



AGDER
fylkeskommune

Hydraulisk modellering

Detaljreguleringsplan for fv. 406 Senumstad bru

Vedlegg til planforslaget



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	Senumstad bru - hydraulisk modellering	DOKUMENTKODE	10219245-RIVass-RAP-001
EMNE	Hydraulisk modellering	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAGSGIVER	Agder Fylkeskommune	OPPDRAGSLEDER	Sofie Steinkjer
KONTAKTPERSON	Ingrid Undheim Nøklund	UTARBEIDET AV	Sofie Steinkjer
		ANSVARLIG ENHET	Multiconsult Norge AS

SAMMENDRAG

Senumstad bru i Birkeland kommune skal skiftes ut med en ny bru med større bæreevne. Det er satt opp en hydraulisk modell for å regne på vannhastighetene og vannstandene ved eksisterende bru, samt 2 alternativ for ny bru. Modellen er basert på eksisterende laserdata målt opp ved lav vannføring og en sjøbunnskartlegging Agder fylkeskommune har fått utført ved brua. Etter at Tovdalsvassdraget ble rammet av flom i oktober 2017, utførte NVE nye flomberegninger (NVE, 2018). Resultatene fra NVEs flomberegning er arealskalerte for å også gjelde for Senumstad. Fordi offentlige veger er underlagt Vegloven gjelder SVVs Håndbøker, som blant annet setter tilleggskrav til flomberegninger. Beregnet 200-årsflom er derfor lagt til 20 % klimapåslag og 10 % sikkerhetsfaktor. Modellen er kalibrert mot 2017-flommen, som er beregnet til å ha et gjentaksintervall på 200 år ved Flaksvatn.

Basert på foreløpige resultater har Agder Fylkeskommune valgt å gå videre med alternativ 2 for ny bru. Dette alternativet er en løsning der ny bru plasseres like oppstrøms eksisterende bru. Brua prosjekteres med 6 sett med piler, hvorav 2 sett er plassert på land ved landkarene ved normalvannføring. Beregningene viser at ny bru ikke vil gi forhøyet vannstand.

Det anbefales å sikre den nye brua mot erosjon. Stabil steinstørrelse er beregnet til $D_{50} = 0,3$ m og $D_{maks} = 0,6$ m. Sikringen anbefales utført med rauset samfengt sprengstein. Tykkelsen på erosjonssikringen bør være på 0,6 m på land og 0,9 m i vann. Pilarene og fotgrøfta bør sikres med en lagtykkelse på 1,35 m. Det anbefales at dybdene under brua kontrollmåles jevnlig og spesielt etter store flommer.

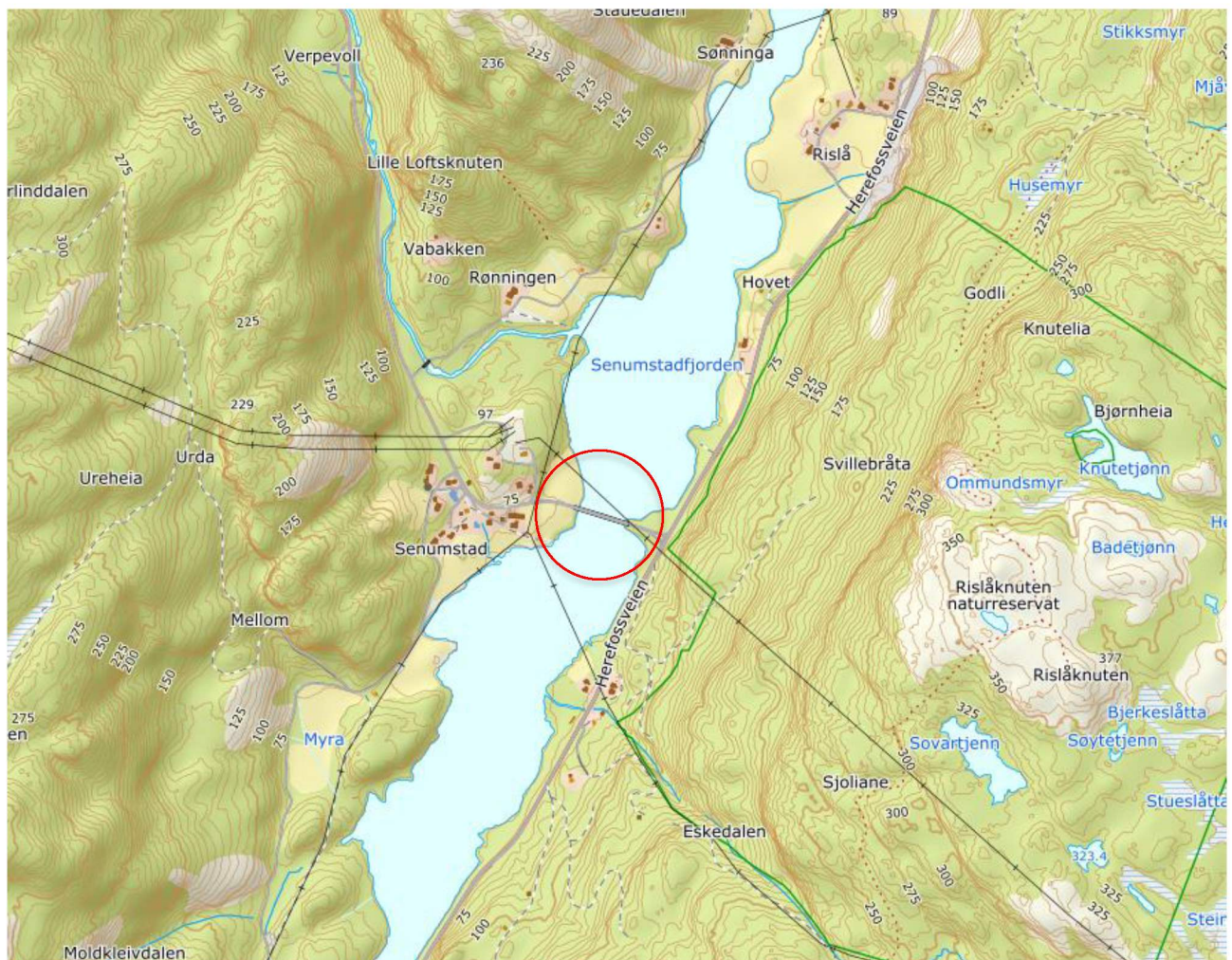
00	16.10.20	Endelig rapport	SOMS	KO	SOMS
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Bakgrunn	5
2	Krav til dimensjonerende gjentakintervall og frihøyder	5
2.1	Håndbok N200 – Vegbygging	5
2.2	Håndbok N400 - Bruprosjektering	6
3	Grunnlagsdata	7
3.1	Flomberegning	7
3.2	Topografisk høgdegrunnlag	8
3.3	Kalibreringsdata	8
4	Hydraulisk modellering	9
4.1	Oppsett og kalibrering	9
4.1.1	Hydraulisk modell	9
4.1.2	Modelloppsett	9
4.1.3	Grensebetingelser	10
4.1.4	Friksjonsforhold og kalibrering	10
4.1.5	Utforming av dagens Senumstad bru	11
4.1.6	Utforming av ny Senumstad bru – alternativ 1 og 2	11
4.2	Resultater	13
4.2.1	Dagens situasjon	13
4.2.2	Ny Senumstad bru – alternativ 1	14
4.2.3	Ny Senumstad bru – alternativ 2	15
5	Vurdering av flom og erosjonsfare for ny bru	16
5.1	Flomfare	16
5.2	Erosjonsfare	16
5.3	Beregning av nødvendig steinstørrelse for erosjonssikring av alternativ 2	16
5.3.1	Brukar	16
5.3.2	Pilarer	17
5.3.3	Anbefalt løsning	17
6	Konklusjon	19
7	Referanser	20
8	Vedlegg	21
8.1	Vedlegg 1 – Foreløpige brutegninger	21
8.2	Vedlegg 2 – Terrenghodifikasjoner hydraulisk modell	23
8.3	Vedlegg 3 – Plott av sjøbunnsdata ved Senumstad bru	24
8.4	Vedlegg 4 – Kalibreringsdata	24

1 Bakgrunn

I forbindelse med prosjektering/bygging av ny bru ved Senumstad i Birkenes kommune er det utført hydraulisk modellering av Senumstadjorden med dagens bru og for ny situasjon med ny bru. Strekningen som er modellert er fra innløpet til Senumstadjorden til nedstrøms Laksefoss i Tovdalsåna. Det er spesielt vannstander og hastigheter ved bruplassering og erosjonsfare på stedet som er vurdert. Plasseringen til eksisterende bru er vist på kartet i Figur 1-1 under.



Figur 1-1: Kart over Senumstadjorden og Senumstad bru

2 Krav til dimensjonerende gjentakintervall og frihøyder

SVVs Håndbok N200 – Vegbygging og Håndbok N400 – Bruprosjektering setter krav til dimensjonerende gjentakintervall og evt. frihøyder for hhv. veg og bru.

2.1 Håndbok N200 – Vegbygging

For å fastsette hvilket gjentakintervall som er dimensjonerende må sikkerhetsklassen til vegen bestemmes. Sikkerhetsklassen bestemmes ut fra tabell 403.1 i NA-rundskriv 2019/03 (Statens vegvesen, 2019). På www.vegkart.no er ÅDT for FV406 er oppgitt til å være 650 og vegen har omkjøringsmuligheter. Vegen er derfor i sikkerhetsklasse V2 og dimensjonerende flom er derfor 100 år. I tillegg skal det benyttes en sikkerhetsfaktor F_k for ta hensyn til fremtidige klimaendringer og en faktor F_u for å ta hensyn til usikkerheten i beregning av $Q_{dim,T}$:

$$Q_{dim,T} = Q_T \cdot F_k \cdot F_u$$

Der:

$Q_{dim,T}$ = Dimensjonerende avrenning for returperiode T (m³/s)

Q_T = Beregnet avrenning for returperiode T (m³/s)

F_k = Sikkerhetsfaktor for fremtidige klimaendringer

F_u = Sikkerhetsfaktor for usikkerhet ved beregningsmetode

Av NA-rundskriv 2019/03 fremgår det at sikkerhetsklassen for vegen også skal gjelde for tverrdrenering, herunder for bruer. For alle anlegg med levetid over 50 år skal det brukes en sikkerhetsfaktor F_u ved beregning av dimensjonerende vannføring $Q_{dim,T}$. Sikkerhetsfaktoren F_u bestemmes iht. tabell 404.2 i N200. For veier i sikkerhetsklasse V2 er sikkerhetsfaktoren $F_u = 1,1$.

