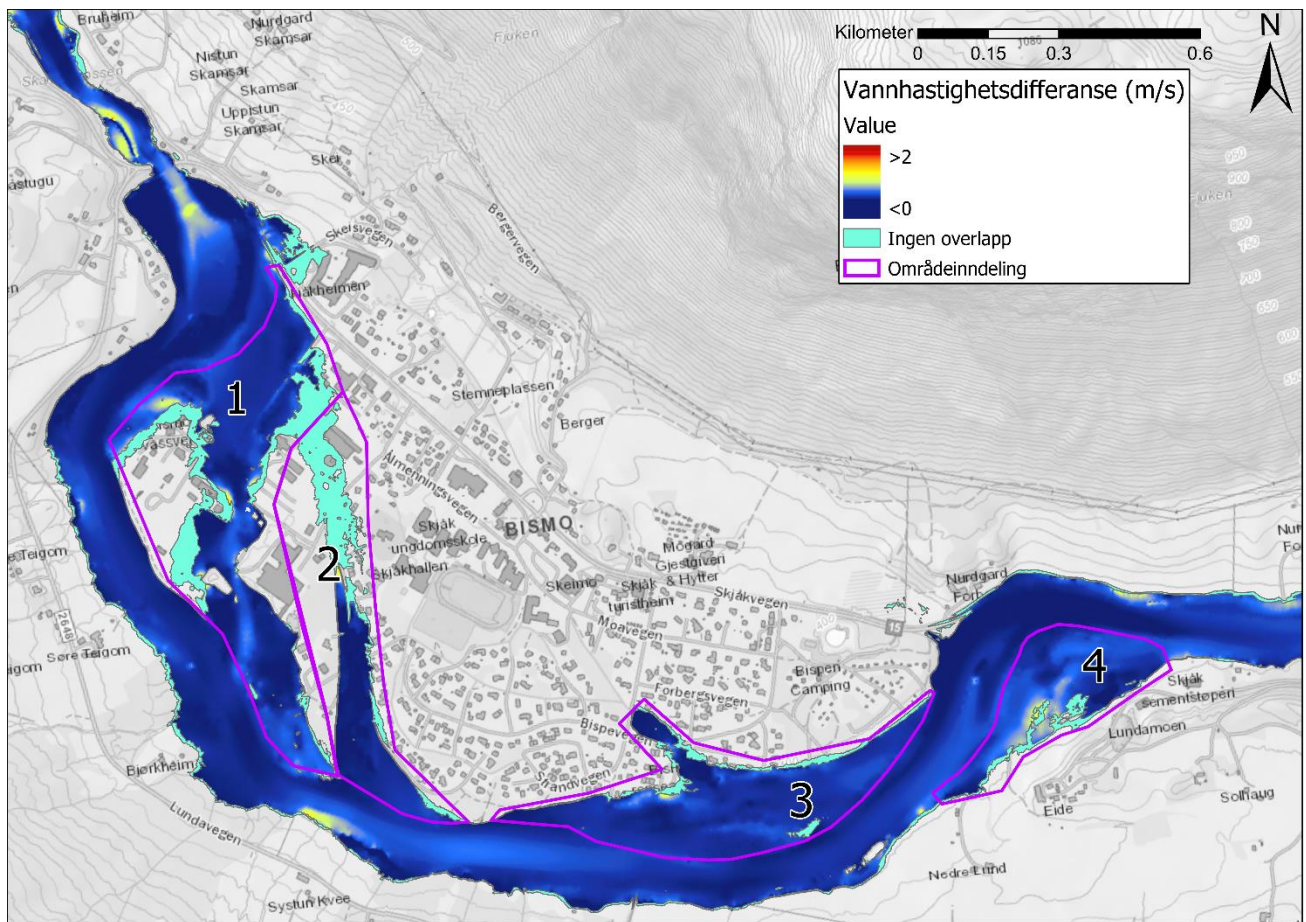
Figur 6.9: Kartet viser differansen i modellert dybde mellom flomsonekart med og uten klimapåslag. Område med høy gradient markert med blå sirkel.

Tabell 7 viser differanse i gjennomsnittsdybde i de oversvømte områdene. I tabellen ser man at område 2 har veldig liten forskjell i dybde mellom de modellerte flomhendelsene, og kartet i figur 6.9 viser en differanse på 0,3 – 0,4 meter. I utregningen av gjennomsnittsdybden er øvre del av område 2 tatt med, som vist til i figur 6.6 har dette området en grunn oversvømmelse på under 0,5 meter. Dermed vil da tallet for gjennomsnittsdybde i område 2 være noe lavere for hele området enn det ville ha vært for kun nedre del.

Tabell 7: Differanse i gjennomsnittsdybde mellom en 200-årsflom i dagens klima og en 200-årsflom med 20% klimapåslag.

Område	Differanser i gjennomsnittsdybde (m)
1	0,24
2	0,07
3	0,23
4	0,27

Kartet i figur 6.10 viser forskjeller i vannhastighet mellom de modellerte flomhendelsene. Det er stort sett små forskjeller i vannhastighet i elveløpet. De mest tydelige forskjellene er i områder med høyere gradient og rett etter disse. I resten av elveløpet er differensen i underkant av 1 m/s. I oversvømte områder, der hvor det er strømming, er det noe høyere hastighet ved en klimajustert 200-årsflom enn ved dagens klimatiske forhold, hvor differansen hovedsakelig ligger på rundt 0,2 – 0,3 m/s.



Figur 6.10: Kartet viser differansen i modellert vannhastighet mellom flomsonekart med og uten klimapåslag

Tabell 8 har en oversikt over differanser i gjennomsnittsvannhastighet mellom flommodelleringene. Likt som i utregningen for gjennomsnittsdybde er øvre del av område 2

tatt med. Dermed vil denne differansen være høy da, som vist i figur 6.8, øvre del har en høyere hastighet enn nedre del.

*Tabell 8: Differanse i gjennomsnittsvannhastighet mellom en 200-årsflom i dagens klima og en 200-årsflom med 20% klimapåslag.*

<b>Område</b>	<b>Differanser i gjennomsnittsvannhastighet (m)</b>
1	0,09
2	0,17
3	0,09
4	0,16



## 7 Diskusjon

---

Resultatene viser hvilke områder i Bismo som er eksponert til flom ved en 200-årsflom i dagens klimatiske forhold, og en 200-årsflom i år 2100 med 20% klimapåslag. Ved en 200-årsflom i dagens klima vil de eksponerte områdene stort sett være langs Otta, nært til elva. I Bismo vil vestre og sør-østre del være eksponert, her finner vannet nye veger inn på elveslettene. Resultatet viser at områder på 609 km<sup>2</sup> vil bli oversvømt, og at 95 bygninger og 6,5 km veg vil være eksponert for vannets krefter.

Ved en 200-årsflom i år 2100 med 20% klimapåslag, som representasjon for klimatiske forhold predikert i RCP 8.5, viser resultatene at de allerede eksponerte områdene vil være mer eksponert med dypere oversvømmelser og raskere bevegelse i vannet. Resultatet viser at ved en 200-årsflom med 20% klimapåslag vil oversvømmelsen dekke 720 km<sup>2</sup>, og 126 bygninger og 7,5 km veg vil være eksponert for flom.

Modellens troverdighet er avhengig at resultatene stemmer overens med virkeligheten, og forståelse for at flomsonekartlegging inneholder usikkerheter. I delkapittel 7.1 vil jeg gå gjennom valideringen av modellen for å undersøke om modellen viser realistiske resultater, og i delkapittel 7.2 vil jeg presentere diverse usikkerheter som følger med i flommodelleringen.

### 7.1 Validering av modellen

Å validere modellen innebærer å undersøke om flommodellen viser realistiske resultater. Data for validering kan være blant annet oppmålt vannstand og vannføring, kart, bilder og anekdotiske fortellinger om oversvømmelser (Brunner, Savant, & Heath, 2020). For validering av denne flommodellen er det brukt:

- Bilder tatt under oktoberflommen av politiets helikopter hentet fra en VG-artikkel publisert 15. oktober 2018.
- En dronevideo lastet opp på YouTube 15. oktober 2018.
- Et flyfoto fra norgebilder.no tatt 16. oktober 2018 dagen etter oktoberflommen.

Bildene er god dokumentasjon for hvor flommen gikk ved tidspunktet bildet ble tatt, derimot er det ikke veldig lett å tolke hvor flommen gikk på flyfotoet, men noen områder er mer åpenbare enn andre. Tegn på at flommen har gått i et område kan være gjenværende vann,

utvasking av underlaget, og gjenstander, rusk og rask som ble ført med vannmassene (Fergus, Hoseth, & Sæterbø, 2010).

Tidspunktet for når bildene og dronevideoen er tatt er uvisst, og i flomsonekartet er det de dypeste og største oversvømmelsene under den modellerte flomhendelsen som er kartlagt. Dermed fører det til usikkerhet til hvor bra valideringen kan være ved å sammenlikne bildene og den modellerte flomhendelsen, da bildene kan være tatt før flomtoppen.

Vannføring for oktoberflommen oppstrøms Bismo er utilgjengelig. Vannføring oppmålt ved Ofossen målestasjon vil være høyere enn vannføringen oppstrøms Bismo grunn av bekker langs elveløpet ved Bismo. Dermed er vannføringen for 200-årsflom med dagens klima, hentet fra NEVINA, brukt for validering. Flomtoppen ved Ofossen målestasjon under oktoberflommen nådde  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  og NEVINAs estimat på en 200-årsflom oppstrøms Bismo er  $780 \text{ m}^3/\text{s}$ . Da vannføringen ved oktoberflommen og vannføringen brukt i modelleringen er forskjellig vil dette føre til usikkerheter i validering. Vannføringen hentet fra NEVINA er  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  lavere, som muligens ikke er så langt unna et realistisk tall for vannføring oppstrøms Bismo, da bekkene ved Bismo er med i vannføringen for oktoberflommen.

Utsnittene av flyfoto og flomsonekart peker nord, og ved bruk av bilder er det markert antatt posisjon av drone/kamera med oransje figur.

### 7.1.1 Område 1

Figur 7.1 er en skjermdump fra dronevideoen tatt under oktoberflommen i 2018 hvor en kan se at flommen har ført til oversvømmelser på elvesletten i øvre del av område 1.



Figur 7.1: Skjermdump fra dronevideo filmet under oktoberflommen. Markert med oransje figur er antatt posisjon av dronen (Lilleengen, 2018).

Figur 7.2 viser et bilde tatt under oktoberflommen og utsnitt av modellert 200-årsflom. Bildet validerer at vannet vil finne en veg gjennom Bismo slik som modellen viser. Bildet er tatt ved et tidspunkt hvor flommen enda ikke har nådd bedriften Glasopor, markert med grønn sirkel. At flommen nådde Glasopor er vel dokumentert, da oktoberflommen medførte at omtrentlig 25 000 kubikk med glasopor havnet i elva og ble ført nedover elveløpet (Larsen & Bækkelien, 2020). Figur 7.3 viser at flomvannet nådde fram til Glasopor.



