

DAM VASSLIVATN

MODELLFORSØK FOR UNDERSØKELSE AV
KAPASITETEN TIL FLOMLØPET

Magnhild Roe

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Morten Skoglund, IVM

Medveileder: Grethe Holm Midttømme, IVM
Odd Guttormsen, IVM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGAVE

Kandidat: *MAGNHILD ROE*

Tittel: **DAM VASSLIVATN – MODELLFORSØK FOR UNDERSØKELSE AV
KAPASITETEN TIL FLOMLØP**

1 BAKGRUNN

TrønderEnergi planlegger en utvidelse av flomavledningskapasiteten på dam Vasslivatn i Søavassdraget. Dammen er en ca 25 m høy steinfyllingsdam med skråstilt tetningskjerne av morene. Siste revurdering av dammen ble gjennomført i 2011 og godkjent av NVE i 2012. En av konklusjonene var at flomavledningskapasiteten ikke var stor nok. På grunn av dårlige og vanskelige strømningsforhold må det utføres modellforsøk av hele flomavledningssystemet.

Flomløpet består av en overløpsterskel med samlet lengde vel 80 m. Nedstrøms overløpet går vannet via en samlekanal og deretter i en ca 45° sjakt ned til flomtunnelen.

Gamle flomberegninger er fra 1987. Det ble utført nye beregninger i 2006. Dimensjonerende avløpsflom ble i 2006 beregnet til 200 m³/s og PMF er beregnet til 360 m³/s. I revurderingen fra 2011 ble det beregnet tilstrekkelig kapasitet til å ta unna dimensjonerende flom med frispelstrømning i sjakt. Videre ble kapasiteten vurdert til bare mellom 250 m³/s og 280 m³/s ved vannstand i samlekanalen lik HRV. Dette vil føre til at vannstanden stiger over topp kjerne og filter ved PMF. Ved å route PMF gjennom magasinet og ta hensyn til gjennomstrømning gjennom dammen vil maksimal vannstand bli på kote 283,2. Noe som er 1,6 m over topp tetning og 0,8 m under topp dam

NVE krever fysisk modellstudie som grunnlag for å fastlegge kapasiteten av flomavledningssystemet.

2 HOVEDPUNKT I STUDIEN

Kandidaten kan bruke alt underlagsmateriale som TrønderEnergi har sendt til laboratoriet ved NTNU eller som senere vil kunne skaffe til veie i form av rapporter, notater, beregninger og tegninger.

Oppgaven skal dekke, men ikke nødvendigvis være begrenset til hovedspørsmålene nedenfor:

1. Vurdering og sammenligning av fysisk modellforsøk og numerisk beregning av flomavledningskapasiteten på dam Innerdalen.
2. Bistå med planlegging, bygging og ferdigstilling av modellen i laboratoriet
3. Beregninger av nedstrøms vannføringskurve.
4. Kalibrering og testkjøring av modellen
5. Fastlegging av kapasiteten til dagens flomavledningssystem.
6. Vurdering av mulige feilkilder.
7. Hydrauliske vurderinger av forskjellige tiltak for å tilfredsstille krav i regelverket.
8. Eventuell ombygging av modellen og bestemmelse av ny kapasitet.

2.1 Vurdering og sammenligning av fysiske og numeriske beregninger.

De to masterrapportene: «Dam Innerdalen – Hydraulisk Analyse og Modellforsøk av Flomløp og Tappeløp» og «Numerisk modellering av overløpet på Innerdalen vannkraftdam» vurderes hver for seg og til slutt sammenlignes resultatene og evt avvik forsøkes forklart. Denne vurderingen gir kandidaten mulighet til å lære mye om fysisk modellkjøring samt evt feilkilder.

2.2 Ferdigstillelse av modellen

Bygging av modellen starter opp i disse dager. Den bygges av Sintef Byggforsk på oppdrag fra Institutt for vann- og miljøteknikk. Deltakelse i bygging av modellen gir mulighet til å gjøre seg kjent med modellen og til å bli fortrolig med utstyr og arbeidsforhold i laboratoriet.

2.3 Nedstrøms vannføringskurve

Nedstrøms vannstand er en meget viktig parameter i bestemmelsen av høye vannstander på vannføringskurva. For å redusere utstrekningen av den fysiske modellen må det utføres en vannlinjeberegning ved aktuelle vannføringer i nedstrøms ende av den fysiske modellen.

2.4 Kalibrering av modellen

Modellen må kalibreres med hensyn på normal ruhet i råsprengte tunneler og sjakter. Dette gjøres ved å legge inn ruhetselementer i de forskjellige delene av modellen og måle det resulterende falltap.

2.5 Kapasitet til flomløp

Når kalibreringen av modellen anses tilfredsstillende, fastlegges kapasitetskurven til flomoverløpet med dagens utforming.

2.6 Vurdering av mulige feilkilder

Det er viktig at den som utfører forsøkene også beskriver mulige feilkilder og at konsekvensene ved disse vurderes. Eksempler på feilkilder er målefeil og luftmedrivning.

2.7 Hydrauliske vurderinger av tiltak

Det er meget sannsynlig at modellforsøket viser at flomavledningskapasiteten ikke er tilfredsstillende. Kandidaten må derfor vurdere og foreslå løsninger som gir tilstrekkelig flomavledningskapasitet.

2.8 Evt ombygging av modell

Foreslåtte tiltak gjennomføres og flomavledningskapasitet bestemmes i den grad kandidaten har tilstrekkelig tid til dette.

3 VEILEDNING, DATA OG INFORMASJON

Førsteamanuensis II Morten Skoglund vil være hovedveileder for oppgaven. Professor II Grethe Holm Midttømme og Odd Guttormsen vil være medveiledere og vil veilede arbeidet med oppgaven og assistere kandidatene. VTA Morten Skoglund vil være kontaktperson i TrønderEnergi.

Diskusjon med og bidrag fra kolleger og medarbeidere ved NTNU, SINTEF, TrønderEnergi og andre kraftselskap anbefales. Bidrag av betydning skal imidlertid refereres til på behørig måte.

Forsøkene og analysene som er utført av kandidatene i forbindelse med oppgaven må vurderes ut fra at arbeidet er en del av studiene som kreves for tildeling av graden Master i teknologi. Kandidatene og veileder står derfor fritt til å introdusere antagelser og begrensninger som i en profesjonell forsknings- eller konsulent-kontekst kunne ses på som urealistisk eller lite relevant.

4 RAPPORTFORMAT, REFERANSER OG ERKLÆRING

Opgaven skal skrives i et tekstbehandlingsprogram og figurer, tabeller, foto etc. skal være av god rapportkvalitet. Rapporten skal inneholde et sammendrag, en innholdsfortegnelse, liste over figurer og tabeller, en litteraturliste og opplysninger om andre relevante referanser. Det skal også legges ved en signert erklæring hvor kandidaten bekrefter at det presenterte arbeidet er ens eget og at bidrag av betydning fra andre er identifisert.

Sammendraget skal ikke inneholde mer enn 450 ord og skal være egnet for elektronisk rapportering. Hele masteroppgaven kan bli publisert på internet som hel tekst.

Masteroppgaven skal ikke leveres senere enn mandag **10. juni 2013**.

Trondheim, 14. januar 2013

Morten Skoglund
Førsteamanuensis II

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet i forbindelse med faget TVM4910 Vassdragsteknikk. Det er avslutningen på masterstudiet på Bygg- og Miljøteknikk, studieretning vassdragsteknikk ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet, NTNU. Oppgaven er gjennomført ved Institutt for vann- og miljøteknikk.

Oppgaven har bestått av en praktisk del med testing i modellen og en teoretisk del med beregninger og tolkning av resultatene. Det har vært spennende og lærerikt å jobbe med et fysisk modellforsøk i laboratoriet. Eneste ulempen med modellforsøket var at modellen ikke var ferdig til kjøring før i slutten av april. Det ble derfor bare kjøring av modellen i mai. På grunn av dette gjenstår det en del ting som jeg gjerne skulle testet og sett litt mer på, men på grunn av tiden måtte jeg sette en strek før alle forsøkene var gjort.

Jeg vil takke min hovedveileder førsteamanuensis Morten Skoglund og Prosjektleder for modellforsøket Professor Odd Guttormsen for god hjelp. Takk også til Sintef Byggforsk som har bygget modellen, Geir Tesaker og Samuel Vingerhagen for hjelp i laboratoriet og med modellen, og til TrønderEnergi som er oppdragsgiver for dette prosjektet. En takk rettes også til alle andre studenter og ansatte ved NTNU som har kommet med bidrag og tips under gjennomføringen av denne masteroppgaven.

Trondheim 7. juni 2013

Magnhild Roe

Sammendrag

Flomløpet til dam Vasslivatn i Hemne kommune i Sør-Trøndelag er et lukka flomløp med overløpsterskel, sjakt, tunnel og utløp i nedstrøms elv. Dammen eies av TrønderEnergi. Revurdering av dammen i 2011 fastslo at flomløpet ikke tilfredstiller kravene i damsikkerhetsforskriften til sikker flomavledning. Derfor har TrønderEnergi blitt pålagt av NVE om å gjennomføre et modellforsøk av flomløpet på Dam Vasslivatn. Modellen er bygget i skala 1:20. Under planlegging og bygging er data fra laserskanninger og tradisjonelle oppmålinger i prototyp blitt brukt for å gjenskape forholdet i modellen på best mulig måte.

Modellen har blitt kalibrert med hensyn på normal ruhet i råsprengte tunneler. Det har blitt beregnet nedstrøms vannføringskurve ved hjelp av HEC-RAS, som gir informasjon om vannstand nedstrøms flomløpet. Dette er for å hindre for stor utstrekning av modellen.

Tre ulike utforminger av flomløpet er testet. For å hindre for høy vannstandsstigning i magasinet, er ikke pilarene som holder oppe broen over overløpsterskelen modellert i modellen. Det gjør at overløpsterskelen blir lenger. Resultatet viser at kapasiteten til flomløpet slik det er i dag er $304 \text{ m}^3/\text{s}$. Det tilfredsstiller ikke kravet til flomavledning ved PMF. Flomløpet tilfredstiller kravet til avledning av Q_{dim} forutsatt at pilarene fjernes.

Ved å utvide tunnelen ble det oppnådd god nok kapasitet ved PMF. Flomløpet får da en kapasitet på $367 \text{ m}^3/\text{s}$. Pulseringer i samlekanalen ved Q_{dim} , gjør at denne løsningen ikke tilfredsstiller kravene. Grunnen til disse pulseringene er at det oppstår vakuumbetoning i modellen. Den virkelige kapasiteten i dette området kan på grunn av luftproblematikk ikke stadfestes helt eksakt.

Den tredje løsningen består av å beholde det opprinnelige tunnelverrsnittet de første meterne av tunnelen og deretter utvide den. Det fører til en større vannhastighet i overgangen mellom sjakt og tunnel. Denne løsningen avleder både Q_{dim} og PMF i henhold til kravene i damsikkerhetsforskriften. Flomløpets maksimale kapasitet er da $360 \text{ m}^3/\text{s}$.

Summary

The spillway to dam Vasslivatn in Hemne municipal in Sør-Trøndelag is a closed spillway consisting of an overflow threshold, shaft, tunnel and outlet in downstream river. The dam is owned by TrønderEnergi. A reassessment of the dam in 2011 showed that the spillway does not satisfy the requirements in dam safety regulations to flood diversion. Therefore, TrønderEnergi has been charged by NVE to conduct a model test of the spillway on dam Vasslivatn. The model is built in scale 1:20. During the planning and construction, data from laser scans and conventional measurements in prototype has been used to recreate the condition of the model in the best possible way.

The model has been calibrated with respect to normal roughness of rock tunnels. It has been estimated a downstream stage-discharge curve using HEC-RAS, which provides information about the water level downstream the spillway. This is to prevent excessive extension of the model.

Three different designs of the spillway is tested. To prevent high water levels in the reservoir, the pillars that is holding up the bridge over the overflow threshold, is not modeled in the model. That makes the overflow threshold longer. The results show that the capacity of the spillway as it is today is 304 m³/s. The spillway does not meet the requirements for flood diversion by PMF. The spillway satisfies the requirements for flood diversion of Q_{dim} provided that the pillars are removed.

By expanding the cross-section it was obtained sufficient capacity by PMF. The spillway then get a maximum capacity of 367 m³/s. Pulsations in the collecting flue at Q_{dim} , causes the solution to not satisfy the requirements. The reason for these pulsations is that there occurs vacuum in the model. The real capacity in this area is difficult to decide, because of air entrainment problems.

The third solution consists of retaining the original tunnel cross-section the first few meters of the tunnel and then expand it. This leads to a greater water velocity in the transition between the shaft and the tunnel. This solution diverts both Q_{dim} and PMF in accordance with the requirements of the dam safety regulations. The maximum capacity of the spillway is then 360 m³/s.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Vasslivatn	1
1.2	Flomløpet	3
1.3	Flomberegninger	5
2	Bakgrunn	7
2.1	Hvorfor modellforsøk	7
2.2	Krav i Forskift om sikkerhet av vassdragsanlegg	8
2.3	Oppbygging og avgrensninger	11
2.4	Grunnlagsdata	12
3	Teori	15
3.1	Beregningsmetoder for flomløpskapasitet	15
3.2	Fysiske modellforsøk	18
3.3	Bygging av modell	24
3.4	Vannlinjeberegning	30
3.5	Friksjon	33
3.6	Luft	39

4	Resultat	41
4.1	Kapasitet til dagens flomløpssystem	41
4.2	Kapasitet til flomløpet med utvidet tunnel	46
4.3	Kapasitet til flomløpet med utvidet tunnel, men innsnevret tverrsnitt i starten av tunnelen	49
4.4	Sammenligning av vannføringskurvene	51
5	Diskusjon	53
5.1	Kapasitet dagens flomløpssystem	53
5.2	Kapasitet flomløpet med utvidet tunnel	55
5.3	Kapasitet flomløpet med delvis utvidet tunnel	56
5.4	Feilkilder	58
5.5	Diverse vurderinger	61
5.6	Flomløpet i forhold til forskriften	64
5.7	Videre forsøk	64
6	Konklusjon	66
A	Bilder av flomløpet	69
B	Byggetegninger og oppmålinger av flomløpet	73
C	Bilder av modellen	85
D	Utvidelse av modell	91
E	Vannlinjeberegning	97
F	Friksjon	99
G	Måleresultater	107
H	Nedstrøms bassengs påvirkning av oppstrøms magasin vannstand	115

Figurer

1.1	Kartutsnitt over beliggenhet av Vasslivatnet (Norgeskart).	2
1.2	Luftsiden på Dam Vasslivatn (Foto: Morten Skoglund)	3
1.3	Terskel og innløp til sjakt slik det er i dag	4
1.4	Lengdesnitt av tunnelsystemet	5
1.5	Skisse av dam og flomløp	5
2.1	Vannføringskurver ved fritt og lukka flomløp (NVE, 2005)	9
2.2	Figuren viser resultatet fra laserskanningen av innløpet til sjakta	13
3.1	Moody's diagram (NVE, 2010a)	22
3.2	Bilde av flomløpsterskelen. Dammen ligger til høyre for flomløpet på bildet.	25
3.3	Magasinet under bygging	26
3.4	Tunneldelene under montering.	27
3.5	Utløp tunnel	28
3.6	Vannføringsmåler	29
3.7	Elva nedstrøms flomløpet	31
3.8	Vannoverflateprofil. Elva renner fra høyre mot venstre i figuren.	32
3.9	Vannføringskurve nedstrøms elv.	33

3.10	Innliming av friksjonslister i tunnelen	38
4.1	Vannføringskurve for dagens flomløp uten pilarene over terskel	42
4.2	Magasin og samlekanal under avledning av Q_{dim}	43
4.3	Vannføringskurve 268 - 320 m ³ /s	43
4.4	Trykkehøyde i sjakta	44
4.5	Variasjon i overløpskoeffisient, C	46
4.6	Vannføringskurve etter utvidelse av tunnelen	47
4.7	Situasjonen samlekanalen ved avledning av PMF	48
4.8	Trykkehøyde i sjakta etter utvidelse av tunnelen	48
4.9	Isopor i overgangen sjakt/tunnel	49
4.10	Vannføringskurve med delvis utvidet tunnel	50
4.11	Trykkehøyde i sjakta med delvis utvidet tunnel	51
4.12	Vannføringskurvene for de tre forskjellige utformingene	51
5.1	Isoporbiten som ble satt inn igjen i sjakta. Verdiene er i meter i prototyp.	57
5.2	Nedstrøms bassengs påvirkning av oppstrøms magasin	60

Tabeller

1.1	Fakta om dam Vasslivatn	3
1.2	Fakta om flomløpet	4
1.3	Flomforhold	6
3.1	Skaleringsfaktorer ved Froudes modellov	23
3.2	Beregning av avstand mellom friksjonslistene	38
3.3	Beregning av avstand mellom listene etter utvidelse av tunnelen .	39
4.1	Effektiv overløpslengde og overløpskoeffisient	45

Ordforklaring

DFV	- Dimensjonerende flomvannstand
GWh	- Gigawatttimer
MW	- Megawatt
NTNU	- Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NVE	- Norges vassdrags- og energidirektorat
PMF	- Påregnelig maksimal flom

Kapittel 1

Innledning

Flomløpet til dam Vasslivatn i Hemne kommune er et lukka flomløp med overløpsterskel, sjakt, tunnel og utløp i nedstrøms elv.

Kapasiteten til flomløpet antas å være for liten etter dagens krav til flomavledning. Med bakgrunn i dette har TrønderEnergi, pålagt av NVE, gitt NTNU og vassdragslaboratoriet oppdrag i å utføre et modellforsøk av flomavledningskapasiteten til dam Vasslivatn. Denne masteroppgaven er en del av dette prosjektet.

Formålet med modellstudien er å utarbeide en vannføringskurve for flomløpet. Dersom dette viser at kapasiteten ikke er god nok i henhold til krav fra NVE skal modellen bygges om og ny vannføringskurve må utarbeides. Målet er å komme frem til en løsning til utbedring av flomløpet som TrønderEnergi kan bruke.

Byggingen av modellen startet i januar 2013 og var ferdig og klar for kjøring i april 2013. Forsøkene ble gjort i mai 2013.

1.1 Vasslivatn

Dam Vasslivatn ligger i Hemne kommune i Sør-Trøndelag, se kart, figur 1.1. Dammen ligger i Sjøavassdraget og eies av TrønderEnergi.



Figur 1.1: Kartutsnitt over beliggenhet av Vasslivatnet (Norgeskart).

Ved vannstander høyere enn kote 277.10 utgjør Vasslivatn og Søvatn ett sammenhengende magasin. Vegetasjonen i tilsigsfeltet består av både gran og furu i lavereliggende deler, ellers fjellbjørkeskog opp til skoggrensa som ligger på ca 500 moh. Feltet strekker seg fra 47 til 1039 moh.

Vasslivatn er inntaksmagasinet til Sjøa Kraftverk (Sand, 2006). Sjøa kraftverk har en installert effekt på 37 MW og en årlig produksjon på 192 GWh (TrønderEnergi).

Dam Vasslivatn er en steinfyllingsdam med sentral tetting av morenekjerne. Dammen er 140 meter lang og 25 meter høy. Figur 1.2 viser luftsiden av dam Vasslivatn. Dammen ble bygget i 1967-1968. Den er fundamentert på fjell på søndre side og på løsmasser på nordre side (Dalsnes, 2011). Se tabell 1.1 for fakta om dammen.



Figur 1.2: Luftsiden på Dam Vasslivatn (Foto: Morten Skoglund)

Tabell 1.1: Fakta om dam Vasslivatn

Damhøyde [m]	25
Kronelengde [m]	140
Damkrone nivå [moh]	284
Tetningskjerne nivå [moh]	281.5
Konsekvensklasse	3
HRV-LRV	279.8-260.0
Magasinvolum [mill.m ³]	43
Byggeår	1967-1968

1.2 Flomløpet

Flomløpet er et lukka flomløp med overløpsterskel hvor vannet ledes inn i en sjakt via en utsprengt kanal med fall mot sjaktmunningen, se figur 1.3. På terskelen står det 21 søyler med en diameter på 24 cm som bærer ei bro over terskelen. Sjakta er 20 meter lang og har en helning på 45°. Den ledes inn på omløpstunnelen rett etter overgangen fra sjakt til tunnel. Tunnelen er horisontal og 73 meter lang. Siste del av tunnelen har en helning oppover og terskelen ved

utløpet ligger så høyt at tunnelutløpet er dykket ved de fleste vannføringer. Flomløpet kalles derfor et flomløp med vannlås. Både sjakt og tunnel har form som et klassisk tunneltverrsnitt. Strossing av flomløpstunnelen ble utført i 1990 (Dalsnes, 2011). Se tabell 1.2 for fakta om flomløpet.

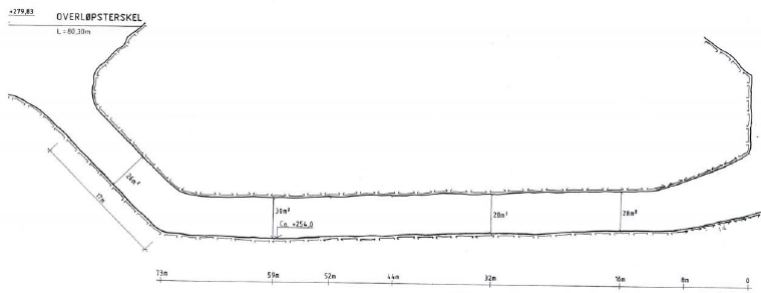


Figur 1.3: Terskel og innløp til sjakt slik det er i dag

Tabell 1.2: Fakta om flomløpet

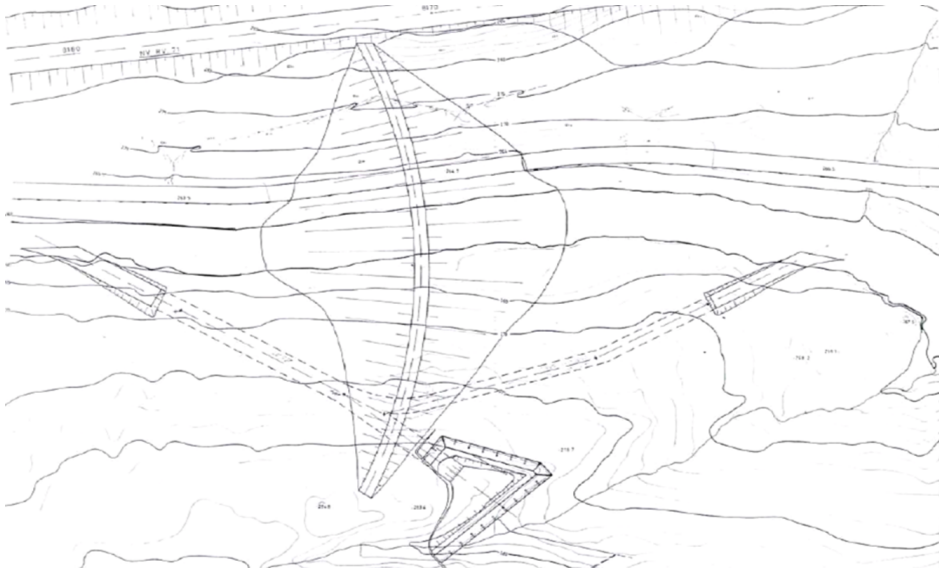
Overløpets lengde (fratrasket søylene) [m]	80.3
Fri høyde mellom topp terskel og underkant bru [m]	2.0
Tverrsnitt skråsjakt [m ²]	26
Helning skråsjakt [°]	45
Lengde skråsjakt [m]	20
Tverrsnitt tunnel [m ²]	28
Lengde tunnel [m]	73
Tunnelheng utløp [moh]	261

Figur 1.4 viser et lengdesnitt av tunnelsystemet. Figuren illustrerer det lukkede systemet ved at tunnelutløpet ligger over bunnen av tunnelen.



Figur 1.4: Lengdesnitt av tunnelsystemet

Figur 1.5 viser hvordan flomløpet ligger i forhold til fyllingsdammen og hvordan omløpstunnelen kommer inn på flomtunnelen rett nedenfor sjakta.



Figur 1.5: Skisse av dam og flomløp

1.3 Flomberegninger

Nye flomberegninger for dam Vasslivatn ble utført i 2006 (Sand, 2006) og viste en økning i forhold til tidligere flomberegninger. Tabell 1.3 viser resultatene av denne.

Tabell 1.3: Flomforhold

	Q_{dim}	Q_{PMF}
Avløpsflom, Q [m^3/s]	200	360
Tilløpsflom, Q [m^3/s]	207	366
Maksimal tillatt vannstandsstigning [m]	1.15	1.65
Maksimal tillatt vannstandsstigning [moh]	281.0	281.5

Retningslinjer for flomberegninger skal klassifiseres på grunnlag av tilgjengelig datagrunnlag for gjennomføring av beregningen. For Vasslivatn finnes det ikke tilgjengelige tidsserier av uregulert vannføring målt i vassdraget etter 1966. Det finnes heller ikke tidsserier av vannføring målt i nærliggende vassdrag med lik hydrologisk karakteristikk. Flomberegningene er derfor klassifisert i klasse 4: “Begrenset hydrologisk datagrunnlag” (NVE, 2011). Dette fører med seg en del ekstra krav og sikkerhetsfaktorer som dameier må ta hensyn til. Denne rapporten har ikke tatt hensyn til dette, men antatt at de gjeldene flomberegningene er de gyldige.

Retningslinjene, se kapittel 2.2.1 skriver utfyllende om kravene i damsikkerhetsforskriften. Tabell 1.3 viser noen av kravene.

Kapittel 2

Bakgrunn

2.1 Hvorfor modellforsøk

Dam Vasslivatn er en steinfyllingsdam med et lukka flomløp. Det ble i 2006 gjort flomberegninger for Dam Vasslivatn. Disse viser $Q_{\text{Dim}} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ og $Q_{\text{PMF}} = 360 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sand, 2006). Da dammen ble revurdert i 2011 (Dalsnes, 2011) ble det konkludert med for liten kapasitet på flomløpet.

Kravet til flomløpskapasitet er gitt i Forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg (Damsikkerhetsforskriften, 2009), se kapittel 2.2.

Det ble under revurderingsbefaringen påpekt ugunstige strømningsforhold for den delen av overløpet som ligger inn mot fyllingsdammen på grunn av trangt innløp. Det ble også påpekt at utformingen av overløpet ytterst i “andenebbet” heller ikke er optimal (NVE, 2010b).