Sikkerhetsfaktor for klimaendringer for veg F_k settes iht. tabell 404.1 i Hb. N200, se Tabell 2-1 under. For nedbørfelt større enn 10 km² i Aust-Agder skal sikkerhetsfaktor $F_k = 1,2$ benyttes.

Tabell 2-1: Tabell 404.1 i NA-rundskriv for fastsettelse av sikkerhetsklasser for veg påvirket av flom (Statens vegvesen, 2019)

Sikkerhetsklasse	ÅDT	Returperiode for flomhendelse			
		Med omkjøringsmulighet		Uten omkjøringsmulighet	
		Tverrdrenering	Langsgående drenering	Tverrdrenering	Langsgående drenering
V1	0 – 500	50 år	50 år	100 år	50 år
V2	500 – 4000	100 år	50 år	200 år	100 år
V3	> 4000	200 år	100 år	200 år	100 år

Da dimensjonerende gjentakintervall for bruer også er gitt i N400, skal den mest konservative verdien velges. I tillegg skal sikkerhetsfaktorene fra N200 gjelde.

2.2 Håndbok N400 - Bruprosjektering

Statens Vegvesen sin håndbok N400 setter blant annet krav til dimensjonerende gjentakintervall og frihøyder for bruer. For vassdrag (4.2.4) gjelder det at «fri høyde over vassdrag bestemmes slik at det er minst 0,5 m klaring mot overbygningen ved beregnet vannstand for 200-årsflom».

Dimensjonerende gjentakintervall er:

$$Q_{dim,T} = Q_T \cdot F_k \cdot F_u = Q_{200} \cdot 1,2 \cdot 1,1 = Q_{200} \cdot 1,32.$$

Bruen skal iht. N400 dimensjoneres for en 200-årsflom med 20 % klimapåslag og 10 % usikkerhetspåslag, samt at brua skal ha 0,5 m fribord.

3 Grunnlagsdata

3.1 Flomberegning

Etter at Tovdalsvassdraget ble rammet av flom i oktober 2017 ble det beregnet nye vannføringer for midlere flom og flom med gjentaksintervall 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 og 1000 år (NVE, 2018). Dette ble gjort fordi det ved hjelp av målinger i felt under flommen ble funnet at vannføringskurven måtte endres. Beregningene ble utført for to lokasjoner i vassdraget, som oppsummert i Tabell 3-1.

Tabell 3-1: Beregnede 200-års flommer, kulminasjonsverdier (NVE, 2018)

Lokasjon	Areal [km ²]	Q ₂₀₀ [m ³ /s]	Q _{200+20% klimapåslag} [m ³ /s]
Utløpet av Flaksvatn	1781	1202	1443
Utløpet av Topdalselva i fjorden	1867	1280	1536

Utløpet ved Flaksvatn ligger ca. 12 km oppstrøms analyseområdet ved Senumstad bru, og det er disse verdiene som vil brukes for å arealskalere 200-årsflommen ved Senumstad bru. Feltarealet til Tovdalsvassdraget ved Senumstad bru er ca. 93% av totalarealet til Flaksvatn og det er da rimelig å anta at en arealskalering vil gi gode resultater.

Målinger av vannstand under flommen i 2017 tilsier den hadde en vannføring på 1195 m³/s ved utløpet av Flaksvatn, noe som tilsvarer en 200-årsflom.

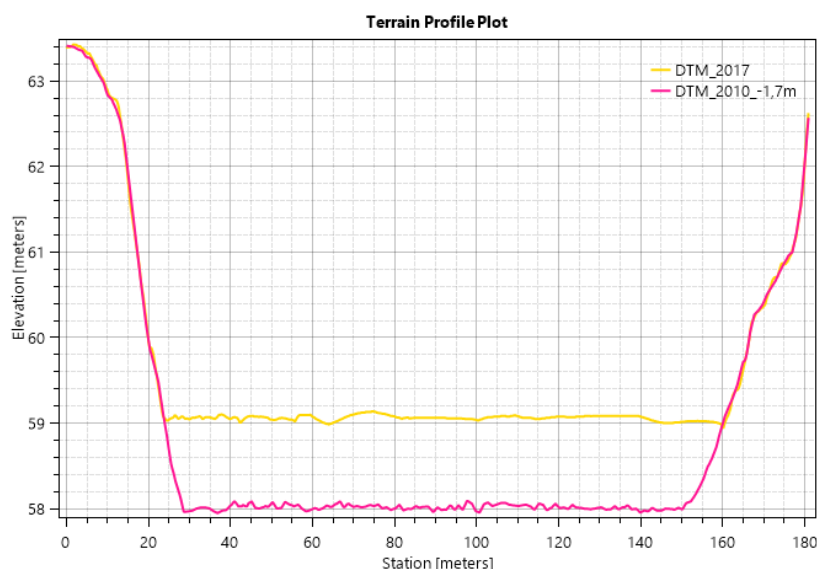
NVEs flomberegning er basert på frekvensanalyse av flommer ved 6 målestasjoner, samt regionale formler og observerte flommer. Arealskalering av 200-årsflommen ved utløpet til Flaksvatn gir kulminasjonsvannføring Q₂₀₀ på 1114 m³/s ved Senumstad bru. Dette er oppsummert i Tabell 3-2.

Tabell 3-2: Arealskalerte 200-års flommer for Senumstad bru

	Areal [km ²]	Q ₂₀₀ [m ³ /s]	Q _{200+20% klimapåslag} [m ³ /s]	Q _{200+20% klimapåslag+ 10% usikkerhetspåslag} [m ³ /s]
Senumstad bru	1651	1114	1337	1470

3.2 Topografisk høydegrunnlag

Alle høydedata er oppgitt i NN2000 dersom annet ikke er spesifisert. Strekingen som er modellert ble laserskannet i perioden 16.-17. juni 2010 (Terratec, 2010) og 13.-14. april 2017, (Terratec, 2017). Bestilte oppløsninger var hhv. 1 pkt. pr m² og 5 pkt. pr m². For oppmålingen i 2017, ble det ved vannmerket 20.3 Flaksvatn, som ligger 12 km nedstrøms Senumstad, registrert 58 m³/s, mens det på samme sted i 2010 ble registrert 9 m³/s. Terrenget fra 2010 har derfor flere detaljer i elveløpet og dette datasettet er derfor brukt for å modellere elveløpet, som vist i Figur 3-1.



Figur 3-1: Tverrsnitt som viser forskjell mellom 2017-terreng (gul) og 2010-terreng (rosa) etter korrigering for systematisk feil.

Det ble funnet en systematisk feil i terrenget som ble scannet i 2010. Kontroll mot fastpunkter langs veiflaten viste at 2010-terrenget lå 1,7 m høyere enn 2017-terrenget og fastmerkene. Dette ble justert ved å senke 2010-terrenget med 1,7 m over hele området, inkludert elvebunnen. I vedlegg 2 er denne systematiske feilen vist grafisk fra et lengdesnitt langs midtlinjen til veien.

Elvebunnen i terrengmodellen ved Senumstad bru er basert på data fra elvebunnskartleggingen som ble utført sommeren 2020. Det modellerte området er svært flatt i øvre del, men når Senumstadjorden smalner inn og ved utløpet blir elva mer stryk-preget.

3.3 Kalibreringsdata

Agder Fylkeskommune fikk målt opp merker etter flomvannstander i elva den 17. august 2020, se Vedlegg 4 – Kalibreringsdata. Vannstandene som ble målt stammer ikke fra 2017-flommen, men flere av de høyeste måle vannstandene gir god overensstemmelse med en større flom i vassdraget. Ut fra målestasjon 20.3 Flaksvatn er den estimert til å ha vært på 300m³/s ved Senumstad bru.

Under 2017-flommen tok Jonny Hauge flere bilder av vannstanden ved Senumstad bru, ved det som han oppgir å ha vært kulminasjonstidspunktet, se Figur 3-2 under.



Figur 3-2: Bilder tatt av Senumstad bru ved kulminasjonstidspunktet. Kilde: Jonny Hauge.

