



Dynamisk Analyse av vannkraftverk

Remi Andre Støple

Master i produktutvikling og produksjon

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Torbjørn Kristian Nielsen, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosessteknikk

EPT-M-2012-81

MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Remi André Stople

Våren 2012

Dynamisk analyse av vannkraftverk*(Dynamic analysis of Hydropower plants)***Bakgrunn og målsetting**

Frøland kraftverk i Samnanger er moden for utskiftning. BKK ønsker i utgangspunktet å etablere en ny stasjon ved fjorden, nærmere bestemt Aldal. Hvis dette ikke lar seg gjennomføre, vil det etableres et nytt kraftverk hvor dagens Frøland kraftverk ligger.

Basert på vannveigeometrien foreslått av kraftselskapet skal det gjennomføres dynamisk analyse av begge systemene. Problemstillingen rundt svingekammer gjelder begge kraftverkene. Analysen innebærer simulering av retardsjonstrykk ved lastavslag, svingninger i svingekammer og reguleringsstabilitet.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

- 1 Litteraturstudie som omhandler dynamisk analyse av vannkraftverk og simulering-metoder
- 2 Redegjøre for hvilke dimensjoneringskriterier som skal legges til grunn.
- 3 Detaljert beskrivelse av vannveien hvor det legges vekt på elementer som har betydning for dynamisk oppførsel.
- 4 Etablere simuleringmodeller
- 5 Gjennomføre simuleringer av retardsjonstrykk, svingninger i svingekammer og reguleringsstabilitet. Foreslå endringer i vannveien for eventuelt å forbedre de dynamiske egenskapene.
- 6 Kontroll av simuleringresultater ved analytiske overslagsberegninger

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.


Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesssteknikk.


Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen.

I henhold til ”Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet” ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, institutt navn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

NTNU, Institutt for energi- og prosesssteknikk, 17. januar 2012


Olav Bolland
Instituttleder


Torbjørn K. Nielsen
Faglig ansvarlig/veileder

Forord

Denne rapporten er en masteroppgave ved Vannkraftlaboratoriet ved Norges Teknisk- og Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), og omhandler systemdynamisk analyse av Aldal og Nye Frøland Kraftverk. I tillegg har det i oppgaven blitt utviklet et program for dynamisk beregning av retardasjonstrykk og svingeutslag i svingesjakter ved avslag og/eller pådrag.

Jeg vil gjerne få takke min veileder, Torbjørn Nielsen, for god veiledning og interessante diskusjoner gjennom oppgaven. Jeg vil også takke BKK for å gi meg mulighet til å jobbe med en interessant og realistisk problemstilling og stille underlagsdata til rådighet. I tillegg vil jeg takke medstudent Simen Vogt-Svendsen og post.doc Pål-Tore Storli for informative diskusjoner og god hjelp i vanskelige stunder. Helt til sist vil jeg takke alle mine medstudenter for det gode arbeidsmiljøet på Vannkraftlaboratoriet, samt alle professorene på huset for å legge til rette for dette.

Trondheim, 08.06.2012



Remi André Støple

Sammendrag

Det er i denne rapporten gjennomført dynamisk analyse av to kraftverk under prosjektering av BKK, Aldal Kraftverk og Nye Frøland Kraftverk. Analysen omfatter elastisk simulering av opp- og nedsving i svingesjakter og retardasjonstrykk ved avslag eller pådrag, samt frekvensanalyse for reguleringsstabilitet. For simulering er det utviklet et generelt program som benytter karakteristikkmetoden for å beregne retardasjonstrykk og massesvingninger i systemet, mens et program utviklet av en annen masterstudent er brukt under frekvensanalysen.

Mye av fokuset i dette arbeidet er å utvikle et simuleringsprogram for beregning av massesvingninger og retardasjonstrykk som er så generelt som mulig og dermed kan benyttes for andre kraftverk enn de to som er analysert her. Kildekoden til dette programmet er å betrakte som åpen, og kan fritt benyttes av andre for egne simuleringer eller videreutvikling.

Simuleringer for Nye Frøland kraftverk har vist at foreslått svingesjakt er underdimensjonert, og overflom vil inntreffe ved pådrag med etterfølgende avslag i mest ugunstige fase. I tillegg skaper et trangt tverrsnitt opp til svingesjakten problemer med trykkstøt og regulering. Videre simuleringer viser at om dette tverrsnittet utvides med en meter i diameter resulterer det i akseptable trykkstøt og en rask regulering. Det konkluderes derfor at svingekammer må utvides, samt flyttes lengre opp i terrenget for å unngå overflom.

Svingesjakt i Aldal Kraftverk er foreslått plassert i forbindelse med svingesjakt til Aldalselva, som er det nederste av to bekkeinntak i dette kraftverket. Simuleringer viser at svingesjakten er dimensjonert tilstrekkelig for å unngå overflom, men nedsvinget vil nå ned til tilføringstunnelen for bekkeinntaket. Dette er ikke kritisk for kraftverket, men vil føre til økt sedimenttransport. Det er også konkludert med at antagelsen om at bekkeinntak mot Kvernelva kan neglisjeres ikke stemmer. Bekkeinntakets lengde er i den størrelsesorden at oppsving til bekkeinntaket vil finne sted, med mindre det installeres en enveis ventil i nevnte bekkeinntak. Det konkluderes derfor med at svingesjakten bør flyttes opp til knutepunkt mellom øvre bekkeinntak og driftstunnel. Forslag om et nytt svingesjaktprinsipp er lagt frem, da opprinnelig prinsipp får en lengde på sjakt i størrelsesorden med tilføringstunnelens lengde. Det har i alternativet nevnt ovenfor vist seg at en god regulering ikke kan oppnås. Det anbefales derfor å vurdere å innføre en ekstra svingesjakt nærmere turbinen for å bedre reguleringen.

Abstract

This report deals with dynamical analysis of hydropower plants. Two new powerplants under planning by BKK is investigated, namely Aldal and New Frøland Power Plant. The analysis includes elastic simulation of water hammer pressure during load rejection or acceptance, as well as simulations of mass oscillations in surge chambers. Frequency analysis has also been carried out for both Aldal and New Frøland Power Plant with the aim to determine the optimal governing parameters. To simulate the up- and downsurge, as well as the water hammer pressure, a general program based on the method of characteristics has been developed. For frequency analysis of the governing a program developed by another master student has been utilized.

Much of the focus in this work is to develop an as general as possible computer program for calculations of mass oscillations and water hammer pressure, and therefore make it possible to analyse other power plants than the two dealt with here. The source code is to be considered open, and others may utilize it for analysis or further development.

The simulations for The New Frøland Power plant has shown that the surge chambers dimensions are not sufficient to avoid overflow during load rejection after acceptance. In addition to this a narrow cross-section in the surge chamber results in large water hammer effects, and making it difficult to obtain a good governing. Based on this it is concluded that the surge cross-sectional area has to be increased by one meter in diameter, as well as being moved further up in the terrain. This results in lower water hammer effects as well as a fast governing.

For Aldal it was originally suggested to place the surge chamber in connection to the creek intake from Aldalselva, which is the last of the two creek intakes in this power plant. Simulations done for this system shows that the surge chamber is sufficiently designed to prevent overflow, but the down surge will reach the feed tunnel. This is not critical for the power plant, but it will lead to increased sediment transportation. It is also concluded that the assumption that the first creek intake can be neglected is not correct. If the length from the junction between the feed tunnel and the main tunnel is in the same order of magnitude as the length from the junction to the nearest surge chamber, upsurge will occur in the creek intake. Therefore, it is concluded that the surge chamber should be placed in the upper creek intake in contrary to the original proposed system and a new surge chamber design is proposed. For the alternative mentioned above a good governing has not been achieved. It is therefore recommended to consider placing an additional surge chamber closer to the turbine, which will greatly improve the governing characteristics.

Figurer

FIGUR 1 - OVERSIKT OVER KRAFTVERK OG RØRGATER I TILKNYTNING TIL FRØLAND KRAFTVERK (1)	1
FIGUR 2 - FORENKLET KRAFTVERKGEOMETRI FOR OVERSLAGSBEREGNINGER	13
FIGUR 3 – FORENKLET BLOKKDIAGRAM FOR ET VANNKRAFTSYSTEM	17
FIGUR 4 - BODE-DIAGRAM	18
FIGUR 5 - KARAKTERISTIKKLINJER I XT-PLAN (8)	20
FIGUR 6 - GITTER FOR NUMERISK BEREGNING, ENKELT (TH) OG FORSKJØVET (TV)	21
FIGUR 7 - GRENSER FOR BEREGNINGSLENGDE (8)	22
FIGUR 8 - LENGDEPROFIL NYE FRØLAND KRAFTVERK	31
FIGUR 9 - LENGDER, NYE FRØLAND	33
FIGUR 10 - PRINSIPPSKISSE SVINGEKAMMER NYE FRØLAND KRAFTVERK	33
FIGUR 11 - LENGDEPROFIL ALDAL KRAFTVERK	34
FIGUR 12 - LENGDER ALDAL	35
FIGUR 13 - PRINSIPPSKISSE SVINGEKAMMER ALDAL KRAFTVERK	36
FIGUR 14 - DEFINISJON AV KRAFTVERKGEOMETRIER OG KONFIGURASJONER	39
FIGUR 15 - SJAKTSVINGNINGER HRV OG LRV, OPPRINNELIG GEOMETRI, NYE FRØLAND	43
FIGUR 16 - BODE-DIAGRAM OG LAST/TURTALL-FORHOLD, NYE FRØLAND, OPPRINNELIG GEOMETRI	45
FIGUR 17 - FORESLÅTT GEOMETRI PÅ SVINGEKAMMER, NYE FRØLAND	46
FIGUR 18 - SJAKTSVINGNINGER HRV OG LRV, NY GEOMETRI, NYE FRØLAND	47
FIGUR 19 - TRYKKSTØT MED STÅENDE SVINGNING	48
FIGUR 20 - BODE-DIAGRAM OG LAST/TURTALL-FORHOLD, NYE FRØLAND, FORESLÅTT GEOMETRI	49
FIGUR 21 - PÅDRAG + AVSLAG FOR HRV OG LRV, OPPRINNELIG GEOMETRI, ØVRE SVINGEKAMMER	53
FIGUR 22 - PÅDRAG + AVSLAG FOR HRV, OPPRINNELIG GEOMETRI, NEDRE SVINGEKAMMER	54
FIGUR 23 - BODE-DIAGRAM OG LAST/TURTALL-FORHOLD, ALDAL, OPPRINNELIG GEOMETRI	56
FIGUR 24 - PRINSIPPSKISSE NYTT SVINGEKAMMER, ALDAL	57
FIGUR 25 - PÅDRAG MED PÅFØLGENDE AVSLAG FOR HRV OG LRV, GEOMETRI I, ØVRE SVINGEKAMMER	58
FIGUR 26 - PÅDRAG MED PÅFØLGENDE AVSLAG FOR HRV OG LRV, GEOMETRI I, NEDRE SVINGEKAMMER	58
FIGUR 27 - BODE-DIAGRAM OG TURTALL/LAST-FORHOLD, ALDAL, FORESLÅTT GEOMETRI	60
FIGUR 28 - SAMMENLIGNING FRIKSJONSINNVIRKNING, SVINGNINGER	61
FIGUR 29 - SAMMENLIGNING FRIKSJONSINNVIRKNING, TRYKKSTØT	61
FIGUR 30 - SAMMENLIGNING FRIKSJONSMODELLER, SVINGNINGER	62
FIGUR 31 - SAMMENLIGNING FRIKSJONSMODELLER, TRYKKSTØT	62
FIGUR 32 - STÅENDE SVINGNING ETTER LUKKING (5)	63
FIGUR 33 - SAMMENLIGNING AV TIDSFORLØP ELASTISK OG UELASTISK PROGRAM, ØVRE SVINGESJAKT	65
FIGUR 34 - SAMMENLIGNING AV TIDSFORLØP ELASTISK OG UELASTISK PROGRAM, NEDRE SVINGESJAKT	66

Tabeller

TABELL 1 - DIMENSJONERINGSKRITERIER SVINGESJAKT OG TRYKKSTØT	12
TABELL 2 – KRAV VED FREKVENSPANALYSE.....	12
TABELL 3 - TUNNELDATA NYE FRØLAND KRAFTVERK	33
TABELL 4 - KRAFTVERKSDATA NYE FRØLAND KRAFTVERK	34
TABELL 5 - TUNNELDATA ALDAL KRAFTVERK.....	35
TABELL 6 - KRAFTVERKSDATA ALDAL KRAFTVERK.....	36
TABELL 7 - RESULTATER AV OVERSLAGSBEREGNINGER – NYE FRØLAND KRAFTVERK.....	42
TABELL 8 -SIMULERINGSRESULTATER SLUKEEVNE NYE FRØLAND, OPPRINNELIG GEOMETRI, TL=7S	43
TABELL 9 - RESULTATER FRA AVSLAGSSIMULERING NYE FRØLAND, VOLUMSTRØM LIK SLUKEEVNE.....	44
TABELL 10 - TURBINPARAMETERE, NYE FRØLAND	44
TABELL 11 - SIMULERINGSRESULTATER SLUKEEVNE NYE FRØLAND, NY GEOMETRI, TL=7S.....	46
TABELL 12 - RESULTATER FRA AVSLAGSSIMULERING NYE FRØLAND, FORESLÅTT GEOMETRI	47
TABELL 13 - TOTAL TRYKKØKNING FORAN TURBIN, NYE FRØLAND, FORESLÅTT GEOMETRI.....	48
TABELL 14 - RESULTATER AV OVERSLAGSBEREGNINGER – ALDAL KRAFTVERK	51
TABELL 15 – SIMULERINGSRESULTATER Q=35, TL=7S, OPPRINNELIG GEOMETRI ØVRE SVINGEKAMMER.....	53
TABELL 16 - SIMULERINGSRESULTATER Q=35, TL=7S, OPPRINNELIG GEOMETRI NEDRE SVINGEKAMMER.....	53
TABELL 17 - RESULTATER FRA AVSLAGSSIMULERING ALDAL KRAFTVERK, VOLUMSTRØM LIK SLUKEEVNE	54
TABELL 18 - TURBINPARAMETERE, ALDAL.....	55
TABELL 19 - SIMULERINGSRESULTATER ALDAL, FORESLÅTT GEOMETRI I, TL=9S, ØVRE SVINGEKAMMER.....	57
TABELL 20 - SIMULERINGSRESULTATER ALDAL, FORESLÅTT GEOMETRI I, TL=9S, NEDRE SVINGEKAMMER	57
TABELL 21 - RESULTATER FRA AVSLAGSSIMULERING ALDAL KRAFTVERK, VOLUMSTRØM LIK SLUKEEVNE	59
TABELL 22 - SAMMENLIGNING MED OVERSLAGSFORMLER, TL=7	64
TABELL 23 - SAMMENLIGNING MED UELASTISK PROGRAM.....	64

Nomenklatur

a	Lydens hastighet i vann	Re_d	Reynoldtall, basert på rørdiameter
A, A_S	Tverrsnittsareal for tunnel/sjakt	T	Svingeperiode
b_t	Regulatorparameter	T_a	Svingemassenes tidskonstant
c	Vannhastighet	T_d	Integraltid regulator
$C_P,$ $C_M,$ $B_P,$ B_M	Koeffisienter i karakteristikkmetoden	T_L	Lukketid
C_V	Ventilkarakteristikk i karakteristikkmetoden	T_R	Trykkbølgens refleksjonstid
d, D	Rørdiameter	v	Vannhastighet
E_q, E_n	Virkningsgradsforandring ved forandring i volumstrøm (q) eller turtall (n)	Z	Vannspeilets kotehøyde i svingesjakt
f	Friksjonsfaktor	å	Turbinens åpningsgrad
g	Tyngdens akselerasjon	Q, Q_S	Volumstrøm i tunnel/sjakt
H_0	Statisk trykk, eller trykk i øvre reservoar	Q_n, Q_Y	Volumstrømsforandring ved forandring i turtall (n) eller åpningsgrad (Y)
h_f, h_f^0	Stasjonært tap før avslag/etter pådrag (0)		
$H_R,$ H_u	Konstant trykk i øvre eller nedre reservoar		<i>Gresk alfabet</i>
H_t, V_t	Tidsderivert av trykk/hastighet	μ	Fluidets dynamiske viskositet
H_x, V_x	Posisjonsderivert av trykk/hastighet	ε	Rørets ruhet
J	Tregghetsmoment generator, eller tapsfaktor i friksjonsmodell	η, η_0	Virkningsgrad
J_s	Statisk tapsfaktor i friksjonsmodell	Θ	Parameter i friksjonsmodell
k	Tapsfaktor/Forsterkningsmargin	λ	Tapsfaktor, eller multiplikator for utledning av karakteristikkmetoden
K	Parameter i friksjonsmodell	ρ	Fluidets tetthet
K_p	Regulatorparameter	ψ	Fasemargin
k_q	Forholdstall mellom utslag i ledeskovelene og utslag i servomotor	ω, ω_0	Turbinens vinkelhastighet
L	Lengde på tunnel		
M	Manningstall		<i>Nedsenket skrift</i>
n	Turtall	A	Forrige posisjon, forrige tidssteg
P	Tunnelperiferie	B	Neste posisjon, forrige tidssteg
P_0	Effekt ved likevekt	H	Hydraulisk

P_h	Hydraulisk effekt	P	Denne posisjon, nytt tidssteg
P_N	Elektrisk effekt til nettet	0	Stasjonært
R	Friksjonsledd i karakteristikkmetoden		

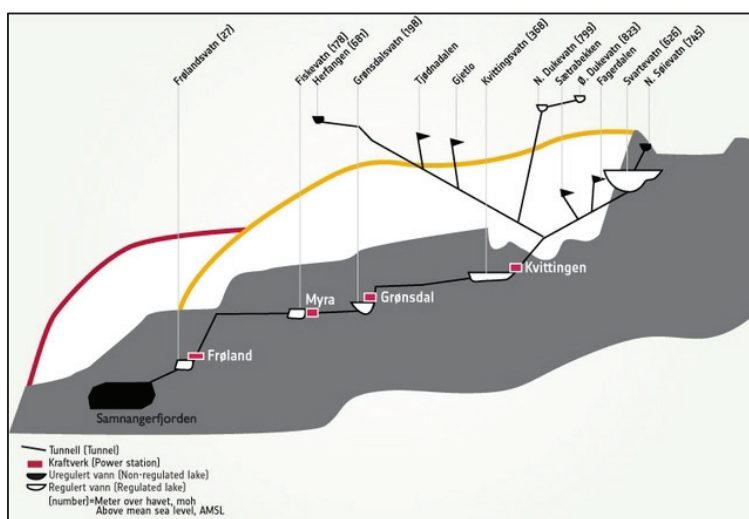
Innhold

FORORD	I
SAMMENDRAG	III
ABSTRACT	IV
FIGURER	V
TABELLER	VI
NOMENKLATUR	VII
INNHold	IX
1. INTRODUKSJON	1
1.1. MÅLSETNING	1
1.2. OPPBYGNING AV OPPGAVEN	2
2. TIDLIGERE ARBEID	3
3. BESKRIVELSE AV ALTERNATIVENE	5
3.1. GAMLE FRØLAND KRAFTVERK	5
3.2. NYTT FRØLAND KRAFTVERK	5
3.3. ALDAL KRAFTVERK	5
4. DET GENERELLE LIGNINGSSYSTEMET	7
4.1. TUNELLER OG RØR	7
4.2. IKKE-STASJONÆRT TAP I RØR	7
4.3. SVINGESJAKT	8
4.4. TURBIN OG GENERATOR	9
4.5. REGULATOR	9
5. DIMENSJONERINGSKRITERIER	11
5.1. SJAKTSVINGNINGER OG TRYKKSTØT	11
5.2. STABILITET	12
6. OVERSLAGSBEREGNINGER	13
6.1. SVINGESJAKT	13
6.2. TRYKKØKNING FORAN TURBINEN	14
6.3. STABILITET	15
7. REGULERINGSSTABILITET	17
8. SIMULERINGSMETODER I TIDSPLANET	19
8.1. UELASTISK VANNSPØYLETEORI	19
8.2. KARAKTERISTIKKMETODEN	19
8.2.1. <i>Utleddning av ligningssett</i>	19
8.2.2. <i>Nodegitter</i>	21
8.2.3. <i>Grensebetingelser for karakteristikkmotoden</i>	21
8.3. EULERS METODE	24
9. FRIKSJONSMODELLER	27

9.1.	TRADISJONELL FRIKSJONSMODELL	27
9.2.	KVASI-STASJONÆR FRIKSJONSFAKTOR	29
9.3.	LOKAL REYNOLDS BALANSEMODELL	29
10.	DETALJERT BESKRIVELSE AV VANNVEI OG TURBIN	31
10.1.	NYTT FRØLAND KRAFTVERK.....	31
10.1.1.	<i>Vannvei</i>	31
10.1.2.	<i>Turbin og generator</i>	34
10.2.	ALDAL KRAFTVERK.....	34
10.2.1.	<i>Vannvei</i>	34
10.2.2.	<i>Turbin og generator</i>	36
11.	SIMULERINGSPROGRAMMER	38
11.1.	UELASTISK SIMULERING AV OPP- OG NEDSVING I SJAKTER.....	38
11.2.	ELASTISK SIMULERING.....	38
11.2.1.	<i>Turbin</i>	39
11.2.2.	<i>Svingesjakter</i>	39
11.2.3.	<i>Valg av tapsmodell</i>	39
11.2.4.	<i>Plotting og lagring av resultater</i>	40
11.2.5.	<i>Definisjon av tunneler</i>	40
11.2.6.	<i>Kjøring av programmet</i>	40
11.3.	SIMULERING AV REGULERINGSSTABILITET.....	40
12.	RESULTATER OG DISKUSJON.....	42
12.1.	NYE FRØLAND KRAFTVERK.....	42
12.1.1.	<i>Dynamiske overslagsberegninger</i>	42
12.1.2.	<i>Opprinnelig geometri</i>	42
12.1.3.	<i>Foreslått geometri</i>	45
12.2.	ALDAL KRAFTVERK	49
12.2.1.	<i>Dynamiske overslagsberegninger</i>	49
12.2.2.	<i>Opprinnelig geometri</i>	51
12.2.3.	<i>Foreslått geometri</i>	56
12.3.	SAMMENLIGNING AV FRIKSJONSMODELLER	60
12.4.	RESULTATENES GYLDIGHET	64
12.4.1.	<i>Verifisering av programvare</i>	64
12.4.2.	<i>Begrensninger i bruk av resultatene</i>	67
13.	KONKLUSJON	68
13.1.	NYE FRØLAND KRAFTVERK.....	68
13.2.	ALDAL KRAFTVERK	68
13.3.	PROGRAMVARE OG FRIKSJONSMODELL.....	69
14.	FORSLAG TIL FORBEDRINGER.....	70
14.1.	NYE FRØLAND KRAFTVERK.....	70
14.2.	ALDAL KRAFTVERK	70
15.	VIDERE ARBEID.....	72
16.	REFERANSER	73
VEDLEGG	74	

1. Introduksjon

BKKs eldste kraftverk, Frøland i Samnanger, ble ferdigstilt i 1912 og er nå modent for rehabilitering (1). En revisjon av kraftverket forutsetter utvidelse av driftstunnel for å redusere falltap, og BKK har vurdert det dithen at kraftverket skal erstattes med et nytt. To mulige alternativer foreligger, Aldal Kraftverk og Nye Frøland Kraftverk, og denne rapporten tar for seg begge alternativene og vektlegger simulering av vannvei med det mål å analysere systemene dynamisk og om mulig foreslå forbedringer. Dette inkluderer vurdering av plassering av svingesjakter og svingninger i disse ved avslag og pådrag, samt simulering av retardasjonstrykk. I tillegg til dette vurderes reguleringsstabiliteten til begge alternativene, samt alle foreslåtte alternativ.