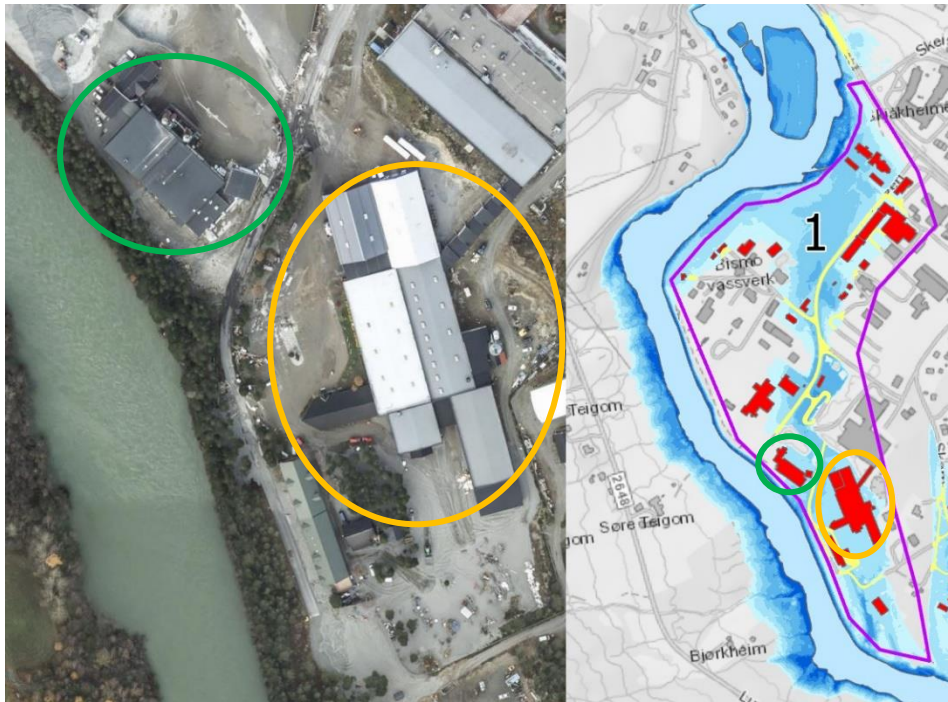
Figur 7.2: Bilde fra oktoberflommen og utsnitt av kartet for en modellert 200-årsflom, med bedriften Glasopor markert med grønn sirkel. Markert med oransje figur er antatt posisjon av kamera (Rognstrand, Bugge, & NTB, 2018, redigert av forfatter)



*Figur 7.3: Flomvann ved bedriften Glasopor (Silseth, Rognstrand, & Jæger, 2018).*

Det er ikke funnet bilder fra oktoberflommen for resten av område 1, dermed er flyfotoet fra norgebilder brukt. Figur 7.4 viser sørlig del av område 1 hvor bygningen til Glasopor kan bli sett øverst til venstre, markert med grønn sirkel. Flyfotoet viser mulige tegn til at vegen etter Glasopor har blitt utsatt for flommen da det ligger gjenstander og gjenværende vann. Modellert flomhendelse viser at bygningen, markert med oransje sirkel i figur 7.4, er utsatt, det er derimot vanskelig å se tegn til at oktoberflommen rammet denne bygningen.

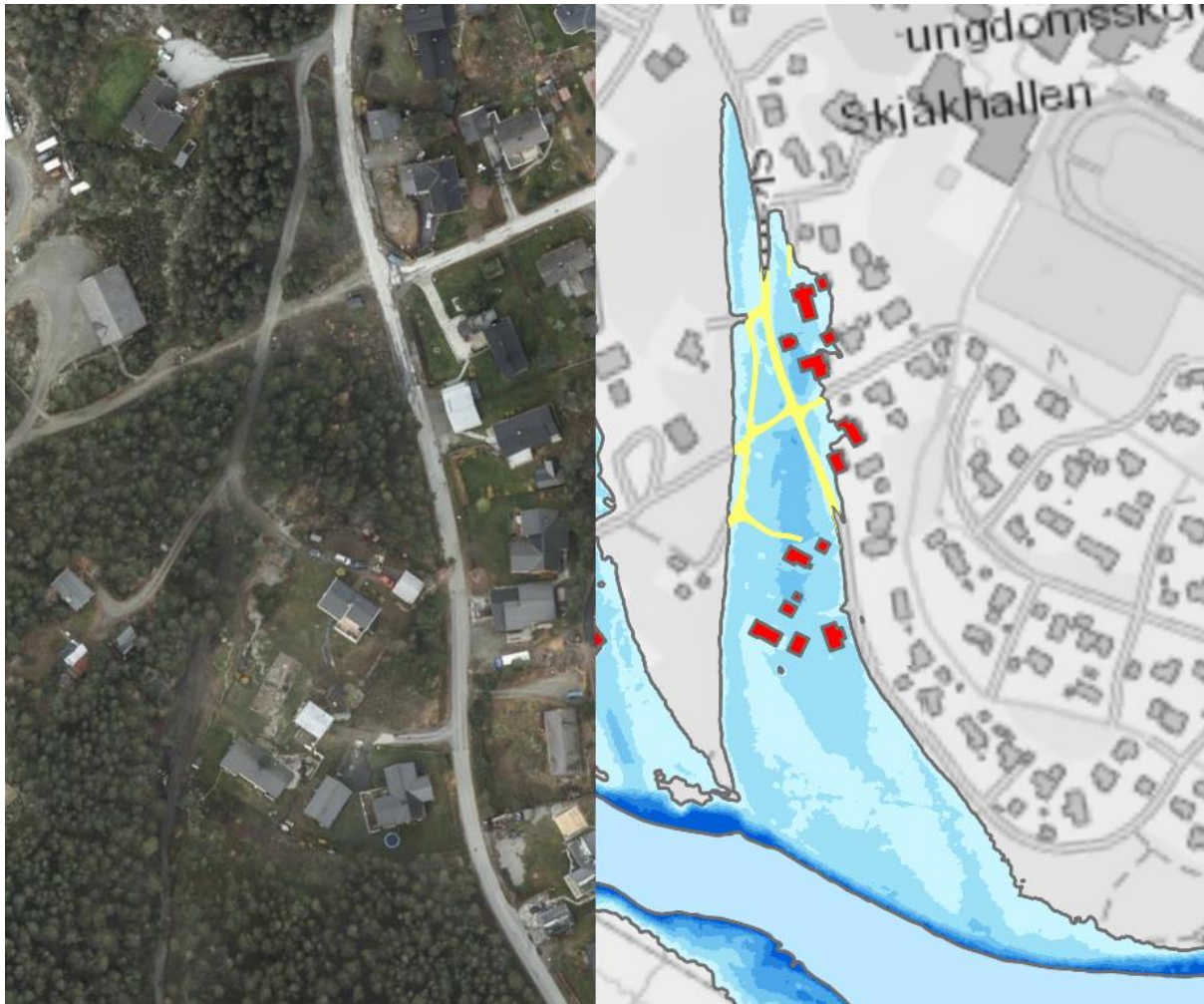




Figur 7.4: Utsnitt flyfoto hentet fra norgebilder.no av nederste del av område 1, med Glasopor markert med grønn sirkel, og annen eksponert bygning med oransje sirkel..

### 7.1.2 Område 2

Det er ikke funnet noen form for dokumentasjon for oversvømmelser i område 2. Flyfotoet i figur 7.5 viser område 2 dagen etter oktoberflommen og det er vanskelig å tolke hvor det har vært oversvømmelser. Det kan se ut som om vegene i flyfotoet har vært dekt av vann, og det er tegn til noe forflytning av gjenstander. Vannhastighetskartet i figur 6.4 viser at dette området er utsatt for oversvømmelser som ikke er spesielt dype eller har høy hastighet. Dette kan være en grunn til at flyfotoet er vanskelig å tolke da vannet her ikke har hatt store krefter og da ikke påvirket arealet i stor grad. Nøyaktigheten til kartleggingen ved område 2 er usikkert da det er vanskelig å si hvor det har vært eventuelle oversvømmelser.



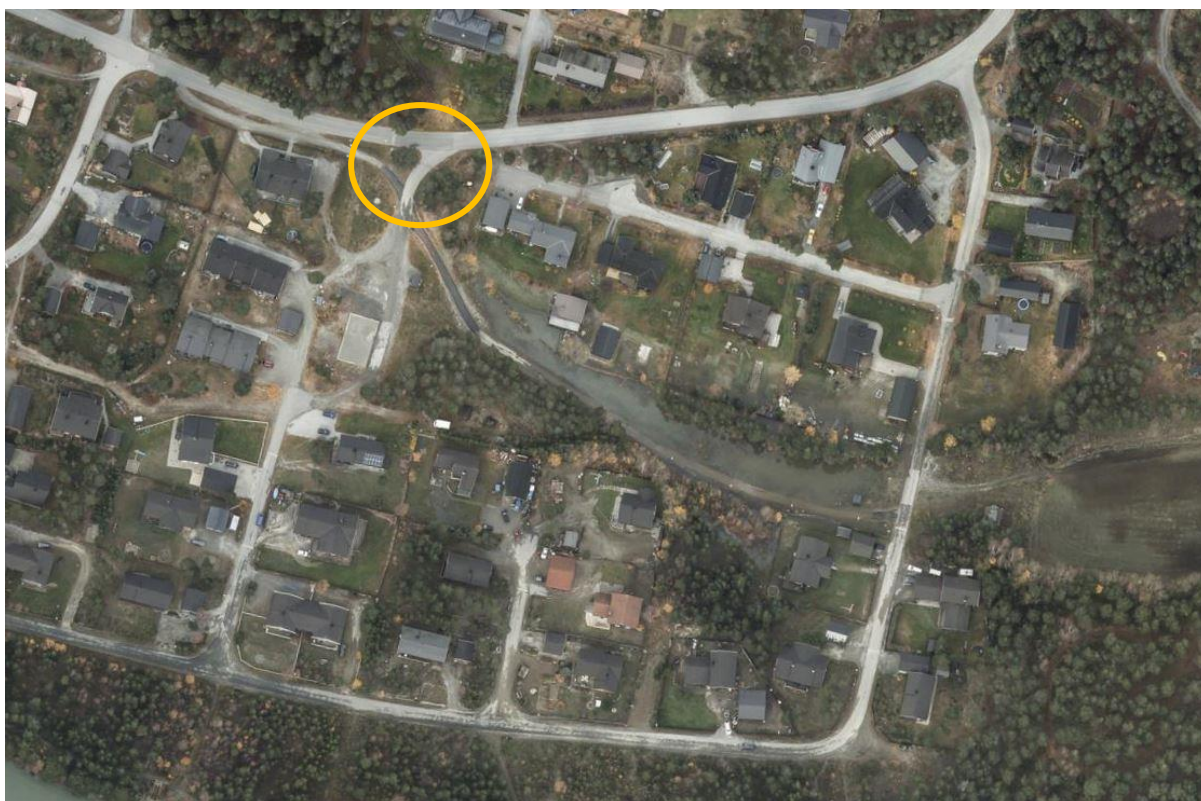
Figur 7.5: Område 2 vist i utsnitt av flyfoto fra norgebilder og modellert flomhendelse.

