

Oppdragsgiver: Tronrud Eiendom AS

Oppdragsnr.: 5202199 Dokumentnr.: oajor20201025

Til: Ellen Grønlund
Fra: Olav Anders Jørstad
Dato: 2020-11-18

► Ledemur langs Hønefossen - Vurdering av nødvendig nivå ifm. 200 årsflom

Sammendrag

Norconsult er engasjert av Tronrud Eiendom for å utføre 3D CFD (Computational Fluid Dynamics) beregninger av vannstrømningene i Hønefossen ved en 200-årsflom for å vurdere om Lloyds marked er flomutsatt.

Lloyds marked ligger på sørsiden av Hønefossen og er adskilt fra fossen av en ledemur. Bygningene på reguleringsområdet faller inn under sikkerhetsklasse F2. Det vil si en flom med gjentaksintervall på 200 år skal legges til grunn for dimensjonering.

200-årsflommen ble satt til 1100 m³/s basert på NVE rapporten «Flomberegninger for Hønefoss» (2002), noe som ble kontrollert til fortsatt å være gyldig ifm. Norconsult rapporten «Vannlinjeberegninger ifm. reguleringsplan for Lloyds marked og Tippen» (2020).

I beregningene er det forutsatt at Sagdammen (dam oppstrøms) er ombygget og hevet over 200 års vannstanden oppstrøms dam Hønefossen. Altså vurderes ikke dagens situasjon for Sagdammen, hvor 200-årsvannstanden overtopper og renner over dammen (og muligens videre inn på Lloyds marked).

Vannstrømningene i Hønefossen er meget kompliserte og vil ha en svært turbulent og dynamisk karakter (vannstandene vil variere over både tid og rom). For å beregne strømningene i Hønefossen mest mulig nøyaktig ble det derfor utført 3D CFD (Computational Fluid Dynamics) beregninger av flomløpet med programmet Flow-3D.

Som grunnlag for 3D CFD-beregningene ble geometrien tegnet i 3D basert på byggetegninger av dam Hønefossen og punktskyer fra laserskann utført fra fly (fra 2015 og 2016).

For å ta hensyn til usikkerhetene beregningene bør en sikkerhetsmargin/fribord tillegges beregnede vannstander ved bestemmelse av laveste nivå for fossens ledemurer. Det er NVE som fastsetter endelig krav til sikkerhetsmargin/fribord, men vi har i dette notatet gjort noen vurderinger basert på blant annet relevant litteratur og kommet opp med et forslag til en anbefalt sikkerhetsmargin for vannstandene langs fossens søndre ledemur på 1,1 m. Se kapittel 3.4 for detaljer.

Siden luftinnblanding til vannstrømmen fra den turbulente vannoverflaten i Hønefossen ble antatt å være stor, noe som kan påvirke vanndybdene langs med ledemuren betydelig, ble det i tillegg til å kjøre én CFD modell med bare vann også kjørt én CFD modell med luftinnblandingsmodellen til Flow-3D aktivert. Selv om modellen er relativt lite validert, virket resultatene å være relativt realistiske (muligens noe konservative/overestimert - $C_{luft} = 10 - 30 \%$) og innenfor det man skulle forvente ut fra erfaringsdata fra litteratur (Vassdragsregulantenenes forening, 1986). Det anbefales derfor at disse beregningene legges til grunn for vurdering av minimumsnivået på ledemuren.

Beregnete vannstander langs ledemuren (med og uten hensyn til luftinnblanding) og laveste anbefalte nivå for ledemur (inkl. en sikkerhetsmargin på 1,1 m) for å unngå overtopping ved en 200-årsflom er vist i vedlegg 2.

Resultatene antyder at eksisterende ledemur er omtrent akkurat høy nok til å forhindre overtopping ved en 200-årsflom, men at når det tas hensyn til usikkerheten i beregningene (ved hjelp av en sikkerhetsmargin) er muren for lav langs den midtre tredjedelen av murens lengde. Eksisterende mur bør derfor heves her.

Hvis det lages en ny ledemur eller lignende konstruksjon (eksisterende mur rives), bør denne i et hvert punkt ikke legges lavere enn det høyeste nivået av eksisterende ledemur og anbefalt laveste nivå for ledemur (beregningsresultat + sikkerhetsmargin). Dette for å unngå påvirkning av sikkerheten og dimensjoneringen av dammen oppstrøms (som dimensjoneres for langs større flommer enn en 200-årsflom). Hvis det lages en ny ledemur bør dette diskuteres med dameier.

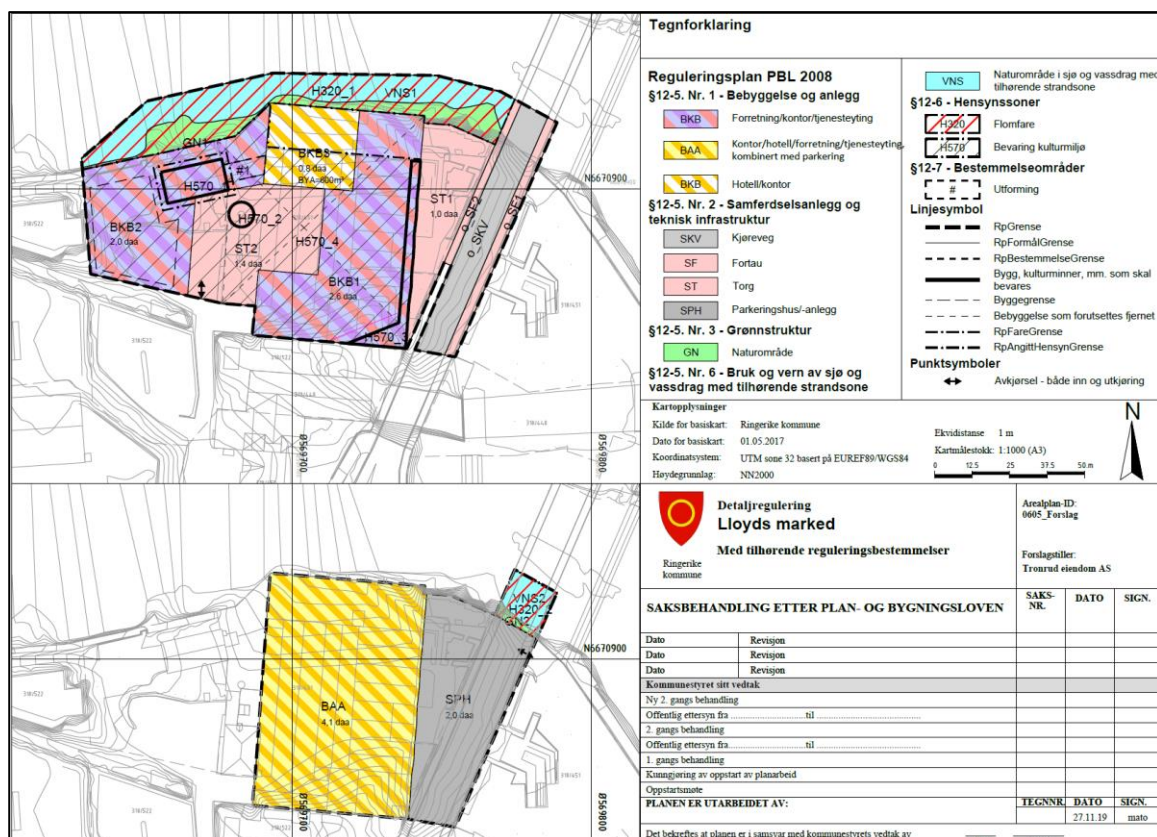
For at resultatet skal være gyldig må det ikke gjøres noen endringer i selve fossen/elveløpet som vil påvirke strømningene. Dette betyr også at formen til den siden av den eksisterende ledemuren og bygget nedstrøms som er i kontakt med vannstrømmen ikke bør endres fra slik det er i dag.

I utgangspunktet bestod ikke dette prosjektet av å vurdere vannstandene langs med bygget nedstrøms ledemuren. Siden beregningene viser relativt høye vannstander langs med bygget (som potensielt kan true reguleringsområdet ved en 200-årsflom), vil det her presenteres de vannstander som er beregnet langs med bygget nedstrøms. Følgende maksimale vannstander ble beregnet langs de to sidene til bygget i kontakt med vannstrømmen (se definisjon av sider i Figur 12 i kapittel 5.3):

- Oppstrøms side:
 - 76,0 moh. (uten hensyn til luftinnblanding)
 - **76,4 moh.** (med hensyn til luftinnblanding)
- Nedstrøms side:
 - 73,8 moh. (uten hensyn til luftinnblanding)
 - **75,9 moh.** (med hensyn til luftinnblanding)

Vegger og vinduer på disse sidene av bygget bør da dimensjoneres for å kunne motstå vanntrykkene gitt av nivåene nevnt over (fortrinnsvis nivåene som inkluderer luftinnblanding) tillagt en sikkerhetsmargin (ikke vurdert her, men sannsynligvis i størrelsesorden ca. 1 – 1,5 m). Dette for å unngå at vann tar seg gjennom vegger og vinduer i bygget og ev. videre derfra.

Alle høyder oppgitt i dette notatet er gitt i NN2000 høydesystem.



Figur 2: Reguleringsplan Lloyds marked

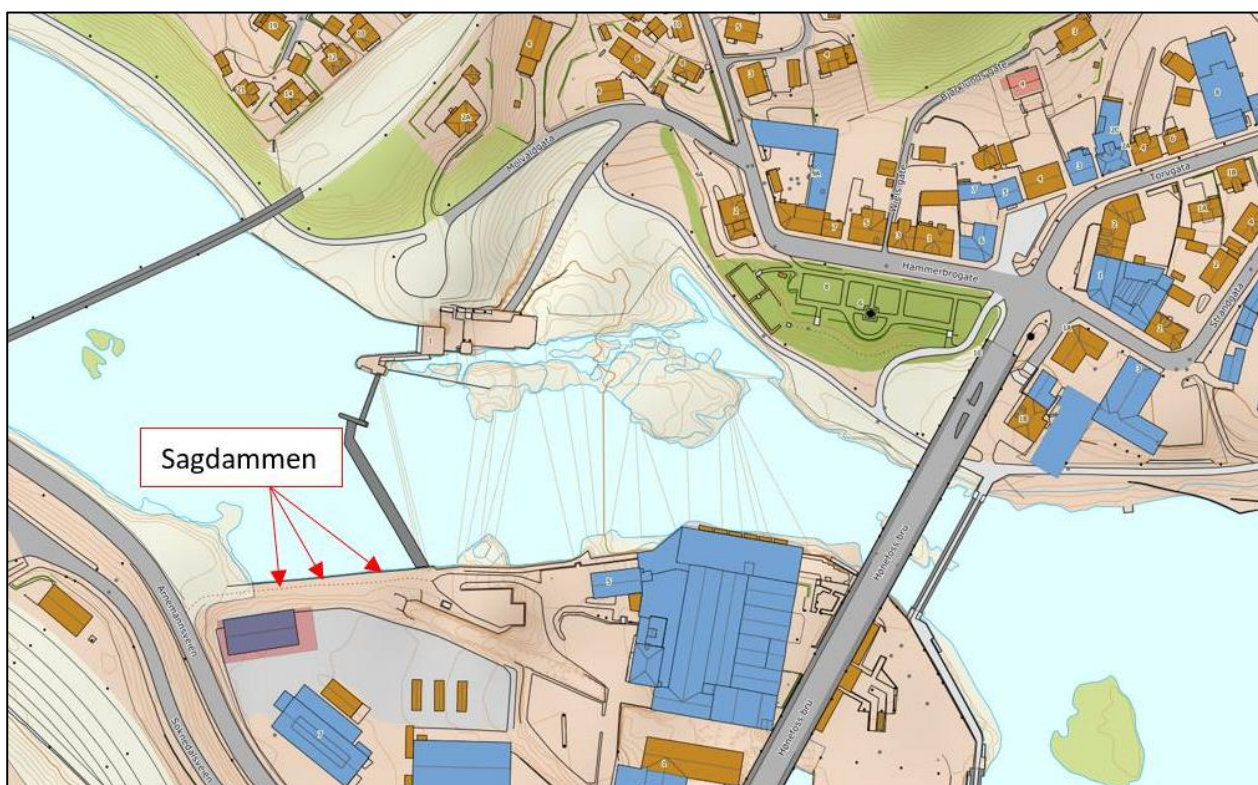
Norconsult har tidligere utført 2D CFD beregninger med HEC-RAS av strømmingene i Hønefossen ved en 200-årsflom (dokumentert i notatet «Vannlinjeberegninger ifm. reguleringsplan for Lloyds marked og Tippen» (Norconsult, 2020)). Notatet er vedlagt i vedlegg 1. I dette notatet ble det konkludert at det ikke kan utelukkes at refleksbølger og dynamiske bølger langs ledemuren kan medføre oversvømmelse av hele eller deler av området Lloyds marked, og at dette bør undersøkes nærmere ved bruk av 3D CFD modeller. Videre er 2D beregninger lite egnet/gyldig ved overkritiske strømminger (strykende strøm) og bratte helninger, slik som er tilfelle for Hønefossen.

Dette notatet tar derfor for seg oppsettet av og resultater fra 3D CFD beregninger av Hønefossen ved en 200-årsflom.

Alle høyder oppgitt i dette notatet er gitt i NN2000 høydesystem. Differansen mellom NN2000 og NN1954 høydesystem er ca. + 16,7 cm iht. fastmerker i området, og er benyttet som forutsetning for transformasjon mellom de to høydesystemene (bla. damtegninger er gitt i NN1954 høydesystem).

2 Forutsetninger

Eksisterende flomberegninger for dam Hønefossen (Norconsult, 2016) antyder at Sagdammen (dam langs høyre side av elva oppstrøms flomløpet – se Figur 3) sannsynligvis vil overtoppes ved en 200-årsflom med dagens utforming, og at området Lloyds marked derfor kan være flomutsatt selv om ledemuren langs fossen ikke overtoppes (vann kan komme rennende inn på området fra Sagdammen). Ringerikskraft jobber imidlertid med tekniske planer for utbedring (inkl. forhøyelse) av Sagdammen slik at den ikke overtoppes, men disse planene er ennå ikke ferdige.



Figur 3: Plassering av Sagdammen (Kartverket, 2020)

I beregningene er det forutsatt at Sagdammen er ombygget og hevet over 200 års vannstanden oppstrøms dam Hønefossen. Altså vurderes ikke dagens situasjon for Sagdammen, hvor 200-årsvannstanden overtopper og renner over dammen (og muligens videre inn på Lloyds marked).

Det forutsettes ellers at det ikke gjøres noen endringer i selve fossen/elveløpet som vil påvirke strømningene. Dette betyr også at formen til den siden av ledemuren og bygget nedstrøms som er i kontakt med vannstrømmen ikke bør endres fra slik det er i dag. Hvis endringer utføres, vil ikke resultatene i dette notatet være gyldige.

3 Metode

3.1 Modelleringsmetode

Vannstrømningene i Hønefossen er meget kompliserte og vil ha en svært turbulent og dynamisk karakter (vannstandene vil variere over både tid og rom). Det forventes i stor grad overkritiske strømninger (strykende

strømninger) med høye vannhastigheter, med overgang til lokale områder med underkritiske strømninger (rolige strømninger). Det vil si at det vil være sterk turbulens og stor energiomsetning i Hønefossen, noe som gir en svært dynamisk karakter (over tid og rom) på vannspeilet med fenomen som vannstandsprang (overgang fra over- til underkritisk strøm med tilhørende energidreping), refleksbølger, dynamiske bølger og luftinnblanding i vannstrømmen.



Figur 4: Hønefossen sett fra nedstrøms side ved lav vannføring

For å beregne strømningene i Hønefossen mest mulig nøyaktig ble det derfor utført 3D CFD (Computational Fluid Dynamics) beregninger av flomløpet med programmet Flow-3D. Flow-3D er et 3D CFD-program som beregner vannets strømninger dynamisk i to eller tre dimensjoner ved å løse differensialligninger for kraftlikevekt (Navier-Stokes) og kontinuitet numerisk.