Figur 1 - Oversikt over kraftverk og rørgater i tilknytning til Frøland kraftverk (1)

1.1. Målsetning

Oppgaven har som mål å etablere simuleringsmodeller, for så å utføre dynamiske simuleringer av retardasjonstrykk, svingninger i svingekammer og reguleringsstabilitet. Simuleringsmodellene sammenlignes med overslagsformler for å validere dem. På bakgrunn av disse simuleringene foreslås endringer i vannveien for å bedre de dynamiske egenskapene.

Dempningen av u-rørssvingninger i et vannkraftsystem er til en stor grad avhengig av hvilken friksjonsmodell som benyttes under simuleringene, spesielt ved lave volumstrømmer. Forskjellige friksjonsmodeller benyttes under simuleringene for å undersøke hvilken innvirkning disse har på resultatet. Det forsøkes imidlertid ikke å utvikle eller forbedre en eksisterende modell. Fokuset i denne rapporten er å utvikle et generelt simuleringsprogram ved hjelp av karakteristikkmetoden, samt implementere forskjellige friksjonsmodeller i dette. Videre legges det også vekt på optimalisering og prosjektering av svingesjakter og reguleringsparametre for både Aldal Kraftverk og Nye Frøland Kraftverk.

Beregninger i tidsplanet ved bare delvis avslag eller pådrag anses som utenfor oppgavens omfang, og beregnes derfor ikke. Reguleringsstabilitet analyseres ved hjelp av programvare som parallelt med dette arbeidet utvikles i MATLAB ved NTNU, og et eget program for reguleringsstabilitet utvikles ikke i denne oppgaven. Som regulering er det bare analysert for PI-regulering, og PID og eventuelt andre reguleringsmetoder er ikke undersøkt.

1.2. Oppbygning av oppgaven

Oppgaven er bygd opp av tre tenkte hoveddeler. Den første delen gir i kapittel 3 til 0 en innføring i alternativene som vurderes, hvilke teoretiske grunnlag som ligger til grunn, og innenfor hvilke krav problemet skal løses. Dette inkluderer en kort beskrivelse av aktuelle kraftverk, på hvilket teoretisk grunnlag det skal simuleres med og hvilke dimensjoneringskriterier som ligger til grunn, før kapittel 10 gir en fullstendig og detaljert beskrivelse av alternativene som skal simuleres. I den andre delen beskrives programvaren som benyttes i kapittel 0, og inkluderer informasjon om hvordan programvaren behandler problemet og hvordan programmet skal brukes. Oppgaven avsluttes med den siste delen som består av resultater, diskusjon, konklusjon og forslag til forbedringer i kapittel 12 til 14.

Simuleringsresultatene i denne oppgave består av mye talldata og grafer, og for å forenkle forståelsen av resultatene er disse gitt i en bestemt rekkefølge. Det oppgis resultater først for opprinnelig og deretter foreslått geometri for Aldal Kraftverk og Nye Frøland Kraftverk i hvert sitt underkapittel. Resultatene i hvert underkapittel for hvert kraftverk oppgis i rekkefølgen; massesvingninger, retardasjonstrykk og reguleringsstabilitet. Simuleringene i dette arbeidet har generert mange grafer og resultatfiler, og det har blitt vurdert lite hensiktsmessig å inkludere alle disse i vedlegg som papirform. Et utvalg av hva som er ansett som viktige resultater er derfor tatt med, mens alle resultater er å finne i sin helhet på vedlagt CD. På vedlagt CD finnes det også et kart over CD-ens mappestruktur. I tillegg finnes alle programmer benyttet i simuleringene, samt installasjonsfiler til all gratis nødvendig installert programvare for å bruk av disse.

2. Tidligere arbeid

Aldal/Frøland-prosjektet er fortsatt på forprosjektstadiet, og denne analysen går parallelt med Norconsults analyser på oppdrag av BKK. I underlag fra BKK er preliminær kraftverkgeometri gitt for begge alternativene, og Norconsult har foretatt enkle overslagsberegninger for hånd. Det er da signalisert om behov for svingesjakt oppstrøms turbinen for begge alternativene, og BKK har plassert disse basert på erfaring og på bakgrunn av ønsket enkel tilkomst for utbygging.

Dynamisk analyse for vannkraftverk er blitt utført for et utall med forskjellige kraftverk, både i industri og ved NTNU. Det eksisterer flere programvarer som kan gjøre beregninger på dynamiske vannkraftsystem både i tidsplan og frekvensplan, men mange av disse er basert på programmeringsspråket Fortran. Dette er ansett som et lite brukervennlig språk, men har i stor grad vært i bruk grunnet sitt fortrinn i tunge numeriske beregninger. Nå da beregningskapasiteten til PCer har økt betraktelig de siste årene er det blitt mulig å gjøre slike beregninger raskt også i andre og mer brukervennlige språk. Det har tidligere ved NTNU blitt utviklet et program i MatLab som tar bruk av karakteristikkmetoden i masteroppgaven til Anja Rydning for å analysere Fortun Kraftverk. Her sammenlignes denne metoden med resultater fra et kommersielt program kalt LVtrans utviklet ved Sintef, noe som ga samsvarende resultater. Programmet er imidlertid ikke generelt nok, og har ikke de funksjonalitetene det trengs i dette arbeidet. I tillegg ønskes det bruk av lisensfri programmeringsspråk for videre bruk.

Parallelt med at denne rapporten ble skrevet utviklet stud.tech Simen Vogt-Svendsen et program i MatLab for dynamisk frekvensanalyse av reguleringsstabilitet. Dette programmet implementerer frekvensmodellen til Hermod Brekke, som har tidligere har gitt meget samsvarende resultater med målinger gjort på anlegg.

3. Beskrivelse av alternativene

Felles for begge alternativene er at Myra kraftverk blir lagt ned da begge alternativene vil hente vann fra Grøndalsvatn. I tillegg til vil gamle Frøland kraftverk blir erstattet med et småkraftverk som benytter den gamle driftstunnelen. Det nye småkraftverket vil få en estimert effekt på 4MW med en midlere årsproduksjon på 10,9 GWh (2).

3.1. Gamle Frøland kraftverk

Gamle Frøland kraftverk ble ferdigstilt i 1912, og er dermed BKKs eldste kraftverk (1). I 1921 var kraftverket fullt utbygd med seks aggregater, og i 1962 ble fire av disse er byttet ut med to større. Med en fallhøyde på 151 m mellom Fiskevatn og Frølandsvatn gir i dag tre francisturbiner en total ytelse på 21 MW, noe som gir en midlere årsproduksjon på 138 GWh.

3.2. Nytt Frøland kraftverk

Et nytt Frøland kraftverk vil benytte en fallhøyde på maksimalt 169 m mellom Grøndalsvatn og Frølandsvatn (3). Kraftverket vil i dette alternativet bli plassert i fjell bak det eksisterende, med en driftstunnel på totalt 5550 meter. Det er blitt vurdert dithen at en svingesjakt med all sannsynlighet blir nødvendig grunnet den lange driftstunnelen, og denne er foreslått plassert i trykksjakten like før kraftverket. Denne plasseringen er foreslått grunnet vanskelig tilkomst lengre oppe i terrenget.

Kraftverkets ytelse er estimert til 38MW med en midlere årsproduksjon på 171 GWh (2).

Vannveien for Nye Frøland kraftverk er nærmere beskrevet i 10.1.

3.3. Aldal kraftverk

Aldal kraftverk vil benytte et fall på maksimalt 198 meter mellom Grøndalsvatn og Samnangerfjorden (4). Kraftverket vil da få en estimert ytelse på 61 MW, og en midlere årsproduksjon på 226 GWh (2). Driftstunnelen i dette alternativet vil være totalt 6000 meter lang, og svingekammer blir nødvendig. I tillegg vil det hentes vann fra Aldalselva og Kvernelva gjennom bekkeinntak. Svingekammeret er foreslått plassert i forbindelse med bekkeinntaket fra Aldalselva. Bekkeinntakets utløp er i knutepunktet mellom trykktunnel og driftstunnel, og svingekammeret er foreslått plassert 200 meter oppstrøms fra bekkeinntakets utløp.

Vannveien for Aldal kraftverk er nærmere beskrevet i 10.2.

4. Det generelle ligningssystemet

For å beskrive strømmingen i et vannkraftverk trengs en matematisk modell bestående av tilstandsligninger og grensebetingelser. Disse er grunnlaget for alle metodene benyttet i denne rapport, og er gjengitt i det følgende. Utledninger er ikke gitt, og det henvises til referansene for mer informasjon.

4.1. Tuneller og rør

En vannstreng må til enhver tid oppfylle en kontinuitetsligning og en bevegelsesligning.

Volumstrøm inn i et kontrollvolum må være lik volumstrømmen ut av volumet, pluss en eventuell lagring inne i volumet. Skrevet på matematisk form fremkommer kontinuitetsligningen som vist i ligning (1) (5).

$$\frac{\delta H}{\delta t} + \frac{a^2}{g} \frac{\delta v}{\delta x} = 0 \quad (1)$$

I ligningen over fremkommer lyd hastigheten a , da elastiteten til både fluid og rørgate ikke kan neglisjeres om vannstrengen blir lang. Lyd hastigheten er en funksjon av kompressibiliteten og tettheten til fluidet, samt egenskapene til rørgaten. Lyd hastigheten kan beregnes etter ligning (2), men erfaringsmessig ligger lyd hastigheten i tunneler på ca. 1200 m/s (5). I resten av rapporten er det derfor benyttet denne verdien for lydens hastighet i vann.

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{d}{TE}}} \quad (2)$$

I ligning (2) er K vannets kompresjonsmodul, ρ vannets tetthet, T rørtykkelse, E rørmaterialets E-modul og d er rørets diameter.

Summen av alle krefter på et stasjonært kontrollvolum må være lik null. En kraftbalanse kan derfor settes opp for nevnte kontrollvolum, og fremkommer matematisk som vist i ligning (3).

$$g \frac{\delta H}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta t} + \lambda \frac{v|v|}{2D} = 0 \quad (3)$$

4.2. Ikke-stasjonært tap i rør

Det finnes ingen fullverdige modeller for ikke-stasjonært tap i rør, men for variasjoner rundt arbeidspunkt hvor den stasjonære volumstrømmen er stor kan en såkalt kvasi-stasjonær tilnærming brukes. Det antas da at friksjonstapet viser samme karakteristikk som for stasjonær strømning, og kan uttrykkes på følgende måte.

$$\Delta h = kQ|Q| \quad (4)$$

I ligning (4) uttrykkes falltøpet som en konstant multiplisert med volumstrømmen på samme måte som i stasjonært tilfelle, med unntak av at volumstrømmen varierer og kan bli negativ. Denne modellen kan utvides til å ta hensyn til lokale variasjoner i Reynoldsnummer ved at friksjonsfaktoren beregnes for hvert tidsskritt etter for eksempel Haalands formel.

Det eksisterer flere forskjellige utvidede modeller som tar hensyn til flere parametere som er neglisjert i den kvasi-stasjonære modellen. Blant annet neglisjeres frekvensens bidrag til dempingen, en parameter som kan få veldig stor innvirkning på resultatet spesielt for stasjonær volumstrøm rundt nullpunkt. Det kan også ses ut fra formel (4) at om middelveidien til volumstrømmen er null vil det ikke eksistere noen demping. Dette er ikke tilfelle da lokal akselerasjon av vannmasser og virveldannelse ved endring av strømningsretning fører til energitap, med følgende demping. Dette problemet kan til en viss grad omgås ved å innføre en passende friksjonsmodell. Dette er nærmere beskrevet i kapittel 0.

4.3. Svingsjakt

Ved å betrakte kontinuitetsligningen for knutepunktet til et svingekammer kan følgende utledes.

$$Q_1 = Q_2 + Q_s \quad (5)$$

Volumstrøm inn i knutepunktet må altså tilsvare volumstrøm videre ned gjennom tunnelen, i tillegg til volumstrøm opp i svingsjakt. Med et vannspeilareal i svingsjakt, A_s , vil økningen av volumstrøm være lik oppsving i sjakten multiplisert med arealet. For et lite tidsskritt uttrykkes dette på følgende måte.

$$Q_s = A_s \frac{dz}{dt} \quad (6)$$

Omformulert blir da differensialligningen for svingsjakten som følger.

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_s}{A_s} \quad (7)$$

4.4. Turbin og generator

Differensialligningen for turbin og generator fremkommer av en effektbalanse over turbin og generator.

$$P_h = J\omega \frac{d\omega}{dt} + P_N + tap \quad (8)$$

Differensialligningen blir da som vist i ligning (9) (5).

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_h - P_N - tap \quad (9)$$

4.5. Regulator

Regulatorer deles inn i P, PI eller PID-regulatorer, hvor PI er hyppigst brukt. For en PI-regulator er differensialligningen som vist i ligning (10) (5).

$$\frac{d\hat{a}}{dt} = -K_p \frac{dn}{dt} + \frac{K_p}{T_d} (n_{ref} - n) \quad (10)$$

5. Dimensjoneringskriterier

Et vannkraftverk dimensjoneres i henhold til forskjellige krav, enten gitt gjennom lovverk, forskrifter eller fysiske begrensninger.

5.1. Sjaktsvingninger og trykkstøt

Svingesjakter må dimensjoneres for å hindre overflom til omgivelser med mindre det eksisterer elveløp som effektivt kan ta unna overskuddsvannet. Normalt sett godtas ikke overløp, og et dimensjoneringskriterie er derfor en fysisk begrensning på hvor høyt oppsving det kan tillates i svingesjakten. Dette henger også sammen med hvor stor trykkøkning det tillates foran turbin, da en økning av vannspeilet i svingesjakten vil føre til økt trykkehøyde nedstrøms i systemet. Videre må det maksimale nedsving ikke føre til frispeilsstrømninger og luftinnsug i driftstunnel da dette vil føre til økt sedimenttransport og skade på turbin. Det kreves også at svingningene i en svingesjakt er stabile, det vil si at svingningene vil dempes ut og ikke forsterkes. I tillegg til dette bør svingesjaktens dimensjoner optimaliseres økonomisk innenfor de rammer som kan tillates. Alle disse kriterier skal være oppfylt under det verst tenkelige scenario som kan inntreffe. For dimensjonering av øvre svingegrense vil dette være ved avslag i den mest ugunstige fase etter oppstart ved maksimal volumstrøm og høyeste regulerte vannstand i reservoaret. Avslaget vil da bidra i fase med svingningene fra oppstart og øke amplituden til svingningene i sjakten. For å dimensjonere nedre svingegrense simuleres det med laveste regulerte vannstand og pådrag fra stillstand til maksimal volumstrøm, i tillegg til at det sjekkes for pådrag med etterfølgende avslag i ugunstig fase. Det er her antatt at fullt pådrag i mest ugunstige fase etter avslag er svært lite sannsynlig, og dermed ikke blir dimensjonerende for nedre svingegrense.

Ved bygging av et vannkraftverk må rørgate og alt utstyr i tilknytning til denne dimensjoneres for den belastning de kan bli påført i alle driftstilstander.

Dimensjoneringskriteriet for trykk vil være det trykket som opparbeider seg grunnet retardasjon av vannmassene ved avslag. En øvre grense for hvilket retardasjonstrykk som kan tillates må bestemmes, men normalt sett kreves det at trykket foran turbin ikke skal overstige 20 % av statisk trykk (6). Dette inkluderer også det økte trykket grunnet høyere vannspeil i svingesjakter. Hvilken grense som skal være gjeldende her en økonomisk betraktning da det for et gitt kraftverk vil være nødvendig å øke lukketiden for å senke trykkøkningen. Dette vil føre til høyere rusing på turbin i tillegg til at mer vann vil slippe gjennom i løpet av lukkingen, noe som må betraktes som et tap og senke inntjeningen. Et høyere tillatt trykk gir utslag i at ventiler og annet mekanisk utstyr må dimensjoneres deretter, noe som gir merutgifter i investeringskostnadene. I det følgende opereres det med en grense på 20 % relativt statisk trykk før avslag, som er gitt av fallhøyden fratrukket friksjonstapet.

Det stilles også krav til at trykket etter turbin ikke faller så mye at det blir fare for brudd i vannstrengen. Et slikt scenario vil føre til implosjon av luftboblen som dannes, og føre til store påkjenninger for mekanisk utstyr. Nedre grense for dette trykket er gitt av at

det må være et visst resttrykk for å hindre gassdannelse. Som starttrykk nedstrøms turbinen settes dykkingen til turbinen, som da blir det maksimale trykkfallet det kan tillates. En viss sikkerhetsmargin bør imidlertid regnes med.

Tabell 1 - Dimensjoneringskriterier svingesjakt og trykkstøt

<i>Dimensjonert størrelse</i>	<i>Kriterie</i>	<i>Driftspunkt</i>
Øvre svingegrense	Ingen overløp	Full volumstrøm, øvre regulerte vannstand, pådrag med etterfølgende avslag
Nedre svingegrense	Over tunnelsåle	Nedre regulerte vannstand, pådrag med etterfølgende avslag
Trykk oppstrøms turbin	< 20% økning	Full volumstrøm, øvre regulerte vannstand, avslag
Trykk nedstrøms turbin	Trykkfall < Dykking	Full volumstrøm, nedre regulerte vannstand, avslag

Ved alle simuleringer under dimensjonerings i en preliminær fase uten kjennskap til kjøreplaner dimensjoneres det med en volumstrøm like slukeevne.

5.2. Stabilitet

Stabilitet analyseres i frekvensplan, og krav stilles til fasemargin, forsterkningsmargin, avviksforhold og turtall/lastforhold. Disse størrelser er nærmere forklart i kapittel 7. I Norge stilles det ofte krav til at fasemarginen skal være større enn 45° på isolert nett og forsterkningsmarginen over 2 (6 dB) (5). Om generator skal være knyttet til regionalnettet kan imidlertid en lavere fasemargin tillates, i størrelsesorden 30°. Avviksforholdet bør være mindre enn 4 – 6 dB, og turtall/lastforholdet godt under 0 dB (helst -4 til -6 dB) (5). Da disse to kravene henger sammen holder det normalt å se på bare en av dem i en preliminær fase. I tillegg er det vanlig å kreve at turtall/lastamplitude for u-rørsvingninger maksimalt skal være -4 dB (5). Disse kravene er sammenfattet i Tabell 2, og må tilfredsstilles i alle turbinens driftspunkt.

Tabell 2 - Krav ved frekvensanalyse

<i>Målt størrelse</i>	<i>Krav</i>
Fasemargin	> 45° / 30°
Forsterkningsmargin	> 6 dB
Avviksforhold	< 4-6 dB
Turtall/lastforhold	< -4 til -6 dB
U-rørsfrekvens	< -4 dB

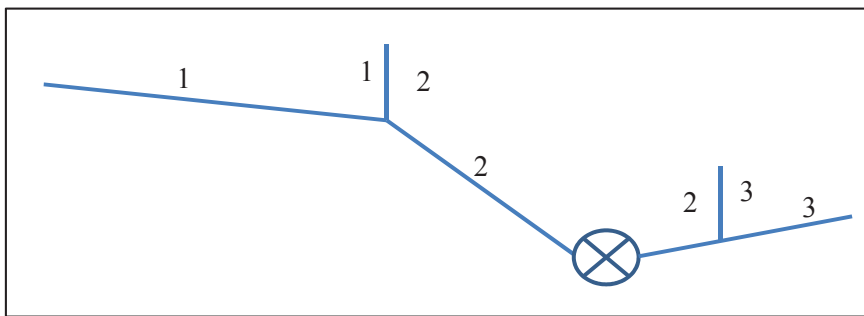
I tillegg må alle frie vannspeil i prinsippet være større enn Thoma-tverrsnittet for å være stabile (5). Det vil imidlertid gi utslag i frekvensanalysen om dette ikke er tilfredsstilt, men for vannspeil som ikke er med i denne analysen må dette kravet stilles eksplisitt. For lukesjakter som vil få svært høy u-rørsfrekvens kan dette kravet likevel fravikes i praksis da den høye frekvensen vil gi svært høy demping, noe som må vurderes i hvert tilfelle (5).

6. Overslagsberegninger

Det finnes et sett med analytiske overslagsformler for opp- og nedsving i svingesjakter og trykkstøt, fremkommet på basis av å betrakte differensialligningene tapsfritt. Disse er betraktet å gi en god preliminær tilnærming i en tidlig fase av prosjekteringen av kraftverk. Grunnet usikkerheten i disse beregningene kreves det normalt en dynamisk modellering i tid-steds-plan.

6.1. Svingesjakt

Svingninger i svingesjakter er et langsomt fenomen med lav frekvens. Vannet kan derfor betraktes som uelastisk for å forenkle ligningssettet, i tillegg til å spare datakraft. Ved å neglisjere elastisiteten kan bevegelsesligningene settes opp for et forenklet kraftverk som vist i det følgende. Ligningene gjengitt i dette avsnittet er hentet fra (5).



Figur 2 - Forenklet kraftverkgeometri for overslagsberegninger

Bevegelsesligninger:

$$\frac{L_1}{gA_1} \frac{dQ_1}{dt} = H_0 - Z_1 - k_1 Q_1 |Q_1| \quad (11)$$

$$\frac{L_2}{gA_2} \frac{dQ_2}{dt} = Z_1 - Z_2 - H_n \left(\frac{Q_2}{\kappa Q_n} \right) - k_2 Q_2 |Q_2| \quad (12)$$

$$\frac{L_3}{gA_3} \frac{dQ_3}{dt} = Z_2 - H_U - k_3 Q_3 |Q_3| \quad (13)$$

Forgrening mellom sjakt og tunnel:

$$Q_{s1} = Q_1 - Q_2 \quad (14)$$

$$Q_{s2} = Q_2 - Q_3 \quad (15)$$

Vannspeil i sjakter:

$$\frac{dz_1}{dt} = \frac{Q_{s1}}{A_{s1}} = \frac{Q_1 - Q_2}{A_{s1}} \quad (16)$$

$$\frac{dz_2}{dt} = \frac{Q_{s2}}{A_{s2}} = \frac{Q_2 - Q_3}{A_{s2}} \quad (17)$$

Ved å betrakte alle differensierte størrelser som endelige kan det vises at følgende overslagsformler for oppsving og nedsving fremkommer, hvor positivt fortegn brukes for oppsving.

$$\Delta z = \pm \Delta Q \sqrt{\frac{L / A_T}{g A_s}} \quad (18)$$

Denne formelen er tapsfri, men en korreksjon for friksjonen er foreslått (5). Opp- og nedsving kan da finnes fra følgende formler. Da disse overslagsberegningene bare brukes for å forutsi i hvilken størrelsesorden resultatene fra fulle simuleringer vil få kan det anses som tilstrekkelig å benytte ligning (18).

$$\Delta z_{\text{oppsving}} = \Delta Q \sqrt{\frac{L / A_T}{g A_s}} + \frac{1}{3} h_f \quad (19)$$

$$\Delta z_{\text{nedsving}} = \Delta Q \sqrt{\frac{L / A_T}{g A_s}} - \frac{1}{9} h_f^0 \quad (20)$$

Størrelsene h_f og h_f^0 er henholdsvis friksjonsfalltap før avslag og falltap etter pådrag.