4 Hydraulisk modellering

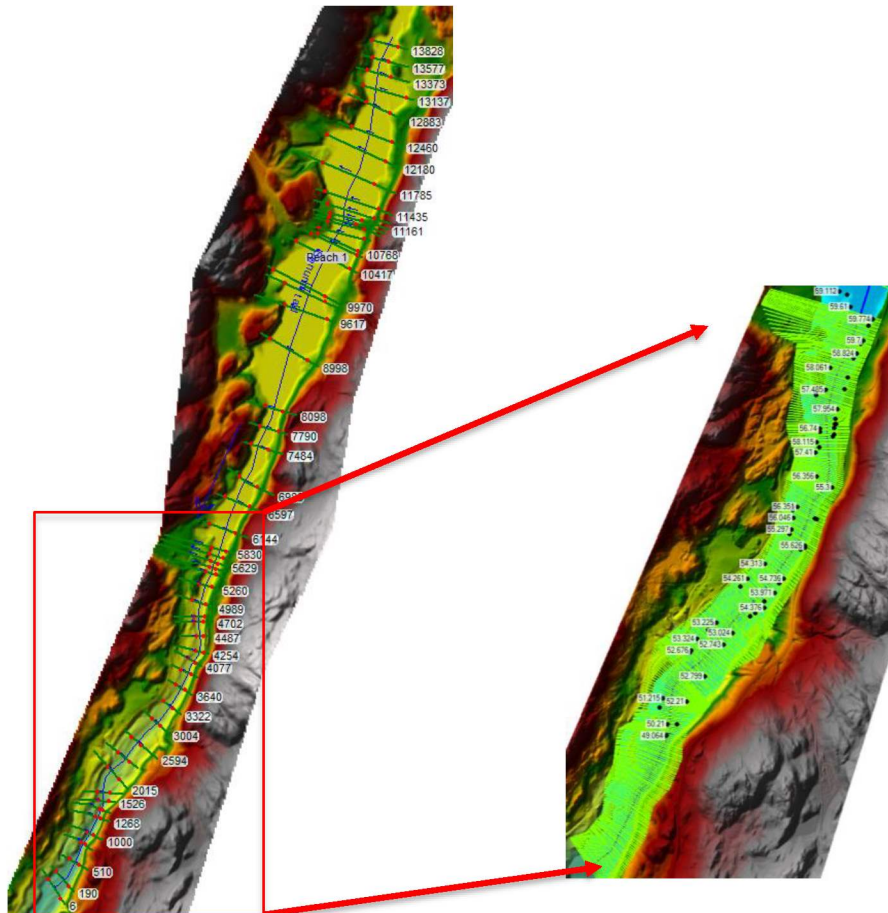
4.1 Oppsett og kalibrering

4.1.1 Hydraulisk modell

Hydrauliske simuleringer er utført i programvaren HEC-RAS v.5.0.7 (Brunner, 2016). Beregningene er utført i 1D og er utført for vannstand og vannhastigheter ved 200-årsflom (Q_{200}) og 200-årsflom med 20% klimapåslag og 10% usikkerhetspåslag ($Q_{200+20\% \text{ klima} + \text{ usikkerhet}}$). Det er viktig at tverrprofilene beskriver geometrien til elva godt i vertikal- og horisontalplanet for at modellen skal gi gode resultater. Det er spesielt viktig at smale tverrsnitt som kan være begrensende på kapasiteten defineres i modellen. Modellverktøyet som er anvendt er vurdert som et godt valg for strekningen som er modellert i Senumstadjorden og Tovdalsåna.

4.1.2 Modelloppsett

Den modellerte strekningen er totalt ca. 4,2 km lang og med et fall på totalt 12 høydemeter. Alle disse høydemetrene er fordelt på de 1,7 km lengst nedstrøms. På den bratteste strekningen i modellen er det valgt å etablere tverrsnitt hver 5. meter, som vist i Figur 4-1. Dette øker detaljeringsgraden i modellen og gir mer pålitelige resultater. Figur 4-1 viser modelloppsettet. Beregningene er utført under forutsetning om at en kan ha blandet strømning (både over- og underkritisk). Dette medfører at vannstanden i bratte partier kan bli lavere oppstrøms enn nedstrøms, noe som skyldes hydrauliske effekter i elva.



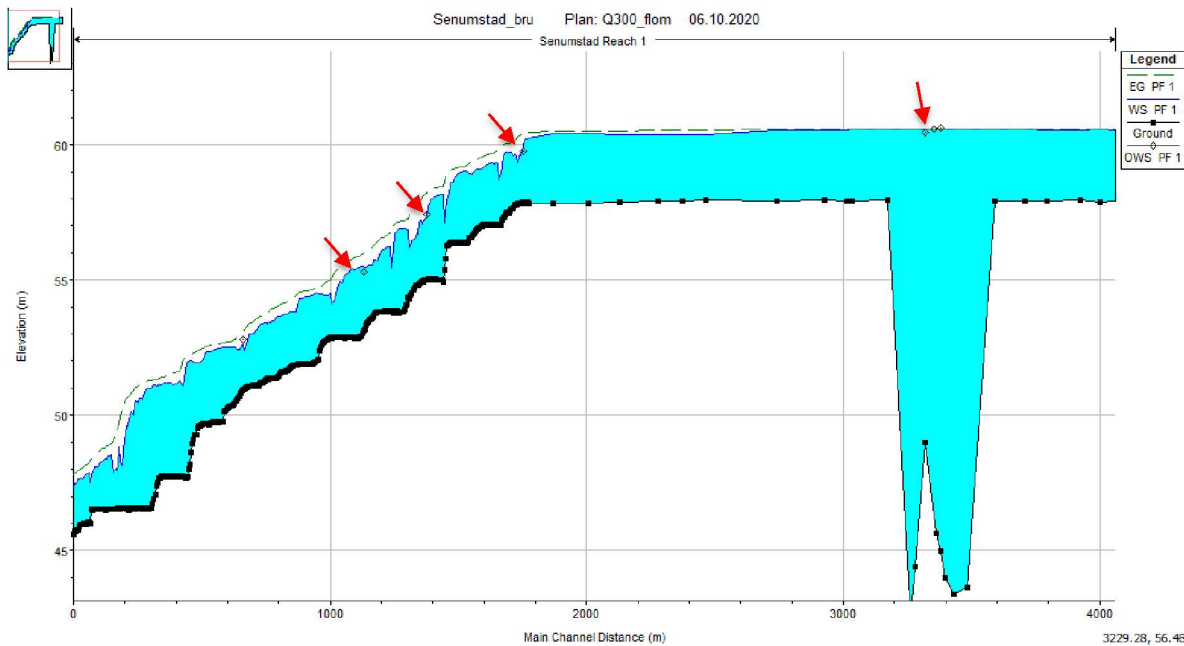
Figur 4-1: Hydraulisk 1D modell av Senumstadjorden forbi Senumstad bru

4.1.3 Grensebetingelser

Beregnet vannføring inn i modellen er som oppgitt i Tabell 3-2. For ned- og oppstrøms grensebetingelse for vannstand er det valgt å bruke normaldybde, som beregnes i Hec-Ras ut fra Mannings formel og antatt helning til energilinja. Det forutsettes at energilinja til elva er den samme som bunnhelningen. Bunnhelningen er satt til 0,015 for nedstrøms grensebetingelse og 0,0002 for oppstrøms grensebetingelse.

4.1.4 Friksjonsforhold og kalibrering

Det er valgt å bruke varierende Mannings n-verdier på den modellerte strekningen. For oppstrøms del som er flat er Mannings $n (=1/M)$ satt til 0,01 for elveleie og 0,02 for sideskåninger og elvesletter. For nedstrøms del, som er smalere og brattere, er Mannings $n (=1/M)$ satt til 0,03 for både elveleie og sideskåninger. Disse verdiene ble valgt under kalibrering slik at modellen beregnet vannstander som stemte overens med kalibreringsdata. Figur 4-2 viser en grafisk fremstilling av dette.

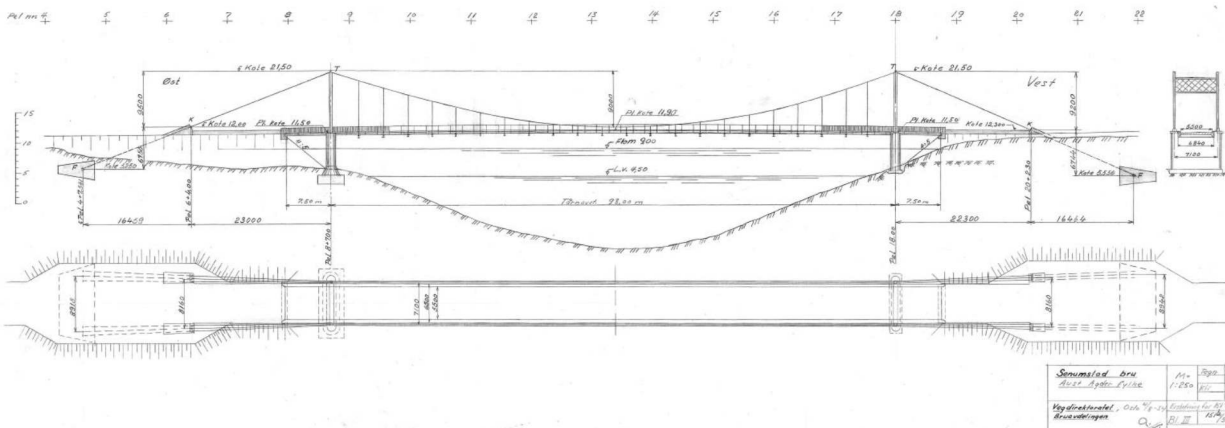


Figur 4-2: Lengdeprofil med noen kalibreringspunkter for vannføringen på 300 m³/s, som modellen er kalibrert mot.

4.1.5 Utforming av dagens Senumstad bru

Dagens Senumstad bru er en hengebru som krysser Senumstadvjorden mellom Rv 41 og Senumstad. Denne veien har pr. i dag en ÅDT på 650. Brua har et hovedspenn på 93 meter og ble åpnet i 1957.

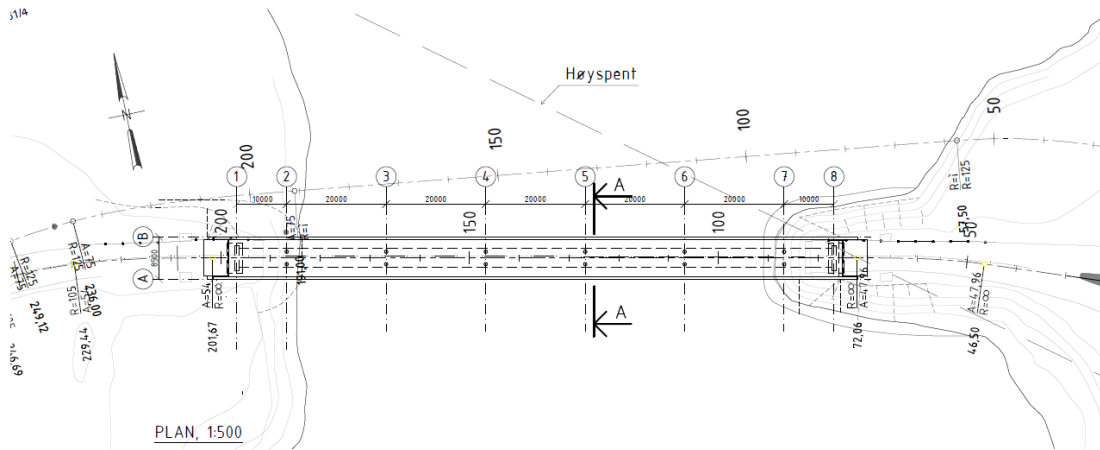
Brua i seg selv er ikke med i den hydrauliske modellen, da dette er en hengebru uten komponenter som kommer i kontakt med vannet. Underdekket til brua ligger så vidt over 2017-floam, som er beregnet til å ha vært en 200-årsflom.