Det eneste reelle alternativet til 3D CFD beregninger ville vært fysiske modellforsøk, men dette ville vært betydelig mer omfattende (både tids- og kostnadsmessig) og man ville hatt betydelige utfordringer med å måle vannstandene i den turbulente fossen over tid og rom med særlig nøyaktighet. Videre ville luftinnblanding og dens påvirkning på vannstand og strømning blitt underestimert i en fysisk modell.

3.2 Geometri

Som grunnlag for 3D CFD-beregningene ble geometrien tegnet i 3D basert på byggetegninger av dam Hønefossen og punktskyer fra laserskann utført fra fly (fra 2015 og 2016).

3.3 Vannstand langs ledemuren på fossens sørside

Som nevnt over, vil vannstandene i Hønefossen ha en svært turbulent og dynamisk karakter (vannstandene vil variere over både tid og rom).

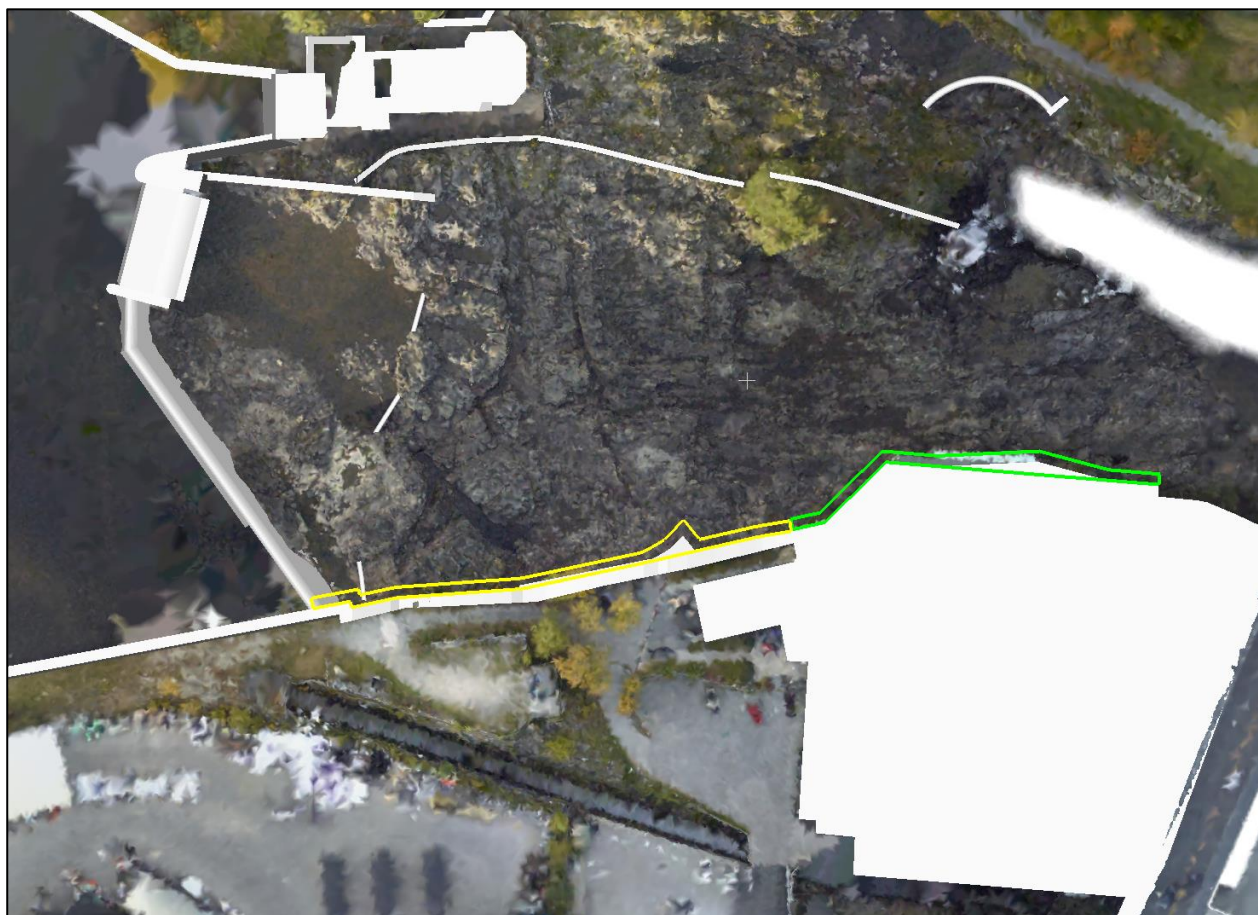
For å ta hensyn til variasjonen over tid og rom, samt noe av usikkerheten forbundet med beregning av dette, ble endelig vannlinje langs ledemuren på sørsiden av fossen og bygningen nedstrøms bestemt på følgende måte:

For et hvert punkt langs ledemuren/bygningen beregnes endelig vannstand som høyeste opptredende vannstand over 10 sekunder (vannstander hentes ut for hvert 0,02 s i beregningene) innenfor 2 m fra muren/bygget (projisert normalt inn på muren/bygget). Det tas ikke hensyn til sprut og brytende bølger ved beregningen av endelig vannlinje – kun sammenhengende vannvolum tas hensyn til.

På denne måten får man tatt noe hensyn til variasjonen over tid, samt noe av usikkerheten forbundet med eksakt beregning av lokasjon for fenomen som vannstandsprang, refleksbølger etc.

Det ble også beregnet gjennomsnittlige og laveste vannstander over tid, men disse resultatene er ikke presentert i denne rapporten.

Figur 5 viser området som ligger innenfor 2 m fra hhv. ledemuren (område markert med gul strek) og bygningen nedstrøms (område markert med grønn strek)



Figur 5: Benyttet resultatområde: Området som ligger innenfor 2 m fra hhv. ledemuren (område markert med gul strek) og bygningen nedstrøms (område markert med grønn strek).

3.4 Fribord/sikkerhetsmargin

For å ta hensyn til usikkerhetene i datagrunnlaget og beregningene bør en sikkerhetsmargin/fribord tillegges beregnede vannstander ved bestemmelse av laveste nivå for fossens ledevægger. Det er NVE som fastsetter endelig krav til sikkerhetsmargin/fribord, men vi har her gjort noen vurderinger og kommet opp med et forslag til en sikkerhetsmargin for vannstandene langs ledemuren.

De fysiske fenomenene som er ventet å gi de største vannstandene langs ledemuren er:

- Vannstandssprang (overgang fra overkritiske strømminger med høy hastighet og lav vanndybde til underkritiske strømminger stor vanndybde og lav hastighet i et energidrepende og turbulent vannstandssprang)
- Refleksbølger (stasjonære bølger formet av overkritisk strømming med stor hastighet som endrer retning).
- Dynamiske variasjon over rom og tid (pga. turbulens)
- Luftinnblanding i vannstrømmen (innblanding av luftbobler fra turbulensinduserte overflateruheter og dynamiske bølger)

Usikkerheten i beregningen av disse fenomenene ligger i hovedsak i usikkerheten i de hydrauliske beregningene, usikkerheten i geometri og i usikkerheten til den valgte vannføringsverdien for dimensjonerende flom (hydrologisk usikkerhet i beregning av 200-årsflommen).

3.4.1 Hensyn til usikkerhet i beregningene og i geometri

For å ta hensyn til usikkerheten i beregningene er det tatt utgangspunkt i den anerkjente boka «Design of small dams» (USBR, 1987). Her gis anbefalt fribord (S) som en funksjon av vanndybden (y) og vannhastigheten (V). Det er derfor tatt utgangspunkt i beregningsresultatet fra CFD beregningene, hvor største beregnede vanndybde (i snitt over tid) er 3,8 m og største beregnede vannhastighet (i snitt over tid) er 7,5 m/s.

USBRs «Design of small dams» (1987) anbefaler følgende fribord for å ta hensyn til usikkerheten i beregningene av vannstand for henholdsvis flomløpskanaler med overkritisk strømming og energidreperbasseng (vannstandssprang):

- $S_{kanal} = \left(2 + 0.025 \times \frac{V}{0.3048} \times \sqrt[3]{\frac{y}{0.3048}} \right) \times 0.3048 \approx 1 \text{ m}$
- $S_{energidreper} = 0,1 \times (V_1 + y_2) \approx 1,1 \text{ m}$

Riktig nok er strømmingene i Hønefossen stedvis sannsynligvis mer komplisert enn formlene over forutsetter, men på en annen side er beregningene som er utført (CFD) betydelig mer avanserte (tar blant annet hensyn til turbulens og variasjon over tid, samt 3D effekter av geometri og strømming) og modellerer flere fysiske fenomen (som for eksempel luftinnblanding) enn tradisjonelle håndberegninger (som sannsynligvis ligger til grunn for formlene over).

For å ta hensyn til usikkerheten i geometri må underlaget vurderes. Underlaget for geometrien i beregningene er laserskanning fra fly. I prosjektrapporten til Terratec er maksimalt avvik for kontrollflater beregnet til kun 2,6 cm (Terratec, 2016). Basert på dette antas det at enkeltpunktene har relativt god nøyaktighet.

Videre ser punkttettheten ut til å være maksimalt ca. 0,5 m for de to punktskyene sammensatt. Hvis det antas (meget konservativt) trekanta ruhetselementer med lengde 0,5 m og høyde 0,25 m (trekanter med 2 vinkler på 45 grader) over alt i geometrien som ikke fanges opp skannen, kan det vises at vannstandene må øke med ca. 0,1 m for å opprettholde strømningsarealet. Denne vurderingen er imidlertid svært konservativ,

og alt i alt mener vi det ikke er behov for å ta hensyn til noen ekstra sikkerhetsmargin for geometri utover hensynet til beregningsusikkerheten.

Basert på dette anbefaler vi en samlet sikkerhetsmargin/fribord for å ta hensyn til usikkerheten i beregningene og i geometri på 1,1 m.

3.4.2 Hensyn til usikkerhet i hydrologi/vannføring

Iht. NVE rapporten «Flomberegninger for Hønefoss» (2002) (som gir 200-årsflommen som er benyttet i beregningene i dette notatet) ligger flomberegningene i høyeste kvalitetsklasse (klasse 1), og NVE estimerer usikkerheten i beregnet vannføring til ca. 20 %.

Gjennom analytiske analyser på Froudetallet (styrende for sekundærdybden i et vannstandssprang) og energinivået oppstrøms dammen (styrende i stor grad for størrelsen på refleksbølgene) kan det vises at 20 % økning i vannføring vil kunne gi opptil ca. 0,5 m endring av vannstand langs ledemuren.

Basert på dette ville det vært naturlig med en sikkerhetsmargin/fribord for å ta hensyn til usikkerheten i vannføring alene på ca. 0,5 m. Vi mener imidlertid at det ikke bør tas ytterligere hensyn (utover usikkerheten i beregning) til usikkerheten i vannføring ved dimensjonering av ledemuren. Dette fordi:

- Det hydrologiske grunnlaget er såpass godt (klasse 1).
- Det ikke er relevant med klimapåslag i et så stort vassdrag.
- Sikkerhetsfaktorer bør ikke adderes direkte (da sannsynligheten for opptreden av flere hendelser samtidig er svært liten). Isteden bør det kanskje heller benyttes den største av sikkerhetsmarginene beregnet.
- Det ser ikke ut til å være praksis i flomsonekartlegging i Norge å ta hensyn til usikkerhet vannføring i tillegg til beregningsusikkerheten. Som eksempel ble en endelig sikkerhetsmargin/fribord på 0,3 m benyttet i NVEs flomsonekartlegging av Storelva nedstrøms Hønefossen, hvor 20 % usikkerhet i vannføring gir en usikkerhet i vannstand på ca. 0,7 m.

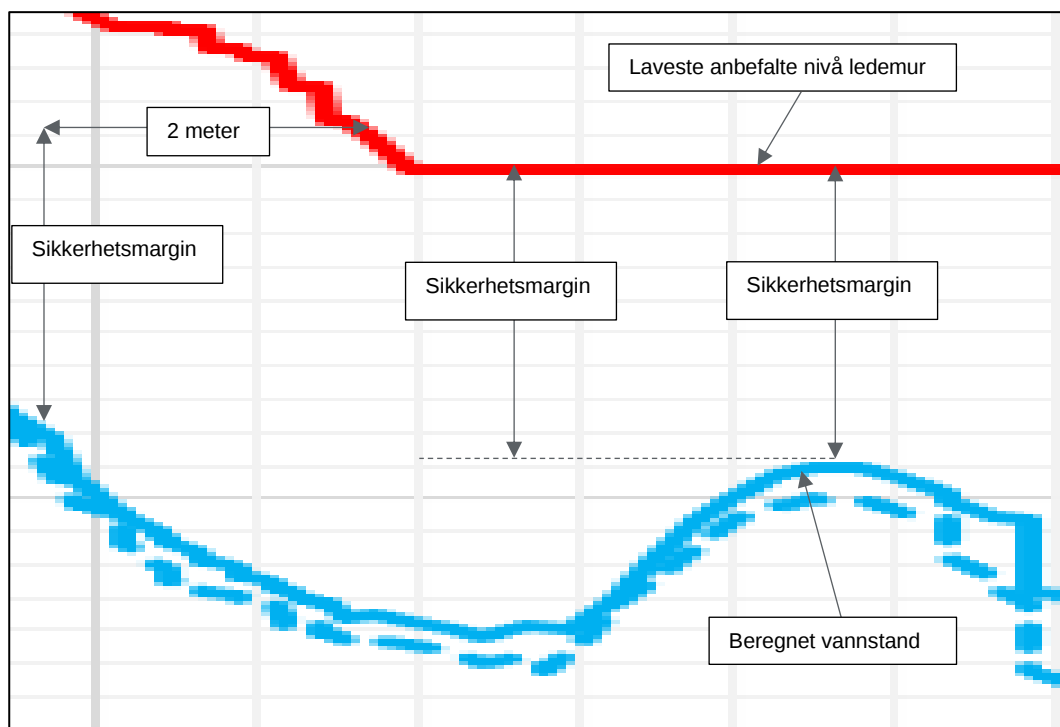
3.4.3 Anbefaling av endelig sikkerhetsmargin/fribord

Basert på vurderingene gitt over, **anbefaler vi en endelig sikkerhetsmargin på 1,1 m** for beregnede vannstander langs den søndre ledemuren i Hønefossen.