Svingningens egenfrekvens kan finnes etter følgende formel.

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{A_s L / A_T}} \quad (21)$$

Perioden blir da som følger.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (22)$$

En begrensning ved en slik overslagsberegning er at et pådrag etterfulgt av et avslag ikke kan beregnes. De største massesvingningene vil oppstå som en følge av nettopp et slikt scenario, og en simulering i tidsplan må utføres for å dimensjonere svingegrenser.

6.2. Trykkøkning foran turbinen

Ved stengning av turbinen vil en trykkbølge oppstå og forplante seg med lydens hastighet oppover trykktunnelen. Joukowsky har vist at øyeblikkelig endring av hastigheten i et rør fører til en trykkstigning gitt av ligning (23).

$$\Delta h = \frac{a \Delta c}{g} \quad (23)$$

Formelen gitt over gjelder ved øyeblikkelig endring av vannhastigheten. Trykkøkningen kan reduseres ved å lukke turbinen over et tidsrom som er lengre enn refleksjonstiden til trykkbølgen. Med dette menes den tiden trykkbølgen bruker på å forplante seg fra turbinen til nærmeste frie overflate og tilbake igjen. Refleksjonstiden, T_R , er gitt av ligning (24).

$$T_R = \frac{2L}{a} \quad (24)$$

For lukketid, T_L , i samme størrelsesorden som T_R gjelder følgende sammenheng for trykkøkningen foran turbinen (5). Om lukketiden er mye større enn refleksjonstiden kan elastisiteten neglisjeres, og uttrykket under halveres som vist i (26) (5).

$$\Delta h = \frac{a\Delta c}{g} \frac{T_R}{T_L} = 2 \frac{\Delta Q}{T_L} \frac{L}{gA} \quad (25)$$

$$\Delta h = \frac{\Delta Q}{T_L} \frac{L}{gA} \quad (26)$$

6.3. Stabilitet

Hovedparameteren for om et kraftverk er stabilt er vannmassenes tilløpstid, T_w . Denne er definert som den tiden det tar å akselerere vannmassene fra stillstand til Q_0 under påvirkning av fallhøyden (5).

$$T_w = \frac{Q}{gH} \sum \frac{L}{A} \quad (27)$$

For å oppnå et godt reguleringsystem stilles det krav til at T_w skal holdes under 1, med den antagelse at svingemassenes aksellerasjonstid, T_a , er i området 5-7 sekunder. T_a defineres som den tid det tar å akselerere generator og turbin fra stillstand til nominelt turtall.

$$T_a = \frac{J \times \omega_0^2}{P_0} = \frac{J \times (\pi n_0)^2}{30^2 \rho g Q_0 H_0 \eta_0} \quad (28)$$

Mer korrekt kan det sies at forholdet mellom T_a og T_w skal være over 6 for å ivareta en god regulering. I tillegg bør forholdet mellom T_w og T_R ikke overstige 1 for at elastisiteten skal være neglisjerbar i forbindelse med fasemarginen (5). Hvis disse kriterier ikke er oppfylt må systemet vurderes utbedret, enten ved å øke svingmassene, endre L/A -forholdene eller ved å innføre svingekammer. Ofte er innføring av svingekammer det mest hensiktsmessige da større tunneler fort fører til veldig store ekstrakostnader, og en økning av svingmassene ofte ikke er ønskelig. Ved innføring av svingekammer bestemmes plasseringen ved å løse ligning (27) for L/A , i tillegg til praktiske betraktninger som adkomst og lignende.

Det kreves et minste tverrsnitt på enhver frie overflate i et vannkraftsystem for at det skal være stabilt. Det kan vises at den minste vannspeiloverflaten som sikrer stabile u-rørssvingninger kan finnes etter det såkalte Thomakriteriet, som er vist i ligning (29).

$$A_{th} = 0.0085 \frac{M^2 A^{5/3}}{H_0} \quad (29)$$

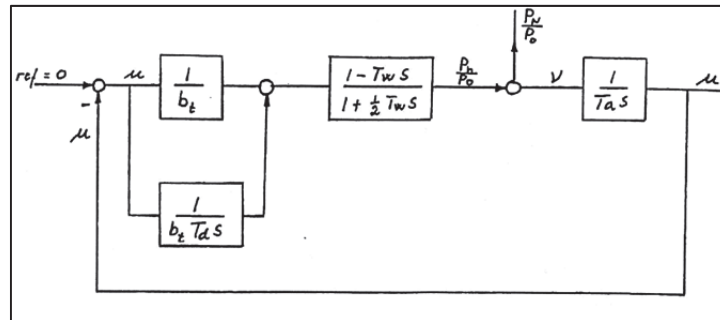
Som sikkerhetsmargin kreves det at vannspeilarealet er 50% større enn A_{th} (5).

Ved svingesjakt bare oppstrøms turbinen vil u-rørssvingninger mellom sjakten og reservoaret være mest fremtredende, og summen av L/A i ligning (27) betraktes fra sjaktvannspeilet til undervannet. Ved lang avløpstunnel kan det også være aktuelt å innføre svingesjakt nedstrøms turbinen, og L/A betraktes da fra øvre sjaktvannspeil til nedre sjaktvannspeil. Ved to svingesjakter må det kontrolleres at svingesjaktenes svingefrekvens ikke ligger i samme område for å forhindre resonans. Det kan også tenkes at det trengs to svingesjakter i overvannet, og dominerende u-rørssvingninger må vurderes i hvert tilfelle. Svingefrekvensen finnes etter ligning (21), og kan omgjøres til sekunder etter ligning (22).

7. Reguleringsstabilitet

Reguleringsstabilitet kan analyseres i frekvensplanet ved såkalte transferfunksjoner, som beskriver responsen til en kjent påtrykt forstyrrelse. Transferfunksjoner fremkommer ved å sette systemets differensialligninger opp i blokkdiagrammer, for så og linearisere rundt et arbeidspunkt og Laplace-transformere dem (5).

Blokkdiagrammet kan så reduseres til en blokk, som blir transferfunksjonen. Et vannkraftsystem beskrives av differensialligninger for vannvei, turbin og regulator. Et forenklet blokkdiagram for et enkelt vannkraftsystem er vist i Figur 3.



Figur 3 - Forenklet blokkdiagram for et vannkraftsystem

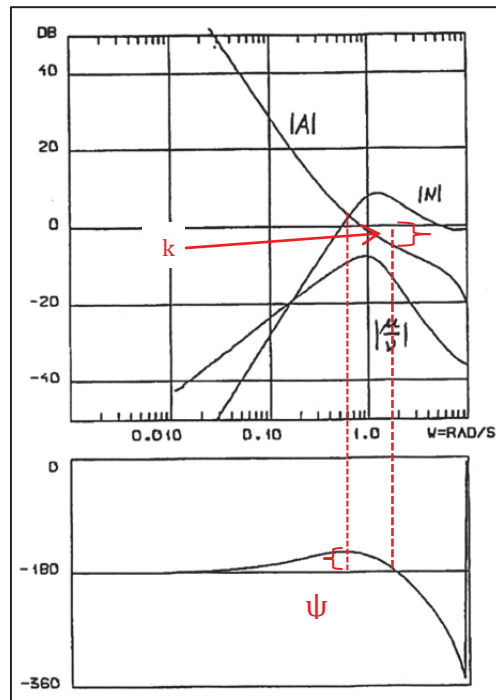
Om tilbakekoblingen fjernes kan systemet reduseres til transferfunksjonen til den åpne sløyfen, **A**. Det påtrykkes her en sinussvingning for alle frekvenser kraftverket skal operere under, og responsen blir plottet i en bode-diagram. I bode-diagrammet bør som minstekrav amplitudeforholdet, avviksførholdet og faseforskyvningen plottes. I tillegg kan turtall/last-forholdet plottes.

Alternativt kan tilstandsligningene settes opp i såkalte elementmatriser, og videre til lokale og til slutt en global strukturmatrise. Disse matrisene beskriver det samme som blokkdiagrammet beskrevet over og alle ligningene er på samme måte linearisert og transformert, men ligningene er organisert annerledes. Fordelen med denne metoden er at den er mer «datamaskinorientert», altså lettere å løse med dataproedyrer (7). Det er denne metoden som er brukt i programvaren benyttet i dette arbeidet.

Et stabilt system krever at fasemarginen, ψ , er positiv ved kryssfrekvensen.

Kryssfrekvensen defineres som den frekvensen hvor **A** krysser 0 dB-linjen.

Forsterkningsmarginen bør også være positiv, og defineres som differanse mellom 0 dB-linjen og **A**. Se Figur 4 for illustrasjon.



Figur 4 - Bode-diagram

Under dimensjonering av reguleringsparametre tas det utgangspunkt i Steins empiriske formler for en PI-regulator, som gjengitt nedenfor.

$$\begin{aligned}
 T_d &= 6 \times T_w \\
 b_i &= 2,6 \times \frac{T_w}{T_a}
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

For en PID-regulator er Steins formler som gjengitt i ligningsett (31)

$$\begin{aligned}
 T_d &= 3 \times T_w \\
 T_n &= 0,5 \times T_w \\
 K_p &= 1,5 \times \frac{T_w}{T_a}
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

Ved å forandre disse parameterne forsøkes det å oppnå en rask regulering samtidig som stabilitetskravene opprettholdes. Ved frekvenser høyere enn kryssfrequensen vil reguleringen ikke være effektiv, og kryssfrequensen må da ligge høyere enn de frekvensen det ønskes å regulere. Den må likevel ikke ligge for høyt da regulatoren da vil prøve å regulere på trykkstøtfrekvenser. Dette kan imidlertid løses ved å benytte en PID-regulator og sette en filtertid på regulatoren, som setter en øvre grense for hvilke frekvensen det ønskes å regulere for. Det er imidlertid sjelden at kryssfrequensen blir for høy, spesielt ved lange vannveier. Med dette i tankene tilstrebes en liten forsterkningsmargin og fasemargin, da dette vil gi en rask regulering. Marginene må likevel alltid være over kriteriene.

8. Simuleringsmetoder i tidsplanet

Det eksisterer flere forskjellige simuleringsmetoder for dynamisk analyse av vannkraftverk, og noen av de mest relevante er beskrevet i det følgende.

8.1. Uelastisk vannsøyleteori

I tilfeller hvor endringer i trykk og volumstrøm er små i forhold til L/A kan uelastisk teori benyttes. Det antas da at effekten av vannets kompressibilitet er så liten at den kan neglisjeres i tillegg til at rørveggene ikke er deformerbare. Dette impliserer løsning av et «stivt» ligningssett, det vil si at en plutselig endring av volumstrøm og trykk i samme øyeblikk opptrer i hele rørlengden.

Løsning av denne metoden finnes ved utledning av en kraftbalanse over et kontrollvolum. Effekten av kompressibilitet kan sjelden neglisjeres i et helt kraftverksystem, og denne metoden benyttes derfor sjelden alene. En tilsvarende metode er imidlertid utviklet til å benyttes i kombinasjon med karakteristikkmetoden for å forenkle beregningene i de deler av systemet hvor kompressibilitet kan neglisjeres (8). Dette forklares nærmere i 8.2.

8.2. Karakteristikkmetoden

8.2.1. Utledning av ligningssett

Karakteristikkmetoden er en veldokumentert numerisk metode for løsning av hyperbolske differensialligninger i tidsplanet. Generelle løsninger av ligningssystemet finnes ikke, men ved hjelp av karakteristikkmetoden kan dette omgjøres og løses numerisk. Følgende kortfattede utledning er hentet fra Wylie og Streeter, Fluid Transients in Systems (8). Metoden tar utgangspunkt i bevegelsesligningen (32) og massebevaring (33) og kombinerer disse med en ukjent multiplikator. Dette resulterer i et elastisk ligningssett for henholdsvis bølgeforplantning i positiv og negativ retning.

$$L_1 = gH_x + V_t + \frac{f}{2D}V|V| \quad (32)$$

$$L_2 = H_t + \frac{a^2}{g}V_x \quad (33)$$

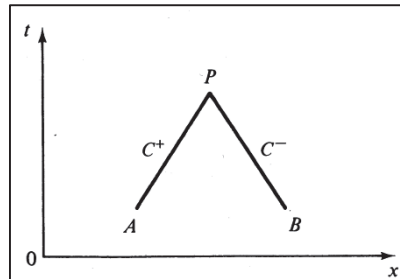
Disse kombineres videre med en multiplikator λ og resulterer i ligning (34).

$$L = L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left(H_x \frac{g}{\lambda} + H_t \right) + \left(V_x \lambda \frac{a^2}{g} + V_t \right) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (34)$$

Videre kan det vises at ligning (34) resulterer i to ligningssett, C^+ og C^- , for bølgeforplantning i henholdsvis positiv og negativ lengderetning.

$$\begin{aligned}
 C^+ & \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = +a \end{cases} \\
 C^- & \begin{cases} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases}
 \end{aligned} \tag{35}$$

Ligningssettet over er gyldig langs lineære linjer i xt-planet med $\pm a$ som stigning, som vist i Figur 5.



Figur 5 - Karakteristikklinjer i xt-plan (8)

Ligningssett (35) kan videre integreres opp og forenkles til følgende ligningssett med notasjoner som vist i Figur 5.

$$\begin{aligned}
 C^+ : H_P &= H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_P |Q_A| = 0 \\
 C^- : H_P &= H_B + B(Q_P - Q_B) + RQ_P |Q_B| = 0
 \end{aligned} \tag{36}$$

hvor B er en funksjon av de fysiske egenskapene til fluid og rør, og R er rørets tapskoeffisient.

$$B = \frac{a}{gA} \tag{37}$$

$$R = \frac{f \Delta x}{2gDA^2} \tag{38}$$

For numerisk beregning med et dataprogram kombineres og forenkles ligningssett (36) videre for å gi en eksplisitt verdi for det nye tidsskrittet.

$$C^+ : H_i = C_P - B_P Q_i \tag{39}$$

$$C^- : H_i = C_M + B_M Q_i \tag{40}$$

$$H_i = \frac{C_P B_M + C_M B_P}{B_P + B_M} \tag{41}$$

$$Q_i = \frac{C_P - C_M}{B_P + B_M} \quad (42)$$

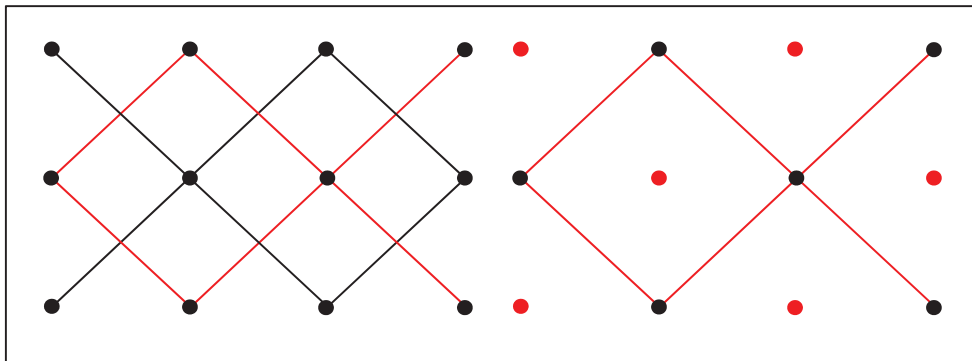
Hvor C_P , C_M , B_P og B_M kjente konstanter.

$$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} \quad B_P = B + R|Q_{i-1}| \quad (43)$$

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} \quad B_M = B + R|Q_{i+1}| \quad (44)$$

8.2.2. Nodegitter

Som vist i forrige delkapittel tar karakteristikkmetoden bruk av verdier beregnet for forrige tidssteg ved både node $i-1$ og $i+1$ for å beregne ny verdi for node i , noe som gir et diamantformet gitter som vist i Figur 6. Som det kan ses på figuren vil dette føre til numeriske problemer da beregninger skjer for hver noderekke i . For annenhvert tidssteg vil en med dette gitteret enten måtte sette verdi lik null, eller interpolere mellom beregnede verdier for $i-1$ og $i+1$. Dette er selvfølgelig mulig, men unøyaktigheter vil innføres ved interpolasjonen i tillegg til at programmet kan bli mer tungkjørt. En annen metode er å innføre forskjøvet gitter (staggered grid), noe som muliggjør beregning for hver noderekke. Det vil da opereres med to parallelle gitter forskjøvet i forhold til hverandre, noe som øker bruk av CPU. I figuren representerer de røde linjene hovedgitteret, mens de svarte linjene er det ekstra gitteret. De røde punktene til høyre representerer punkter uten data ved bruk av enkelt gitter.

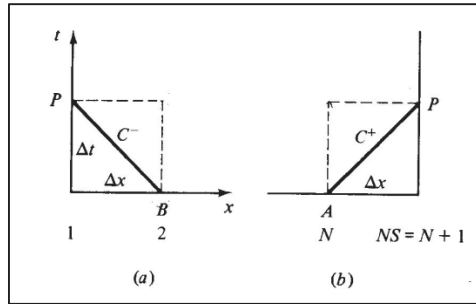


Figur 6 - Gitter for numerisk beregning, enkelt (th) og forskjøvet (tv)

Fordelen med denne metoden er imidlertid at matriser blir halvparten av størrelsen ved enkelt gitter da alle nullverdier utelates, noe som reduserer bruken av CPU. Etterbehandlingen av resultatene forenkles også av samme grunn.

8.2.3. Grensebetingelser for karakteristikkmetoden

I hver av endene av beregningslengden er det kun en node for tidligere tidssteg tilgjengelig med en tilhørende ligning. For løsning av verdi for nytt tidssteg trengs to ligninger, og en grensebetingelse må innføres. I starten av beregningslengden er C- ligningen gyldig, og en grensebetingelse må erstatte C⁺-ligningen. Etter samme argumentasjon gjelder dette også for enden, med den forskjell at det er C⁻-ligningen som må erstattes med en grensebetingelse. Dette kan ses fra Figur 7.



Figur 7 - Grenser for beregningslengde (8)

Disse grensebetingelsene avhenger av hva røret er tilkoblet, og kan være både andre rør og andre elementer i vannveien. I et vannkraftverk er dette typisk reservoar, andre rørstykker, T-koblinger av rør, svingesjakter eller turbin.

Øvre reservoar

Øvre reservoar er ofte karakterisert ved at vannivået er holdt konstant. Som en følge av denne grensebetingelsen fremgår det at trykkehøyde ved innløp til rørsystemet er konstant lik øvre reservoars kotehøyde fratrukket rørinnløpets høyde over nullnivå. På matematisk form blir da grensebetingelsen som vist i (45). Volumstrømmen kan da løses direkte fra (40).

$$\begin{aligned} H_1 &= H_R \\ Q_1 &= \frac{H_1 - C_M}{B_M} \end{aligned} \quad (45)$$

Nedre reservoar

Nedre reservoar karakteriseres ved et konstant kjent utløpstrykk lik nedre reservoars kotehøyde trykket fra høyde over nullnivå, og volumstrøm kan da finnes fra (39).

$$\begin{aligned} H_N &= H_U \\ Q_N &= \frac{C_P - H_U}{B_P} \end{aligned} \quad (46)$$

Turbin

Som regel i beregning ved hjelp av karakteristikkmetoden ender modellen med en turbin. For forenklet beregning modelleres denne ofte som en ventil med gitt åpningsgrad. Da avslag skjer raskt vil volumstrørendringen følge en tilnærmet lineær sammenheng med åpningsgraden, og for dimensjonering av svingesjakter og trykkstøtberegninger ved avslag vil dette gi en fullgod tilnærming. Grensebetingelsen mot en ventil blir da en kjent volumstrømsendring over ventilen som funksjon av trykkforskjellen oppstrøms og nedstrøms ventilen. Dette kan uttrykkes matematisk som i ligning (47), hvor 0 betegner likevektstilstand.

$$\Delta Q = \frac{Q_0}{\sqrt{H_0}} \tau \sqrt{\Delta H} \quad (47)$$

Sammen med ligning (39) kan volumstrømsendring over ventilen som funksjon av trykkforskjell over ventilen implementeres i karakteristikkmetoden og volumstrømsendring fremkommer av ligning (48) og ligning for henholdsvis positiv og negativ strømningsretning (8).

$$\Delta Q_i^t = -C_V (B_{P1} + B_{M2}) + \sqrt{C_V^2 (B_{P1} + B_{M2})^2 + 2C_V (C_{P1} - C_{M2})} \quad (48)$$

$$\Delta Q_i^t = C_V (B_{P1} + B_{M2}) - \sqrt{C_V^2 (B_{P1} + B_{M2})^2 - 2C_V (C_{P1} - C_{M2})} \quad (49)$$

$$C_V = \frac{(Q_0 \tau)^2}{2H_0} \quad (50)$$

Knutepunkt mellom flere rørgater

Knutepunkt mellom flere rørgater karakteriseres ved at trykket i knutepunktet må være det samme for alle tilknytte rør. Ved å betrakte ligning (39) for seksjon rett oppstrøms og (40) for seksjon rett nedstrøms knutepunktet kan disse summeres og løses for et trykk.

$$H_i^t = C_n + B_n Q_n \quad (51)$$

$$C_n = \frac{\sum \frac{C_P}{B_P} + \sum \frac{C_M}{B_M}}{\sum \frac{1}{B_P} + \sum \frac{1}{B_M}} \quad (52)$$

$$B_n = \frac{1}{\sum \frac{1}{B_P} + \sum \frac{1}{B_M}} \quad (53)$$

I ligning (51) fremkommer Q_n som en volumstrøm for noden, som er en volumstrøm som ikke er uttrykt ved hjelp av C_P og B_P . I denne rapporten er alle volumstrømmer uttrykt slik, og Q_n settes denne lik null. Ny volumstrøm for alle tilknytte rørgater kan løses fra ligning (39) eller (40), avhengig av om rørgaten er plassert oppstrøms eller nedstrøms knutepunktet.