### 7.1.3 Område 3

I område 3 viser den modellerte flomhendelsen mye større oversvømt areal enn det bildet tatt under oktoberflommen viser (se figur 7.6). Dette kan være på grunn av unøyaktig modellering, eller at bildet er tatt ved en lavere vannføring enn flomtoppen. Med tanke på at bildet fra område 1 ikke viser oversvømmelser ved Glasopor er det sannsynlig at disse bildene er tatt tidligere i flomhendelsen, før flomtoppen. Dermed er det vanskelig å si noe om nøyaktigheten til flommodelleringen i dette området ut ifra bildet.



Figur 7.6: Oversvømt areal ved område 3 under oktoberflommen og ved modellert 200-årsflom, område med forskjell i oversvømmelser markert med oransje sirkel. Markert med oransje figur er antatt posisjon av kamera (Rognstrand, Bugge, & NTB, 2018, redigert av forfatter).



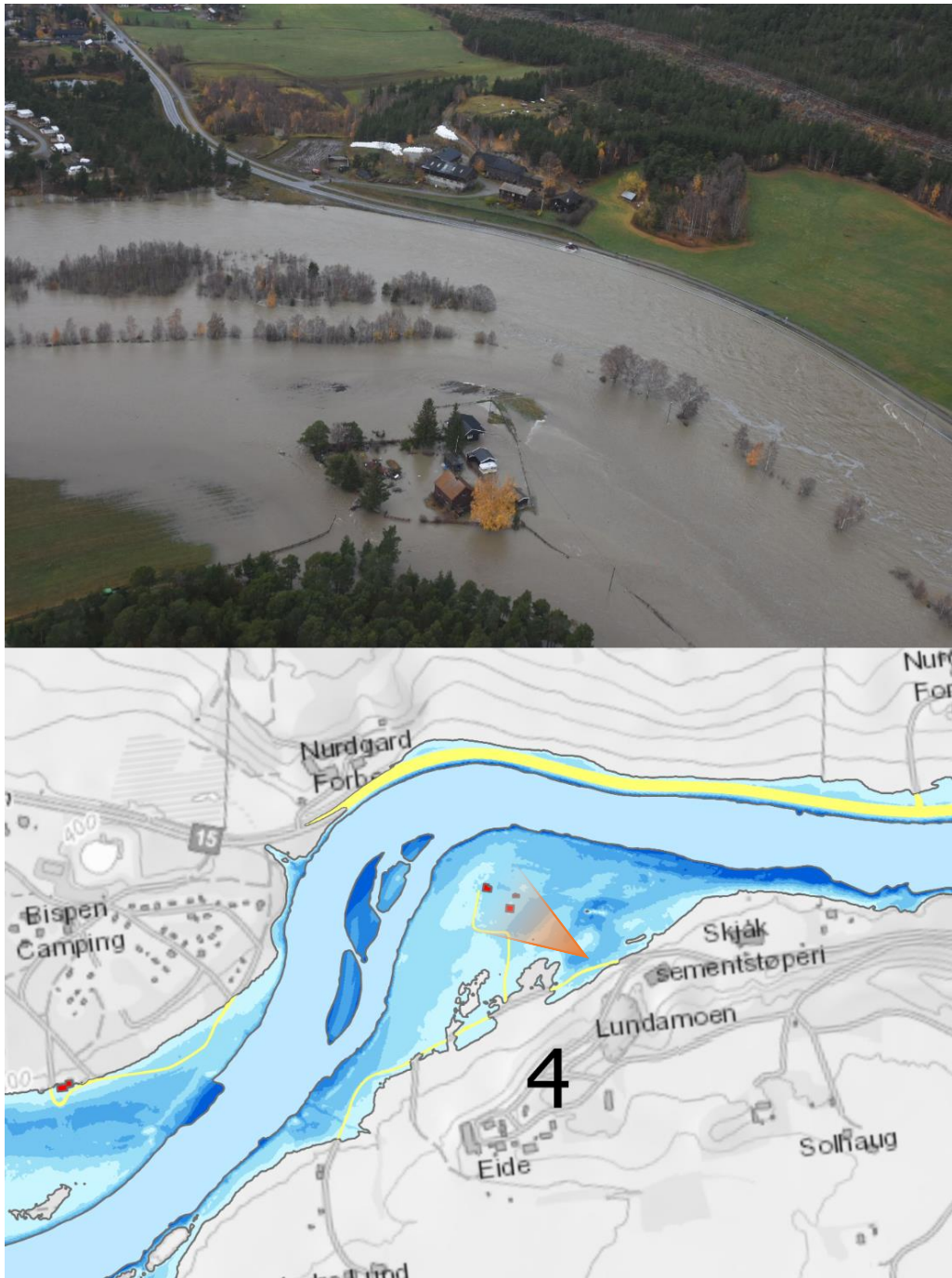
*Figur 7.7: Flyfoto fra norgebilder over område 3 med oransje sirkel rundt et område med markant forskjell mellom oktoberflommen og modellert flomhendelse.*

Flyfotoet i figur 7.7 viser tegn til at vann ikke har dekket like mye som flommodellen foreslår. I figur 7.6 er et vegkryss ringet rundt med oransje sirkel hvor flommodellen viser oversvømmelse, og flyfotoet i figur 7.7 viser noe tegn til denne oversvømmelsen, men ikke i like stor grad som foreslått av flommodellen. Dette viser at flommodellen muligens overestimerer oversvømmelsene i dette området.

Som et flomtiltak etter oktoberflommen var det i desember 2019 bygd en flomvoll ved Blåbærmyra (område 3) (Eide, 2019). Denne flomvollen er ikke en del av terrengmodellen brukt i flommodellering og er da ikke tatt hensyn til. Dette reduserer brukbarheten til flomsonekartet i dette området.

#### 7.1.4 Område 4

Den samme usikkerheten i område 3 viser seg i valideringen av område 4, hvor flomsonekartet viser større oversvømmelse enn bildet (se figur 7.8).



Figur 7.8: Oversvømt areal ved område 4 under oktoberflommen og ved modellert 200-årsflom (Rognstrand, Bugge, & NTB, 2018, redigert av forfatter).



Figur 7.9: Flyfoto fra norgebilder over område 4 med mulig flomgrense under oktoberflommen markert med rød pil, og modellert flomgrense vist med gul pil.

Flyfotoet i figur 7.9 viser tegn til at flommen ikke har gått like langt inn på elvesletten som det den modellerte flomhendelsen viser. I flyfotoet fra oktoberflommen ser det ut som det er en grense for hvor langt flommen har gått basert på tegn til utvasking av underlaget, og gjenstående gjenstander og masser. Denne grensen ligger midt på et jorde (rød pil), mens den foreslåtte elvegrensen i flomsonekartet er nesten ved veggen (gul pil).

Bildene tatt under oktoberflommen og flyfotoene etter kan antyde at flommodellen overestimerer vannstanden i flommodellen. Dette samsvarer med undersøkelsene gjort i kapittel 5.5 hvor Full Momentum viste en høyere vannstand enn oppmålt ved Ofossen målestasjon. Utenom dette ser det ut som om flommodellen stort sett har kartlagt de samme utsatte områdene som var oversvømt under oktoberflommen og har en middels god nøyaktighet.

## 7.2 Usikkerheter

Usikkerhet er ufullstendig kunnskap som følge av mangel på sikker informasjon eller uenigheter om det kjente (Hanssen-Bauer, et al., 2016). Det er usikkerheter i flere av delene i denne studien, ikke bare i selve prosessen, men også i dataene og grunnlaget for dataen.

Usikkerhetene til klimaframskrivninger blir vist til i miljødirektoratets rapport om klima i Norge i 2100 (Hanssen-Bauer, et al., 2016). NVE viser til klimaendringer og framtidige flommer i Norge i Lawrence (2016), som har brukt resultater fra miljødirektoratets rapport. Lawrence (2016) er brukt som grunnlag for utregning av klimapåslag til vannføring for flom og viser til anbefalte tall for ajourføring av tidligere kartlagte flomsoneer.

### 7.2.1 Klimaframskrivninger

Først og fremst er det usikkerheter knyttet til klimaendringer; hvor mye av økningen menneskelig aktivitet står for, om det er naturlige klimavariasjoner, og usikkerhet i selve klimamodellene som framskrivningene er basert på. Hanssen-Bauer et al. (2016) viser til at usikkerhet knyttet til årsak, altså rollen til menneskelig aktivitet i økningen, er i noen grad tatt hensyn til ved å benytte forskjellige utslippsscenarioer. Denne usikkerheten stammer fra usikkerheter knyttet til framtidige demografiske endringer i økonomi, befolkningsvekst, grad av innovasjon som valg av energikilder og energieffektivitet, og andre sosioøkonomiske faktorer. Disse faktorene fører videre til usikkerheter i utslipp av drivhusgasser, og kortlivede forurensingsgasser og partikler. Det er vanskelig å si noe om hvordan utviklingen av forbrenning av fossile brensler vil være, samt hvordan framtidig landbruksproduksjon vil påvirke metanutslipp, og hvordan behandling av utslipp ved søppelfyllinger vil være.

Naturlige klimavariasjoner fører til videre usikkerhet ved å forutsi hvordan klimaet vil være i fremtiden. Denne usikkerheten kan knyttes til interne variasjoner i klimasystemet og variasjoner av eksterne naturlig pådrag. Klimasystemet er ikke-lineært og kaotisk som fører til at det er umulig å beregne endringer fra år til år, eller tiår til tiår (Hanssen-Bauer, et al., 2016). Denne umuligheten kommer fra at ikke-forutsigbare interne variasjoner i klimasystemet kan være betraktelig større enn de forandringer i klimaet som er knyttet til drivhusgasser. Disse interne variasjonene i klimasystemet omfordeler energien mellom forskjellige systemer eller geografiske områder, og med det er prosesser som ikke forandrer mye av den totale mengden energi. Interne klimatiske variasjoner påvirker temperatur og nedbør, oftere på en regional skala kontra global da geografisk lokasjon er ofte relevant. El Niño er et eksempel på en intern variasjon som har stor påvirkning på omfordelingen av energi mellom hav og atmosfære. I klimamodeller er det tatt hensyn til uforutsigbare interne variasjoner som El Niño ved å plote de inn i tilfeldige intervaller, dette anses for å være relativt god representasjon av interne variasjoner (Hanssen-Bauer, et al., 2016; Benestad, Mamen, Harstveit, & Fuglestad, 2020).