Ved gjennomgang av revurderingsrapporten (NVE, 2012a) ble det konkludert med at det ikke bør tillates at vannstanden stiger høyere opp enn 1/3 av sjakta. Dette er for å ta hensyn til blant annet pulsasjoner i vannstanden. Det innebærer at flomløpet ikke har tilstrekkelig kapasitet ved DFV. NVE kom derfor frem til at et modellforsøk ville være fordelaktig, særlig med tanke på de uoversiktlige innstrømningsforholdene (NVE, 2012a). I et brev fra NVE til TrønderEnergi datert 12 mars 2012 står det (NVE, 2012b):

“Siden dam Vasslivatn har et lukket flomløp med uryddige innstrømningsforhold forutsetter vi i tillegg at det gjennomføres modellforsøk som grunnlag for utbedringen av flomavledningskapasiteten”.

På bakgrunn av denne forutsetningen blir det på oppdrag fra TrønderEnergi utført et modellforsøk av flomløpet på dam Vasslivatn ved vassdragslaboratoriet

på NTNU. Det er ikke tidligere utført modellforsøk på dam Vasslivatn (Dalsnes, 2011).

2.2 Krav i Forskrift om sikkerhet av vassdragsanlegg

Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg, damsikkerhetsforskriften (2009), stiller krav til hvordan flomavledning skal skje og hvordan kapasitet skal beregnes. Her er et utvalg av leddene som omtaler flomavledning.

Damsikkerhetsforskriften (2009) §5-8 tredje ledd sier: *“Dammer skal ha flomløp med tilstrekkelig kapasitet til å avlede dimensjonerende avløpsflom ved dimensjonerende flomvannstand. Ved utforming av flomløp skal det tas hensyn til luftbehov og fare for erosjon av utsatte flater, trykkpulsasjoner, tilstopping og ising”*.

Sjette ledd sier: *“Flomavledningen skal fortrinnsvis skje ved faste overløp med standard overløpsprofil, fastlagt for dimensjonerende avløpsflom. Utforming som avviker fra dette kan benyttes dersom avledningskapasiteten og stabiliteten er tilfredsstillende dokumentert”*.

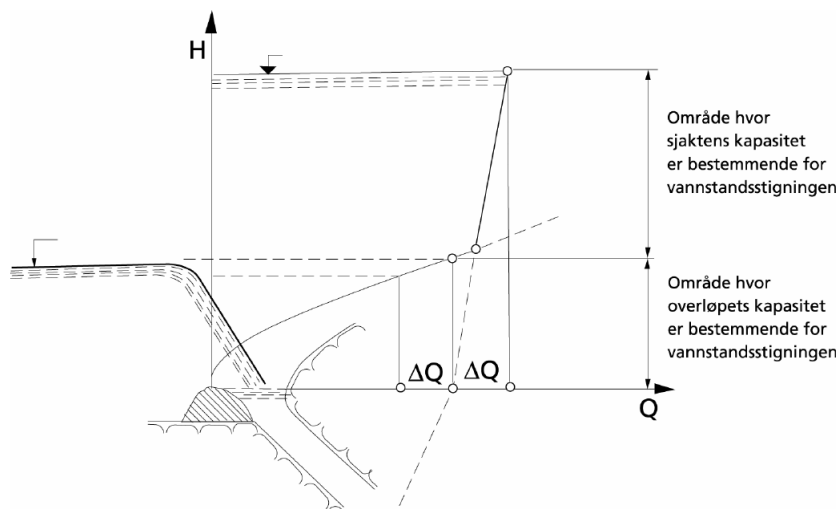
Videre sier sjuende ledd: *“Dersom flomavledning skjer gjennom sjakt eller tunnel (lukket avløp), skal disse utformes slik at det blir frispelstrømning i øvre del av systemet ved avledning av dimensjonerende avløpsflom. Overgangen fra overløpsterskel til sjakt eller tunnel skal gis en god hydraulisk utforming, slik at denne delen av flomløpet ikke blir begrensende for kapasiteten. Ved avledning av påregnelig maksimal avløpsflom, tillates rørstrømning ved at hele tverrsnittet går vannfylt, forutsatt at overløpet er bestemmende for vannstanden i magasinet”*.

Niende ledd sier: *“Flomløpets totale kapasitet i forhold til vannstander og lukeåpninger skal beregnes ut fra anerkjente metoder, eventuelt på grunnlag av hydrauliske modellforsøk eller prøvetapping der erfaringsgrunnlaget for beregningene er mangelfullt eller lokale forhold tilsier det”*.

2.2.1 Retningslinjer

Retningslinjer for flomløp (NVE, 2005), inneholder utfyllende informasjon om hvordan kapasitet kan beregnes og vurderes. Dam Vasslivatn har et lukka flomløp. Dersom et overløp går over i en lukka vannvei, som sjakt eller tunnel, skal det tas spesielle hensyn ved dimensjonering og utforming. Konsekvensene ved økning utover en forutsatt vannføring er vesentlig forskjellig ved et lukka avløp i

forhold til et åpent avløp. En liten stigning i vannstanden i et avløp som allerede går fullt vil gi en betydelig stigning i vannstanden, se figur 2.1



Figur 2.1: Vannføringskurver ved fritt og lukka flomløp (NVE, 2005)

Dammen er i bruddkonsekvensklasse 3 (Dalsnes, 2011). I retningslinjer for flombe-regninger (NVE, 2011) står det at Q_{1000} skal brukes som dimensjonerende flom, Q_{dim} . For ulykkesflom skal Q_{PMF} brukes. For Vasslivatn er $Q_{dim} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ og $Q_{PMF} = 360 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sand, 2006).

Retningslinjer for flomløp (NVE, 2005) legger følgende forutsetninger til grunn for beregning av kapasitet:

- Q_{dim}
 - Forutsetter frispelstrømning i systemet
 - Maksimalt 70 % av tverrsnittet går vannfylt
- Q_{PMF}
 - Hele tverrsnittet kan gå vannfylt
 - Overløpsterskelen skal være bestemmende for vannstanden i magasinet

Veileder for fyllingsdammer (NVE, 2012c) stiller krav til fribord ved flom.

- Q_{dim}
 - Topp sentral tetting skal ligge minimum 0.5 meter over nivå for dimensjonerende flomvannstand, tillagt vindoppstuvning.
- Q_{PMF}
 - Tillater at vannet stiger opp til topp tetting, tillagt vindoppstuvning. Det kan tillates at noe vann renner over kjernen så lenge damtopp og nedstrøms skråning tåler det.

For Vasslivatn betyr det at tillatt vannstandstigning ved Q_{dim} er 1.15 meter og ved Q_{PMF} 1.65 meter. Dette tilsvarer kotehøyde 281.0 og 281.5 meter, se tabell 1.3.

Ved dimensjonering og kontroll av systemets kapasitet bør man gjøre antagelser som gir systemet gunstige forhold (liten friksjon) og ugunstige forhold (stor friksjon) (Backe, 1993). Det skal spesielt legges vekt på at overgangen fra samlekanalen nedstrøms overløpet til sjakt/tunnel gis en god traktformet utforming (NVE, 2005).

2.2.2 Flomløpet i forhold til forskriften

Da dam Vasslivatn ble revurdert i 2011 ble flomløpskapasiteten beregnet ved bruk av beregningsmetodikken og forutsetningene fra Retningslinjer for flomløp. Beregningene konkluderte med at det vil være god nok kapasitet for flomløpet ved avledning av Q_{dim} i forhold til kravet om at bare 70 % av flomløpet er vannfylt. Siden sjakten er kort, har NVE kommet frem til et krav om vannsnaden ikke skal stige lenger opp enn 1/3 i sjakta. Dette innebærer at flomløpet ikke har tilstrekkelig kapasitet ved avledning av Q_{dim} (NVE, 2012a). Ved PMF vil ikke flomløpet klare å avlede Q_{PMF} . Det skyldes at vannstanden i tunnelsystemet stiger over nivå for overløpsterskelen (Dalsnes, 2011). Beregningene viser også at med dagens lengde på flomløpsterskelen vil vannstanden i magasinet stige over kravet til fribord på tetningskjernen i fyllingsdammen (NVE, 2012a).

Ved dagens situasjon på dam Vasslivatn er det derfor flere punkter som ikke tilfredstiller damsikkerhetsforskriftens krav til flomavledning.

- Flomløpet har ikke tilstrekkelig kapasitet ved DFV.
- Overløpet er ikke bestemmende for vannstanden i magasinet ved avledning av PMF.
- Vannstandstigningen i magasinet overstiger kravet til fribord på tetningskjernen ved DFV og PMF.

2.3 Oppbygging og avgrensninger

Oppgaven består av følgende hoveddeler:

2.3.1 Vurdering og sammenligning av fysiske og numeriske beregninger

Første del består av å sammenligne to kapasitetsberegninger av det samme flomløpet, flomløpet på Innerdalsdammen, men som er utført ved to forskjellige metoder. Røneid og Sæter (2007) gjorde et fysisk modellforsøk for å finne kapasiteten. Vingerhagen (2012) gjorde numeriske beregninger på det samme flomløpet for å finne kapasiteten. Forskjellene og likhetene, og fordelene og ulempene skal vurderes. Dette er ment som en innledning til det fysiske modellforsøket og vil bare gi en rask oversikt uten å gå i detaljer.

2.3.2 Ferdigstillelse av modellen

Modellen blir bygget av Sintef Byggforsk. Oppstart modellbygging er januar 2013. Det blir byggemøter hver uke hvor framdrift og ulike løsninger i modellbyggingen skal være tema. Når Sintef er ferdig med modellen monteres PC og loggerutstyr for modellkjøringen. Den skal lese av vannstand i magasinet, vannstand i elva nedstrøms tunnelen, trykkehøyde i sjakta og falltap i tunnel. Når vannet blir satt på modellen må de siste justeringene av modellbyggingen gjøres ved å tette eventuelle lekkasjer og hindre at vannet spruter utover i laboratoriet.

2.3.3 Nedstrøms vannføringskurve

For å redusere utstrekningen av den fysiske modellen blir den kuttet 15 meter ned i elva. Det må da utføres en vannlinjeberegning for å finne vann-nivået for ulike vannføringer i dette punktet i elva. Dette gjøres ved hjelp av dataprogrammet HEC-RAS og profilmålinger av elva.

2.3.4 Kalibrering av modellen

For at modellen skal være mest mulig lik prototypen og gi så gode resultater som mulig må modellen kalibreres med hensyn på normal ruhet i råsprenge sjakter og tunneler. Dette gjøres ved å legge inn ruhetselementer og måle det resulterende falltap med trykksensorer.

2.3.5 Kapasitet til flomløp

Når kalibreringen er god nok skal kapasiteten til systemet slik det er i dag bestemmes. Dette gjøres ved å finne vannføringskurven. Kapasiteten til flomløpet med pilarene til broa på terskelen vil ikke bli testet da det er sikkert at disse må fjernes for å hindre for høy vannstandsstigning i magasinet.

2.3.6 Vurdering av mulige feilkilder

Det skal vurderes hvilke feilkilder som ligger i et fysisk modellforsøk og ut fra dette gjøre tiltak som i størst mulig grad resuserer feilkildene.

2.3.7 Hydrauliske vurderinger av tiltak

Hvis flomløpet viser for liten kapasitet, må nye løsninger vurderes for å få tilstrekkelig kapasitet.

2.3.8 Ombygging av modell

Er kapasiteten for dårlig må modellen bygges om slik det vil være mest hensiktsmessig å gjøre forbedringer i prototypen, for at den tilfredstiller kravene til flomavledningskapasitet.

Ved bygging av modellen tas det hensyn til at ombygging må til for å få god nok kapasitet. Det er regnet ut nødvendig tverrsnitt i tunnelen ved håndberegninger. Tunnelen bygges etter denne størrelsen. For å gjøre forsøk med dagens tunnelstørrelse limes det inn isopor i bunnen av tunnelen for å redusere tverrsnittet.

Nødvendig terskellengde er beregnet. Ut fra dette viser det seg at dersom pilarene som holder broen over terskelen oppe ikke bygges, vil terskellengden være lang nok til å hindre for høy vannstandsstigning i magasinet. Broen blir derfor ikke laget i modellen.

2.4 Grunnlagsdata

2.4.1 Befaring

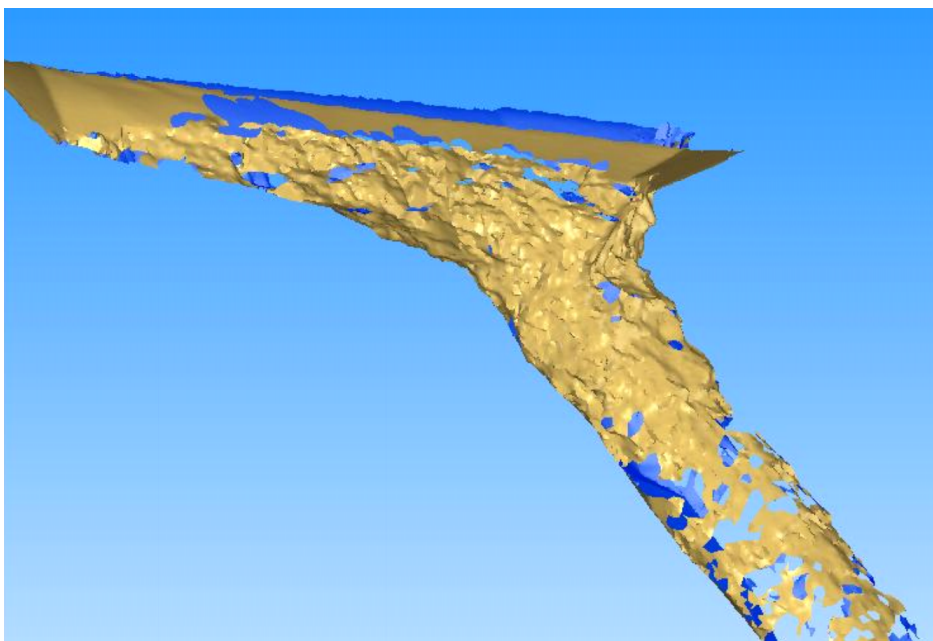
7. juni 2012 var førsteamanuensis Morten Skoglund fra TrønderEnergi/NTNU, professor Grethe Holm Midttømme NVE/NTNU og undertegnede på befaring

til flomløpet på dam Vasslivatn. Vannstanden var da akkurat på HRV. Det ble sett på overløpsterskelen, samlekanalen og innløp til sjakt, utløp tunnel og nedstrøms elv. Bilder fra befarings finnes i vedlegg A. Bildet fra flommen er tatt av Morten Skoglund våren 2012.

Morten Skoglund og undertegnede har også vært å sett på flomløpet ved to anledninger vinteren 2013. En gang med andre studenter og en gang med prosjektleder, professor Odd Guttormsen. Befaringen sommeren 2012 var mest nyttig og bildene fra denne befarings har blitt brukt i ettertid under bygging av modellen. I vinter var det en del snø og da er det ikke like lett å få et inntrykk av flomløpet.

2.4.2 Kart og tegninger

Det finnes byggetegninger av flomløpet fra 1967. I tillegg er det gjort oppmålinger i to omganger. De første målingene er gjort i desember 2004. De andre målingene er gjort i desember 2012 for å få de dataene som manglet til dette modellforsøket. Det er Nidaros oppmåling som har stått for oppmålingene. Det har blitt brukt laserskanning for å kartlegge innløpet til sjakta, se figur 2.2. Oppmålinger av overløpsterskelen fra 2012 viser at den ikke er bygget slik byggetegningene fra 1967 viser. Terskelen er bygget litt rundere og ikke så skarpe hjørner som byggetegningene viser.



Figur 2.2: Figuren viser resultatet fra laserskanningen av innløpet til sjakta

I elva nedstrøms flomløpet er det målt opp tverrprofiler med 5 meter avstand mellom hver, 120 meter ned i elva. Ved flom er vannstanden i elva høyere enn de oppmålte tverrprofilene. Tverrprofilene er derfor tegnet opp til en høyere kotehøyde ved hjelp av høydekoter og avstand på kart fra www.norgeskart.no.

Se tillegg B for byggetegninger og oppmålingsdata av flomløpet.

Kapittel 3

Teori

3.1 Beregningsmetoder for flomløpskapasitet

Her følger ulike beregningsmetoder for flomløpskapasitet.

3.1.1 Håndberegninger

Retningslinjer for flomløp (NVE, 2005) beskriver hvordan avledningskapasiteten kan beregnes ved håndberegninger. Denne metoden egner seg best på flomløp med enkle strømnings situasjoner som fri overløpsterskel. Ved beregning av lukka flomløp inkluderer håndberegning en rekke tapkoeffisienter for blant annet innløp, utløp, arealendringer, retningsendringer og friksjon. Dette er faktorer som har stor innvirkning på resultatet, men som kun finnes ved empiriske metoder. En matematisk beregning av falltapet vil da i noen tilfeller bli ren gjetning. Denne metoden er derfor ofte ikke tilstrekkelig for å dokumentere kapasiteten til lukka flomløp.

3.1.2 Numeriske beregninger, CFD

CFD står for beregningsmessig fluiddynamikk og er vitenskapen om beregning av fluidstrømning og relaterte variabler ved bruk av datamaskin. Grunntanken er å dele fluidgeometrien inn i celler som lager et gitter (Olsen, 2011 a). Deretter løses ligninger for ukjente variabler i hver celle (Olsen, 1999). Ligningene blir diskretisert ved å transformere partiell differensialligning til en ny ligning, hvor variabelen i en celle er en funksjon av variabelen i nabocellen. Den nye

funksjonen kan bli sett på som et vektet gjennomsnitt av konsentrasjonen i nabocellene. Mange CFD-programmer bruker endelig volum metode. Dette er en metode som formulerer de matematiske ligningene over beregningsgitteret slik at de kan løses numerisk ved hjelp av datamaskin (Olsen, 2011 a).

Bruk av CFD har de senere årene blitt mer brukt i takt med økt datamaskin-kapasitet. Det er mye tid og penger å spare på å bruke en CFD-modell i stedet for et fysisk modellforsøk, men foreløpig godkjenner ikke NVE dette til å påvise kapasitet av lukka flomløp. Fordelen med CFD-modeller er at det er lettere å gjøre endringer enn i en fysisk modell og kan på den måten være et nyttig verktøy i utformingen av nye flomløp og forbedring av utformingen på gamle flomløp (Roe, 2012).

3.1.3 Sammenligning av numerisk og fysisk modell

I 2007 ble det gjort et fysisk modellforsøk på det lukka flomløpet til Innerdalsdammen i Tynset kommune i Hedmark (Røneid & Sæter, 2007). Vingerhagen (Vingerhagen, 2011) gjorde i 2011 et numerisk modellforsøk på det samme flomløpet. Målet med studiet var å finne ut om STAR CCM+, som er et CFD-program, var egnet til å finne kapasiteten til dette flomløpet. Resultatene fra den numeriske modellen ble sammenlignet med resultatene fra den fysiske modellen.

Flomløpet på Innerdalsdammen består av en overløpsterskel, samlekanal og ei sjakt med helning 45° som ender i et samløp hvor også omløpstunnelen er koblet til. Fra samløpstunnelen går vannet gjennom en avløpstunnel og ut i elva nedstrøms dammen. I modellene er avløpstunnelen lenger enn i virkeligheten og ender i en kum. I flomløpet til Innerdalsdammen er det frispellstrømning i systemet ved lave vannføringer og fylt tverrsnitt i tunnelen ved høye vannføringer (Røneid & Sæter, 2007).

I en CFD-modell må turbulensmodell, type og størrelse på gitter og tidssteg velges. I den fysiske modellen ble det testet både med og uten ruhet i tunnelen. Det ble i det fysiske modellforsøket inkludert ei luftesjakt for å hindre negativt trykk (sug) i den skrå sjakten. Modellen ble testet både med og uten denne luftesjakten. Det vil si med og uten tilgang på luft. Dette viste at kapasiteten ved høye vannføringer i stor grad avhenger av ruhet og luftinnblanding.

Resultatene viste at CFD-modellen beregnet vannføringskurven ved frispellstrømning i systemet med en høy grad av nøyaktighet. Det ble beregnet et avvik på bare 5 %. Vannføringskurven var da uavhengig av de testede tidsstegene, turbulensmodell og gitterstørrelse. Nøyaktigheten til modellen ble redusert når systemet gikk delvis vannfylt. Energitapet i tunnelen begrenser da kapasiteten. Aviket var på 15 %. Grunnen til dette er mest sannsynlig ustabilitet som følge

av luftinnblanding i tunnelen. Ulik mengde luft gir varierende størrelse på luftlommer i tunnelen, noe som leder til ulike singulærtap i tunnelen (Vingerhagen, 2011).

Vingerhagen (2011) konkluderte med at det var lettere å forstå strømningssituasjonen i CFD-modellen enn i den fysiske modellen. Det var ikke mulig å observere strømningsfeltet og luftboblene i rørene i den fysiske modellen da de var bygd i et ugjennomsiktig materiale. I CFD-modellen ga fargegrafikk bra informasjon om luftkonsentrasjoner, trykk og hastighetsvektorer. Valg av turbulensmodell har innvirkning på resultatene. Avvikene mellom turbulensmodellene var størst ved bruk av lange tidssteg på grunn av dårlig konvergens.

CFD-modellen ble laget flere år etter den fysiske modellen, og denne var revet da CFD-modellen ble laget. CFD-modellen var derfor basert på samme tegninger som den fysiske modellen. Det var ikke mulig å kontrollere om modellene var like hverandre på andre måter enn å studere gamle tegninger og bilder av den fysiske modellen. Dette førte til usikkerheter i likheten mellom modellene. Dette gjelder avløpstunnelen, ruhet i sjakta og rundingsgraden i sjaktinnløp. Det har gjennom CFD-modellen blitt avdekket feil ved det fysiske modellforsøket. Dette gjelder geometriske feil, som at den fysiske modellen ikke stemmer helt med tegningene den skulle vært bygget etter, og at det oppstår sug i det siste avløpsrøret i modellen der vannet skulle føres ned under gulvet i laboratoriet. Feilen i den fysiske modellen ble antatt å være feil diameter på sjakta. Når denne feilen ble funnet og utbedret i CFD-modellen, viste resultatene at det var god sammenheng mellom CFD-modellen og den fysiske modellen (Vingerhagen, 2011).

Totalt ble avviket mellom CFD-modellen og fysisk modell på $\pm 10\%$. Dette var ikke stort avvik, men resultatene fra simuleringen var veldig ustabile som følge av avløpstunnelen. Det var nesten tilfeldig om det oppsto luftinnsugning i avløpstunnelen eller om avløpstunnelen var vannfylt helt til utløpet. Hvis det hadde vært eksakt lik geometri i CFD-modellen og den fysiske modellen kombinert med korte tidssteg, ville sannsynligvis resultatene vært tilnærmet perfekte for simuleringen hvor luft blir tilsatt sjakta, og innenfor et avvik på 5% på de andre simuleringene (Vingerhagen, 2011).

3.1.4 Vurdering av forsøkene på Innerdalsdammen

Selv om resultatene til Vingerhagen (2011) var noe usikre på grunn av usikkerhet om CFD-modellen var lik den fysiske modellen, viste simuleringen noen sterke sider. Ved hjelp av CFD-modellen ble feil i den fysiske modellen funnet. Ut fra simuleringene i CFD-modellen viste det seg at geometrien i den fysiske modellen ikke var lik geometrien på tegningene den skulle vært bygget etter. Den fysiske

modellen var revet før CFD-modellen ble laget og det var derfor bare mulig å finne svaret på dette ut fra bilder og CFD-modellen. En annen fordel med CFD-modellen i dette tilfellet var at strømningsforholdene i sjakta kunne observeres. Den fysiske modellen var bygget i et ugjennomsiktig materiale og det var ikke mulig å se strømningsforholdene i tunnelen (Roe, 2012).

Fysisk modell er en direkte simulering av virkeligheten i en skalamodel. Den betrakter strømningsforholdene i en redusert skala. Numerisk modell er en indirekte simulering i en datamaskinbasert analyse som betrakter en fullskalamodell med tilnærmet fysikk (Aberle, 2012). Fordelen med CFD-modell er derfor at vi slipper skaleringsfaktorene som kan ha stor innvirkning i fysiske modeller. Det er ikke mulig å skalere ned luftbobler i fysisk modell. Dette problemet unngår vi med å modellere fullskalamodell i et CFD-program (Roe, 2012).

3.2 Fysiske modellforsøk

Fysiske modellforsøk i laboratorier har hatt stor betydning i forbindelse med vassdragstekniske problemstillinger som strømningsmessig riktig utforming av vannveier og fastlegging av kapasitet (Guttormsen, 2006). NVE kan etter dagens regelverk (Damsikkerhetsforskriften, 2009), pålegge dameier fysisk modellforsøk for å påvise tilstrekkelig kapasitet i lukka flomløp. Bruken av laboratoriemodeller kommer av at turbulent vannstrøm er veldig vanskelig å analysere på bakgrunn av teori. Det eksisterer som skrevet i kapittel 3.1.1, formler som kan brukes til håndberegninger av kapasitet, men disse fungerer best for ukompliserte flomløp (Lysne et al., 2003).

Fysisk modell er en reproduksjon i miniatyr av et fysisk system (Aberle, 2012). Forholdene i prototypen må gjengis i en modell med mål om å gjengi strømmingen og dens vilkår så nøyaktig som mulig (Guttormsen, 2006). Fordelen med fysisk modell er at du får en visuell tilbakemelding. Du får et direkte kvalitativt inntrykk av fysiske prosesser. I en fysisk modell er det mulig å se på strømmingssituasjoner ved ekstreme forhold, for eksempel flom, som det ikke er mulig å se ut i fra prototypen. Den kan beregne kompliserte fenomener som det ikke er mulig å finne ved teoretiske tilnærminger. Fysisk modell kan bli brukt til å verifisere eller motbevise teoretiske resultater (Aberle, 2012).

Alle forsøk innebærer at man må gjøre visse forenklinger. I hvilken grad modellen representerer de virkelige prototypforholdene avhenger av de antakelser og tilnærminger som gjøres (Guttormsen, 2006). En forutsetning for god fysisk modellering er en hensiktsmessig utforming av modellen (Aberle, 2012). Den eneste måten å oppnå full likhet mellom prototype og modell er å bygge en fullskalamodell. Dette er ikke mulig for studier av store konstruksjoner som det

flømløp er. Derfor bygges laboratoriemodeller i en redusert skala. Det betyr at noen mindre viktige parametere må neglisjeres, mens mer viktige parametere må skaleres i henhold til modellover som realistisk gjenspeiler de mest relevante faktorene for problemet (Li et al., 2011).

Alle modeller må derfor verifiseres mot prototypen ved å sammenligne målere-sultater og kalibreres etter dette for at den skal stemme overens med prototypen. På denne måten fastlegges reproduksjonsvilkårene (Guttormsen, 2006). Verifi-sering av fysiske modeller skjer i hovedsak etter bilder fra prototypen. Ved å sammenligne vannstrømningen i fysisk modell og prototyp kan modellen kali-breres (Vingerhagen, 2012).

