

Hydraulisk analyse av utfylling og erosjonssikring i Ottavassdraget ved Otta jernbanebru

Oppdragsnavn **Otta Jernbanebru**
Prosjekt nr. **RNO2023N01002**
Kunde **Bane NOR**
Notat nr. **01/172.2.2024**
Versjon **03**
Til
Fra **Per Ludvig Bjerke**
Kopi **[Name]**

Utført av **Per Ludvig Bjerke**
Kontrollert av **Geir Vatne**
Godkjent av **Aslak Flore**

Dato

1 Innledning

Dovrebanen krysser Ottavassdraget ved Otta like før samløpet med Gudbrandsdalslågen (Figur 1). Jernbanebrua ble bygget i 1879.

Under uværet Hans i august 2023 fikk mange vei og jernbanebruer erosjonsskader, og Randklev jernbanebru i Ringebu kollapset. Som en oppfølging ble også elvebunnen ved Otta jernbanebru skannet i september 2023 for å se etter erosjonsskader. Skanningene viste at det har vært betydelig erosjon i hele elveprofiler og rundt begge brupilarene. Elvebunnen i Ottavassdraget ved Otta er senket over tid som et resultat av flere flommer. Trolig har ikke elvebunnen vært lavere enn dagens situasjon siden jernbanebrua ble bygd.

Rambøll
Kobbegate 2
PB 9420 Torgarden
N-7493 Trondheim

T +47 73 84 10 00
<https://no.ramboll.com>



Figur 1. Utsnitt av samløpet mellom Otta og Lågen med plassering av Otta jernbanebru markert med oransje sirkel.

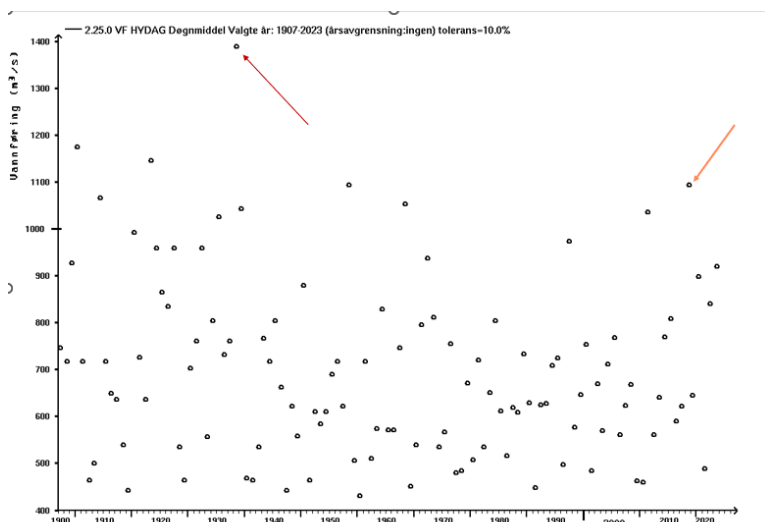
Det er behov for å få reetablert brupilarenes stabilitet ved å legge fylling rundt pilarene. Siden fyllingen hever elvebunnen lokalt, vil fyllingen og områdene rundt bli utsatt for ekstra strøm- og skjærkrefter, og tiltaket kan medføre vannstandsendringer. Det er utført beregninger av 200 års flom uten klimapåslag, som er brukt som input i en hydraulisk simulering. For anleggsveiene er simuleringene kjørt for dimensjonerende 10 års flom som er beregnet for planlagt anleggsperiode 01.02-15.04.

Dette notatet presenterer resultatene fra flomberegningene og de hydrauliske simuleringene. Endringene i vannhastighet, vannstand og skjærstress som et resultat av anleggsveier og fyllinger i byggefasen, og for permanent situasjon for fyllingen rundt pilarene er kvantifisert. Basert på disse simuleringene er det beregnet steinstørrelser for erosjonssikring av tiltaket.

2 Om vassdraget og vassdragets hydrologi

Ottavassdraget oppstrøms jernbanebrua har et nedbørfelt på 4061 km² og en feltlengde på 124 km (Vedlegg 1). Nedbørfeltet er dominert av snaufjell (69%) og skog (17%) og en relativt høy andel bre (5%). 50% av nedbørfeltet ligger over 1300 moh. Normalavrenningen er angitt til 26,4 l/s*km² (nve.nevina.no). Det er fire reguleringsmagasin i Ottavassdraget som påvirker vannføringen. Målestasjon 2.25 Lalm, som ligger nederst i vassdraget, er påvirket av alle reguleringene og har reguleringsgradsareal på 0,33 og reguleringsgradmagasin på 0,14 (NVE, 2015).

Ottavassdraget er dominert av vårflommer på grunn av snøsmelting i fjellet. Store flommer har vanligvis forekommet i perioden mai – september (Varsom.no). De største kjente flommene i nedre del av Ottavassdraget er fra 1789 hvor flommen er anslått til å ha vært 1648 m³/s, og i 1860 til 1585 m³/s (varsom.no). Det er utført vannføringsmålinger i Otta ved Lalm siden 1907 (Figur 2). Den største flommen registrert i denne perioden var en regnflom i august/september 1938 (rød pil) som i er beregnet til å være en 200 års flom. Otta jernbanebru klarte seg bra under denne flommen (Figur 3). Til sammenligning viser oransje pil i (Figur 2) nivået på regnflommen i oktober 2018.



Figur 2. Største årlig døgnmiddelflom ved målestasjon Lalm i Ottavassdraget (NVE HYDRA II).



Figur 3. Otta jernbanebru under flommen 1938

(https://www.selhistorie.no/otta/vannet_stod_hoyere_under_flommen_i_1938.html).

NVE oppdaterte i 2015 flomberegningene for Gudbrandsdalsvassdraget (NVE, 2015). Etter at NVE oppdaterte flomberegninger har det vært to større flommer, i oktober i 2018 som spesielt rammet de øvre delene av Ottavassdraget, og flommen Hans i august 2023. Det er kjørt nye flomfrekvensanalyser for Otta for å se om flommene i 2018 og 2023 endrer flomberegningene fra 2015. For stasjon Lalm eksisterer døgndata fra 1907 og timesdata fra 1986. Det er kjørt analyse av alle dataseriene. Flomverdiene for flommen Hans i Hydra II er ikke kvalitetssikret, så det er kjørt analyser både på den kvalitetssikrede serien til og med 2022 og på serien Complete som inkluderer data fra 2023 som ikke er kvalitetssikret. Resultatene fra disse analysene er vist i Tabell 1, og analysene fra Hydra II i vedlegg 2. Grunnlaget ansees som veldig bra. Siden både HYKVAL og COMPLETE er serier basert på timesdata skal det ikke legges på kulminasjonsfaktor. Merk da at for analysene for serien HYDAG er det ikke lagt på en kulminasjonsfaktor som i NVE (2015) er beregnet til 1,07. Inkludering av flommene etter 2015 endrer ikke beregnede flomverdier for Ottavassdraget (Tabell 1).

Tabell 1. Beregnede flomverdier for Otta ved jernbanebrua. Alle flomverdiene er ganget med en faktor på 1,01 for å ta høyde for arealet mellom målestasjonen ved Lalm og Otta by, som beskrevet i flomberegningene fra NVE (2015). Serien Otta_NVE er hentet fra NVE (2015) og de tre andre dataserier fra Hydra II. Hydag_Dag er døgnmiddelflom for perioden 1907-2022, HYKVAL er timesdata for perioden 1986-2023, og COMPLETE (1986 – 2023) er en serie med timesdata som også inneholder data som ennå ikke er kvalitetssikret

	Q _M	Q ₅	Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₂₀₀	Q ₅₀₀	Q ₁₀₀₀
Otta_NVE	674	796	895	990	1113	1283	1390	1530	1637
HYDAG_dag	699	838	949	1054	1193	1296	1400	1542	1652
HYKVAL_time	696	829	937	1043	1182	1288	1395	1539	1649
COMPLETE_time	697	830	937	1042	1181	1286	1392	1535	1645

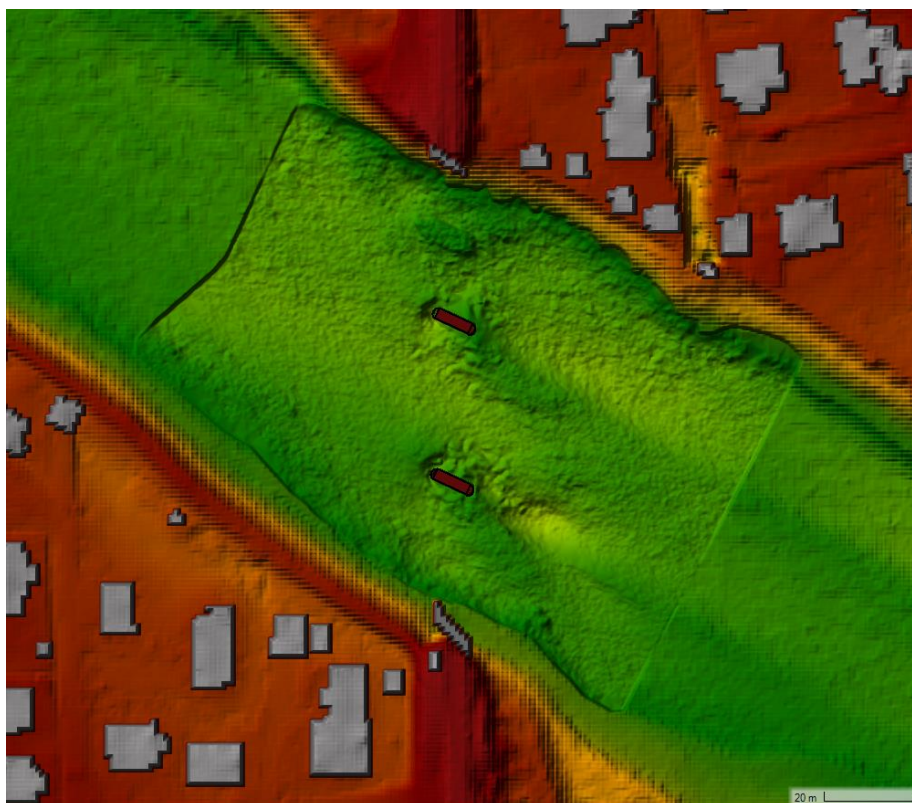
Det er anbefalt at det legges på et usikkerhetspåslag (F_u) både på flomberegninger og på resultater fra hydrauliske simuleringer (NVE, 2022). Siden det hydrologiske grunnlaget er vurdert som godt, og den hydrauliske modellen er kalibrert, er det valgt å legge på et usikkerhetspåslag på 5% som er det samme som valgt av Norconsult (2024).