For å ta hensyn til den dynamiske variasjonen over rom som potensielt ikke fanges opp av CFD-beregningene (horisontal sikkerhetsmargin), er følgende kriterier benyttet ved fastsettelse av laveste anbefalte nivå på ledemuren:

Nivået på muren ved et hvert punkt legges ikke lavere enn:

- **Høyeste vannstand nedstrøms inkl. endelig sikkerhetsmargin**
- **Høyeste vannstand innenfor 2 m normalt på muren inkl. endelig sikkerhetsmargin** (hensyntatt gjennom måten vannstandene beregnes – se kapittel 3.3)
- **Høyeste vannstand innenfor 2 m oppstrøms inkl. endelig sikkerhetsmargin.**



Figur 6: Prinsipper for å ta hensyn til variasjon over rom

4 Modell

4.1 Geometri

Som grunnlag for 3D CFD-beregningene ble geometrien tegnet i 3D basert på byggetegninger av dam Hønefossen og punktskyer basert på laserskann fra fly, hentet fra følgende prosjekt på hoydedata.no:

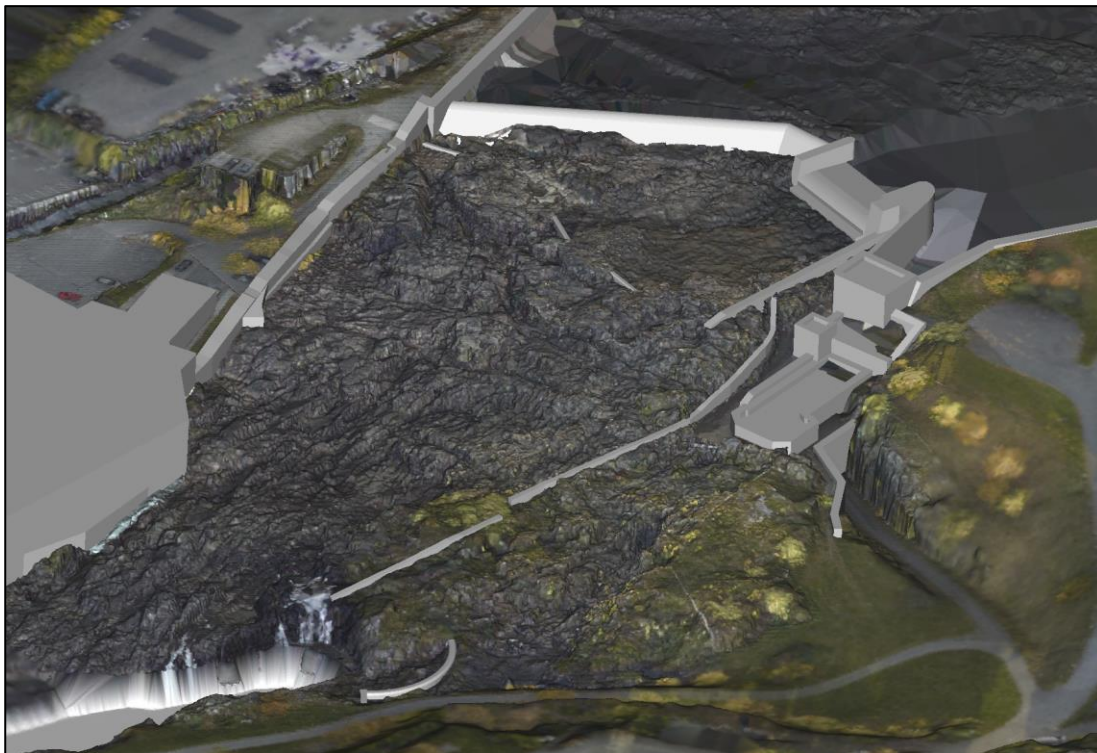
- 2015: Geovekstprosjekt, Midt-Buskerud 2015
- 2016: Kartlegging av Storelva, Randselva og Begna. NVE sak 201603593

Punktskyen fra 2016 inneholder også deler av elvebunnen, da laserskannet fra fly (mest sannsynlig grønn laser) er kombinert med ekkolodd fra lettboat.

Flomløpet til dam Hønefossen ble tegnet basert på byggetegninger av dammen. Øvrige betongkonstruksjoner ble tegnet etter beste evne basert på laserskann fra fly. Enkelte komponenter ble gjort tykkere enn i virkeligheten for å redusere kravet til celleoppløsning i beregningene, men siden dette hovedsakelig ble utført på den siden av komponenten som ikke er i kontakt med vannstrømmen, vil ikke dette påvirke resultatet av betydning. Videre ble uvesentlige elementer for strømningene ikke modellert (rekkverk etc.).

Terrengtet ble tegnet basert på laserskann fra fly, hovedsakelig fra 2016-prosjektet som også inneholdt deler av elvebunnen. Vegetasjon og uvesentlige elementer ble fjernet før endelig overflate ble laget. Områder med manglende punkter ble interpolert fra nærliggende punkter eller laget basert på informasjon fra damtegninger.

Figur 7 viser et bilde av endelig 3D geometrimodell sett fra nedstrøms side.



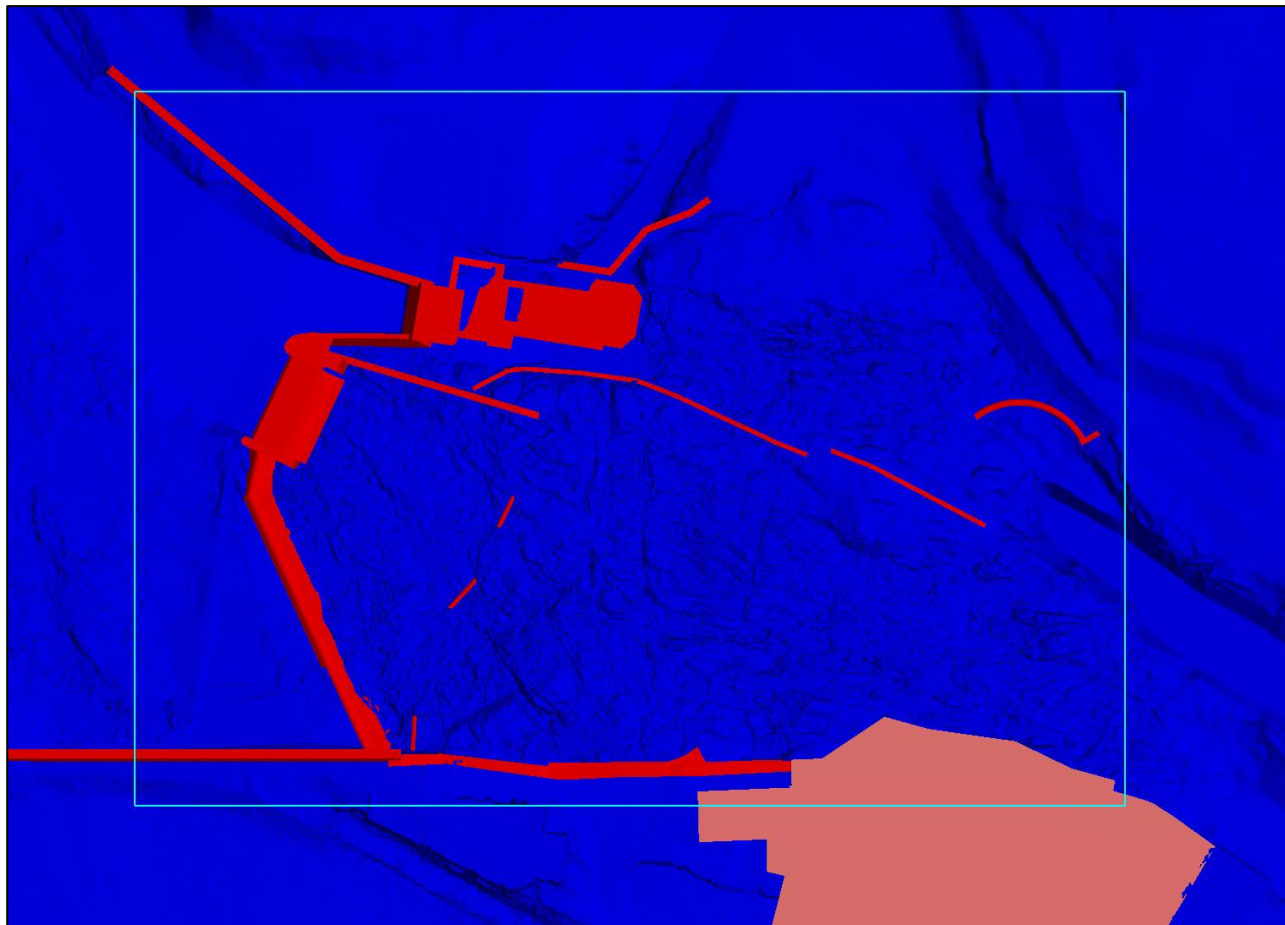
Figur 7: Endelig 3D geometrimodell sett fra nedstrøms side (fra nord-øst)

4.2 Grid og grensebetingelser

For å modellere strømmingene i Hønefossen ble det benyttet ett ortogonalt grid med 25 cm cellestørrelse. Gridet har oppstrøms ende ca. 25 – 50 m oppstrøms flomløpet til dam Hønefossen og nedstrøms ende ca. 50 m nedstrøms hjørnet på bygget langs høyre side (sett medstrøms) av fossen/elva. Figur 8 viser gridet sett ovenfra.

Gridgrensene (og retningen til cellene) ble plassert mest mulig normalt på og parallelt med ledemuren.

Det ble gjennomført gridkonvergensstudier for både vannføring og vannstand langs ledemuren, og den endelige celleoppløsningen (som beskrevet over) ble valgt basert på dette.



Figur 8: Gridet sett ovenfra. Lyseblå strek viser yttergrensene til gridet.

Oppstrøms grense:

Oppstrøms grense ble plassert ca. 25 – 50 m oppstrøms flomløpet til dam Hønefossen og satt til en vannføringsgrense med underkritiske vannstrømning. Vannføringen ble satt til 1100 m³/s. Dette tilsvarer en 200-årsflom i Ådalselva ved samløp med Randselva iht. NVE rapporten «Flomberegninger for Hønefoss» (2002), noe som ble kontrollert til fortsatt å være gyldig ifm. Norconsult rapporten «Vannlinjeberegninger ifm. reguleringsplan for Lloyds marked og Tippen» (2020).

Nedstrøms grense:

Nedstrøms grense ble plassert ca. 20 – 60 m oppstrøms Hønefoss bru og satt til en vannstandsgrense (stagnasjonstrykk). Vannstanden ble satt til 70 moh. basert på 200-årsvannstanden gitt i NVE rapporten «Flomsonekart, Delprosjekt Hønefoss» (2003). Vannstanden her har imidlertid ingen betydning for vannstanden i fossen oppstrøms (pga. overkritiske strømninger i fossen).

4.3 Friksjons og singulærtap

Friksjonen mellom vannet og underlaget ivaretas på to måter i Flow-3D:

1. Gjennom turbulensmodeller som beregner energidissipasjonen på grunn av geometrisk ruhet
2. Gjennom kunstig brukerspesifisert ruhet og bruk av "law of the wall" til å beregne hastigheten i den nærmeste cellen til geometrioverflaten.

Siden overflateruheten til betongkonstruksjonene ikke er modellert i geometrimodellen, ble kunstig ruhet for betongkonstruksjonene satt til 3 mm (tilsvarende et Manningstall på ca. $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$). Friksjonen til betongkonstruksjonene har imidlertid liten betydning for vannstandene i fossen.

Siden også overflateruheten til terrenget i liten grad blir modellert med kun laserskann fra fly, ble kunstig ruhet for terrenget satt til 30 cm (tilsvarende et Manningstall på $28 - 31 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ for 1 – 4 m vanndybde). Siden friksjonen til terrenget har noe større betydning på vannstandene i fossen, ble det utført sensitivitetstester med ruhet på henholdsvis 0,1 m og 0,5 m. Resultatet av sensitivitetstestene viste følgende:

- Generelt gir høy ruhet så vidt noe høyere vannstand langs ledemuren
- Situasjoner der sensitivitetstestet ruhet gir høyere vannstand enn valgt ruhet:
 - Generelt svært liten forskjell i gjennomsnittlig vannstand over tid (0 – 10 cm forskjeller) langs nesten hele ledemuren
 - Ved noen få lokasjoner gir sensitivitetstestet ruhet opptil 20 – 30 cm høyere gjennomsnittlig vannstand over tid enn valgt ruhet.

Vannets densitet og dynamiske viskositet settes til henholdsvis 1000 kg/m^3 og $1,519 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$, noe som omtrentlig tilsvarer egenskapene til rent vann ved en temperatur på 4 - 5 °C. Gravitasjonen ble i modellen satt til $9,81 \text{ m/s}^2$.

Singulærtap (energidissipasjon innad i vannstrømmen) beregnes i modellen ved hjelp av turbulensmodeller. Turbulens i vannstrømmen modelleres ved å benytte RANS (Reynolds-Average Navier-Stokes) ligninger med RNG (ReNormalized Group) turbulensmodell med dynamisk beregnet maksimal turbulent mikselengde. RNG-modellen (to-lignings modell) er en statistisk tilnærming til turbulens som benyttes for å estimere turbulensens påvirkning på hastigheter/strømninger og trykk (tilnærming for å redusere cellebehovet – trenger ikke beregne virvlene). Generelt gir bruk av RANS med en turbulensmodell ofte mindre synlig turbulens (mindre hastighets-/trykkfluktuasjoner, miksing og virvler lokalt) enn i virkeligheten, men et overordnet strømningsfelt og turbulens-/singulærtap som er relativt realistisk.

Det ble utført en sensitivitetstest på maksimal turbulent mikselengde (konstant vs. dynamisk). Denne testen viste liten sensitivitet for valg av maksimal turbulent mikselengde (mindre enn 10 – 15 cm i forskjell på gjennomsnittlig vannstand over tid langs ledemuren).

4.4 Luftinnblanding

Siden luftinnblanding til vannstrømmen fra den turbulente vannoverflaten i Hønefossen ble antatt å være stor, noe som kan påvirke vanndybde langs med ledemuren betydelig, ble det i tillegg til å kjøre én modell med bare vann også kjørt én modell med den semiempiriske luftinnblandingsmodellen til Flow-3D aktivert.

Det foreligger relativt lite dokumentasjon på hvor nøyaktig denne modellen er per dags dato, men det ble vurdert til at den informasjon modellen ville gi var bedre enn ingen informasjon (selv ikke fysiske modellforsøk klarer å ta hensyn til luftinnblanding), samt at dette vil redusere behovet for en ekstra og sannsynligvis konservativ sikkerhetsmargin.

Generelt kan det sies at beregning av luftinnblanding og -transport er komplisert og innebefatter blant annet prosesser som:

- Turbulent innblanding av luftbobler ved fri overflate
- Densitet og volumendringer av strømningsvolumet på grunn av luftboblene
- Luftboble nedbryting og oppbygging
- Transport av luftboblene gjennom vannet (drift)
- Frigjøring av luft ved fri vannoverflate

I modellen ble det benyttet anbefalte og logiske verdier for de empiriske parameterne som defineres i modellen. De fysiske parametere som defineres ble satt basert på de fysiske egenskapene til vann og luft. Siden vi ikke hadde tilgjengelig noen kalibreringsdata, ble det ikke gjennomført noen kalibrering av modellen.

Det ble imidlertid antatt (ut fra de rapporter vi har funnet på temaet) at modellen med standardverdier ville gi noenlunde realistiske resultat for iblandet mengde luft så lenge cellestørrelsen er liten nok til å beregne turbulent kinetisk energi med tilstrekkelig nøyaktighet. Ved for store celler til å beregne turbulent kinetisk energi korrekt, vil sannsynligvis turbulent kinetisk energi overestimeres (og da vil også luftinnblandingen teoretisk sett bli overestimert/konservativ).

Selv om modellen er relativt lite validert, virket resultatene å være relativt realistiske (muligens noe konservative/overestimert - $C_{\text{luft}} = 10 - 30 \%$) og innenfor det man skulle forvente ut fra erfaringsdata fra litteratur (Vassdragsregulantenens forening, 1986). Det anbefales derfor at disse beregningen legges til grunn for vurdering av minimumsnivået på ledemuren.

4.5 Numerisk beregningsmetode

For å beregne fri vannoverflate benyttes "Split Lagrangian method" og for momentumadveksjon benyttes "Second order monotonicity preserving" (2. ordens i rom og 1. ordens i tid).