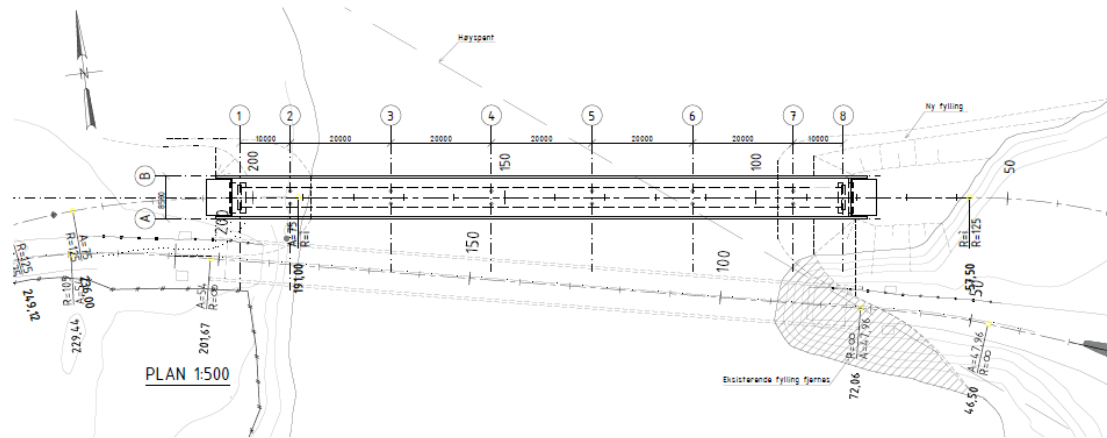
Figur 4-3: Plan og snitt av dagens Senumstad bru.

4.1.6 Utforming av ny Senumstad bru – alternativ 1 og 2

Det er to alternative utforminger av Senumstad bru som er undersøkt og begge alternativ skal erstatte dagens bru. Alternativ 1 går ut på at ny bru skal plasseres på akkurat samme sted, som vist i Figur 4-4. Alternativ 2 innebærer at brua bygges umiddelbart nord for dagens bruplassering, og inkluderer terrengendringer, da i hovedsak østre fylling vil flyttes nordover. Dette er vist i Figur 4-5.

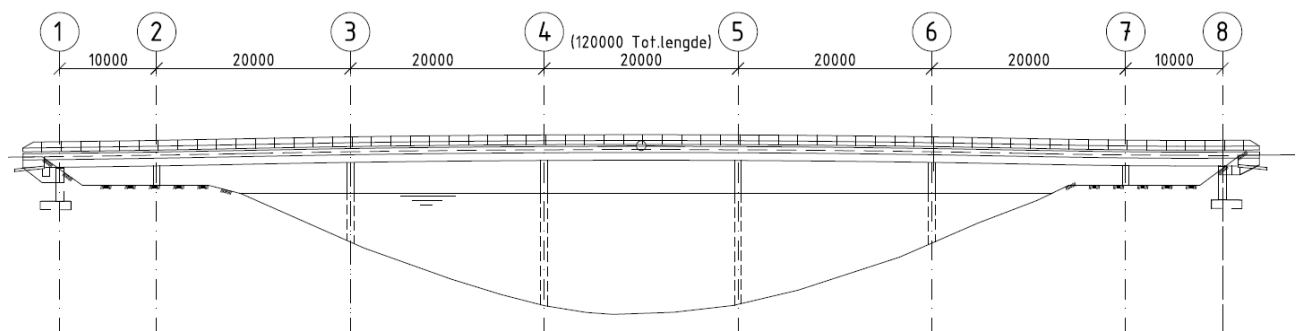


Figur 4-4: Plassering Senumstad bru - Alternativ 1.



Figur 4-5: Plassering Senumstad bru - Alternativ 2.

Den nye brua skal i begge alternativ ha 6 pilarer, hvorav 4 av disse er lokalisert i elveløpet. Høyden på brudekket er 1,4 m, og diameter på søylene 0,8 m. Underkant bru er foreslått lagt til kote 64,6 moh. på de to laveste punktene der brua kobles til veien med et høybrett på midten.

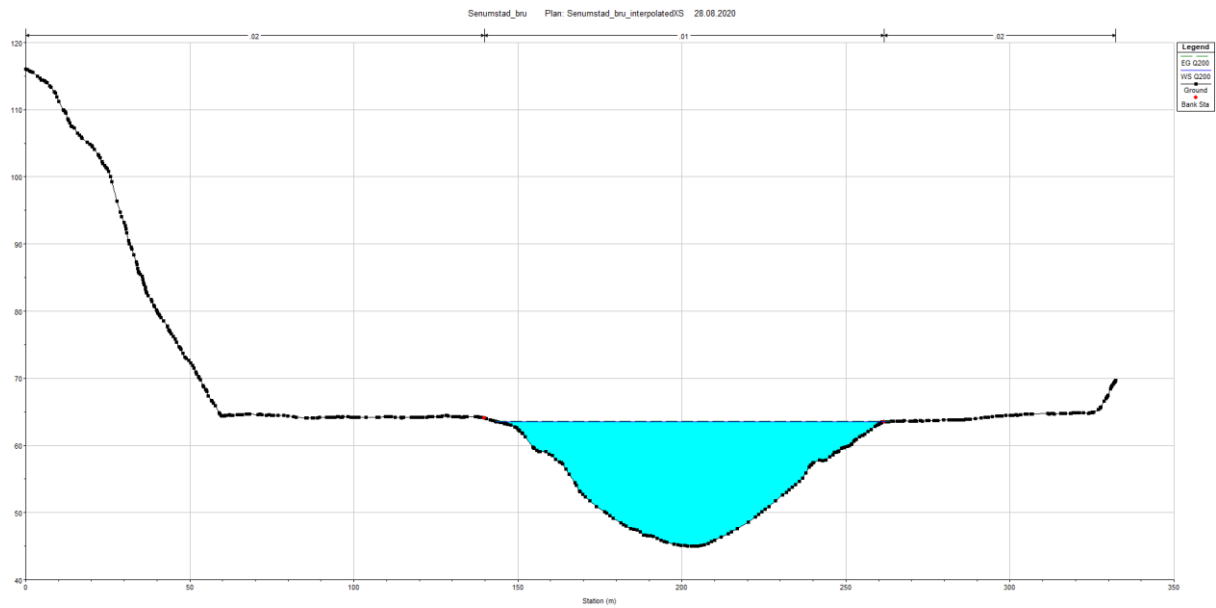


Figur 4-6: Snitt av ny Senumstad bru

4.2 Resultater

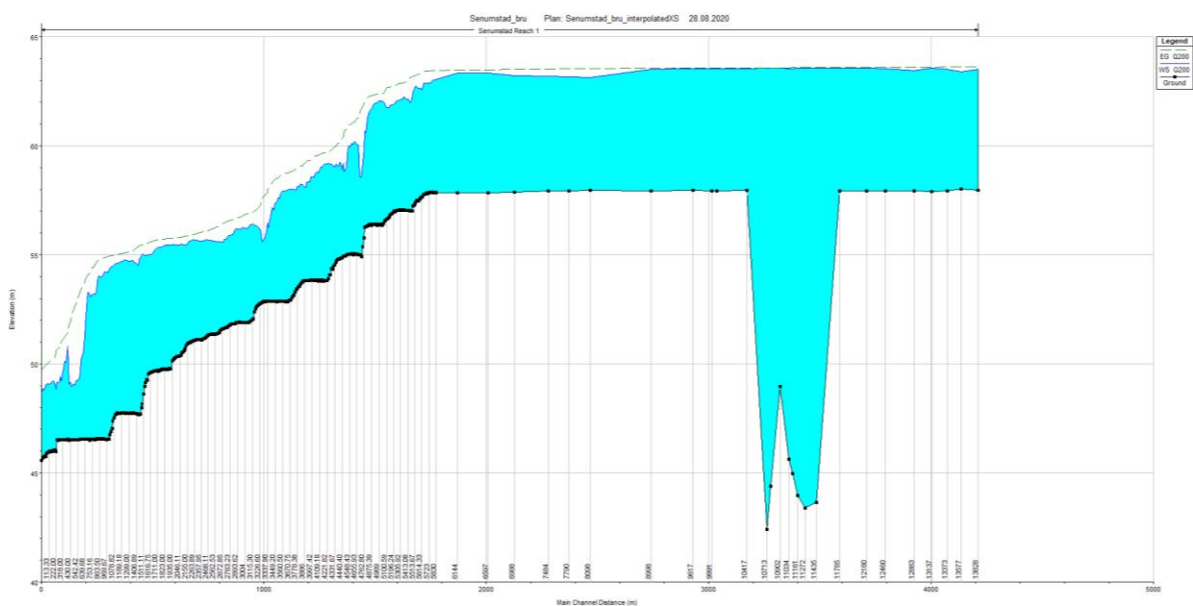
4.2.1 Dagens situasjon

Dagens situasjon ble modellert som grunnlag for hydraulisk modellering av fremtidig bru. Det ble benyttet kalibreringsdata for å verifisere at forholdet mellom vannstand og vannføring korresponderte for ulike scenarier. Etter kalibrering fikk man en flomvannstand under Senumstad bru på kote 63,5 moh., som samsvarer med vannstanden under 2017- flommen. Tverrsnittet under Senumstad bru ved en 200-årsflom er vist i Figur 4-7.



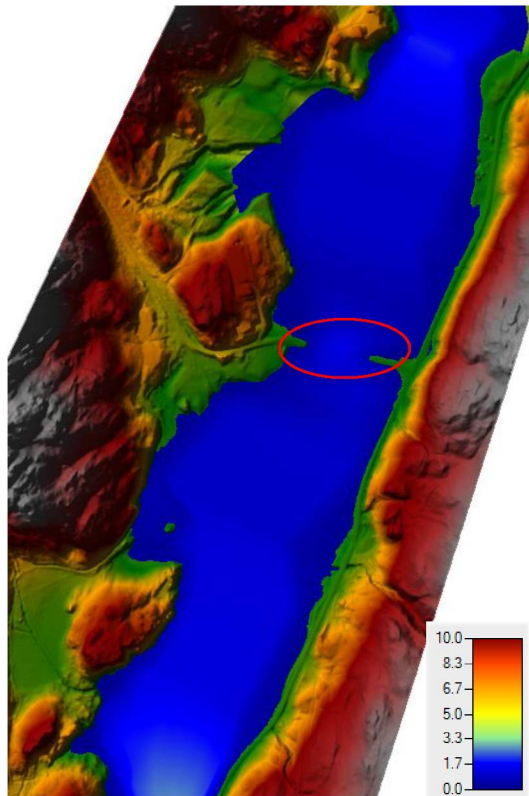
Figur 4-7: Tverrsnitt under Senumstad bru

Den hydrauliske simuleringen viser også at det ikke er noe fall igjennom brua. Vannstanden under 200-årsflommen er relativt lik for hele Senumstadjorden, før denne når utløpet. En illustrasjon av dette er vist i Figur 4-8. I denne figuren kommer også sjøbunnskartleggingen under brua til syne.