3.2.1 Likedannethet

For at resultatene skal stemme overens med prototypen, kreves det at det er likedannethet geometrisk, kinematisk og dynamisk. Geometrisk likedannethet er når modellen er en nøyaktig kopi av prototypen. Alle lineære dimensjoner reduseres med samme faktor, $L_r = L_{modell}/L_{prototyp}$. Alle vinklene blir dermed like store i modell og prototyp.

Kinematisk likedannethet krever at strømmingen i modellen skal være lik strøm-ningen i prototypen. Alle hastigheter må skaleres med samme faktor og må følge samme geometriske mønster som i prototypen (Guttormsen, 2006). Forholdet mellom strømningshastigheten ved ethvert punkt i modellen og prototypen må være lik (Aberle, 2012). Skaleringsforholdet blir $V_r = \frac{V_m}{V_p} = \frac{V_{1,m}}{V_{1,p}} = \frac{V_{2,m}}{V_{2,p}}$.

Dynamisk likedannethet krever at alle krefter som virker i et bestemt punkt i prototyp og modell skal stå i samme forhold til hverandre. Da vil også resul-tanten av kreftene få samme innbyrdes forhold, og akselrasjonene av de enkelte partiklene vil ha samme størrelse og retning, $F_r = \frac{F_m}{F_p}$ (Guttormsen, 2006). Dynamisk likedannethet er den viktigste forutsetningen for fysisk modellering. Forholdet mellom kreftene i prototyp og modell må være lik for at det skal være dynamisk likedannethet (Aberle, 2012). Når dynamisk og geometrisk likedannethet er oppnådd, vil også kinematisk likedannethet være oppnådd (Guttormsen, 2006).

3.2.2 Modellover

Ved de fleste hydrauliske problemstillinger vil følgende krefter være dominerende (Lysne, 1982):

- Tregheitskrefter ($F_I = \text{masse} * \text{akselrasjon}$)

- Tyngdekrefter ($F_G = \text{masse} * \text{tyngdeakselerasjon}$)
- Trykk-krefter ($F_P = \text{kraft} * \text{areal}$)
- Viskositetskrefter ($F_V = \text{skjærkrefter} * \text{areal}$)

$$\frac{F_{I,m}}{F_{I,p}} = \frac{F_{G,m}}{F_{G,p}} = \frac{F_{P,m}}{F_{P,p}} = \frac{F_{V,m}}{F_{V,p}} \quad (3.1)$$

Det finnes ingen kjente fluider som vil tilfredstille alle kravene til kraftforhold når modellen er mindre enn prototypen. En viktig oppgave i modellutforming er derfor å finne de viktige kraftforholdene og neglisjere de andre (Aberle, 2012). Ligning 3.1 kan settes opp som uavhengige ligninger og gi følgende modellover:

Froudes modellov Den mest brukte modellov er Froudes modellov (Lysne et al., 2003). Den brukes der hvor tyngdekrefter er dominerende, slik som flomløp (Aberle, 2012). Den kommer fra å sette Froude nummer, Fr , i prototyp lik Froude nummer i modell (Lysne et al., 2003):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3.2)$$

$$\frac{V_p}{\sqrt{g_p L_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m L_m}} \quad (3.3)$$

$$\frac{V_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1 \quad (3.4)$$

Setter $g_r = 1$ og modelloven blir da:

$$V_r = \sqrt{L_r} \quad (3.5)$$

hvor:

- V - hastigheten [m/s]
- L - lengde [m]
- g - tyngdeakselerasjon [m/s^2]
- r - forholdet mellom modell og prototyp

Det vil si at hastighetsskaleringen er lik roten av lengdeskaleringen. Denne modelloven setter sammen gravitasjon og treghetskrefter og neglisjerer viskositet og overflatespenning (Lysne et al., 2003).

Reynolds modello En annen modello er Reynolds modello (Guttormsen, 2006). Den beskriver forholdet mellom treghetskreftene og viskositetskreftene. Denne brukes når viskøse krefter er dominerende. Dette er tilfelle ved strømming i lukkede tverrsnitt (Aberle, 2012):

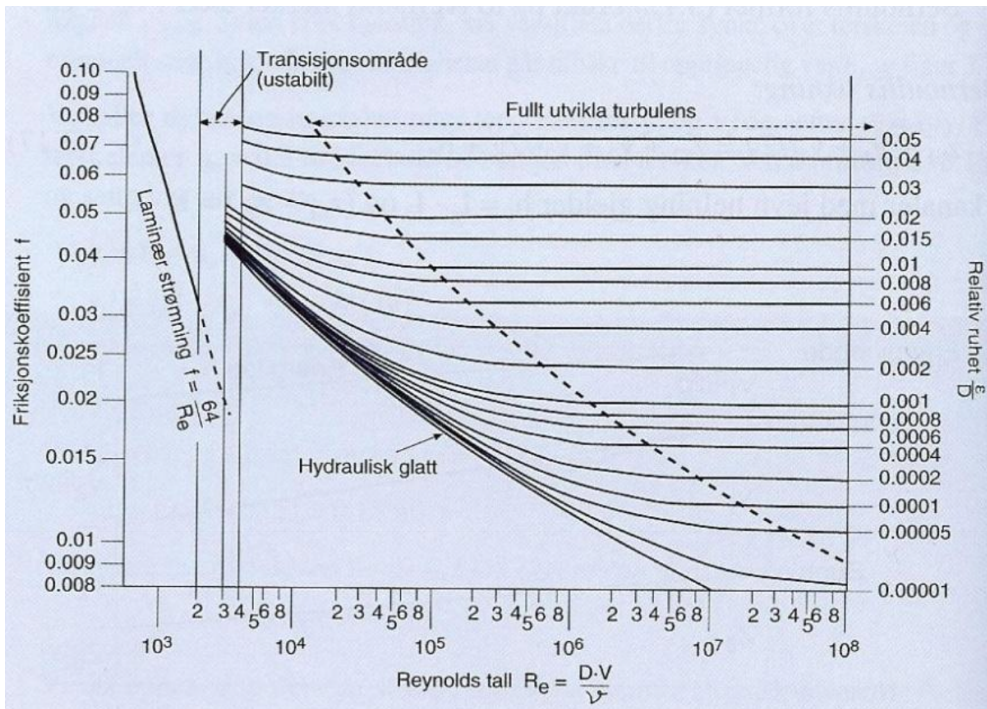
$$Re = \frac{F_I}{F_V} = V \frac{L}{\nu} \quad (3.6)$$

hvor ν er kinematisk viskositet. For vann er $\nu = 1\text{cSt}$. cSt er forkortelsen for centiStokes og har enheten mm^2/s .

$$V_r = \frac{1}{L_r} \quad (3.7)$$

Webers modello Webers modello beskriver forholdet mellom treghetskreftene og overflatespenninger (Lysne, 1982). I flomløpsmodeller kan dette neglisjeres ved å sørge for at det alltid er et vanddyp på minst 15 mm. Når vanddypet er under dette, vil vannføringen være liten og det vil være utenfor området som er interessant å undersøke. Det er viktig å være klar over overflatespenningene når vannstands nivået lik høyden på topp terskel skal stilles inn på måleinstrumentene.

Det kan ikke oppnås likhet fra mer enn en modello om gangen, se formel 3.5 og 3.7. Løsningen på problemet er å sørge for at det er fullt utviklet turbulens i modellen. I modellteknisk betydning er grensen for fullt utviklet turbulens ensbetydende med grensen for hvor friksjonskoeffisienten ikke lenger er en funksjon av Reynolds tall (Bjørkmo, 2012). Ser av Moodys diagram, figur 3.1 at Reynoldstallet da må ligge til høyre for den stiplede linjen.



Figur 3.1: Moodys diagram (NVE, 2010a)

Ved fullt utviklet turbulens er tyngdekraftene dominerende og Froudes modellov blir den betemmende. Dette vil være tilfelle for de fleste praktiske problemstillinger (Aberle, 2012).

Modellen av flomløpet på dam Vasslivatn vil bli bygd med geometrisk likhet. Den blir skalert og kjørt etter Froudes modellov. Reynolds modellov blir tatt hensyn til ved å bygge modellen i stor nok målestokk, 1:20, slik at det er fullt utviklet turbulens.

Skaleringsfaktorene blir derfor som i tabell 3.1:

Tabell 3.1: Skaleringfaktorer ved Froudes modellov

Dimensjon	Gemetrisk sammenheng	Forhold
Lengde [m]	L_r	1:20
Areal [m ²]	L_r^2	1:400
Volum [m ³]	L_r^3	1:8000
Tid [s]	$L_r^{1/2}$	1:4.472
Hastighet [m/s]	$L_r^{1/2}$	1:4.472
Vannføring [m ³ /s]	$L_r^{5/2}$	1:1789
Manningstall [m ^{1/3} /s]	$L_r^{-1/6}$	1:0.607

3.2.3 Skaleringseffekter

Skaleringeffekter oppstår fordi kraftforholdet mellom modell og prototyp ikke er lik og resulterer i deviasjon mellom resultater fra skalert modell og prototypobservasjoner. Siden det ikke går å modellere alle kraftforholdene i en modell, vil det alltid være skaleringseffekter. Desto større skaleringsforhold, desto større skaleringseffekter (Heller, 2011).

I en Froudeskalert modell er Re lavere enn i prototypen.

$$n_r = \frac{n_p}{n_m} = L_r^{\frac{1}{6}} \quad (3.8)$$

For eksempel for betong er $n_p = 0.014$. Dette krever den glattest mulige overflaten som er glass, $n_m = 0.009$, noe som resulterer i $L_r \approx 14$. Som en konsekvens av dette har en flomløpsmodell alltid større ruhet enn prototypen. Derfor vil det på glatte overflater alltid være Reynoldseffekter. Dette kalles skaleringseffekter og gjør at vannføringskapasiteten er underestimert i modellen. Denne effekten er neglisjerbar og er vanligvis ikke tatt i betraktning (Aberle, 2012).

Luftinnblanding kan gi en skaleringseffekt. Luftbobler kan ikke skaleres ned. De har samme størrelse i modell og prototyp (Aberle, 2012).

I prototyp vil det aldri være lavere trykk enn vannets damptrykk ved den aktuelle temperaturen. Grovt sett er vannets damptrykk satt til -10 m (Bjørkmo, 2012). Det er ikke mulig å skalere ned undertrykket i modellen og det kan derfor oppstå et unaturlig høyt undertrykk i sjakta siden maksimalt undertrykk i prototyp da er 10 meter. For å unngå dette, kan det tilsettes luft i modellen. Hvis ikke kan modellen oppnå en bedre kapasitet enn prototypen (Vingerhagen, 2012).

For å unngå skaleringfaktorer er det noen grensestørrelser en bør ta hensyn til:

- Overflatespenninger påvirker resultatet i Froudeskalerte modeller dersom vann dybden er lavere enn 15 mm (Aberle, 2012).
- Ved modeller av luker, rør og kulverter, bør det være en lysåpning på minst 100 mm. Dersom den er mindre vil grenselaget langs kanten utgjøre en feilaktig stor del i forhold til prototypen (ASCE, 1983).

3.3 Bygging av modell

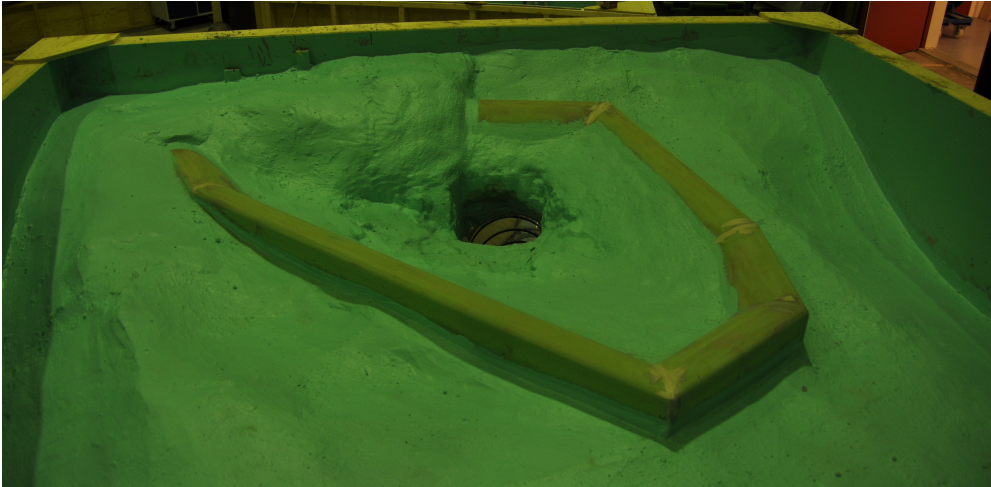
Bygging av modellen startet i slutten av januar 2013. Den var ferdig i slutten av april 2013. Modellen ble bygget av Sintef Byggforsk. Professor Odd Guttormsen fra Hydroconsult AS er prosjektleder og førsteamanuensis Morten Skoglund er TrønderEnergis kontaktperson.

Ved planlegging av en fysisk modell er det viktig å vurdere nøye hva i prototypen det er viktig å modellere. Grensene for hva som skal med i den fysiske modellen må fastsettes ut fra hvilket problem som skal undersøkes. Det er viktig å få med alt av landskap og konstruksjoner som kan ha innvirkning på problemet som undersøkes (Birkeland, 2008).

I modellen av flomløpet til dam Vasslivatn ble følgende tatt med:

- Overløpsterskel
- Samlekanal
- Hele sjakta og tunnelen
- 15 meter av terrenget etter utløpet
- 60 x 64 meter av terrenget i magasinet

Flomløpet er plassert på den ene siden av dammen (sørsiden). Den ene delen av terskelen ligger inn mot dammen og kan ha litt dårlig innstrømningsforhold. Det er derfor viktig å modellere dette sammen med dammen, se figur 3.2. Se tillegg C for flere bilder av modellen.



Figur 3.2: Bilde av flomløpsterskelen. Dammen ligger til høyre for flomløpet på bildet.

Flomløpstunnelen kommer inn på omløpstunnelen rett etter overgang fra sjakt til tunnel. Ved denne luka vil det være et lite tap, men dette ble vurdert til å være så lite at det er neglisjert og utelatt i modellen. Omløpstunnelen er derfor ikke modellert i modellen.

3.3.1 Målestokk

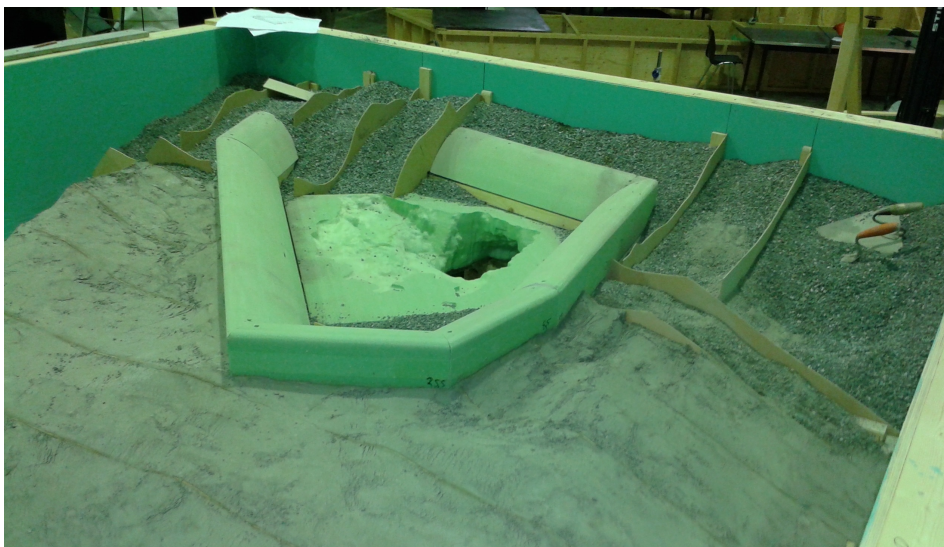
Flere faktorer må tas med i vurderingen av målestokk. Den øvre begrensningen er at modellen må ha plass i laboratoriet og økonomien i prosjektet. Den nedre begrensningen er vannets fysiske egenskaper som viskositet og overflate-spenninger. Dersom målestokken blir for liten kan resultatet bli feil som følge av skalaeffekter, se avsnitt 3.2.3.

Modellen ble bygget i 1:20. Dette er en relativt stor målestokk. Fordelen med stor målestokk er at resultatet blir mest mulig likt prototypen.

3.3.2 Magasin, terskel, samlekanal og nedløp sjakt

Magasinet er bygget ved å lage profiler ut fra kartmaterialet og oppmålinger i området. Det fylles pukk mellom profilene og øverst legges det betong. Overløpsterskelen bygges i devynycell. Overgang mellom terreng i samlekanalen og nedløp sjakt freses ut i en fresemaskin av Marintek basert på skannede data

fra prototyp. Figur 3.3 viser magasinet under bygging. Innenfor terskelen vises området som er freset ut.



Figur 3.3: Magasinet under bygging

3.3.3 Tunnel

Tunneldelene er laget i gjennomsiktig akrylplast. Det er totalt 5.1 meter med sjakt/tunnel i modellen. De er laget i lengder på ca 1 meter og satt sammen i modellen ved hjelp av skruer. Fordelen med å bygge gjennomsiktig tunnel er at det da er enkelt å observere strømmingssituasjonen i tunnelen under kjøring av modellen. Det er små variasjoner i arealet i sjakt og tunnel i prototypen. Arealet av sjakta i modellen er et gjennomsnitt av arealet i sjakta i prototypen. Arealet av tunnelen i modellen er et gjennomsnitt av arealet av tunnelen i prototypen. Figur 3.4 viser tunneldelene under montering. For å gjøre det enklere å utvide tunnelen har det blitt limt inn isopor i bunn av tunnelen som kan fjernes dersom tunnelverrsnittet må økes. De svarte listene skal tilsvare ruheten i prototyp.



Figur 3.4: Tunneldelene under montering.

3.3.4 Utløp og avløp

Tunnelen føres til et avløpsbasseng hvor vanddybden kan reguleres med ei luke. I dette avløpsbasseng er 15 meter av elva etter tunnelutløpet modellert, se figur 3.5. Denne føres videre til en avløpskanal på gulvet hvor avløpsvannet kan komme tilbake til vannreservoaret i laboratoriet.



Figur 3.5: Utløp tunnel

3.3.5 Vanntilførsel

Vannforsyningen til modellen kommer fra det sentrale vannforsyningsanlegget i laboratoriet. Vannføringen justeres med en spjeldeventil og betjenes med et justeringsratt.

3.3.6 Måling

For å måle vannstanden i magasinet nøyaktig er det plassert et trykkuttak i bunn av magasinet. Fra uttaket går en gummislange til et fastmontert målebeger på utsiden av magasinet. Vannstanden i målebegeret er dermed det samme som i magasinet. Vannstanden i målebegeret ble lest av ved hjelp av en digital avstandsmåler. Nullpunktet til måleren ble satt til HRV, kote 279.8.

Vannstanden i avløpsbassenget ble også målt med en digital avstandsmåler. Vannstanden ble målt der vannet var mest mulig rolig i bassenget. For å få så stabile måleforhold som mulig, ble det satt inn et rør som vannstanden ble målt i. Inne i dette røret var vannstanden tilnærmet stabil.

Det ble satt inn målere for å måle vanntrykk i bunn av sjakta og trykkdifferansen mellom to punkter i tunnelen. Vanntrykket skulle gi informasjon om hvor høyt i sjakta vannet står. Trykkdifferansen brukes til å måle falltap i tunnel for å verifisere ruheten som er satt inn i forhold til prototyp.

Vannføringen leses av på en måler som står ved ventilen til pumpa, se figur 3.6. Alle målingene, bortsett fra vannføringen, blir loggført på PC.



Figur 3.6: Vannføringsmåler

3.3.7 Utvidelse av modell

For å vite hvor stor tunnelen i modellen skal bygges, må nødvendig tverrsnitt for å ta unna PMF beregnes. Dette er beregnet ut fra metodene i Retningslinjer for flomløp (NVE, 2005) og viser at ved et tunneltverrsnitt på 39 m^2 vil flomløpet kunne ta unna PMF. Se tillegg D for beregninger.

For å være sikker på at tunnelen bygges stor nok, bygges den så det tilsvarer 41 m^2 i prototyp. Dette tilsvarer at tunnelen må utvides med to meter i bunnen av prototyp. Det vil si at isoporen som legges inn i bunn av tunnelen må være 10 cm tykk for dagens tunnelstørrelse. Ved utløpet bygges tunnelen 2 meter lavere enn den er i dag og skrås oppover til den når høybrekket i elva som er der i dag og ligger på kote 258. Her legges det også inn isopor som tilsvarer dagens bunn og som fjernes når tunnelen skal utvides. Se figur i tillegg D.

3.3.8 Vurdering av data og nøyaktighet

Vannføringen inn i modellen er tilnærmet konstant, men kan variere med ± 0.1 liter. Dette tilsvarer $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ i prototyp. Vannstandsmålerne har en feilmargin

på 1 %. Begge disse feilmargienene er veldig små og innenfor nøyaktigheten til fysisk modell, så de brukes uten noe annen kontroll.

Oppmålingene fra Nidaros oppmåling er blitt gjort i to omganger og det har vært litt usikkerhet om sammenhengen og om koordinatene samsvarer på de to ulike målingstidspunktene. Dette gjelder spesielt i tunnelutløpet. Her er det lite målinger. Derfor er tunnelutløpet bygget etter oppmålinger og der disse var dårlige er det supplert med bilder. Bilder har også vært brukt i magasinet og samlekanalen under byggingen.

I nedstrøms elv var det tverrprofiler for hver femte meter. Men disse profilene var lave, og ble oversvømt ved store flommer. Tverrprofilene er derfor supplert med kart. Dette fører til at disse blir unøyaktige. Det blir også litt unøyaktighet siden det ikke finnes informasjon om hvordan elva er mellom disse tverrprofilene annet enn fra bilder og kart. Tverrprofilene i elva nedstrøms blir brukt til å beregne vannlinje i HEC-RAS og profilene supplert med kart er vurdert som gode nok for dette formålet.

3.4 Vannlinjeberegning

For å unngå for stor utstrekning av modellen, slutter modellen i elva 15 meter nedstrøms tunnelutløpet. Vannet går deretter over i et basseng som fører det tilbake til vannreservoaret i laboratoriet. For å finne riktig vannstand ved dette punktet er det utført en vannlinjeberegning ved hjelp av programmet HEC-RAS. HEC-RAS er et dataprogram som kan modellere hydraulikken i naturlige elver. Nedstrøms vannstand blir da justert i modellen etter utregningene i HEC-RAS.

Modellen beregner en endimensjonal og stasjonær strømningstilstand. Nødvendige inngangsdata er tverrprofiler, ruhet, oppstrøms og nedstrøms grensebetingelse og vannføring. Ruhet er friksjonen mellom vann og elvebunnen og beskrives med Mannings tall, $n = \frac{1}{M}$. HEC-RAS gir vannstand, vannføring og hastighet i hvert tverrprofil (NVE, 2010a).

Ut av tunnelutløpet vil det ved de største vannføringene være overkritisk strømning, mens det for mindre vannføringer vil være underkritisk. Det må derfor beregnes for varierende underkritisk og overkritisk strømning. Grensebetingelsene som er satt er normalstrømning i slutten av elva og kritisk dyp ved tunnelutløpet.

3.4.1 Manningstall i naturlig elv



Figur 3.7: Elva nedstrøms flomløpet

Valg av Manningstall i elva nedstrøms har betydning for vannlinjeberegningen. Figur 3.7 viser et bilde av elva. Manningstall på 30 er en vanlig ruhet for elver med lite sidevegetasjon eller større steiner (NVE, 2010a). Av figur 3.7 ser vi at det er litt steiner i elveløpet og ved høye vannføringer vil det også være litt vegetasjon i sidene av elveløpet. Det ble derfor kjørt en HEC-RAS beregning med Manningstall på 16 for å se hvor stor forskjell dette utgjør. Manningstall på 16 er en ruhet som gjenspeiler at det finnes større steiner i elveleiet, samt noe kantvegetasjon (NVE, 2010a). Beregninger her viser at for et Manningstall på 16 vil vannstanden være i underkant av 0.3 meter høyere enn for et Manningstall på 30, for vannføringer over $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Elven nedstrøms ble vurdert til å ligge nærmere Manningstall på 30 og dette ble da brukt i HEC-RAS beregningene.

3.4.2 Nøyaktighet av HEC-RAS

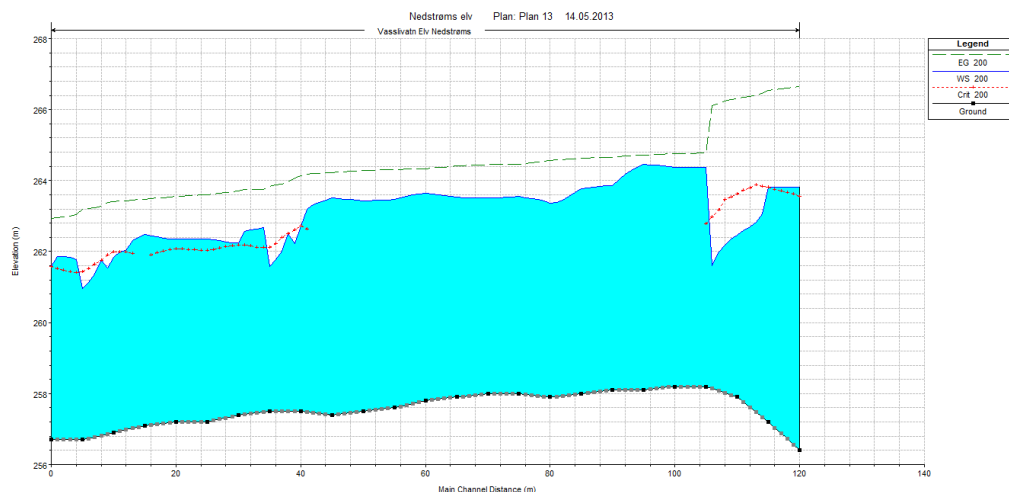
Kvaliteten på vannlinjeberegningen er avhengig av at modellen er godt kalibrert. Det vil si at det finnes sammenhengende verdier av vannføringer og vannstand, som modellen kan kalibreres etter. Problemet her er at det ikke finnes data for store vannføringer. Andre usikkerhetsmomenter er nøyaktighet i tverrprofiler,

avstand mellom tverrprofiler, usikkerhet i estimat av ruhet. Ved store flommer kan det skje endring i profilene, ved for eksempel erosjon. Beregningene vil likevel gi en pekepinn på nedstrøms vannstand og vil bli brukt i dette modellforsøket.

HEC-RAS er et endimensjonalt beregningsprogram. Strømningen i elva og spesielt ved tunnelutløpet vil ikke være endimensjonal. Dette vil også gi litt usikkerheter i nøyaktigheten til beregningen.