Det er også utført flomberegning for planlagt byggeperiode fra 01.02.-15.04 i NVE sitt HYDRA II (Vedlegg 3). Disse analysene er utført på timesdata fra målestasjon ved Lalm og det er lagt il en faktor på 1% på beregnet flomstørrelse ihht NVE (2015). Resultatet av flomberegninger for anleggsperioden gir en 10 års flom på 98 m³/s.

3 Hydraulisk simulering

Simuleringen ble utført med HEC-RAS 6.4.1. Det ble bygd opp en terrengmodell basert på data gjort tilgjengelig fra regionplan Lågen (Regionplan Lågen, 2017) basert på skanning av elvebunn fra 2015.

Det er i tillegg benyttet data fra bunnkartlegging utført av ScanSurvey i slutten av september 2023. Bunnen ble kartlagt i en total lengde på 120 m med varierende avstand brua da denne krysser Ottavassdraget på skrå. Det skannede området vises i Figur 4 og overgangen mellom det skannede området og gammel elvebunn vises tydelig.



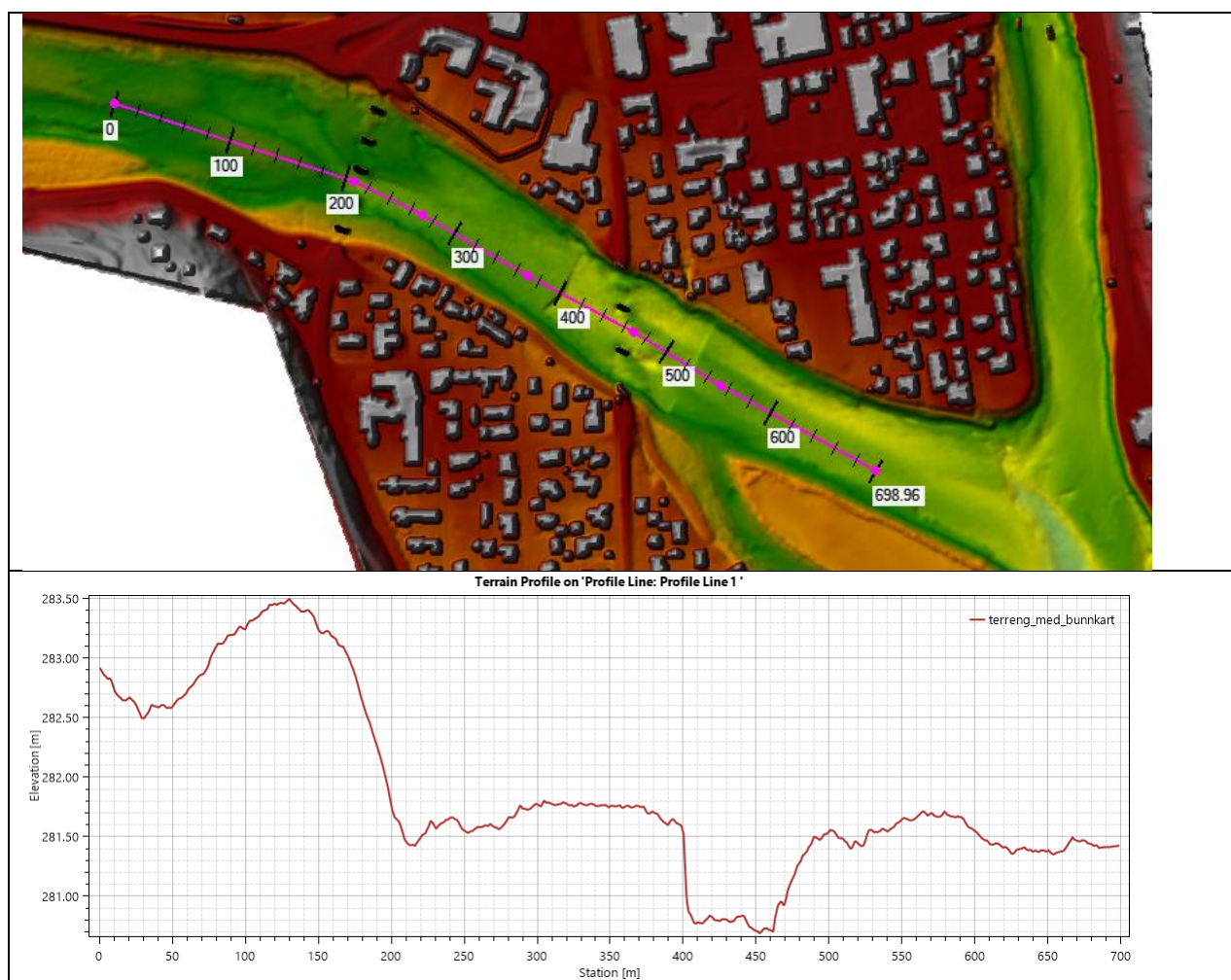
Figur 4. Området som ble bunnkartlagt sees i elva avgrenset med et høyere detaljnivå.

Data fra den nye bunnkartleggingen er av god kvalitet, og viser betydelig erosjon rundt brupilarene siden bunnen sist ble kartlagt i 2016. I oppstrøms ende av det nylig skannede området er forskjellen mellom ny og gammel elvebunn opp til 1 m. Dette viser tydelig på figur 5 som viser høyden av elvbunnen nedover elva fra veibru og ned forbi jernbanebrua.

Trolig har flommenene i 2018 og Hans i 2023 forårsaket mye av denne bunnsenkingen/erosjonen. Det ble planlagt bunnkartlegging for områder både lengre oppstrøms og nedstrøms det skannede området, men det lot seg ikke gjennomføre på grunn av en langvarig kuldeperiode med utstrakt dannelse av bunnis.

Mangelen på nye bunnskanninger medfører usikkerhet i simuleringer av effekten av tiltakene samt reel flomhøyde i Ottavassdraget. Spesielt vil en lavere elvebunn nedstrøms jernbanebrua kunne endre resultatet da elvas tverrprofil her er bestemmende for vannstand oppstrøms forbi jernbanebrua.

Det er manuelt lagt inn nytt og høyere terreng i Hec-Ras modellen for området på nordsiden av elva mellom veibru og jernbanebru. Dette området er hevet etter 2016 og ble også beskrevet og lagt inn av Norconsult i sin modell.



Figur 5. Høyden av bunnen fra veibru ned forbi jernbanebrua. Brua ligger på station 450.

For å reetablere stabiliteten til pilarene er det testet flere løsninger, både en terskel på tvers av elva under brua og sirkulære fyllinger rundt pilarene. En terskel viste seg å være en ugunstig løsning med hensyn på hydraulikk, og ble tidlig forkastet.

Oppfylling med erosjonssikring rundt pilarene er utformet av geotekniker i Rambøll i og lagt inn i terrengmodellen i HEC-RAS. Pilarer er lagt inn i modellen basert på brutegninger og bunnskanningen. Anleggsveiene er lagt inn i samråd med entreprenør. I simuleringene er veiene lagt i flomsikker høyde, dvs med fribord på 0,5 m beregnet ut fra en 10 års flom for anleggsperioden.

Det ble brukt 2D versjon av HEC-Ras med gridstørrelse 2 m. For området rundt pilarene ble det brukt finere grid på 1 m via "Refinement" modusen i HEC-RAS. Simuleringene utført med SWE-ELM løsningen av ligningene og tidsoppløsningen er 1 sekund. Det er brukt normalstrømning som nedre grensebetingelse.

3.1 Kalibrering/Tilpasning av hydraulisk modell

Kalibrering av den hydrauliske modellen bygger på data fra Norconsult (2024) som gir flomverdier fra Hans samt innmålinger av vannlinjer både ved veibru og jernbanebru over Otta. Ved kjøring av vår modell for $n=0,03$ og $995 \text{ m}^3/\text{s}$ i Otta og $505 \text{ m}^3/\text{s}$ i Lågen gir dette vannstand nedstrøms jernbanebrua lik målt verdi og lik verdien simulert av Norconsult (Tabell 2, Figur 6). Målepunktene for vannstand er noe uklart angitt i Norconsult (2024) så våre målepunkter kan avvike noe fra dette.

Tabell 2. Kalibrering av hydraulisk modell.

	Målt verdi	Norconsult	Vår verdi $n = 0.03$
Jernbanebrua	285,69	285,69	285,69

Figur 6. Vannstand simulert for flomhendelsen Hans og med ruhet $n=0.03$. Tallet i figuren viser simulert vannstand nedstrøms jernbanebrua.

Selv om resultatene er like med Norconsult for flomverdiene fra Hans, så er vannstandsverdiene for 200 års flommen i vår beregning betydelig lavere enn Norconsult sine. Det er ikke helt klart hva dette skyldes. Begge er kalibrert for Hans, mens Norconsult har kommet frem $n=0.035$ mens vi har kommet til $n= 0.03$. Hva forskjellen skyldes er ikke avklart. Som nedre grensebetingelse bruker de vannføringskurven gitt 2 km nord for Sjoa. Og antar oppstuvning fra jernbanebru på Sjoa. Dette kan også gi en høyere vannstand. De har også lagt inn et ekstra falltap for bruene i Otta som også bidrar til oppstuvning.

4 Resultat av simuleringene.

Det er kjørt simuleringer både for å se på effekten av anleggsveier og fyllinger i anleggsperioden (1 februar til 15 april 2024), og for å se på effekten ved en permanent situasjon med stabiliseringsfyllinger rundt pilarene, og med terskel på tvers av elva. Simuleringene med en sammenhengende terskel på tvers av elva hadde uheldige/store effekter på hastighet og skjærspenning på nedstrøms side av terskelen, samtidig som det førte til en vannstandsøkning oppstrøms terskelen. Denne løsningen ble derfor tidlig forlatt, og det ble valgt å gå for ovale fyllinger rundt hver pilar.