Figur 4-8: Lengdesnitt av modellert strekning

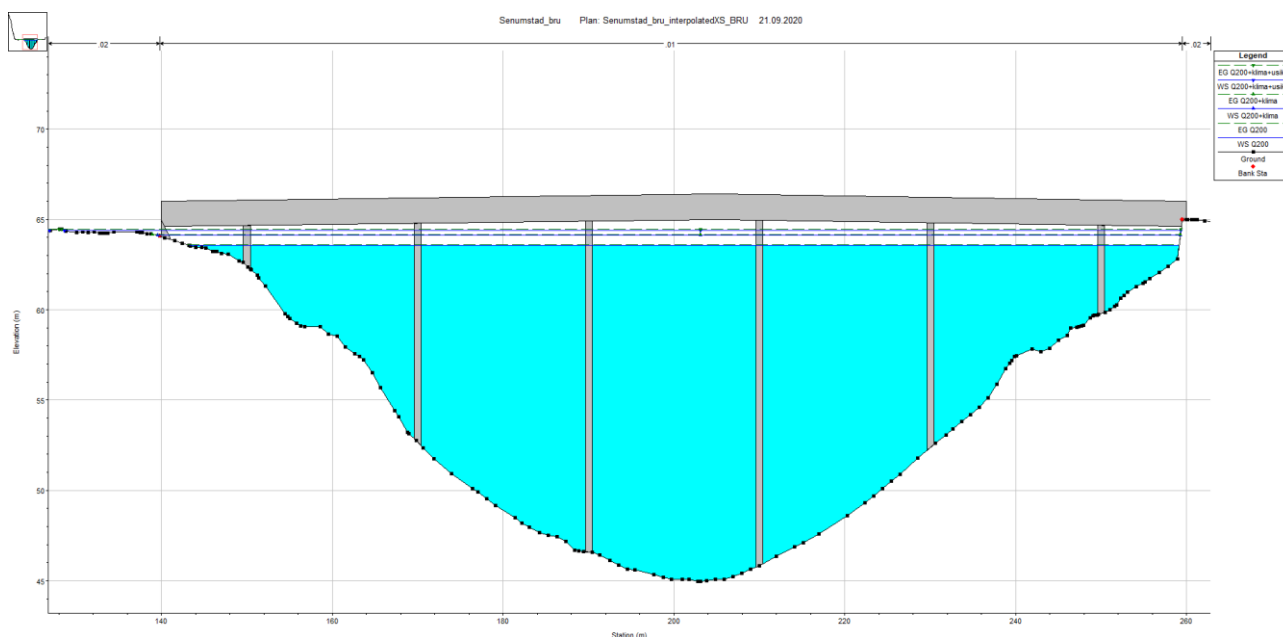
Beregnet vannhastighet i modellen er mindre nøyaktig enn beregnet vannstand, da det kan være store lokale variasjoner og fordi en 1D-modell ikke kan beskrive strømningsretninger. I naturlige elver kan erfaringsmessig vannhastighetene maksimalt blir 8 m/s. Beregnet gjennomsnittlig vannhastighet varierer langs elva. I de brede, flate partiene av Senumstadjorden er gjennomsnittlig vannhastighet under 1 m/s, mens den i de bratte strekningene nedstrøms utløpet er opp mot 8 m/s. Under Senumstadbrua er vannhastigheten for 200-årsflom med klima og sikkerhetspåslag beregnet til opp mot 1,1 m/s. Figur 4-9 viser de beregnede vannhastighetene ved en 200-årsflommen. Merk at vannhastighetene mellom profilene er gjennomsnittsverdier og at det er unøyaktigheter ved å beregne vannhastigheter i en 1D-modell.



Figur 4-9: Beregnede vannhastigheter ved 200-årsflom – utsnitt av modellen der Senumstad bru er markert

4.2.2 Ny Senumstad bru – alternativ 1

Utforming av ny Senumstad bru legges inn i Hec-Ras modellen slik som beskrevet i kapittel 4.1.6. I den hydrauliske modellen er underkant bru på høybrekket lagt til kote 65,0 moh. En grafisk fremstilling av den nye brua er vist i Figur 4-10.



Figur 4-10: Ny Senumstad bru i HEC-RAS (Alternativ 2). Dybden ved venstre brukar er 7,5m.

Etter å ha lagt inn ny bru i den hydrauliske modellen ble scenario med 200-årsflom inkludert klimapåslag modellert og deretter og deretter ble 200-årsflom inkludert klimapåslag og usikkerhetsfaktor modellert.

Uten sikkerhetsfaktor

Resultatene viser en marginal endring i flomvannstand under brua og umiddelbart oppstrøms sammenlignet med dagens situasjon. Da denne vannstanden er > 1 cm lavere, er den i prinsipp neglisjerbar. Grunnet lave vannhastigheter i Senumstadjorden forbi Senumstad bru, har brupilarene liten innvirkning på strømningsforholdene og vannhastighetene under brua.

Kravet om 0,5 m fribord under brua er ikke overholdt, da denne er planlagt med minste høyde på kote 64,60 moh. ved kanten, og vannstanden her, og over resten av snittet, ligger på kote 64,13 moh.

Med sikkerhetsfaktor

Resultatene med sikkerhetsfaktor viser at flomvannstanden under Senumstadbrua øker med 32 cm sammenlignet med scenario med kun klimapåslag. Dette gir en flomvannstand på 64,45 moh. Minste høyde under brua må settes til kote 64,95 moh. for å tilfredsstille dette kravet.

4.2.3 Ny Senumstad bru – alternativ 2

Uten sikkerhetsfaktor

Forskjellene mellom alternativ 1 og alternativ 2 er små. Oppstrøms brua er vannstanden den samme for begge brualternativer. Under brua for alternativ 2 ligger flomvannstanden på kote 64,13 moh., altså det samme som for alternativ 1. For å innfri kravet om fribord for dette scenarioet må dermed underkant bru legges til kote 64,63 moh.

Med sikkerhetsfaktor

Resultatene med sikkerhetsfaktor viser at flomvannstanden under Senumstadbrua øker med 30 cm sammenlignet med scenario med kun klimapåslag. Dette gir en flomvannstand på 64,46 moh. Sammenlignet med alternativ 1 er dette 1 cm høyere. Minste høyde under brua må dermed settes til kote 64,96 moh. for å tilfredsstille kravet om fribord.

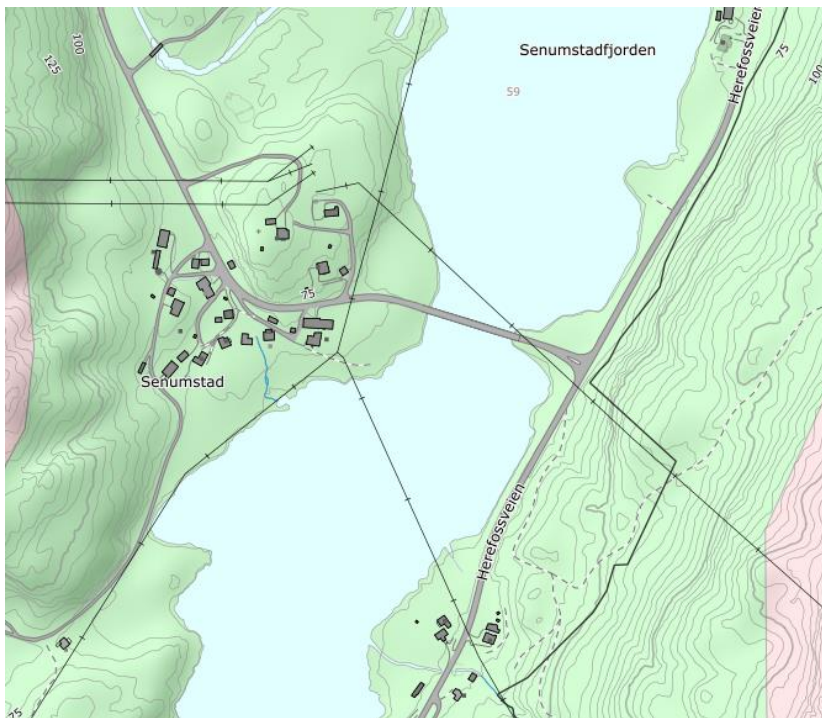
5 Vurdering av flom og erosjonsfare for ny bru

5.1 Flomfare

Slik som ny bru er prosjektert (beskrevet av Figur 4-6 og i kapittel 4.1.6) vil denne ikke stå i fare for beregnet 200-årsflom med 20% klimapåslag. Men med usikkerhetspåslag vil brua slik den er prosjektert i dag ikke tilfredsstillende krav til fribord.

5.2 Erosjonsfare

Terrenget rundt ny bru er slakt og består av morenemateriale i tynt dekke over berggrunnen. Forbi Senumstad bru er vannhastighetene lave, beregnet til rundt 1,1 m/s (maksimalt 1,4 m/s). Det anbefales at brupilarer og brukarene erosjonssikres. Faren for langsiktig bunnsenkning og bunnsenkning under flom er ikke vurdert. Det anbefales derfor at dybdene under brua kontrollmåles jevnlig og spesielt etter store flommer for å kunne sette inn tiltak før en får erosjonsskader på brua.



