

RAPPORT

# Flomsonekartlegging for Flåmselvi

OPPDRAGSGIVER

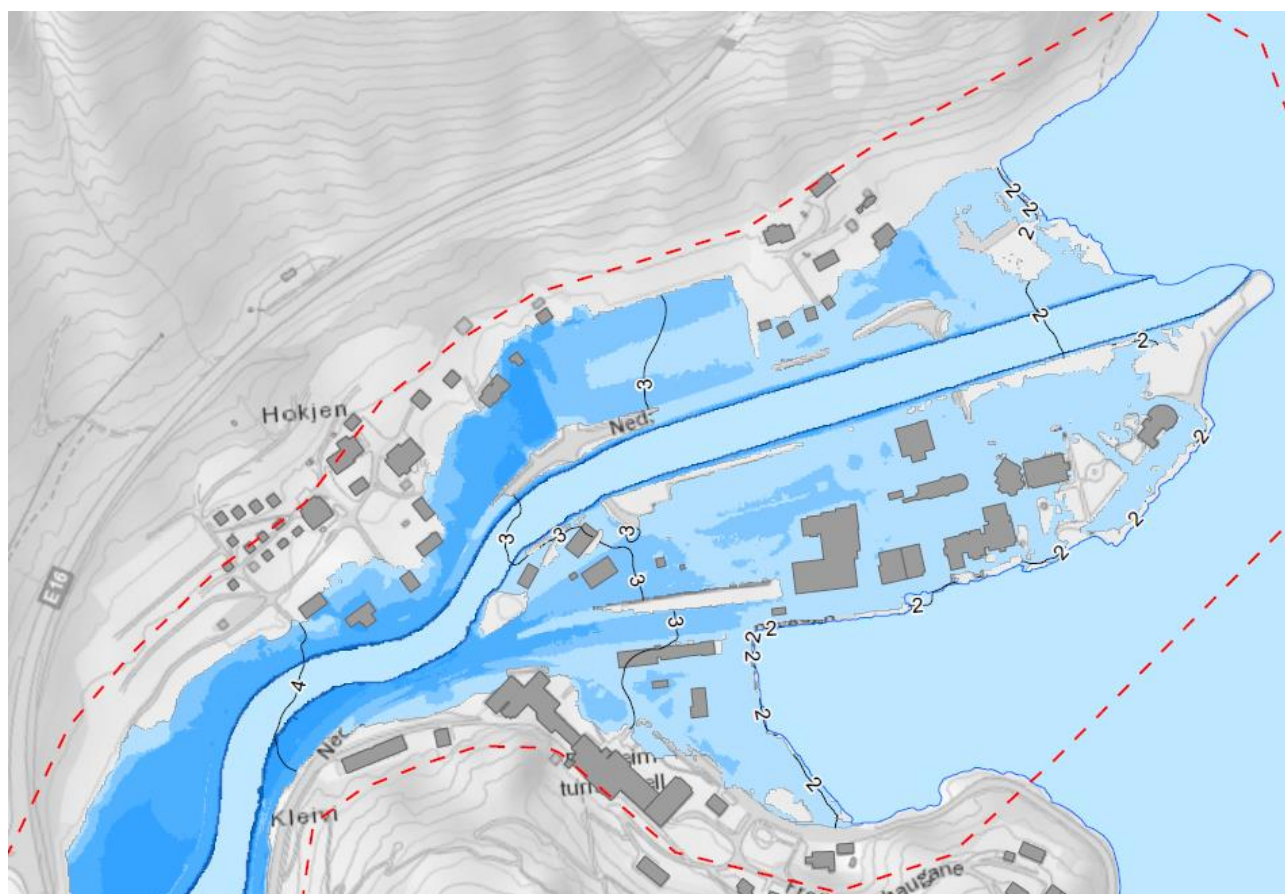
NVE

EMNE

Flomsonekartlegging

DATO / REVISJON: 21. juni 2019 / 0

DOKUMENTKODE: 10205657-01-RiVass-RAP-1



Multiconsult

Denne rapporten er utarbeidet av Multiconsult i egen regi eller på oppdrag fra kunde. Kundens rettigheter til rapporten er regulert i oppdragsavtalen. Hvis kunden i samsvar med oppdragsavtalen gir tredjepart tilgang til rapporten, har ikke tredjepart andre eller større rettigheter enn det han kan utlede fra kunden. Multiconsult har intet ansvar dersom rapporten eller deler av denne brukes til andre formål, på annen måte eller av andre enn det Multiconsult skriftlig har avtalt eller samtykket til. Deler av rapportens innhold er i tillegg beskyttet av opphavsrett. Kopiering, distribusjon, endring, bearbeidelse eller annen bruk av rapporten kan ikke skje uten avtale med Multiconsult eller eventuell annen opphavsrettshaver.

## RAPPORT

OPPDRAG	<b>Flomsonekartlegging for Flåmselvi</b>	DOKUMENTKODE	10205657-01-RiVass-RAP-1
EMNE	Flomsonekartlegging	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAGSGIVER	<b>NVE</b>	OPPDRAGSLEDER	Christian Almestad
KONTAKTPERSON	Siss-May Edvardsen	UTARBEIDET AV	Kristine Lilleeng Walløe
ANSVARLIG ENHET	1087 Hydrologi		

## SAMMENDRAG

Det er utført flomsonekartlegging for Flåmselvi fra Leinafoss kraftverk og til utløpet i sjøen. Kartleggingen er gjennomført ved hjelp av en hydraulisk 2D-modell i HEC-Ras. Det er utarbeidet dybdekart og hastighetskart for den kartlagte strekningen for 20-årsflom, 200-årsflom og 200-årsflom med 40% klimapåslag.

0	21.6.2019		Kristine Walløe	Øyvind Pedersen	Bjørn Sønju Moltzau
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

## INNHOLDSFORTEGNELSE

<b>Bibliografi</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Bakgrunn</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Flommer</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Nedstrøms grensebetingelse</b> .....	<b>5</b>
3.1 Høyvann og stormflo .....	5
3.2 Havnivåstigning.....	6
3.3 Valg av nedstrøms grensebetingelse .....	6
<b>4 Bruer</b> .....	<b>7</b>
<b>5 Modell</b> .....	<b>8</b>
5.1 Terrengmodell .....	8
5.2 Geometri.....	9
5.2.1 Valg av cellestørrelse .....	9
5.2.2 Bruer .....	9
5.3 Kalibrering.....	9
5.4 Modellering av flom.....	15
<b>6 Resultater</b> .....	<b>15</b>
6.1 Bruenes kapasitet .....	15
6.2 Usikkerhet.....	15
6.3 Sammenligning med tidligere flomsonekart.....	15
<b>7 Vedlegg</b> .....	<b>17</b>

## Bibliografi

Carlsen, A. J. (2016). *Flomsonekart i Flåm*. Sandvika: Norconsult.