3.4.3 Nedstrøms vannføringskurve

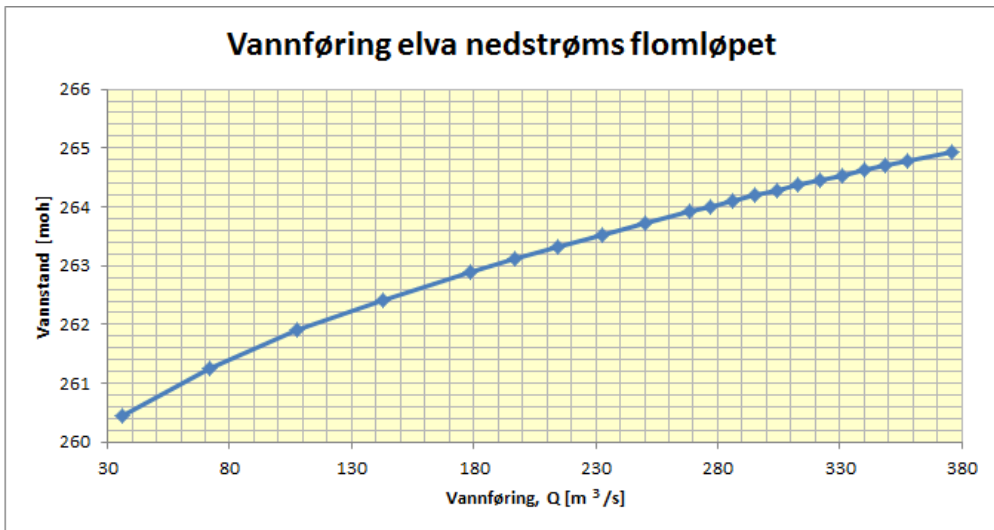
Ved å sette inn tverrsnittprofiler fra oppmålinger, normalstrømning som nedre grensebetingelse og kritisk dyp som oppstrøms grensebetingelse og beregne for mikset strømning (varierende overkritisk og underkritisk strømning) fås følgende vannoverflateprofil i elva nedenfor flomløpet, figur 3.8.



Figur 3.8: Vannoverflateprofil. Elva renner fra høyre mot venstre i figuren.

Vannstanden er den blå linjen og energilinen er den prikkete. Siden vannhastigheten i bassenget nedstrøms modellen er lav i forhold til prototypen ble det i samråd med professor Odd Guttormsen, forsker Kiflom Belete og professor Jochen Aberle besluttet å bruke energilinen som vannstand til vannføringskurven. Det ble også besluttet å sette vannstanden til høyden på energilinen rett bak vannstands spranget. Tunnelutløpet er til høyre i figuren, figur 3.8.

HEC-RAS beregningen gir følgende vannføringskurve som ble brukt i modellen, figur 3.9. Figuren viser tverrsnittet 15 meter etter tunnelen, som er tverrsnittet rett etter vannstands spranget. For beregningen, se tillegg E.



Figur 3.9: Vannføringskurve nedstrøms elv.

3.5 Friksjon

Kapasiteten til en vannvei er bestemt av høydeforskjellen mellom innløp og utløp og summen av tapene vannet har underveis. Falltap deles inn i to typer:

- Singulærtap
- Friksjonstap

Singulærtap er lokale tap ved tverrsnittsendringer eller bend i vannveien. Singulærtapet vil bli gjengitt ved at geometrien er lik i modellen og i prototypen. Friksjonstap er tap som skjer langs hele vannveien på grunn av strømningsmotstand mot veggene i tunnelen. Friksjonstap vil være det dominerende i de fleste råsprenge tunneler (Guttormsen, 2006). Siden tunneldelene i modellen bygges i plastmateriale, vil det være for lite friksjon i modellen i forhold til prototypen. Det må derfor tilføres friksjon til tunneldelene i modellen. Størrelsen av friksjonstapet i en tunnel bestemmes av strømningshastigheten, veggruheten og tverrsnittformen. Av disse faktorene er veggruheten vanskeligst å bestemme fordi dette er et erfaringsstall som bare kan fastslås ved å måle falltapet i tunnelen. De siste årene har det vært en tendens til ruere tunneler på grunn av overgangen til tyngre anleggsutstyr med større hullavstander og salvelengde (Guttormsen, 2006). NVE skriver i Retningslinjer for flomløp (NVE, 2005) at det skal gjøres antakelser som gir stor friksjon dersom ikke annet kan dokumenteres.

På bakgrunn av erfaringstall ble det i samråd med professor Odd Guttormsen og førsteamanuensis Morten Skoglund besluttet å sette manningstallet i sjakta til 30 og til 33 i tunnelen i prototypen.

3.5.1 Mannings formel

For å beregne friksjonstap i tunneler har det vært mest vanlig å benytte Manning formel, se formel 3.9 (Guttormsen, 2006).

$$h_f = \frac{L * v^2}{M^2 * R_h^{4/3}} \quad (3.9)$$

Hvor:

- h_f - absolutt falltap [m]
- L - tunnellengde [m]
- v - vannhastighet [m/s]
- M - Manningstall [$m^{1/3}/s$]
- R_h - hydraulisk radius [m]

For konvensjonelt drevet tunnel kan hydraulisk radius settes lik formel 3.10.

$$R_h = \frac{A}{P} \approx 0.265 * \sqrt{A} \quad (3.10)$$

Hvor:

- P - våt omkrets

Den største usikkerheten knyttet til bruk av Mannings formel er usikkerheten knyttet til valg av Manningstall (Bjørkmo, 2012).

3.5.2 Darcy-Weissbachs formel

Darcy-Weissbachs formel, se formel 3.11, er en mer generell formel for friksjonstap i rør.

$$h_f = f * \frac{L}{4 * R} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (3.11)$$

Hvor:

- h_f - absolutt falltap [m]
- f - friksjonskoeffisient
- L - tunnallengde [m]
- R - hydraulisk radius [m]
- v - vannhastighet [m/s]

Verdier av friksjonskoeffisienten finnes i Moody-diagrammet, se figur 3.1.

3.5.3 Sammenligning

Mannings formel, formel 3.9 og Darcy-Weissbachs formel, formel 3.11, avviker noe fra hverandre. Eksponenten for hydraulisk radius er forskjellig. Det er imidlertid tatt hensyn for denne forskjellen ved at Manningstallet er dimensjonsavhengig og avhenger av absolutt ruhet, mens Darcy-Weissbachs koeffisient er dimensjonsløs og avhengig av den relative ruheten. De to formlene faller godt sammen innenfor et begrenset gyldighetsområde (Falltapskomiteen, 1985). Friksjonskoeffisienten kan gjøres om til Manningstall og omvendt ved følgende formel, formel 3.12:

$$f = \frac{8 * g}{M^2 * R_h^{1/3}} \quad (3.12)$$

For store og glatte tunneler vil Mannings formel gi ca. én enhet høyere verdi enn Darcy-Weissbachs formel. For små og ru tunneler fås et Manningstall som ligger 1-2 enheter lavere (Bjørkmo, 2012).

3.5.4 Friksjon i modellen

Friksjon i sjakt og tunnel har stor innvirkning på den totale kapasiteten til flomløpet. Det er derfor viktig å få friksjonen i modellen korrekt i forhold til prototypen. I laboriemodeller av tunneler og sjakter har det gjennom tidene blitt prøvd ut mange forskjellige metoder for å oppnå riktig friksjon i modellen. Den mest brukte metoden har vært å lime inn plastbiter eller grus over hele eller deler av tverrsnittet. Tunnelen vil da få korrekt relativ ruhet og dermed korrekt friksjon. Ulempen er at dette tar bort sikten fra tunnelen. Det vil da ikke være mulig å studere strømnings situasjonen inne i tunnelen og underveis i det lukkede systemet. Det er også svært tidkrevende å lime inn plast- og grusbiter.

Birkeland (2008), gjorde i sin masteroppgave et forsøk på å oppnå ønsket friksjon ved å lime inn gummilister med en bestemt tykkelse og ruhet. For å undersøke hvor mye innlimt ruhet som er nødvendig for å oppnå riktig friksjon i modellen ble det kjørt flere modellforsøk ved å bygge opp en enkel prøverigg for testing av falltap med innlimte friksjonselementer. På bakgrunn av disse målingene ble det satt opp et ligningssett for å bestemme de ulike parameterne. Han tok utgangspunkt i at den totale friksjonen er bygd opp i to deler, formel 3.13.

$$f = f_{glatt} + f_{ru} \quad (3.13)$$

hvor f_{glatt} er friksjonskoeffisienten for glatt tunnel og f_{ru} er friksjonskoeffisienten for den ekstra ruheten. f_{glatt} er satt til 0,017 etter forsøk av Birkeland. Ved hjelp av modellforsøk har Birkeland kommet frem til følgende formel for f_{ru} , formel 3.14. Formelen er et polynom med variablene avstand mellom listene, listetykkelse og listelengde. For å gjøre variablene dimensjonsløse er det delt på 4 * den hydrauliske radiusen (Birkeland, 2008).

$$f_{ru} = 8,43 \cdot \left(\frac{L}{4R}\right)^{-0,796} \cdot \left(\frac{h}{4R}\right)^{1,655} \cdot \left(\frac{l}{4R}\right)^1 \quad (3.14)$$

Hvor:

L = avstanden mellom listene [m]

h = listetykkelse [m]

l = listelengde [m]

Birkeland (2008) brukte denne formelen videre i sitt modellforsøk av flomløpet på Sysendammen. Denne metoden ble også brukt av Bjørkmo (2012) i et modellforsøk på flomløpet til Svartevassdammen. Ved testing av nøyaktigheten av denne formelen for andre tunneler kom han frem til at formelverket var akseptabelt og kan brukes (Bjørkmo, 2012).

3.5.5 Skalering

Siden modellen er geometrisk likedannet må energilinja i modellen ha samme helning som i prototypen. Skriver derfor om Mannings formel ved å sette inn kontinuitetsligningen og får følgende helning på energilinjen, formel 3.15 (Birkeland, 2008).

$$I = \left(\frac{Q}{A * M * R^{2/3}} \right)^2 \quad (3.15)$$

Setter deretter helningen på energilinjen lik for prototyp og modell, formel 3.16.

$$\begin{aligned} I_p = I_m &\rightarrow \left(\frac{Q}{A * M * R^{2/3}} \right)_p^2 = \left(\frac{Q}{A * M * R^{2/3}} \right)_m^2 \\ &\rightarrow \frac{M_m}{M_p} = \left(\frac{\frac{Q_m}{Q_p} * A_p * R_p^{2/3}}{A_m * R_m^{2/3}} \right) = \frac{L_r^{5/2}}{L_r^2 * L_r^{2/3}} = L_r^{-1/6} \end{aligned} \quad (3.16)$$

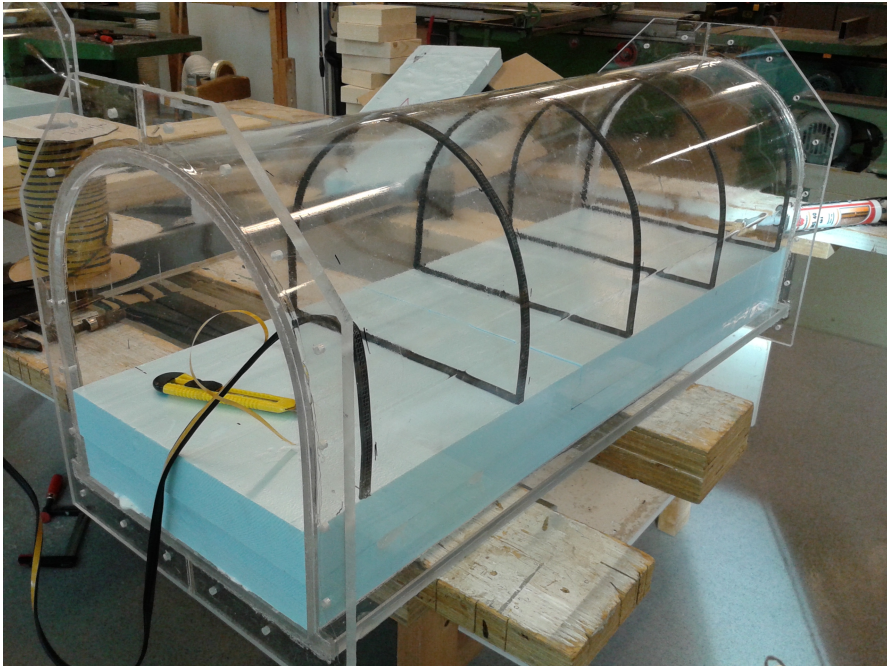
Med dette kan Manningstallet i prototypen brukes for å skalere riktig friksjonsforhold i modellen (Birkeland, 2008). Se beregning av skalering av friksjon i tillegg F.

3.5.6 Innliming av ruhet i modellen

Ved å bruke metoden til Birkeland (2008) fås følgende tall for formel 3.14, se tabell 3.2. Utregningen ligger i tillegg F. Figur 3.10 viser en tunneldel under innliming av friksjonslister.

Tabell 3.2: Beregning av avstand mellom friksjonslistene

	Sjakt	Tunnel	Tunnelutløp
Ønsket f, beregnet fra M	0.079	0.064	0.062
Listelengde [m]	0.98	1.01	1.15
Listetykkelse [m]	0.005	0.005	0.005
Listeavstand [m]	0.165	0.215	0.208



Figur 3.10: Innliming av friksjonslister i tunnelen

3.5.7 Test av innlimt ruhet

Siden metoden til Birkeland (2008) er lite brukt og bare testet på tverrsnitt som er mindre enn tunneltverrsnittet på modellen til dam Vasslivatn, ble det utført testmålinger av friksjon i tunnelen. Ved testing av tunnel ble falltapet registrert mellom to trykkuttak som var boret inn i tunnelen. Avstanden mellom trykkuttakene var 2 meter. Uttakene er satt et stykke fra overgangen mellom sjakt og tunnel oppstrøms og et stykke fra lavbrekket nedstrøms for å unngå at målingene blir påvirket av strømningsforholdene i disse områdene. Fra trykkuttakene ble vannet ført i plastslanger til en digital trykkcelle som registrerer trykkdifferansen mellom de to uttakene. Trykkcellen ble koblet til en frekvenslogger som

videre ble koblet til en PC slik at all data ble lest av og lagret. Forskjellen i trykk mellom de to sensorene ble målt i meter vannsøyle, mVs.

Siden sjakten er så kort, vil det være vanskelig å måle trykkforskjellen her på grunn av uryddig strøming. Det ble antatt at dersom friksjonsforholdene stemmer i tunnelen vil det også være tilnærmet riktig i sjakta.

Friksjonskoeffisienten beregnes ut fra de målte falltapene ved hjelp av Darcy-Weisbachs formel, se formel 3.11. Manningstallet beregnes så fra formel 3.12 og skaleres over til prototypen ved hjelp av formel 3.16. Dette viser at Mannings-tallet i modellen er 32, se tillegg F. Målet var å oppnå et Manningstall på 33. 32 er da på sikker side i forhold til kapasitet, så modellen kjøres videre med denne friksjonen.

3.5.8 Innliming av ruhet i modellen etter utvidelse

Når tunnelen utvides må ny ruhet limes inn. Beregning av skalering av friksjon og listelengde ligger i tillegg F. Tabell 3.3 viser resultatene fra beregningen.

Tabell 3.3: Beregning av avstand mellom listene etter utvidelse av tunnelen

	Sjakt	Tunnel	Tunnelutløp
Ønsket f, beregnet fra M	0.079	0.060	0.059
Listelengde [m]	0.98	1.20	1.34
Listetykkelse [m]	0.005	0.005	0.005
Listeavstand [m]	0.165	0.158	0.156

I stedet for å sette inn nye lister hver 15.8 cm i tunnelen og hver 15.6 cm i tunnelutløpet ble de gamle listene stående og nye ble satt inn mellom noen av disse for å få det riktige antallet lister over lengden. Friksjon ble testet på samme måte som før utvidelsen av tunnelen og resultatene viste at det nå var en ruhet på 33 i modellen. Noe som var akkurat det som var ønskelig å oppnå. Beregning av falltap ligger i tillegg F.

3.6 Luft

Luftmedriving er et alvorlig problem i forbindelse med kraftverksdrift. Skadelige utblåsninger, kapasitetsreduksjon og andre driftsforstyrrelser er de største problemene knyttet til luft i lukkede vannveier. Det er viktig å skille mellom

innblandet og oppløst luft. Definisjonen på innblandet luft er en blanding av luftbobler og vann. Dette vil alltid være synlig som enkeltbobler eller brusing. Oppløst luft er en tilstand der luften er fordelt som enkeltmolekyler blant vannmolekylene. Oppløst luft er ikke synlig (Guttormsen, 2006).

En tofasestrømning av luft og vann i lukkede vannveier er ikke mulig å modellere riktig siden luftmedriving og luftbobler ikke blir riktig skalert ved Froudes modellov. Det har blitt gjort en del modellforsøk for skråsjakter i bekkeinntak hvor det er funnet grensehastigheter for luftmedriving, lufttransportkapasitet, kontinuerlig retur av luft, eller når det er fare for utblåsninger opp sjakta. Problemet med disse er at de er gjort for vannhastigheter som er vanlig for bekkeinntak 0.5-3.0 m/s. Ved hastigheter over dette er usikkerheten stor (Bjørkmo, 2012).

Et flomløp som Vasslivatn har en mye høyere vannhastighet enn et bekkeinntak og kan komme opp mot vannhastigheter på 14 m/s ved PMF. I tillegg vil den reelle hastigheten være enda større ettersom en del av tverrsnittet består av medrevet luft (Bjørkmo, 2012). Kapasiteten til en vannvei kan bli betydelig redusert som følge av luftansamlinger (Bjørkmo, 2012).

Ved luftinnblanding blir luft pisket inn i vannet av kreftene som oppstår i turbulente strømninger. Overflatespenningene i vannet virker imot. Overflatespenningene er de samme i modell og prototyp, mens kreftene er større i prototyp enn i modell. Resultatet er at det vil blandes inn mer luft i prototyp enn det vil i modellen (Birkeland, 2008). Vann med mye luft vil få lavere tetthet og dermed mindre tyngde som fører vannet gjennom flomløpet. Vann i et modellforsøk kan derfor ha en høyere tyngdetetthet enn i prototyp, som igjen kan føre til bedre kapasitet ved flomavledning.

Siden det blir blandet inn mindre luft i modellforsøk enn i prototyp, vil det raskere oppstå undertrykk. I prototyp er det maksimalt ti meter undertrykk, mens det kan oppstå mer i modell. Undertrykk kan skape en høyere kapasitet, men det er ikke lov å regne med dette i kapasitetsberegning. Det er viktig å være oppmerksom på dette ved modellforsøk fordi det kan føre til at flomløpet oppnår en høyere kapasitet enn det er i prototyp.

Kapittel 4

Resultat

4.1 Kapasitet til dagens flomløpssystem

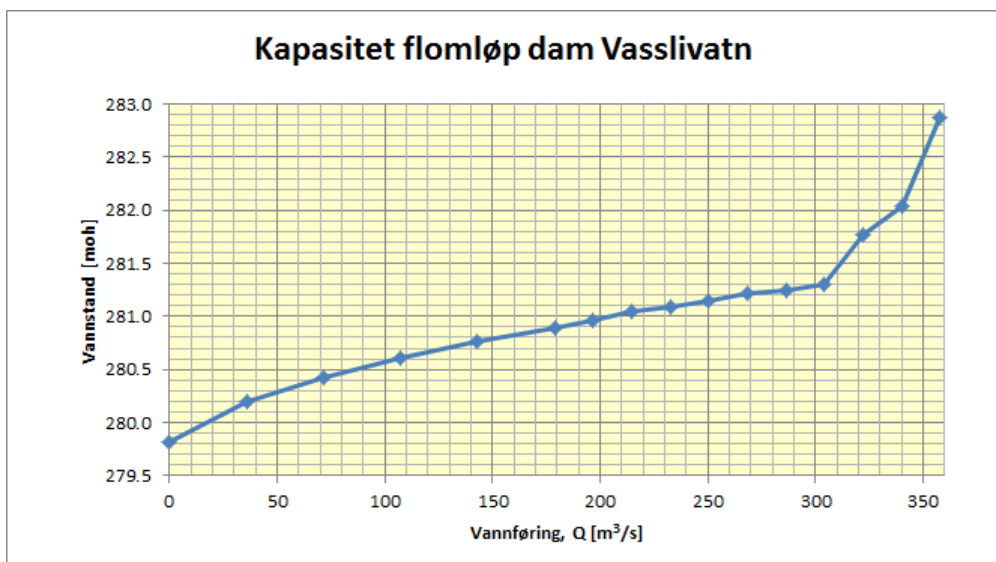
Kapasiteten til dagens system må kartlegges før eventuelle utbedringer kan vurderes. I dette forsøket er allerede pilarene til broen fjernet. Dette er fordi broen helt sikkert må fjernes i prototypen for å hindre for høy vannstandsstigning i magasinet og fordi det er mest praktisk for modellbyggingen at den ikke bygges.

Vannføringskurven er utarbeidet ved å måle vannstanden i magasinet ved ulike vannføringer. Vannstanden er målt med trykkuttak i bunn av magasinet. Måleren er koblet til PC og vannstandene ble logget på PC. Målingene er gjort med trinnvis økning av vannføringen på 20 l/s for vannføringer mindre enn 100 l/s og 10 l/s for vannføringer over dette. Dette tilsvarer henholdsvis 35.8 m³/s og 17.9 m³/s i prototypen. Det er ingen vannføringsmåler i avløpet, men ved å stabilisere vannstanden i magasinet for hver vannføring, vet man at $Q_{\text{inn}} = Q_{\text{ut}}$. Det har blitt gjennomført flere uavhengige målinger for å minske usikkerheten til forsøket.

I det følgende blir kapasiteten til dagens system, uten pilarene, presentert.

4.1.1 Vannføringskurven til dagens flomløp

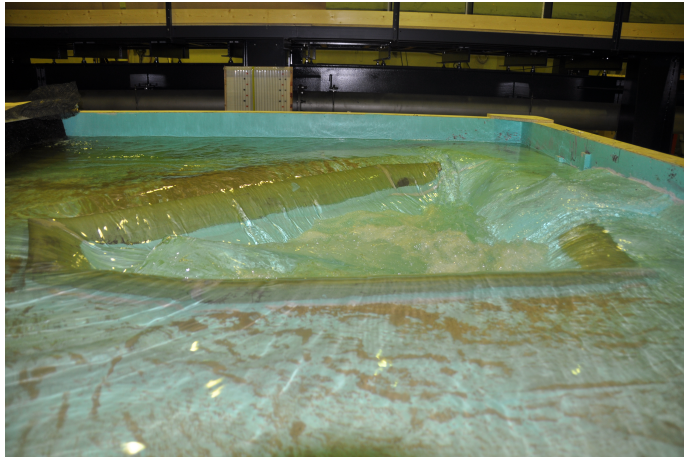
Figur 4.1 viser vannføringskurven til dagens flomløpssystem uten pilarene.



Figur 4.1: Vannføringskurve for dagens flomløp uten pilarene over terskel

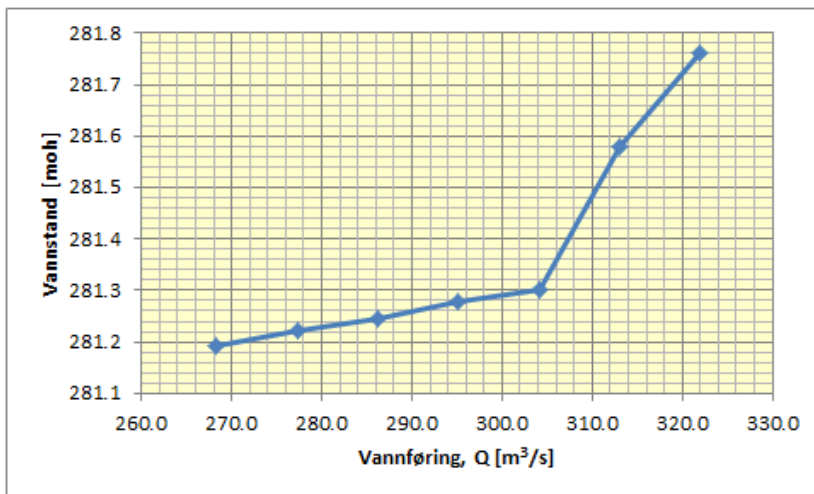
Figuren viser at ved en vannføring større enn $304 \text{ m}^3/\text{s}$, går flomløpet over til et lukket system og en økning i vannføringen gir en betydelig økning av vannstanden i magasinet. Vannstanden er da på 281,3 meter. Se tillegg G for måleresultater.

Q_{dim} Ser av figur 4.1 at ved Q_{dim} er det en vannstand i magasinet på 281 moh. Det er akkurat innenfor kravet som stilles til maksimal vannstandsstigning, se tabell 1.3. Luften som blir med ned i sjakten, blir med videre gjennom tunnelen som luftbobler inblandet i vannet og går ut gjennom utløpet. Figur 4.2 viser magasin og samlekanal ved avledning av Q_{dim}



Figur 4.2: Magasin og samlekanal under avledning av Q_{dim}

$270 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 320 \text{ m}^3/\text{s}$ For å se mer nøyaktig på området hvor systemet går fullt, ble det i dette området gjort en mer detaljert måling med mindre trinnvis økning i vannføring, se figur 4.3.



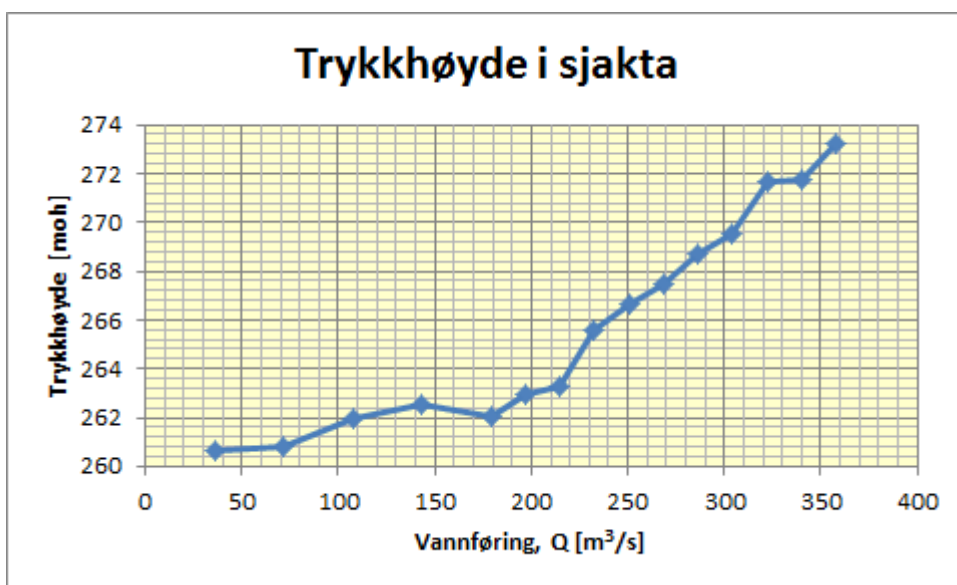
Figur 4.3: Vannføringskurve 268 - 320 m^3/s

Dette viser mer nøyaktig at for vannføringer opp til $304 \text{ m}^3/\text{s}$ er overløpsterskelen er bestemmende. For vannstander over dette er ikke lenger flomløpsterskelen bestemmende. I dette området er det fortsatt en del innblandet luft i tunnelen, men ved de høyeste vannføringene blir det med mindre luft gjennom flomløpet.