Naturlige eksterne pådrag har stort sett mindre usikkerhet enn andre usikkerheter i klimaframskrivningene. Dette er på grunn av muligheter til å predikere framtidige variasjoner i solinnstråling, basert på historisk data på om lag 100 år med unntak av en velkjent 11-års syklus i solinnstråling. Store vulkanutbrudd har kortvarige og store effekter på klimaet, som varer omtrentlig 2 til 4 år, og som kan føre til ekstreme klimatiske hendelser (Hanssen-Bauer, et al., 2016; Benestad, Mamen, Harstveit, & Fuglestad, 2020).

Til slutt i usikkerhet i klimaframskrivningene er modellusikkerhet. Denne usikkerheten stammer fra en ufullstendig forståelse av klimasystemet, vanskeligheter med å implementere forståelsen i et numerisk matematisk rammeverk og manglende beregningskapasitet i dagens superdatamaskiner. Stor usikkerhet skyldes uenigheter om lite kjente parametere i klimamodellene, Hanssen-Bauer et al. (2016) viser til uenigheter om hvordan en best kan simulere effekten av skyer. Andre usikkerheter knyttes til hvilke prosesser som er tatt med i modelleringen, generalisering av disse, samt hvorvidt kunnskapen om prosessene er sikre. Videre vises det til at manglende kunnskap om prosesser knyttet til metanutslipp fra smeltende tundra og fra havbunn ved global oppvarming har ført til at det ikke er tatt med i klimamodellene (Hanssen-Bauer, et al., 2016).

### 7.2.2 Data for vannføring

Vannføringen brukt i flommodelleringen er hentet fra NEVINA som beregner estimerte flomverdier basert på automatiske prosesser. Beregninger for nedbørsfelt over 60 km<sup>2</sup> beregnes med RFFA\_2018, denne metoden bruker medianflom som utgangspunkt for beregninger av flomindekser. Det er en viss usikkerhet i disse beregningene som øker med gjentakintervall. Sammenliknet med resultater fra andre metoder viser det seg at RFFA\_2018 gir noen av de beste resultatene som er oppnådd, spesielt for døgnmiddelflom, 100- og 200-årsflom (Engeland, et al., 2020). Det er usikkerheter i hvor realistiske flomverdiene er, dermed blir det videre usikkerheter i flomsonekartene da de er basert på disse tallene. I tillegg til usikkerheten i estimeringen er vassdragene antatt uregulerte, som fører til at tallene brukt i flommodelleringen kan være for høye da noen av innsjøene i Ottas nedbørsfelt er regulerte (NVE, 2019).

Det er brukt et klimapåslag på 20% i flommodelleringene. Det er ikke funnet et konkret tall for Ottavassdraget. Lawrence (2016) viser til at det er anbefalt 0% klimapåslag for flomkartlegging i nedbørsfelt som er dominert av snøsmelteflommer om våren, men viser også til at det er anbefalt 20% klimapåslag for Lågen oppstrøms tettstedet Otta. Med tanke på at Ottavassdraget



er dominert av snøsmelteflommer og har veldig lite årsnedbør er det mulig at 0% klimapåslag er det riktige. Grunnet usikkerhet har jeg valgt å bruke 20% klimapåslag da det er anbefalt av Lawrence (2016) i ajourføring for flomsonekart bestående av Ottavassdraget og andre sidevassdrag (se kapittel 4.2 for disse flomsonekartene).

Vannføringen som nevnt tidligere er fra et punkt satt oppstrøms Bismo i NEVINA, dette medfører at bekker ved Bismo ikke er med på flomberegningene. Disse bekkene kan også være flomutsatt, til tross for at de ikke er en del av denne kartleggingen. Dermed fører det med seg noe usikkerhet i flomsonekartet da bekkene kan føre til oversvømmelser utenfor kartlagte områder.

### 7.2.3 Terrengmodell og batymetri

Terrengmodellen brukt i flommodelleringen inneholder ikke informasjon om vegetasjon og bygninger da det er blitt filtrert vekk, dermed blir terrenget representert mye flatere og mindre dynamisk enn det er i virkeligheten. På grunn av dette kan det modellerte vannet finne veier som egentlig er blokkert i virkeligheten og da vise et resultat som ikke er nøyaktig.

Batymetrisk data for Otta var ikke tilgjengelig, dermed ble det en utfordring i denne masteroppgaven å estimere batymetri for Otta ved Bismo. Det fører med seg en høy grad av usikkerhet da det ikke er gjort en grundig undersøkelse av hvordan elvebunnen er i virkeligheten. Dette kan føre til at elvebunnen er enten for grunn eller for dyp, som vil påvirke hvor og når elven flommer over. Vanligvis hentes batymetrisk data gjennom feltbefaring ved å sette GPS punkter på elvebunnen på tvers av elveløpet, multistråleekkolodd som skanner elvebunnen, eller ved bruk av lidar med grønn laser (Vingerhagen, 2018).

Ofte er det brukt oppmålte tverrsnitt av elva som viser elvebunnen i profil. Disse tverrsnittene blir brukt i 1D modeller uten å modifisere terrengmodellen, 2D modeller derimot trenger informasjon om batymetrien i terrengmodellen. Teknikken brukt for å inkludere batymetrien i terrengmodellen er i utgangspunktet ment for bruk med oppmålte tverrsnitt, for å interpolere terrenget mellom disse. I denne flommodelleringen er formen på tverrsnittene estimert etter et flyfoto med lav vannføring i elva.

Det var vanskelig å kalibrere estimatet av batymetrien i elveløpet med en fjernanalytisk fremgangsmåte. Det var brukt vannstand og vannføring ved Ofossen målestasjon til dette. Som vist tidligere er denne målestasjonen nedstrøms Bismo som betyr at det er forskjellige vannføringer ved målestasjonen og ved Bismo. Dermed kunne jeg ikke kalibrere batymetrien i

hele elveløpet til lik nøyaktighet som jeg kunne ved Ofossen målestasjon. Om jeg hadde hatt tilgang til oppmålt vannstand langs Otta ved Bismo, hadde jeg kunnet brukt oppmålingene for å sammenlikne modellerte vannstander. Har jeg kun hatt vannføring for Otta ved Bismo kunne jeg ha brukt flyfoto fra datoen oppmålingen ble tatt, og prøvd å kalibrere ved å sammenlikne flommodellen med flyfotoet. Siden jeg bare hadde vannføring og vannstand for Ofossen målestasjon var disse teknikkene ugunstige.

## 7.2.4 Flommodellering

Flommodellering er en generaliserende representasjon av en mulig flomhendelse. Flommodeller generelt tar ikke hensyn til infiltrasjon av vann og heller ikke forandringer i terrenget knyttet til masseforflytning og erosjon. I flommodellen brukt i denne studien er det ikke tatt hensyn til tetting av kulverter og bro, noe som er mulig å gjøre i HEC-RAS, men krever mer redigering av modellen og mer data. I Otta ved Bismo er det ingen kulverter i hovedløpet og eventuelle stikkrenner befinner seg langt inn på elvesletten. Broer kan kun bli modellert med en 1D modell i HEC-RAS. Det er mulig å bruke en kombinasjon av 1D og 2D hvor 1D elementer representerer hovedløpet til elva og 2D representerer elveslettene langs elva. Denne flommodelleringen er kun gjort i 2D, da det er mer komplisert å lage en kombinert modell. 2D modellering ble valgt da elvesletten er ganske bred og vann kan bevege seg i forskjellige retninger, noe som er ikke mulig å modellere med en 1D modell.

### 7.2.4.1 Mannings n-verdi

Det medfører seg en del usikkerhet i modellen med tanke på valg av ruhekskoeffisienter. I denne studien er n-verdiene plukket ut fra en tabell i Brunner (2016c) med beskrivelse av overflaten sammenliknet med bilder fra studieområdet. Verdiene i tabellen i Brunner (2016c) er anbefalt å bruke som utgangspunkt. Verdiene er ikke kalibrert da jeg ikke hadde oppmålt vannstand for flere punkter i Otta ved Bismo. Det er også veldig tidskrevende å gå gjennom hver enkelt n-verdi i AR5-laget og sammenlikne modelleringer. På grunn av denne oppgavens tidsramme valgte jeg å ikke bruke tid på kalibrering av n-verdier.

Som vist i kapittel 5.6 viser modellen en sensitivitet til valget av n-verdi i elveløpet, dermed kan det tenkes modellen ville vært mer nøyaktig om den hadde blitt kalibrert. I modellen er det brukt én n-verdi for hele elveløpet, som kan føre til et unøyaktig resultat da elva ikke er lik overalt. En mulighet kunne vært og delt elva inn i flere deler og gitt delene en egen n-verdi. Dette kan gjøres innad i HEC-RAS hvor en kan definere egne områder for n-verdi som overskriver et eventuelt importert Mannings-lag.

Jeg valgte å bruke Mannings n-verdi for bygninger. Dette viste seg å være en akseptabel måte å ta hensyn til bygninger uten å måtte redigere terrenngmodellen. I figur 7.10 vises et utsnitt fra HEC-RAS' *partikkelsporing* som simulerer hvordan vannet beveger seg, hvor de lange strekene indikerer høyere relativ hastighet enn de korte. I midten er det ingen bygninger, og partiklene beveger seg relativt raskt. Markert med røde sirkler er lokasjonen til bygninger som senker farten til vannet. Som nevnt tidligere i kapittel 5.2.1 kan man også ta bygninger med i modellen ved å redigere terrenngmodellen, enten gjennom å bruke tverrsnitt i HEC-RAS på lik måte som redigering av batymetri, eller justere verdier i rasterlaget i ArcGIS. Både n-verdi-metoden og terrenngmodell-metoden har positive og negative sider. Ved å representere bygninger i terrenngmodellen vil vann være helt blokkert ut av bygningene, og ved bruk av n-verdi-metoden vil ingen bygninger blokkere vannet helt. Begge kan representere bygninger nøyaktig og unøyaktig i forskjellige situasjoner. I flommodellen brukt i denne studien medfører det seg usikkerheter tilknyttet at vann ikke blir blokkert av bygninger.