Figur 5-1: Løsmassekart for Senumstad bru. Grønt er tynt morene

5.3 Beregning av nødvendig steinstørrelse for erosjonssikring av alternativ 2

Alternativ 2 for ny bru består av landkar og pilarer som må erosjonssikres. Beregningene er utført iht. NVEs veileder for erosjonssikring (NVE, 2009). Da det ikke alltid er største flom som gir størst belastning på erosjonssikringen, er vannhastigheten også vurdert for en lav vannføring på 58 m³/s og en middels vannføring på 300 m³/s. I vårt tilfelle var det størst vannføring som gav høyest vannhastighet. Det er ulike formler for dimensjonering av stabil steinstørrelse for hhv. brukar og pilarer.

5.3.1 Brukar

Stabil steinstørrelse for underkritisk strømning ved brukar beregnes etter Barkdoll (2007):

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{K}{(s-1)} \frac{V_{kar}^2}{gy}$$

Her er:

D_{50} = stabil steinstørrelse (m)

$K = 1,02$ for landkar med vertikal frontvegg (-)

s = steinens relative tetthet (-)

g = tyngdens akselerasjon ($9,81 \text{ m/s}^2$)

y = vanddybde ved foten av landkaret (m)

V_{kar} = karakteristisk hastighet, se under (m/s)

Dimensjonerende steinstørrelse D_{50} må korrigeres for sidehelning på 1:1,5 (korreksjonsfaktor $C_0=1,6$) og det benyttes en sikkerhetsfaktor på 1,4. Beregnet steinstørrelse blir $D_{50} = 0,21 \text{ m}$.

5.3.2 Pilarer

Stabil steinstørrelse for erosjonssikring av bropilarene beregnes etter Lagasse (2007):

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

Her er:

D_{50} = stabil steinstørrelse (m)

K_f = formfaktor (2,3 for brupilarer med rund nese)

s = steinens spesifikke tetthet (-)

g = tyngdens akselerasjon ($9,81 \text{ m/s}^2$)

V_{lokal} = hastigheten rett oppstrøms bropilaren (m/s)

Det er benyttet en korreksjonsfaktor på 1,3 for å finne V_{lokal} . Dimensjonerende steinstørrelse D_{50} med en sikkerhetsmargin på 1,5 blir $D_{50} = 0,19 \text{ m}$.

Topp sikring bør plasseres i nivå med eksisterende elvebunn og tykkelsen bør være minst $3 \cdot D_{50}$ med $D_{maks} = 2 \cdot D_{50}$.

5.3.3 Anbefalt løsning

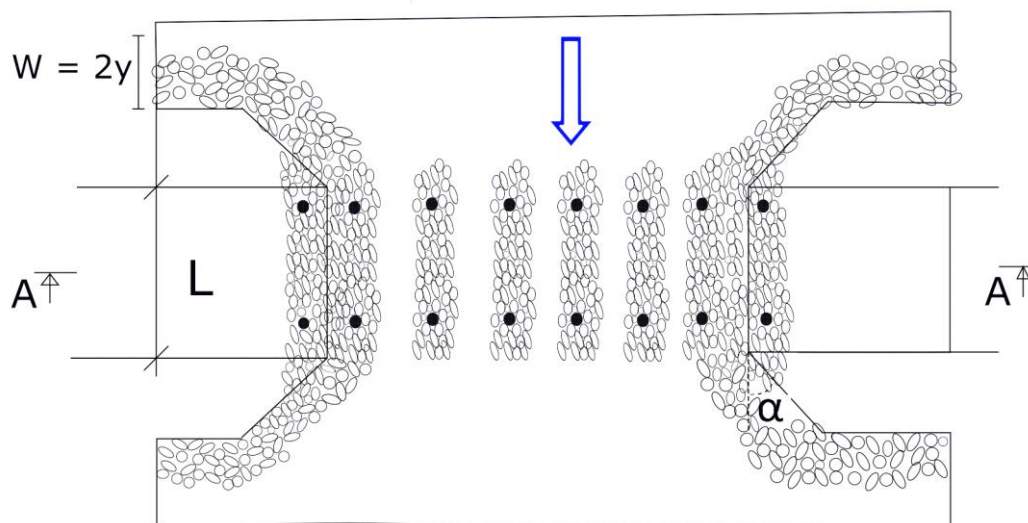
Det er utført en sensitivitetsanalyse der bunnen i bruprofilene under kote 52,5 moh er blokkert. Bakgrunnen for dette er at elvebunnsdata viser at det ligger en rygg nedstrøms brua som har ca. denne høyden, noe som vil kunne påvirke vannhastighetene ved brua. Et plott av elvebunnen fra sjøbunnskartleggingen er vist i Vedlegg 3 – Plott av sjøbunnsdata ved Senumstad bru. Sensitivitetsanalysen viser at vannhastigheten øker fra 1,2 m/s til 1,4 m/s, samt at dimensjonerende steinstørrelse D_{50} øker til 0,29 m for landkaret og 0,25 for pilarene.

Det anbefales å erosjonssikre både pilarer og landkar med steinstørrelsen $D_{50} = 0,30 \text{ m}$ med rauset samfengt sprengstein. Tykkelsen på erosjonssikringen bør minimum være $2D_{50}$. Utstrekningen til erosjonssikringen er omtrentlig vist Figur 5-2 og Figur 5-3. Der erosjonssikring plasseres i vann anbefales det å øke lagtykkelsen med 50 %. Erosjonssikringen av landkarene bør trekkes ut til første pilar som står i vann og sikres med en fotgrøft med minimum 1 m tykkelse. Denne kan med fordel også benyttes til å sikre pilaren.

Rundt pilarene bør det sikres i alle retninger med minst 2 m. Erosjonssikringen ved pilarene bør plasseres i en grop i elvebunnen, slik at topp erosjonssikring flukter med bunn i tverrprofilet. Skisser

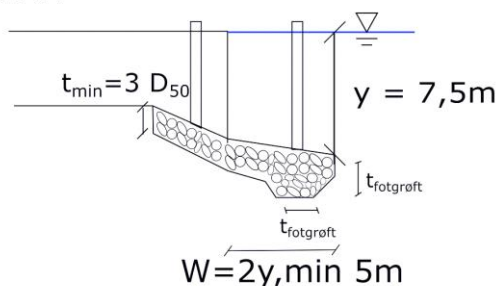
av mulig løsning for erosjonssikring er vist i Figur 5-2 og Figur 5-3 og en oppsummering av beregnede steinstørrelser og lagtykkelser er vist i Tabell 5-1.

Plan



Figur 5-2: Skisse utforming erosjonssikring. NB: Figuren er ikke i målestokk og avstanden mellom pilarene er mye større enn en får inntrykk av i figuren.

Snitt AA



Figur 5-3: Skisse erosjonssikring landkar. NB: Ikke i målestokk.

Tabell 5-1: Beregnede parametere for erosjonssikring

Parameter	Formel	Anbefalt størrelse
D_{50}	Barkdoll (2007)/Lagasse (2007)	0,30m
t_{min}	$2 \cdot D_{50} + 50\%$ i vann	0,9m
$t_{min, pilar}$	$3 \cdot D_{50} + 50\%$ i vann	1,35m
D_{maks}	$2 \cdot D_{50}$	0,6m
W	$2y$, min 5m	15m
$t_{fotgrøft}$	min 1m	1,35m

6 Konklusjon

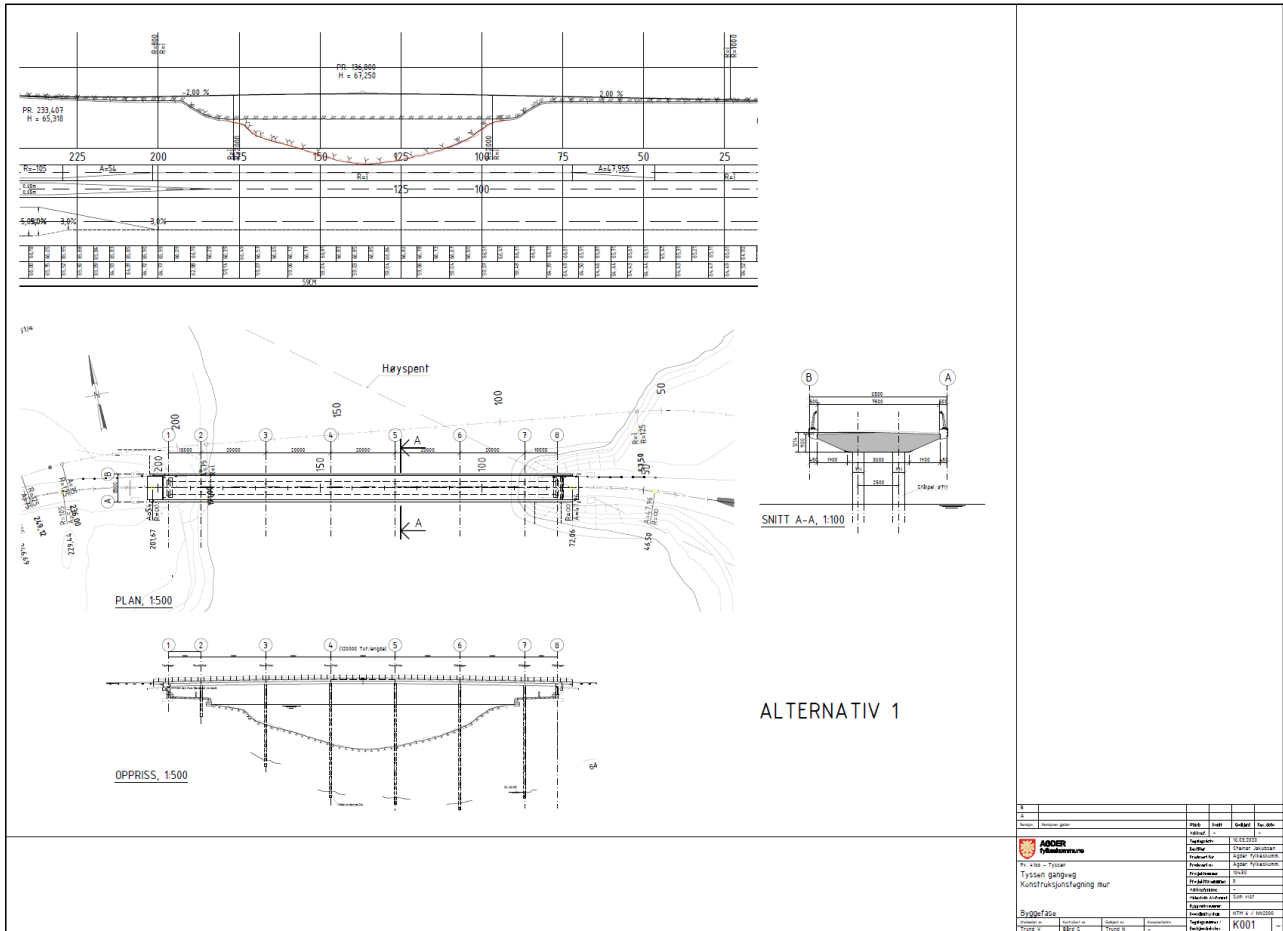
Modelleringen av 200-årsflommen (inkludert 20% klimapåslag og 10% usikkerhetspåslag) i Senumstadjorden viser at vannstanden stiger til kote 64,45 og 64,46 moh. for hhv. brualternativ 1 og 2. Med kravet om 0,5 meter fribord blir underkant bru hhv. 64,95 og 64,96 moh. for de to alternativene. Med dagens planer for bru med 6 sett piler med diameter 0,8 m, vil hverken vannstand eller vannhastigheter påvirkes i nevneverdig grad. Dette skyldes at vannhastighetene forbi Senumstad bru er svært lave og vannlinja er veldig slak/flat for hele Senumstadjorden.