Holmqvist, E. (2015). *Flomberegninger for Flåmselvi ved Brekke bru (072.2Z)*. Oslo: NVE.

Orvedal, K. (2015, 02 27). Dokumentasjon av hydrauliske beregninger i Flåmselva - Aurland kommune. Internt notat. NVE.

Zevenbergen, L. A. (2012). *Hydraulic Design of Safe Bridges*. Colorado: Federal Highway Administration.

## 1 Bakgrunn

Flåm i Aurland kommune ble hardt rammet av oktoberflommen i 2014. I etterkant av flommen har NVE utført en rekke sikringstiltak i vassdraget, og i forbindelse med dette er det nå blitt utarbeidet en ny flomsonekartlegging av elva. Det er tidligere blitt gjennomført flomsonekartlegging av Norconsult og av NVE. Fordi elvas løp er blitt endret i betydelig grad av flom og av sikringstiltak, er det satt opp en helt ny modell. Modellen strekker seg fra utløpet av Leinafoss kraftverk og frem til elvas utløp i fjorden.

## 2 Flommer

Flomberegning for Flåmselvi ble utført i 2015 (Holmqvist, 2015). Flomverdier er her oppgitt for Brekke bru. For flom ved utløpet i fjorden er verdiene arealskalert basert på feltareal. Flomverdiene benyttet i denne flomsonekartleggingen er presentert i Tabell 1.

Tabell 1. Flomverdier, hentet fra (Orvedal, 2015)

Sted	Q <sub>20</sub>	Q <sub>200</sub>	Q <sub>200+40%</sub>
Brekke bru	210 m <sup>3</sup> /s	290 m <sup>3</sup> /s	400 m <sup>3</sup> /s
Utløp i fjorden	220 m <sup>3</sup> /s	306 m <sup>3</sup> /s	422 m <sup>3</sup> /s

## 3 Nedstrøms grensebetingelse

Nedstrøms grensebetingelse i modellen er havnivå i Aurlandsfjorden. Valg av nedstrøms grensebetingelse har stor betydning for vannstanden i det nederste partiet av elva. Under flommen i 2014 var det lavvann i Aurlandsfjorden. Ved flommens kulminasjon klokka 18 den 28. oktober 2014, var vannstanden på -0,25 moh (NN00). Dersom det hadde vært høyvann, kunne flomskadene potensielt vært mye større.

Ved valg av nedstrøms grensebetingelse, må det både tas hensyn til stormflo, og til effekten av havnivåstigning og landheving.

### 3.1 Høyvann og stormflo

Middelvannstand, vannstand med middels høyvann og ved stormflo ved ulike gjentaksintervaller er gitt i tabellen under. Tallene er hentet fra sehavniva.no.

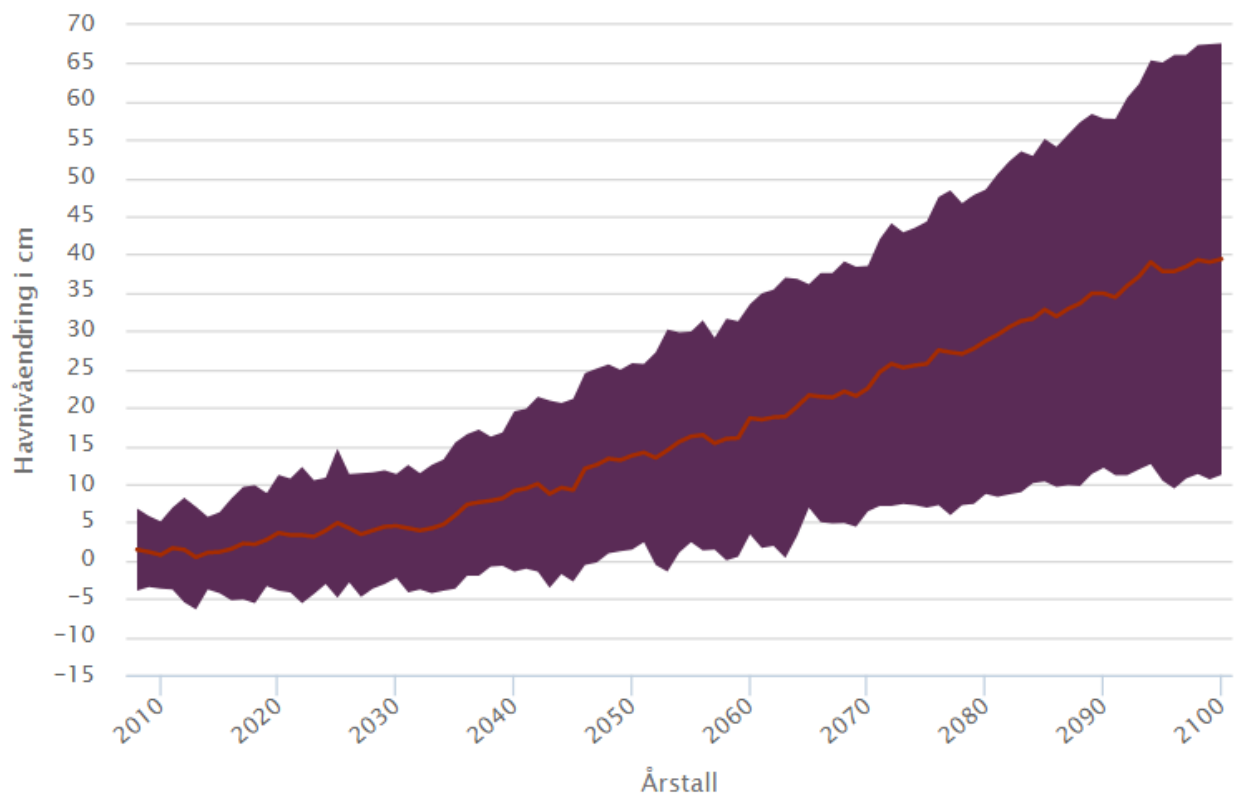
Tabell 2. Havnivå ved ulike gjentaksintervaller.

Gjentaksintervall	Vannstand (NN2000, moh)
Middelvannstand	-0,07
Middelhøyvann	0,45
1 års stormflo	1,12
5 års stormflo	1,23
200 års stormflo	1,45

### 3.2 Havnivåstigning

Det er forventet en betydelig havnivåstigning forårsaket av klimaendringer. Prognosert havnivåstigning justert for landheving kan finnes på [sehavniva.no](http://sehavniva.no). Havnivåstigningen er beregnet for ulike klimascenarier og utfallsrommet er relativt stort. Norske myndigheter har bestemt av klimascenariet RCP8.5 skal legges til grunn.