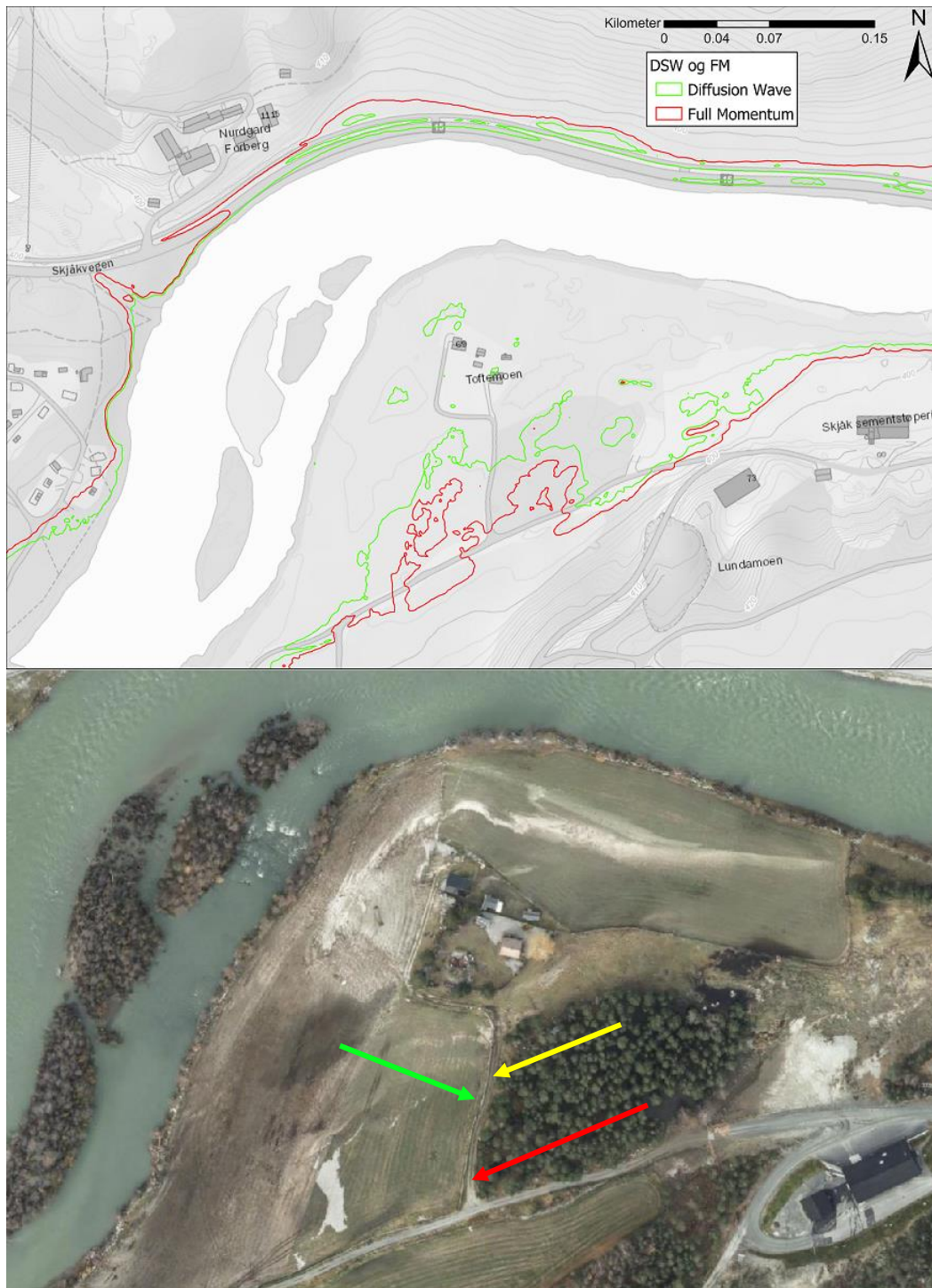
Figur 7.10: Utsnitt av flommodell med partikkelsporing, røde sirkler viser bygningspolygonenes lokasjon hvor partiklenes hastighet senkes.

#### 7.2.4.2 Diffusion Wave og Full Momentum

Full momentum er brukt i den endelige modellen. Full Momentum skal egne seg bedre i situasjoner hvor vann må trenge seg gjennom trangere passasjer, som ved Skamsar bro, og det er anbefalt å bruke Full Momentum om det er betydelige forskjeller i resultatene (Brunner, 2016b). I sammenlikningen av vannstand, vannhastighet, og oversvømte områder mellom DSW og FM viste det seg noen betydelige forskjeller som vist i kapittel 5.5, dermed ble FM valgt.

Under prosessen med å sette opp modellen, som 2D cellenettet og testing av diverse parametere, er DSW brukt. Dette er fordi DSW trenger mindre prosesseringstid og da er mer effektiv til å gå igjennom iterasjoner av modellen, som anbefalt i brukermanualen (Brunner, 2016b). Etter modellen var noenlunde ferdig ble den testet med FM, det var her det viste seg forskjeller i vannstand, vannhastighet og oversvømte områder.

Det er store usikkerheter knyttet til at det er generelt lav grad av kalibrering i modellen, da det er tidskrevende å undersøke alle parameterne. Modellen er spesielt lite kalibrert med bruk av FM, da DSW ble brukt til å sette opp modellen. Etter valideringen gjort i 7.1 kan det synes at DSW produserer et mer nøyaktig resultat slik modellen er oppsatt, vist i figur 7.11. Årsaken til dette kan være at batymetrien er for grunn for FM, og/eller at n-verdien i elveløpet er for høy som fører til høyere vannstander.



Figur 7.11: Forskjellig i modellert flomgrense i DSW (grønn pil) og FM (rød pil) med antatt flomgrense fra oktoberflommen (gul pil).

#### 7.2.4.3 Modellørs erfaring

Jeg har ingen tidligere erfaringer med HEC-RAS eller hydrauliske analyser, og dermed måttet ha lært programvaren og mye av teoriene imens jeg har arbeidet. Dermed vil det være en høy grad av usikkerhet i resultatene da programvaren er komplisert, og valgene en tar angående parametere er veldig innviklet. Som vist i kapittel 7.2.4.2 ble det gjort et valg med å bruke Full

Momentum i stedet for Diffusion Wave, da det er anbefalt om det er betydelige forskjeller mellom beregningsmetodene. Jeg misforstod hva det innebærer å bytte beregningsmetode, som fører til at modellen overestimerer vannstand da estimatet av batymetrien er kalibrert med DSW. Dette ble oppdaget under sluttdelen av arbeidet, og det var lite tid til å gjøre om på modellen og resultatene. Brunner et al. (2020) viser til at en bør ha en god bakgrunn innen hydrologi, og lære av andre når en skal bruke HEC-RAS. Med en mer erfaren modellør er det nok mulig å redusere usikkerhetene i denne flommodelleringen betraktelig.

HEC-RAS kan også være litt vanskelig å sette i gang med da programmet krever at desimalskillet er punktum og ikke komma, og ustødig-strøm-analyser vil ikke kjøre med norske navn på måneder i operativsystemet. Begge disse er for så vidt lett å ordne innad i Windows, men førte til at jeg måtte jobbe på en privat datamaskin fremfor datamaskiner tilgjengelig på NTNU Dragvoll, da de tilbakestiller innstillingene på noen minutters intervaller. HEC-RAS trenger også en fil for koordinatsystem hvis resultatene fra modelleringen skal bli georeferert. Denne filen kan hentes fra ArcGIS, men koordinatsystemfilene er skjulte. Løsningen til dette er å sette koordinatsystemet som favoritt innad i ArcGIS, som gjør at filen havner i en egen mappe. Heldigvis hadde en tidligere masteroppgave vært gjennom denne prosessen tidligere (Sigstad, 2018).

## 8 Avslutning

---

### 8.1 Forslag til videre arbeid

Flommodellen brukt i denne studien inneholder en del svakheter, spesielt på grunn av estimeringen av batymetrien. For å forbedre modellen burde batymetrien vært undersøkt nærmere, enten ved oppmålinger eller feltbefaringer. I tillegg burde hele flommodellen kalibreres for bruk av Full Momentum da det er mulig at den representerer vannstrømmingen i Otta ved Bismo mest nøyaktig.

Om modellen blir kalibrert bra nok og produserer et realistisk og tilfredsstillende resultat, kan flomsonekartet bli brukt videre i en risiko- og sårbarhetsanalyse av Bismo.

En interessant studie ville vært å undersøke effekten til flomvollen bygd ved Blåbærmyra. Eventuelt forsøkt å redigere inn flomvoller i terrengmodellen for å undersøke mulige flomtiltak.

### 8.2 Konklusjon

*Hvordan vil Bismo være eksponert for en 200-årsflom under dagens klimatiske forhold?*

Resultatene viser at en 200-årsflom i dagens klimatiske forhold vil eksponere bygninger og veg som ligger langs Otta, samt i vestre og sør-østre del av Bismo. Her vil flomvannet ta seg inn på elvesletten og kan føre til store ødeleggelser på bebyggelse og infrastruktur. Flomsonekartet viser at områder på 609 km<sup>2</sup> vil bli oversvømt, og at 95 bygninger og 6,5 km veg vil være eksponert for vannets krefter.

*Hvordan vil Bismo være eksponert for en 200-årsflom i år 2100 med klimatiske forhold resultert fra RCP 8.5 scenariet?*

Ved en 200-årsflom i år 2100 med 20% klimapåslag viser resultatene at det er mer oversvømmelser, mer eksponerte bygninger og infrastruktur, og at de er utsatt for dypere oversvømmelser med høyere vannhastighet som kan føre til enda større ødeleggelser. Ved en slik flomhendelse viser resultatet at oversvømmelsene vil dekke områder på 720 km<sup>2</sup>, og 126 bygninger og 7,5 km veg vil være eksponert for flom.

Kun oversvømmelser knyttet til Otta er kartlagt. Eventuelle bekker som renner gjennom Bismo er ikke tatt i betraktning, og oversvømmelser knyttet til disse er ikke inkludert.

Flommodell er begrenset i hvor bra de representerer virkeligheten. Resultatene fra denne flommodelleringen fører med seg en høy grad av usikkerhet, på grunn av; lav grad av kalibrering av parametere, estimering av batymetri, og usikre flomverdier og klimapåslag. Valideringen gjort i kapittel 7.1 viser at resultatene dekker de samme områdene som var utsatt under oktoberflommen i 2018, og at flommodelleringen overestimerer oversvømmelser.