7 Referanser

- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System, User's Manual, Version 5.0*. US Army Corps of Engineers.
- NVE. (2009). *Veileder for dimensjonering av erosjonssikringer av stein*. Oslo: NVE.
- NVE. (2018). *Flomberegninger for Flaksvatn i Tovdalselva*. Oslo: NVE.
- Statens vegvesen. (2015). *Håndbok N400 Bruprosjektering*. Statens vegvesen.
- Statens vegvesen. (2019). *NA-rundskriv 2019/03 Rettelsesblad til håndbok N200 Vegbygging, kapittel 2, 4, 5 og 6*. Statens vegvesen.
- Terratec. (2010). *10079 Birkenes DTM20, 10081 Birkenes DTM10*. Oslo: Terratec.
- Terratec. (2017). *NDH Birkenes-Grimstad 5pkt 2017*.

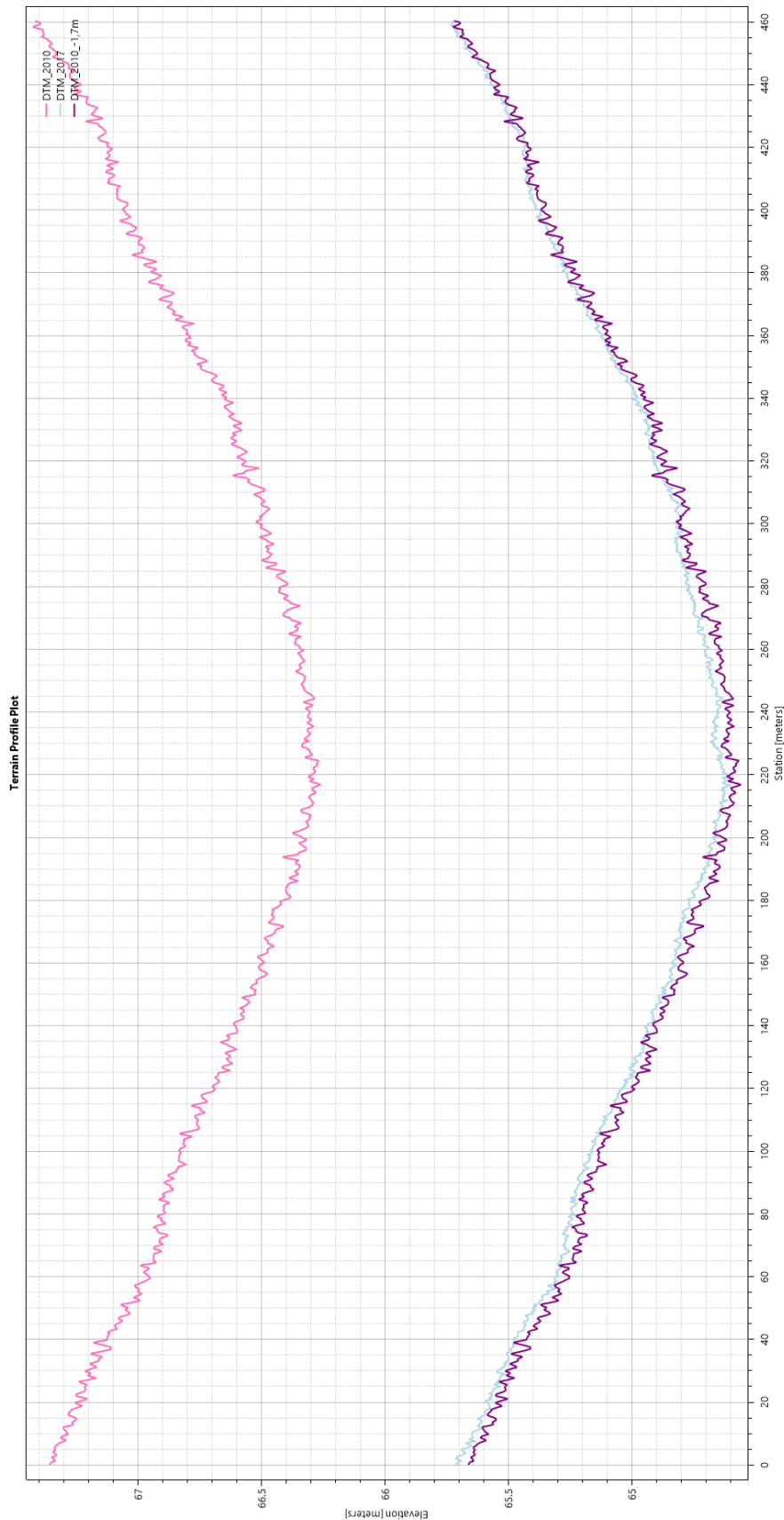
8 Vedlegg

8.1 Vedlegg 1 – Foreløpige brutegninger



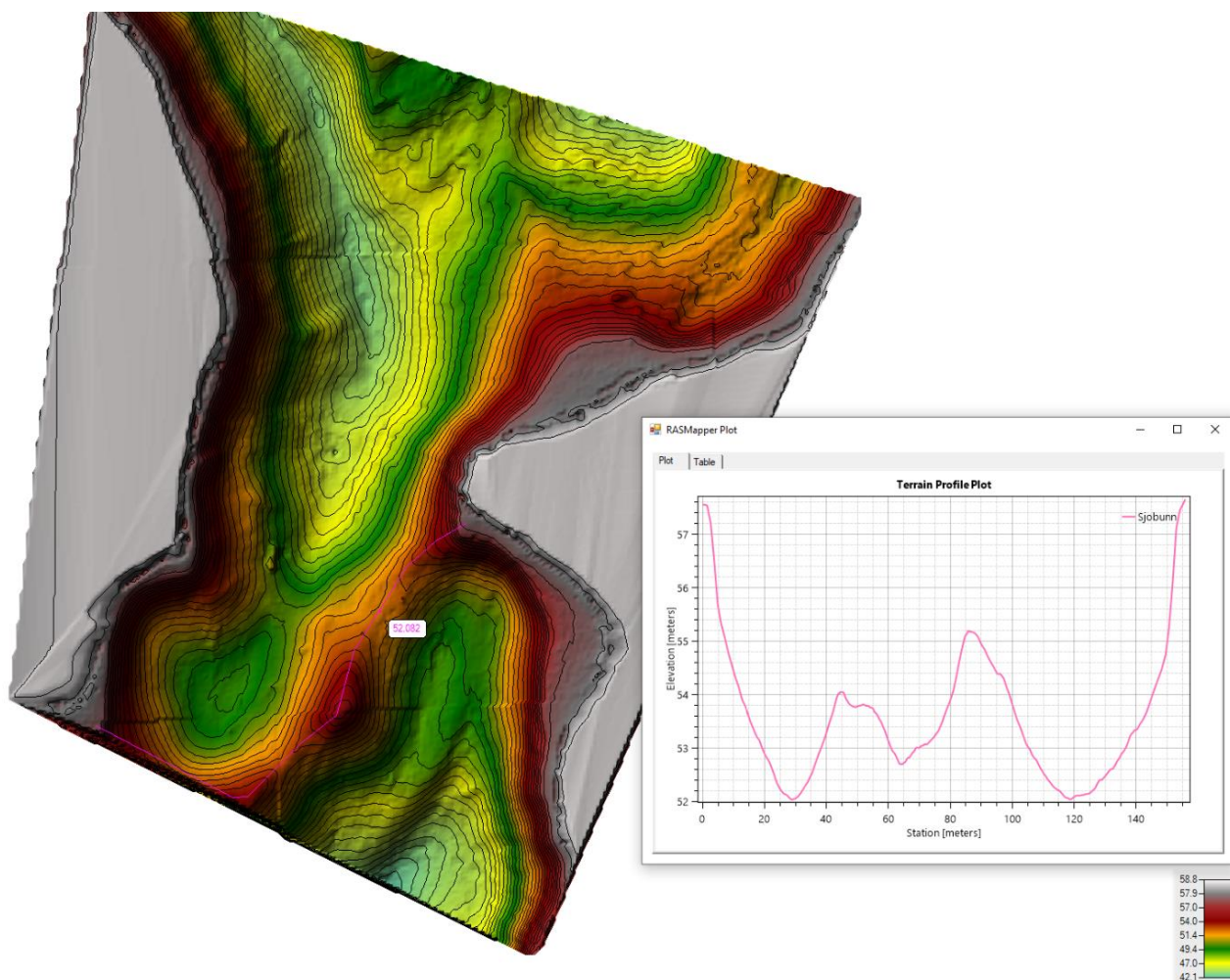
Figur 8-1: Alternativ 1 for ny bru – dagens plassering.

8.2 Vedlegg 2 – Terrenghøyde modifikasjoner hydraulisk modell



Figur 8-3: Forskjell i høyder mellom terrenghøyde modellen fra 2010 og 2017 var ca. 1,7m for en veg.