For Flåm er det prognosert en stigning på mellom 10 og 60 cm for perioden 2081-2100 sammenlignet med perioden 1986-2005. Middelverdien er på 35 cm.



Figur 3-1. Prognosert havnivåstigning for Flåm ved scenariet RCP8.5. Figuren er hentet fra [sehavniva.no](http://sehavniva.no).

### 3.3 Valg av nedstrøms grensebetingelse

I henhold til NVEs kravspesifikasjoner for flomsonekartlegging, skal høyvann med 1 års gjentakintervall brukes som nedre grensebetingelse ved utløp i hav. For klimafremskrivninger skal nedre grensebetingelse sjø settes lik 1 års stormflo i år 2100. Her velger vi å bruke 95-percentil for havnivåstigning ved RCP8.5 i 2081-2100. Grensebetingelsene er oppsummert i tabellen under.

Tabell 3. Valg av nedstrøms grensebetingelse

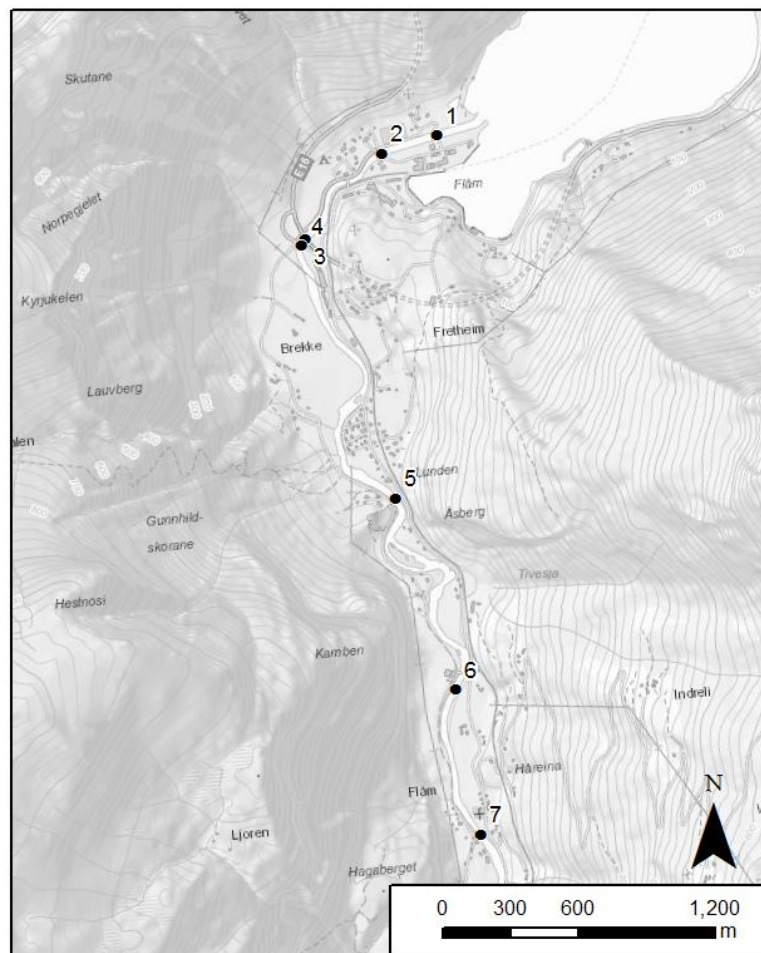
Scenario	Tidevann	Havnivåstigning	Grensebetingelse
Q20	1,12 moh	+0 m	<b>1,12 moh</b>
Q200	1,12 moh	+0 m	<b>1,12 moh</b>
Q200+40%	1,12 moh	+0,60 m	<b>1,72 moh</b>

## 4 Bruer

Det er syv bruer på strekningen. Bruene er listet opp fra nedstrøms og oppover elva. Nøkkeldata for bruene er hentet fra NVE sin HEC-Ras-modell og fra Norconsults flomsonekartlegging (Carlsen, 2016) og kontrollert opp mot en digital terrengmodell. For Skulebrui er nøkkeldata hentet fra Multiconsult sine prosjekteringsdokumenter. Bruene er også vist på kartet i Figur 4-1.

Tabell 4. Bruer over Flåmselvi nedstrøms Leinafoss kraftverk.

Nr	Navn	Underkant dekke	Overkant dekke
1	Bru Nedre Brekkeveg	Antatt 2,0 moh	2,6 moh
2	Bru A-Feltvegen	2,7 moh	4,0 moh
3	E16	Ca. 10 moh	Ca. 11 moh
4	Nedre Brekke bru (Fv 245)	3,45 moh	5,35 moh
5	Øvre Brekke bru (Haugen bru)	Antatt 12,5 moh	13,5 moh
6	Skulebrui (bygges 2019)	21,16 moh	21,5 moh
7	Flåm bru	26,18 moh	27,40 moh



Figur 4-1. Bruer på strekningen mellom Leinafoss kraftverk og Aurlandsfjorden

## 5 Modell

For å beregne flomsone er det satt opp en hydraulisk 2D-modell i programvaren HEC-Ras 5.0.5, som er utviklet av US Army Corps of Engineers.

Det er valgt å bruke en todimensjonell modell i HEC-Ras, hvilket innebærer at modellene tar høyde for strømming i horisontalplanet, mens et gjennomsnitt tas over dybden. Dette betyr at vertikale strømningskomponenter ikke modelleres. En todimensjonal modell er særlig egnet til å modellere situasjoner hvor det er uklart hva strømningsretningen blir og der det er viktig å kartlegge strømmingen mer nøyaktig, for eksempel der det er relativt flatt og ved tettbebyggelse.

For kontroll og beregning av den hydrauliske kapasiteten til bruene er det i tillegg satt opp en 1D-modell i samme programvare og med samme grunnlag.