5 Resultater

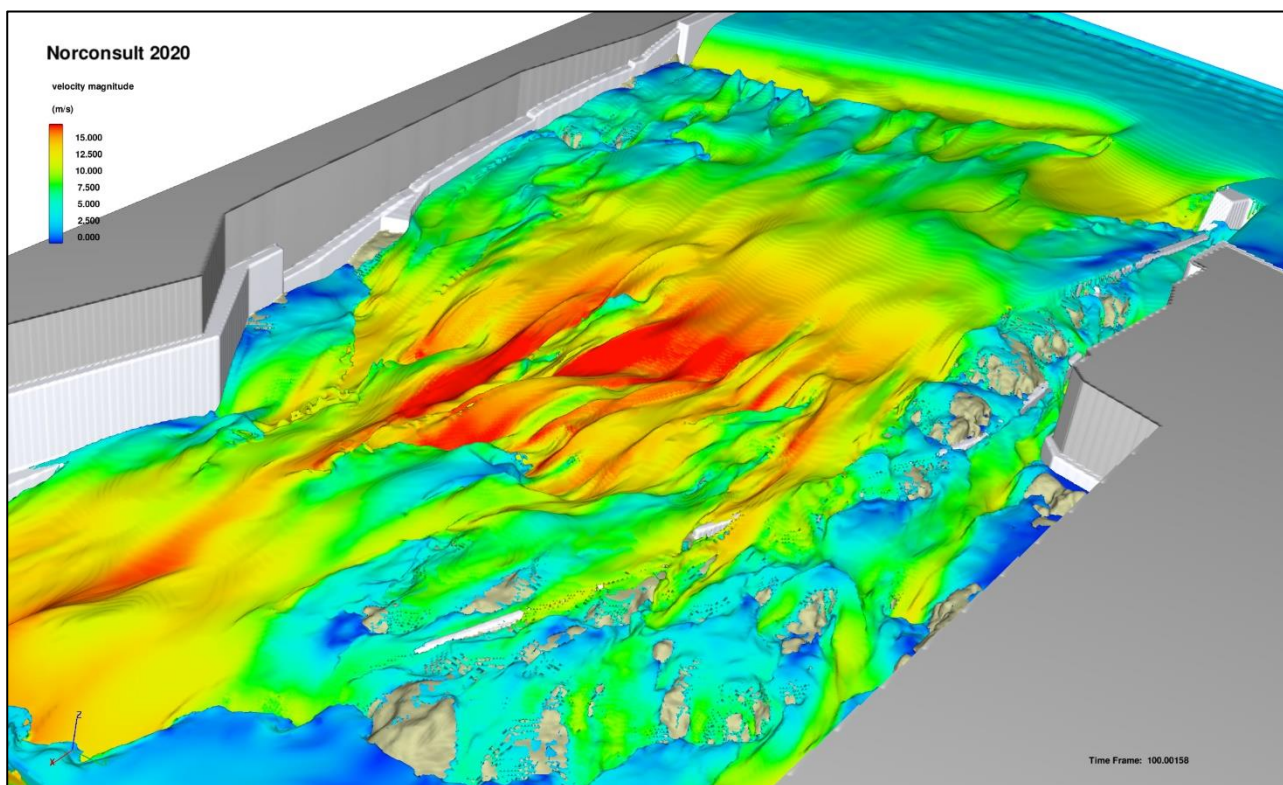
5.1 Strømninger

Figurer som viser beregnede strømninger med og uten hensyn til luftinnblanding er vist i hhv. Figur 9 og Figur 10.

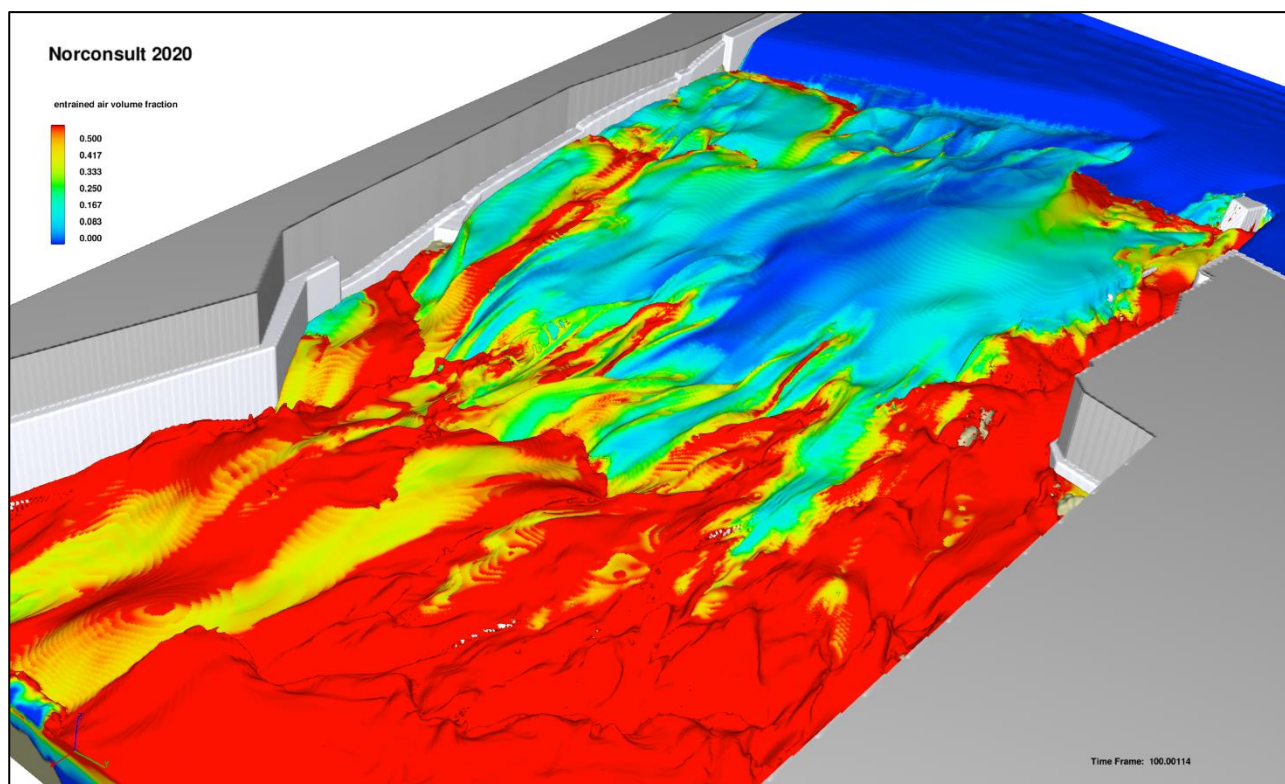
Strømningene langs ledemuren er dominert av overkritiske strømninger (strykende strøm med store vannhastigheter) med periodevis innslag av vannstandssprang og refleksbølger som skaper de største vannstandene langs ledemuren.

Gjennomsnittlig volumfraksjon med luft over dybden langs med ledemuren ser ut til å øke gradvis fra ca. 10 % ved vannstandsspranget nedstrøms overløpet og opp til ca. 30 % langs den nedre delen av ledemuren. Dette virker relativt realistisk (kanskje noe konservativt/overestimert) gitt den bratte helningen, den turbulente vannstrømmen og vannstandssprangene langs strekningen.

De tidsgjennomsnittlige vanndybden og vannhastighetene langs ledemuren ligger mellom hhv. 0,1 – 3,8 m og 0,1 – 7,5 m/s (noe høyere rett nedstrøms overløpet).



Figur 9: Beregnede strømninger uten hensyn til luftinnblanding. Fargeplott angir vannhastigheten i overflaten (skala er begrenset oppad til 15 m/s av visualiseringshensyn).



Figur 10: Beregnede strømninger uten hensyn til luftinnblanding. Fargeplott angir volumfraksjon med luft innblandet i vannstrømmen målt ved overflaten (skala er begrenset oppad til 0,5 av visualiseringshensyn).

5.2 Beregnede vannstander langs ledemuren og laveste anbefalte nivå for ledemur

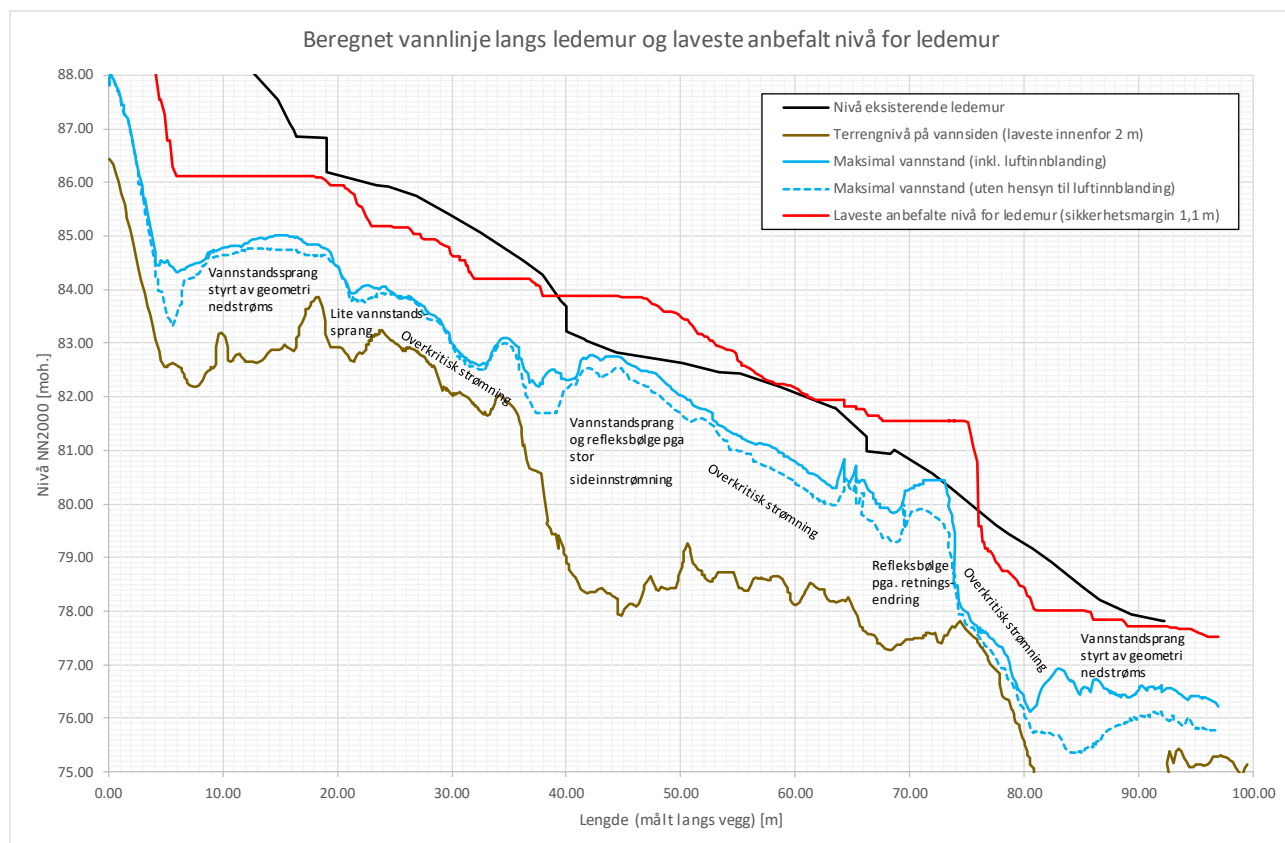
Beregnete vannstander langs ledemuren (med og uten hensyn til luftinnblanding) og laveste anbefalte nivå for ledemur (inkl. en sikkerhetsmargin på 1,1 m) for å unngå overtopping ved en 200-årsflom er vist i vedlegg 2 og i Figur 11. Her er lengden (x-aksen) målt langs med ledemuren (som har noe varierende retning langs lengden).

Resultatene antyder at eksisterende ledemur er omtrent akkurat høy nok til å forhindre overtopping ved en 200-årsflom, men at når det tas hensyn til usikkerheten i beregningene (ved hjelp av en sikkerhetsmargin) er muren for lav ved langs den midtre tredjedelen av murens lengde. Eksisterende mur bør derfor heves her.

Hvis det lages en ny ledemur eller lignende konstruksjon (eksisterende mur rives), bør denne i et hvert punkt ikke legges lavere enn det høyeste nivået av eksisterende ledemur og anbefalt laveste nivå for ledemur (beregningsresultat + sikkerhetsmargin). Dette for å unngå påvirkning av sikkerheten og dimensjoneringen av dammen oppstrøms (som dimensjoneres for langs større flommer enn en 200-årsflom). Hvis det lages en ny ledemur bør dette diskuteres med dameier.

For at resultatet skal være gyldig må det ikke gjøres noen endringer i selve fossen/elveløpet som vil påvirke strømningene. Dette betyr også at formen til den siden av den eksisterende ledemuren og bygget nedstrøms som er i kontakt med vannstrømmen ikke bør endres fra slik det er i dag.

Det gjøres også oppmerksom på at det er NVE som fastsetter endelig krav til sikkerhetsmargin.



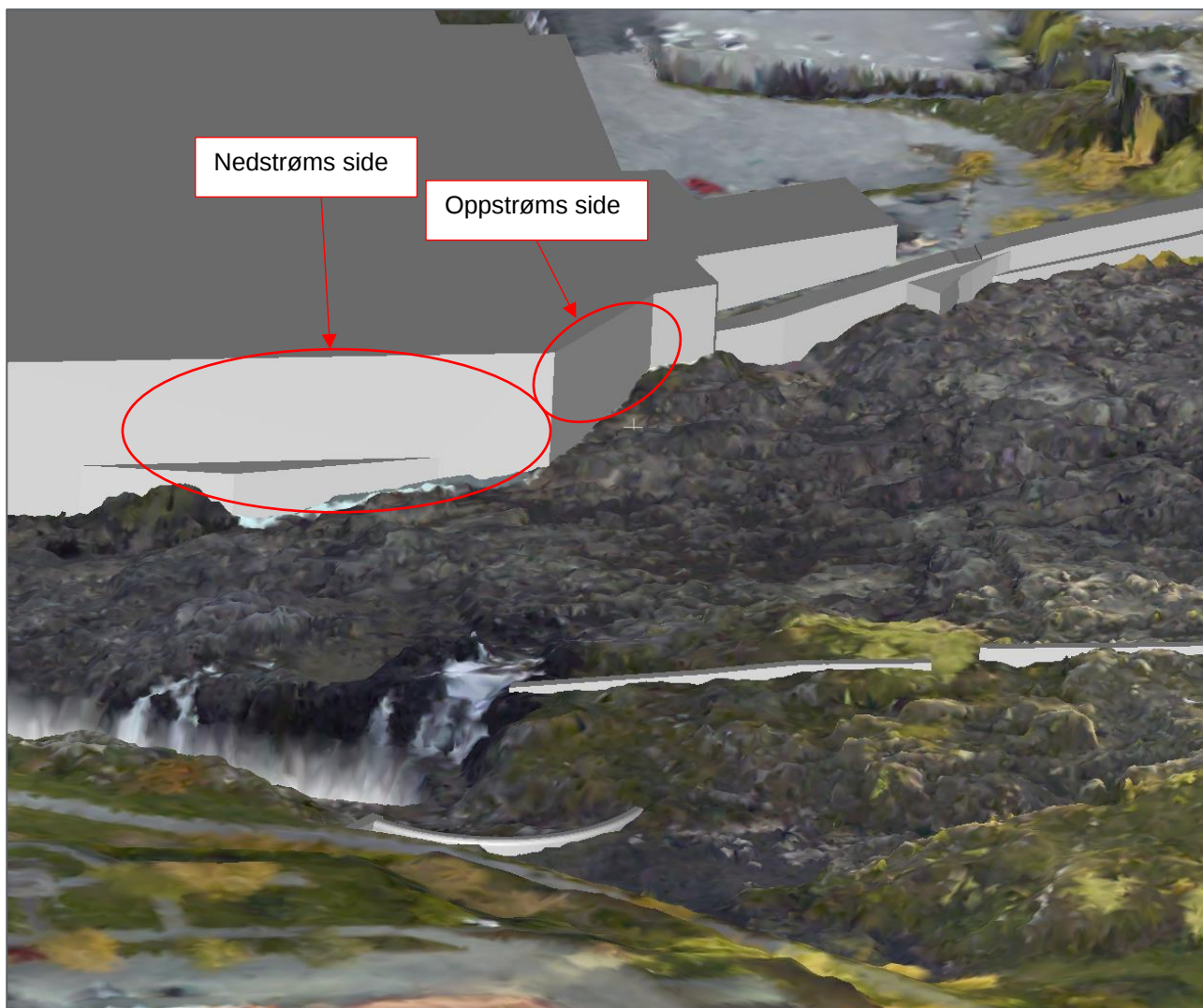
Figur 11: Beregnede vannstander langs ledemuren med og uten hensyn til luftinnblanding

5.3 Beregnede vannstander langs bygget nedstrøms

I utgangspunktet bestod ikke dette prosjektet av å vurdere vannstandene langs med bygget nedstrøms ledemuren. Siden imidlertid beregningene viser relativt høye vannstander langs med bygget (som potensielt kan true reguleringsområdet ved en 200-årsflom), vil det her presenteres de vannstander som er beregnet langs med bygget nedstrøms. Følgende maksimale vannstander ble beregnet langs de to sidene til bygget i kontakt med vannstrømmen (se definisjon av sider i Figur 12):

- Oppstrøms side:
 - 76,0 moh. (uten hensyn til luftinnblanding)
 - **76,4 moh.** (med hensyn til luftinnblanding)
- Nedstrøms side:
 - 73,8 moh. (uten hensyn til luftinnblanding)
 - **75,9 moh.** (med hensyn til luftinnblanding)

Vegger og vinduer på disse sidene av bygget bør da dimensjoneres for å kunne motstå vanntrykkene gitt av nivåene nevnt over (fortrinnsvis nivåene som inkluderer luftinnblanding) tillagt en sikkerhetsmargin (ikke vurdert her, men sannsynligvis i størrelsesorden ca. 1 – 1,5 m). Dette for å unngå at vann tar seg gjennom vegger og vinduer i bygget og ev. videre derfra.