Svingesjakt

Vannhøyden i svingesjakten er en funksjon av tiden, og trykket i tilføringstunnelen antas lik den høyden i svingesjakten ved det tidsskrittet. Trykket i svingesjakten er da uttrykt som vist i ligning (54).

$$H = Z(t) \quad (54)$$

Høyden av vannstand i svingesjakt er avhengig av volum av vann i sjakten og sjaktens tverrsnittsareal. Sjaktens tverrsnittsareal kan igjen være en funksjon av vannspeilhøyden i svingesjakten. Trykkehøyden i sjakten kan da uttrykkes som vist i ligning (55).

$$Z(t) = Z^{t-1} + \frac{\Delta Q^t}{A_{sjakt}(Z)} \Delta t \quad (55)$$

Volumstrøm kan da løses fra ligning (39).

Om sjakten er tverrsnittsareal som varierer med høyden på vannspeilet kan dette tas høyde for ved å beregne dette for hvert tidsskritt, enten ved å legge inn «hvis-setninger» om variasjonen er stegvis, eller legge inn en funksjon som representerer arealforandringen tilfredsstillende.

8.3. Eulers metode

Den enkleste form for løsning av lineære differensialligninger er ved hjelp av Eulers metode. Metoden multipliserer den deriverte av funksjonen med et lite tidssteg for å finne verdien ved neste tidssteg. Som et eksempel er Eulers metode anvendt på ligningen for driftstunnel med svingesjakt som gitt i (5).

$$\frac{L_1}{gA_1} \frac{dQ_1}{dt} = H_0 - Z_1 - k_1 Q_1 |Q_1|$$

Ligningen løses først for den deriverte av størrelsen, i dette tilfellet den tidsderiverte av volumstrømmen.

$$\frac{dQ_1}{dt} = (H_0 - Z_1 - k_1 Q_1 |Q_1|) \frac{gA_1}{L_1}$$

Ved å betrakte dt og dQ_1 som endelige størrelser fremkommer ligningen for volumstrømsendring som følger.

$$\Delta Q_1 = (H_0 - Z_1 - k_1 Q_1 |Q_1|) \frac{gA_1}{L_1} \Delta t$$

Volumstrømsendring og volumstrømmen er her gitt for samme tidssteg. For å muliggjøre numerisk løsning benyttes volumstrøm ved forrige tidssteg i beregningen. Ved å la Δt gå mot null vil differansen mellom volumstrømmen ved forrige og gjeldende

tidssteg gå mot null. Fra dette kan det konkluderes med at differansen mellom virkelig verdi og numerisk beregnet verdi reduseres ved en reduksjon av tidssteget. Ved valg av lite nok tidssteg kan denne feilen neglisjeres for praktiske formål. Den endelige numeriske ligning blir da som følger.

$$\Delta Q_1' = \left(H_0 - Z_1^{t-1} - k_1 Q_1^{t-1} | Q_1^{t-1} \right) \frac{g A_1}{L_1} \Delta t$$

Den største ulempen ved denne metoden er at den behandler vannstrengen som stiv, og dermed ikke inkluderer effekten av kompressibilitet. Løsning for trykkstigning foran turbin ved avslag er heller ikke mulig uten å introdusere overslagsformler, noe som forringer riktigheten av metoden.

9. Friksjonsmodeller

Mange forskjellige friksjonsmodeller er utprøvd for dynamiske system hvor volumstrømmen alternerer om null. Denne rapporten tar for seg tre ulike friksjonsmodeller og sammenligner virkningen av dem.

9.1. Tradisjonell friksjonsmodell

Som sammenligningsgrunnlag benyttes tradisjonelle tapsberegninger hvor friksjonsfaktor ikke varierer og er utregnet på basis av likevektstilstand. Friksjonstapet blir beregnet etter Weisbachs korrelasjon, basert på Darcys friksjonsfaktor.

$$h_f = f \frac{L}{D_H} \frac{V^2}{2g} \quad (56)$$

Omregnet til volumstrøm, hydraulisk radius og per meter lengde blir friksjonstapet som følger.

$$h_f = f \frac{Q^2}{8gA^2R_H} \quad (57)$$

Darcy-Weisbach friksjonsfaktor er gitt ved en implisitt formel. For å forkorte beregningstiden benyttes Haalands eksplisitte formel for beregning av friksjonsfaktoren, noe som gir et avvik fra Darcy-Weisbachs på under 2% (9).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\frac{6,9}{\text{Re}_d} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right] \quad (58)$$

Omregnet eksplisitt blir formelen for friksjonsfaktor som følger.

$$f = \frac{1}{\left(-1,8 \log \left[\frac{6,9}{\text{Re}_d} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right] \right)^2} \quad (59)$$

Reynoldstallet er gitt av formel

$$\text{Re}_d = \frac{\rho |V| D_H}{\mu} = \frac{\rho |Q| D_H}{A\mu} \quad (60)$$

I mange de fleste kraftverk av en viss størrelse, og da også inkludert Frøland og Aldal, består vannveien av råsprengte eller borede tunneler. Ruheten, ε , er svært vanskelig å anslå i slike tilfeller da den kan variere kraftig. Ved tradisjonelle tapsberegninger benyttes Manningstall, som er fremkommet på basis av målinger på eksisterende tunneler. Tunneler i vannkraftsystem har gjerne et Manningstall på 33-65, hvor 65 er en svært glatt tunnel med lite friksjon. Et tall på 33 er vanlig å benytte for standard sprengte vannkrafttunneler, mens for borede tunneler kan 65 benyttes. Da modellen i

denne rapporten er basert på Darcy-Weisbachs friksjonsfaktor og ikke Manningstall, beregnes et standard ε/D -forhold basert på et Manningstall.

Volumstrømmen i en kanal basert på Manningstall er gitt av ligning (61), og omregnet til tap per meter lengde er gitt av ligning (62) (9).

$$Q = M \times A \times R_H^{2/3} \times I^{1/2} = M \times A \times R_H^{2/3} \times \left(\frac{h_f}{L} \right)^{1/2} \quad (61)$$

$$h_f = \frac{Q^2}{M^2 A^2 R_H^{4/3}} \quad (62)$$

Hvis Haalands formel innsettes i Darcy-Weisbach formel for friksjonstap og dette settes lik tapshøyden basert på Manningstall, kan et standard ε/D -forhold løses fra ligning (63). Etter litt mellomregning fremkommer ε/D -forholdet etter ligning (64). Dette kan brukes til å beregne en friksjonsfaktor tilsvarende valgt Manningstall etter ligning (59).

$$h_f = \frac{Q^2}{M^2 A^2 R_H^{4/3}} = f \frac{Q^2}{8gA^2 R_H} \quad (63)$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 3,7 \times \sqrt[1,11]{10^{-1,8 \sqrt{\frac{8g}{M^2 \times R_H^{1/3}}}} - \frac{6,9}{\text{Re}}} \quad (64)$$

Denne modellen har sin svakhet når volumstrømmen går mot null. Om dette skjer vil verdien på friksjonsfaktoren gå mot uendelig, noe som selvfølgelig ikke er tilfellet. For å unngå dette kan det settes som krav at i utregningen av friksjonsfaktoren skal det ikke benyttes et Reynoldstall under en gitt verdi.

9.2. Kvasi-stasjonær friksjonsfaktor

Denne modellen skiller seg fra tradisjonell tapsberegning ved at friksjonsfaktoren oppdateres i henhold til Haalands formel for hvert tidssteg etter lokalt Reynoldsnummer. For hvert nytt tidsskritt og steg i x-retning beregnes Reynoldsnummer og følgende også friksjonsfaktoren.

$$\text{Re}_d(t, n) = \frac{\rho |Q'_n| D_H}{A\mu} \quad (65)$$

Ligning (59) gjelder for turbulent strømning, definert ved et Reynoldsnummer over 2300 (9). Reynoldsnummer under dette kriteriet vil opptre når volumstrømmen går mot null, og det må da benyttes en friksjonsfaktor for laminær strømning. Friksjonsfaktor for laminær strømning er gitt etter ligning (66).

$$f = \frac{64}{\text{Re}_d(t, n)} \quad (66)$$

Som ved tradisjonell friksjonsmodell vil også en volumstrøm som nærmer seg null gi en friksjonsfaktor som nærmer seg uendelig. Dette kan løses på samme måte som beskrevet i 9.1.

9.3. Lokal Reynolds balansemodell

Lokal Reynolds balansemodell (LRM) er en én-dimensjonal friksjonsmodell for dynamisk friksjon. Denne modellen baserer seg på å beregne en tapshøyde, i motsetning til mange andre modeller som beregner friksjonsfaktoren. Problemet med at friksjonsfaktoren går mot null når Reynoldsnummeret går mot null unngås derfor delvis. Modellen kan anses som to-delt der den ene delen ser på dynamisk tap, mens den andre medberegner det kvasi-statiske tapet. Det kvasi-statiske tapet beregnes i dette arbeidet ved hjelp av en kvasi-stasjonær friksjonsfaktor som beskrevet i 0, og problemet med volumstrøm nært null er løst på samme måte som i den kvasi-stasjonære modellen.

For implementering i karakteristikkmotoden legges tapsleddet fra LRM-modellen til i ligningene. Det kan vises at dette leddet kommer inn i beregningen av C_P og C_M , se «Vedlegg 1 – Bevis for implementering av LRB-friksjonsmodell».

$$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - gJ_i \quad (67)$$

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} + gJ_i \quad (68)$$

Endringen av J er gitt av ligning (69), hvor J representerer det totale tapet og J_s det kvasi-stasjonære. K og Θ er konstanter som må finnes ved kalibrering. Endringen av tapet er en funksjon av tapet ved neste tidsskritt, men hvis tidsskrittet er lite nok kan det antas at feilen ved å benytte verdien for det gamle tidsskrittet er neglisjerbar. Dette fordi det

største bidraget til dynamisk tap vil være akselerasjonen av vannmassene, uttrykt ved det første leddet på høyre side. Omskrevet for karakteristikkmethode og basert på volumstrøm fremkommer det totale tapet ved det nye tidssteget som vist i ligning (70) (10).

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{K}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - J + J_s \right) \quad (69)$$

$$J^t = J^{t-1} + \frac{dJ}{dt} \Delta t = J^{t-1} + \frac{1}{\Theta} \left(\frac{K}{Ag} (Q^t - Q^{t-1}) - J^{t-1} + J_s^t \right) \Delta t \quad (70)$$

Det kvasi-stasjonære tapet fremkommer ved en sammenligning mellom gj-leddet i ligning (68) og (63), og er gitt ved ligning (71).

$$J_s = f_s \frac{Q^2 \Delta x}{8g^2 A^2 R_H} \quad (71)$$

Da det kvasi-stasjonære tapet er tatt med her må friksjonsleddet R i karakteristikkmethode settes lik null.

10. Detaljert beskrivelse av vannvei og turbin

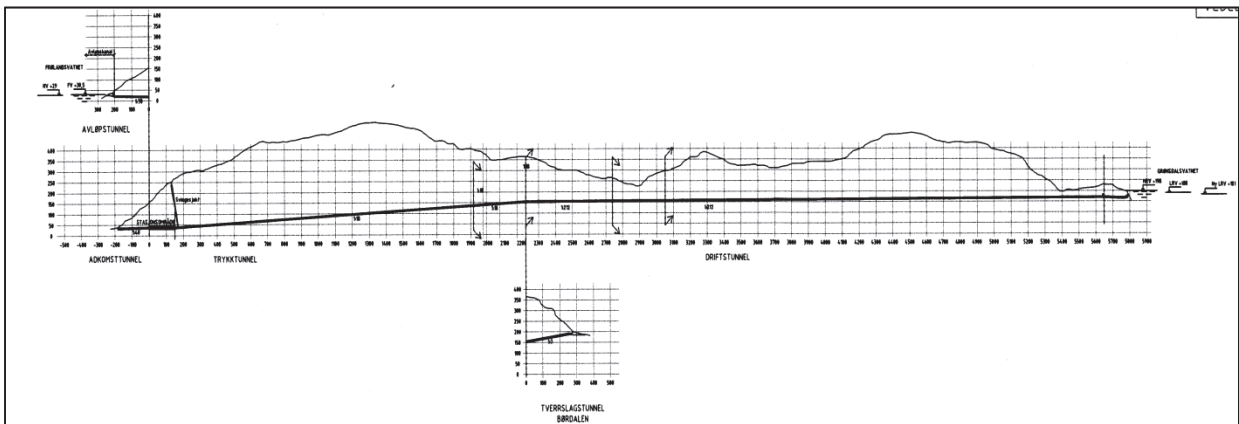
Felles for begge kraftverk er inntaket i Grønsdalsvatnet, som får nye regulerte vannstandsgrenser. Laveste og høyeste regulerte vannstand blir henholdsvis 188 og 198,1 meter.

10.1. Nytt Frøland kraftverk

10.1.1. Vannvei

Detaljert beskrivelse av foreslått vannvei er gitt i kravspesifikasjon fra BKK (3), og for enkelhets skyld er et sammendrag gitt her. Se «Vedlegg 2 – Underlag fra BKK» og «Vedlegg 3 – Tunnel- og kartunderlag» for nærmere detaljer.

Nye Frøland kraftverk plasseres i fjellet bak eksisterende Frøland kraftverk, og vil benytte fallet på 169 meter mellom Grønsdalsvatnet og Frølandsvatnet.



Figur 8 - Lengdeprofil Nye Frøland Kraftverk

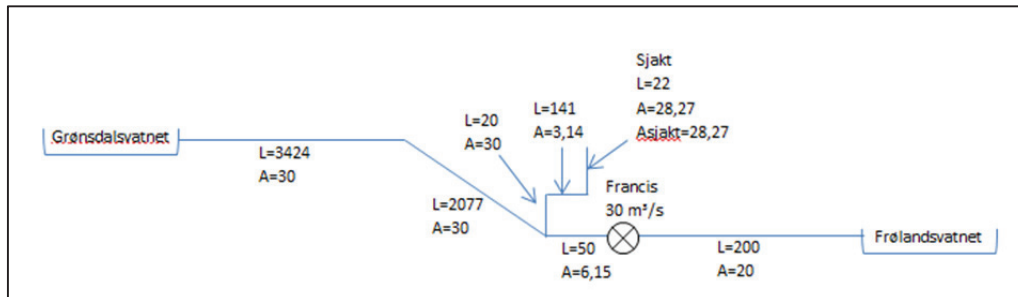
Driftstunnelen vil starte i Grønsdalsvatnet på ca. kote 180, og fortsette med en helning på 1:210 i en lengde på 2550 meter til tverrslaget, hvor en ca. 2000 meter lang trykktunnel fortsetter med en helning på 1:18 ned til kraftverket. De siste 50-70 meterne vil være stålføret for å minimere lekkasjevann til fjellhall og for å oppnå nødvendig fjelloverdekning. De siste 50 meterne til turbin antas å være sirkulære stålrør med diameter på ca. 2,8 meter (11). Fra kraftverket ledes vannet ut via en 200 meter lang avløpstunnel med utslag øst for Fv134. Videre føres vannet gjennom en 40 meter lang avløpskanal ut i Frølandsvatnet. Utløp er planlagt på kote 27,5, som tilsvarer tre meter under nedre vannstand i Frølandsvatnet.

Alle tunneler i tilføringsveien bygges med tradisjonelt tunneltverrsnitt. Se

Tabell 3 og Figur 9 for tunneldata.

Tabell 3 - Tunneldata Nye Frøland Kraftverk

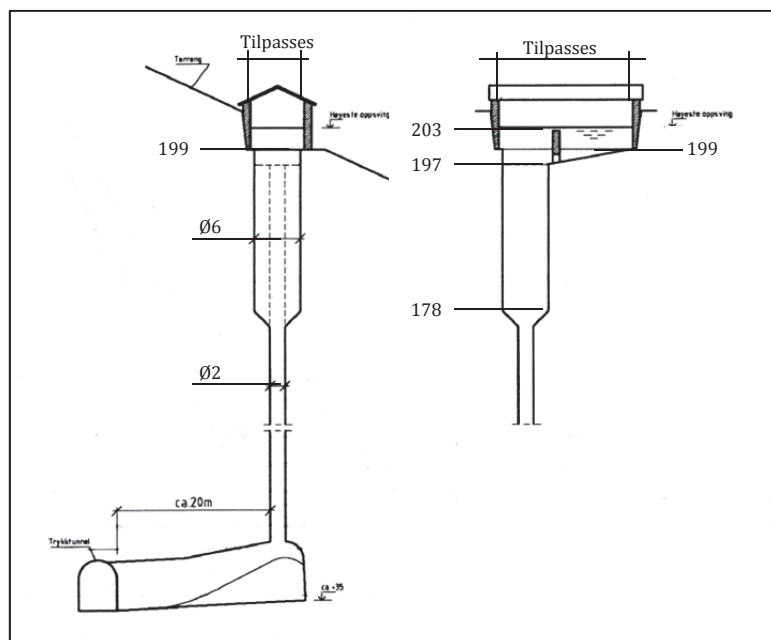
Tunneltype	Areal	Bredde	Høyde	Hydraulisk diameter/radius
Drift/trykktunnel	30 m ²	5 m	6,5 m	5,84 m / 1,46 m
Rør til turbin	6,16 m ²	-	-	2,8 m / 0,7 m
Avløpstunnel	20 m ²	4 m	5,5 m	4,72 m / 1,18 m



Figur 9 - Lengder, Nye Frøland

En sedimenttransport på 20-40 l/m² er antatt, og for å stoppe denne utvides tunnelverrsnittet nær tverrslaget slik at en vannhastighet på 0,4-0,5 m/s oppnås.

Svingesjakt med svingebasseng er foreslått bygd i nærhet til kraftstasjonen i trykktunnelen. Prinsippskisse for svingekammer er vist i Figur 10. Dimensjoner bestemmes endelig på bakgrunn av en optimalisering av svingemassene og simulert opp- og nedsving, og ønsket øvre svingegrense er på ca. kote 202 meter.



Figur 10 - Prinsippskisse svingekammer Nye Frøland Kraftverk

10.1.2. Turbin og generator

Kraftverket dimensjoneres for en slukeevne på 30 m³/s, og en fallhøyde på 168 meter. Se

Tabell 4 for sammendrag av kraftverkdata. Aggregatet er antatt til å få en effekt på 52MVA med en rotasjonshastighet på 375 rpm. Vekt på rotor antas 116 t, og aggregatets treghetsmoment på 183 tm² (11). Turbinens dykking er beregnet til 3,49 meter, basert på turbinens antatte hoveddimensjoner. Se «Vedlegg 4 – Beregning av turbinens hoveddimensjoner» for denne. For enkelthets skyld og for å ha en viss sikkerhetsmargin mot brudd i vannstreng simuleres det med en dykking på 10 meter.

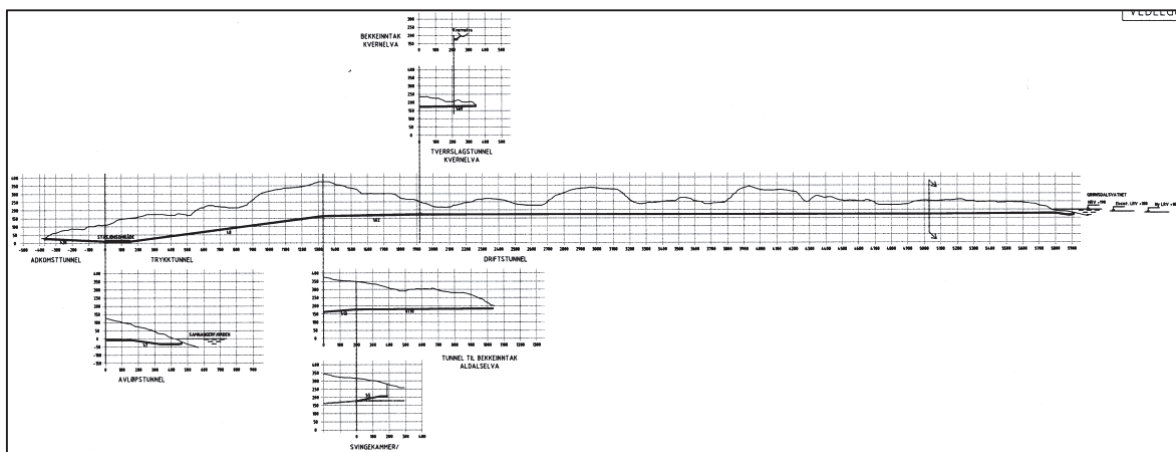
Tabell 4 - Kraftverksdata Nye Frøland Kraftverk

Slukeevne	30 m ³ /s
Volumstrøm, bestpunkt ¹	27 m ³ /s
Største fallhøyde	168,1 m
Laveste fallhøyde	158 m
Fallhøyde, bestpunkt	168 m
Installert effekt	38 MW
Treghetsmoment, aggregat	183 tm ²
Rotasjonshastighet, aggregat	375 rpm
Ta-generator	5,95 s
Turbinens dykking	10 m

10.2. Aldal kraftverk

10.2.1. Vannvei

Detaljert beskrivelse av foreslått vannvei er gitt i kravspesifikasjon fra BKK (3), og for enkelthets skyld er et sammendrag gitt her. Se «Vedlegg 2 – Underlag fra BKK» og «Vedlegg 3 – Tunnel- og kartunderlag» for nærmere detaljer.



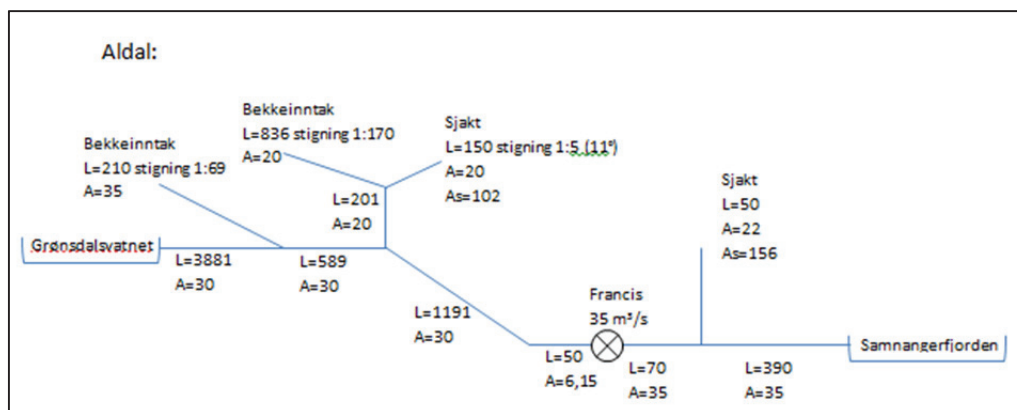
Figur 11 - Lengdeprofil Aldal Kraftverk

¹ Bestpunkt antatt til høyeste fallhøyde og volumstrøm på 90% av slukeevne

Kraftstasjonen plasseres i fjell ved Aldal, og vil benytte seg av et fall på 198 meter mellom Grøndalsvatnet og utløpet i Samnangerfjorden. Inntaket er det samme som ved Nye Frøland Kraftverk. Fra inntaket er det en 4470 meter lang driftstunnel med helning på 1:150, før en trykktunnel fører vannet til kraftstasjonen gjennom en 1191 meter lang trykktunnel med helning på 1:8, hvorav de siste 50-70 meterne vil være stålføret etter samme argumentasjon som for Nye Frøland. De siste 50 meterne til turbin antas å være sirkulære stålrør med diameter på ca. 2,8 meter (11). Fra kraftstasjonen vil vannet ledes ut i Samnangerfjorden gjennom en 460 meter lang avløpstunnel. I tillegg til dette vil to et bekkeinntak tilføre vann fra Aldalselva og Kvernelva. Bekkeinntaket fra Aldalselva er en 836 meter lang tunnel og har sin sammenføring med vannstrengen i overgang mellom driftstunnel og trykktunnel. Bekkeinntaket fra Kvernelva er en 210 meter lang tunnel plassert i et tverrslag med sammenføring med vannstrengen 589 meter ovenfor trykktunnelen. Alle tunneler i tilføringsveien bygges med tradisjonelt tunneltverrsnitt. Se Tabell 5 og Figur 13 for tunneldata.