# Referanser

---

- Ahlstrøm, A. P., Bjørkelo, K., & Fadnes, K. (2019). *AR5 Klassifikasjonssystem*. NIBIO.
- Benestad, R., Mamen, J., Harstveit, K., & Fuglestvedt, J. S. (2020). *Klimaendringer*. Hentet fra Store norske leksikon: <https://snl.no/klimaendringer>
- Betsholtz, A., & Nordlöf, B. (2017). *Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS, A case study on Höje river (Masteroppgave)*. Lund: Lund Universitet.
- Bjørnæs, C. (2015). *A guide to Representative Concentration Pathways*. Hentet fra CICERO: <https://www.cicero.oslo.no/en/posts/news/a-guide-to-representative-concentration-pathways>
- Brunner, G. W. (2016a). *HEC-RAS, River Analysis System User's Manual Version 5.0*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- Brunner, G. W. (2016b). *HEC-RAS, River Analysis System 2D Modeling User's Manual Version 5.0*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- Brunner, G. W. (2016c). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- Brunner, G. W. (2018). *HEC-RAS, River Analysis System Supplemental to HEC-RAS Version 5.0 User's Manual*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- Brunner, G. W., Savant, G., & Heath, R. E. (2020). *Modeler Application Guidance for Steady versus Unsteady, and 1D versus 2D versus 3D Hydraulic Modeling*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- Carlson, T. N. (2004). Analysis and prediction of surface runoff in an urbanizing watershed using satellite imagery. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, ss. 1087-1098.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- CivilGEO. (U.å.). *HEC-RAS 2D Flow Area Modeling*. Hentet fra CivilGEO: <https://knowledge.civilgeo.com/knowledge-base/hec-ras-2d-flow-area-modeling/>
- ClimRes. (2018). *Insurance compensation payment due to flood hazard*. Hentet fra ClimRes: <http://folk.ntnu.no/opach/tools/climres/>
- Collier, N., Radwan, H., Dalcin, L., & Calo, V. M. (2011). Diffusive Wave Approximation to the Shallow Water Equations: Computational Approach. *Procedia Computer Science*, ss. 1828-1833.
- Drageset, T.-A. (2000). *Flomberegning for Otta*. Norges vassdrags- og energidirektorat.

- Eide, S. (2019). *Flaumvoll ved Blåbærmyra i Bismo*. Hentet fra Skjåk kommune: <https://www.skjaak.kommune.no/aktuelt/flaumvoll-ved-blabarmyra-i-bismo.31603.aspx>
- Engeland, K., Glad, P., Hamududu, B. H., Li, H., Reitan, T., & Stenius, S. M. (2020). *Lokal og regional flomfrekvensanalyse*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat.
- ESRI. (U.å.). *How Fill works*. Hentet fra ArcMap: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fill-works.htm>
- Fergus, T., Hoseth, K. A., & Sæterbø, E. (2010). *Vassdragshåndboka*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.
- Fjelstad, K., & Hansen, B.-I. (2016). *Vannlinjeberegninger i nedre del av Bøvra ved Lom*. Oslo: HydraTeam AS.
- Forest, M. (2020). *HEC-RAS Subgrid Bathymetry Theory and Application*. Hentet fra The RAS Solution: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/hec-ras-subgrid-bathymetry-theory-and-application/>
- Førli, O. A. (2019). *2D numerical modeling of Mandalselva to ensure flood protection (Masteroppgave)*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology Department of Civil and Environmental Engineering.
- Goodell, C. (2010). *Downstream Boundry - Normal Depth?* Hentet fra The RAS Solution: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/downstream-boundary-normal-depth/>
- Goodell, C. (2014). *Re: Including channel bathymetry into your model, kommentar 11 [Blog kommentar]*. Hentet fra The RAS Solution: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/including-channel-bathymetry-into-your-terrain/>
- Goodell, C. (2015a). *2D Mesh "Leaking"*. Hentet fra The RAS Solution: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/2d-mesh-leaking/>
- Goodell, C. (2015b). *2D Troubleshooting - Fragmented Inundation*. Hentet fra The RAS Solution: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/2d-troubleshooting-fragmented-inundation/>
- Goodell, C. (2015c). *HEC-RAS Model with 2D Mesh Only*. Hentet fra The RAS Solution: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/hec-ras-model-with-2d-mesh-only/>
- Goodell, C. (2016). *Bridges in 2D Areas - Important Update!* Hentet fra The RAS Solution: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/bridges-in-2d-areas-important-update/>
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., . . . Ådlandsvik, B. (2016). *Klima i Norge 2100 Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015*. Miljødirektoratet.
- Hengl, T., & Evans, I. S. (2009). Chapter 2 Mathematical and Digital Models of the Land Surface. I T. Hengl, & H. I. Reuter, *Developments in Soil Science* (ss. 31-63). Elsevier.
- Hjermann, D. Ø. (2018). *Ørken*. Hentet fra Store norske leksikon: <https://snl.no/%C3%B8rken>

- Holtet, J. A. (2018). *LIDAR*. Hentet fra Store norske leksikon: <https://snl.no/lidar>
- Larsen, A. B., & Bækkelien, S. (2020). *Staten varsler millionkrav mot flomrammet bedrift*. Hentet fra NRK: <https://www.nrk.no/innlandet/staten-varsler-millionkrav-mot-flomrammet-bedrift-1.15163334>
- Lawrence, D. (2016). *Klimaendringer og framtidige flommer i Norge*. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Lilleengen, M. (2018). *Flom Skjåk 2018 [Videoklipp]*. Hentet fra youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=8ux-1WYvO4s>
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., & Flood, M. (2003). LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27, 1, ss. 88-106.
- Midttømme, G. H., Pettersson, L. E., Holmqvist, E., Nøtsund, Ø., Hisdal, H., & Sivertsgård, R. (2011). *Retningslinjer for flomberegninger*. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- NOAA. (2012). *Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data and Applications*. Charleston, SC.
- Norsk klimaservice. (2017). *Klimaprofil Oppland, Et kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning*. Hentet fra [https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/klimaprofiler/klimaprofil-oppland/\\_attachment/12035?\\_ts=15d9d3c1d03](https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/klimaprofiler/klimaprofil-oppland/_attachment/12035?_ts=15d9d3c1d03)
- NVE. (2019). *NEVINA Beregninger av lavvannsindekser og flomverdier, brukerveiledning*. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- NVE. (2020a). *Oktoberflaum på Vestlandet og Otta 2018*. Hentet fra Flomhendelser: <https://www.flomhendelser.no/20180637/oversikt>
- NVE. (2020b). *Gudbrandsdalslågen med Ottavassdraget og Vinstravassdraget*. Hentet fra NVE: <https://www.nve.no/flaum-og-skred/flom-i-regulerte-vassdrag/flomproblematikk-i-glommavassdraget-og-drammensvassdraget/glommavassdraget-flomoversikt/gudbrandsdalslagen-med-ottavassdraget-og-vinstravassdraget/>
- NVE. (2020c). *Kartlegging*. Hentet fra NVE: <https://www.nve.no/flaum-og-skred/kartlegging>
- NVE. (2020d). *Aktsomhetskart for flom*. Hentet fra <https://www.nve.no/flaum-og-skred/kartlegging/aktsemdkart/aktsomhetskart-for-flom/>
- NVE. (2020e). *Hydrologisk data*. Hentet fra NVE: <https://www.nve.no/hydrologi/hydrologiske-data/?ref=mainmenu>
- NVE. (U.å.). *Flomaktsomhetskart*. Hentet fra NVE: <https://temakart.nve.no/tema/flomaktsomhet>
- Orvedal, K., & Ortega, R. Z. (2015). *Delprosjekt Etne*. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Renkenberger, J. (2020). *An Adaptive Time-Step Optimization Method for 2D HEC-RAS Simulations*. Hentet fra The RAS Solution: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/an-adaptive-time-step-optimization-method-for-2d-hec-ras-simulations/>
- Rød, J. K. (2015). *GIS - verktøy for å forstå verden*. Bergen: Fagbokforlaget.

- Rognstrand, A., Bugge, S., & NTB. (2018). *Skjåk oversvømt og isolert*. Hentet fra VG: <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/Kv4p1E/skjaak-oversvoemt-og-isolert>
- Selby, M. J. (2005). *Hillslope Materials and Processes (2. utg.)*. Eastbourne: Oxford University Press.
- Sigstad, H. (2018). *Flommodellering i HEC-RAS En undersøkelse av nøyaktigheten til steady flow-modelleringer i HEC-RAS med to forskjellige GIS-representasjoner (Masteroppgave)*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Silseth, I., Rognstrand, A., & Jæger, O. (2018). *Flommen tok med seg glasopor til flere millioner kroner*. Hentet fra VG: <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/zL27z9/flommen-tok-med-seg-glasopor-til-flere-millioner-kroner>
- Stenius, S., Glad, P. A., Wang, T. K., & Væringstad, T. (2015). *Veilder for flomberengninger i små uregulerte felt*. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Svendsen, T. O. (2020). *Skjåk*. Hentet fra Store norske leksikon: <https://snl.no/Skj%C3%A5k>
- Syme, W. (2008). *Flooding in Urban Areas - 2D Modelling Approaches for Buildings and Fences*.
- The RAS Solution. (2018a). *Terrain Modification in HEC-RAS Part 1: Bathymetry [Videoklipp]*. Hentet fra <https://www.youtube.com/watch?v=QyrOhkJZPhI>
- The RAS Solution. (2018b). *HEC-RAS Basics Part 5 of 7: Computational Options and Variable Time Steps [Videoklipp]*. Hentet fra <https://www.youtube.com/watch?v=2hkpPdvicmU>
- Thorsnæs, G. (2019). *Bismo*. Hentet fra Store norske leksikon: <https://snl.no/Bismo>
- Varsom. (u.å.). *Ordlister for flom*. Hentet fra Varsom: <https://www.varsom.no/flom-og-jordskredvarsling/ordliste-for-flom/>
- Vingerhagen, S. (2018). *Flomsonekart Delprosjekt Mandal*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Vinjar, A., & Thorsnæs, G. (2020). *Otta*. Hentet fra Store norske leksikon: [https://snl.no/Otta\\_-\\_elv](https://snl.no/Otta_-_elv)
- Wasrud, J. (2015). *Flaumfare langs bekker*. Norges vassdrags- og energidirektorat.