8.3 Vedlegg 3 – Plott av sjøbunnsdata ved Senumstad bru



Figur 8-4: Plott av elvebunn ved Senumstad bru. Nedstrøms brua er ligger en rygg med laveste punkt på ca.52,1moh.

8.4 Vedlegg 4 – Kalibreringsdata

VEST:

Id	Øst	Nord	Høyde	Punktnavn	Punkttype	Kvalitet	Kommentar	Bildet nr:
1	458711.451	6475382.181	59.183	V1	Kulm	God	Tydlig skille i terreng med tørt gress og kvister	1
2	458711.853	6475377.77	60.607	V2	Kulm	God	Tydlig skille i terreng med tørt gress og kvister	2
3	458565.294	6475347.897	60.454	V3	Kulm	God	Tydlig skille i terreng med tørt gress og kvister	3
4	458054.207	6473914.576	59.610	V4	Kulm	Nokså sikker	Tørt grass henger i grener	4
5	458022.809	6473958.275	59.112	V5	Kulm	God	Tydlig skille i terreng med tørt gress og kvister	5
6	458044.394	6473948.271	60.810	V6	Kulm	God	Tørt gress henger i gjerde	6
9	457998.721	6473746.132	58.061	V16	Kulm	Usikker	Tømmerstokk ligger flatt i terreng	7
10	457984.908	6473684.541	57.485	V17	Kulm	Nokså sikker	Tørt gress og kvister ligger imellom steiner, flere steder	8
11	457981.875	6473683.661	57.495	V18	Kulm	Nokså sikker	Tørt gress og kvister ligger inntil fjell	9
12	457958.793	6473670.975	57.447	V19	Kulm	God	Tydlig skille i terreng med tørt gress og kvister	10
13	457958.38	6473678.26	58.518	V20	Kulm	God	Tydlig skille i terreng med tørt gress og kvister	11
15	457960.466	6473539.337	58.115	V21	Kulm	God	Tørt gress og kvister ligger imellom steiner, flere steder	12
17	457966.93	6473525.488	57.893	V23	Kulm	Nokså sikker	Tørt gress og kvister ligger imellom steiner, flere steder	13
18	457957.646	6473511.776	57.410	V24	Kulm	Nokså sikker	Tørre kvister og gress	14
20	457959.952	6473444.056	56.356	V25	Kulm	Nokså sikker	Tørre kvister og gress	15
21	457961.155	6473444.077	57.923	V26	Kulm	Nokså sikker	Tørt grass henger i grener	16
23	457907.512	6473360.903	56.351	V30	Kulm	God	Tydlig skille i terreng med tørt gress og kvister	17

24	457893.937	6473359.653	57.268	V31	Kulm	Nokså sikker	Tørt gress henger i grener	18
25	457893.986	6473351.754	57.689	V32	Kulm	Nokså sikker	Tørt gress henger i grener	19
26	457896.556	6473330.721	56.046	V33	Kulm	God	Tørt gress i terreng	20
28	457889.841	6473298.473	55.297	V34	Kulm	God	Tørre kvister og gress ligger inntil busk	21
29	457886.042	6473285.026	56.334	V35	Kulm	Nokså sikker	Tørt gress henger i grener	22
31	457817.305	6473203.288	54.313	V40	Kulm	Nokså sikker	Tørt gress i terreng	23
32	457768.199	6473161.384	54.261	V41	Kulm	Nokså sikker	Tørre kvister og gress	24
33	457749.317	6473140.043	54.061	V42	Kulm	God	Tørre kvister og gress	25
34	457749.5	6473139.658	54.937	V43	Kulm	Nokså sikker	Tørt gress henger i grener	26
35	457681.763	6473039.065	53.225	V44	Kulm	God	Tørre kvister og gress	27
36	457675.027	6473035.516	53.445	V45	Kulm	God	Tørre kvister og gress	28
37	457658.568	6473019.671	52.832	V46	Kulm	God	Tørre kvister og gress inntil tre	29
38	457628.327	6472995.118	53.324	V47	Kulm	Nokså sikker	Tørre kvister og gress inntil stubbe	30
39	457612.547	6472961.939	52.676	V48	Kulm	Nokså sikker	Tørt gress henger i grener	31
40	457609.011	6472957.096	53.515	V49	Kulm	God	Tørre kvister og gress	32
41	457533.955	6472828.89	51.215	V50	Kulm	God	Tydelig skille i terreng med tørt gress og kvister	33
43	457524.733	6472804.677	52.328	V52	Kulm	Nokså sikker	Tydelig skille mellom vegetasjon og elvegrus	34
45	457541.88	6472724.356	49.064	V60	Kulm	Nokså sikker	Tørt gress og kvister ligger imellom steiner	35
14	457969.077	6473578.262	56.740	T-STRYK-2	STRYK	God	Målt der vannet går over til stryk	41
16	457969.191	6473568.244	55.524	B-STRYK1	STRYK	God	Målt der vannet flater ut	42
47	457545.251	6472757.786	50.210	T-Stryk8	STRYK	God	Målt der vannet går over til stryk - Laksefoss	43
46	457543.871	6472727.582	48.206	B-STRYK8	STRYK	God	Målt der vannet flater ut - Laksefoss	44

ØST:

Id	Øst	Nord	Høyde	Punktnavn	Punkttype	Kvalitet	Kommentar	Bilde nr.
1	458721.693	6475353.976	62.010	Ø1	Kulm	Nokså sikker	gammelt	pkt1
2	458720.144	6475349.030	60.520	Ø2	Kulm	God	gress og kvist	pkt2
3	458720.510	6475338.651	59.310	Ø3	Kulm	God	nyere kulm mye gress	pkt3
4	458690.589	6475359.229	59.350	Ø4	Kulm	God	rester i skråning	pkt4
5	458581.509	6475357.673	60.590	Ø5	Kulm	God	tydelig rester	pkt5
6	458595.488	6475447.170	59.343	Ø6	Kulm	God	gress og kvist	pkt6
7	458115.889	6473880.887	59.774	Ø7	Kulm	God	gress i tre	pkt7
8	458110.771	6473879.567	59.113	Ø8	Kulm	God	gress i tre	pkt8
9	458103.509	6473863.594	59.757	Ø9	Kulm	God	kvist og stokk	pkt9
10	458089.724	6473821.530	59.700	Ø10	Kulm	Nokså sikker	kvister i skråning	pkt10
11	458082.885	6473811.911	59.331	Ø11	Kulm	Nokså sikker	kvister i skråning	pkt11
12	458071.726	6473786.231	58.824	Ø12	Kulm	Nokså sikker	kvister i skråning	pkt12
13	458062.160	6473773.564	58.222	Ø13	Kulm	God	gress og kvist	pkt13
14	458045.973	6473718.864	58.303	Ø14	Kulm	God	rudballplast i stein	pkt14
15	458038.551	6473686.468	59.847	Ø15	Kulm	Nokså sikker	kvister samlet og mindre trær i kant	pkt15
16	458017.889	6473630.963	57.954	Ø16	Kulm	God	kvister og gress mellom steiner	pkt16
17	458013.527	6473603.979	58.048	Ø17	Kulm	God	kvister og gress mellom trær	pkt17
18	458014.364	6473590.374	57.856	Ø18	Kulm	God	samling av kvister og gress	pkt18
19	458008.438	6473561.396	56.306	Ø19	Kulm	God	gress og kvister på stein	pkt19
20	458003.656	6473414.480	55.300	Ø20	kulm	God	kvister og gress i stein	pkt20
21	457961.078	6473326.325	60.294	Ø21	kulm	Nokså sikker	trær som ligger i kanten, men peker ikke med strømmen	pkt21
22	457954.890	6473328.182	56.267	Ø22	kulm	God	kvister i mellom steiner	pkt22
24	457928.120	6473253.191	55.626	Ø24	kulm	God	kvister og planker	pkt24
25	457928.349	6473247.918	56.869	Ø25	kulm	Nokså sikker	tydelig kant, med kvister og diverse	pkt25

26	457915.662	6473242.667	55.048	Ø26	kulm	God	element som ligger igjen	pkt26
27	457869.696	6473161.675	54.736	Ø27	kulm	God	gress som ligger igjen mot stubbe som er utvasket	pkt27
28	457855.974	6473149.034	54.315	Ø28	kulm	God	gress og kvist som ligger igjen	pkt28
29	457843.549	6473121.115	53.971	Ø29	kulm	God	større tre og kvister som ligger igjen	pkt29
30	457815.041	6473099.139	53.043	Ø30	kulm	God	tydelig linje med gress og kvister	pkt30
31	457816.122	6473079.854	54.376	Ø31	kulm	God	tydelig linje med gress og kvister	pkt31
32	457789.908	6473066.637	53.875	Ø32	kulm	God	bank med kvister og gress som ligger innimellom	pkt32
33	457774.915	6473056.827	53.246	Ø33	kulm	God	tre med kvist presset opp i mot	pkt33
34	457726.696	6473009.630	53.024	Ø34	kulm	Nokså sikker	tre som ligger veltet, noe gress	pkt34
35	457726.745	6473009.598	53.023	Ø35	kulm	Nokså sikker	ligger litt kvister.	pkt35
36	457702.783	6472978.480	52.743	Ø36	kulm	Nokså sikker	kant/skille mellom vegetasjon	pkt36
37	457650.906	6472890.960	52.799	Ø37	Kulm	God	tydelig linje med gress og kvister	pkt37
38	457599.304	6472819.351	52.210	Ø38	Kulm	God	element som ligger igjen	pkt38
42	458010.603	6473590.898	56.579	f10	Foss	God	Kjærestrom	f10
43	458009.542	6473578.943	56.373	f11	Foss	God	Kjærestrom	
44	458005.639	6473556.178	55.665	f12	Bunn	God	nedsiden av foss	f12
45	457572.654	6472757.057	49.913	f1000	Foss	God	Laksefoss	F1000



AGDER
fylkeskommune

Agder fylkeskommune

Postboks 788, Stoa
NO-4809 Arendal

Besøksadresse Kristiansand:
Tordenskjolds gate 65

Org.nr.: 921 707 134
Bank: 3207.28.74993

Besøksadresse Arendal:
Ragnvald Blakstads vei 1

www.agderfk.no