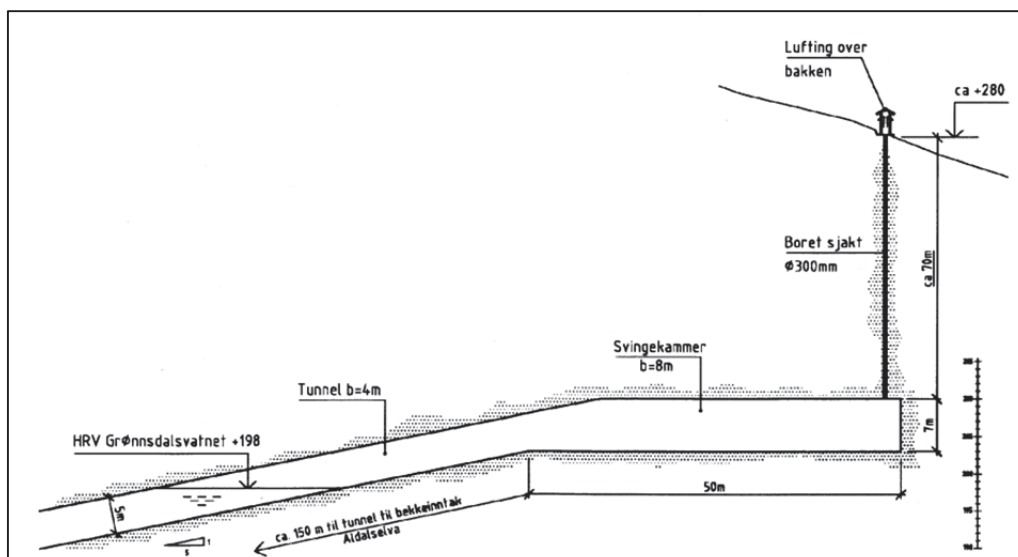
Tabell 5 - Tunneldata Aldal Kraftverk

Tunneltype	Areal	Bredde	Høyde	Hydraulisk diameter/radius
Drift/trykktunnel	30 m ²	5 m	6,5 m	5,84 m / 1,46 m
Rør til turbin	6,16 m ²	-	-	2,8 m / 0,7 m
Avløpstunnel	35 m ²	5,5 m	6,8 m	6,24 m / 1,56 m
Bekkeinntak, Aldalselva	20 m ²	4 m	5,5 m	4,72 m / 1,18 m
Bekkeinntak, Kvernelva	35 m ²	5,5 m	6,8 m	6,24 m / 1,56 m
Adkomsttunnel, avløp	22 m ²	4,2 m	5,7 m	5,36 m / 1,34 m



Figur 12 - Lengder Aldal

I avgreiningen til bekkeinntaket er det foreslått plassert et svingekammer. Se for prinsippskisse av svingekammer. Adkomsttunnelen til avløpet vil fungere som svingekammer i undervannet. Denne tunnelen har en stigning på 1:7, noe som gir et vannspeilareal på ca. 156 m². Se «Vedlegg 5 – Skisse av kraftstasjon» for tegning av dette.



Figur 13 - Prinsippskisse svingekammer Aldal Kraftverk

10.2.2. Turbin og generator

Kraftverket dimensjoneres for en slukeevne på 35 m³/s, og en fallhøyde på 168 meter. Se Tabell 6 for sammendrag av kraftverksdata. Aggregatet antas å produsere en effekt på 71MVA ved en rotasjonshastighet på 375 rpm. Vekt på rotor er 133t, med et totalt treghetsmoment på aggregat på 263 tm². Turbinens nødvendige dykking er beregnet til 5,28 meter, basert på antatte hoveddimensjoner på turbin. For enkelhets skyld og for å ha en viss sikkerhetsmargin mot brudd på vannstreng antas dykking på 10 meter. Se «Vedlegg 4 – Beregning av turbinens hoveddimensjoner» for beregning.

Tabell 6 - Kraftverksdata Aldal Kraftverk

Slukeevne	35 m ³ /s
Volumstrøm, bestpunkt ²	31,5 m ³ /s
Største fallhøyde	198,1 m
Laveste fallhøyde	188 m
Fallhøyde, bestpunkt	198 m
Installert effekt	61 MW
Treghetsmoment aggregat	263 tm ²
Rotasjonshastighet, aggregat	375 rpm
Ta-generator	6,22 s
Turbinens dykking	10 m

² Bestpunkt antatt til høyeste fallhøyde og volumstrøm på 90% av slukeevne

11. Simuleringsprogrammer

I dette arbeidet er det utviklet to simuleringsprogram for dynamisk oppførsel under av- og påslag. Programmene er begge skrevet i språket C, og kompilert med Minimalist GNU for Windows (MinGW). Dette er en åpen kildekode-kompilator basert på MS Windows for språkene C, C++, ADA og Fortran. Kompilatoren baserer seg på kommandovindu, og har ikke et grafisk grensesnitt.

Språket C har få funksjoner for grafisk fremstilling av resultater og begge simuleringsprogrammene kaller derfor et eget grafisk program kalt GNUplot for plotting av resultatene. I tillegg til lagres resultatene i en tekstfil. Begge programmene krever at GNUplot er installert for å vise resultater grafisk, mens resultatfiler skrives uavhengig av dette.

11.1. Uelastisk simulering av opp- og nedsving i sjakter

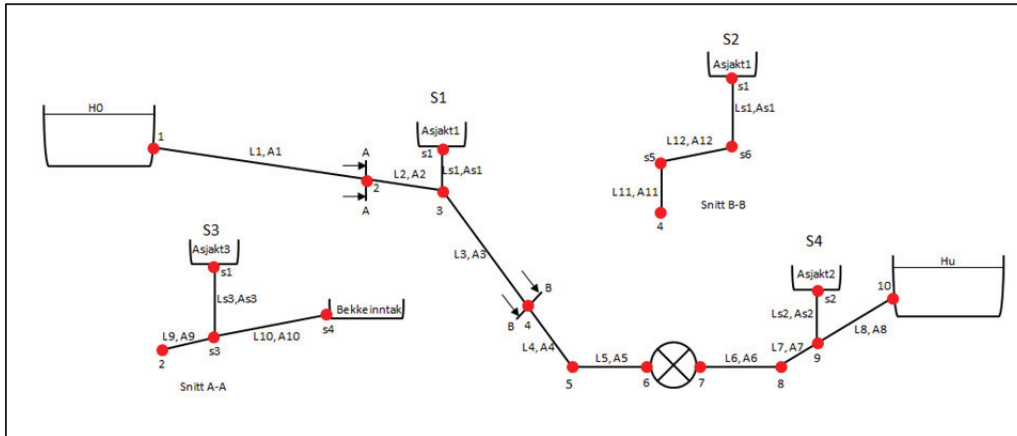
For et sammenligningsgrunnlag og som en kontroll av den uelastiske beregningen er det utviklet et program som løser de uelastiske differensialligningene ved hjelp av Eulers metode, som beskrevet i 8.3. Programmet «svingeulerManning» tar inn kraftverkkdata ved hjelp av en inputfil skrevet i en hvilken som helst teksteditor, og både plotter resultater og lagrer i en tekstfil. Programmet antar konstant friksjon, basert på et Manningstall på 33. Avslag simuleres ved at åpningsgraden for ventilen oppdateres i hvert tidssteg ved hjelp av en egen funksjon. Åpning og lukking i mest ugunstige fase kan også simuleres ved å redigere denne funksjonen.

11.2. Elastisk simulering

For elastisk simulering er det utviklet et program for beregning av både trykkstøt og opp/nedsving i svingesjakter. Det er tilstrebet at programmet er så generelt som mulig for å muliggjøre simuleringer for andre kraftverk enn de som behandles i denne rapporten. Figur 14 definerer tunnelnavn og koordinater programmet opererer med.

Kildekoden består av tre filer, hvorav den ene definerer funksjonen for åpningsgrad, den andre tar inn inputdata og behandler disse, og den tredje består av hoveddelen som gjør beregningene og plotter resultatene. Se vedlagt CD for kildekode.

Avslag sørges for av en funksjon som beregner åpningsgraden på turbinen ved et gitt tidspunkt. Tre forskjellige scenarioer er mulig å simulere for lukningsgraden. Dette styres gjennom inputfilene, og det kan velges mellom å enten simulere avslag fra drift, pådrag fra stillstand eller pådrag med etterfølgende avslag. Tidspunkt for pådrag og avslag må defineres.



Figur 14 - Definisjon av kraftverkgeometrier og konfigurasjoner

Programmet tar inn informasjon om kraftverket i fire inputfiler; geometriske data, hydrauliske data, tunnallengder og en fil for parametere som slår av og på diverse funksjoner i programmet. Se vedlagt CD for inputfiler for Aldal og Nye Frøland Kraftverk, hvor parameterne også er definert.

11.2.1. Turbin

Turbinen er simulert som en ventil som forklart i avsnitt 8.2.3. Nominelt trykkfall over ventil beregnes etter gitt kotehøyde på overvann og undervann, og medregner tapet i tunneler. Dette er gjort for at startbetingelsene for systemet skal være eksakt gitt, og transienter som følge av feil i startbetingelser ikke skal innvirke på resultatet. Merk at likevel kan feil i volumstrøm inntreffe, og det må kontrolleres at likevektstilstand er inntruffet før avslag finner sted.

11.2.2. Svingesjakter

Det er muligheter for å simulere kraftverk med én svingesjakt plassert vilkårlig oppstrøms turbin, så vel som svingesjakt i undervannet. Det er i tillegg mulig å plassere svingesjakt i bekkeinntak i driftstunnel. Alle mulige konfigurasjoner er tegnet inn i Figur 14. Merk at selv om tre svingesjakter er tegnet inn i overvannet er det kun en som kan slås på om gangen. Svingesjakt i bekkeinntak kan også defineres som en ren svingesjakt i driftstunnel.

Det er lagt inn tre typer svingesjakter, hvorav to er tilpasset Aldal og Nye Frøland Kraftverk. Den siste typen er en vanlig svingesjakt med konstant areal.

11.2.3. Valg av tapsmodell

I den hydrauliske inputfilen velges hvilken tapsmodell programmet skal beregne med, og det er mulighet for beregning etter tradisjonell tapsberegning, kvasi-likevektsberegning og LBR-modell. Se kapittel 0 for beskrivelse av de forskjellige friksjonsmodellene.

11.2.4. *Plotting og lagring av resultater*

Programmet plotter automatisk nivået i svingesjakter som funksjon av tid, i tillegg til trykk oppstrøms og nedstrøms turbin, i tillegg til å lagre dette både som bildefiler og tallverdier i tekstdokumenter. For plotting og lagring av bildefilene kreves det at GNUplot er installert i banen C:\\Gnuplot. Lagring av talldata gjøres uavhengig av dette.

11.2.5. *Definisjon av tunneler*

Programmet krever at tunnelers lengde, areal og hydraulisk radius er spesifisert. Hydraulisk radius er definert som vist i ligning (72), hvor A er tunnelens tverrsnittsareal og P er lengden på periferien.

$$R_H = \frac{A}{P} \quad (72)$$

Om en tunnel defineres med lengde lik null settes automatisk lengden lik dx. I tillegg forandres alle tunnellengder marginalt, slik at forholdet L/dx er et heltall. Dette gjøres av hensyn til numerikken i karakteristikkmetoden. Vannføring i alle hovedtunneler settes til samme verdi, definert i inputfilene. Unntaket til dette er alle sjakttunneler hvor initiell volumstrøm automatisk settes lik null, og bekkeinntak hvor initiell volumstrøm defineres i inputfil.

11.2.6. *Kjøring av programmet*

Programmet kan kjøres ved å dobbeltklikke på programikonet, så lenge inputfilene er oppdatert. Om det må gjøres forandringer i kildekoden må programmet kompiles på nytt, noe som anbefales gjort ved bruk av MinGW for Windows. Dette gjøres ved å skrive følgende kommandoer i konsollvinduet;

- cd C:\\«Filplassering av prosjektmappe»
- gcc Kstilling.c KMinput.c KMmain.c -o Navn
- Navn

Øverste kommando endrer filbanen til hvor programmet er lagret. Den neste linjen gir kommando om hvilke kildekodefiler som skal kompiles og setter navnet til Navn, før siste linje kjører programmet.

11.3. **Simulering av reguleringsstabilitet**

Reguleringsstabilitet simuleres med programvare i MatLab, utviklet av stud.tech Simen Vogt-Svendsen (12). Programmet tar input direkte i kildekoden, og kraftverk legges inn som «caser». Aldal og Nye Frøland Kraftverk er lagt inn med sine respektive lengder og tverrsnitt, og av input kreves bare reguleringsparametre. Programmet er basert på strukturmatrise-metoden, og er designet for å implementere Hermod Brekkes friksjonsmodell (12). For resultatene i denne rapport er imidlertid en vanlig Brown-friksjonsmodell benyttet, noe som gir et noe konservativt resultat.

12. Resultater og diskusjon

12.1. Nye Frøland Kraftverk

12.1.1. Dynamiske overslagsberegninger

Overslagsberegninger er utført med tanke på verst tenkelige tilfelle. I beregninger av Thoma-tverrsnitt i svingesjakt er lav fallhøyde det verste tilfellet, og er derfor benyttet i disse beregningene. For øvrige beregninger er det benyttet høyeste fallhøyde. For alle beregninger er det kalkulert med maksimal volumstrøm. Det er beregnet for en lukketid på 7, 8 og 9 sekunder. Mest ugunstige fase etter pådrag er estimert til 80 sekunder etter pådraget.

Resultatene fra overslagsberegningene for Nye Frøland Kraftverk er vist i Tabell 7, og beregningene vist i «Vedlegg 6 – Overslagsberegninger».

Tabell 7 - Resultater av overslagsberegninger – Nye Frøland Kraftverk

	<i>Tl = 7/8/9 sekunder</i>
Opp/Nedsving i sjakt	27,3 m
Svingeperiode	162 sek
Trykkøkning foran turbinen	47,6 m / 41,6 m / 37 m
Thoma-kriterie, sjakt	17,94 m ²
Anbefalt minsteareal, sjakt ³	>26,91 m ²
Ta/Tw-forhold	4,76

Det kan nevnes at utslag i svingesjakt er noe høyt tatt i betraktning foreslått prinsippskisse for svingesjakt, og at trykkøkning foran turbinen er for høyt etter dimensjoneringskriteriene. T_a/T_w -forholdet er under kravet på 6.

12.1.2. Opprinnelig geometri

Elastisk simulering av svingekammer

Hvor annet ikke er spesifisert er det benyttet en friksjonsmodell basert på kvasi-likevekt, med et ε/D -forhold basert på et Manningstall på 33. Svingeforløp i sjakter er gjengitt her er for en lukketid på syv sekunder. Svingninger har vist seg uavhengig av lukketiden, men simuleringer er utført for også 8 og 9 sekunder, samt for avslag og pådrag alene. Se «Vedlegg 7 – Simuleringsresultater Nye Frøland» for utvalgte resultater. Alle resultater kan ses på vedlagt CD. Ekstremalverdier er indikert med uthevet skrift.

Simuleringer er utført på svingekammer i henhold til prinsippskissen i Figur 10. En lengde på 55 meter og en bredde på 8 meter på svingebasseng er funnet til å sikre at overflom ikke inntreffer. Med de dimensjoner vil største oppsving bli på ca. kote 203 meter, tilsvarende øvre svingegrense. Største nedsving vil opptre ved pådrag med etterfølgende avslag, og bli på ca. 149 meter. Dette er 27 meter under nedre

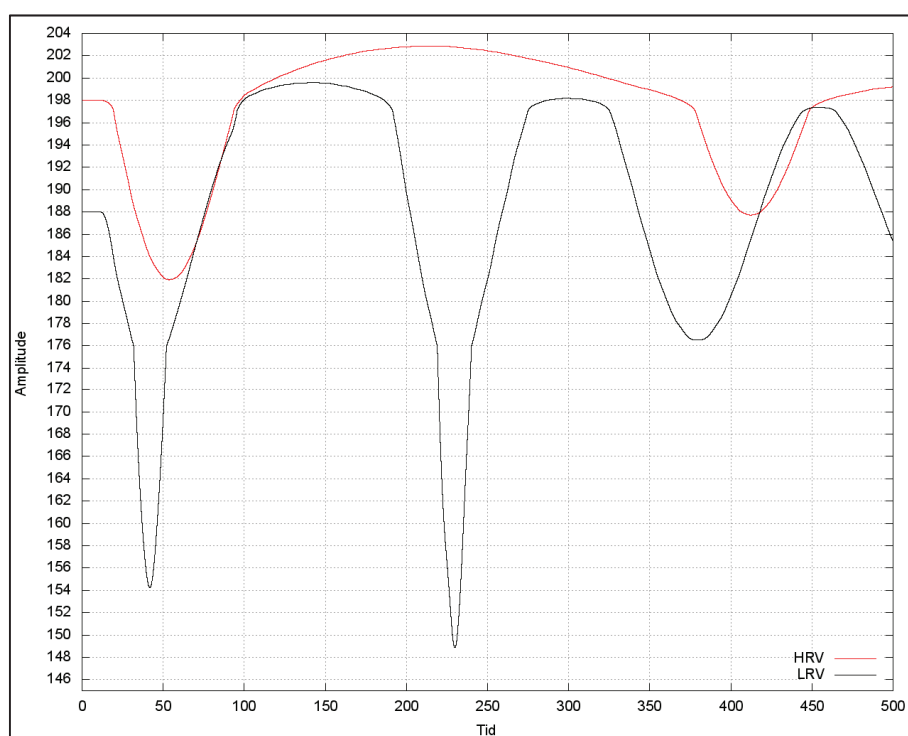
³ Anbefalt minsteareal i sjakt er Thoma-kriterie pluss 50% sikkerhetsmargin

svingegrense på kote 176, men dette vil ikke føre til luftinnsug i driftstunnelen. Det er likevel tydelig at svingesjakt ikke er optimalt dimensjonert, da overbygget over kammeret er urimelig stort, og nedsvinget får svært stor amplitude.

Tabell 8 - Simuleringsresultater slukeevne Nye Frøland, opprinnelig geometri, Tl=7s

Scenario	Øvre vannstand	Nedre vannstand
1: Pådrag m/avslag i ugunstig fase HRV	202,9 m	182 m
2: Pådrag m/avslag i ugunstig fase LRV	199,6	149 m

Tidsforløp for scenario 1 og 2 er gitt i Figur 15.



Figur 15 - Sjaktsvingninger HRV og LRV, opprinnelig geometri, Nye Frøland

Elastisk simulering av retardasjonstrykk

Retardasjonstrykk er simulert for både volumstrøm lik slukeevne og designpunkt, både for høyeste og nederste regulerte vannstand. Bare slukeevne er gjengitt her, da det er dette kraftverket må dimensjoneres mot. Resultater for designpunkt er å finne på vedlagt CD.

Retardasjonstrykk og trykkfall bak turbin for både volumstrøm lik slukeevne og antatt designpunkt på 27 m³/s er utført. Resultatene for slukeevne kan finnes i

Tabell 9, mens resultatene for designpunkt finnes på vedlagt CD. Det kan nevnes at den prosentmessige trykkøkningen foran turbinen er ganske høy og i grenseland for hva som kan aksepteres. Basert på denne geometrien oppnås ikke et akseptabelt trykkstøt for lukketid under 9 sekunder, og det bør vurderes om en enda lengre lukketid kan

velges. Ved å øke lukketiden til 10 sekunder reduseres den største prosentmessige trykkøkning til 19 % for designpunkt og 21,8 % for slukeevne. Utvalgte resultater kan ses i «Vedlegg 7 – Simuleringsresultater Nye Frøland», mens alle resultater kan ses på vedlagt CD.

Tabell 9 - Resultater fra avslagssimulering Nye Frøland, volumstrøm lik slukeevne

	$Tl = 7s$	$Tl = 8s$	$Tl = 9s$
Trykk foran turbin, HRV	225 m	219 m	215 m
Trykkstigning foran turbin, HRV	48,4 m	41,4 m	38,4 m
Prosentmessig trykkstigning relativ statisk trykk, HRV	27,3 %	23,4 %	21,7 %
Trykkstigning foran turbin, LRV	48,6 m	42,3 m	38,4 m
Prosentmessig trykkstigning relativ fallhøyde, LRV	29,1 %	25,3 %	23 %
Trykkfall bak turbin, HRV	5 m	4,4 m	4 m
Trykkfall bak turbin, LRV	5 m	4,4 m	4 m
Resttrykk bak turbin, HRV	5 m	5,8 m	6,2 m

Reguleringsstabilitet

I analysen av reguleringsstabiliteten for Nye Frøland benyttes turbindata fra Jørundland (13), da turbindata for Frøland ikke eksisterer enda. Unntaket er T_a som er beregnet for Nye Frøland basert på generatorens treghetsmoment. Turbinens treghetsmoment er i dette tilfellet ikke tatt med, noe som bare vil gi en sikkerhetsmargin da dette treghetsmomentet vil virke stabiliserende. Turbinparametere benyttet i analysen er gjengitt i Tabell 10. Som fallhøyde benyttes 158 m, da laveste fallhøyde vil gi det mest ustabile systemet.