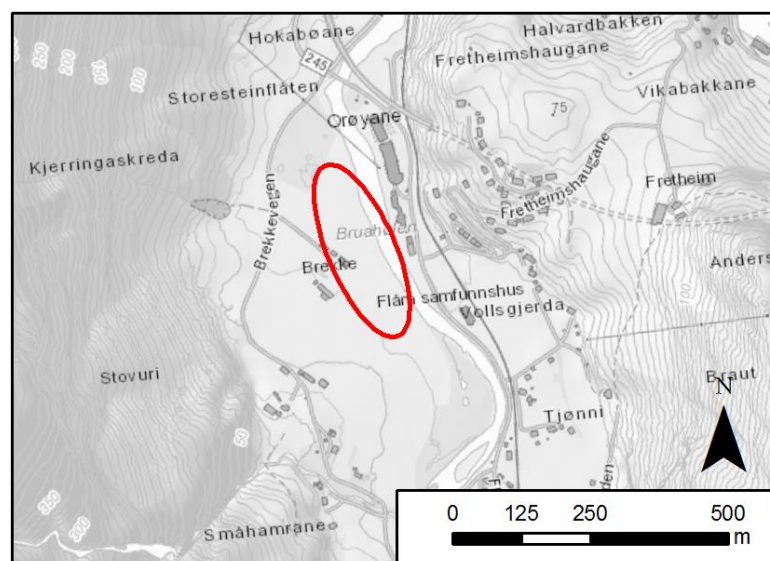
### 5.1 Terrengmodell

Topografiske data i form av en terrengmodell brukes som grunnlag for beregningsnett i HEC-Ras. I tillegg brukes dataene til å beregne oversvømmelseskart etter at simuleringene er utført. Gode topografiske data er svært viktige for å oppnå gode resultater.

Flåmselvi, samt flomslettene nærmeste elva, er scannet med grønn laser av Terratec den 11. april 2018. Grønn laser trenger gjennom vannoverflaten, og gir dermed en god terrengmodell også av elvebunnen. Terratec har i tillegg gjort supplerende målinger med ekkolodd og manuell oppmåling i områder der laseren ikke har gitt tilstrekkelig gode resultater. Terrengmodellen har en oppløsning på 1x1 m.

Scanningen til Terratec omfatter en bredde på ca. 50 m på hver side av elva. For enkelte flomsletter vil det være oversvømmelse også på utsiden av området som er scannet av Terratec. For dette området er det brukt en terrengmodell fra laserscanning i 2014 (hentet fra hoydedata.no).

Det er god overensstemmelse mellom de to terrengmodellene bortsett fra på et jorde nord for Brekke gård. Her viste det seg å være avvik på opp til 1 meter. Dette området er uten bebyggelse og avviket har svært liten betydning for oversvømmelse oppstrøms eller nedstrøms. Det er valgt å jevne ut overgangen mellom de to modellene.



Figur 5-1. Område der det var avvik mellom de to terrengmodellene.



## 5.2 Geometri

### 5.2.1 Valg av cellestørrelse

Det er gjort modellering med ulike cellestørrelser, fra 10 m til 0,5 meter. Den øvre delen av modellen, ned til E16, er relativt lite sensitiv for valg av cellestørrelse. I den nedre del av modellen, Flåm tettsted, er det oversvømmelse over et relativt stort område utenfor elveløpet. Her viser det seg at modellen er sensitiv for cellestørrelse ved store vannføringer. Det er opp til 20 centimeter forskjell i vanddybde mellom største og minste cellestørrelse, og de største cellene gir høyest vannstand.

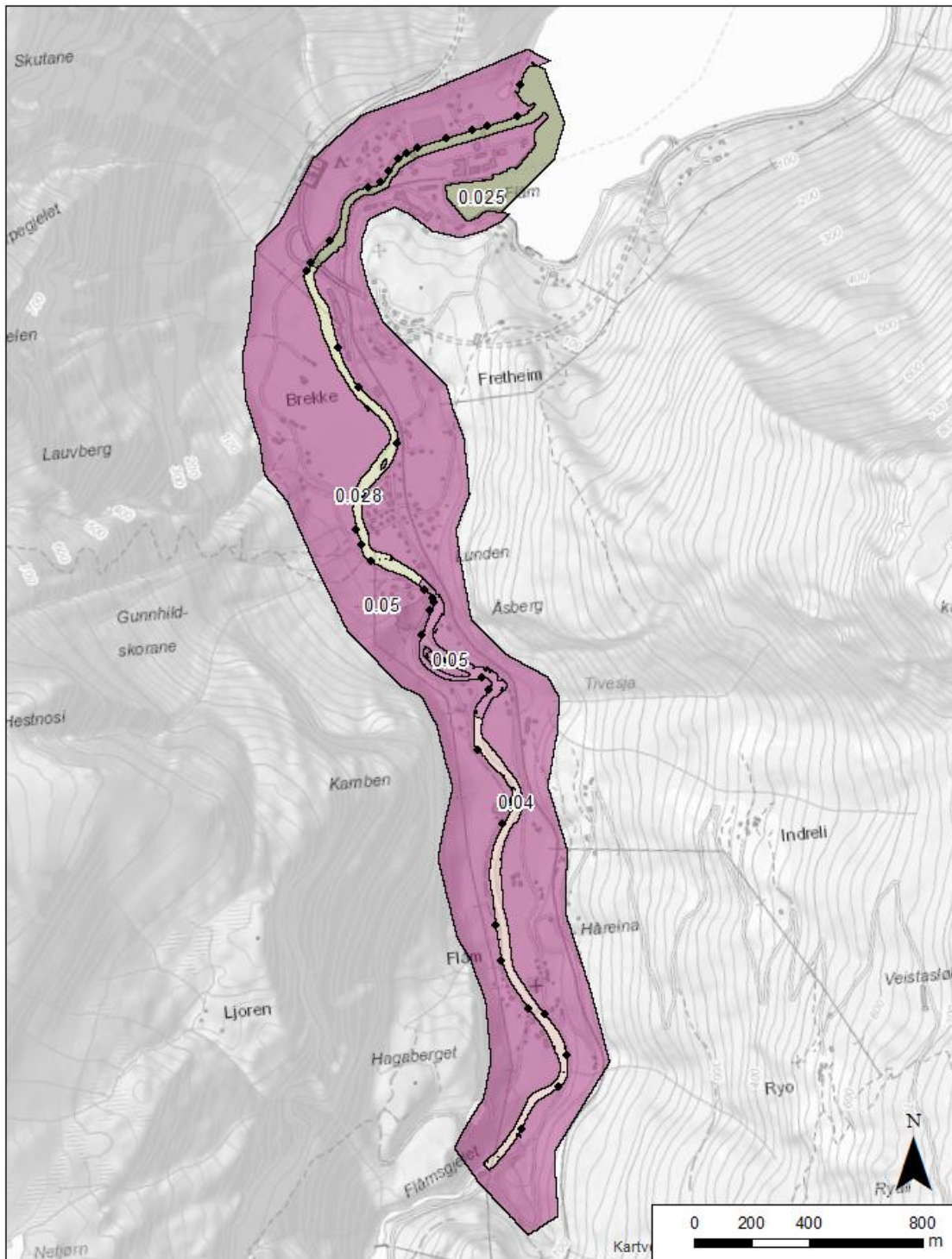
Det skyldes trolig at elvebredden fungerer som en terskel, og at det er vanskelig å lage celler som er små nok til å fange opp geometrien med tilstrekkelig stor nøyaktig. For de minste cellestørrelsene er det videre problematisk å få en stabil modell, da HEC-Ras har begrensninger i hvor små tidskritt som er tillatt. I tillegg blir simuleringstiden svært lang. Det er derfor valgt cellestørrelse på 3x3 meter for hele modellen. Denne cellestørrelsen ser ut til å gi det beste kompromisset mellom resultat, beregningstid og stabilitet.