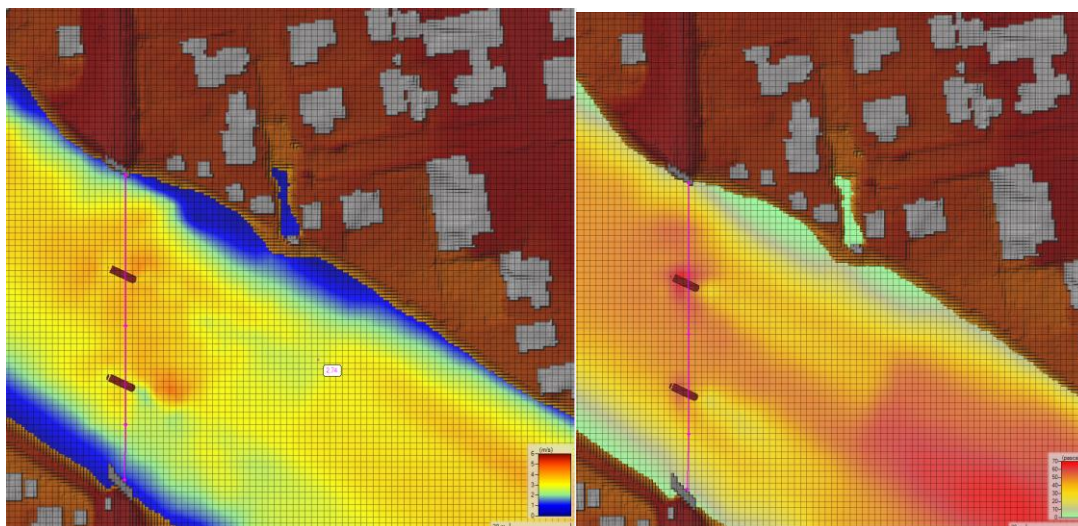
For anleggsperioden er simuleringene kjørt med en flom lik $98 \text{ m}^3/\text{s}$ som tilsvarer en 10 års flom for perioden (vedlegg 3). Resultatene er sammenlignet med verdiene for middelflom beregnet for hele året, men uten tiltak i elva. Dette for å kunne vurdere effekten av anleggsfasen på elvemiljøet.

For den permanente utfyllingen er det i tillegg kjørt simuleringer for vanlig vintervannføring ($43 \text{ m}^3/\text{s}$) for å se på effekten av tiltaket ved lavvannføring.

For alle simuleringene framkommer sprang i alle verdier for hastighet og skjærspenning i overgangen mellom ny og gammel skanning av elvebunnen, både oppstrøms og nedstrøms brua. Disse sprangene er ikke reelle og ville ha forsvunnet om man hadde ny skanning over en lengre del av elvebunnen.

4.1 Simulering av middelflom for referanseverdier på dagens situasjon

Ved middelflom på $674 \text{ m}^3/\text{s}$ viser simuleringene at hastighetene med elvebunnen fra høsten 2023 uten tiltak i elva vil variere fra $3,5 \text{ m/s}$ til opp i $4,6 \text{ m/s}$ i området rundt brua. Skjærspenningene varierer rundt 50 N/m^2 med noe høyere verdier (66 N/m^2) rundt den nordlige pilaren



Figur 7. Hastighet (tv) og skjærspenning i elva (th) ved middelflom (Q_m) på $674 \text{ m}^3/\text{s}$. Brupilarer og rosa linje viser bruas beliggenhet.

4.2 Første trinn – Anleggsvei fra nord og utfylling rundt nordre pilar.

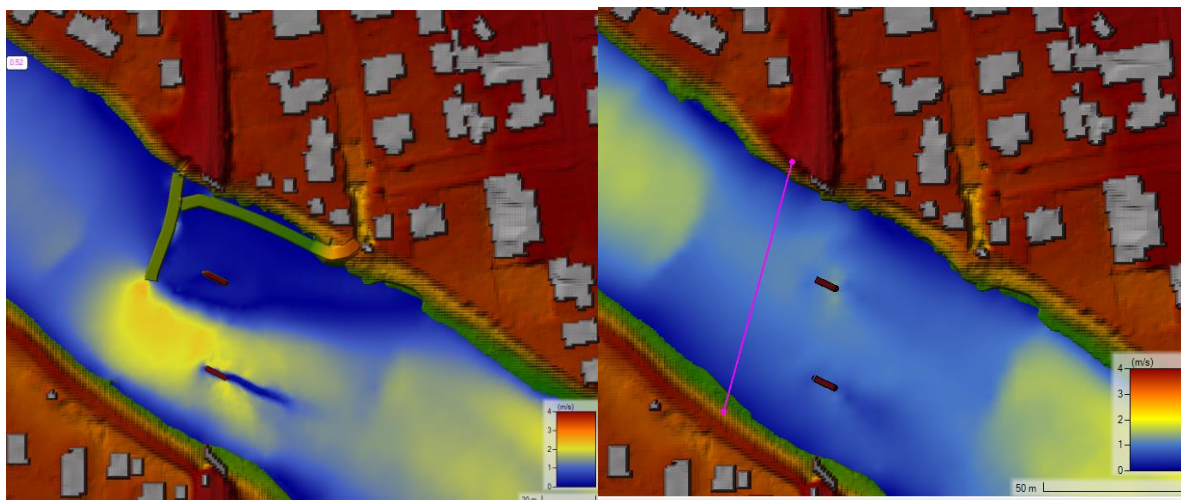
Utfyllingen er planlagt startet fra nord med utbygging av anleggsvei som beskytter anleggsområdet og påfølgende utfylling rundt den nordlige pilaren. Denne rekkefølgen ble valgt da simuleringene av middelflom viste at det var størst hastighet og størst skjærspenning på nordsiden.

Figur 8 viser hastighet for en 10 års flom for anleggsperioden med vannføring på $98 \text{ m}^3/\text{s}$ med og uten anleggsvei fra nord og utfylling rundt den nordlige pilaren.

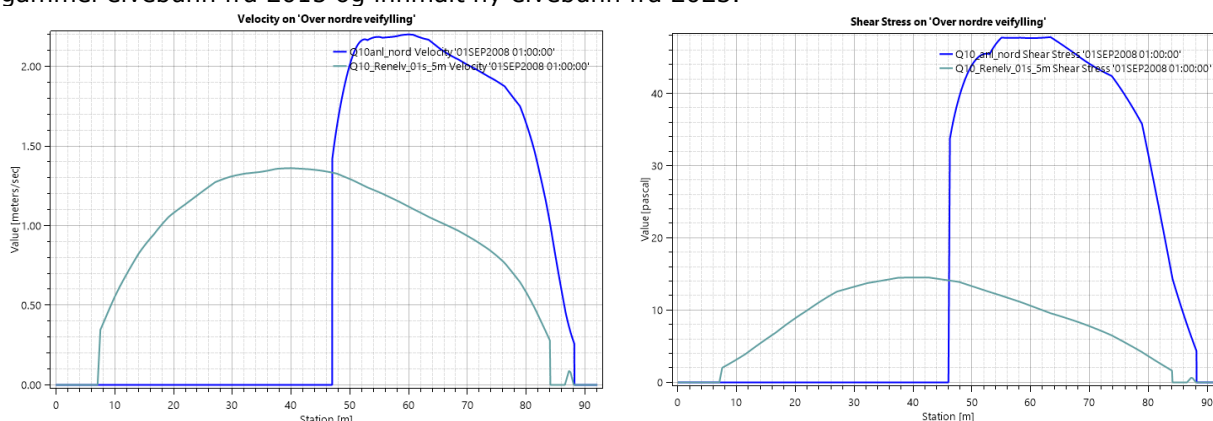
Hastighetene er i hovedsak lave også ved en utfylling, men utenfor hjørnet på anleggsveien blir hastigheten opp mot $2,4 \text{ m/s}$. Lokalt nedstrøms fyllinga har man hastigheter opp mot $3,5 \text{ m/s}$. Fordelingen av hastigheter og skjærspenninger varierer, og viser en sterk økning i verdiene ved og rett nedstrøms innsnevringen (Figur 9). Verdiene vurderes ikke som spesielt høye, og skjærspenningen når

en maksimalverdi rett i underkant av 50 N/m^2 rett oppstrøms den sørlige pilaren. Dette er i samme størrelsesorden som oppstår under en middelflom i vassdraget uten anleggsvei.

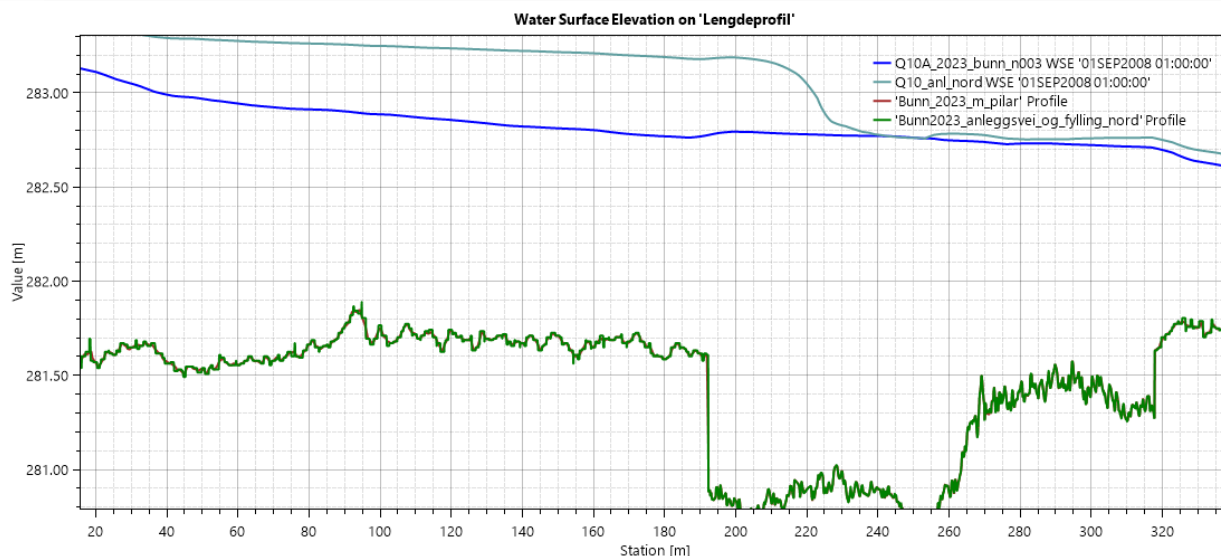
Det blir en endring i vannstand med anleggsvei (Figur 10). Flomnivå ved 10 års flom rett oppstrøms anleggsveien stiger med i underkant av 40 cm på det meste og avtar oppstrøms. Rett oppstrøms anleggsveien blir flomnivå 283,1. Med fribord på 50 cm som sikkerhet settes flomsikker høyde for den nordlige anleggsveien lik 283,6 moh.