Figur 12: Definisjon av sider på bygget nedstrøms

6 Kilder

Burnham, J. (2011). *Modeling Dams with Computational Fluid Dynamics: Past Success and New Directions*.

Chow, V. (1959). *Open-channel hydraulics*.

Kartverket. (2020, 10 30). Hentet fra Norgeskart:

<https://www.norgeskart.no/#!?project=norgeskart&layers=1002&zoom=16&lat=6679767.05&lon=236826.82>

Norconsult. (2016). *Oppdaterte flomberegninger for dam Hønefoss*.

Norconsult. (2020). *Vannlinjeberegning ifm. reguleringsplan for Lloyds marked og Tippen*.

NVE. (2002). *Flomberegning for Hønefoss*.

NVE. (2003). *Flomsonekart, Delprosjekt Hønefoss*.

Terratec. (2016). *Laserskanning for elvekartlegging, Kartlegging av Storelva, Randselva og Begna, NVE sak 201603593*.

USBR. (1987). *Design of small dams*.

Vassdragsregulantenenes forening . (1986). *Bekinntak på kraftverkstunneler*.

7 Vedlegg

Vedlegg 1 – Notat 2D HEC-RAS beregninger Hønefossen

Vedlegg 2 - Vannstand langs og laveste anbefalt nivå på ledemur

D02	2020-11-18	For godkjenning Tronrud Eiendom	Olav Anders Jørstad	Aslak Løvoll	Olav Anders Jørstad
A01	2020-10-30	For fagkontroll	Olav Anders Jørstad		
Versjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult AS som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører Norconsult AS. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

Vedlegg 1 – Notat 2D HEC-RAS beregninger Hønefossen

Se neste side.

► Vannlinjeberegning ifm. reguleringsplan for Lloyds marked og Tippen

Sammendrag/konklusjon

Det er utført vannlinjeberegninger for Ådalselva ifm. reguleringsplan for Lloyds marked og Tippen på Hønefoss i Ringerike kommune i Viken.

Vannlinjeberegningene er utført på oppdrag av Tronrud Eiendom. Beregningen baserer seg på flom med gjentaksintervall på 200 år som er beregnet til $Q_{200} = 1100 \text{ m}^3/\text{s}$.

I en flomsituasjon vil vannstanden i elva øke, slik at den renner over egne bredder og oversvømmer lavereliggende terreng tett på vassdraget. Reguleringsområde Lloyds marked ligger rett sør for Hønefossen bak ledeveggen som går langs elva. Reguleringsområde Tippen ligger på den søndre elvebredden mellom Hønefoss bru og samløpet med Randselva.

Beregningsresultatene fra den todimensjonale HEC-RAS-modellen viser at vannstanden er lavere enn flomvollen. Det kan imidlertid ikke utelukkes at bølger fra Hønefossen kan skylle over toppen av flomvollen. Avhengig av vannmengden (vannstand og -hastighet) som eventuelt kan renne gjennom Lloyd marked, kan det vurderes om bygningene vil være flomutsatt. Det anbefales å utføre en mer nøyaktig beregning vha. et tredimensjonalt beregningsprogram.

Det er også satt opp en todimensjonal beregningsmodell i HEC-RAS for Tippen som viser at området vil bli flomutsatt under en 200 – årsflomsituasjon. Elveløpet og -slettene er relativt flat. Den todimensjonale modellen er godt egnet og nøyaktighetene vurderes til å være tilstrekkelig.

D01	2020-05-29	For gjennomgang av oppdragsgiver	Fleur Kettner	Einar Markhus	Fleur Kettner
Versjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult AS som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører Norconsult AS. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

1 Innledning

Norconsult er engasjert av Tronrud Eiendom for å kartlegge vannutbredelsen ved en 200 - årsflom langs Ådalselva på Hønefoss som kan bl.a. utnyttes i ny reguleringsplan for Lloyds marked og Tippen.

Vannlinjeberegningene er utført på strekningen fra dam Hønefossen til Hønefoss bru og fra Hønefoss bru til samløpet med Randselva.

I forbindelse med reguleringsplan Lloyds marked er det planlagt bygging av bl.a. forretningslokaler, kontor og tjenesteyting.

Et oversiktskart over analyseområdet er vist i Figur 1-1.



Figur 1-1: Oversiktskart over analyseområde (blå markering)

2 Bestemmelse av flomstørrelse

Ifølge «Byggteknisk forskrift, TEK17» [2] skal ikke byggverk plasseres i flomutsatt område, hvor konsekvensen av en flom er særlig stor. Videre er det beskrevet i forskriften at for byggverk i flomutsatt område, skal det fastsettes sikkerhetsklasse for flom. Byggverk skal plasseres, dimensjoneres eller sikres mot flom, slik at største nominelle årlige sannsynlighet, vist i Tabell 1, ikke overskrides.

Sikkerhetsklasse for flom	Konsekvens	Største nominelle årlige sannsynlighet
F1	Liten	1/20
F2	Middels	1/200
F3	Stor	1/1000

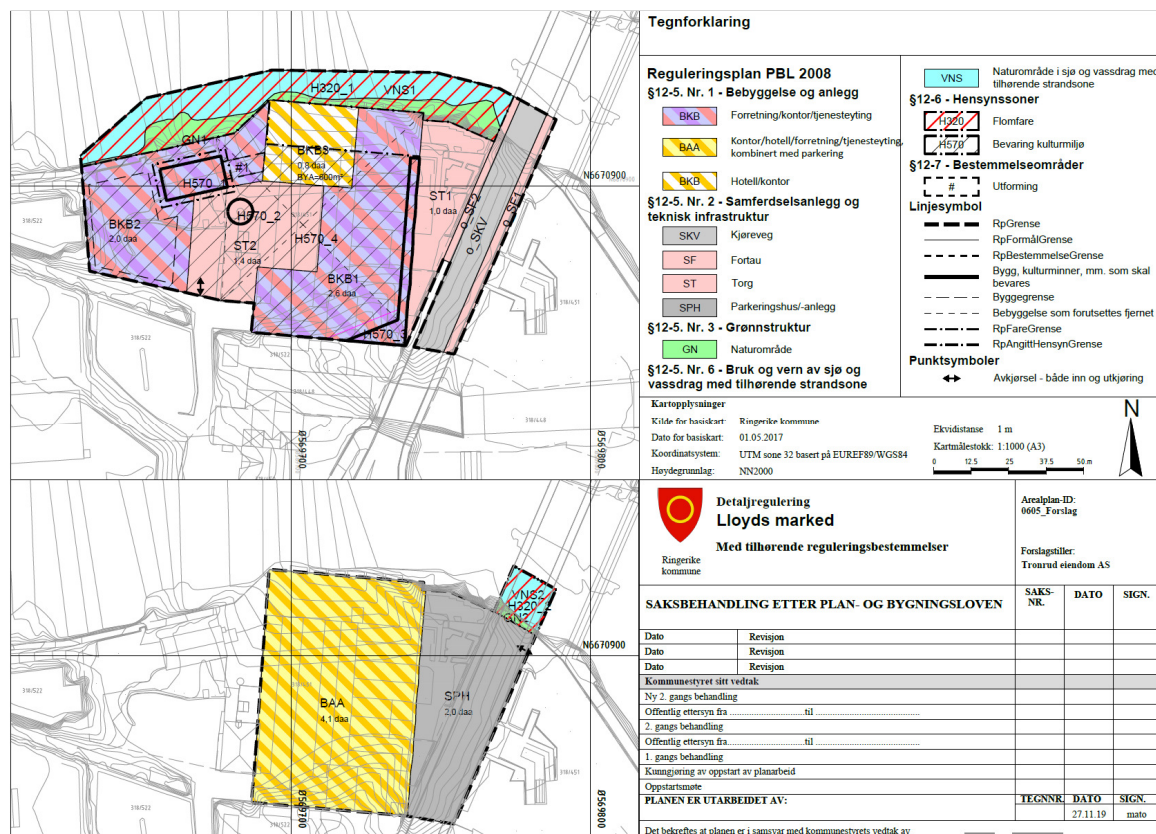
Tabell 1: Sikkerhetsklasser for byggverk i flomutsatt område

Sikkerhetsklasse F1 omfatter byggverk med lite personopphold og små økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser, f.eks. garasjer, lagerbygning med lite personopphold.

Sikkerhetsklasse F2 omfatter de fleste byggverk beregnet for personopphold, f.eks. bolig, kontor-, industri- og driftsbygning.

F3 omfatter byggverk for sårbare samfunnsfunksjoner og byggverk som kan gi stor forurensning ved oversvømmelse, f.eks. sykehjem, sykehus, brannstasjon og avfallsdeponier.

Ifølge reguleringsplanen (Figur 2-1) er det planlagt forretningsbygg, kontor, tjenesteyting og hotell ved Lloyds marked. Bygningene faller under kategori sikkerhetsklasse F2, dvs. en flom med gjentakintervall på 200 år legges til grunn for vannlinjeberegningen. For store vassdrag, som Begna, regnes det ikke med klimapåslag.



Figur 2-1: Detaljregulering Lloyds marked

3 Beregningsmodell

3.1 Datagrunnlag

Vannlinjeberegningen er utført ved hjelp av HEC-RAS 5.0.7 [1]. Programmet er en todimensjonal modell for frie-overflatestrømninger hvor vannets utbredelse ikke må være kjent på forhånd. En todimensjonal modell er svært godt egnet for flate områder som f.eks. ved Tippen. Det er etablert en egen modell for Lloyds marked (rød boks i Figur 3-1) og Tippen (svart boks i Figur 3-1) pga. det store høydeforskjellen i Hønefossen og instabiliteten som forårsakes av dette.

Topografien er beskrevet ved hjelp av en digital terrengmodell fra laserskanning hentet fra hoydedata.no. Laserdata over det aktuelle området er NVEs dybdekart fra 2016 hvor nøyaktigheten/ tettheten er 5 pkt. per kvadratmeter.

Modellene er satt opp med en øvre og nedre grensebetingelse. Øvre grensebetingelse er flomvannføring med gjentaksintervall på 200 år som er beregnet til $Q_{200} = 1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Vannstanden oppstrøms dam Hønefossen er hentet fra vannstandskurven [2] og tilsvarer ca. kt. 89,3.

Nedre grensebetingelse er satt lik flomvannstand kt. 70,0 som er hentet fra NVEs flomsonekart for profil 34 [3]. Grensebetingelsene gjelder for begge beregningsmodeller. Det regnes ikke med flomdemping langs Hønefossen. Det kan derfor forutsettes at vannføringen nedenfor Hønefossen er lik vannføringen oppstrøms dammen. Nedenfor Hønefossen er elveløpet relativt flat og det forutsettes at vannstanden fra NVEs profil 34 gjelder også ved brua.

Vannstand, vannføring og vannhastighet i HEC-RAS - modellen beregnes mellom celler i et såkalt beregningsmesh. Modellen er kjørt med forskjellige cellestørrelse som er forklart nærmere under pkt. 3.1.1 og 3.1.2.

Det gjøres oppmerksom på at flomvannstander i NVEs flomsonekart [3] er i høydesystem NN1954. Vannlinjeberegningen/ terrengmodellen er i det nye høydesystemet NN2000 som ligger 0,17 m høyere enn koter i NN1954 ($\text{NN2000} = \text{NN1954} + 0,17 \text{ m}$).

3.1.1 Lloyds marked

Modellen for Lloyd marked strekker seg fra rett oppstrøms dam Hønefossen og avsluttes ovenfor samløpet med Randselva som vises i Figur 3-1 (omriss av beregningsmeshet i rød). Opplysninger om dammen er hentet fra damtegning, se vedlegg 1.

Flomvullen ved Lloyds marked er inkludert i terrengmodellen ved hjelp av en punktsky som ble bearbeidet i programmet cloud compare.

I en todimensjonal modell blir parameterne som vannndybde og -hastighet kun beregnet i to retninger i horisontalplanet. Langs flomvullen kan det oppstå sjokk-/ stående bølger, som krever beregning av vannhastigheter og -dybder i vertikal retning langs flomvullen. For å gjenskape denne effekten så godt som mulig i en 2d beregning, er modellen satt opp med en turbulenskoeffisient (eddy viscosity transverse mixing coefficient) lik 5 (som benyttes for sterk turbulens). Ruheten av elvebunnen som defineres vha. Mannings M-tall er satt lik $18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ($n = 0,056 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$) som brukes for elver med store uregelmessigheter i elvebunnen og er valgt noe på den ugunstige siden (konservativ mht. vannstand).

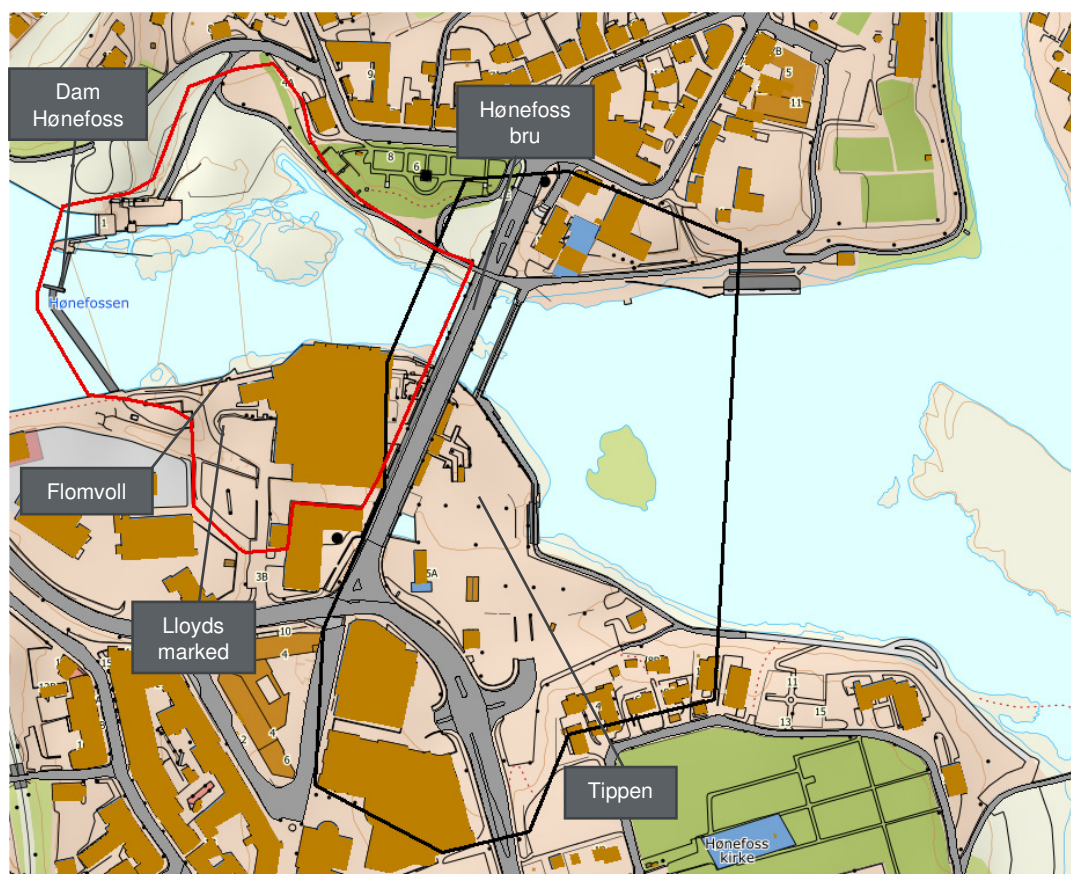
Modellen er dessuten satt opp med et fint beregningsmesh, hvor cellestørrelsen er satt lik $0,3 \times 0,3 \text{ m}$. Flomvullen er fremhevet i beregningsmeshet som egne celler.