### 5.2.2 Bruer

Bruene gjennom Flåm sentrum kan ha betydning for oversvømmelse ved ulike vannføringer. HEC Ras 2D har per sommeren 2018 begrensede muligheter for å modellere bruene. Det er derfor satt opp en 1D-modell hvor bruene er modellert. Fra 1D-modellen kommer det fram at det bare er bru 4, Nedre Brekke bru, som gir betydelig oppstuvning ved høye vannføringer. For denne brua er vannføringskurver (rating curves) hentet ut fra 1D-modellen, og lagt inn som grensebetingelser i 2D-modellen. Fordi vannføringskurven er avhengig av undervannet, må dette gjøres på nytt for hver vannføring. Det er altså laget separate geometrifiler for de ulike scenarioene som er modellert. De øvrige bruene er ikke modellert i 2D-modellen. Dette er i henhold til anbefalinger i Federal Highway Adiministrations «Hydraulic Design of Safe Bridges» (Zevenbergen, 2012).

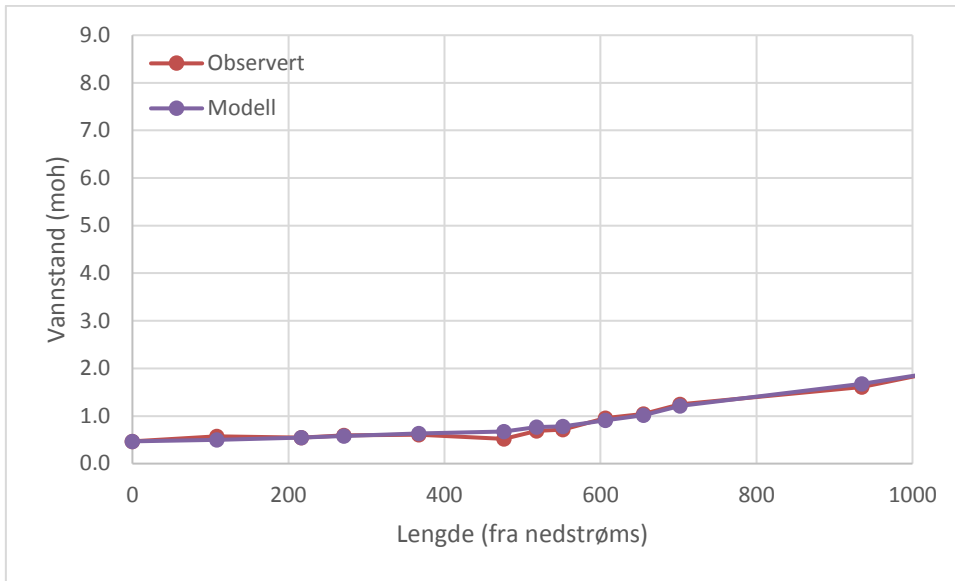
## 5.3 Kalibrering

Det ble gjort oppmålinger i vassdraget den 13. og den 19. september, ved hhv. ca 60 m<sup>3</sup>/s og ca. 90 m<sup>3</sup>/s. Friksjon i modellen er kalibrert mot målingene ved 90 m<sup>3</sup>/s og validert mot målingene ved 60 m<sup>3</sup>/s. Det viste seg å være nødvendig med betydelig høyere friksjon langt oppstrøms i elva enn lengre nedstrøms. Basert på resultatet fra kalibreringene, ble det etter hvert delt opp i fem soner for friksjon: fire ulike i elva, samt et for flomslettene. Oppdelingen, og punktene som er grunnlaget for kalibreringen, er vist i Figur 5-2.

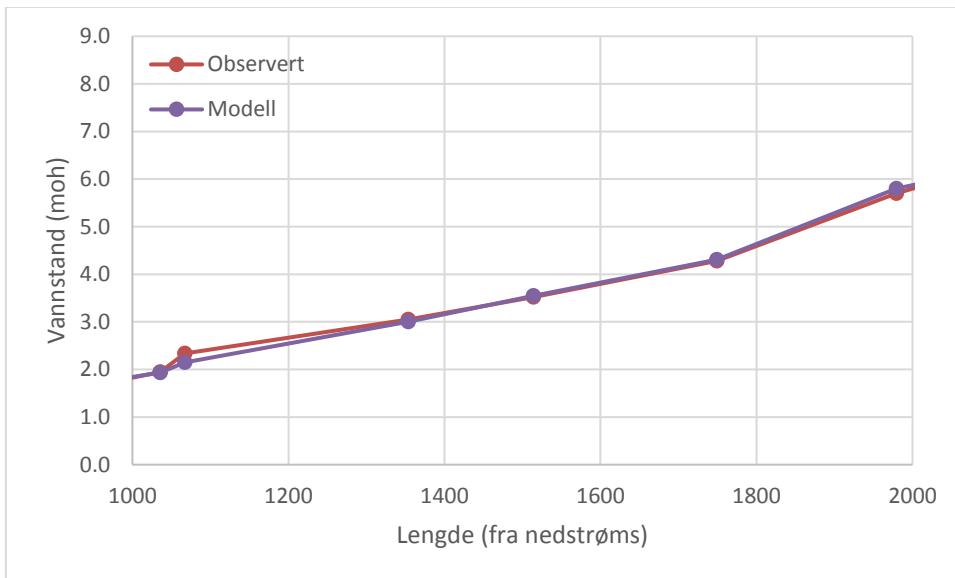


Figur 5-2. Inndeling av soner for Manningstall og punkter for kalibrering av modell. Endelig Manningstall  $n$  for de ulike sonene er vist i modellen.