Figur 8. Vannhastigheter med anleggsvei og med fylling rundt nordlige pilar (tv) og uten fylling (th) i Ottavassdraget ved vannføring på $98 \text{ m}^3/\text{s}$ (10 års flom for perioden). De økte hastighetene et stykke oppstrøms og nedstrøms brua skyldes at det oppstår et sprang i elvebunnen på 0,4 til 1,0 m mellom gammel elvebunn fra 2015 og innmålt ny elvebunn fra 2023.

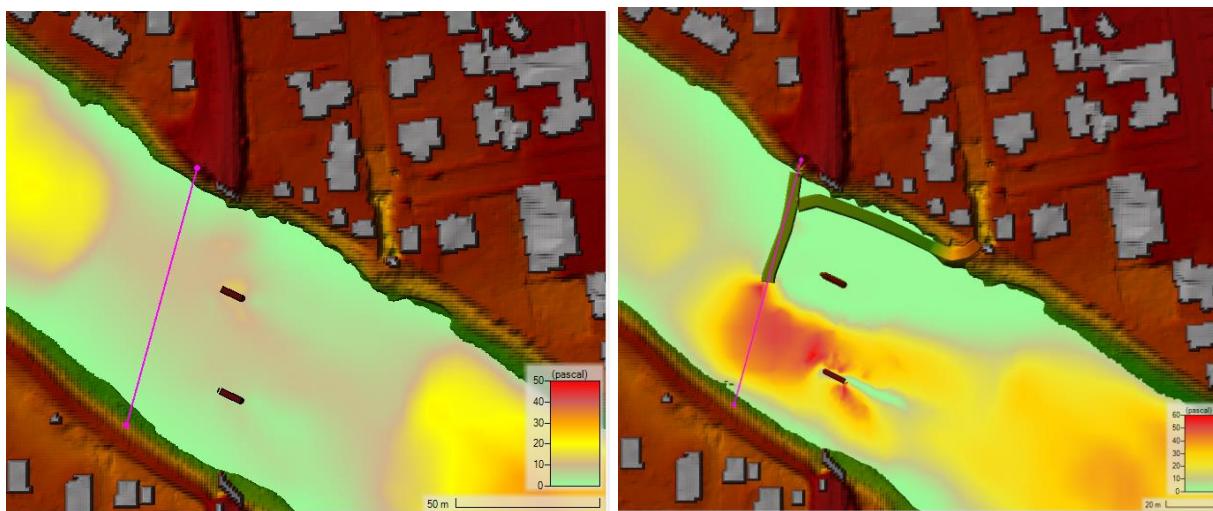


Figur 9. Hastighet (tv) og skjærspenning (th) langs et tverrprofil av elva over den planlagte anleggsveien fra nord ved 10 års flom med utfylling (mørk blå) og uten utfylling (grønn). Profilet er angitt som rosa linje i Figur 8.



Figur 10. Endring i vannstand i en lengdeprofil av elva rett sør for den planlagt anleggsveien fra nord ved 10 års flom beregnet for anleggsperioden.

Skjærspenningen er en av faktorene som beskriver erosjonsfaren. Andre faktorer er helning av bunnen, steinstørrelse, og hvordan steinene ligger i forhold til hverandre. Figur 11 viser skjærspenninger for 10 års flom for anleggsperioden for den nordlige anleggsveien. Anleggsveien fører til innsnevring og øker skjærspenningen lokalt til noe under 50 N/m², som er lavere enn det som oppstår ved middelflom i elva uten fylling.



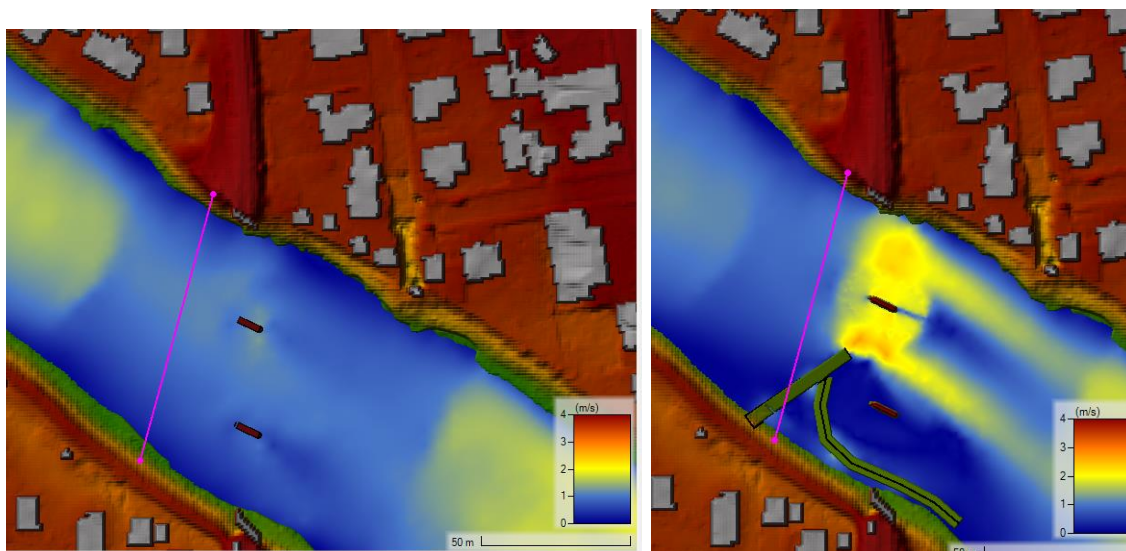
Figur 11. Romlig endring i skjærspenning i elva uten anleggsvei (tv) og med (th) ved 10 års flom på 98 m³/s.

4.3 Andre trinn – Anleggsvei fra sør og utfylling rundt søndre pilar.

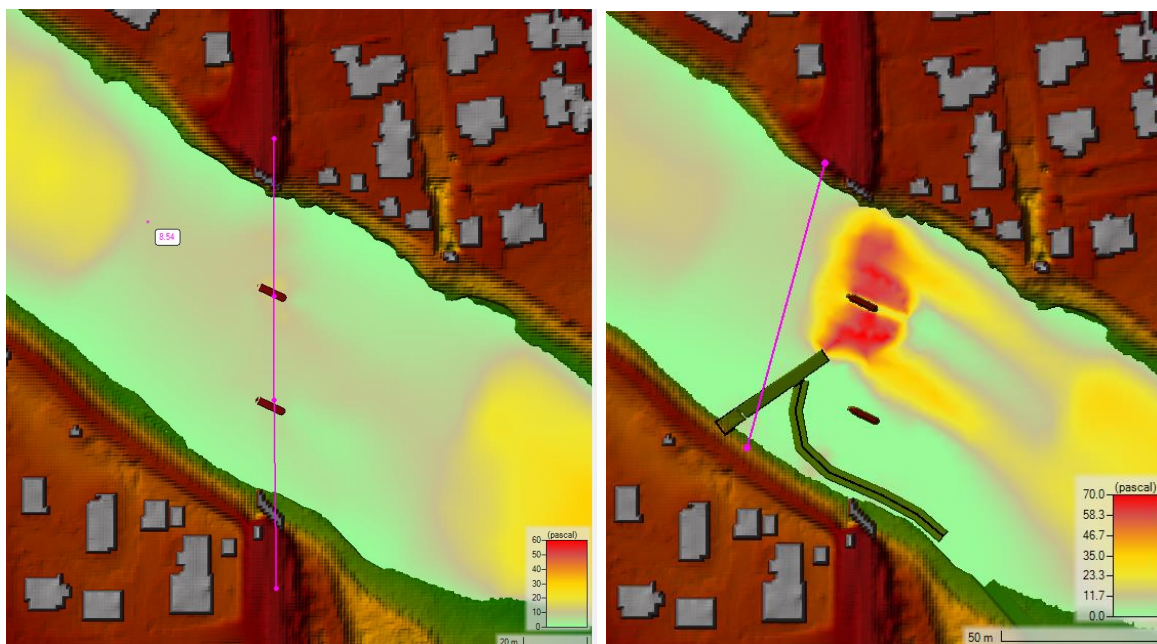
For andre trinn i anleggsperioden er fyllingen omkring den nordlige pilaren allerede på plass når anleggsveien fra sør bygges, og den er ferdig erosjonssikret. Figur 12 viser hastighet for en 10 års flom for byggeperioden med vannføring på 98 m³/s med og uten anleggsvei fra sør og utfylling rundt begge pilarene i elven. Simuleringene viser økte hastigheter rundt fyllingen i nord med maksimale hastigheter

lokalt opp mot 2,7 m/s over fyllingen og i elveløpet nord for den nordlige fyllingen. Det blir og noe økte hastigheter i forsenkningene i elvebunnen nedstrøms brua. Både hastighet og skjærspenning øker over fyllingen som et resultat av innsnevringen av elveløpet. Dette utgjør ikke noe fare da fyllingen allerede er erosjonssikket og dimensjonert for mye høyere verdier. Heller ikke i denne situasjonen overstiges de verdier som oppstår i elva ved en middelflom uten tiltak.

Det blir en endring i vannstand i den nordlige delen for det samme tverrsnittet med og uten fylling. Flomhøyde ved en 10 års flom for anleggsperioden blir 282,7 moh. Med 0,5 meter fribord blir flomsikker høyde 283,2 moh. Hastigheten i et tverrprofil langs brua når en maksimalverdi på noe i overkant av 2,5 m/s og skjærspenningen er størst (over 60 N/m²) på toppen av fyllingen.