3.1.2 Tippen

Modellen for Tippen strekker seg fra Hønefoss bru og avsluttes ovenfor samløpet med Randselva som vises i Figur 3-1 (omriss av beregningsmeshet i svart).

Modellen er kjørt med tre forskjellige cellestørrelser – 3x3 m, 2x2 m og 1,5x1,5 m - for å finne ut når beregningsresultater konvergerer. Presenterte beregningsresultater baserer seg på beregningsmesh med celler på 1,5x1,5 m.

Manningstallet for Tippen er satt lik $M = 28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ som brukes for elva med middels uregelmessigheter i elvebunnen.



Figur 3-1: Oversiktskart over modellert område/ beregningsmesh (rød markering)

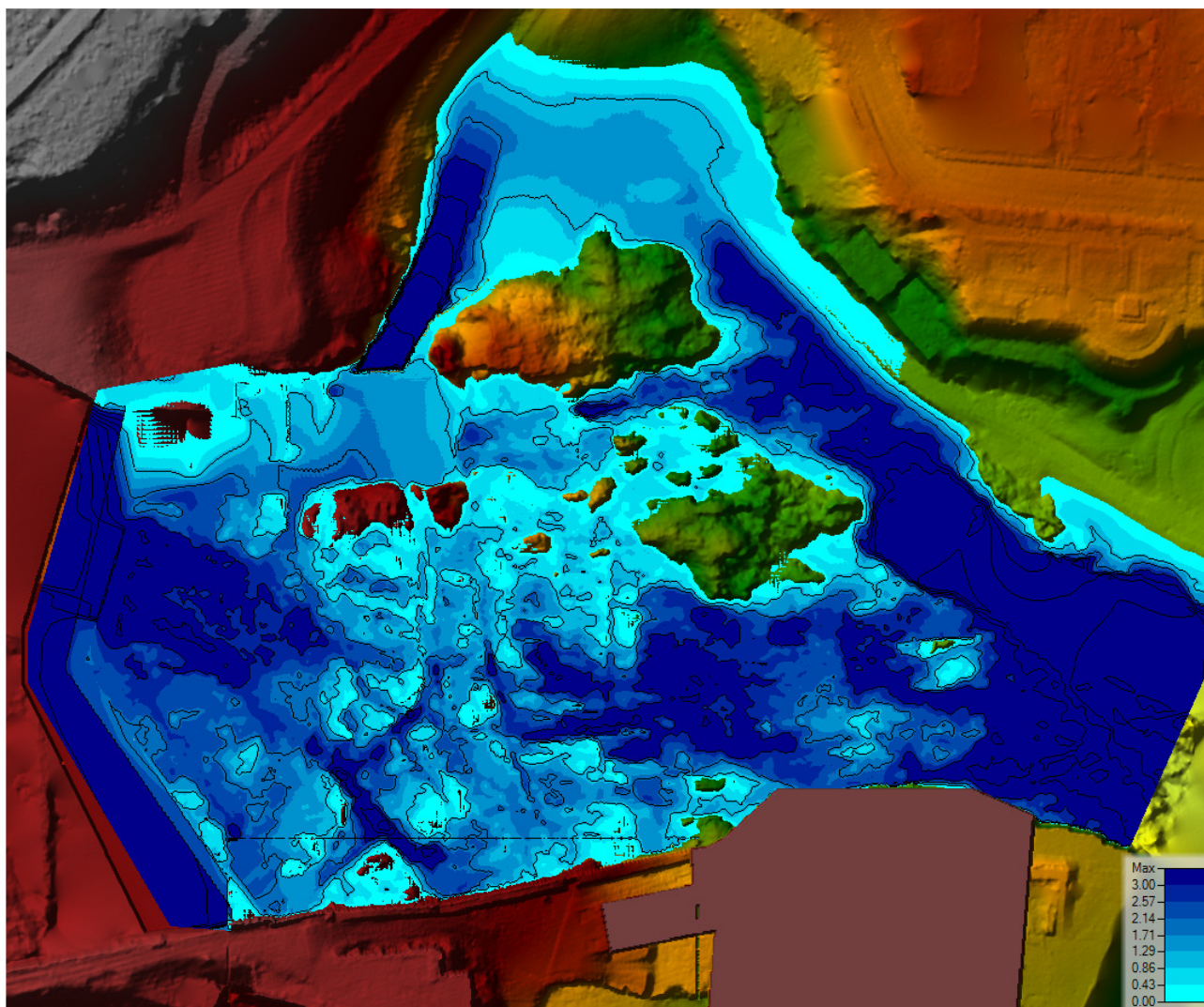
4 Resultat

Beregningsresultater for Lloyd marked og Tippen er presentert i dette avsnittet.

4.1 Lloyds Marked

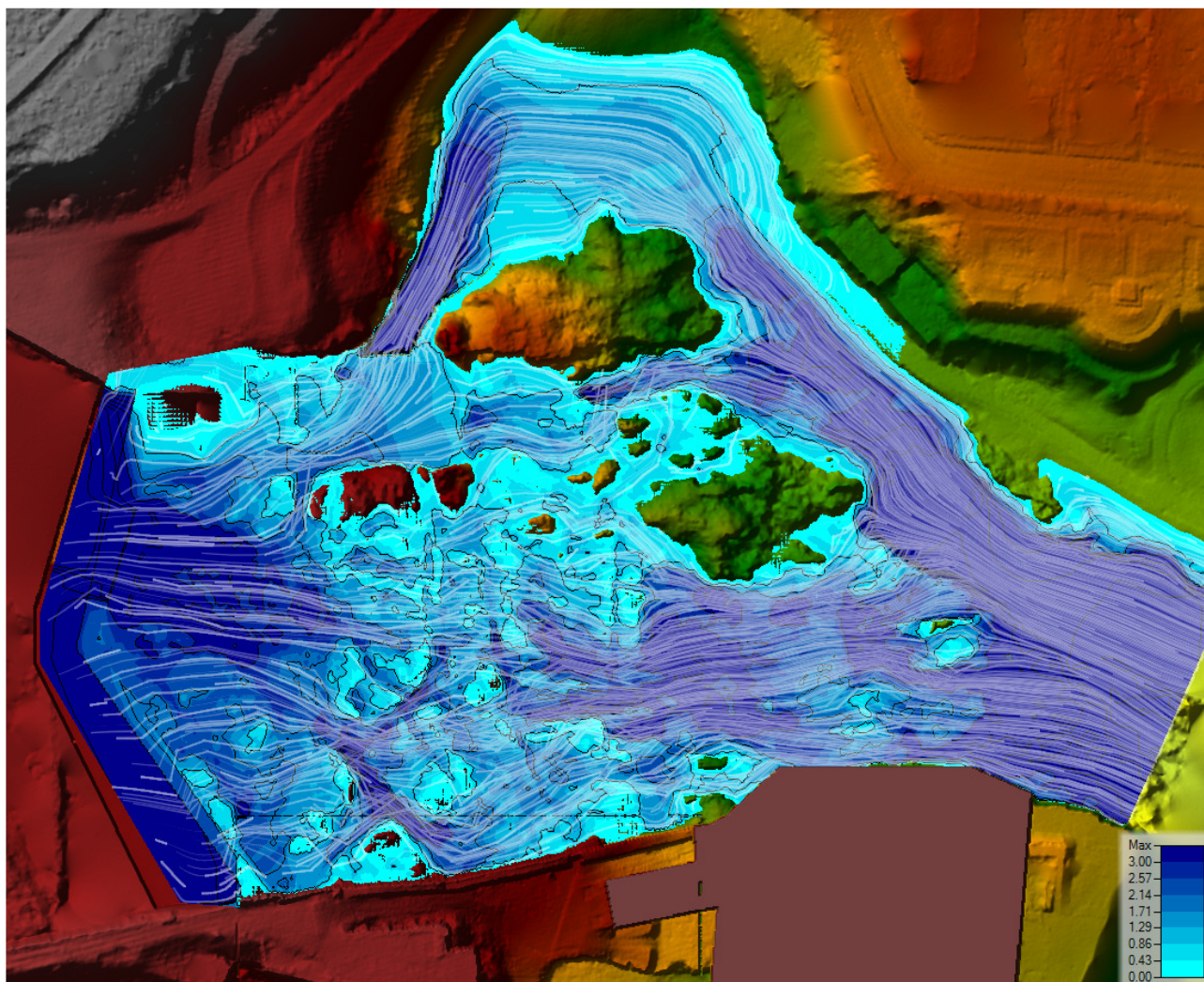
Figur 4-1 viser vanndybden nedstrøms dam Hønefossen. Det er lagd kurver med 1 m ekvidistanse for vanndybde.

Vanndybden langs flomvollen varierer mellom ca. 0,1 m til 2,8 m.



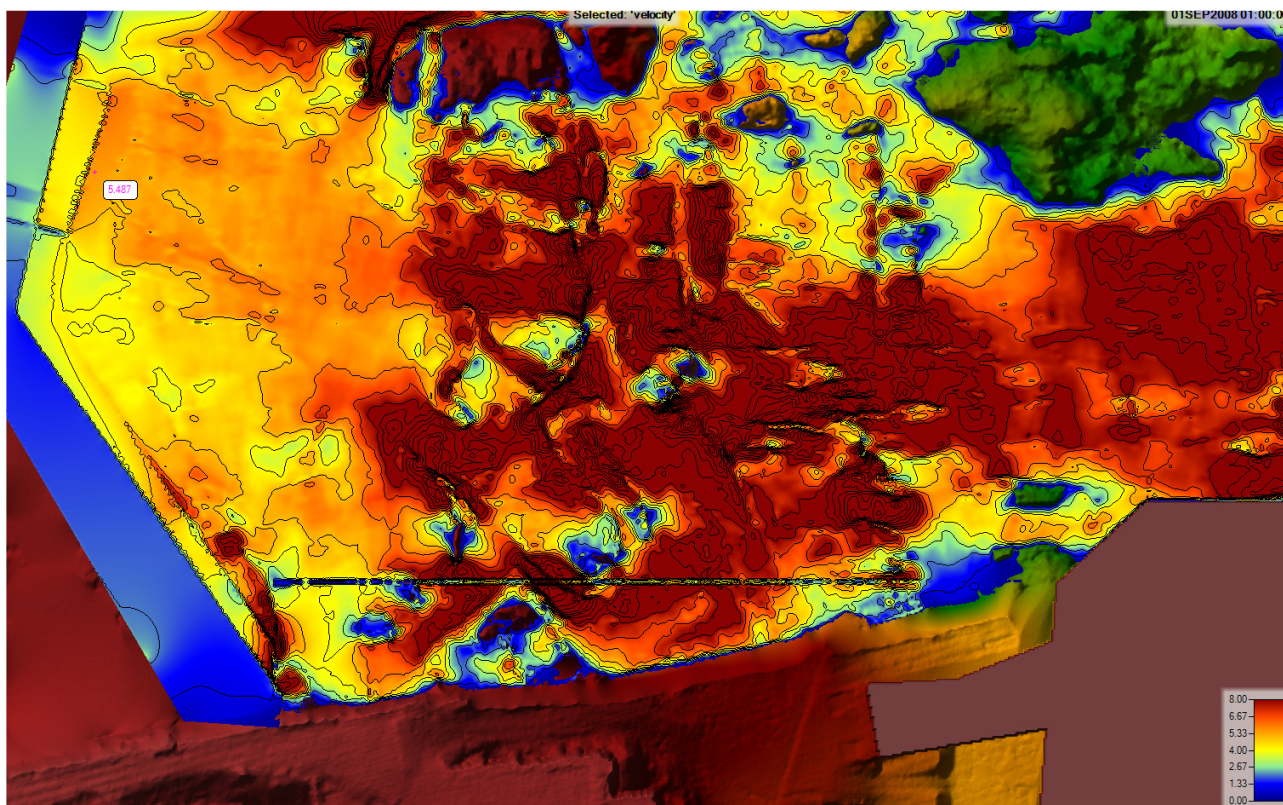
Figur 4-1: Flomsituasjon under en 200-årsflom i Ådalselva ved Lloyds marked: Vanndybde

Figur 4-2 viser strømningsmønsteret langs flomvollen ved 200 – årsflommen. Strømlinjene går ikke parallelt med flomvollen. Det er pga. oppstikkende fjell og store steinblokker flere steder langs flommuren.



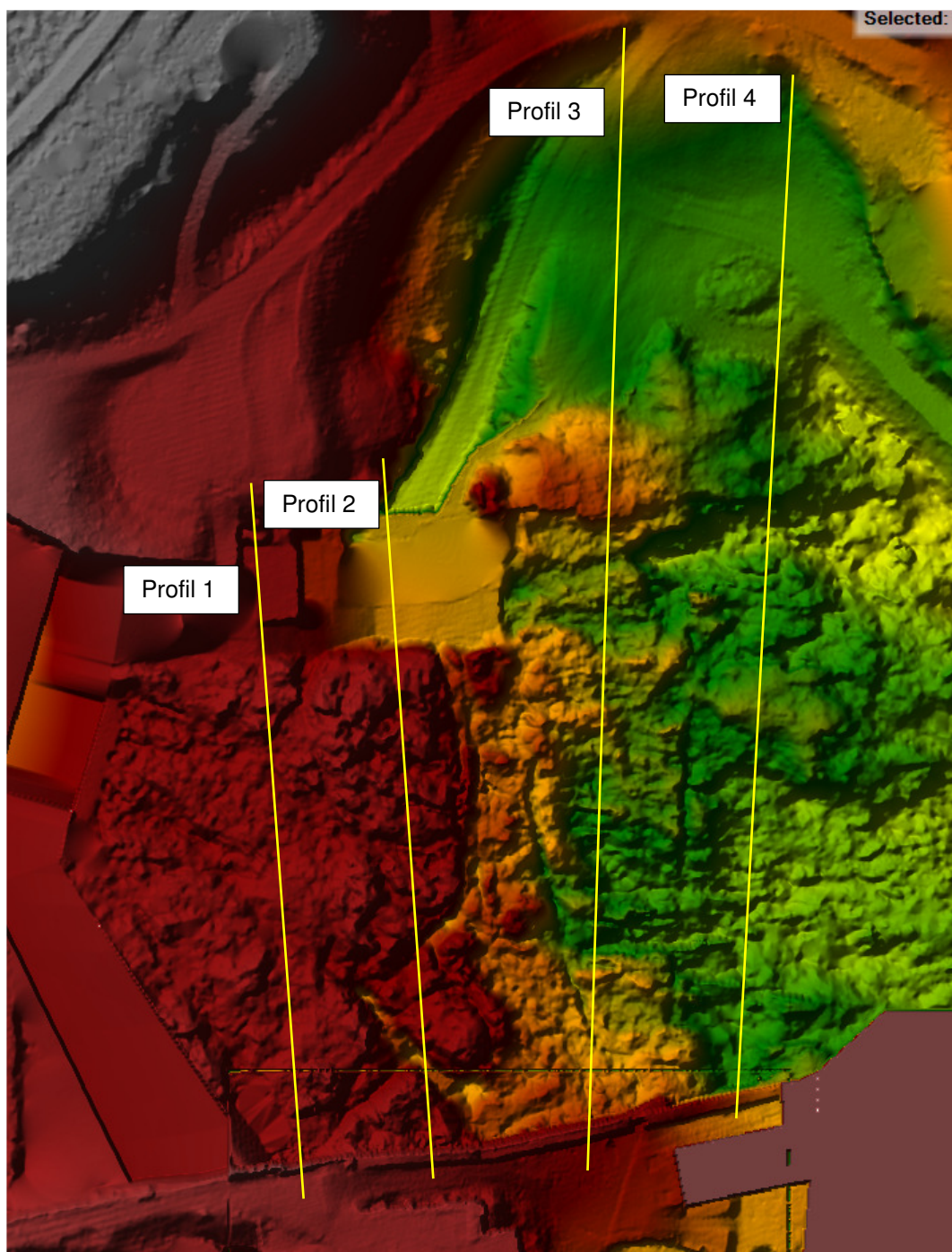
Figur 4-2: Strømningsmønsteret i Ådalselva ved flomvollen, Q_{200}

Figur 4-3 viser vannhastigheter langs flomvollen ved 200 – årsflommen. Vannhastighetene varierer fra ca. 0,2 m/s til 8,0 m/s.