Tabell 10 - Turbinparametere, Nye Frøland

Virkningsgrad	0,94
Q_n	-0,55
Q_y	0,9
E_q	0
E_n	0
k_q	1,19
T_a	6,22

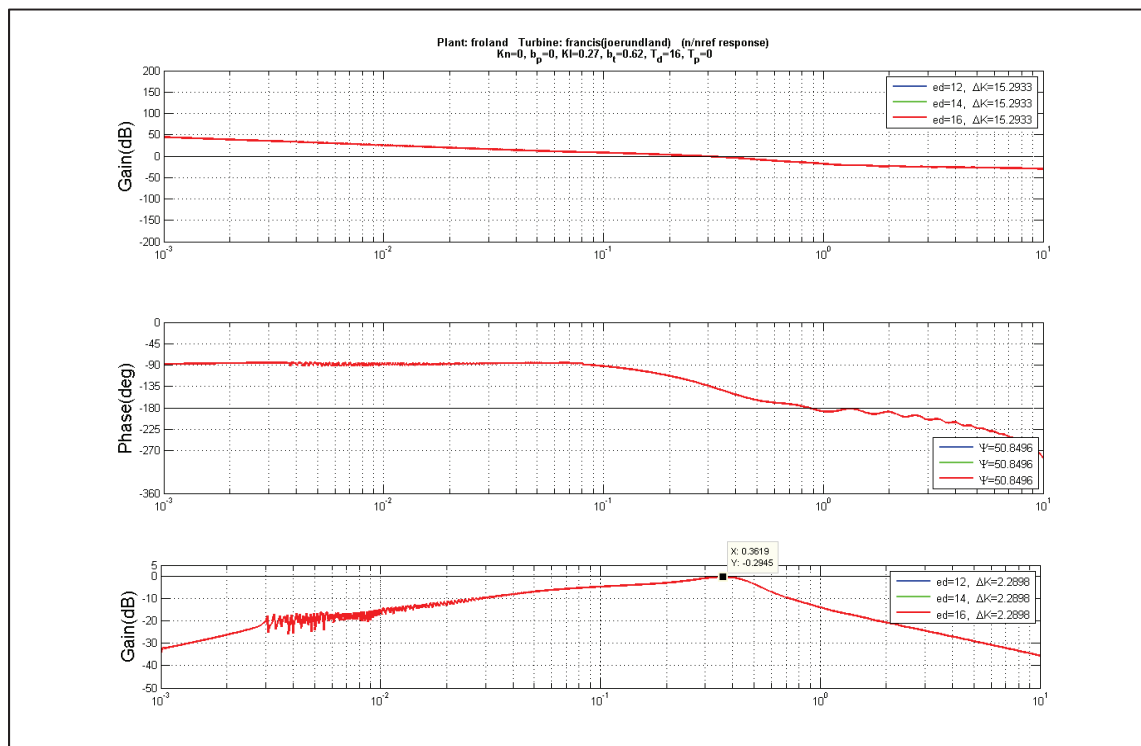
Som regulatorinnstillinger prøves det først med T_d og b_t beregnet fra Steins empiriske formler for PI-regulatorer.

$$T_d = 7,5$$

$$b_t = 0,546$$

Fasemargin og forsterkningsmargin blir da 29,6° og 10,14 dB, mens turtall/last-forholdet får en maksimal verdi på 2,531 dB. Det vil si at systemet ikke kan aksepteres

med disse regulatorparameterne. Ved å bruke $b_t=0,62$ og $T_d=16$ oppnås et stabilt system med fasemargin og kryssfrekvens på henholdsvis $50,8^\circ$ og $15,3$ dB, mens turtall/last-forholdet får en maksimal verdi på $-0,2945$ dB. Bode-diagram og turtall/last-forhold er gitt i Figur 16. Se «Vedlegg 7 – Simuleringsresultater Nye Frøland» for resultater for alle simuleringene.



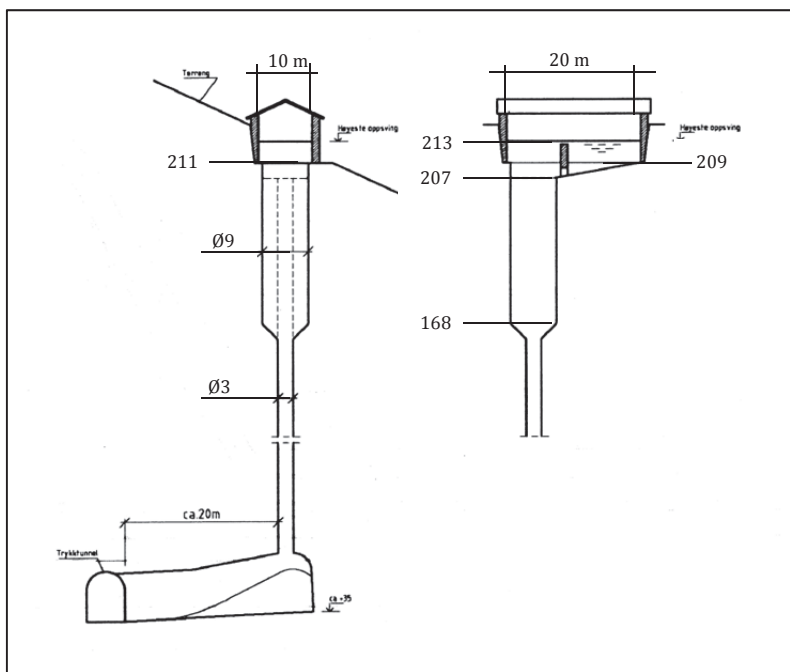
Figur 16 - Bode-diagram og last/turtall-forhold, Nye Frøland, opprinnelig geometri

Med disse parameterne oppnås et marginalt stabilt system med en meget treg regulering. Ved foreslått utvidelse av Ø2-tverrsnittet vil T_w reduseres og stabiliteten forbedres. Dette er undersøkt i 12.1.3.

12.1.3. Foreslått geometri

Elastisk simulering av svingekammer

En utvidelse av tverrsnitt i sjakten fra seks meter til åtte meter reduserer svingeamplitudene, men for å hindre overflom må overbygget dimensjoneres urimelig langt for å ta vare på vannet. I stedet foreslås det å holde husets dimensjoner til 10×20 m, og flytte det lengre opp i terrenget slik at gulvnivå blir på minst kote 211. I tillegg må avstand fra gulvnivå til sålen økes til to meter, og sjakttverrsnitt utvides til Ø9 og forlenges til kote 168 for å unngå nedsving i Ø3-sjakten. Se Figur 17 for dimensjoner på foreslått svingekammer. For å ha en viss sikkerhetsmargin anbefales det at svingekammer dimensjoneres for å kunne ta vare på oppsving noe over det maksimale.



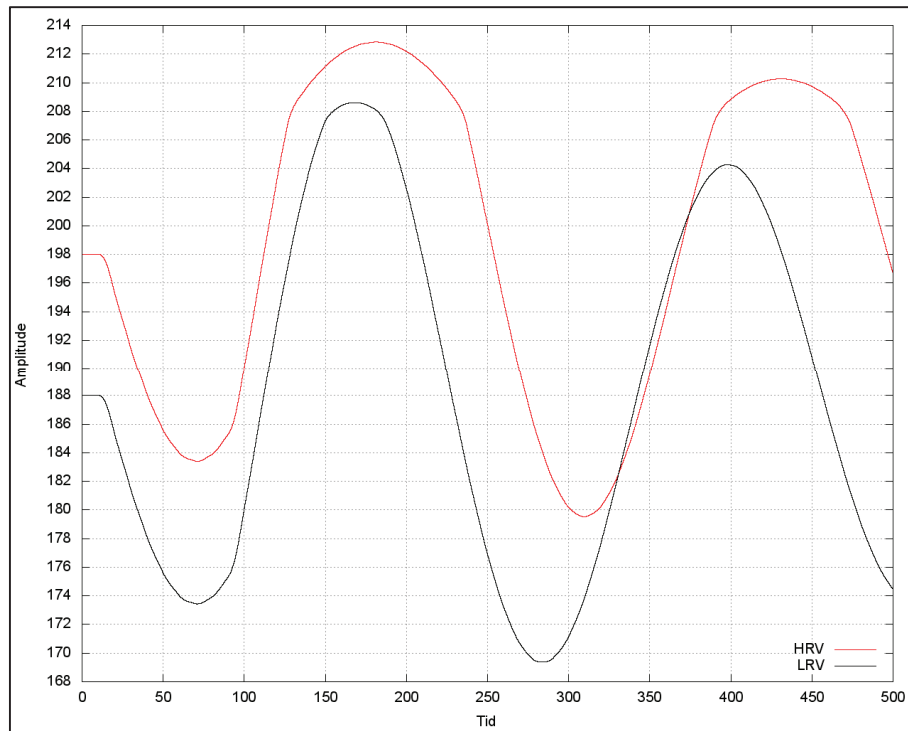
Figur 17 - Foreslått geometri på svingekammer, Nye Frøland

Med foreslått geometri vil største oppsving bli til kote 213 meter, og største nedsving til kote 169,5 meter. Svingekammerets store dimensjoner skyldes i all hovedsak at sjakten er plassert nært turbin. Dette fører til lange tunneler og mye vann som må tas vare på i kammer. Ved å flytte kammeret lenger opp i systemet vil dimensjonene kunne reduseres betraktelig, men trykkstigning som følge av avslag vil øke. I Tabell 17 nedenfor kan resultater for pådrag med etterfølgende avslag ses for en lukketid på 7 sekunder. Simuleringer for andre lukketider, samt for avslag og pådrag alene er utført, og kan ses på vedlagt CD.

Tabell 11 - Simuleringsresultater slukeevne Nye Frøland, ny geometri, Tl=7s

Scenario	Øvre vannstand	Nedre vannstand
1: Pådrag m/avslag i ugunstig fase HRV	213 m	179,5 m
2: Pådrag m/avslag i ugunstig fase LRV	208,5 m	169,5m

Tidsforløp for scenario 1 og 2 kan ses i Figur 18, mens fler resultater kan ses i «Vedlegg 7 – Simuleringsresultater Nye Frøland».



Figur 18 - Sjaktsvingninger HRV og LRV, ny geometri, Nye Frøland

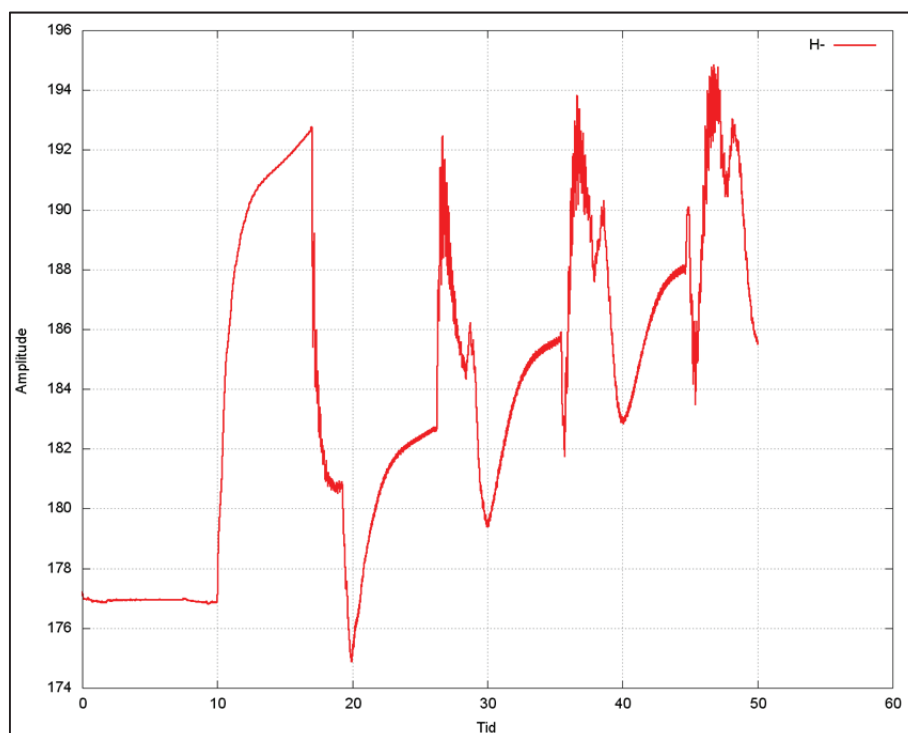
Elastisk simulering av retardasjonstrykk

Høyt trykkstøt forårsakes i hovedsak av lange tunneler eller små tunneltverrsnitt. Ved å utvide Ø2-tverrsnittet i sjakt til Ø3 fås en maksimal trykkøkning til å være 13,2 % for volumstrøm lik slukeevne og lukketid på 9 sekunder. Resultatene for denne simuleringen kan ses i Tabell 12. Dette er noe høye verdier, og kan reduseres ytterligere ved å øke sjakttverrsnittet mer eller ved å velge en lengre lukketid. Dette vil imidlertid redusere økonomisk gevinst. Utvalgte resultater kan ses i «Vedlegg 7 – Simuleringsresultater Nye Frøland», mens alle resultater kan ses på vedlagt CD. Det kan nevnes at trykk over verdier i tabell under forekommer som følge av en kombinasjon av stående svingning etter avslag og oppsving i sjakten, se Figur 19. Dette er ikke tatt med i Tabell 12 da den ikke direkte representerer trykkstøtet, og tabell under er ment som en sammenligning av virkningen av forskjellige lukketider. Den stående svingningen vil i virkeligheten også dempes ut ganske raskt, og dens amplitude ikke bli så høy som resultatene viser. Dette er videre diskutert i 12.3. Total trykkøkning, inkludert den stående svingningen, kan ses i Tabell 13. Disse tallene er svært usikre da ingen demping av den stående svingningen er regnet med.

Tabell 12 - Resultater fra avslagssimulering Nye Frøland, foreslått geometri

	$Tl = 7s$	$Tl = 8s$	$Tl = 9s$
Trykk foran turbin, HRV	193 m	191,5 m	190 m
Trykkstigning foran turbin, HRV	16 m	14,5 m	13 m
Prosentmessig trykkstigning, HRV	9 %	8,2 %	7,3 %

Trykkstigning foran turbin, LRV	24 m	23 m	22 m
Prosentmessig trykkstigning, LRV	14,3 %	13,8 %	13,2 %
Trykkfall bak turbin, HRV	4,7 m	4,2 m	3,7 m
Trykkfall bak turbin, LRV	4,7 m	4,2m	3,7 m
Resttrykk bak turbin, HRV	5,5 m	6 m	6,5 m



Figur 19 - Trykkstøt med stående svingning

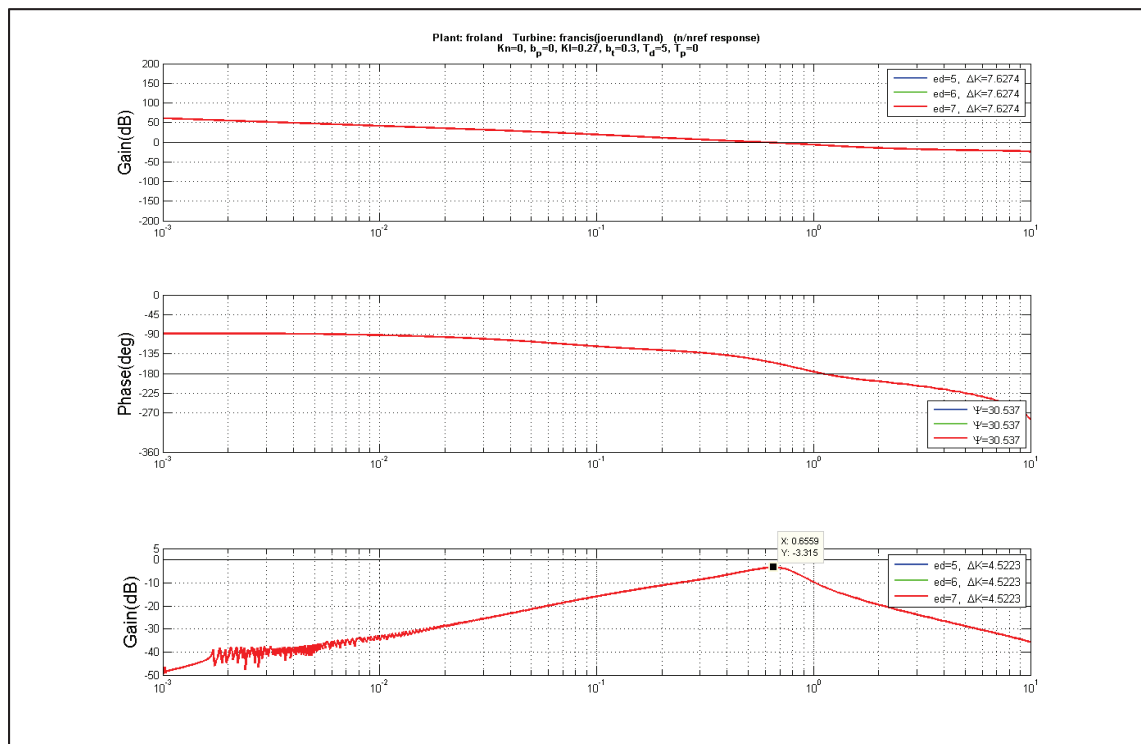
Tabell 13 - Total trykkøkning foran turbin, Nye Frøland, foreslått geometri

	$Tl = 7s$	$Tl = 8s$	$Tl = 9s$
Trykk foran turbin, HRV	194,5 m	194,5 m	195,5 m
Trykkstigning foran turbin, LRV	24 m	24 m	24 m
Prosentmessig trykkstigning, LRV	14,3 %	14,3 %	14,3 %

Reguleringsstabilitet

Som initiale reguleringsparametre prøves det først med de verdier som ga et stabilt system for opprinnelig geometri, $T_d=16$ og $b_t=0,62$. Turtall/last-forholdet en maksimal verdi på -4,71 dB, med en fasemargin på 73,6° og forsterkningsmargin på 17,8 dB. Systemet er godt stabilt, men har en treg regulering. Ved å velge $T_d=5$ og $b_t=0,3$ blir fasemargin og kryssfrekvens henholdsvis 30,5° og 7,6 dB, mens turtall/last-forholdet får en maksimal verdi på -3,315 dB. Bode-diagram og turtall/last-forhold er vist i Figur 20.

Dette er et stabilt system med en rask regulering. Øvrige resultater er vist i «Vedlegg 7 – Simuleringsresultater Nye Frøland».



Figur 20 - Bode-diagram og last/turtall-forhold, Nye Frøland, foreslått geometri

12.2. Aldal Kraftverk

12.2.1. Dynamiske overslagsberegninger

Overslagsberegninger er utført med tanke på verst tenkelige tilfelle. I beregninger av Thoma-tverrsnitt i svingesjakt er lav fallhøyde det verste tilfellet, og er derfor benyttet i disse beregningene. For øvrige beregninger er det benyttet høyeste fallhøyde. For alle beregninger er det kalkulert med maksimal volumstrøm. Det er beregnet for en lukketid på 7 og 8 sekunder. For alle simuleringene er svingekammeret i undervannet simulert som et åpent svingekammer, det vil si med konstant atmosfæretrykk over vannspeil. Dette gjelder hvis det ventileres mot omgivelsesluft eller om luftputen i kammeret er så stor at luftpute-effekten kan neglisjeres. Det sistnevnte antas i dette tilfellet.

Resultatene fra overslagsberegningene for Aldal Kraftverk er vist i

Tabell 14, og utregningene vist i «Vedlegg 8 – Simuleringsresultater Aldal»

Tabell 14 - Resultater av overslagsberegninger – Aldal Kraftverk

	<i>Tl = 7/8/9 sekunder</i>
Opp/Nedsving i øvre sjakt	14,3 m
Svingeperiode øvre sjakt	262 sek
Opp/Nedsving i nedre sjakt	3,64 m
Svingeperiode nedre sjakt	102,02 sek
Trykkøkning foran turbinen	66,5 m / 58,2 m / 51,7 m
Minste tverrsnittsareal, sjakt	16,04 m ²
Anbefalt minsteareal, sjakt	>24,06 m ²
Ta/Tw-forhold	3,66

Utslag i svingesjakt ligger innenfor akseptable grenser tatt i betraktning foreslått svingesjakt. Trykkøkning foran turbinen ved avslag ligger godt over det som kan anses som akseptabelt (14). T_a/T_w -forholdet er godt under kravet på 6, og i utgangspunktet altfor lavt.

12.2.2. Opprinnelig geometri

Elastisk simulering av svingekammer

Svingeforløp i sjakter er gjengitt her er for en lukketid på syv sekunder, men simuleringer for ni og ti sekunder er også utført i tillegg til kun avslag og pådrag. Se «Vedlegg 8 – Simuleringsresultater Aldal» for resultater. Ekstremalverdier er indikert med uthevet skrift, og simuleringene er gjort for samme scenarier som for Frøland.

Resultatene for geometrien foreslått av BKK og lukketid på syv sekunder er vist i

Tabell 15. Disse resultatene forutsetter at bekkeinntak fra Kvernelva kan ses bort fra i de dynamiske beregningene. Dette er tilfelle om bekkeinntaket er langt eller en enveis ventil er installert. I dette tilfellet er inntaket bare ca. 200 meter, og ved avslag vil retarderingen styre vannmasser opp i bekkeinntak. Denne simuleringen forutsetter altså en anordning som bare slipper vann gjennom i positiv strømningsretning.

Det kan merkes at maksimale vannstand er ved kotehøyde 207,8 meter og oppstår ved pådrag fra stillstand med påfølgende avslag for HRV. Dette tilsvarer en meter under tunneltak i svingekammeret. Den laveste vannstanden er ved kotehøyde 173 meter, og opptrer ved pådrag under drift med LRV. Knutepunkt mellom bekkeinntak og svingesjakt er på ca. kote 174 meter, og nedsvinget vil føre til luftinnsug og frispeilstrømning i bekkeinntak. Nedsvinget når imidlertid ikke driftstunnelen, men nedsvinget vil føre til økt sedimenttransport. Et slikt nedsving er uønsket og svingekammeret er underdimensjonert for pådrag med medfølgende avslag ved laveste regulerte vannstand. Merk at dette er det eneste scenarioet som fører til dette, og ved de øvrige scenarioene når aldri nedsvinget lavere enn kote 176 meter.