# Vedlegg

---

**Vedlegg 1:** Flomsonekart for 200-årsflom i Otta ved Bismo

**Vedlegg 2:** Flomsonekart for 200-årsflom med 20% klimapåslag i Otta ved Bismo

**Vedlegg 3:** Vannhastighetskart for 200-årsflom i Otta ved Bismo

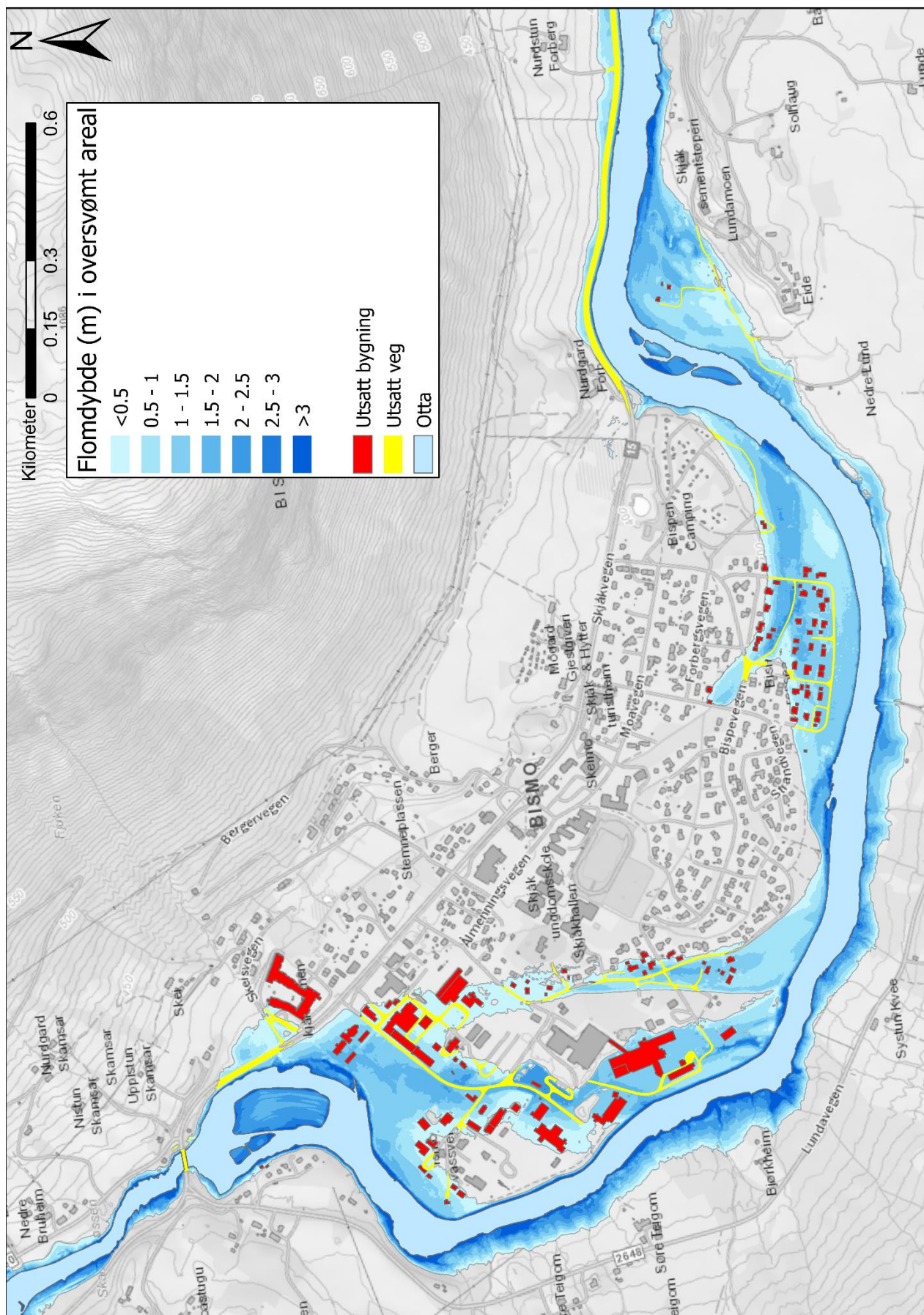
**Vedlegg 4:** Vannhastighetskart for 200-årsflom med 20% klimapåslag i Otta ved Bismo

**Vedlegg 5:** Mannings n-verdier

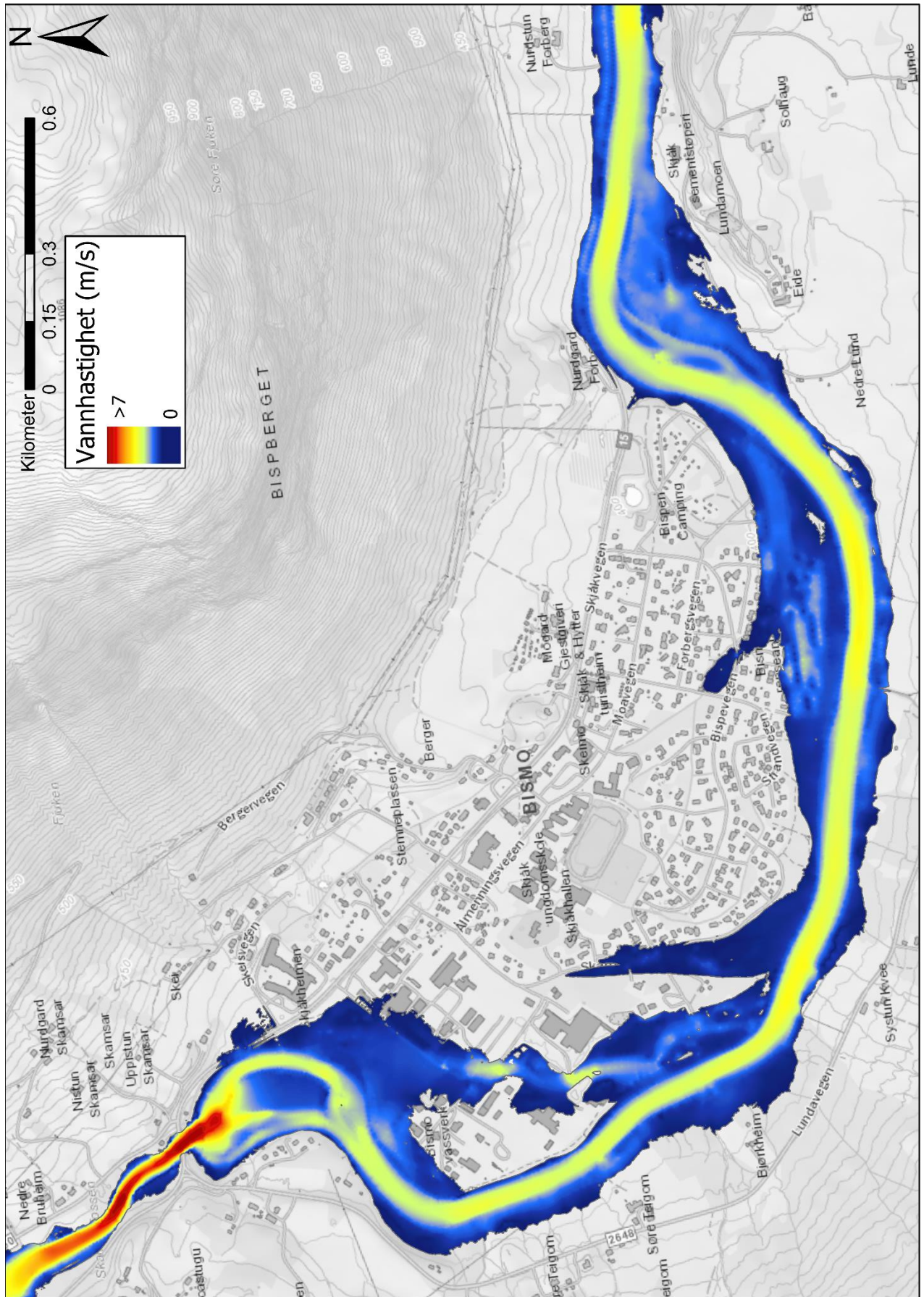
**Vedlegg 6:** Nedbørsfeltparametere og flomindekser fra NEVINA



Vedlegg 2: Flomsoneskart for 200-årsflom med 20% klimapåslag i Otta ved Bismo

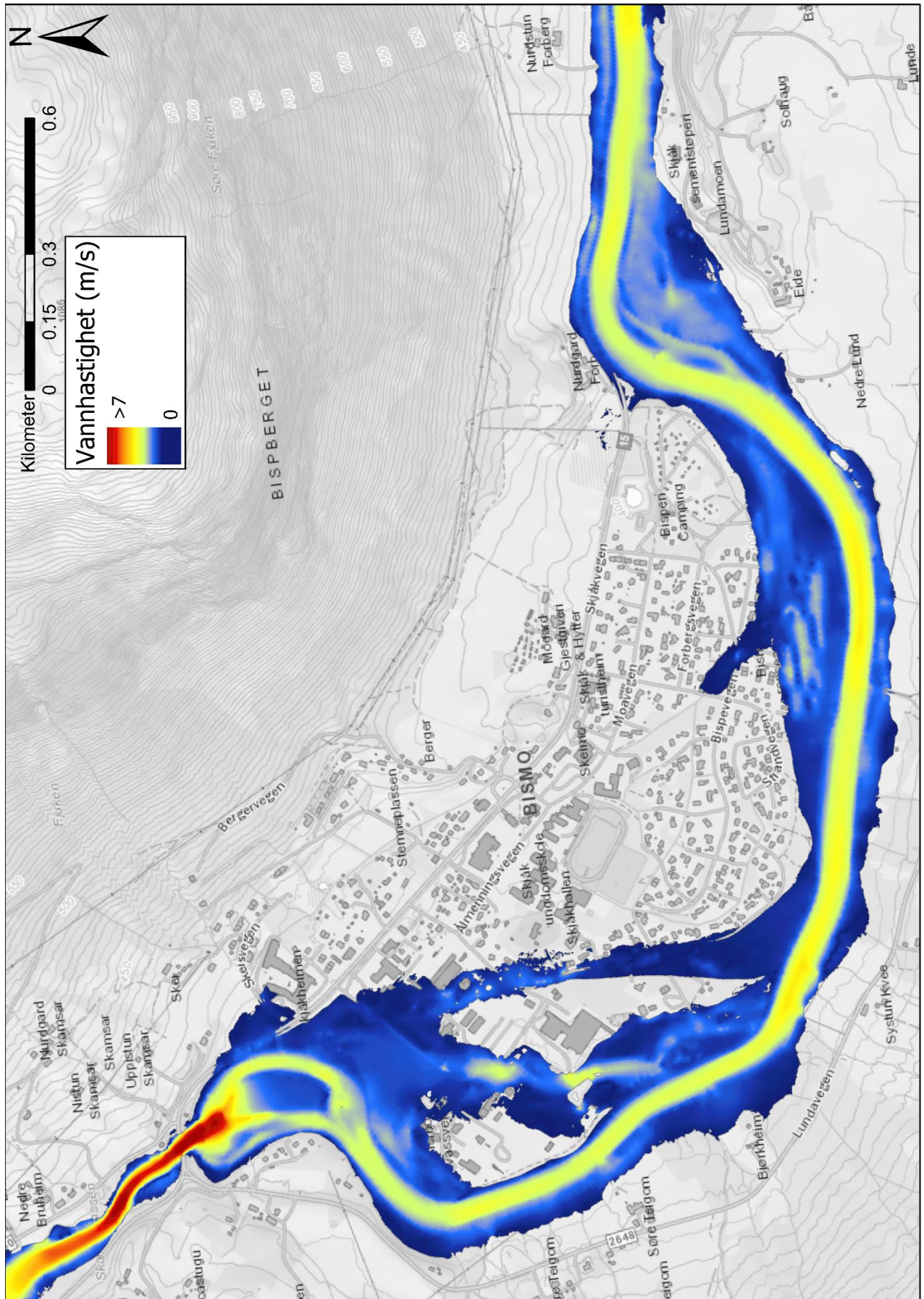


Vedlegg 3: Vannhastighetskart for 200-årsflom i Otta ved Bismo





Vedlegg 4: Vannhastighetskart for 200-årsflom med 20% klimapåslag i Otta ved Bismo