PMF Ved PMF på $360 \text{ m}^3/\text{s}$, er kurven langt over området hvor terskelen er bestemmende for kapasiteten. Vannstanden i magasinet er da på kote 283. Dette er bare 1 meter under topp dam dersom det er antatt at ikke noe vann går gjennom dammen. Ved PMF er sjakt og tunnel helt vannfylt og drar tidvis med seg luftbobler som blir med gjennom tunnelen.

4.1.2 Trykkforhold

Trykkmåleren som er satt inn i bunn av sjakta viser følgende trykkehøyde, figur 4.4.



Figur 4.4: Trykkehøyde i sjakta

Figuren viser ikke reell trykkehøyde på grunn av tap i sjakta som trykkmåleren ikke klarer å måle. Figuren kan likevel gi en antydning av hvor vannstanden står i sjakta. Figuren viser at det er først etter $200 \text{ m}^3/\text{s}$ at vannstanden i sjakta begynner å stige betydelig. Se tillegg G for måleresultater.

4.1.3 C-faktor

I Retningslinjer for flomløp (NVE, 2005) finnes formelen for overløpsterskler, formel 4.1. Denne formelen gjelder for rette og svakt buede overløp:

$$Q = C * L_{eff} * H_0^{3/2} \quad (4.1)$$

Hvor:

- Q - total kapasitet [m³/s]
 C - overløpskoeffisient [m^{1/2}/s]
 L_{eff} - effektiv overløpslengde [m], se formel 4.2
 H₀ - overløpshøyde [m]

Effektiv overløpslengde påvirkes av pilarer og hjørner/landfester på grunn av sidekontraksjon, formel 4.2:

$$L_{eff} = L_{lysåpning} - (0.1 * n * H_0) \quad (4.2)$$

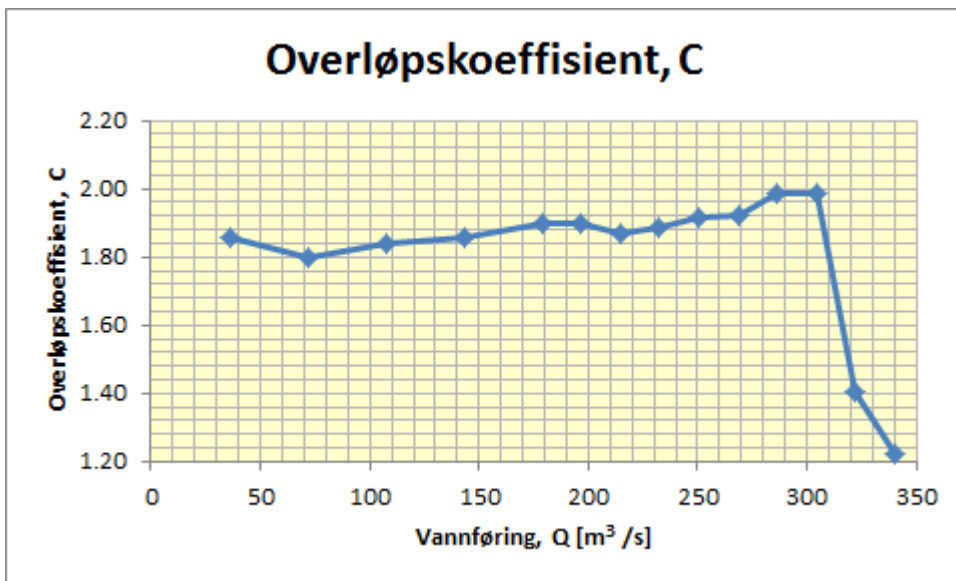
Hvor:

- n - antall hjørner

Lysåpningen for dagens terskel er 80.3 meter. Når vi tar vekk pilarene blir lysåpningen 85.8 meter. Antall kontraksjoner er satt til 5. 3 hjørner og 2 landfester. Tabell 4.1 viser effektiv overløpslengde og overløpskoeffisient. Overløpskoeffisienten ligger mellom 1.8 - 2.0 i området der undervannet ikke påvirker kapasiteten.

Tabell 4.1: Effektiv overløpslengde og overløpskoeffisient

Q [m ³ /s]	H [m]	L _{eff} [m]	C
35.8	0.37	85.80	1.86
71.6	0.60	85.50	1.80
107.3	0.78	85.41	1.84
143.1	0.94	85.33	1.86
178.9	1.07	85.27	1.90
196.8	1.14	85.23	1.90
214.7	1.22	85.19	1.87
232.6	1.28	85.16	1.89
250.5	1.33	85.14	1.92
268.4	1.39	85.11	1.92
286.2	1.42	85.10	1.99
304.1	1.48	85.06	1.99
322.0	1.94	84.83	1.40
339.9	2.21	85.70	1.22



Figur 4.5: Variasjon i overløpskoeffisient, C

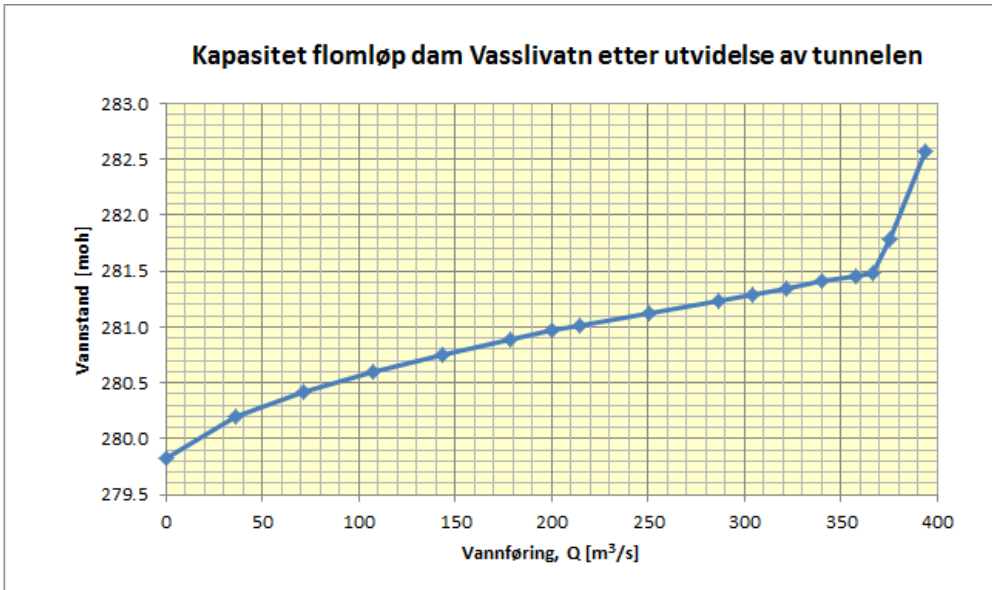
Figur 4.5 viser variasjon i overløpskoeffisienten i forhold til vannføring. Etter 304 m³/s faller C-verdien betraktelig. Dette skyldes at undervannet da har innvirkning på kapasiteten.

4.2 Kapasitet til flomløpet med utvidet tunnel

Vannføringskurven for dagens system viser for liten kapasitet. Tverrsnittet på tunnelen utvides derfor fra 28 m² til 41 m² og nye målinger gjøres. Målingene gjøres nå ved å øke med 20 l/s for vannføringer opp til 160 l/s og med 10 l/s for vannføringer større enn dette. I området der flomløpet er i ferd med å lukke seg økes vannføringen med 5 l/s. Dette tilsvarer henholdsvis 35.8 m³/s, 17.9 m³/s og 8.9 m³/s i prototyp.

4.2.1 Vannføringskurven med utvidet tunnel

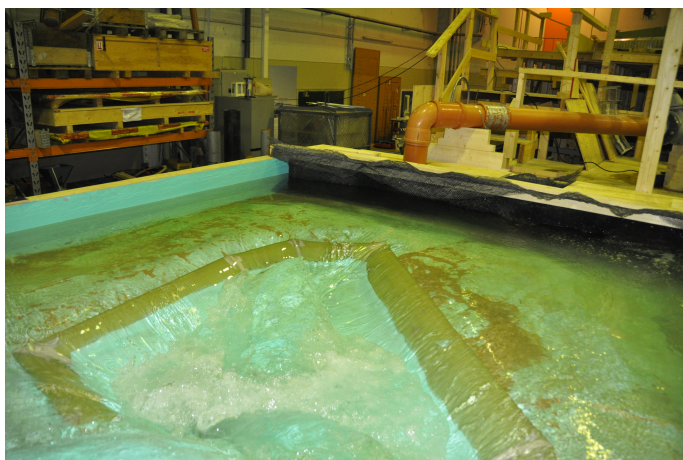
Figur 4.6 viser vannføringskurven til flomløpet etter at tunnelen er utvidet. Se tillegg G for måleresultater.



Figur 4.6: Vannføringskurve etter utvidelse av tunnelen

Q_{dim} Resultatene ved Q_{dim} har ikke endret seg ved utvidelse av tunnelen fordi terskelen er bestemmende ved begge utformingene. En observasjon som ble gjort ved Q_{dim} er at det oppsto pulseringer i vannstanden i samlekanalen. Vannet går vekselvis fra å være helt tett ved innløpet til å åpne seg og nesten tømme samlekanalen helt. Luft blir med som luftbobler innblandet i vannet og stiger opp til tunneltaket ved utløpet.

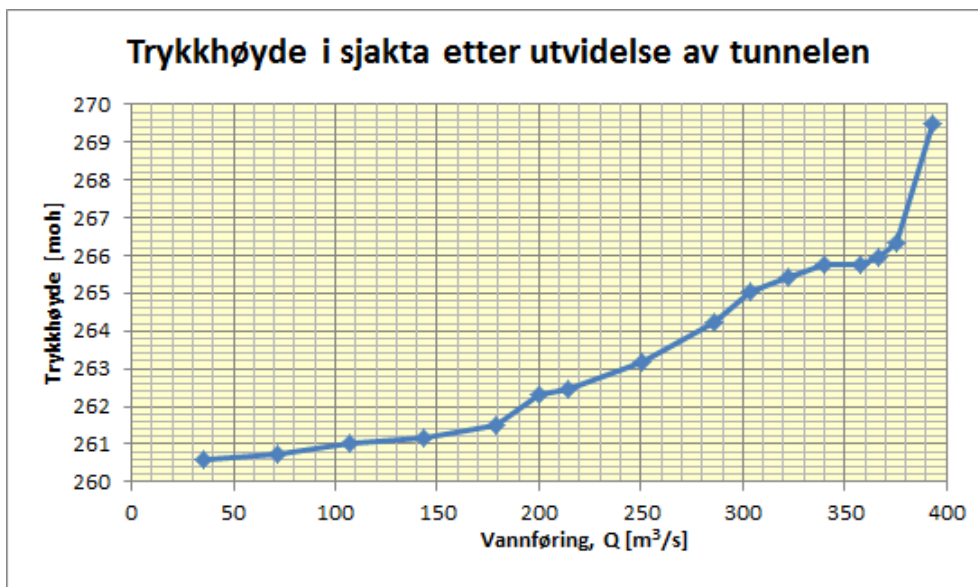
PMF Figur 4.6 viser at utvidelse av tunnelen gir en betydelig økning i kapasitet. Ved Q_{PMF} som er $360 \text{ m}^3/\text{s}$, viser grafen at terskelen fortsatt er bestemmende for kapasiteten. Vannstanden er da 281.5 moh . Dette er det samme som topp kjerne og innenfor kravet til maksimal vannstandsstigning, se tabell 1.3. Luft blir med gjennom flomløpet som luftbobler innblandet i vannet. Figur 4.7 viser situasjonen i samlekanalen ved avledning av PMF.



Figur 4.7: Situasjonen samlekanalen ved avledning av PMF

4.2.2 Trykkforhold i sjakta ved utvidet tunnel

Figur 4.8 viser trykkhøyden i sjakta etter at tunnelen er utvidet.



Figur 4.8: Trykkhøyde i sjakta etter utvidelse av tunnelen

Ser at trykkhøyden nå er lavere enn den var ved dagens flomløpsløsning. Det betyr at vannstanden i sjakta blir lavere når tunnelen utvides. Se tillegg G for måleresultater.

4.3 Kapasitet til flomløpet med utvidet tunnel, men innsnevret tverrsnitt i starten av tunnelen

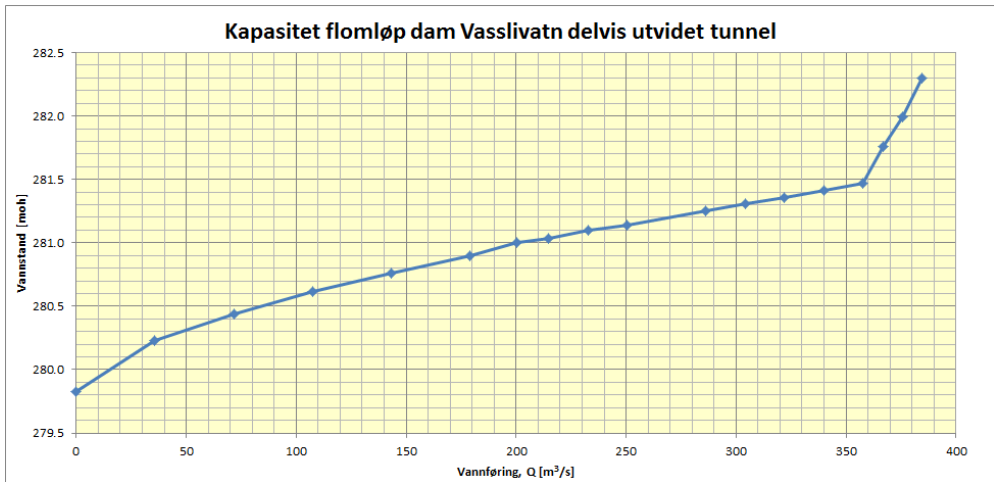
For å få vekk pulsasjonene i samlekanalen ved Q_{dim} ble det puttet inn isopor i overgangen mellom sjakt og tunnel for å snevre inn deler av tunneltverrsnittet. Dette tilsvarer at tverrsnittet i overgang sjakt/tunnel er 28 m^2 i 7.6 meter av tunnelen. Deretter skrås den nedover til 41 m^2 , 10.8 meter ut i tunnelen. Se figur 4.9. Tanken bak dette var å få en høyere vannhastighet i overgangen sjakt/tunnel.



Figur 4.9: Isopor i overgangen sjakt/tunnel

4.3.1 Vannføringskurven ved innsnevring i starten av tunnelen

Vannføringskurven, figur 4.10, viser resultatene når deler av isoporen er satt inn igjen i starten av tunnelen. Det vil si delvis utvidet tunnel. Se tillegg G for måleresultater. Vannføringene er økt på samme måte som i avsnitt 4.2.



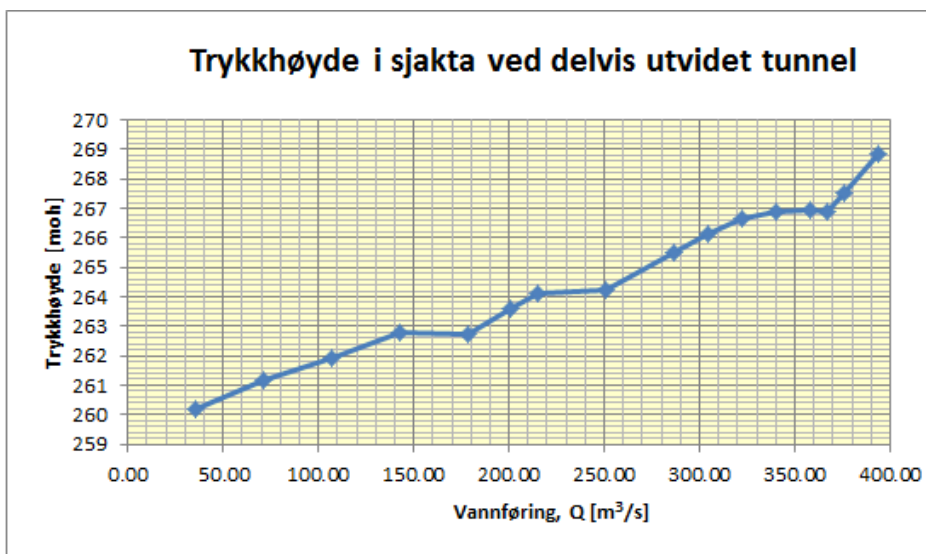
Figur 4.10: Vannføringskurve med delvis utvidet tunnel

Q_{dim} Kapasiteten til flomløpet ved Q_{dim} viser samme resultat som de to tidligere vannføringskurvene. Observasjoner i modellen viser at pulseringene som var i samlekanalen ved utformingen der hele tunnelen ble utvidet nå er borte. Luften blir med som luftbobler innblandet i vannet som stiger opp til tunneltaket i slutten av tunnelen og føres videre ut gjennom utløpet.

PMF Vannføringskurven, figur 4.10 viser da en redusert kapasitet i området der overløpsterskelen er bestemmende i forhold til fullt utvidet tunnel. Tverrsnittet går fullt ved vannføringer over Q_{PMF} . Det vil si at flomløpet klarer akkurat kravet til Q_{PMF} . Luften blir med som innblandet luft gjennom hele tunnelen.

4.3.2 Trykkforhold i sjakta ved innsnevring i starten av tunnelen

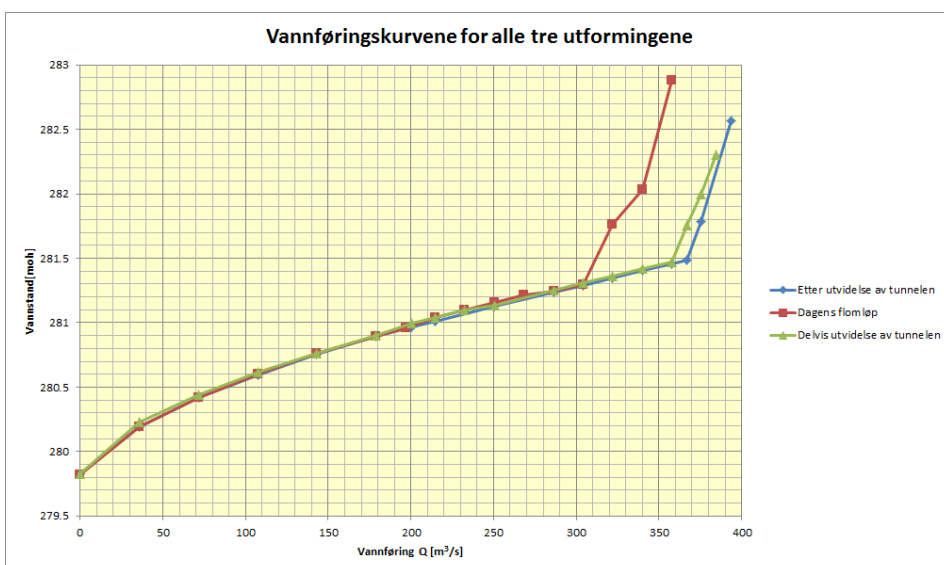
Figur 4.11 viser trykkhøyden i sjakta når isoporen er limt inn i starten av tunnelen. Ser at trykkhøyden blir litt høyere ved Q_{dim} enn den var før isoporen ble satt inn. Se tillegg G for måleresultater.



Figur 4.11: Trykkehøyde i sjakta med delvis utvidet tunnel

4.4 Sammenligning av vannføringskurvene

Alle vannføringskurvene i samme figur, figur 4.12 gir en oversikt over endringene i kapasitet ved de forskjellige løsningene.



Figur 4.12: Vannføringskurvene for de tre forskjellige utformingene

Figuren viser vannføringskurvene før og etter utvidelsen av tunnelen i samme figur, samt vannføringskurven der deler av isoporen er satt inn igjen i overgang sjakt/tunnel. Ser her at utvidelse av tunnelen fra 28 m^2 til 41 m^2 gir en økning i kapasitet fra $304 \text{ m}^3/\text{s}$ til $368 \text{ m}^3/\text{s}$ i området der overløpsterskelen er bestemmende, men her er problemet at det oppstår pulseringer i samlekanalen ved dimensjonerende flom. Ved å sette inn isopor i overgang sjakt/tunnel viser vannføringskurven en kapasitet på $360 \text{ m}^3/\text{s}$ før systemet lukker seg. Dette tilsvarer Q_{PMF} .

Kapittel 5

Diskusjon

5.1 Kapasitet dagens flomløpssystem

Kapasiteten til flomløpet vises på vannføringskurven, figur 4.1. Dette er kapasiteten slik det er i dag bortsett fra at broen og pilarene er fjernet. Dette er fordi det var mest praktisk i forhold til modellbyggingen og fordi det er beregnet med ganske stor sikkerhet at denne må fjernes for å ikke få for høy vannstandsstigning i magasinet. Alternativet til å fjerne broen er å heve morenekjernen i dammen. Dette vil være et mye dyrere tiltak. Broen har i dag ingen funksjon utover at den er fin å stå på for å få en oversikt over flomløpet. Broen er inngjerdet så 3.person ikke har adgang.

5.1.1 Q_{dim}

Figur 4.1 viser at ved Q_{dim} er vannstanden i magasinet 281 moh. Dette er akkurat innenfor kravet til maksimal vannstandsstigning i magasinet, se kapittel 1.3. Det vil si at det er nødvendig at broen over terskelen fjernes for å få lang nok overløpslengde på terskelen. Denne broen er ikke laget i modellen, så det er ikke mulig å se hvor mye større kapasitet terskelen får uten.

Kravet ved avledning av Q_{dim} er at det skal være friskeilstrømning i systemet, se kapittel 2.2.1. I tillegg stiller NVE krav om at vannstanden ikke skal høyere opp enn 1/3 av sjakta (NVE, 2012a). Trykksensoren som var plassert i bunn av sjakta, figur 4.4 gir indikasjoner på at vannstanden ikke stiger høyere enn 1/3 av sjakta. Observasjoner under modellkjøringen viser at vannstanden ikke overstiger 1/3. I revurderingsrapporten viser beregninger at vannstanden overstiger dette punktet. Dette har modellforsøket motbevist.

5.1.2 PMF

Ved økning i vannføring, stiger trykknivået oppover og hele systemet lukker seg ved $304 \text{ m}^3/\text{s}$. Ved en vannføring lik PMF klarer ikke modellen å ta unna alt vannet og vannstanden i magasinet stiger over det måleren klarer å måle. Vannstanden ved dette punktet måtte leses av manuelt og er derfor noe usikkert. Likevel viser det at flomløpet ikke har god nok kapasitet til å avlede Q_{PMF} .

5.1.3 Kommentar til vannføringskurven

Vannføringskurven gir litt rare resultater etter at systemet har gått over til å være lukka. Her er det først en veldig reduksjon i systemet som følge av at det lukkes, før det plutselig blir litt bedre kapasitet enn det i teorien skal bli. Etter at systemet er lukka skal vannføringskurven bli en rett strek uten flere knekker. Dette ses også godt i figur 4.3, hvor det bare er $9 \text{ m}^3/\text{s}$ mellom hvert punkt. Det er gjort flere uavhengige målinger i dette området, men det samme resultatet skjer hver gang. Det er også prøvd å stikke inn en luftslange i sjakta for å se om det skyldes luftproblemer og undertrykk i sjakta, men dette gir heller ikke noe annet resultat. Den mest sannsynlige grunnen er at det ikke er mulig å holde nedstrøms vannstand helt eksakt i forhold til beregningene fra HEC-RAS.

Det viste seg at det er viktig å alltid starte vannstanden nedstrøms tunnelutløpet lavere enn hva den egentlig skal være og deretter justere den opp. De gangene vannstanden ble for høy og den ble justert ned, ga vannstanden i magasinet andre resultater. Dette skyldes nok at når vannstanden først er påvirket av for høy vannstand nedstrøms mister den kapasitet og fortsetter å ha den dårlige kapasiteten etter at vannstanden er stilt inn. Når systemet først lukkes, må vannføringen senkes lavere enn til det punktet det ble lukket, før det åpnes igjen. Det er mest sannsynlig en slik feil som oppstår her.

5.1.4 Vurdering av hvordan flomløpet skal endres

Vannføringskurven viser at flomløpet må utvides. Det er flere muligheter å gjøre dette på. Det har tidligere vært nevnt at innløpet til sjakt er dårlig utformet. Innstrømningsforholdene inn i sjakta er veldig rotete, noe som også synes i modellen. Et alternativ er derfor å gjøre noe med dette innløpet.

Et annet alternativ vil være å utvide sjakten og/eller tunnelen. Håndberegningene, se tillegg D, viser at det er tunnelen som er den største begrensningen av disse. Dette kommer av at det vil være rørstrømning i tunnelen, mens det er

mindre vannfylt tverrsnitt i sjakta. Vætet periferi og friksjon vil da være større i tunnel.

Et tredje alternativ er å endre ruheten i sjakt og tunnel. Vannføringskurven viser at det mangler mye for at PMF skal kunne avledes. Det ble derfor vurdert at det var mer å hente på å utvide tunnelen.

Det ble derfor bestemt at tunnelen skulle utvides. Dvs. fjerne isoporen som er lagt inn.

5.2 Kapasitet flomløpet med utvidet tunnel

Håndberegninger viste at det var i tunnelen flaskehalsen til kapasiteten var. Tunnelen ble derfor utvidet fra 28 m² til 41 m². Etter beregningene skulle 39 m² være tilstrekkelig, men for å være på den sikre siden, ble det utvidet til 41 m².

5.2.1 Q_{dim}

Ved avledning av Q_{dim} oppsto det da veldig uregelmessig innstrømning til sjakta. Samlekanalen varierte fra og nesten være helt full av vann, til at alt ble slukt unna. Det var en mye mer ustabil innstrømning med den nye løsningen enn hva det var før tunnelen ble utvidet. Disse ustabile innstrømningene og pulsasjonene i samlekanalen opptrer i området 200 m³/s til 280 m³/s. Etter dette blir det stabile og fine innstrømningsforhold igjen. Dette påvirker ikke vannstanden i magasinet som er på 281 meter ved Q_{dim} , siden vannet i samlekanalen ikke stiger høyere enn at terskelen fortsatt er bestemmende. Vannstanden i magasinet er den samme nå som før tunnelen ble utvidet. Det kommer av at det er terskelen som er bestemmende for kapasiteten så lenge tunnelen ikke er helt fylt.