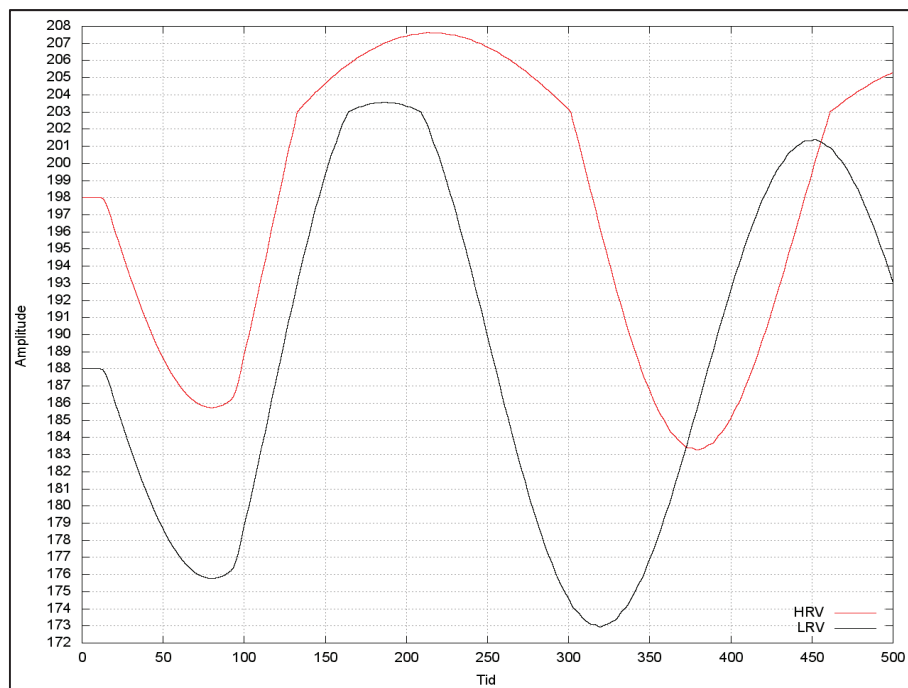
Tabell 15 - Simuleringsresultater Q=35, Tl=7s, opprinnelig geometri øvre svingekammer

Scenario	Øvre vannstand	Nedre vannstand
1: Pådrag m/avslag i ugunstig fase HRV	207,8 m	183,5 m
2: Pådrag m/avslag i ugunstig fase LRV	203,5 m	173 m

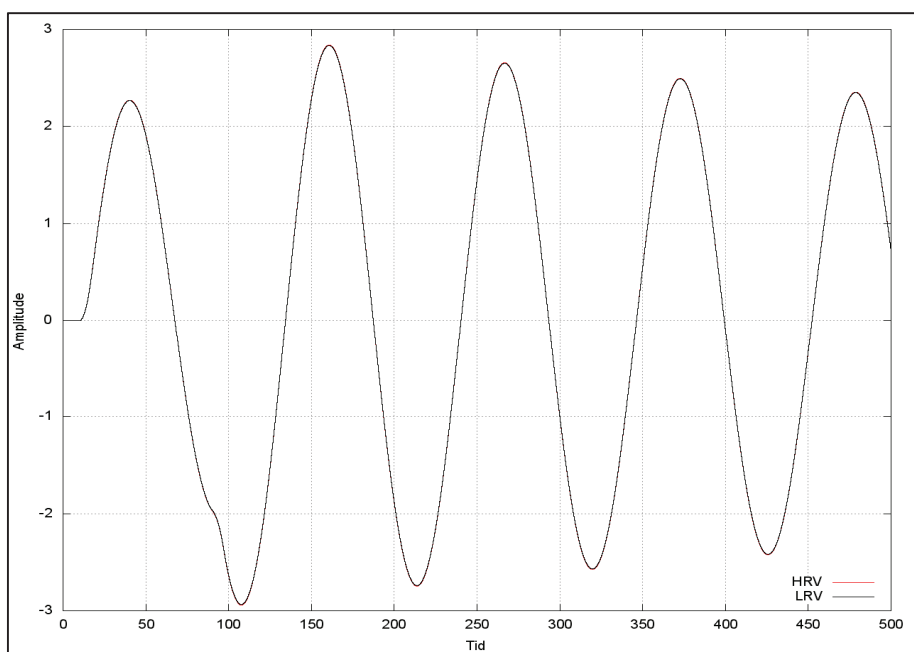
Tabell 16 - Simuleringsresultater Q=35, Tl=7s, opprinnelig geometri nedre svingekammer

Scenario	Øvre vannstand	Nedre vannstand
1: Pådrag m/avslag i ugunstig fase HRV	2,8 m	-2,9m
2: Pådrag m/avslag i ugunstig fase LRV	2,8 m	-2,9 m

Tidsforløp i øvre svingekammer for scenario 1 og 2 for Tl=7s er vist i Figur 21. Tilsvarende for HRV for nedre svingekammer er vist i Figur 22.



Figur 21 - Pådrag + avslag for HRV og LRV, opprinnelig geometri, øvre svingekammer



Figur 22 – Pådrag+ avslag for HRV, opprinnelig geometri, nedre svingekammer

Disse resultatene forutsetter at bekkeinntaket til Kvernelva kan ses bort fra. Dette er imidlertid ikke tilfelle, og ved et avslag vil bekkeinntaket ta av for den lengste tunnelen i systemet. Med andre ord vil de største svingningene opptre i bekkeinntaket. Det kan vurderes om dette tillates om bekkeinntaket har et inntaksbasseng med relativt stort areal som kan ta opp disse svingemassene uten for store utslag. Imidlertid anbefales det enten å flytte svingesjakt opp før første bekkeinntak, eller innføre en ekstra svingesjakt i bekkeinntak. Det første av disse alternativene er vurdert i 12.2.3.

Elastisk simulering av retardasjonstrykk

Den elastiske simuleringen for lukketider på syv, åtte og ni sekunder for volumstrøm lik slukeevne kan ses i Tabell 17, i tillegg til «Vedlegg 8 – Simuleringsresultater Aldal» som inkluderer utvalgte tidsforløp. Alle resultater kan ses på vedlagt CD.

Tabell 17 - Resultater fra avslagssimulering Aldal Kraftverk, volumstrøm lik slukeevne

	$Tl = 7s$	$Tl = 8s$	$Tl = 9s$
Trykk foran turbin, HRV	249 m	242,5 m	238,5 m
Trykkstigning foran turbin, HRV	49 m	42,5m	38,5 m
Prosentmessig trykkstigning, relativt statisk trykk	24,5 %	21,3 %	19,25 %
Trykkstigning foran turbin, LRV	48,5 m	43,5 m	38,5 m
Prosentmessig trykkstigning, relativt statisk trykk	25,5 %	22,8 %	20,3 %
Trykkfall bak turbin, HRV	4,7 m	4,4 m	4 m
Trykkfall bak turbin, LRV	4,7 m	4,4 m	4 m
Resttrykk bak turbin, HRV	5,5 m	5,8 m	6,2 m

Reguleringsstabilitet

Også i analysen av reguleringsstabilitet blir bekkeinntak til Kvernelva neglisjert, da dette vil ha neglisjerbar innvirkning på stabiliteten. For å forenkle analysen neglisjeres også bekkeinntaket til Aldalselva, da dette til tross for at den innfører u-rørssvingninger mellom bekkeinntaket og svingesjakten vil bidra til å bedre stabiliteten. Med unntak av T_a analyseres systemet med turbinparametere for Jørundland, som har tilnærmet samme fartstall som Aldal. T_a er beregnet for Aldal, basert på generatorens oppgitte treghetsmoment. Parameterne er vist i Tabell 18.

Tabell 18 - Turbinparametere, Aldal

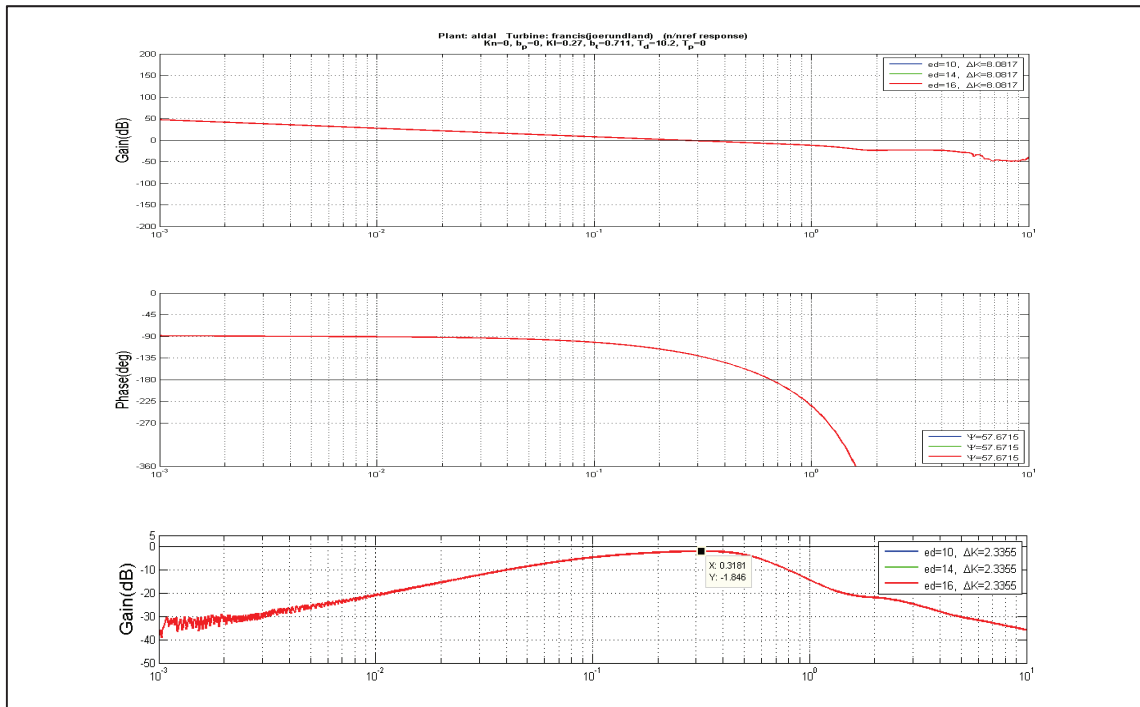
Virkningsgrad	0,94
Qn	-0,55
Qy	0,9
Eg	0
En	0
kq	1,19
T_a	6,22

Som for Nye Frøland benyttes Steins empiriske formler for PI-regulatorer som et første estimat for reguleringsparametre.

$$T_d = 10,2$$

$$b_t = 0,711$$

Med parameterne ovenfor blir fasemargin og forsterkningsmargin henholdsvis $57,67^\circ$ og 8,08 dB, mens turtall/last-forholdet blir -1,846 dB. Systemet er altså innenfor akseptable grenser, men dog ikke innenfor anbefalt verdi for turtall/last-forhold. Bode-diagram og turtall/last-forholdet er gjengitt i Figur 23. Da friksjonsmodellen brukt i programmet benyttet for analysen vil dette forholdet ligge lengre under 0 dB-linjen i virkeligheten, og sikkerhet mot ustabilitet vil være større. Dette bør undersøkes med en friksjonsmodell som ikke er fullt så konservativ. I tillegg vil kraftverket operere med et ohmsk nett, og statikken vil bidra til stabiliteten.

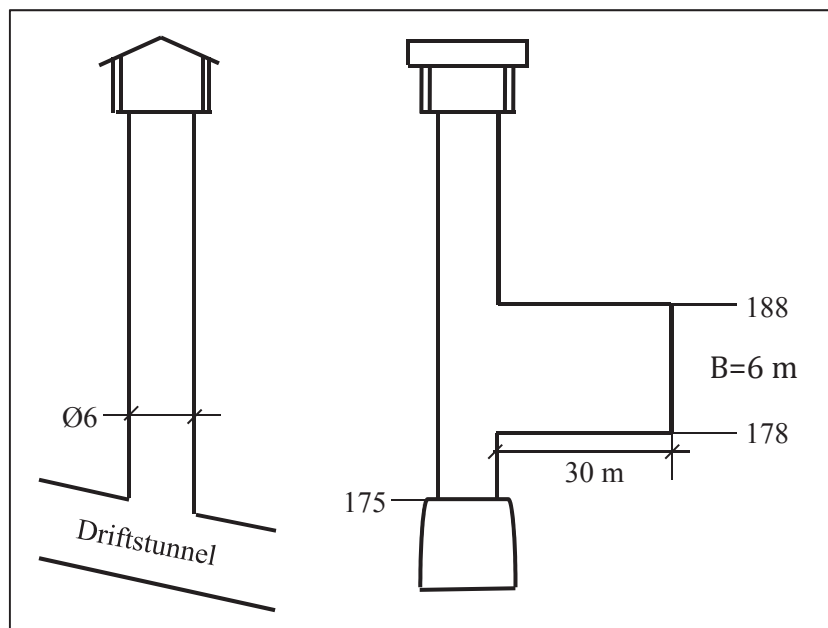


Figur 23 - Bode-diagram og last/turtall-forhold, Aldal, opprinnelig geometri

12.2.3. Foreslått geometri

Elastisk simulering av svingekammer

På bakgrunn av simuleringresultatene for den opprinnelige geometrien ses det at pådrag med etterfølgende avslag for LRV kan føre til frispelstrømning i bekkeinntakstunnelen. I tillegg forutsetter disse resultatene at bekkeinntak fra Kvernelva kan ses bort fra, noe som ikke kan sies å være tilfelle. Det foreslås enten å flytte svingesjakt til det første bekkeinntaket, eller innføre et ekstra svingekammer i dette. En simulering gjort med en svingesjakt i øvre bekkeinntak er utført, og resultatene kan ses i det følgende. Svingesjakt er simulert etter prinsipp og dimensjoner som vist i Figur 24. Det forutsettes at det er tilstrekkelig fjelloverdekning hvor svingesjakt er foreslått plassert. Ut fra lengdeprofil i tegning 118680 gitt i «Vedlegg 2 – Underlag fra BKK» er knutepunkt for bekkeinntak og driftstunnel på ca. kote 175, og overdekning over 50 meter. Overdekning reduseres betraktelig oppover driftstunnel, hvor det i tillegg finnes bolighus. En vertikal sjakt i knutepunkt vil være et godt alternativ. Sjaktprinsipp foreslått i bekkeinntak for Aldalselva bør ikke benyttes her, da sjakten vil bli i like lang som bekkeinntaket og retardasjon av vannmasser vil gi utslag i bekkeinntaket i stedet for sjakten. Resultatene gjengitt her er for en lukketid på 9 sekunder. Simuleringer for lengre lukketid, samt er å finne i «Vedlegg 8 – Simuleringresultater Aldal». Simuleringer for avslag eller pådrag alene, samt simuleringer for designpunkt er å finne på vedlagt CD.



Figur 24 - Prinsipkisse nytt svingekammer, Aldal

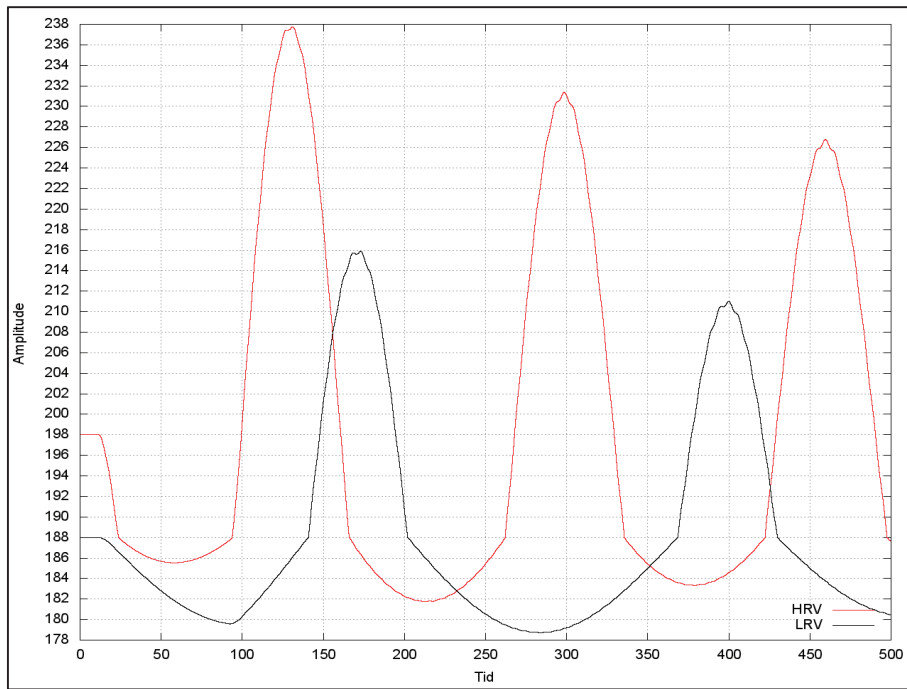
Tabell 19 - Simuleringsresultater Aldal, foreslått geometri I, Tl=9s, øvre svingekammer

Scenario	Øvre vannstand	Nedre vannstand
1: Pådrag m/avslag i ugunstig fase HRV	237,8 m	182 m
2: Pådrag m/avslag i ugunstig fase LRV	216 m	179 m

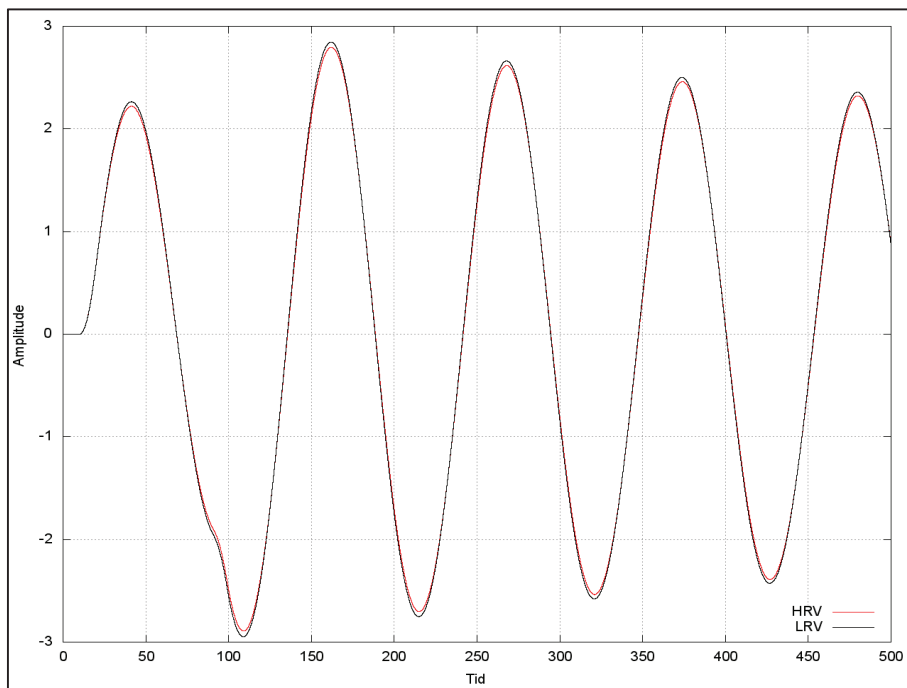
Tabell 20 - Simuleringsresultater Aldal, foreslått geometri I, Tl=9s, nedre svingekammer

Scenario	Øvre vannstand	Nedre vannstand
1: Pådrag m/avslag i ugunstig fase HRV	2,8 m	-2,8 m
2: Pådrag m/avslag i ugunstig fase LRV	2,9 m	-2,9 m

Tidsforløp i øvre svingekammer for scenario 1 og 2 for lukketid på 9 sekunder er gitt i Figur 25. Tilsvarende er vist for nedre svingekammer i Figur 26.



Figur 25 - Pådrag med påfølgende avslag for HRV og LRV, geometri I, øvre svingekammer



Figur 26 - Pådrag med påfølgende avslag for HRV og LRV, geometri I, nedre svingekammer

Største oppsving er noe høyt, noe som fører til økt trykk foran turbin. Dette kan reduseres ved å utvide tverrsnitt i sjakten over HRV.

Elastisk simulering av retardasjonstrykk

Retardasjonstrykk er simulert for volumstrøm lik slukeevne, og både høyeste og nederste regulerte vannstand. En dukking på 10 meter er antatt for simuleringene, basert på beregninger gjort på basis av hoveddimensjonene. Se «Vedlegg 4 – Beregning av turbinens hoveddimensjoner». Tidspunkt hvor avslag er i fase med oppsving etter pådrag er funnet til å være ca. 80 sekunder etter pådraget starter.

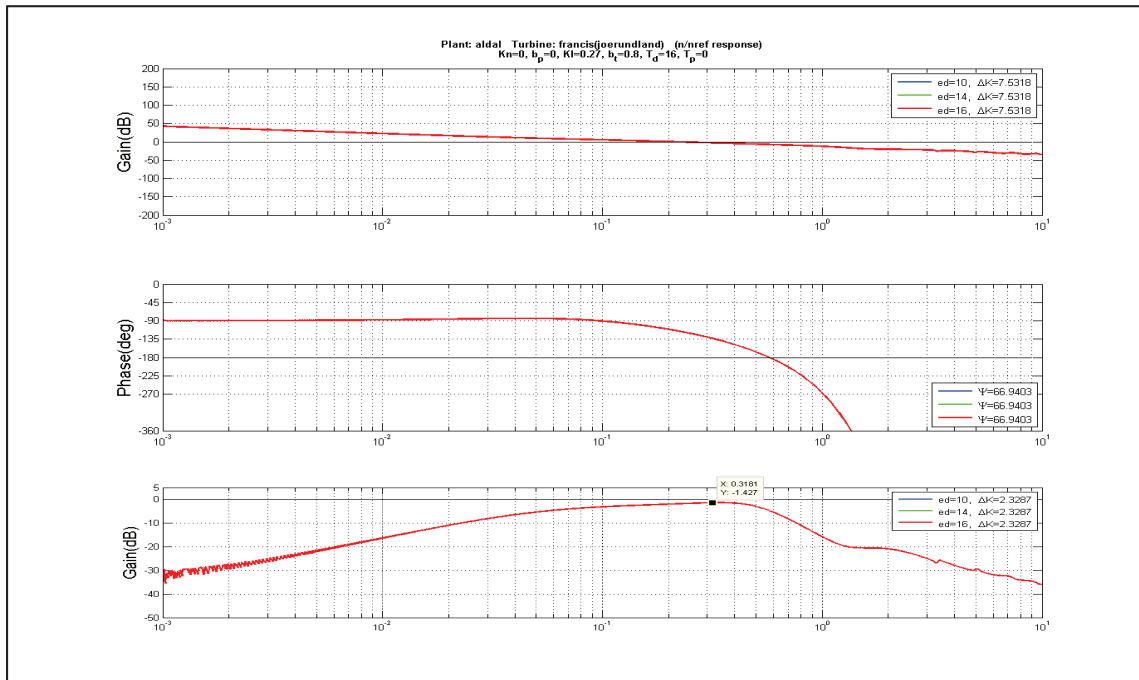
Retardasjonstrykk og trykkfall bak turbin for avslag fra volumstrøm lik slukeevne og for både høyest og lavest regulerte vannstand og lukketid på 10, 11 og 12 sekunder er gitt i Tabell 21. Verdiene gitt er trykkdifferanse grunnet trykkstøt, og noe høyere trykk kan forekomme grunnet oppsving i svingesjakten. Utvalgte resultater er også gitt i «Vedlegg 8 – Simuleringsresultater Aldal» sammen med tidsforløp, mens alle resultater kan ses på vedlagt CD.

Tabell 21 - Resultater fra avslagssimulering Aldal Kraftverk, volumstrøm lik slukeevne

	$Tl = 9s$	$Tl = 10s$	$Tl = 11s$
Trykk foran turbin, HRV	248,5 m	244 m	239,5 m
Trykkstigning foran turbin, HRV	46,5 m	42,5 m	38 m
Prosentmessig trykkstigning, HRV	23,1 %	21,1 %	18,9 %
Trykkstigning foran turbin, LRV	42,5 m	37,5 m	34 m
Prosentmessig trykkstigning, LRV	22,2 %	19,6 %	17,8 %
Trykkfall bak turbin, HRV	3,8 m	3,7 m	3,2 m
Trykkfall bak turbin, LRV	3,8 m	3,7 m	3,2 m
Resttrykk bak turbin, HRV	6,2 m	6,5 m	7 m

Reguleringsstabilitet

Som initiale verdier for regulatorparametere brukes de som ga stabil regulering for opprinnelig system, $T_d=10,2$ og $b_t=0,711$. I tillegg er sjakttverrsnitt økt til 212,14 m². Turtall/lastforholdet blir da marginalt under 0 dB-linjen med -0,1997 dB, og systemet er så vidt stabilt. Se «Vedlegg 8 – Simuleringsresultater Aldal» for disse resultatene. Med $T_d=16$ og $b_t=0,8$ blir turtall/last-forholdet maksimalt -1,427 dB, mens fasemargin og forstrekningsmargin blir henholdsvis 66,9° og 7,5 dB. Systemet er altså stabilt, men med et turtall/last-forhold som ikke er innenfor anbefalte verdier. Det er likevel innenfor absolutte krav, og også i dette tilfellet er friksjonen konservativ og sikkerhet mot ustabilitet er i realiteten større. Bode-diagram og turtall/last-forhold er gjengitt i Figur 27.