## Vedlegg 5: Mannings n-verdier

### Chapter 3– Basic Data Requirements

**Table 3-1 Manning's 'n' Values**

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<b>A. Natural Streams</b>			
<b>1. Main Channels</b>			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
<b>2. Flood Plains</b>			
a. Pasture no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2. Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4. Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
<b>3. Mountain Streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged</b>			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

Table 3-1 (Continued) Manning's 'n' Values

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<b>B. Lined or Built-Up Channels</b>			
<b>1. Concrete</b>			
a. Trowel finish	0.011	0.013	0.015
b. Float Finish	0.013	0.015	0.016
c. Finished, with gravel bottom	0.015	0.017	0.020
d. Unfinished	0.014	0.017	0.020
e. Guniting, good section	0.016	0.019	0.023
f. Guniting, wavy section	0.018	0.022	0.025
g. On good excavated rock	0.017	0.020	
h. On irregular excavated rock	0.022	0.027	
<b>2. Concrete bottom float finished with sides of:</b>			
a. Dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.020
b. Random stone in mortar	0.017	0.020	0.024
c. Cement rubble masonry, plastered	0.016	0.020	0.024
d. Cement rubble masonry	0.020	0.025	0.030
e. Dry rubble on riprap	0.020	0.030	0.035
<b>3. Gravel bottom with sides of:</b>			
a. Formed concrete	0.017	0.020	0.025
b. Random stone in mortar	0.020	0.023	0.026
c. Dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
<b>4. Brick</b>			
a. Glazed	0.011	0.013	0.015
b. In cement mortar	0.012	0.015	0.018
<b>5. Metal</b>			
a. Smooth steel surfaces	0.011	0.012	0.014
b. Corrugated metal	0.021	0.025	0.030
<b>6. Asphalt</b>			
a. Smooth	0.013	0.013	
b. Rough	0.016	0.016	
<b>7. Vegetal lining</b>	0.030		0.500

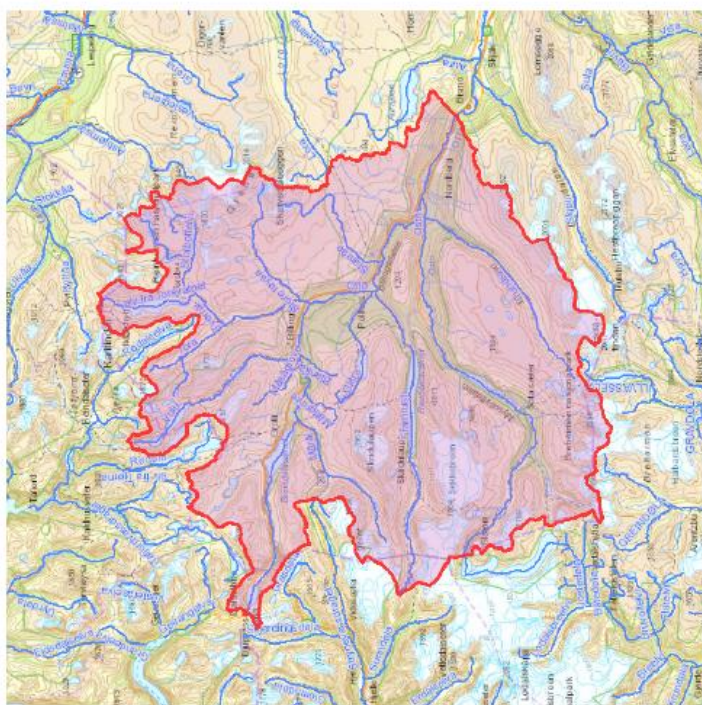
## Vedlegg 6: Nedbørsfeltparametere og flomindeksar fra NEVINA

### Nedbørsfeltparametere

Vassdragsnr.: 002.DHEO  
 Kommune.: Skjåk  
 Fylke.: Innlandet  
 Vassdrag.: Otta

Feltparametere	
Areal (A)	1545 km <sup>2</sup>
Effektiv sjø (A <sub>SE</sub> )	0.19 %
Elveengde (E <sub>L</sub> )	66.5 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	13.3 m/km
Elvegradient <sub>1085</sub> (E <sub>G,1085</sub> )	10.0 m/km
Helning	13 °
Dreneringstetthet (D <sub>T</sub> )	1.2 km <sup>-1</sup>
Feltlengde (F <sub>L</sub> )	54.5 km
Arealklasse	
Bre (A <sub>BRE</sub> )	6.2 %
Dyrket mark (A <sub>JORD</sub> )	0.4 %
Myr (A <sub>MYR</sub> )	0.4 %
Leire (A <sub>LEIRE</sub> )	0 %
Skog (A <sub>SKOG</sub> )	12.8 %
Sjø (A <sub>SJØ</sub> )	4.9 %
Snaufjell (A <sub>SF</sub> )	73.2 %
Urban (A <sub>U</sub> )	0.0 %
Uklassifisert areal (A <sub>REST</sub> )	1.8 %

Hypsografisk kurve	
Høyde <sub>MIN</sub>	413 m
Høyde <sub>10</sub>	856 m
Høyde <sub>20</sub>	1015 m
Høyde <sub>30</sub>	1146 m
Høyde <sub>40</sub>	1255 m
Høyde <sub>50</sub>	1336 m
Høyde <sub>60</sub>	1411 m
Høyde <sub>70</sub>	1482 m
Høyde <sub>80</sub>	1550 m
Høyde <sub>90</sub>	1657 m
Høyde <sub>MAX</sub>	2082 m
Klima- /hydrologiske parametere	
Avrenning 1961-90 (Q <sub>N</sub> )	35.5 l/s*km <sup>2</sup>
Sommernedbør	446 mm
Vinternedbør	744 mm
Årstemperatur	-1.7 °C
Sommertemperatur	3.9 °C
Vintertemperatur	-5.7 °C



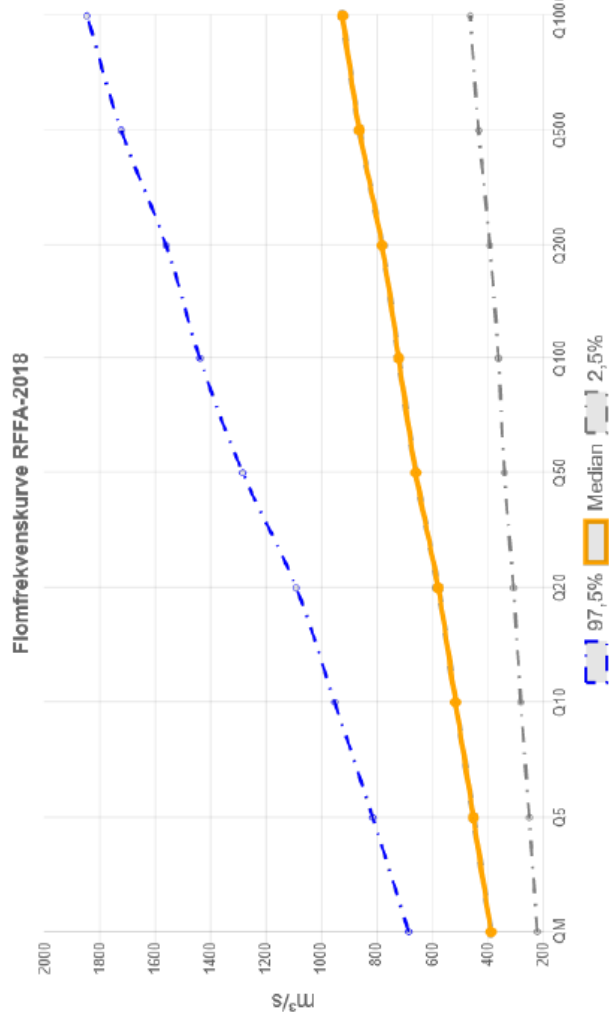
# Regional flomberegning

Vassdragsnr.: 002.DHEO  
 Kommune.: Skjåk  
 Fylke.: Innlandet  
 Vassdrag.: Otta  
 Nedbørfeltareal: 1545 km<sup>2</sup>

Flomestimer er beregnet basert på «Regional flomfrekvensanalyse (RFFA-2018)», 0 m nedbørfeltet er mindre enn 60 km<sup>2</sup>, er det alternativt beregnet kulminasjonsflommer basert på NIFS-formelverk (2015).

Anbefalinger om klimapåslag er gitt i NVE rapport nr. 81-2016 og klimaprofiler for fylker (se [www.klimaservicesenter.no](http://www.klimaservicesenter.no)).

Hvordan bruke resultatene fra rapporten, se her.



## RFFA-2018

Tidsoppløsning	Døgn	-
Indeksflom (QM): Medianflom	250 l/s*km <sup>2</sup>	
Klimapåslag	20 %	
Kulminasjonsfaktor	1.11	-

## NIFS-2015

Tidsoppløsning	Kulminasjon	-
Indeksflom (QM): Middelflom	-	l/s*km <sup>2</sup>
Klimapåslag	-	%

## Annet

Tilføpsflom	Nei	-
-------------	-----	---

## RFFA-2018 (døgnmiddel)

Flomfrekvensfaktor (QM / QT)	Q <sub>M</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>20</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>100</sub>	Q <sub>200</sub>	Q <sub>500</sub>	Q <sub>1000</sub>	Q <sub>200-klima</sub>
1	1.16	1.33	1.49	1.70	1.86	2.02	2.23	2.39	-	-
Flomverdier, m <sup>3</sup> /s	386	449	514	576	658	719	780	861	923	936
Flom usikkerhet (97,5%), m <sup>3</sup> /s	683	813	951	1089	1282	1438	1560	1722	1845	-
Flom usikkerhet (2,5%), m <sup>3</sup> /s	218	248	278	305	337	359	390	431	461	-

**NIFS (kulminasjon)**  
 Ikke beregnet pga. areal større enn 60km<sup>2</sup>

Flomfrekvensfaktor (QM / QT)

Flomverdier, m<sup>3</sup>/s

Flom usikkerhet (97,5%), m<sup>3</sup>/s

Flom usikkerhet (2,5%), m<sup>3</sup>/s

Flomverdier er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres. Verdiene kan ikke benyttes direkte, men må sammenlignes med andre metoder, sammenligningsstasjoner og/eller egne data.