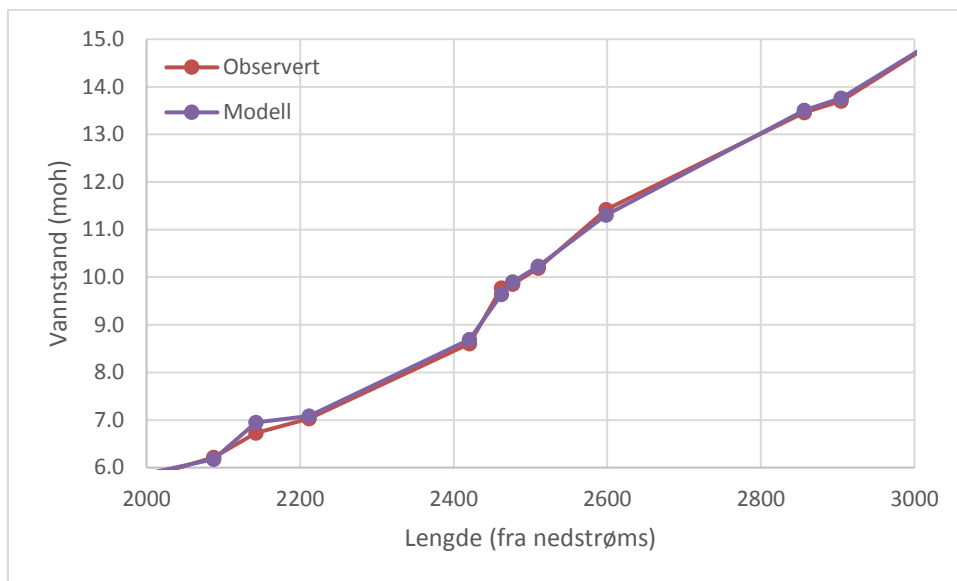
Gjennomsnittlig avvik for kalibreringen er på 0,8 cm. Hver sone har et maksimalt gjennomsnittlig avvik på 1 cm. Maksimalt avvik er -18 og +22 cm. Det er stedvis store gradienter i vannflaten, og vi vurderer kalibreringen som brukbar. Vi har ikke informasjon om hvor nøyaktige innmålingene er.



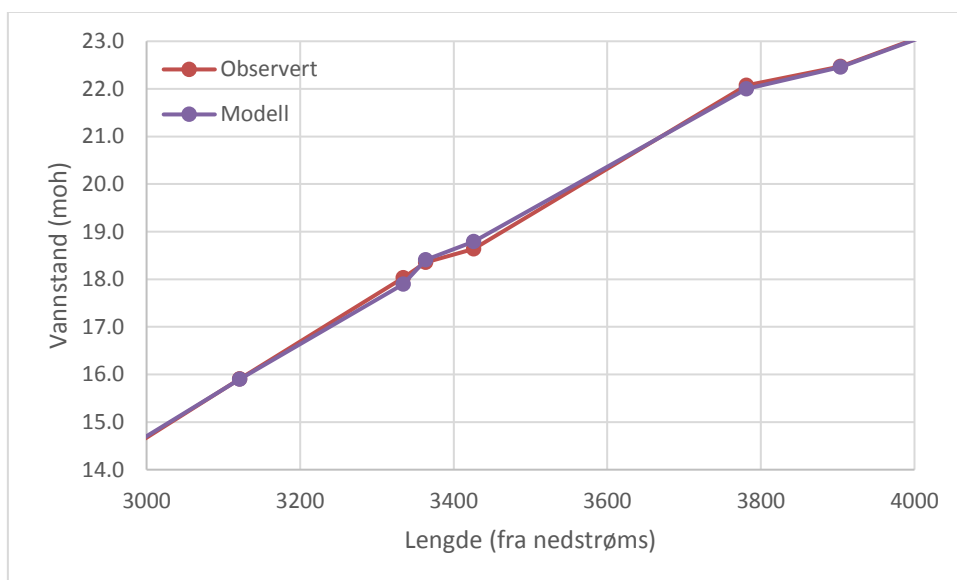
Figur 5-3. Kalibrering sone 1. Største avvik 16 cm



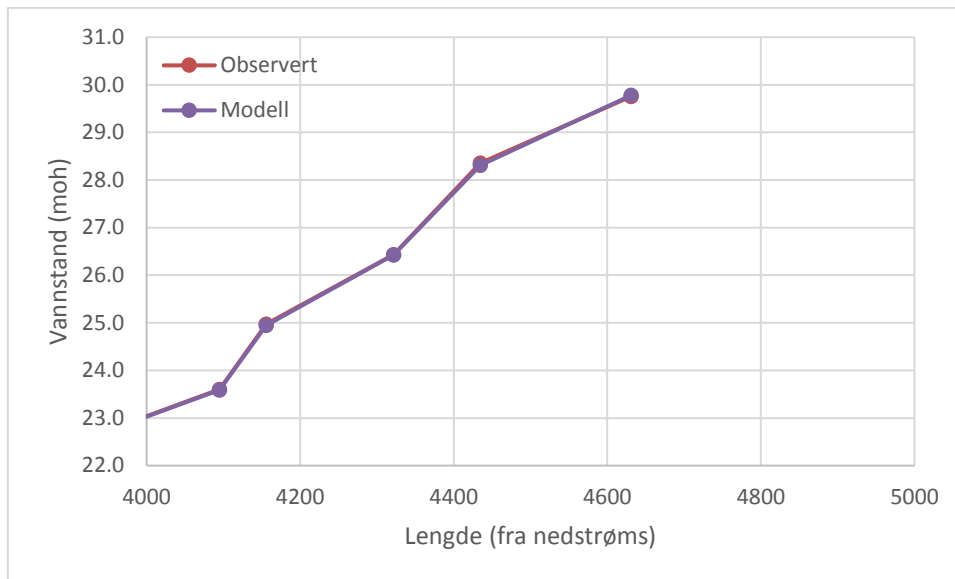
Figur 5-4. Kalibrering sone 2. Største avvik 18 cm.



Figur 5-5. Kalibrering sone 2 (til 2400 m) og sone 3 (fra 2400 m). Største avvik 22 cm.