Disse pulseringene ved innløp til sjakt skyldes mest sannsynlig luftproblemer. Ved å stikke inn en slange som tilfører luft inn i innløpet til sjakta blir disse pulseringene borte. Det som skjer da er at innløpet til sjakt går tett slik at det ikke blir luft med ned i sjakta. Dette fører til et vakuum i sjakta, som igjen drar vannet gjennom innløpet og ned sjakta. Som skrevet i kapittel 3.6 kan det bli maksimalt 10 meter undertrykk prototyp, mens det kan bli mer i modell. Flomløpet på Vasslivatn har bare 20 meter lang sjakt, men det er likevel viktig å være klar over at det ikke er sikkert at det vil oppstå vakuum som drar vannet gjennom sjakta i prototyp. Faren er da, dersom disse pulseringene også vil oppstå i prototyp, at systemet kan gå over til å bli lukket allerede ved dimensjonerende flom. Det vil også oppstå mindre undertrykk i sjakta i prototypen fordi mer

luft blir med ned i sjakta. På grunn av at luft ikke modelleres riktig i en fysisk modell er det derfor vanskelig å si om situasjonen ved Q_{dim} viser riktig resultat eller ikke. Et mulig resultat er at vi oppnår for god kapasitet i modellen ved Q_{dim} . Det vil derfor være god nok kapasitet ved Q_{dim} , under forutsetning av at det ikke lukker seg uten å åpne opp igjen.

Trykkmålinger i bunn av sjakta som viser vanntrykket viser at det er mye større variasjon når luft ikke tilføres sjakta i forhold til når luft tilføres sjakta. Dette er en god indikasjon på at det oppstår undertrykk i sjakta.

Observasjoner i modellen viser at farten i overgang sjakt/tunnel er veldig lav og at det oppstår en stor virvel i vannet som drar vannet litt i alle retninger. Det at farten er lav kan være grunnen til at sjakten fylles opp og delvis tetter innløpet til sjakten.

5.2.2 PMF

Etter utvidelsen av tunnelen viser vannføringskurven at den klarer å avlede Q_{PMF} . Vannstanden i magasinet er da 281,5 meter. Dette er innenfor kravet om å ikke overstige tetningskjernen i dammen. Ved avledning av Q_{PMF} oppstår ikke de samme problemene ved innløpet i sjakta som ved Q_{dim} . En grunn til dette kan være at det da er en høyere vannhastighet gjennom flomløpssystemet. Maksimal kapasitet av flomløpet før det går over til lukka system er $367 \text{ m}^3/\text{s}$.

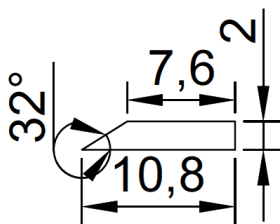
5.2.3 Vurdering av ny endring av flomløpet

For å prøve å unngå pulsasjonene i samlekanalen ble en ny utforming vurdert. Dersom lukkingen av innløpet og derav vakuumpressur i sjakta skyldes rotete strømning i bunn av sjakta og for lav fart, må tunnelen endres slik at farten økes i bunnen av sjakta. Det ble derfor bestemt å sette inn isoporen igjen i starten av tunnelen, slik at første del av tunnelen får sitt opprinnelige tverrsnitt, mens resten av tunnelen får det nye tverrsnittet. Vurderingen gikk da på hvor mye som skulle settes inn. Det finnes ikke noe eksakt svar på dette, så metoden blir å prøve seg frem og se hvordan resultatet blir i modellen. Ved å snevre inn tverrsnittet vil kapasiteten til flomløpet reduseres. Det er viktig at det ikke reduseres mer enn at flomløpet klarer å ta unna PMF.

5.3 Kapasitet flomløpet med delvis utvidet tunnel

Det ble satt inn isopor i starten av tunnelen og 7.6 meter utover og deretter skrånet ned mot tverrsnittet på 41 m^2 etter 10.8 meter, se figur 5.1 for målene

på biten som ble satt inn.



Figur 5.1: Isoporbiten som ble satt inn igjen i sjakta. Verdiene er i meter i prototyp.

5.3.1 Q_{dim}

Utformingen hvor starten av tunnelen er snevret inn i forhold til full utvidelse av tunnelen gjør at pulseringene blir borte. Virvelen som var i bunn av sjakta ved fullt utvidet tunnel er mye mindre i denne utformingen. Observasjoner viser at vannet skyter fart i bunnen av sjakta og ut i tunnelen på grunn av mindre tverrsnitt. Dette fører til at vannstanden ikke bygges opp i sjakta og innløpet slipper inn luft hele tiden. Figur 4.11 indikerer at vannstnaden ikke overstiger $1/3$ av sjakta. Dette ble også observert under modellkjøringen.

Luften går gjennom tunnelen som luftbobler innblandet i vannet i starten av tunnelen. Disse kommer opp til tunneltaket mot slutten av tunnelen og går ut gjennom utløpet.

5.3.2 PMF

Siden deler av tunneltverrsnittet er redusert, vil kapasiteten reduseres. Figur 4.10 viser at flomløpet så vidt klarer å ta unna PMF. Ved en økning på $9 \text{ m}^3/\text{s}$, lukker systemet seg. Luften går gjennom flomløpet som luftbobler innblandet i vannet og ut i utløpet. Siden vi er i området helt i knekkpunktet av vannføringskurven vil en liten feil i flomberegningen eller modellen føre til at systemet lukker seg ved dette tilfellet i prototypen. Kapasiteten ved PMF er derfor litt for liten til å være på den sikre siden. Særlig med tanke på at flomberegningene er i klasse 4.

5.3.3 Luftobservasjoner i modellen

Det er stor luftinnblanding i modellen, men det er ikke for noen av forsøkene observert luftlommer som blir stående i sjakt eller tunnel. Det betyr at luft fritt passerer gjennom modellen ved alle vannføringer. Kapasiteten til systemet reduseres derfor ikke som følge av luft i systemet.

5.4 Feilkilder

Siden den fysiske modellen bygges i en redusert skala og med noen antakelser vil det være noen feilkilder det er viktig å være klar over. Her følger noen av disse.

5.4.1 Luft

Den største og mest usikre feilkilden i dette modellforsøket er luft. Det er vanskelig å tallfeste hvor mye påvirkning det er fra luftproblematikk i modellen. Avsnitt 5.2.1 tar for seg et av problemene. På bakgrunn av disse problemene er det vanskelig å komme med noe eksakt konklusjon av kapasiteten i områdene der luftproblemene spiller inn. Det er viktig å være klar over når disse kan oppstå og hele tiden være kritisk til resultatene med tanke på luftinnblanding.

5.4.2 HEC-RAS beregninger

HEC-RAS beregner endimensjonal vannstrøm. Det forutsetter lik hastighet og vannstand over hele profilet. HEC-RAS gir derfor gode resultater der vannet strømmer parallelt, men er mindre egnet der vannet spres ut (NVE, 2010a). Ved utløpet av flomløpstunnelen vil ikke vannstrømmen være helt parallell. Derfor vil resultatene til HEC-RAS være litt unøyaktige i dette området.

Tverrprofilene som ble brukt i HEC-RAS beregningen var målt opp med 5 meters mellomrom, 120 meter ned i elva. For de største vannføringene overstiger vannstanden nivået profilene har blitt målt opp til. Profilene er derfor tegnet høyere ved hjelp av kart og høydekoter fra stedet. Dette fører til at det vil være en usikkerhet i nøyaktighet av tverrprofilene. Det finnes heller ikke informasjon om terregnet mellom tverrprofilene, men ut fra observasjoner i elva er det ikke store forandringer i elveløpet mellom tverrprofilene. De gir, sammen med kart, en god beskrivelse av elva nedstrøms tunnelutløpet. Totalt sett ble dette ansett som tilstrekkelig nok til å kunne beregne nedstrøms vannstand.

Manningstallet ble valgt til 33. Dette er valgt ut fra observasjoner på stedet og tall brukt i tilsvarende elver. Hvis Manningstallet er feil og elva egentlig har et lavere Manningstall vil vannstanden HEC-RAS beregner bli feil. Som skrevet i avsnitt 3.4.1 vil vannstanden ved et Manningstall på 16 være 0.3 meter høyere for vannføringer over $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

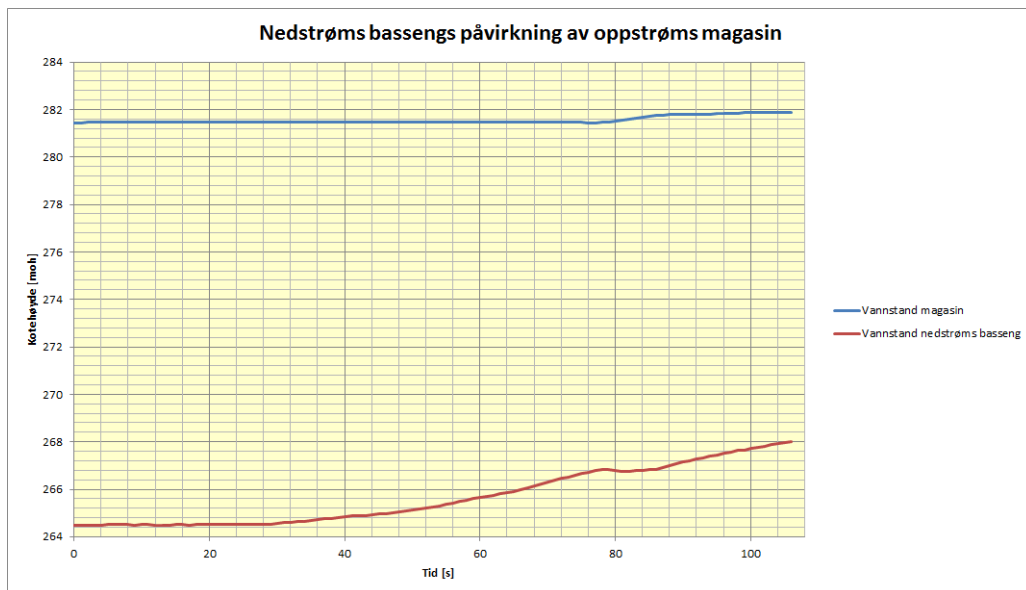
5.4.3 Vannstand i nedstrøms basseng

Det ble brukt vannstandsmåler med kobling til PC i nedstrøms basseng. Denne viste vannstanden i bassenget over bunn av tunnel som er på kote 254. Den viste at vannstanden i bassenget ikke holder seg helt stabil. Det er også veldig vanskelig å stille inn vannstanden helt korrekt. Luka som ble montert for å stille inn vannstanden går litt hakkete og små justeringer er umulig.

En annen usikkerhet med bassenget nedstrøms er hvor i elva vi skulle bruke vannstanden fra. Figur 3.8 viser at det oppstår et vannstandssprang 15 meter nedenfor tunnelutløpet. Vannet nedenfor dette spranget vil ikke ha innvirkning på området oppstrøms dette punktet. For å være på den sikre siden, ble det likevel bestemt at vannstanden etter vannstandsspranget skulle brukes. Dette er det punktet hvor vannstanden i HEC-RAS har det høyeste nivået. Figur 3.5 viser da at utløpet blir dykket ved høye vannstander siden utløpet ligger inne i bassenget. Det vil si at vannstandsspranget også blir dykket siden vannet vil stå rundt hele utløpet. Det ble vurdert å sette inn en plate langs utløpet for å få med vannstandsspranget, men kom frem til at det ville være vanskelig å få modellert dette helt korrekt. Ved store flommer er det mulig at vannet vil komme over fra et elveløp ved siden av utløpet i prototyp og få litt samme effekt som modellen får ved at utløpet blir dykket. For å være på den sikre siden, ble det valgt å fortsette med å bruke vannstanden bak vannstandsspranget. Det vil også være litt unøyaktigheter i beregningen av vannstandsspranget på grunn av endimensjonal beregning av flerdimensjonal vannstrøm ut av tunnelen, se avsnitt 5.4.2.

For å se hvor mye feil innstilt vannstand i bassenget nedstrøms flomløpet påvirker vannstanden i magasinet, ble det gjort et forsøk med å heve vannstanden nedstrøms ved en vannføring lik Q_{PMF} gjennom flomløpet. Denne testen ble gjort når tunnelen var utvidet og klarte å ta unna PMF med riktig nedstrøms vannstand. Figur 5.2 viser resultatene av testen. Måleresultater ligger i tillegg H. Ved Q_{PMF} må vannstanden nedstrøms heves med 2.3 meter for at det skal påvirke vannstanden i magasinet. Dette tilsvarer 11.5 cm i modellen. Bassenget nedstrøms flomløpet påvirker ikke vannstanden i magasinet før sytemet lukkes. For å hindre at nedstrøms basseng ble overfylt måtte testen avsluttes etter 110 sekunder. Dette viser at så lenge systemet ikke er lukket skal det mye til for at en feil innstilling av vannet nedstrøms påvirker resultatet. Når systemet er

lukket, eller i nærheten av å bli lukket gir en feil vannstand i bassenget større utslag på vannstanden i magasinet oppstrøms.



Figur 5.2: Nedstrøms bassengs påvirkning av oppstrøms magasin

Bassenget nedstrøms tunnelutløpet har liten vannhastighet sammenlignet med hastigheten i prototyp. Derfor er energilinja og ikke vannstanden i HEC-RAS beregningen benyttet. Energilinja ligger ca. 40 cm over vannlinja i prototyp. Det vil si 2 cm i modellen. Denne vurderingen fører til at modellen er på sikker side i forhold til prototyp.

5.4.4 Ruhet

Som skrevet både i avsnitt 3.4.1 og kapittel 3.5 er Manningstall i dette modellforsøket valgt på bakgrunn av erfaringstall. Det finnes ingen målinger av ruheten på Vasslivatn som kan gi eksakte tall på hva Manningstallet skal være. Retningslinjer for flomløp (NVE, 2005) sier at det skal gjøres antakelser om stor friksjon dersom ikke annet kan dokumenteres og at det ved dimensjonering og kontroll av systemets kapasitet bør gjøres antagelser som gir systemet gunstige forhold (liten friksjon) og ugunstige forhold (stor friksjon) (Backe, 1993).

Ved videre undersøkelser av modellen kunne det være interessant å sjekket hvor stor innvirkning ruheten har på kapasiteten. Dette kan gjøres ved å endre ruheten i modellen. Røneid og Sæter (2007), viste at ruhet har stor innvirkning på kapasiteten.

5.5 Diverse vurderinger

Her følger diverse vurderinger av modellforsøket.

5.5.1 Falltap

Singulærtap er tap som følge av tverrsnittsendringer eller bend i vannveien. Så lenge modellen blir korrekt modellert i forhold til prototypen blir disse tapene med. På Vasslivatn kommer omløpstunnelen inn på flomløpstunnelen i bunnen av sjakta. Denne er ikke laget i modellen og det vil derfor være et singulærtap her i prototypen som ikke er i modellen. Det ble vurdert å sette inn ekstra ruhet ved hjelp av ruhetselementer i dette området, men det ville ha blitt ren gjetning. Det ble også antatt at dette hadde veldig lite å si for kapasiteten. Så lenge alle de andre falltapene er med og ruheten blir riktig modellert, kan det reduserte falltapet på grunn av omløpstunnelen neglisjeres.

Siden tunnelen er helt glatt, må friksjonstapet settes inn. Det ble antatt at ruheten i sjakta og tunnelen tilsvarer et Manningstall på henholdvis 30 og 33 i prototypen. Dette er et erfaringstall og vi kan ikke med sikkerhet si at det er den riktige ruheten. Både sjakt og tunnel er råsprengt, og tall fra andre råsprengte tunneler viser at Manningstallet ligger i dette området. Til å sette inn ruhet i modellen ble Birkelands formel (Birkeland, 2008), se kapittel 3.5.4, brukt. Denne er tidligere bare brukt på mindre tverrsnitt enn tunnelen på modellen til Vasslivatn. Det var derfor interessant å se om den ga de samme resultatene på et større tunneltverrsnitt.

Ved å finne trykkdifferansen i tunnelen mellom to punkter når tunnelen var helt vannfylt, viste det seg at det var oppnådd et Manningstall på 32 i modellen. Dette var ganske nærme det ønskede Manningstallet som var 33. 32 er på den sikre siden i forhold til kapasitet, og det er heller ikke helt sikkert at 33 er det riktige tallet i tunnelen. Dette viste at Birkelands formel gir gode resultater uavhengig av tunneltverrsnitt. Det ble ikke målt falltap i sjakta fordi den er kort og har litt uryddig strømning. Det ble antatt at dersom ruheten stemmer i tunnelen, vil den også stemme i sjakta, siden samme formel er brukt.

5.5.2 Skala 1:20

Modellen ble bygget i skala 1:20. Dette er en relativt stor skala. De fleste tidligere modellforsøk av flomløp som er gjort i vassdragslaboratoriet er modellert i skala 1:40. Fordelen med stor skala er at det er enklere å modellere detaljer fra prototyp. For eksempel vil innløpet til sjakta bli mer nøyaktig modellert ved

en skala på 1:20 i forhold til en mindre skala. Modellovene, se avsnitt 3.2.2, vil også være tilfredstilt ved en skala på 1:40. Modellen over Vasslivatn er derfor høyt over dette kravet. En annen fordel er at Reynoldseffekter som er omtalt i avsnitt 3.2.3, blir mindre.

Ulempen med en så stor skala som modellen til Vasslivatn er, er at plass i laboratoriet kan begrense utstrekningen av modellen. Det kunne vært interessant å modellert mer av utløpet og lenger ned i elva etter utløpet. Den store målestokken, gjorde at modellen måtte kuttes 15 meter ned i elva. Usikkerheten med nedstrøms vannstand kunne da kanskje vært redusert. En annen ulempe er at når modellen er så stor, kreves det store vannmengder inn i modellen. For å få nok vann måtte to pumper tas i bruk.

5.5.3 Innløp sjakt

Retningslinjer for flomløp (NVE, 2005), sier at det skal legges vekt på at overgangen fra samlekanalen nedstrøms overløpet til sjakt gis en god traktformet utforming. På Vasslivatn er innløpet til sjakta dårlig utformet. Fra samlekanalen og over i sjakt, får vannet en nesten 90 grader knekk. Det vil si at det ikke er noen traktformet utforming. Ved flom kommer vannet fra nesten alle kanter ned mot innløpet. Det fører til at vannet må krige litt med seg selv før det finner veien ned i sjakta. Det ville derfor være interessant å se om endringer i innløpet til sjakta kunne ha noen innvirkning på kapasiteten til flomløpet.

5.5.4 Trykksensorer

Det ble satt inn en trykksensor i bunn av sjakta som skulle måle trykkehøyden i sjakta. Dette kunne være med på å bevise hvor i sjakta vannstanden står ved Q_{dim} . Denne ga informasjon i form av meter vannsøyle over denne sensoren. På grunn av at den ikke klarer å måle tap gjennom sjakta, ble resultatene fra denne litt vanskelig å tolke. Det ble derfor satt inn en trykksensor 1/3 opp i sjakta før de neste forsøkene. Hensikten her var å finne ut når vannstanden sto 1/3 opp i sjakta. Denne ble satt i taket av sjakta. Når isoporen ble fjernet, kom den for høyt opp i sjakta. Siden den ble satt i taket ga den veldig lite utslag. Dette skyldes nok at vannet sjelden når helt opp til taket. Dette kan fortelle at det er frispelstrømning i sjakta, men på grunn av at denne er satt litt for høyt opp, gir den ingen informasjon om hva som skjer i 1/3-punktet.

Trykkehøyden i sjakta for de ulike utformingene av flomløpet er tatt med i resultatet, kapittel 4, men må leses kritisk med tanke på falltap i sjakten og kan kun brukes som en indikasjon på trykkehøyden.

Ved videre forsøk med modellen anbefales det at trykkmåleren flyttes ned til 1/3-punktet.

5.5.5 Overløpsterskel

Overløpsterskelen er økt i forhold til prototyp siden broen og pilarene er fjernet. Som skrevet i kapittel 2.1 ble det under revurderingsbefaringen påpekt at det var ugunstige strømningsforhold for den delen av flomløpet som ligger inn mot fyllingsdammen på grunn av trangt innløp. Observasjoner i modellen tyder på at dette ikke er noe problem. Enkle tester med å blokkere den delen av terskelen som ligger helt inne ved dammen viser at dette ikke gjør strømnings situasjonen i samlekanalen og sjaktinnløp bedre. Dette kommer av at vannet her har en rett vei ned i sjakta, se tillegg A, bilde 1. Ved å sperre terskeldelen som er lengst vekk fra damsiden, inn mot land, blir det antydning til bedre innstrømningsforhold. Dette kommer av at vannet her renner over terskelen og når det møter resten av vannet i samlekanalen må det snu 90 grader for å komme ned i sjakta. Dette fører til at strømningsforholdene blir uryddige.

Problemet med å gjøre endringer på overløpsterskelen er at det fører til endringer i vannstanden i magasinet. Vannstanden i magasinet ved dimensjonerte flom og påregnelig maksimal flom er allerede helt på grensen av hva som er tillatt. En liten reduksjon i terskellengden vil derfor føre til at kravet til fribord på morenekjerne overskrides.

Det påpekes også i revurderingsrapporten (2011) at overløpet helt ytterst i “andenebbet” ikke er helt optimalt. Tabellen over overløpskoeffisienten, tabell 4.1, viser at den ligger mellom 1.8 og 2.0 for området der undervannet ikke har innvirkning på kapasiteten. Dette er en ganske god overløpskoeffisient, men kunne kanskje vært nærmere 2.0 i hele området hvis terskelen hadde hatt en rundere utforming helt ytterst i spissen og at terskeldelen lengst vekk fra damsiden hadde vært fjernet.

5.5.6 Innløpsflom versus avløpsflom

I denne oppgaven er det bare tatt hensyn til avløpsflommen som er beregnet i flomberegningene (Sand, 2006). Hele modellforsøket forutsetter at broen over terskelen fjernes. Det vil si at avløpsflommen vil bli større enn det som er brukt i denne oppgaven. Tabell 1.3 viser at innløpsflommen ikke er så mye større enn avløpsflommen, men for at dette skulle vært helt korrekt måtte flommen vært routet gjennom magasinet på nytt. Avløpsflommen kan uansett ikke bli større enn innløpsflommen.

Dette fører inn på et miljøkrav som sier at flommene nedstrøms magasiner ikke skal økes. Alternativet da er å øke morenekjernen i dammen for at ikke vannstanden i magasinet skal gå over denne.

5.6 Flomløpet i forhold til forskriften

I kapittel 2.2 står det skrevet en del krav som er relevante for flomløpet på Vasslivatn. Blant annet §5-8 tredje ledd i damsikkerhetsforskriften (2009) der det står: *“Dammer skal ha flomløp med tilstrekkelig kapasitet til å avlede dimensjonerende avløpsflom ved dimensjonerende flomvannstand. Ved utforming av flomløp skal det tas hensyn til luftbehov og fare for erosjon av utsatte flater, trykkpulsasjoner, tilstopping og ising”*.

Løsningen hvor tunnelen er utvidet bortsett fra i overgangen mellom sjakt og tunnel er den beste løsningen. Den klarer å ta unna Q_{dim} og PMF. Pulsasjonene som oppsto i modellen da hele tunnelen var utvidet, er borte. Tilstopping har det ikke blitt tatt hensyn til i dette forsøket. Avhengig av faren for drivgods og lignende må det vurderes å legge til en sikkerhetsmargin for å ta hensyn til dette. Det at flomløpet har en vannlås, gjør at det er mindre utsatt for ising.

Damsikkerhetsforskriften §5-8 sjuende ledd sier: *“Dersom flomavledning skjer gjennom sjakt eller tunnel (lukket avløp), skal disse utformes slik at det blir frispeilstrømning i øvre del av systemet ved avledning av dimensjonerende avløpsflom. Overgangen fra overløpsterskel til sjakt eller tunnel skal gis en god hydraulisk utforming, slik at denne delen av flomløpet ikke blir begrensende for kapasiteten. Ved avledning av påregnelig maksimal avløpsflom, tillates rørstrømning ved at hele tverrsnittet går vannfylt, forutsatt at overløpet er bestemmende for vannstanden i magasinet”*.

Løsningen med delvis utvidet tunnel tilfredstiller dette kravet, bortsett fra at overgangen fra overløpsterskel til sjakt, som skal gis en god hydraulisk utforming, kan være litt begrensende for kapasiteten. For å tilfredstille sjuende ledd, må derfor dette punktet vurderes nærmere.

5.7 Videre forsøk

Det gjenstår fortsatt en del forsøk som ville vært interessante å gjøre i modellen til dam Vasslivatn. Det er blant annet å gjøre endringer i innløpet til sjakten og se hvor mye dette har å si for kapasiteten. Det vil være interessant å se hvor store endringer som skal til for at situasjonen ved innløpet blir bedre.

Et annet forsøk som ville vært interessant er hvor stor innvirkning ruheten har å si på kapasiteten. Dette kan gjøres ved å fjerne ruhetsselementer i modellen og ut fra dette finne ut om kapasiteten i prototyp kan økes ved å glatte sjakt og tunnel i flomløpet.

Et tredje forsøk ville være å sette på pilarene og broen over overløpsterskelen i modellen og sett hvordan dette påvirket vannstandsstigningen i magasinet.

Kapittel 6

Konklusjon

Alle resultatene i denne konklusjonen forutsetter at pilarene og broen over overløpsterskelen er fjernet.

Det er stor luftinnblanding i modellen, men kapasiteten til systemet vil ikke reduseres som følge av luft i systemet. Det vil ikke for noen vannføringer bygge seg opp luftlommer som svekker kapasiteten.

Kapasiteten til flomløpet er i dag $304 \text{ m}^3/\text{s}$. Dette er for liten kapasitet og flomløpet klarer ikke kravet til å avlede PMF etter regelverket. Flomløpet klarer å avlede Q_{dim} uten at vannstanden stiger for høyt i sjakta.

Ved utvidelse av tunnelen fra 28 m^2 til 41 m^2 vil kapasiteten til flomløpet økes til $367 \text{ m}^3/\text{s}$. Denne løsningen klarer dermed kravet til å avlede PMF etter regelverket, men pulseringer i innløp sjakt ved Q_{dim} gjør at denne løsningen ikke er tilfredstillende.

Ved å redusere tverrsnittet i overgangen mellom sjakt og tunnel og beholde resten av det utvidede tverrsnittet reduseres kapasiteten til $360 \text{ m}^3/\text{s}$. Problemet med pulseringer i sjakta blir da borte og avledning av Q_{dim} med vannstand lavere enn $1/3$ opp i sjakta er da tilfredstilt. Denne løsningen klarer kravene til både Q_{dim} og PMF. Løsningen klarer kravet til å avlede PMF med veldig liten margin og for å være på den sikre siden, bør kapasiteten økes noe utover dette.