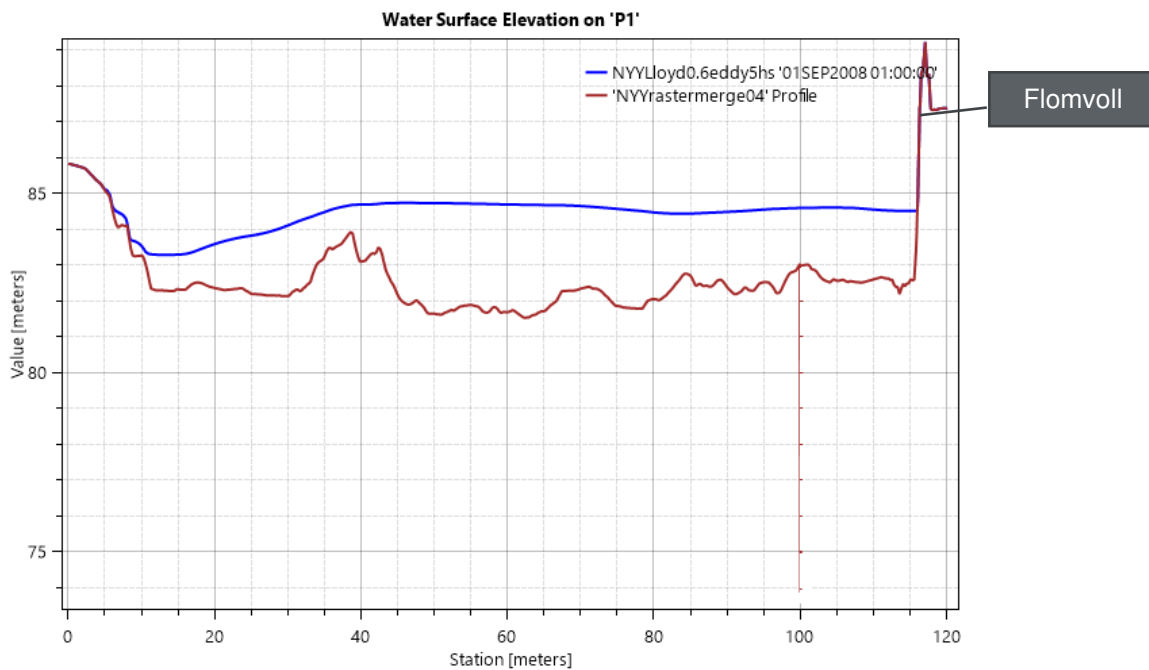


Figur 4-3: Flomsituasjon under en 200-årsflom i Ådalselva ved Lloyds marked: Vannhastigheter

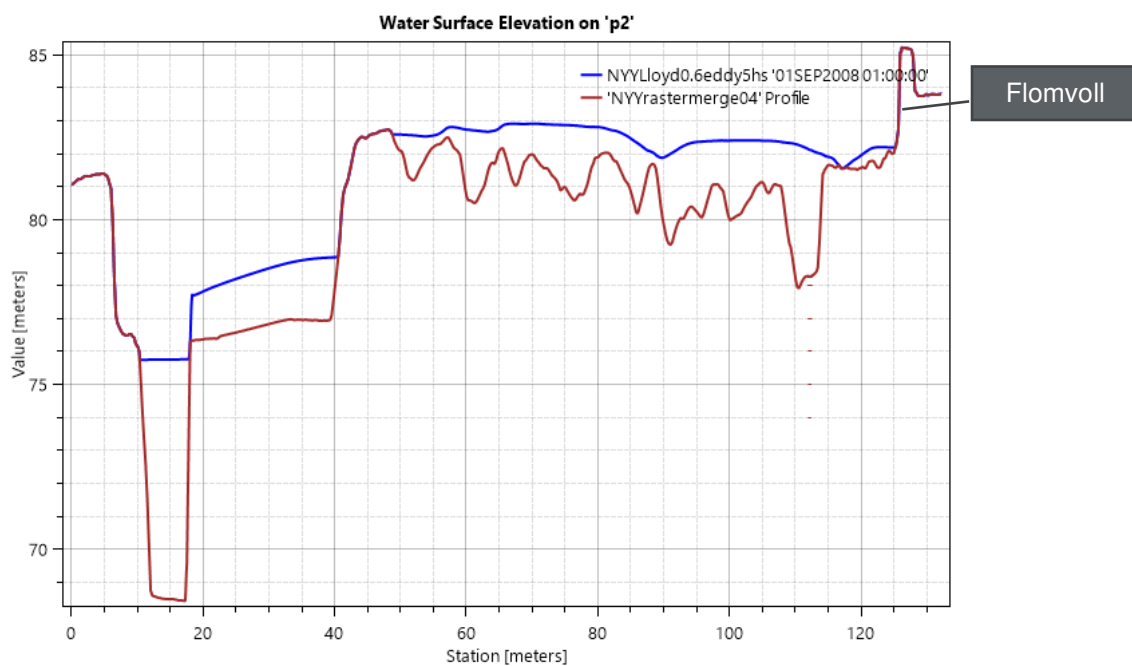
Det vises flomvannstander langs fire profiler langs flomvollen. Plasseringen til profilene er markert i Figur 4-4, mens vannstandene for hvert profil er vist i Figur 4-5 til Figur 4-8.



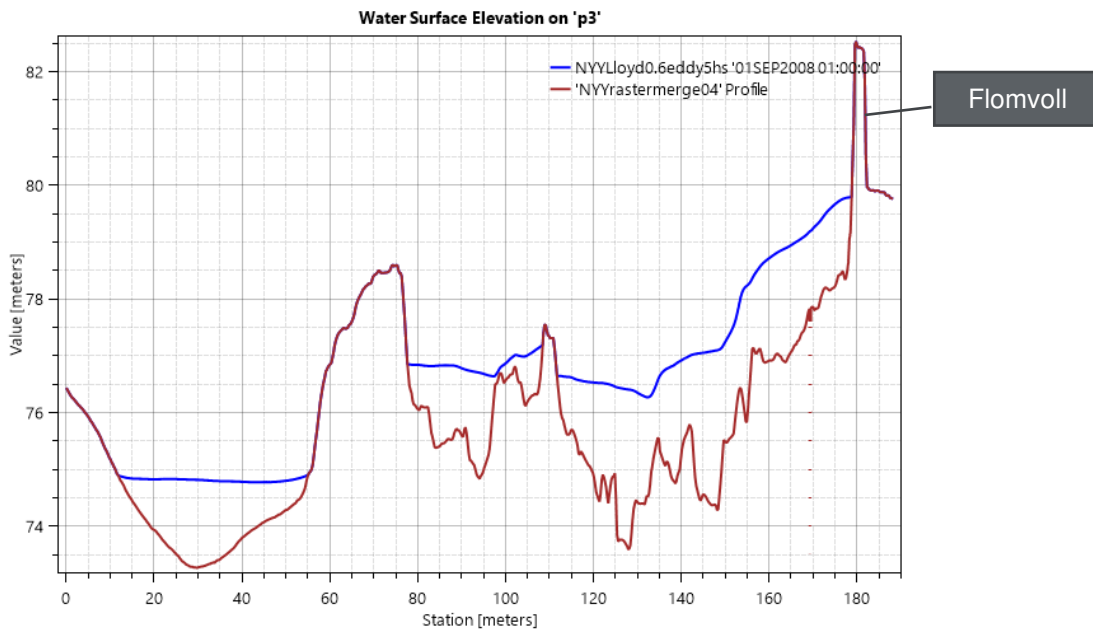
Figur 4-4: Plasseringen til profiler langs flomvallen



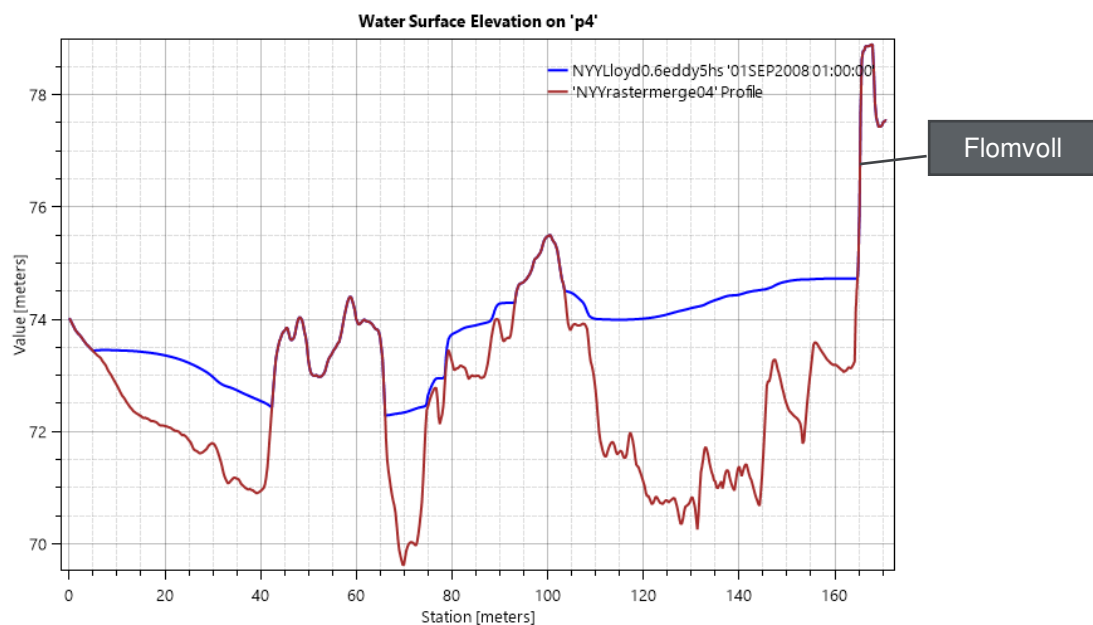
Figur 4-5: Flomvannstand profil 1



Figur 4-6: Flomvannstand profil 2



Figur 4-7: Flomvannstand profil 3



Figur 4-8: Flomvannstand profil 4

4.1.1 Konklusjon

I en todimensjonal modell blir parameterne som vanndybde og -hastighet kun beregnet i to retninger i horisontalplanet. Langs flomvollen kan det oppstå sjokk-/ stående bølger, som krever beregning av vannhastigheter og -dybder i vertikal retning langs flomvollen. For å kompensere mangelen av beregning av parameterne i vertikal retning, er modellen satt opp med en turbulenskoefisient og et Manningstall som er valgt noe på den ugunstige siden. Dette resulterer i lavere vannhastigheter og dermed høyere flomvannstander i elva.

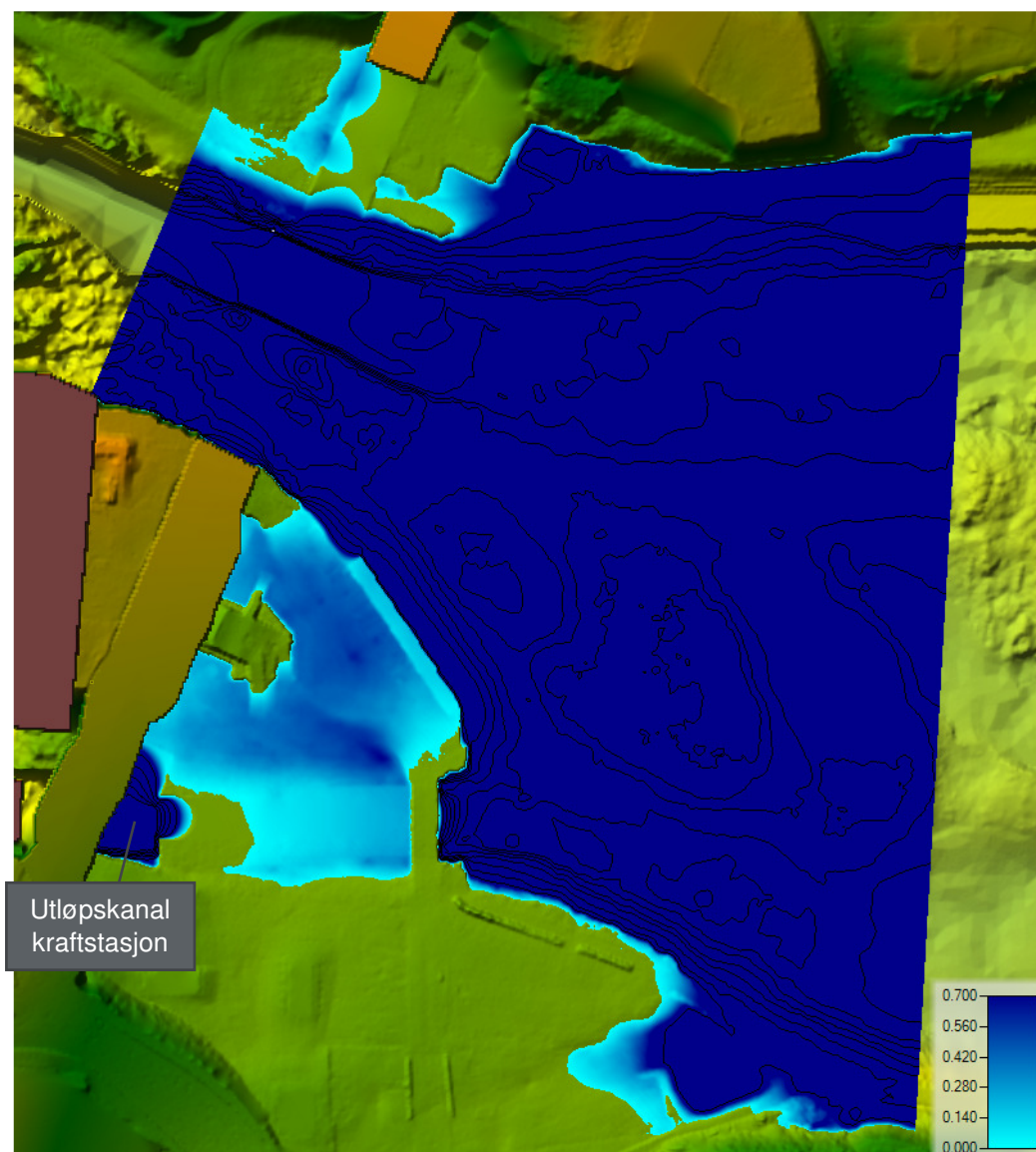
Det kan imidlertid ikke utelukkes at bølger fra Hønefossen kan skylle over toppen av flomvollen. Avhengig av vannmengden (vannstand og -hastighet) som eventuelt kan renne gjennom Lloyd marked, kan det vurderes om bygningene vil være flomutsatt.