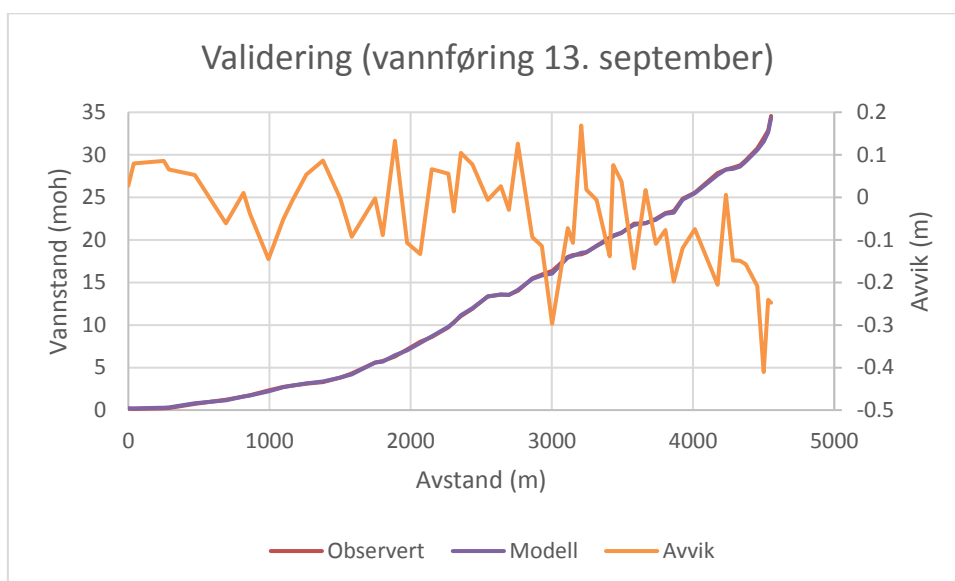


Figur 5-6. Kalibrering sone 4

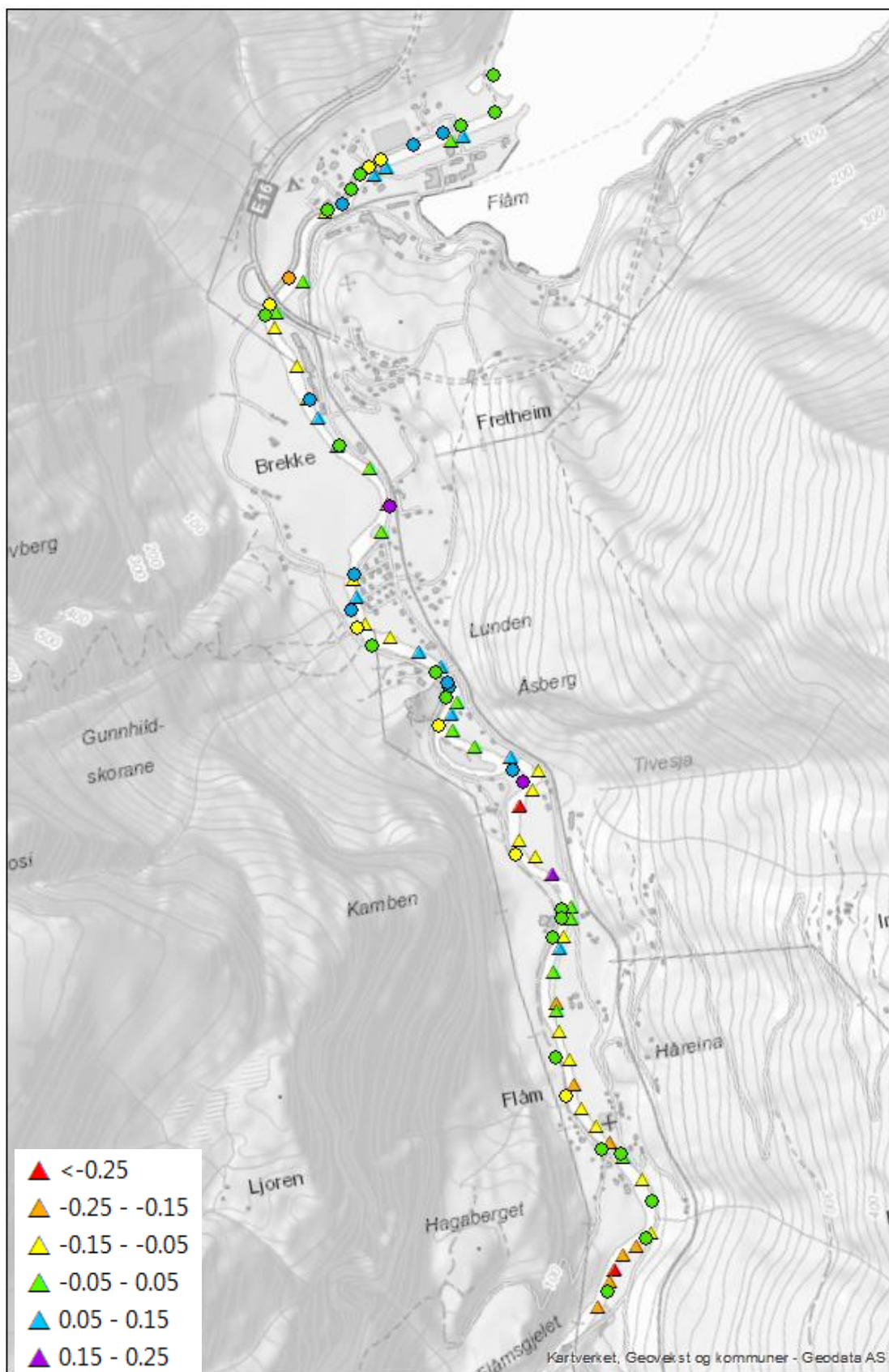


Figur 5-7. Kalibrering sone 4

Det er gjort en validering av kalibreringen basert på oppmåling den 13. september. Punktene er ikke identiske med punktene fra kalibreringen. En grafisk presentasjon av modellert og observert vannstand, samt avvik, er vist i Figur 5-8. En visuell presentasjon av avvik er vist i Figur 5-9. Valideringen viser kun mindre avvik for den nederste delen, men har større avvik for den øverste delen. Dette området har svært godt samsvar i kalibreringen. Området med størst avvik har imidlertid ingen bebyggelse.



Figur 5-8. Validering av kalibrering.



Figur 5-9. Visuell presentasjon av avvik. Runde punkter er fra kalibrering, mens triangulære punkter er fra validering. Grønne punkter har maks 5 cm avvik. Gule og blå punkter har opp til 15 cm avvik.

## 5.4 Modellering av flom

Flommene er modellert med konstant vannføring, og modellen er kjørt helt til stasjonær tilstand. I realiteten er Flåmselvi et raskt vassdrag, der vannføringen endrer seg hurtig. Flomutbredelse i modellen kan derfor være noe større enn det som vil skje i virkeligheten.

## 6 Resultater

Resultatene er presentert i form av kart som viser oversvømmelse, vanddybde og vannhastighet. Disse ligger som vedlegg til rapporten.

### 6.1 Bruenes kapasitet

Med de forutsetningene som er lagt inn i modellen, er det bare Nedre Brekke bru som blir oversvømt ved en 200-årsflom med klimapåslag. Ved de to bruene gjennom Flåm sentrum, A-feltvegen og Nedre Brekkeveg, ligger vannflaten rett opp under brudekket ved 200-årsflom med klimapåslag. Dersom det bygges flomvoller eller lignende i Flåm sentrum, slik at mer vann renner i elveløpet, vil ikke kapasiteten til disse bruene være tilstrekkelig. Merk at kapasiteten til disse bruene også er sensitiv for nedstrøms vannstand. Ved høyere sjøvannstand enn det som er brukt her, vil de ikke ha tilstrekkelig kapasitet.