Figur 12. Vannhastigheter uten fylling (tv) med anleggsvei og med fylling rundt sørlige pilar (th) ved vannføring på 96 m³/s (10 års flom for perioden). De store områdene med økte hastigheter oppstrøms og nedstrøms brua skyldes at den oppmålte elvebunnen fra 2023 er mellom 0.5 og 1m lavere enn elvebunnen innmålt i 2017.



Figur 13. Skjærspenning i elva uten fyllinger (tv) og med fyllinger (th) ved 10 års flom på $98 \text{ m}^3/\text{s}$.

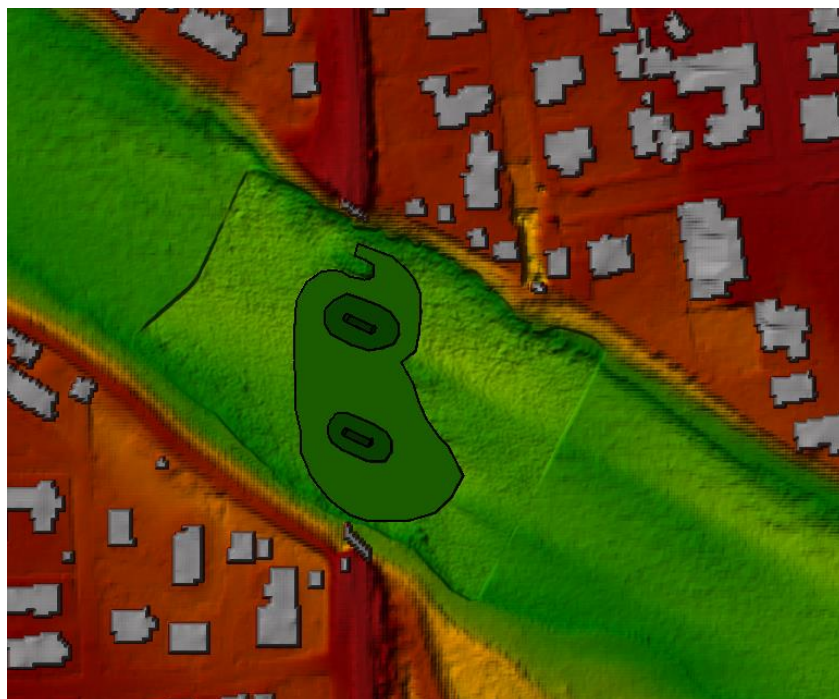
4.4 Permanent situasjon med erosjonssikring rundt brupilarene

Det er kjørt simuleringer for flere ulike vannføringer for å se på endringer i vanndybde, vannhastighet og skjærspenning for permanent situasjon etter utfylling rundt pilarene. Brua har begrenset gjenværende levetid og det er etter anbefaling fra NVE kjørt simuleringer for en 200 års flom uten klimapåslag. Dette er ca. $200 \text{ m}^3/\text{s}$ høyere vannføring enn 20 års flom med klima som er den laveste vannføringen Norconsult (2024) har kjørt sine beregninger for.

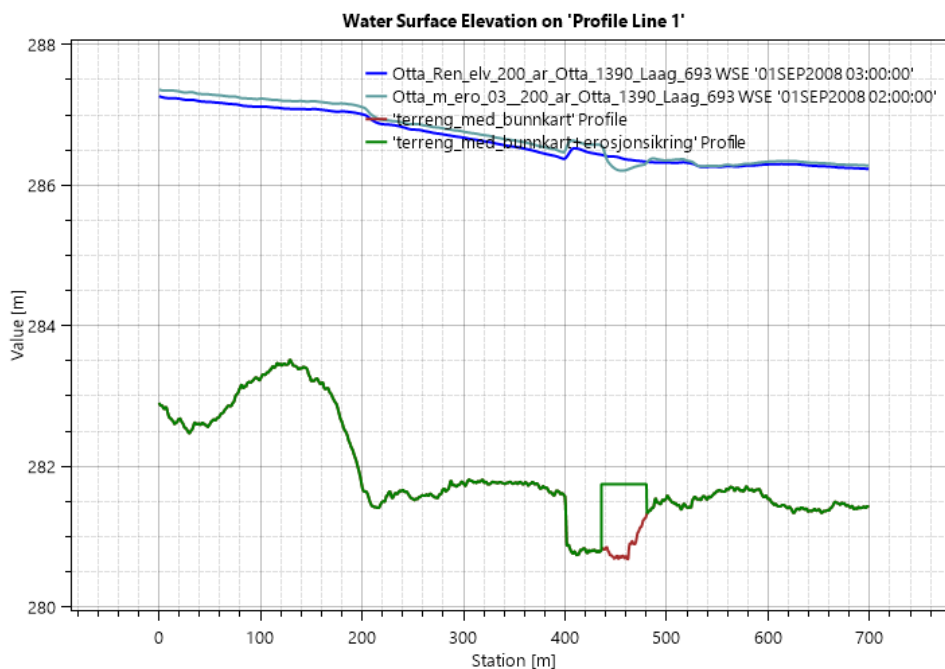
I første runde ble det kjørt med fyllinger som var bygd opp til samme høyde som elvebunnen var når brua ble bygd. Dette ga økte vannhastigheter rundt fyllingen, som utløste behov for erosjonssikring rundt disse og nedenfor brua. Samlet ga tiltaket for store utfordringer med flom i Otta og det ble bestemt å se på en redusert løsning. Der reduserer man de store fyllingene rundt pilarene og i stedet erosjonssikrer et større område utenfor pilarfyllingene. Det plastres rundt pilarene med ett lag med stein med 0.8 m og 5 m ut fra pilaren (Figur 14). Utenfor dette erosjonssikres et området med stein av størrelse minimum 0.5 m og det er dette som simuleres i modellen.

Effekt av tiltaket ved 200 års flom uten klimapåslag.

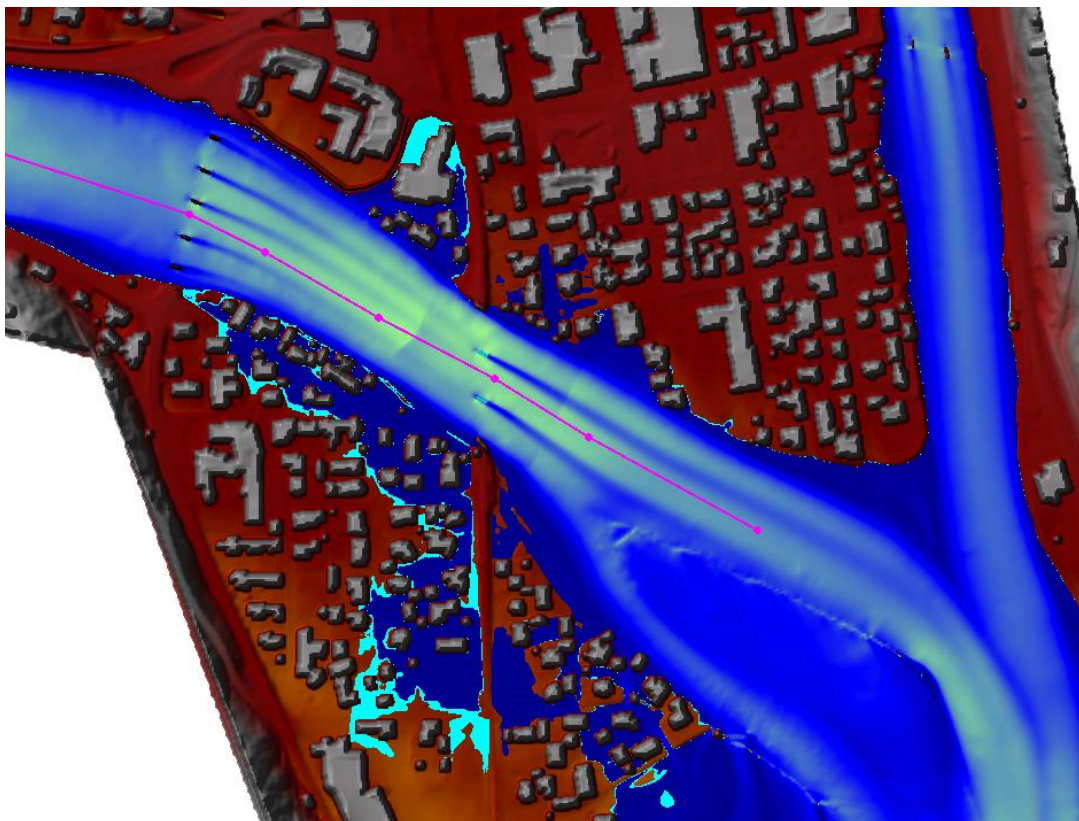
Tiltaket øker vannstanden noe oppstrøms jernbanebrua. Figur 15 viser simulert vannstand i en lengdeprofil fra rett oppstrøms veibrua til ca. 200 m nedstrøms jernbanebrua langs senter av elva, Tiltaket kan gi en vannstandsøkning i underkant av 20 cm rett oppstrøms erosjonssikringen og som avtar oppover mot veibrua. Figur 16 viser den økte oversvømmelsen i Otta som følge av tiltaket ved en 200 års flom. Tiltaket reduserte vannhastighetene oppstrøms som følge av oppstuvningen. Lokalt over fyllingen øker vannhastighetene, med hastigheter opp mot 4 m/s . Tilsvarende øker skjærspenningene, over sikringen og når verdier noe over 100 N/m^2 . Rett nedstrøms fyllingen i midten av elva øker skjærspenningen lokalt fra 73 til 80 N/m^2 (Figur 17).