På grunn av de ovennevnte begrensninger i HEC-RAS-modellen anbefales det å utføre en mer nøyaktig beregning vha. et tredimensjonalt beregningsprogram.

Det er ikke gjennomført en vurdering av grunnforholdene langs flomvollen. Det forutsettes at flomvollen tåler trykket fra vannspeilet ved en 200 – årsflom og ikke vil bryte sammen og/ eller eroderes bort.

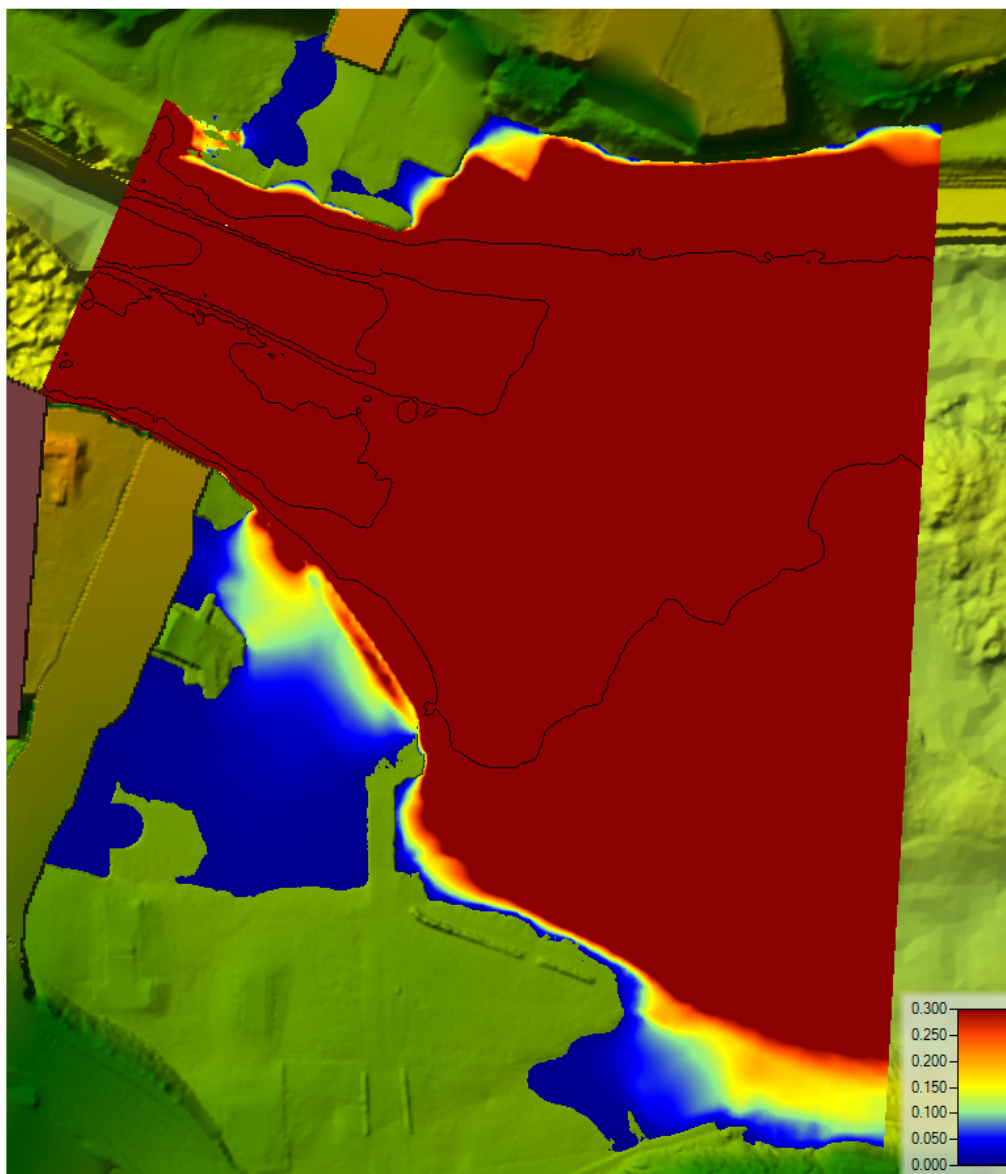
4.2 Tippen

Mellom vannkanten og reguleringsområde Tippen fins det ikke en flomvoll langs elvekanten. Resultatene viser at Tippen blir oversvømt ved en 200 – årsflom, se Figur 4-9. Det er lagd kurver med 1 m ekvidistanse for vanndybde. Maksimal vanndybden langs Tippen er ca. 0,7 m.



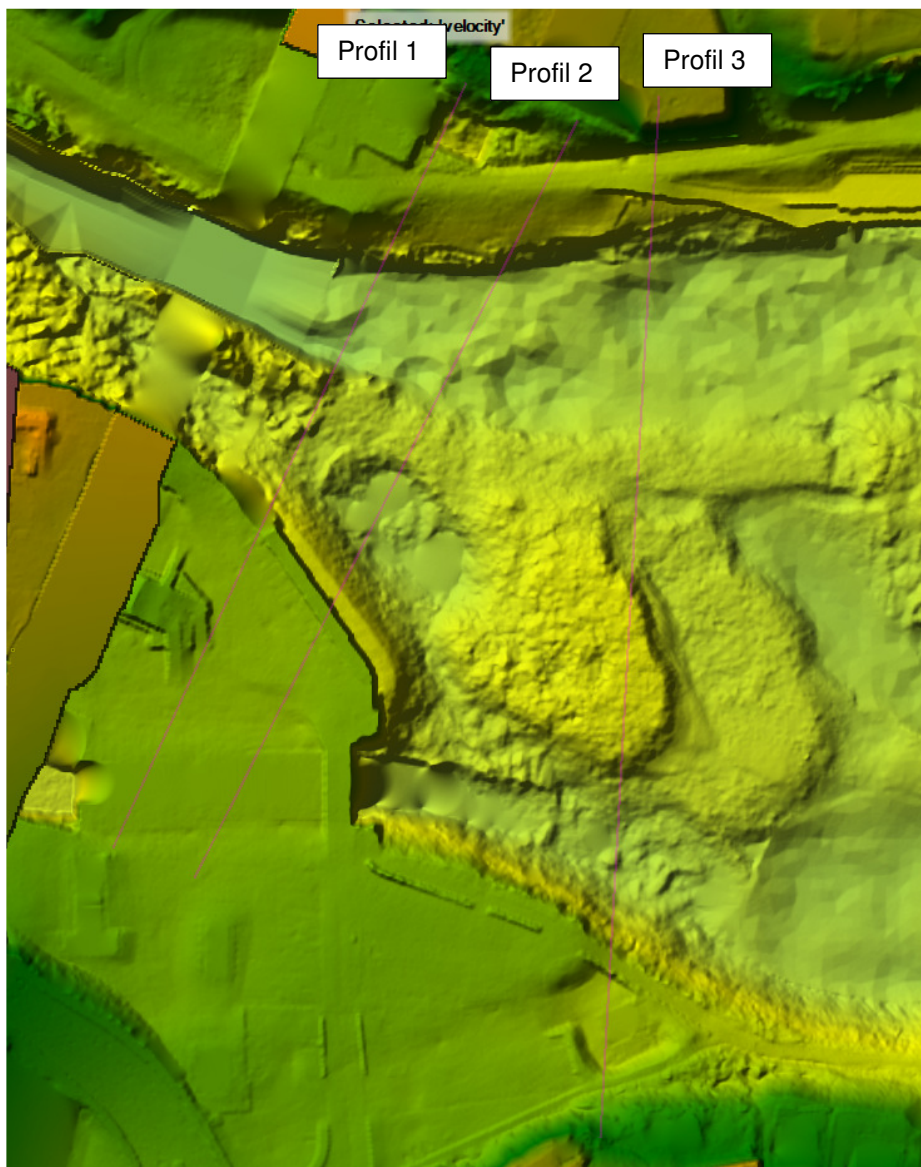
Figur 4-9: Flomsituasjon under en 200-årsflom i Ådalselva ved Tippen: Vanndybde

Figur 4-10 viser vannhastigheter ved Tippen ved 200 – årsflommen. Maksimal vannhastighet ved Tippen er ca. 0,4 m/s. Det er nærmest stillestående vann i søndre delen av Tippen.

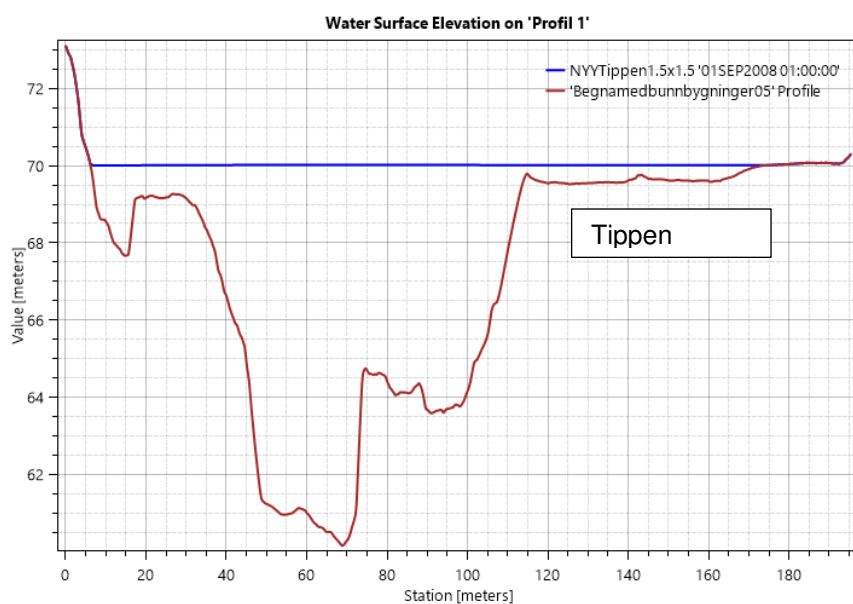


Figur 4-10: Flomsituasjon under en 200-årsflom i Ådalselva ved Tippen: Vannhastigheter

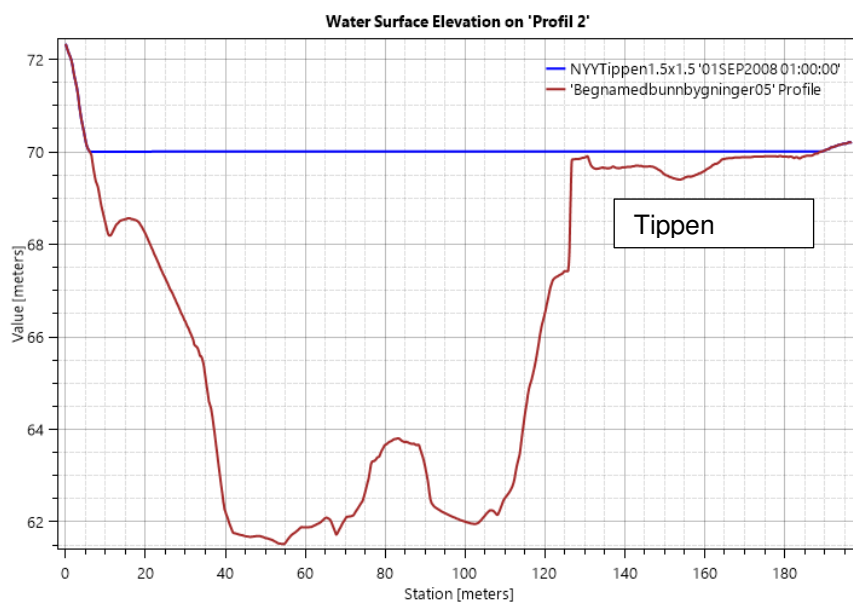
Det vises flomvannstander langs tre profiler langs flomvollen. Plasseringen til profilene er markert i Figur 4-11, mens vannstandene for hvert profil er vist i Figur 4-12 til Figur 4-14.



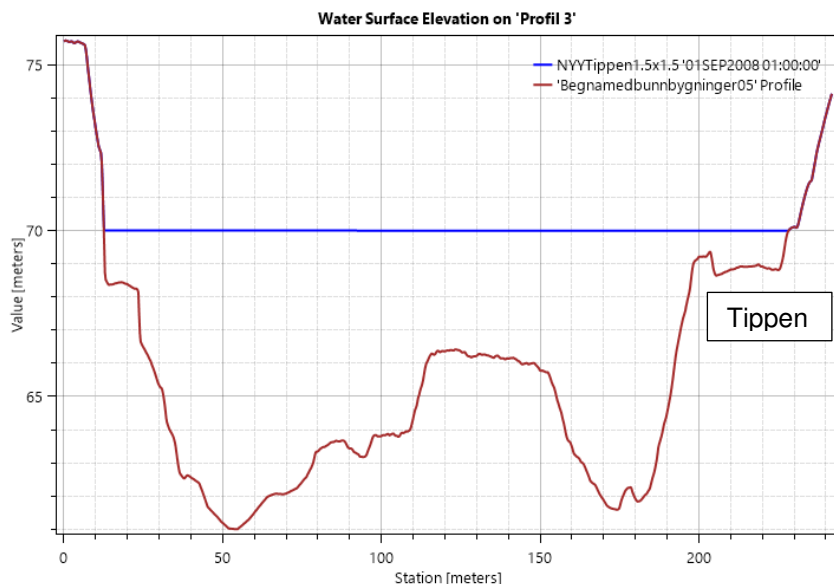
Figur 4-11: Plasseringen til profiler langs Tippen



Figur 4-12: Flomvannstand profil 1



Figur 4-13: Flomvannstand profil 2



Figur 4-14: Flomvannstand profil 3

4.2.1 Konklusjon

Tippen ligger nedenfor Hønefossen. Elveløpet og -slettene er relativt flat. Den todimensjonale modellen som er satt opp i HEC-RAS er godt egnet og nøyaktighetene vurderes til å være tilstrekkelig.

Resultatene viser at Tippen vil bli flomutsatt under en 200 – årsflomsituasjon.

4.3 Usikkerhet

I en vannlinjeberegning tas det bare hensyn til strømning av vann. Det tas ikke hensyn til erosjon og sedimenttransport eller sedimentering, som endrer elveløpet under flom.

I tillegg må det forventes usikkerheter i friksjonsforhold og flomstørrelser.

Terrengmodellen er basert på innmålinger fra fly og inneholder ingen informasjon om kotehøyder under vann. Dessuten vil terrenget i områder med tett vegetasjon, under bruer eller andre overbygg være interpolert som skaper unøyaktigheter i modellen. Elvebunnen ved disse områder er endret i vannlinjemodellen for å skape en mer nøyaktig terrengmodell. Vurdering av elvebunnen er utført vha. flybilder og befaringsbilder.

5 Kilde

- [1] HEC-RAS 5.0.7, US Army Corps of Engineers, www.hec.usace.army.mil/, 2019
- [2] Oppdaterte flomberegninger for dam Hønefossen og Sagdammen, Norconsult, 2016
- [3] Flomsonekart Delprosjekt Hønefoss, NVE, 2003

Vedlegg 2 - Vannstand langs og laveste anbefalt nivå på ledemur

Se neste side.

Beregnet vannlinje langs ledemur og laveste anbefalt nivå for ledemur