Ved Flåm bru ser det ut til at vannføringen vil nå opp til brudekket ved 200-årsflom med klimapåslag, men det vil ikke være overtopping av brua.

De øvrige bruene, E16, Haugen bru og Skulebrui, har mer enn tilstrekkelig kapasitet.

### 6.2 Usikkerhet

Den største usikkerheten i flomsonekartene er størrelse på framtidens flommer. Selv om vi har gode data for flommer i Flåmsvassdraget, er det ikke mulig å forutse hvilke flommer som kommer til å inntreffe i fremtidens klima.

En annen usikkerhet er terrenget. Beregningene forutsetter at terrenget er uendret, men ved flom kan det oppstå erosjon, og drivgods kan tette til bruer slik at elva tar en annen retning. Dette er det ikke tatt hensyn til i modellen.

Videre er det usikkerheter i modellen, blant annet når det gjelder valg av friksjonskoeffisienter og modellgeometri. Modellen er kalibrert for vannføringer som er under 1/3 av vannføring ved flom, og gjenspeiler derfor ikke nødvendigvis friksjonsforholdene ved større vannføringer. Det er også noe usikkerhet i kalibreringen, med avvik i enkeltpunkter og måleusikkerhet ved innmåling av vannstander til kalibrering.

Modellen har også vist seg å være noe sensitiv for valg av cellestørrelser. Valgt cellestørrelse ser ut til å gi vannstander som kan være ca. 5 cm for høye i noen områder i Flåm sentrum.

Samlet sett anbefales en sikkerhetsmargin på 30 cm på flomsoneutarbeidet i denne rapporten.

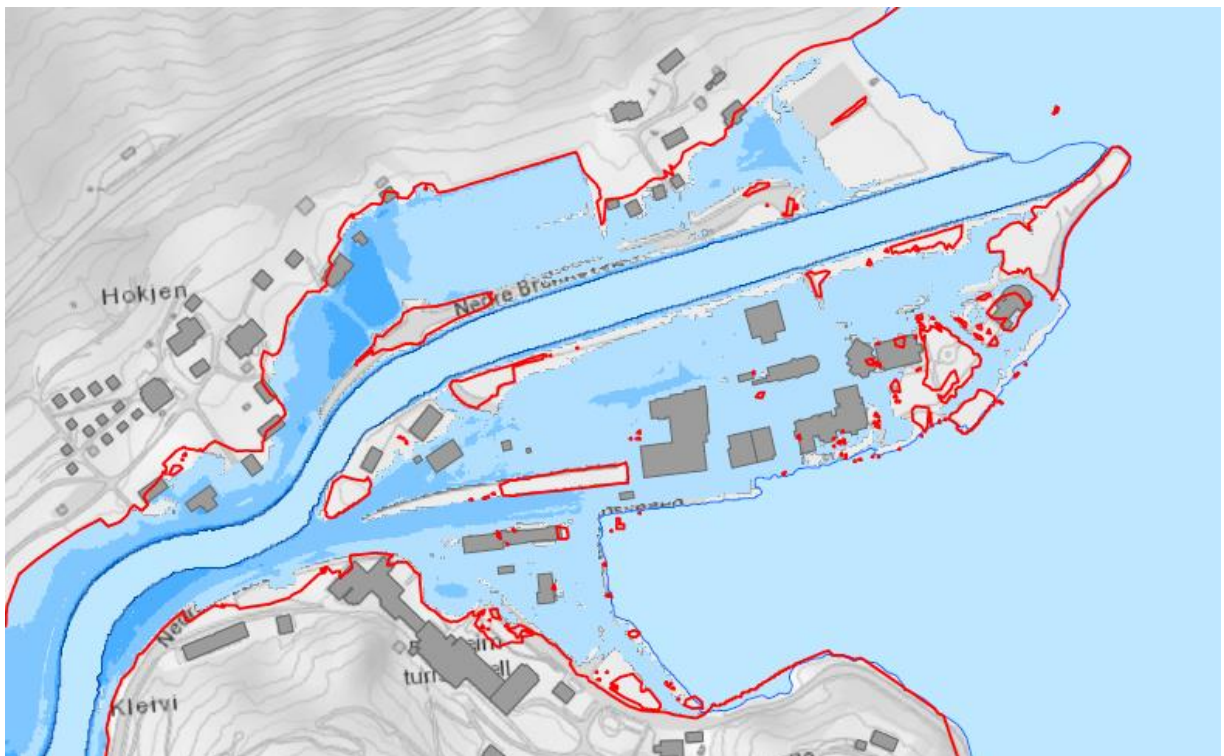
### 6.3 Sammenligning med tidligere flomsonekart

Aurland kommune har tidligere fått utarbeidet flomsonekart for Flåmselvi. Siste versjon av kartene ble laget av Norconsult i 2016, og er basert på en hydraulisk 2D-modell i MIKE 21.

Flomstørrelsene som er brukt er like som i denne rapporten. Nedstrøms grensebetingelse, dvs. havnivå, avviker noe fra denne rapporten. Norconsult har brukt et havnivå på 1,25 moh, mens vi har brukt hhv. 1,12 og 1,72 moh.

Valgt friksjonskoeffisient i 2016 er ikke oppgitt i rapporten, men det er opplyst om at samme koeffisient er brukt i hele modellen. Vi fant ut at det var nødvendig å bruke betydelig høyere friksjon i de øverste delene av modellen enn i de nederste delene.

Hovedforskjellen på modellene er terrengmodellen som er brukt. I den nye modellen er det brukt en terrengmodell der selve elvebunnen er oppmålt. Dette har spesielt stor betydning for området gjennom Flåm sentrum, hvor elvebunnen ligger på mellom -1,5 moh og -2,5 moh. I den tidligere modelleringen er det, så vidt vi forstår, brukt en elvebunn på ca. 0 moh for dette området. Oversvømmelsene i Flåm sentrum er derfor mindre i den nye modellen enn som er blitt presentert tidligere. Dette kan også delvis skyldes av vi trolig har brukt en lavere friksjon for denne delen av modellen enn det Norconsult har brukt.



Figur 6-1. Forskjell mellom kart fra 2016 (rødt) og dagens modellering for Flåm sentrum ved Q200

Oversvømmelsene rett oppstrøms Nedre Brekke bru er omtrent like. Her er brua begrensende snitt, og dette er likt i begge modellene. Lengre oppstrøms er det blitt gjennomført sikringstiltak, noe som gir mindre oversvømmelse enn det som finnes på de gamle kartene.



## 7 Vedlegg