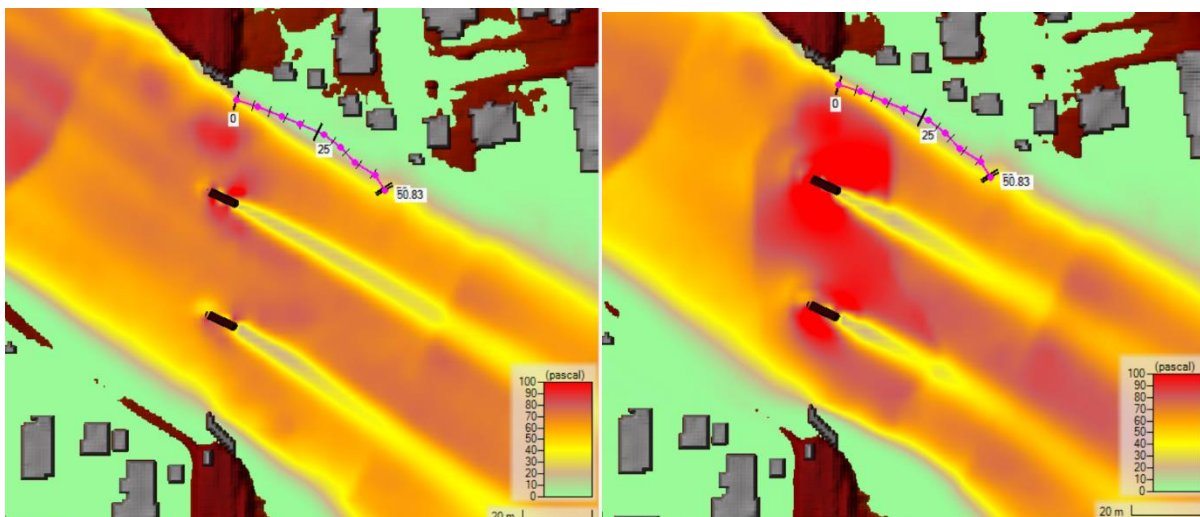
Figur 14. Omfang av fylling rundt pilar med stein 0.8 m og erosjonssikring med stein 0.5 m (mørkegrønne polygon).



Figur 15. Simulert vannstand i en lengdeprofil som vist i figur 5 fra ovenfor veibru til ca. 200 m nedstrøms tiltaket. Grønn linje viser vannstand med tiltak, og blå linje uten tiltak.

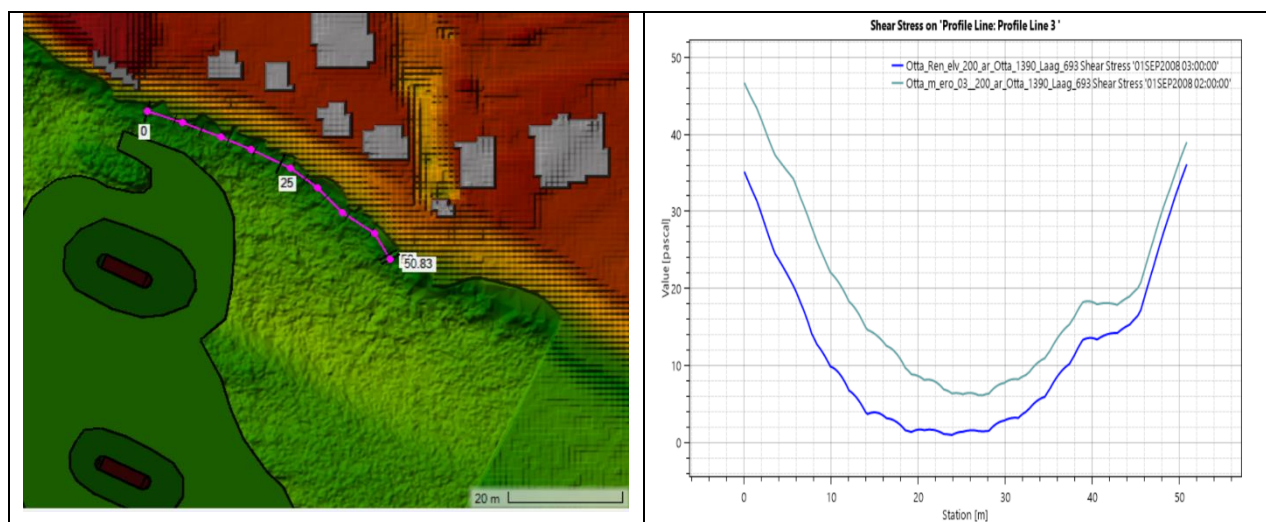


Figur 16. Økt flomfare i Otta (lysblå farge) som følge av tiltaket ved en 200 års flom.



Figur 17. Skjærspenning i området rundt jernbanebrua før til venstre og etter tiltaket til høyre.

For å se effekten av tiltaket på elvebreddene er verdier for skjærspenning sammenlignet for situasjonen før og etter (Figur 18). Det blir bare små økninger i skjærspenningen mot elvebreddene, og vurderes til å være så liten at det ikke behov for erosjonssikring.



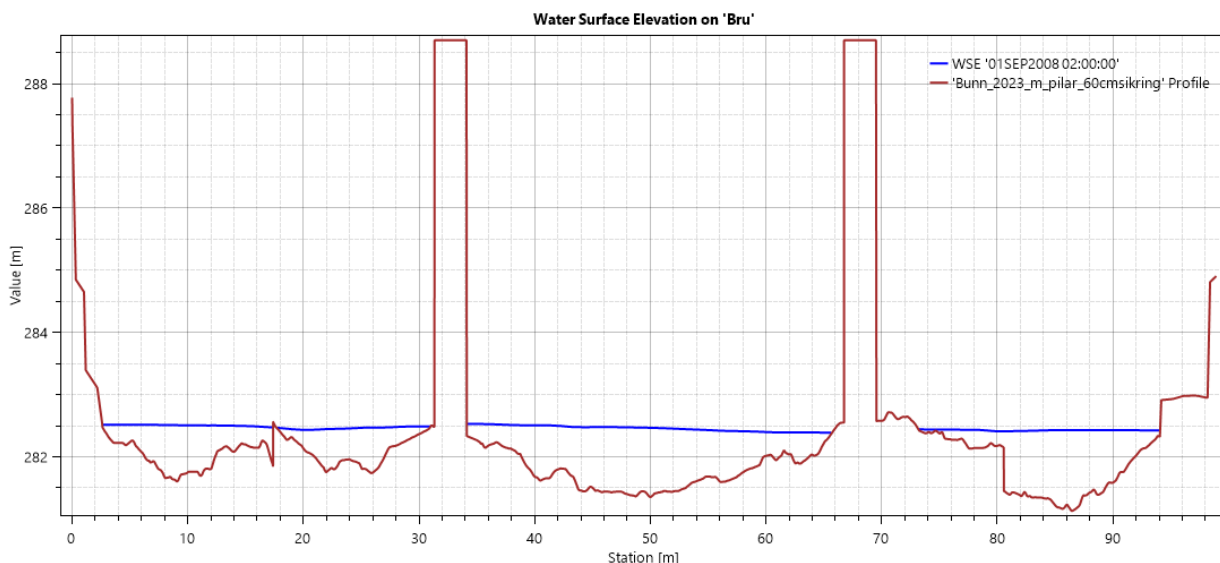
Figur 18. Skjærspenning i en lengdeprofil langs den nordlige elvebredd nedstrøms jernbanebrua ved 200 års flom. Fyllingen ligger langs stasjon 20 til 60 i profilet.

Vintervannføring - 43 m³/s.

I november og desember 2023 har det i lange perioder vært svært lave temperaturer og lite nedbør og vannføringen har ligget på ca. 43 m³/s. Dette er betydelig mindre enn normalvannføringen på ca. 104 m³/s.

Vannstand for et profil tvers over elva langs brua er vist i Figur 19. Den planlagte fyllingen kan lokalt nær pilarene stikke opp over vannflata. Det er simulert hastigheter lokalt opp mot 2 m/s og skjærspenning i overkant av 40 N/m², som er betydelig lavere enn det som oppstår ved en middelflom i elva i dagens situasjon.

En utfordring kan være at sikringsfyllingen fører til grunnstøting av isflak nær pilarene som kan medføre oppstuvning. Mest sannsynlig vil isgangen skje på en betydelig høyere vannføring enn 43 m³/s, og dermed vil vanddybden være stor nok til at isflakene glir over. Utfordringer med is er videre diskutert i kapittel 99.



Figur 19. Simulert vannstand i et tverrprofil langs brua ved vannføring på 43 m³/s slik det har vært i november og desember 2023. Bunnis og sarr i elva vil kunne øke vintervannstanden.

5 Behov for erosjonssikring av midlertidig anleggsvei

En fylling/tiltak som legges ut i elva er utsatt for strømkrefter, som øker med økende vannføring. Simuleringene viser at fyllingen/tiltakene og områdene rundt bør sikres mot erosjon. Det eksisterer ikke informasjon om steinstørrelsen i bunnsubstratet ved jernbanebrua. Vi vet derfor ikke hvilke hastigheter og skjærstress som er dimensjonerende for erosjon i elvebunnen.

For begge anleggsveiene blir hastighetene svært lave inne mot land, hovedsakelig lavere enn 0,5 m/s og det er ikke behov for ekstra erosjonssikring. Utover mot tuppen av anleggsveiene får man økte hastigheter lokalt på 2 m/s med en vanddybde på 1,5 m. Basert på beregning av stabil steinstørrelse med Maynord's formel anbefales bruk av $D_{50} = 150$ mm og $D_{max} = 300$ mm ved bruk av sikkerhetsfaktor på 1,2. Det anbefales at det legges erosjonssikring med rauset stein av størrelse 150 – 300 mm langs de ytterste 10 m av anleggsveiene, og langs fronten av veien som stikker lengst ut i elva. Det anbefales at de største steinene brukes langs bunn av veifyllingen samt på det oppstrøms ytre hjørnet på veifyllinga da det er her strømlastene blir størst. Erosjonssikringa legges helt opp til topp veifylling med en tykkelse på minimum 300 mm. Det vil ikke være behov for filterlag da det ikke er finstoff i veifyllingene.

6 Behov for erosjonssikring av brupilarene

Pilarene har vært utsatt for sterk erosjon og det er erodert mye masser og stein rundt pilarene. Det er behov for både stabiliserende fyllmasser og sikring mot videre erosjon.