Det er stor luftinnblanding i modellen, men kapasiteten til systemet vil ikke reduseres som følge av luft i systemet. Det vil ikke for noen vannføringer bygge seg opp luftlommer som svekker kapasiteten.

Bibliografi

- Aberle, Jochen (2012). Physical hydraulic modelling. Forelesningsfoil TVM4128 Vassdragsteknikk VK 10.10.2012. Institutt for vann- og miljøteknikk. NTNU.
- ASCE, American Society of Civil Engineers (1983). Manuals and Reports on Engineering Practise No. 97, Hydraulic Modeling - Concepts and practise
- Backe, D. (1993). Flomavledning, Dimensjonering, Eksempler. Kompendium til kurs Damsikkerhet II. NTNU.
- Bjørkmo, Dag (2012). Svartevassdammen - Modellforsøk for undersøkelse av kapasitet til flomløp og tappeløp, Masteroppgave, Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.
- Birkeland, R. (2008). Modellstudie av flomløpet på dam Sysenvatn, Masteroppgave, Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.
- Dalsnes, B. (2011). Sjøa Kraftverk, Dam Vasslivatn - Revurdering 2011. Sweco.
- Falltapskomiteen (1985). Falltap i kraftverkstunneler. Vassdragsregulantens forning, Teknisk sektor.
- Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (2009). Lovdata. <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20091218-1600.html>.
- Gessler, D. (2005). CFD Modelling of Spillway Performance, EWRI 2005: Impacts of Global Climate Change. Anchorage. Alaska. USA.
- Guttormsen, O. (2006). Kompendium TVM4165 Vannkraftverk og vassdrags-teknikk, Vassdragsteknikk II. Tapir Akademisk forlag. NTNU.
- Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models, Journal of Hydraulic Research, 49:3, 293-306.
- Li, S., Cain, S., Wosnik, M., Miller, C., Kocahan, H. og Wyckoff, R. (2011). Numerical Modeling of Probable Maximum Flood Flowing through a System of Spillways. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE

- Lysne, D., Glover, B., Støle, H. og Tesaker, E. (2003). Hydraulic Design, bok 8. Hydropower Development. Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.
- Lysne, D. K. (1982). Laws of similitude for model studies. Norconsult.
- Norgeskart. www.norgeskart.no. Hentet 7.5.2013.
- NVE (2005). Retningslinjer for flomløp, til §§ 4-6 og 4-13 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg. Norges vassdrags- og energidirektorat. Utgave 2.
- NVE (2010a). Vassdragshåndboka, Tapir akademisk forlag, Trondheim.
- NVE (2010b). Dam Vasslivatn - Notat fra revurderingsbefaring 16.9.2010. Internt notat.
- NVE (2011). Retningslinjer for flomberegninger, til § 5-7 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- NVE (2012a). Gjennomgang av revurderingsrapport for dam Vasslivatn 11.01.2012. Internt notat.
- NVE (2012b). Dam Vasslivatn i Hemne kommune. Godkjenning av revurdering og dispensasjon til å utsette dambruddsbølgeberegninger - Vedtak. Brev fra NVE til TrønderEnergi 12. mars 2012.
- NVE (2012c). Veileder for fyllingsdammer, til § 5-10 og § 6-1 i forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Olsen, N.R.B. (1999). Computational Fluid Dynamics in Hydraulic and Sedimentation Engineering. Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.
- Olsen, N.R. (2011). Numerical Modeling and Hydraulics. Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.
- Roe, M. (2012). Metoder for beregning av Flomløpskapasitet. Prosjektoppgave TVM4520 Vassdragsteknikk. NTNU.
- Røneid, Ø. og Sæter, Å. (2007). Dam Innerdalen - Hydraulisk analyse og Modellforsøk av Flomløp og Tappeløp. Masteroppgave. Institutt for vann- og miljøteknikk. NTNU.
- Sand, K. (2006). Flomberegning for Dam Vasslivatn og Dam Eidsfossen. Sweco Grøner.
- TrønderEnergi. www.tronderenergi.no/kraftverk. Hentet 20.5.2013.
- Vingerhagen, S. (2012). Muntlig kilde 17.12.2012. NTNU.
- Vingerhagen, S. (2011). Numerisk modellering av overløpet på Innerdalen vannkraftdam, Masteroppgave, Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.

Tillegg A

Bilder av flomløpet



1. Nedløp sjakt



2. Samlekanalen sett fra ytterst i spissen



3. Vasslivatn



4. Samlekanalen og overløpsterskelen sett fra land



5. Utløp tunnel



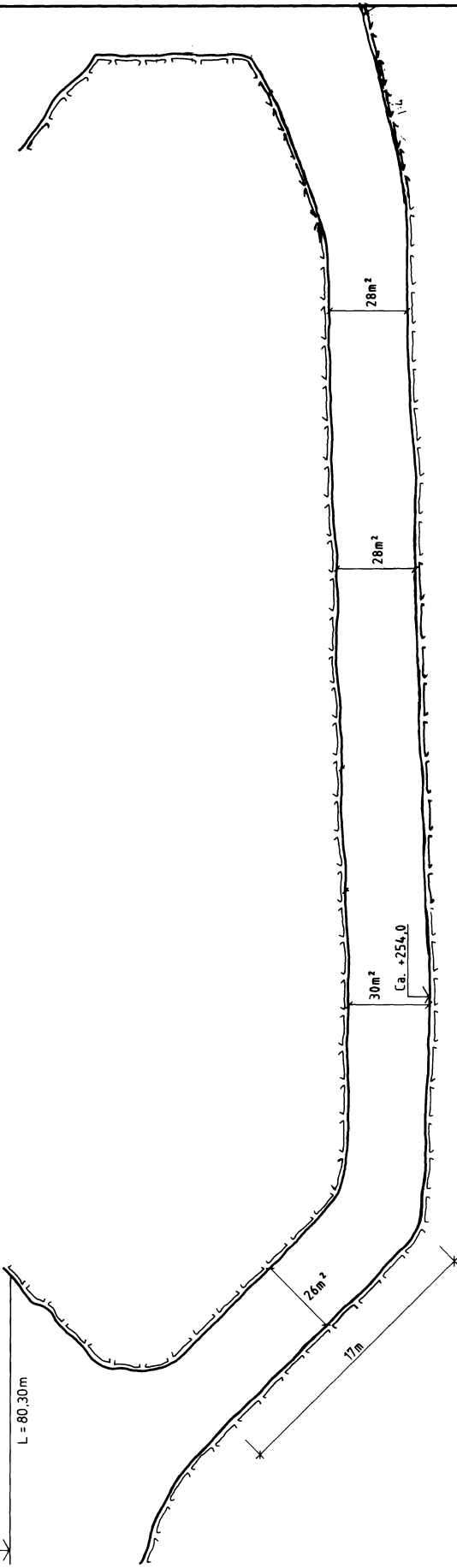
6. Flomløpet i bruk våren 2012

Tillegg B

Byggetegninger og oppmålinger av flomløpet

1. Tegning av overløpsterskelen
2. Tegning lengdeprofil av tunnelen
3. Tverrprofiler samlekanal
4. Tverrprofiler i elv
5. Lengdeprofil av tunnelen fra oppmålinger
6. Høydekoter overløpsterskel og samlekanal

+279.83
OVERLØPSTERSKEL
L = 80.30m



LENDEPROFIL

OVERLØP

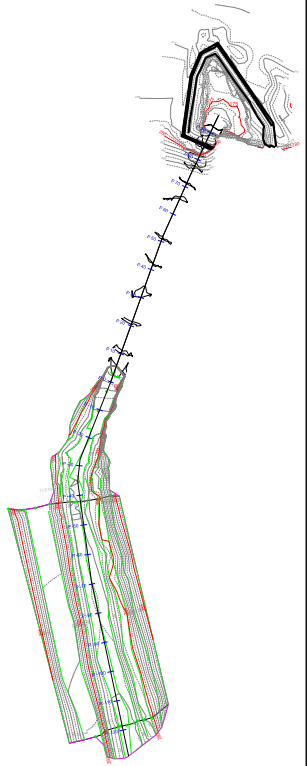
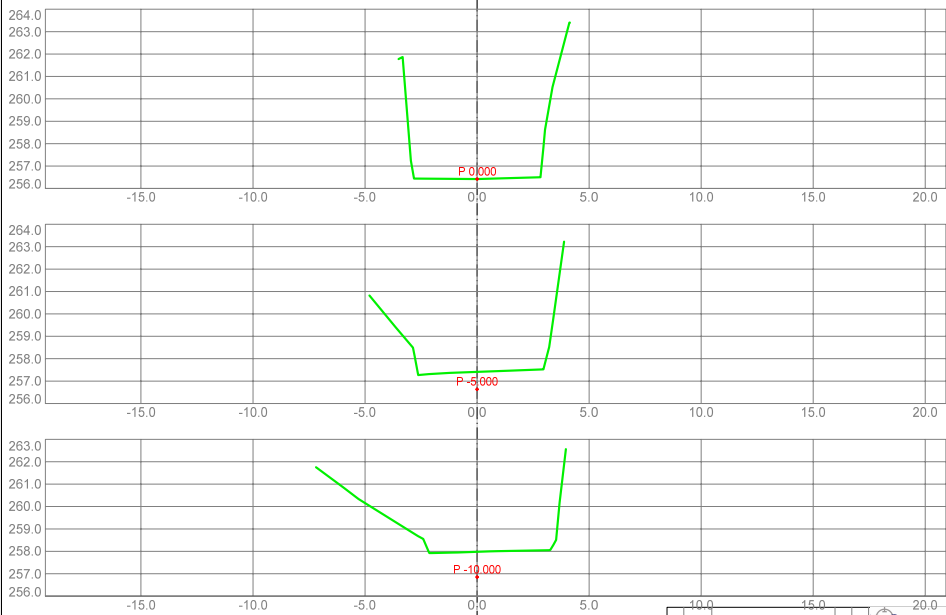
STRØMNINGSDIREKSJON →

TUNNELSYSTEM
PLAN

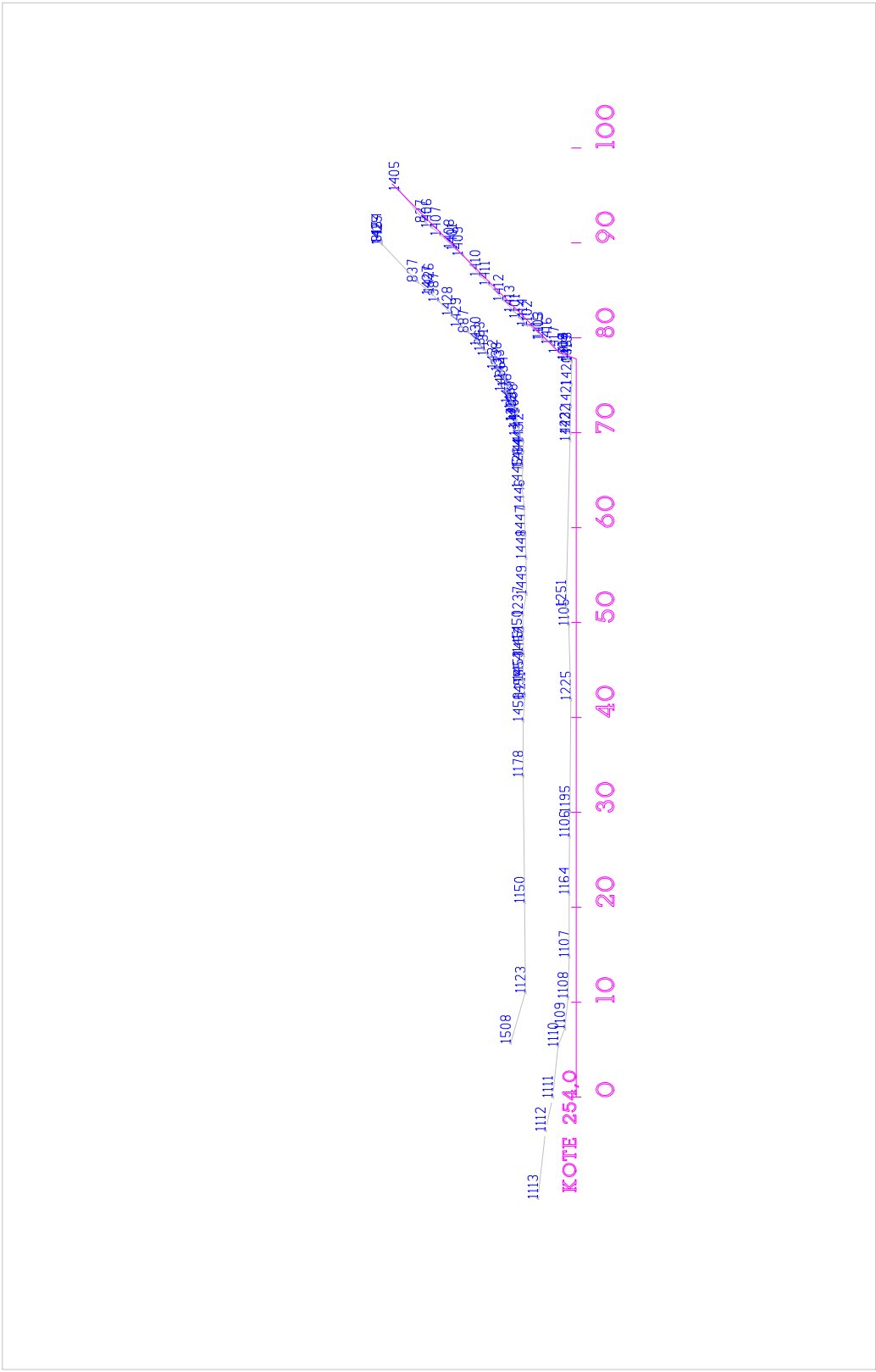
B	ETTER	UTVIDELSE	7/5-92	R. Ø.
A	PLAN FOR	UTVIDELSE	2/16-90	R. Ø.
Dato:		Konstr./Tegnet:	Målestokk:	
07.04.88		T.T.	1:25	
Ark. nr.		Trasé:		
BII - 85		R.BA.		
SØA KRAFTVERK		Erstatlet av		
VASSLIVATN		SØR-TRØNDELAG		
LENDEPROFIL AV OMLØPSTUNNEL		KRAFTSELSKAP		
MÅLINGER FORETATT 16.03.-1988		Anlegg nr.		
		B12		
		Tegning nr.		
		505		
		Format		
		3		
		Revisjon		
		B		



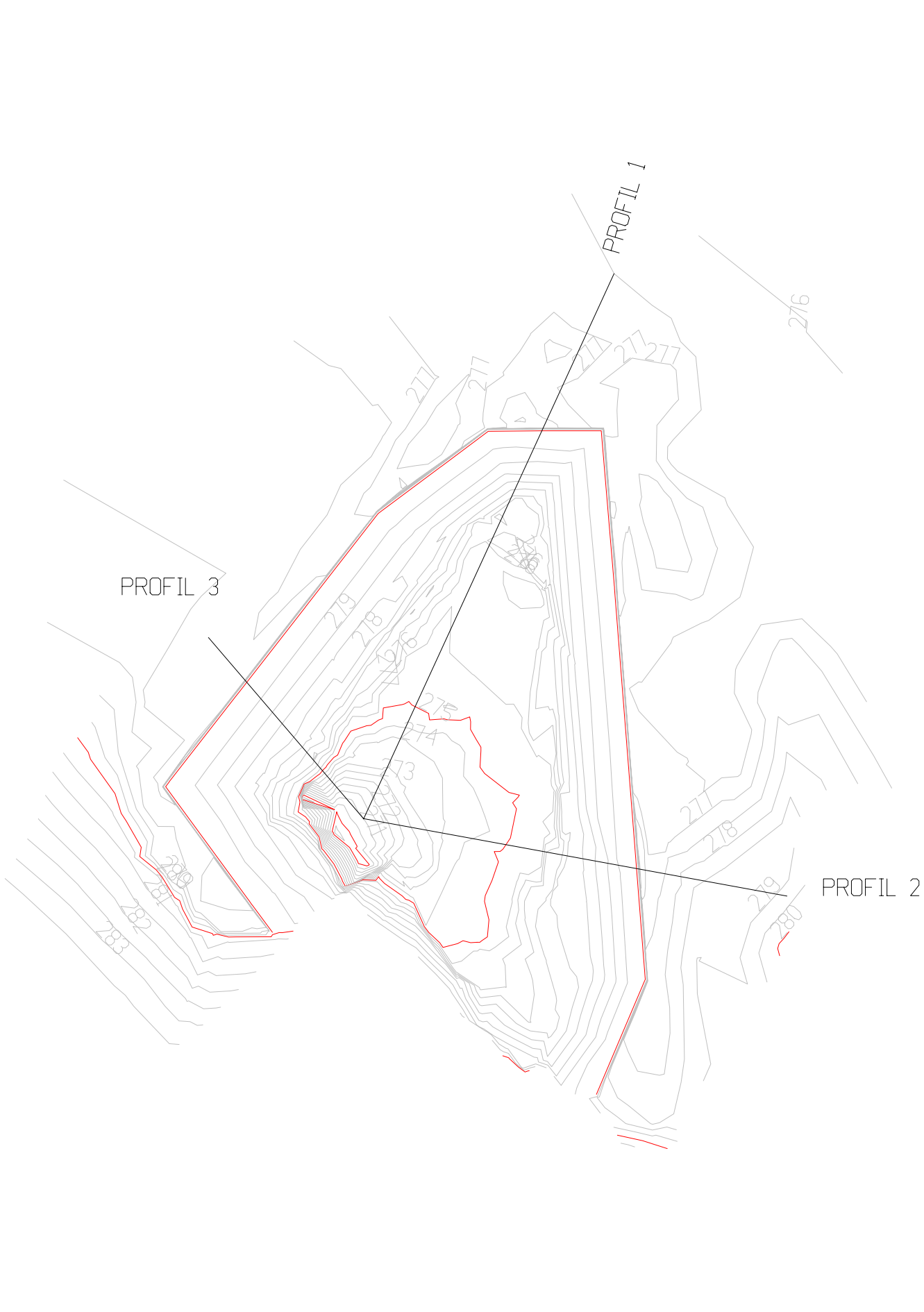
TAPPELUKE



Tvedenergi as		7613 Tunnelprofilering		Tverrprofiler i ehv fra ende overlapsstusnel		Kartuskel 1:750	
Proj.:	EGD	Rev.:	01	Dato:	17.11.2012	Skrevet:	1:1000
				Nümann Engineering Løkkevej 10, 2600 Lyngby T: +45 44 66 10 00 E: info@nmann.dk			
Proj.:	EGD	Rev.:	01	Dato:	17.11.2012	Skrevet:	1:1000



LENGDEPROFIL SØA
 2006.12.04
 1 : 400



PROFIL 1

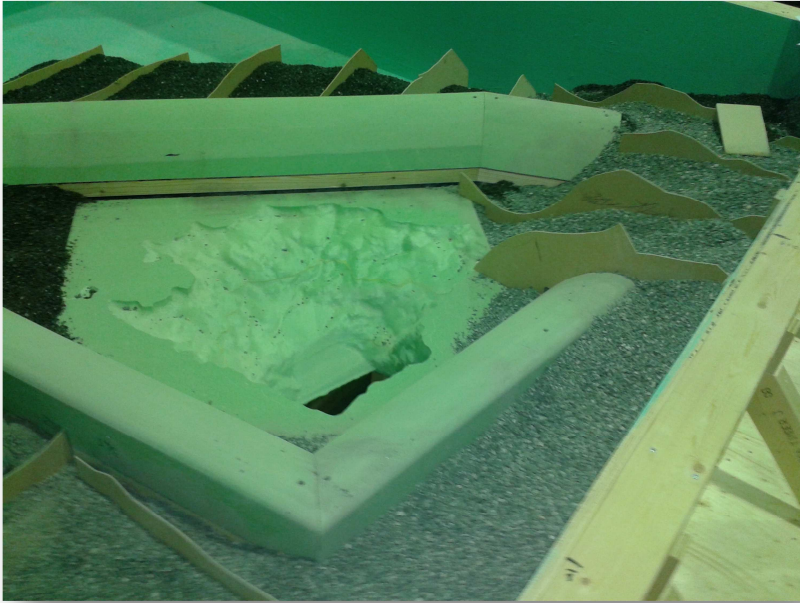
276

PROFIL 3

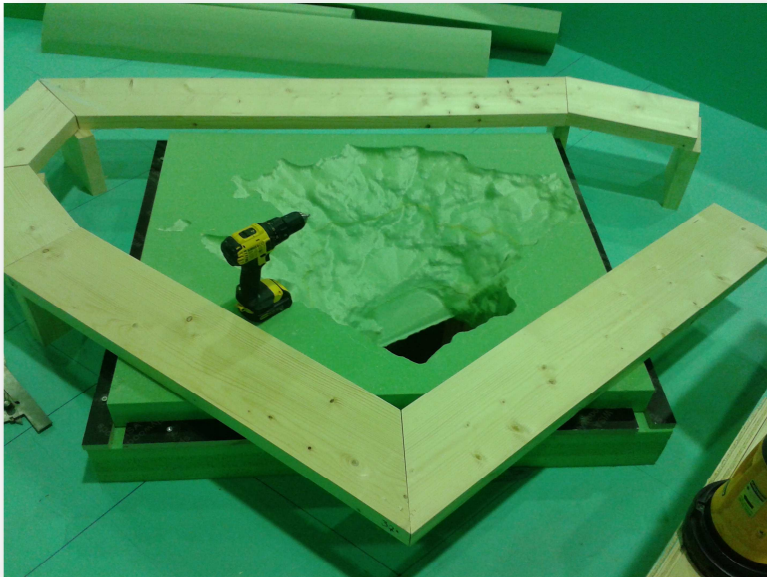
PROFIL 2

Tillegg C

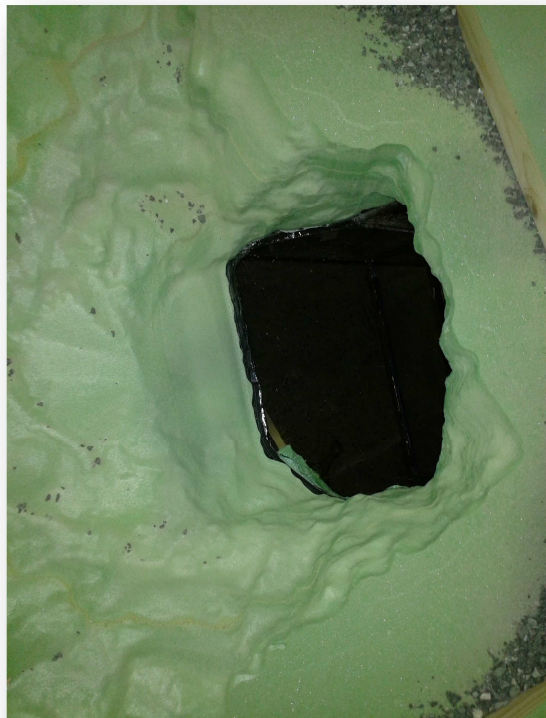
Bilder av modellen



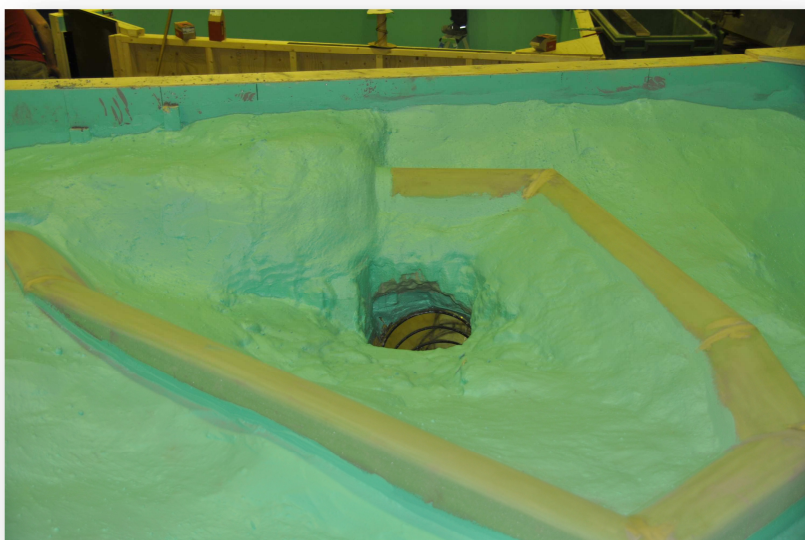
Figur 1: Magasin, overløpsterskel og samlekanal under bygging



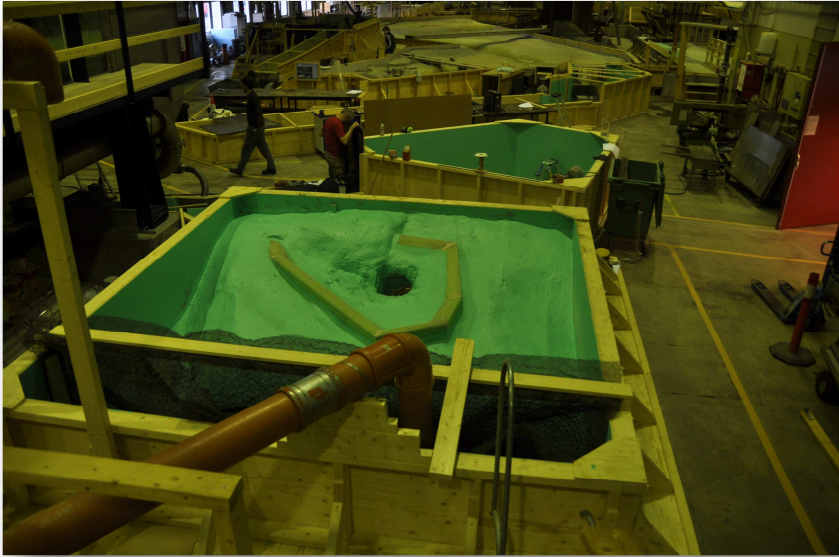
Figur 2: Overløpsterskelen under bygging



Figur 3: Innløp sjakt



Figur 4: Terskel og samlekanal ferdig



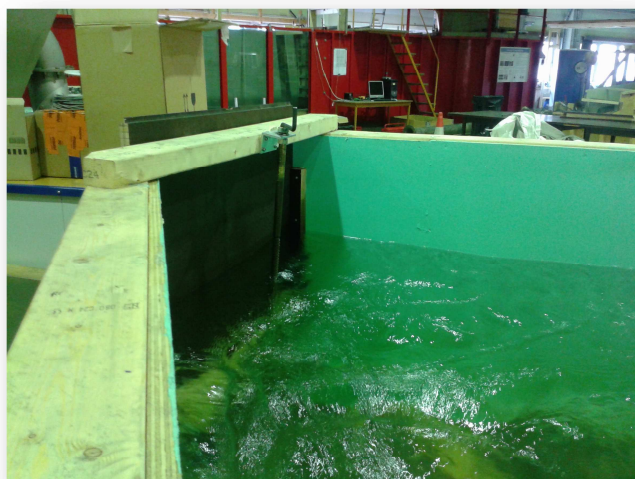
Figur 5: Magasinet med nedstrøms basseng i bakgrunnen