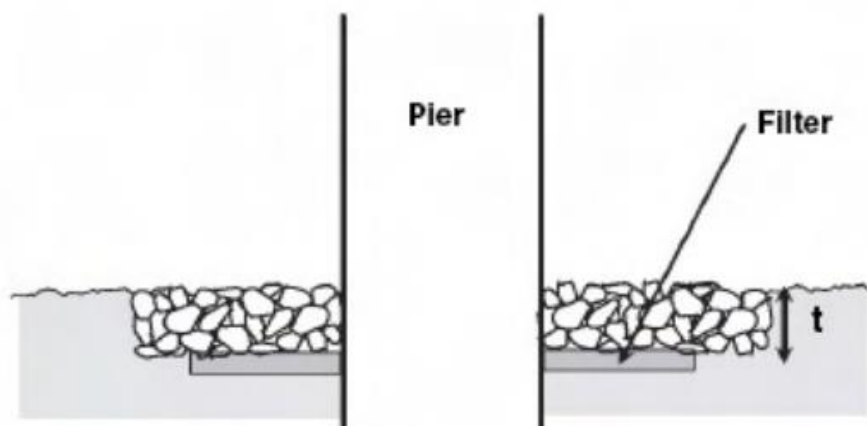
For sikring rundt brupilarer anbefaler veilederen (NVE 2009) at man benytter Lagasse's formel (2007). I veilederen er det ikke spesifisert om dette gjelder stein som rauses eller plastres, men fra figur 83 i veilederen, gjengitt i Figur 20, og vises rausing. Lagasse's formel er gitt som:

$$D_{50} = K_f \frac{0,692V_{\text{lokal}}^2}{2g(s-1)}$$

Hvor	D_{50}	= stabil steinstørrelse (m)
	K_f	= formfaktor (2,3 for bro Pilarer med rund eller spisset nese)
	s	= steinens spesifikke tetthet (-)
	g	= tyngdens akselerasjon (9,81 m/s ²)
	V_{lokal}	= hastigheten rett oppstrøms bro Pilaren (m/s)

Den hydrauliske simuleringen gir hastigheter oppstrøms bro Pilarene opp mot 4 m/s ved 200 års flom. Med formfaktor for spiss/rund nese på pilarene på 2,3 beregnes stabil steinstørrelse D_{50} med Lagasse's formel til 0,8 m. Lagasse's metode angir bare D_{50} og ikke gradering av massene som legges ut. Stein med diameter på 0,8 m i diameter er det lite hensiktsmessig å rause da dette vil gi et veldig tykt sikringslag. Det anbefales heller at det flatplastres rundt pilaren. Prosjektering og utførelse av flatplastring er beskrevet i Sikringshåndboka, Modul F2.203. (sikringshandboka.nve.no).

Veilederen anbefaler at sikringen legges i en utstrekning fra pilaren lik 2 ganger bredden. Det anbefales konservativt at stein med minste akse på minimum 0.8 m legges i forband 5 meter ut på alle sidene av pilarene. Utenfor dette sikres fyllingen som angitt i kapittel 7 nedenfor. Filterlaget er ikke nødvendig her da det er grov stein i elvebunnen.

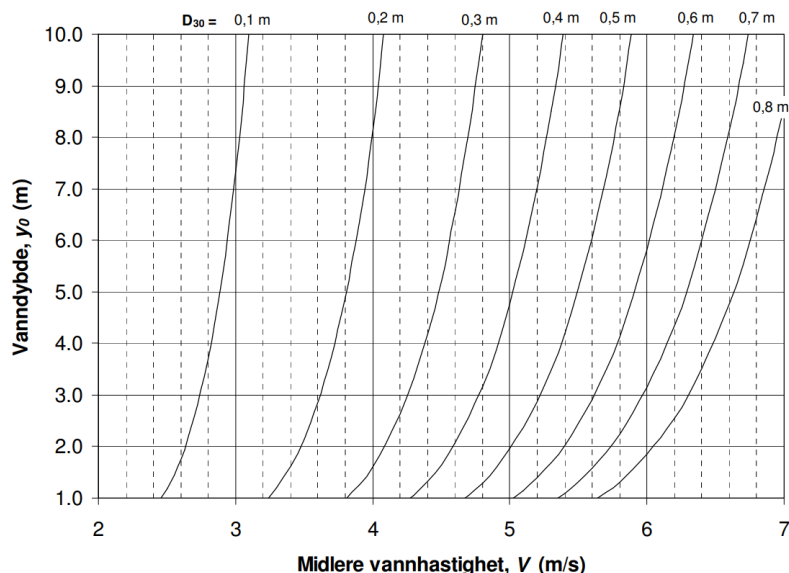


Figur 20. Sikring rundt bro Pilar (NVE 2009)

7 Erosjonssikring videre ut rundt pilarene

Veileder for erosjonssikring med stein (NVE, 2009) har en grafisk løsning for beregning av D_{30} for sikring av flat elvebunn (Figur 21). Metoden gjelder for rette strekninger med sideskråning slakere enn

1:4 og forutsetter at sikringen består av sprengt stein med tetthet 2600 kg/m^3 , at elvas fall er mindre enn 2 %, og at sikkerhetsfaktoren er minimum 1.1. Alle disse forutsetningene gjelder for erosjonssikringen ved Otta jernbanebru.



Figur 21. D_{30} som funksjon av hastighet og dybde (NVE, 2009).

Med hastigheter opp mot 4 m/s og dybde over fyllingen på 4,6 m beregnes D_{30} til 0,35 m. Siden det skal plastres med stor stein er det ikke hensiktsmessig å angi D_{30} . Siden skjærspenningene over fyllingen er høye anbefales i stedet at som minimum brukes stein med minste akse på 0,5 m som flatplastres. Stein på 0,5 m vil gi ekstra sikkerhet og sikre rask anleggsgjennomføring.

8 Utlegging av plastring

Flatplastring av elvebunnen

Massene i den eksisterende elvebunnen består trolig av grov grus og stein etter erosjon fra de siste flommene, og faren for utvasking gjennom bunnplastringen er liten. Det er derfor ikke behov for et filterlag under plastringen. For å unngå at elvebunnen rundt fyllingene bygges høyere enn opprinnelig elvebunn bør elvebunnen jevnes ut og masser fra små høydedrag i eksisterende elvebunn fylles i omliggende forsenkninger.

Steinblokker i plastringen må legges enkeltvis med god kontaktflate mellom steinblokkene og i forband for å sikre at steinene lager et mosaikkmønster. Et godt forband gir økt tetthet i sikringstiltaket da hver enkelt stein får flere kontaktpunkt og steinene "låses" i hverandre. Siden simuleringene viser at det kan oppstå høye hastigheter, må hulrom mellom enkeltstein minimeres for å forebygge utvasket av eksisterende elvebunn under plastringen.

Flatplastring kan medføre lav lokal ruhet og høye vannhastigheter som kan gi økt erosjon nedstrøms. Ruheten bør derfor økes ved å legge stein med ulik tykkelse-/størrelse ved siden av hverandre, slik at overflaten blir variert i høyde og struktur. Dette ivaretar også forholdet til fisk og dyreliv på en bedre

måte. Dersom det brukes stein med en tydelig lengste akse bør denne legges mest mulig parallelt med strømretningen.

En erosjonssikring er spesielt utsatt i oppstrøms og nedstrøms ende. For å unngå graving i elvebunnen, anbefales ikke fotgrøft ved start og slutt, men heller at man legger ekstra store steiner som har typisk lengdeakse og som legges med lengdeaksen i strømretning i øverste og nederste rad.

9 Isforhold

Ottavassdraget er regulert og inntaksdammen for Eidefoss kraftverk ligger 14 km opp for Otta. Kraftverket har utløp ca. 4 km opp for Otta ved Myrom gård. Kraftverket hadde tidligere utløp rett nedenfor Eidefossen. Fra kraftverksutløpet ved Myrom og nedover er det for det meste et åpent råk ned til samløpet med Lågen. Vintervannføringa er stabil og vinterstid dannes det bunnis og kantis fra kraftverksutløpet og nedover.

Det er ellers stabile isforhold og lite som skjer med isen i løpet av vinteren. Ved mildvær vinterstid, og alltid om våren, vil smelting og vannstandsheving føre til at isflak løsner og driver nedover elva. Større isflak kan stoppe opp ved jernbanebrua, men løsner etter hvert og driver videre nedover mot Lågen. (pers. komm. Aanund Kvambekk 11.1.2024).

Slike isganger var mye større tidligere da kraftverket hadde utløp lenger opp. Da var det en lang strekning der det i kuldeperioder dannet seg mye is og gav et stort volum i hver isgang. I dag når utløpet er flytta nesten ned til Otta er det mindre mengder is i hver isgang. (pers. komm. Hans Christian Udnæs 18.1.2024). Det vurderes ikke som at det planlagte tiltakene ved jernbanebrua forverrer situasjonen.

10 Oppsummering

Det er utført en hydraulisk analyse for Ottavassdraget ved jernbanebrua ved Otta. I analysen er det utført simuleringer med og uten anleggsveier i elven for å se på effekten av disse ved flom med 10 års gjentaksintervall for anleggsperioden.

Simuleringene viser at hastigheter og skjærspenninger ved en 10 års vinterflom er i størrelsesorden det man har ved middelflom i elva beregnet for hele året. Det er derfor ikke behov for tiltak i en slik situasjon. Ved prognoser som varsler større flommer enn 10 års flom bør det vurderes beredskapstiltak basert på hydrologiske simuleringer basert på vannføringsprognoser.

For den permanente situasjonen viser simuleringene en liten økning lokalt, både i hastighet og skjærspenning både over de planlagte tiltakene ved brua. Endringen i vannstanden på grunn av fyllingene ved 200 års flom blir opp mot 20 cm cm rett oppstrøms fyllingene og avtar opp mot veibrua.

Det anbefales at det i et område på 5 m rundt pilarene flatplastres stein med minste akse 0.8 m. Området utenfor anbefales flatplastres med stein opp til kote ca. 281.75 moh. Dette gjøres ett lag stein med minimum tykkelse lik 0,5 m. De legges godt inntil hverandre og i forband.

Referanser:

NVE Rapport nr. 15 (2015). Flomberegning for Gudbrandsdalslågen.

Regionplan Lågen (2017). Hydrauliske beregninger i Gudbrandsdalslågen. Dr. Blasy og Dr. Øverland.7

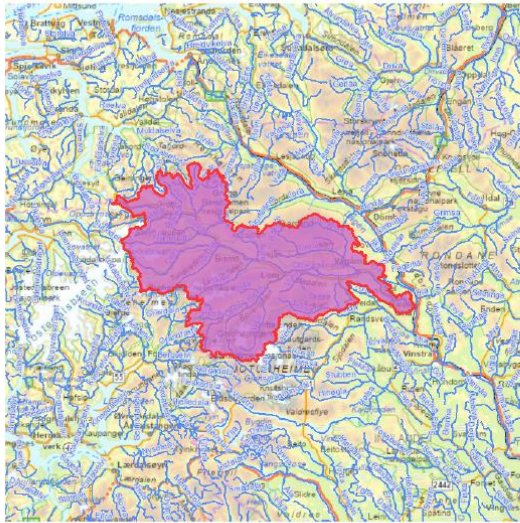
NVE (2009). Veileder for dimensjonering av erosjonssikring av stein.

NVE (2022). Sikkerhet mot flom. Veileder nr. 3/2022.

Varsom.no. Flommene på Vestlandet og i Ottavassdraget <https://www.varsom.no/nyheter/nyheter-flom-og-jordskred/flommen-pa-vestlandet-og-i-ottavassdraget-oppdateret-status-mandag-15-oktober-kl-15-30/>

Vedlegg:

Vedlegg 1. Nedbørfelt og feltparametre for Otta ved jernbanebrua (nve.nevina.no)



Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Kartbakgrunn: Statens Kartverk
Kartdatum: EUREF89 WGS84
Projeksjon: UTM 33N
Beregn.punkt: 212006 E
6860520 N

Nedbørfeltgrenser og feltparametere er automatisk generert og kan inneholde feil.
Resultatene må kvalitetssikres.

Feltparametere

Areal (A)	4061	km ²
Effektiv sjø (A _{SE})	0.37	%
Elvleengde uten sjø (E _{TLnet})	4105.2	km
Elvegradient (E _G)	6.8	m/km
Elvegradient 1085 (E _{G,1085})	5.0	m/km
Helning	13.8	°
Dreneringstetthet (D _T)	1.2	km ⁻¹
Feltlengde (F _L)	124.1	km

Arealklasse

Bre (A _{BRE})	5.1	%
Dyrket mark (A _{JORD})	1.6	%
Myr (A _{MYR})	1.0	%
Leire (A _{LEIRE})	0	%
Skog (A _{SKOG})	16.9	%
Sjø (A _{SJØ})	4.4	%
Snau fjell (A _{SF})	68.7	%
Urban (A _U)	0.1	%
Uklassifisert areal (A _{REST})	2.3	%

Hypsografisk kurve

Høyde _{MIN}	287	m
Høyde ₁₀	758	m
Høyde ₂₅	1025.5	m
Høyde ₅₀	1316	m
Høyde ₇₅	1542	m
Høyde _{MAX}	2462	m

Klima- /hydrologiske parametere

Avrenning 1961-90 (Q _N)	26.4	l/s*km ²
Nedbør juni	45	mm
Nedbør juli	60	mm
Regn og snøsmelting mai	164	mm
Regn og snøsmelting juni	188	mm
Regn og snøsmelting årlig 4d	84	mm
Regn og snøsmelting november	7	mm
Temperatur februar	-10.0	°C
Temperatur mars	-8.0	°C

Vedlegg 2: Flomfrekvensanalyser for stasjon Lalm i Ottavassdraget

Flomfrekvensanalyser på timesdata fra HYDRA II (COMPLETE, ikke kvalitetssikret) fra perioden 1986 - 2023

2,25,0 VF COMPLETE Timesdata Valgte år: 1986-2023 (årsavgrensning:ingen) tolerans=10,0%

Gjennomsnittelig maksimalverdi (middelflow) : 689,873
Median maksimalverdi (indeksflow for døgndata) : 634,913

Gumbel (Bayesiansk): $f(x)=(1/\alpha)\exp(-(x-u)/\alpha)\exp(-(x-u)/\alpha)$ $\alpha=138$ $+/-21$ $u=615$ $+/-26$
Maksimums-quantiler:

Gjentak- intervall (år)	Måle- verdier	Relative måle- verdier	Øvre estimat	Nedre estimat
2	664,55	0,963	609,70	725,43
5	822,15	1,192	741,44	922,68
10	928,27	1,346	822,36	1060,14
20	1032,56	1,497	896,61	1186,40
50	1169,38	1,695	996,72	1355,72
100	1273,51	1,846	1067,59	1484,39
200	1378,49	1,998	1140,69	1609,74
500	1520,22	2,204	1237,12	1775,05
1000	1629,19	2,362	1309,48	1904,68

Relativ måleverdi = flowverdi / middelflow.
Nedre/øvre estimat angir grensene for å posteriori 95% troverdighetsintervall.
Usikkerheten i parameterestimerer er her angitt med '+/-' standardavvik (stdev). Under normal-fordelings-
antagelser for å posteriori-fordelingen til hver parameter, betyr det at et 95% troverdighetsintervall kan lages med
estimat/ $\pm 1,96$ *stdev som grenser.

Flomfrekvensanalyser på kvalitetssikrede timesdata fra HYDRA II (HYKVAL) fra perioden 1986 - 2023

2,25,0 VF HYKVAL(virt.isred.) Timesdata Valgte år: 1986-2023 (årsavgrensning:ingen) tolerans=10,0%

Gjennomsnittelig maksimalverdi (middelflow) : 689,873
Median maksimalverdi (indeksflow for døgndata) : 634,913

Gumbel (Bayesiansk): $f(x)=(1/\alpha)\exp(-(x-u)/\alpha)\exp(-(x-u)/\alpha)$ $\alpha=139$ +-21 $u=614$ +-27
Maksimums-kvantiler:

Gjentaks- intervall (år)	Måle- verdier	Relative måle- verdier	Øvre estimat	Nedre estimat
2	664,19	0,963	610,75	723,64
5	822,95	1,193	742,00	919,17
10	929,76	1,348	819,03	1055,99
20	1034,50	1,500	895,06	1182,17
50	1171,89	1,699	993,46	1345,86
100	1276,38	1,850	1068,47	1470,13
200	1381,53	2,003	1137,73	1594,67
500	1522,88	2,207	1229,81	1762,37
1000	1630,98	2,364	1300,77	1889,22

Relativ måleverdi = flowverdi / middelflow.

Nedre/øvre estimat angir grensene for å posteriori 95% troverdighetsintervall

Usikkerheten i parameterestimater er her angitt med '+/-' standardavvik (stdev). Under normal-fordelings-
antagelser for å posteriori-fordelingen til hver parameter, betyr det at et 95% troverdighetsintervall kan lages med
estimat+/-1,96*stdev som grenser.

Flomfrekvensanalyser på kvalitetssikrede døgnbmiddelverdier fra HYDRA II (HYDAG) fra perioden 1907 – 2022.

2,25,0 VF HYDAG Døgnmiddel Valgte år: 1907-2022 (årsavgrensning:ingen) tolerans=10,0%

Gjennomsnittelig maksimalverdi (middelflow) : 692,634
Median maksimalverdi (indeksflow for døgndata) : 648,503

GEV (Full lokal+regional): $f(x)=1/s \cdot (1.0+(ksi(x-\mu)/s))^{-(1/ksi-1)} \exp(-(1.0+(ksi(x-\mu)/s))^{-(1/ksi)})$ $\mu=609$ +-14 $s=148$ +-11 $ksi=-0,0094+-0,037$
Maksimums-kvantiler:

Gjentaks- intervall (år)	Måle- verdier	Relative måle- verdier	Øvre estimat	Nedre estimat
2	662,59	0,957	631,08	693,33
5	830,32	1,199	782,49	876,27
10	940,17	1,357	878,92	1003,01
20	1044,40	1,508	970,94	1120,93
50	1181,39	1,706	1083,46	1288,82
100	1283,64	1,853	1157,81	1420,49
200	1386,26	2,001	1231,70	1552,71
500	1526,47	2,204	1320,27	1748,96
1000	1634,96	2,360	1387,10	1902,61

Relativ måleverdi = flowverdi / middelflow.

Nedre/øvre estimat angir grensene for å posteriori 95% troverdighetsintervall

Usikkerheten i parameterestimater er her angitt med '+/-' standardavvik (stdev). Under normal-fordelings-
antagelser for å posteriori-fordelingen til hver parameter, betyr det at et 95% troverdighetsintervall kan lages med
estimat+/-1,96*stdev som grenser.

Flomfrekvensanalyser på kvalitetssikrede timesdata fra HYDRA II (HYKVAL) for anleggsperioden 01.02. – 15.04 fra perioden 1986 – 2023.

2.25.0 VF HYKVAL(virt.isred,) Timesdata Valgte år: 1987-2023 (årsavgrensning:ingen) tolerans=10.0% Sesong: 1/ 2-15/ 4

Gjennomsnittelig maksimalverdi (middelflow) : 63.7026
Median maksimalverdi (indeksflow for døgndata) : 59.2243

Weibull (Bayesiansk): $f(x)=ksi/s (x/s)^{(ksi-1)} \exp(-(x/s)^{ksi})$ s=73 +-5.2 ksi=2.94 +-0.36
Maksimums-kvantiler:

Gjentaks- intervall (år)	Måle- verdier	Relative måle- verdier	Øvre estimat	Nedre estimat
2	64.46	1.012	55.25	73.98
5	85.90	1.348	75.36	99.04
10	97.04	1.523	85.29	113.79
20	106.11	1.666	93.15	126.33
50	116.12	1.823	101.71	140.98
100	122.75	1.927	106.90	150.80
200	128.74	2.021	111.66	159.78
500	135.92	2.134	117.36	170.68
1000	140.90	2.212	121.03	178.31

Relativ måleverdi = flowverdi / middelflow.

Nedre/øvre estimat angir grensene for å posteriori 95% troverdighetsintervall

Usikkerheten i parameterestimater er her angitt med '+/-' standardavvik (stdev). Under normal-fordelings-
antagelser for å posteriori-fordelingen til hver parameter, betyr det at et 95% troverdighetsintervall kan lages med
estimat+/-1.96*stdev som grenser.