Figur 6: Ventilen hvor vannføringen justeres



Figur 7: Tunnelutløpet og første del av elva



Figur 8: Nedstrøms basseng med luka som kan justere vannstanden

Tillegg D

Utvidelse av modell

1. Beregnet nødvendig tunnelareal
2. Tegning utvidelse av tunnel

KAPASITET AV AVLØP, DAM VASSLIVATN

Rørstrømming i sjakt og tunnel

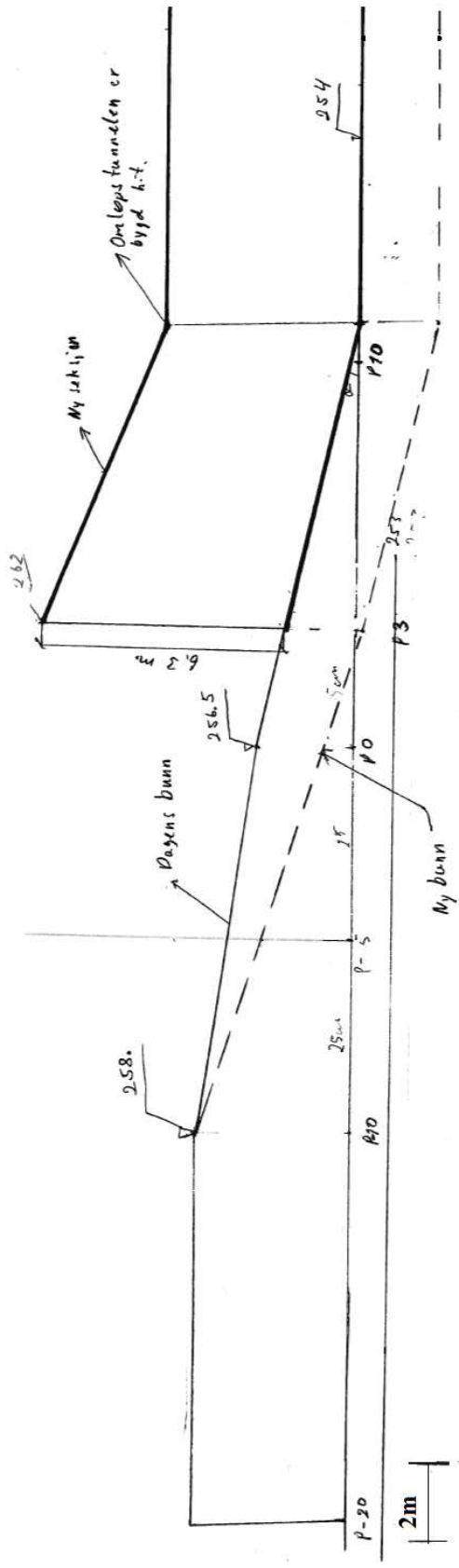
TUNNEL	Klassisk
Tverrsnitt	5.00 m
Bredde, B	4.00 m
Høyde opp til sirkel, H	2.50 m
Radius, r	39.00 m ²
Tunnelareal, A _s	20.85 m
Våt omkrets, P	1.87 m
Hydraulisk radius, R	34 m ^{1/3} /s
Manning, M _{s, gunstig}	30 m ^{1/3} /s
Manning, M _{s, ugunstig}	73 m
Lengde, L	200.00 m ³ /s
Q _{DIM}	360.00 m ³ /s
Q _{PMF}	

SIJAKT	Klassisk
Sjaktverrsnitt	4.50 m
Bredde, B	4.00 m
Høyde opp til sirkel, H	2.25 m
Radius, r	25.95 m ²
Sjaktareal, A _s	19.60
Våt omkrets, P	1.32
Hydraulisk radius, R	32 m ^{1/3} /s
Manning, M _{s, gunstig}	28 m ^{1/3} /s
Manning, M _{s, ugunstig}	17 m
Lengde, L	45.00 grader
Sjaktvinkel, α	

SINGULÆRTAP

Innløp		
Innløpstap	k _i	0.5
Bendtap	n	1
Antall bend	α	45
Bendvinkel	k _b	0.28
Bendtap		
Nisjetap	n	1
Antall nisjer (tunnelkryss)	k _n	0.21
Nisjetap		
Utløpstap		
Utløpstap	k _u	1
HRV		279.83 moh.
Tunnelheng utløp		261.00 moh.
Topp hjørne		281.50 moh.
Damkjerne		284.00 moh.

Q m ³ /s	Sjakt		Tunnel		Innløp	Bend	Nisje	Utløp	Sum tap		Vannstander	
	Gunstig m	Ugunstig m	Gunstig m	Ugunstig m					Gunstig m	Ugunstig m	Gunstig moh.	Ugunstig moh.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	261
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	261.01
20	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.05	0.06	0.06	261.06
30	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.12	0.13	0.13	261.12
40	0.03	0.04	0.03	0.04	0.06	0.06	0.01	0.05	0.22	0.23	0.23	261.23
50	0.04	0.06	0.05	0.06	0.09	0.09	0.05	0.08	0.34	0.36	0.36	261.36
60	0.06	0.08	0.06	0.08	0.14	0.14	0.08	0.12	0.48	0.52	0.52	261.52
70	0.08	0.11	0.09	0.11	0.19	0.19	0.10	0.16	0.66	0.71	0.71	261.71
80	0.11	0.14	0.12	0.15	0.24	0.24	0.14	0.05	0.86	0.93	0.93	261.93
90	0.14	0.18	0.15	0.19	0.31	0.31	0.17	0.06	1.09	1.17	1.17	262.09
100	0.17	0.22	0.18	0.23	0.38	0.38	0.21	0.07	1.35	1.45	1.45	262.35
110	0.21	0.27	0.22	0.28	0.46	0.46	0.26	0.09	1.63	1.75	1.75	262.75
120	0.24	0.32	0.26	0.33	0.54	0.54	0.31	0.10	1.94	2.09	2.09	262.94
130	0.29	0.37	0.30	0.39	0.64	0.64	0.36	0.12	2.27	2.45	2.45	263.45
140	0.33	0.43	0.35	0.45	0.74	0.74	0.42	0.14	2.64	2.84	2.84	263.84
150	0.38	0.50	0.41	0.52	0.85	0.85	0.48	0.16	3.03	3.26	3.26	264.26
160	0.43	0.57	0.46	0.59	0.97	0.97	0.54	0.18	3.44	3.71	3.71	264.71
170	0.49	0.64	0.52	0.67	1.09	1.09	0.61	0.20	3.89	4.19	4.19	264.89
180	0.55	0.72	0.58	0.75	1.23	1.23	0.69	0.23	4.36	4.69	4.69	265.69
190	0.61	0.80	0.65	0.84	1.37	1.37	0.76	0.25	4.86	5.23	5.23	265.86
200	0.68	0.89	0.72	0.93	1.51	1.51	0.85	0.28	5.38	5.79	5.79	266.38
210	0.75	0.98	0.79	1.02	1.67	1.67	0.93	0.31	5.93	6.39	6.39	267.39
220	0.82	1.07	0.87	1.12	1.83	1.83	1.03	0.34	6.51	7.01	7.01	268.01
230	0.90	1.17	0.95	1.22	2.00	2.00	1.12	0.37	7.12	7.66	7.66	268.66
240	0.98	1.28	1.04	1.33	2.18	2.18	1.22	0.41	7.75	8.34	8.34	269.34
250	1.06	1.38	1.13	1.45	2.36	2.36	1.32	0.44	8.41	9.05	9.05	270.05
260	1.15	1.50	1.22	1.56	2.56	2.56	1.43	0.48	9.10	9.79	9.79	270.79
270	1.24	1.61	1.31	1.69	2.76	2.76	1.54	0.51	9.81	10.56	10.56	271.56
280	1.33	1.74	1.41	1.81	2.97	2.97	1.66	0.55	10.55	11.36	11.36	272.36
290	1.43	1.86	1.52	1.95	3.18	3.18	1.78	0.59	11.32	12.18	12.18	273.18
300	1.53	1.99	1.62	2.08	3.41	3.41	1.91	0.63	12.11	13.04	13.04	274.04
310	1.63	2.13	1.73	2.22	3.64	3.64	2.04	0.68	12.93	13.92	13.92	274.92
320	1.74	2.27	1.85	2.37	3.87	3.87	2.17	0.72	13.78	14.83	14.83	275.83
330	1.85	2.41	1.96	2.52	4.12	4.12	2.31	0.77	14.65	15.78	15.78	276.78
340	1.96	2.56	2.08	2.68	4.37	4.37	2.45	0.81	15.55	16.75	16.75	277.75
350	2.08	2.71	2.21	2.84	4.64	4.64	2.60	0.86	16.48	17.75	17.75	278.75
360	2.20	2.87	2.34	3.00	4.90	4.90	2.75	0.91	17.44	18.77	18.77	279.77
370	2.32	3.03	2.47	3.17	5.18	5.18	2.90	0.96	18.42	19.83	19.83	280.83
380	2.45	3.20	2.60	3.34	5.46	5.46	3.06	1.02	19.43	20.92	20.92	281.92
390	2.58	3.37	2.74	3.52	5.76	5.76	3.22	1.07	20.46	22.03	22.03	283.03
400	2.71	3.54	2.88	3.70	6.05	6.05	3.39	1.13	21.53	23.18	23.18	284.18



Tillegg E

Vannlinjeberegning

Beregning nedstrøms vannføringskurve

Beregning nedstrøms vannføringskurve

Vannføring (modell)	Vannføring (prototyp)	Vann-nivå	Vann-nivå over kote 254 [m]	Vann-nivå (modell) over kote 254 [cm]
20	35.78	260.45	6.45	32.25
40	71.56	261.26	7.26	36.3
60	107.34	261.9	7.9	39.5
80	143.12	262.41	8.41	42.05
100	178.9	262.89	8.89	44.45
110	196.79	263.11	9.11	45.55
120	214.68	263.32	9.32	46.6
130	232.57	263.53	9.53	47.65
140	250.46	263.73	9.73	48.65
150	268.35	263.92	9.92	49.6
155	277.295	264.01	10.01	50.05
160	286.24	264.1	10.1	50.5
165	295.185	264.19	10.19	50.95
170	304.13	264.28	10.28	51.4
175	313.075	264.37	10.37	51.85
180	322.02	264.45	10.45	52.25
185	330.965	264.54	10.54	52.7
190	339.91	264.62	10.62	53.1
195	348.855	264.7	10.7	53.5
200	357.8	264.77	10.77	53.85
210	375.69	264.92	10.92	54.6

Tillegg F

Friksjon

1. Skalering av friksjon
2. Avstand mellom listene før utvidelse av tunnel
3. Måling av falltap før utvidelse av tunnel
4. Skalering av friksjon etter utvidelse av tunnel
5. Avstand mellom listene etter utvidelse av tunnel
6. Måling av falltap etter utvidelse av tunnel

Skalering av friksjon før utvidelse

	Prototyp			Modell		
	Sjakt	Tunnel	Tunnelutløp	Sjakt	Tunnel	Prototyp
Vannføring, Q [m ³ /s]	200					
Gjennomsnittlig tverrsnitt [m ²]	26	28	36	0.065	0.070	0.090
Vannhastighet [m/s]	7.69	7.14	5.56	1.72	1.60	1.24
Hydraulisk radius, R _h [m]	1.35	1.40	1.59	0.07	0.07	0.08
Ønsket Manningstall, M [m ^{1/3} /s]	30	33	33.00	49.43	54.37	54.37
Energilinjens helning	0.0440	0.0299	0.0153	0.0440	0.0298	0.0153
Ønsket friksjonsfaktor, f, beregnet fra M	0.079	0.064	0.062	0.079	0.064	0.062

Avstand mellom listene

	Sjakt	Tunnel	Utløp
Listelengde [m]	0.98	1.01	1.15
Listeavstand [m]	0.165	0.215	0.208
Listetykkelse [m]	0.005	0.005	0.005
f_{ru}	0.0615	0.0478	0.0443
f_{total}	0.0785	0.0648	0.0613
Manningstall beregnet	49.54	54.20	54.57

Måling av falltap før utvidelse av tunnel

	Vannføring [l/s]	Vannføring [m^3/s]	Max falltap [m]	A [m^2]	v [m/s]	R _h [m]	L [m]	f	M _{modell}	M _{prototyp}
Test 1	190.67	0.191	0.193	0.07	2.72	0.0701	2	0.0716	51.57	31.30
Test 2	199.7	0.200	0.2	0.07	2.85	0.0701	2	0.0676	53.06	32.20
Test 3	191.6	0.192	0.189	0.07	2.74	0.0701	2	0.0694	52.37	31.78
									Gj.snitt	31.76

Skalering av friksjon etter utvidelse

	Prototyp			Modell		
	Sjakt	Tunnel	Tunnelutløp	Sjakt	Tunnel	Prototyp
Vannføring, Q [m ³ /s]	200					
Gjennomsnittlig tverrsnitt [m ²]	26	41	49	0.065	0.103	0.123
Vannhastighet [m/s]	7.69	4.85	4.07	1.72	1.09	0.91
Hydraulisk radius, R _h [m]	1.35	1.70	1.86	0.07	0.09	0.09
Ønsket Manningstall, M [m ^{1/3} /s]	30	33	33	49.43	54.37	54.37
Energilinjens helning	0.0440	0.0107	0.0066	0.0440	0.0107	0.0066
Ønsket friksjonsfaktor, f, beregnet fra M	0.079	0.060	0.059	0.079	0.060	0.059

Avstand mellom listene etter utvidelse av tunnel

	Sjakt	Tunnel	Utløp
Listelengde [m]	0.98	1.2	1.34
Listeavstand [m]	0.165	0.158	0.156
Listetykkelse [m]	0.005	0.005	0.005
f_{ru}	0.0615	0.0427	0.0417
f_{total}	0.0785	0.0597	0.0590
Manningstall beregnet	49.54	54.70	54.35

Måling av falltap etter utvidelse av tunnelen

	Vannføring [l/s]	Vannføring [m^3/s]	Max falltap [m]	A [m^2]	v [m/s]	R _h [m]	L [m]	f	M _{modell}	M _{prototyp}
Test 1	219.8	0.220	0.081	0.103	2.13	0.0850	2	0.0594	54.83	33.28
Test 2	219.8	0.220	0.084	0.103	2.13	0.0850	2	0.0616	53.84	32.68
Test 3	219.8	0.220	0.085	0.103	2.13	0.0850	2	0.0623	53.52	32.49
									Gj.snitt	32.82

Tillegg G

Måleresultater

1. Kapasitet dagens flomløp
2. Trykkehøyde dagens flomløp
3. Kapasitet etter utvidelse av tunnel
4. Trykkehøyde etter utvidelse av flomløp
5. Kapasitet delvis utvidet tunnel
6. Trykkehøyde delvis utvidet tunnel

Kapasitet flomløp dagens system

Vannføring modell [l/s]	Vannføring prototyp [m^3/s]	Vannstandstigning test 1 [moh]	Vannstandstigning test 2 [moh]	Vannstandstigning test 3 [moh]	Gjennomsnitt vannstandstigning [moh]
0	0	279.83	279.83	279.8	279.8
20	35.78	280.19	280.19	280.2	280.2
40	71.56	280.42	280.42	280.42	280.4
60	107.34	280.61	280.60	280.6	280.6
80	143.12	280.78	280.75	280.76	280.8
100	178.9	280.89	280.89	280.9	280.9
110	196.79	280.95	280.97	280.96	281.0
120	214.68	281.02	281.09	281.02	281.0
130	232.57	281.07	281.14	281.08	281.1
140	250.46	281.13	281.19	281.14	281.2
150	268.35	281.19	281.25	281.2	281.2
160	286.24	281.24	281.25	281.24	281.2
170	304.13	281.29	281.30	281.3	281.3
180	322.02	281.77	281.76	281.76	281.8
190	339.91	282.04	282.10	281.96	282.0
200	357.8	282.90	282.90	282.9	282.9

Trykkehøyde i sjakta i dagens flomløp

Vannføring modell [l/s]	Vannføring prototyp [m ³ /s]	Trykkehøyde	Trykkehøyde + 3 cm	Trykkehøyde prototyp [m]	Kotehøyde [moh]	Gjennomsnitt [moh]
0						
20	35.78	0.317818	0.347818	6.96	260.96	260.7
40	71.56	0.315318	0.345318	6.91	260.91	260.8
60	107.34	0.366661	0.396661	7.93	261.93	262.0
80	143.12	0.393522	0.423522	8.47	262.47	262.6
100	178.9	0.378208	0.408208	8.16	262.16	262.1
110	196.79	0.409251	0.439251	8.79	262.79	262.9
120	214.68	0.435271	0.465271	9.31	263.31	263.3
130	232.57	0.531362	0.561362	11.23	265.23	265.6
140	250.46	0.607485	0.637485	12.75	266.75	266.7
150	268.35	0.622636	0.652636	13.05	267.05	267.4
160	286.24	0.664030	0.694030	13.88	267.88	268.7
170	304.13	0.745114	0.775114	15.50	269.50	269.5
180	322.02	0.883690	0.913690	18.27	272.27	271.7
190	339.91	0.859852	0.889852	17.80	271.80	271.7
200	357.8	0.919541	0.949541	18.99	272.99	273.2
20	35.78	0.289581	0.319581	6.39	260.39	
40	71.56	0.307863	0.337863	6.76	260.76	
60	107.34	0.370598	0.400598	8.01	262.01	
80	143.12	0.402170	0.432170	8.64	262.64	
100	178.9	0.369093	0.399093	7.98	261.98	
110	196.79	0.422416	0.452416	9.05	263.05	
120	214.68	0.430162	0.460162	9.20	263.20	
130	232.57	0.568547	0.598547	11.97	265.97	
140	250.46	0.601218	0.631218	12.62	266.62	
150	268.35	0.660336	0.690336	13.81	267.81	
160	286.24	0.745925	0.775925	15.52	269.52	
170	304.13	0.745112	0.775112	15.50	269.50	
180	322.02	0.821979	0.851979	17.04	271.04	
190	339.91	0.852434	0.882434	17.65	271.65	
200	357.8	0.945220	0.975220	19.50	273.50	

Kapasitet flomløp etter utvidet tunnel

Vannføring modell l/s]	Vannføring prototyp [m ³ /s]	Vannstandstigning test 1 [moh]	Vannstandstigning test 2 [moh]	Gjennomsnitt vannstandstigning [moh]
0	0	279.83		279.8
20	35.78	280.19	280.19	280.2
40	71.56	280.42	280.42	280.4
60	107.34	280.59	280.60	280.6
80	143.12	280.75	280.76	280.8
100	178.9	280.89	280.89	280.9
112	200.368	280.97	280.96	281.0
120	214.68	281.01	281.01	281.0
140	250.46	281.13	281.12	281.1
160	286.24	281.24	281.24	281.2
170	304.13	281.29	281.29	281.3
180	322.02	281.35	281.35	281.3
190	339.91	281.41	281.41	281.4
200	357.8	281.46	281.45	281.5
205	366.745	281.48	281.48	281.5
210	375.69	281.78	281.78	281.8
220	393.58	282.57	282.57	282.6

Trykkehøyde i sjakta etter utvidelse av tunnelen

Vannføring modell [l/s]	Vannføring prototyp [m ³ /s]	Trykkehøyde test 1	Trykkehøyde+3cm	Trykkehøyde i prototyp [m]	Kotehøyde [moh]	Trykkehøyde test 2	Trykkehøyde+3cm	Trykkehøyde i prototyp [m]	Kotehøyde [moh]	Snitt [moh]
20	35.78	0.298661	0.328661	6.57322	260.57	0.299224	0.329224	6.58448	260.58	260.58
40	71.56	0.305056	0.335056	6.70112	260.70	0.309188	0.339188	6.78376	260.78	260.74
60	107.34	0.32428	0.35428	7.0856	261.09	0.320082	0.350082	7.00164	261.00	261.04
80	143.12	0.323152	0.353152	7.06304	261.06	0.332415	0.362415	7.2483	261.25	261.16
100	178.9	0.3444	0.3744	7.488	261.49	0.346749	0.376749	7.53498	261.53	261.51
112	200.368	0.385088	0.415088	8.30176	262.30	0.385088	0.415088	8.30176	262.30	262.30
120	214.68	0.398404	0.428404	8.56808	262.57	0.389279	0.419279	8.38558	262.39	262.48
140	250.46	0.445324	0.475324	9.50648	263.51	0.411321	0.441321	8.82642	262.83	263.17
160	286.24	0.490564	0.520564	10.41128	264.41	0.470455	0.500455	10.0091	264.01	264.21
170	304.13	0.51955	0.54955	10.991	264.99	0.525253	0.555253	11.10506	265.11	265.05
180	322.02	0.529817	0.559817	11.19634	265.20	0.552377	0.582377	11.64754	265.65	265.42
190	339.91	0.553961	0.583961	11.67922	265.68	0.561577	0.591577	11.83154	265.83	265.76
200	357.8	0.560905	0.590905	11.8181	265.82	0.55423	0.58423	11.6846	265.68	265.75
205	366.745	0.568305	0.598305	11.9661	265.97	0.565731	0.595731	11.91462	265.91	265.94
210	375.69	0.579492	0.609492	12.18984	266.19	0.59553	0.62553	12.5106	266.51	266.35
220	393.58	0.743991	0.773991	15.47982	269.48	0.744001	0.774001	15.48002	269.48	269.48

Kapasitet flomløp med delvis utvidet tunnel

Vannføring modell [l/s]	Vannføring prototyp [m ³ /s]	Vannstandstigning test 1 [moh]	Vannstandstigning test 2 [moh]	Gjennomsnitt vannstandstigning [moh]
0	0	279.83	279.83	279.8
20	35.78	280.24	280.22	280.2
40	71.56	280.44	280.44	280.4
60	107.34	280.62	280.61	280.6
80	143.12	280.76	280.76	280.8
100	178.9	280.90	280.90	280.9
112	200.368	281.00	281.00	281.0
120	214.68	281.04	281.04	281.0
130	232.57	281.10	281.09	281.1
140	250.46	281.14	281.14	281.1
160	286.24	281.26	281.25	281.3
170	304.13	281.32	281.30	281.3
180	322.02	281.36	281.36	281.4
190	339.91	281.42	281.41	281.4
200	357.8	281.48	281.46	281.5
205	366.745	281.76	281.76	281.8
210	375.69	281.99	281.99	282.0
215	384.635	282.29	282.30	282.3

Trykkehøyde i sjakta ved delvis utvidet tunnel

Vannføring modell [l/s]	Vannføring prototyp [m ³ /s]	Trykkehøyde	Trykkehøyde+3cm	Trykkehøyde i prototyp [m]	Kotehøyde [moh]
20	35.78	0.2781	0.3081	6.1614	260.2
40	71.56	0.3270	0.3570	7.1404	261.1
60	107.34	0.3652	0.3952	7.9044	261.9
80	143.12	0.4099	0.4399	8.7971	262.8
100	178.90	0.4060	0.4360	8.7196	262.7
112	200.37	0.4511	0.4811	9.6215	263.6
120	214.68	0.4753	0.5053	10.1069	264.1
140	250.46	0.4808	0.5108	10.2164	264.2
160	286.24	0.5444	0.5744	11.4874	265.5
170	304.13	0.5758	0.6058	12.1154	266.1
180	322.02	0.6019	0.6319	12.6388	266.6
190	339.91	0.6148	0.6448	12.8968	266.9
200	357.80	0.6170	0.6470	12.9391	266.9
205	366.75	0.6135	0.6435	12.8702	266.9
210	375.69	0.6468	0.6768	13.5358	267.5
220	393.58	0.7131	0.7431	14.8628	268.9

Tillegg H

Nedstrøms bassengs påvirkning av oppstrøms magasin vannstand

Nedstrøms bassengs påvirkning av oppstrøms magasin vannstand

Tid [s]	Kotehøyde magasin [moh]	Kotehøyde nedstrøms basseng [moh]
0	281.45	264.49
1	281.45	264.47
2	281.45	264.48
3	281.46	264.48
4	281.45	264.48
5	281.45	264.52
6	281.45	264.52
7	281.45	264.52
8	281.45	264.53
9	281.45	264.50
10	281.45	264.51
11	281.45	264.51
12	281.45	264.50
13	281.46	264.49
14	281.46	264.48
15	281.46	264.51
16	281.46	264.51
17	281.46	264.49
18	281.45	264.51
19	281.45	264.51
20	281.45	264.51
21	281.45	264.51
22	281.46	264.51
23	281.45	264.52
24	281.45	264.51
25	281.45	264.51
26	281.45	264.50
27	281.45	264.51
28	281.45	264.53
29	281.46	264.54
30	281.46	264.54
31	281.46	264.58
32	281.46	264.62
33	281.45	264.64
34	281.45	264.65
35	281.45	264.69
36	281.45	264.73
37	281.45	264.75

38	281.45	264.78
39	281.45	264.81
40	281.45	264.83
41	281.45	264.87
42	281.46	264.89
43	281.46	264.90
44	281.46	264.93
45	281.46	264.95
46	281.46	264.96
47	281.46	265.00
48	281.46	265.04
49	281.45	265.10
50	281.45	265.13
51	281.45	265.17
52	281.46	265.20
53	281.46	265.24
54	281.46	265.28
55	281.46	265.36
56	281.45	265.40
57	281.45	265.48
58	281.45	265.54
59	281.46	265.60
60	281.46	265.65
61	281.46	265.68
62	281.46	265.74
63	281.45	265.81
64	281.45	265.86
65	281.46	265.91
66	281.46	265.97
67	281.46	266.07
68	281.46	266.16
69	281.45	266.24
70	281.45	266.31
71	281.45	266.38
72	281.45	266.45
73	281.45	266.52
74	281.45	266.59
75	281.45	266.66
76	281.45	266.72
77	281.45	266.78
78	281.45	266.83
79	281.47	266.82

80	281.51	266.78
81	281.55	266.73
82	281.59	266.74
83	281.62	266.78
84	281.67	266.78
85	281.71	266.81
86	281.74	266.84
87	281.77	266.92
88	281.78	267.00
89	281.78	267.06
90	281.79	267.15
91	281.79	267.21
92	281.79	267.27
93	281.80	267.34
94	281.81	267.38
95	281.82	267.44
96	281.83	267.51
97	281.84	267.56
98	281.85	267.62
99	281.87	267.65
100	281.87	267.71
101	281.88	267.78
102	281.89	267.82
103	281.89	267.89
104	281.88	267.94
105	281.88	267.98
106	281.87	268.00