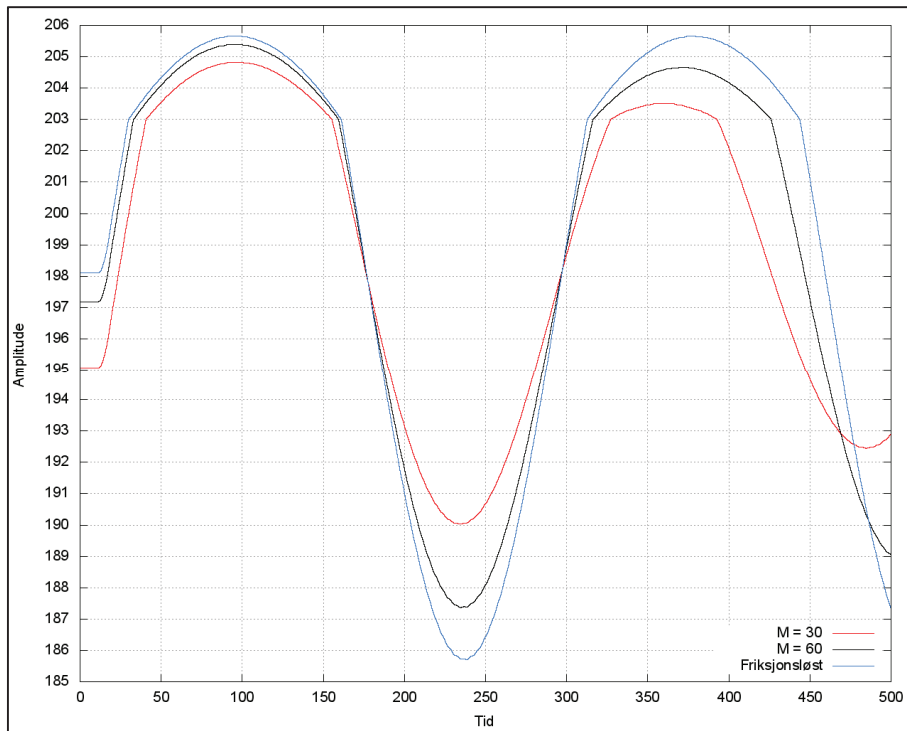


Figur 27 - Bode-diagram og turtall/last-forhold, Aldal, foreslått geometri

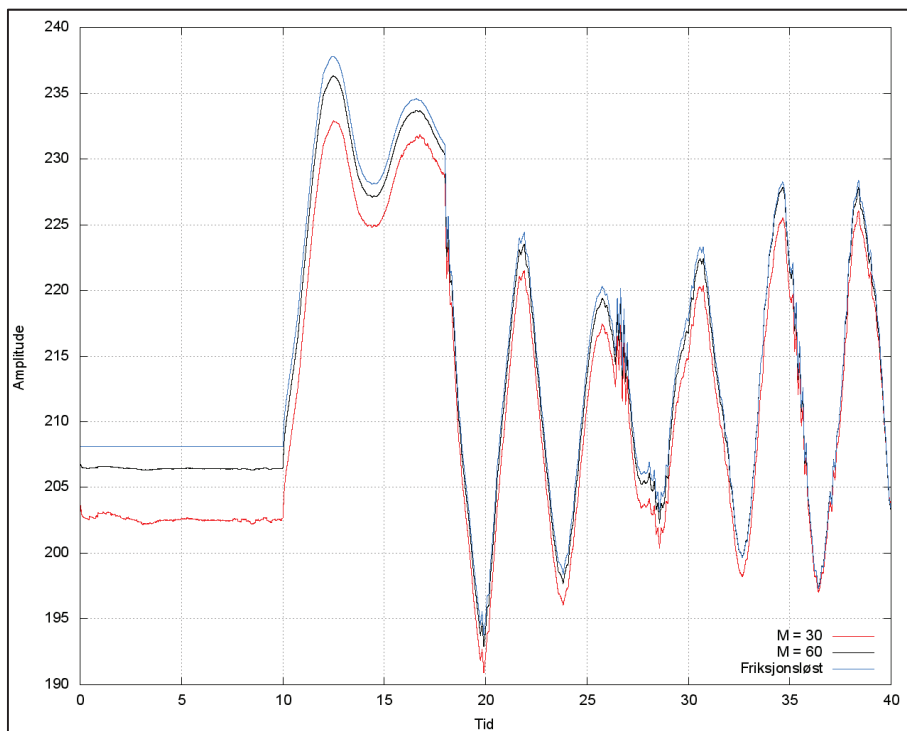
Dette kan betraktes stabilt, men er en veldig treg regulering. Det bør vurderes om kraftverket bør bygges med to svingesjakter, en i forbindelse med øverste bekkeinntak og en lengre ned mot turbinen. Reguleringsmessig vil en svingesjakt nærere turbinen forbedre reguleringen betraktelig.

12.3. Sammenligning av friksjonsmodeller

De tre friksjonsmodellene er sammenlignet ved å simulere både svingesjakt og retardasjonstrykk fra full slukeevne og høyeste regulerte vannstand for Aldal Kraftverk, med opprinnelig geometri. Friksjon har liten innvirkning på retardasjonstrykket, men resultatet for svingeberegninger viser store variasjoner med varierende friksjon spesielt for nedsving. Forskjellen i nedsving med friksjonsløs beregning og et Manningstall på 33 er hele fem meter. I Figur 1 kan en sammenligning mellom friksjonsløs svingning, Manningstall på 33 og på 60 ses. I Figur 29 er samme sammenligning gjort for trykkstøt. Friksjonskoeffisienten, f , er her oppdatert for lokalt Reynoldsnummer for hvert tidssteg (kvasi-likevekt). Et Manningstall på 30 er den høyeste friksjonen som kan forventes i tunneler i vannkraftverk, og opptrer i råsprenge tunneler. For borete tunneler kan friksjonen bli så lav som 60. Det ses tydelig at høy friksjon reduserer og demper ut svingningene raskere. For trykkøkning som følge av avslag har friksjon lite å si, mens absoluttverdien av det maksimale trykket vil synke med økende friksjon. Dette er fordi trykkhøyden ved turbin reduseres ved høyt tap i tunnelene.



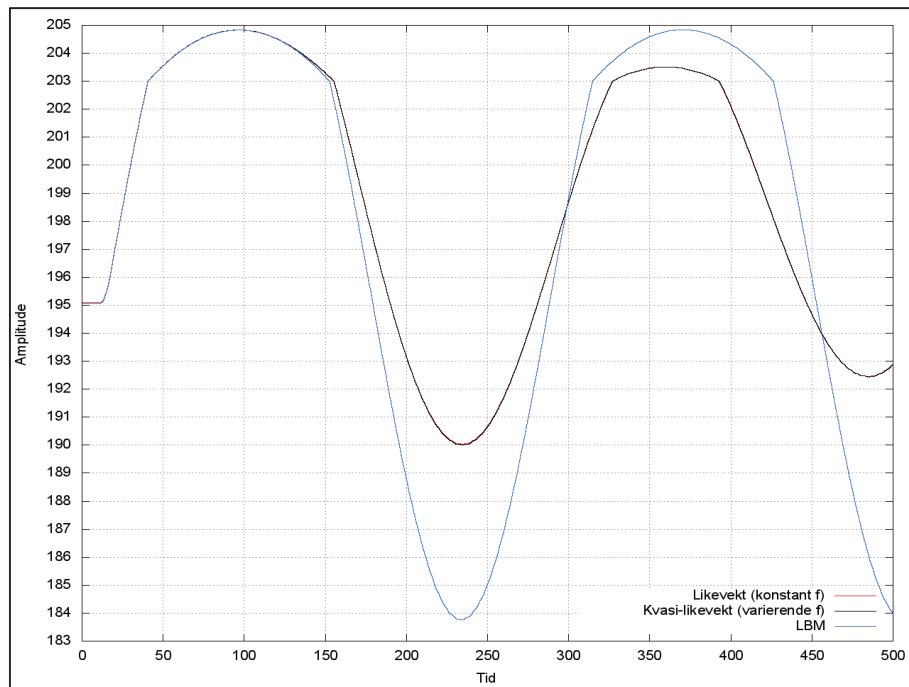
Figur 28 - Sammenligning friksjonsinnvirkning, svingninger



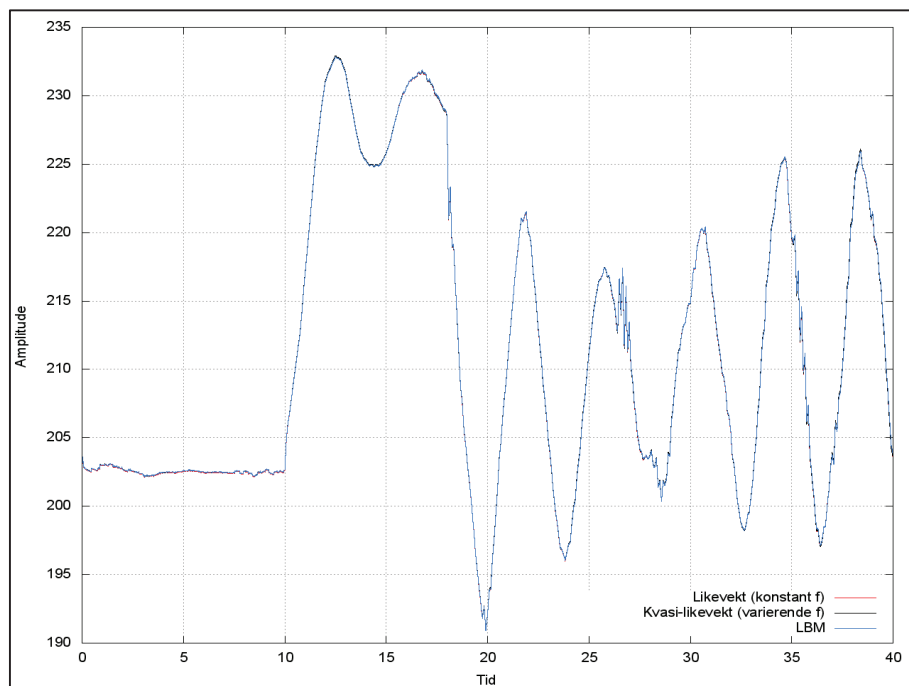
Figur 29 - Sammenligning friksjonsinnvirkning, trykkstøt

De forskjellige modellenes innvirkning på de samme scenarioene som vist over kan ses i Figur 30 og Figur 31. Forskjellen mellom konstant friksjonsfaktor og friksjonsfaktor basert på kvasi-likevekt er ikke-eksisterende. For svingninger viser LBM-modellen

veldig liten dempning i forhold til de to øvrige, mens for trykkstøt er det ingen forskjell mellom modellene.



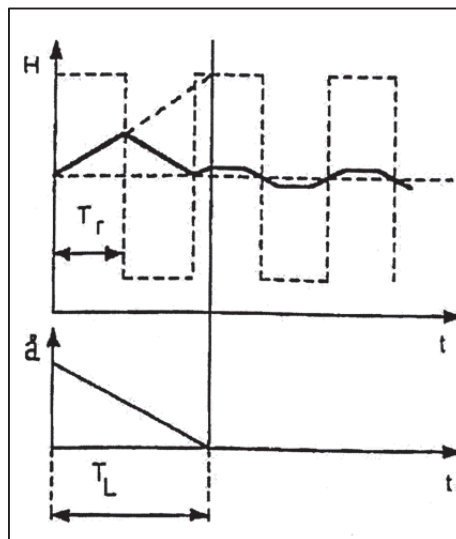
Figur 30 - Sammenligning friksjonsmodeller, svingninger



Figur 31 - Sammenligning friksjonsmodeller, trykkstøt

LBM-modellen viser svært liten dempning, og ser ikke ut til å kunne stemme med virkeligheten, da den til fører til negativ dempning. Noe av dette kan henge sammen med at parameterne K og Θ brukt i simuleringene er kalibrert for glatte rør i laboratoriet, og de kan i utgangspunktet ikke brukes for tunneler. Disse parameterne bør kalibreres eksperimentelt for tunneler, før denne modellen vil gi noe realistisk resultat. Det kan også nevnes at disse parameterne varierer mye i litteraturen (10). I tillegg foreslås det et «predictor-corrector sceme» for beregning av nytt tap, basert på «finite difference»-metoden med fullt utskrevne formler for beregning av trykkøkning. Dette er ikke direkte implementerbart i karakteristikkmetoden, men med noe omskrivning kan dette inkluderes for å forbedre modellen i karakteristikkmetoden. Det bør kontrolleres hvordan modellen er implementert i programmet.

Lydhastighet endres i utgangspunktet med væskehastighet da den relative hastigheten er konstant, men grunnet lav væskehastighet relativt lydhastigheten er dette neglisjerbart. Trykkstøt er derfor ikke karakterisert med en tilhørende volumstrøm, og friksjonsmodellene brukt i denne analysen er ikke gode nok til å få med dempningen på trykkstøt, samt ved volumstrøm med null som middelverdi. Dette kan spesielt ses på det stående rest-trykkstøtet etter at turbinen er helt lukket. Som kan ses i Figur 32 er denne stående svingningen et resultat av at lukkingen «avbryter» en trykkbølge, som deretter blir reflektert. Sagt med andre ord kan det tenkes på vannstrengen som en fjær, som ikke har likevekt når stenging inntreffer. Rest-energien i fjæren fører da til elastiske svingninger.



Figur 32 - Stående svingning etter lukking (5)

I virkeligheten vil denne svingningen dempes ut etter hvert, mens under simuleringene skjer ikke dette. Lukketiden kan justeres slik at den stående svingningen blir kansellert, noe som vil gi lavere belastning på utstyr. Å gjøre dette i praksis krever imidlertid nøye simulering i tillegg til måling og etterjustering etter at kraftverket er bygget da simuleringer ikke kan gjengi hele sannheten.

12.4. Resultatenees gyldighet

12.4.1. Verifisering av programvare

For å sikre resultatenees gyldighet er beregningene for avslag fra HRV for Aldal med opprinnelig geometri med uniform svingesjakt på 102 m² blitt sammenlignet med både overslagsformler og uelastiske numeriske beregninger. Det er her valgt en lukketid på syv sekunder, og volumstrøm lik slukeevne på 35 m³/s. Resultatene fra sammenligningene kommer frem i Tabell 22 og Tabell 23.

Tabell 22 - Sammenligning med overslagsformler, Tl=7

	Overslag	Elastisk program	Differanse	
			Abs	%
Trykkøkning foran turbin	66,5 m	49 m	-17,5 m	-26,3 %
Amplitude i øvre svingesjakt	14,3 m	13 m	-1,3 m	-9,1 %
Periode i øvre svingesjakt	262 s	265 s	3 s	1,14 %
Amplitude i nedre svingesjakt	3,64 m	2,2 m	-1,44 m	39,6 %
Periode i nedre svingesjakt	102,02 s	110 s	8 s	7,8 %

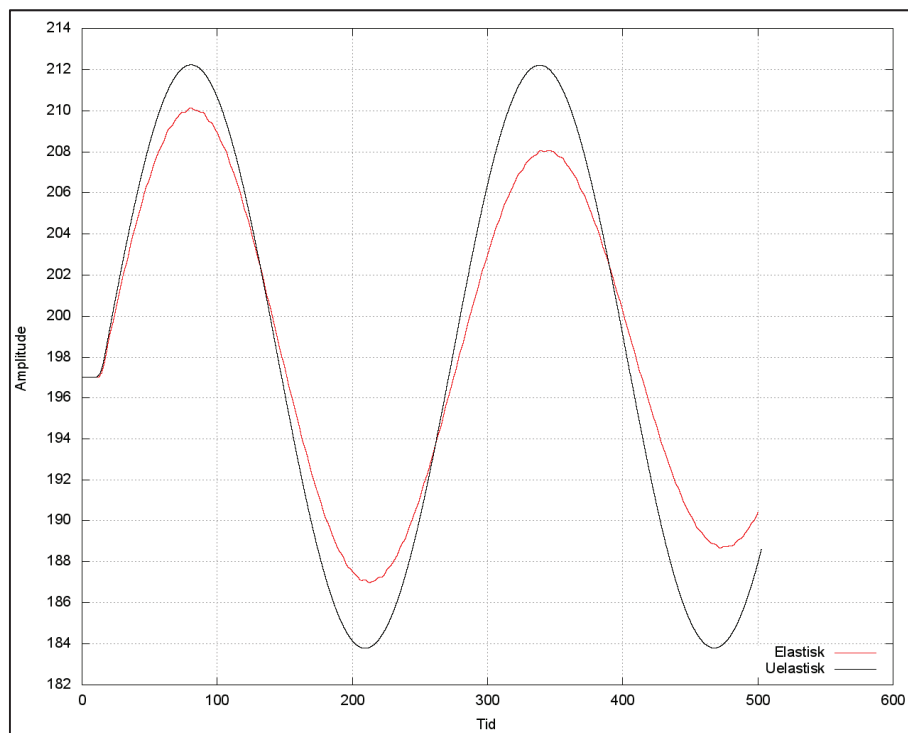
Tabell 23 - Sammenligning med uelastisk program

	Uelastisk program	Elastisk program	Differanse	
			Abs	%
Trykkøkning foran turbin	-	49 m	-	-
Amplitude i øvre svingesjakt	15 m	13,2 m	-1,2 m	-8 %
Periode i øvre svingesjakt	255 s	265 s	10 s	3,92 %
Amplitude i nedre svingesjakt	3,2 m	2,4 m	-0,8 m	-25 %
Periode i nedre svingesjakt	110 s	110 s	0 s	0 %

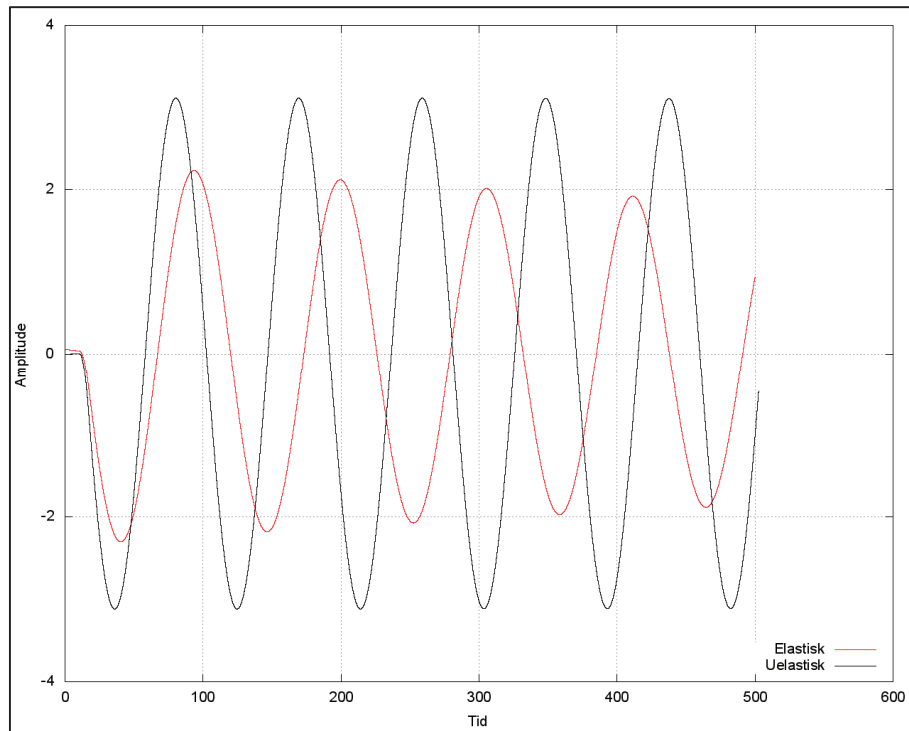
Resultatene stemmer godt overens med overslagsformlene når det gjelder massesvingninger, med unntak av nedre svingesjakt. Forskjellen på 1,3 m kan ikke sies å være spesielt stor, og stammer mest sannsynlig fra friksjon. Som vist og diskutert i 12.3 og Figur 28 kan friksjon redusere svingeamplitudene betraktelig. Avviket i svingeperioden på 3 sekunder er så lite at det kan stamme fra unøyaktig avlesning i graf fra programmet. For nedre svingesjakt er forskjellen imidlertid ganske stor, både i amplitude og periode. Perioden er i all hovedsak avhengig av L/A-forholdet, og bør ikke avvike mye fra overslagsberegningene. Dette impliserer at det enten er simulert med feil lengder, eller at det finnes en feil i koden. Da det ved kontroll er avdekket at korrekte lengder er brukt sannsynliggjøres det sistnevnte.

I nedre svingesjakt gir det elastiske programmet et resultat som er høyere i forhold til det uelastiske og lavere i forhold til overslagsformelen. Dette kan også til dels forklares med at overslagsformelen ikke tar med friksjon, noe som vil ha signifikant innvirkning på den lange sjakten i undervannet. Videre kan forskjellen i amplituden med det uelastiske forklares med at det uelastiske regner med konstant tverrsnitt lik 35 m^2 hele veien opp i sjakt, og mister dempningen i innsnevringen av tverrsnitt. Avviket kan til en viss grad forklares med forskjell i L/A-forholdet, men sett i lys av at det elastiske programmet også bommer i forhold til overslagsformelen tyder også dette på en feil i kildekode for nedre svingesjakt. En enkel kontroll er gjennomført ved å øke lengden av tunnel med 35 m^2 tverrsnitt i det elastiske programmet, noe som gjorde at resultatene ble mer lik både overslagsformel og resultat fra det uelastiske programmet. Dette tyder på at kodefeilen ligger i kodingen av enten noden eller selve sjakten.

Se Figur 33 og Figur 34 for sammenligning av tidsforløp i øvre og nedre sjakt for uelastisk og elastisk program.



Figur 33 - Sammenligning av tidsforløp elastisk og uelastisk program, øvre svingesjakt



Figur 34 - Sammenligning av tidsforløp elastisk og uelastisk program, nedre svingesjakt

Når det gjelder trykkøkning som følge av avslag oppstår et stort avvik mellom beregning og overslag. Overslagsformel benyttet i denne rapporten inkluderer elastiske effekter, noe som er korrekt hvis lukketid og trykkbølgens refleksjonstid er i samme størrelsesorden. Forhold mellom lukketid og refleksjonstid er i dette tilfellet 2,64. Det bør derfor antas at effekten av elastiteten ikke har en faktor på to, men ligger et sted imellom den elastiske og uelastiske overslagsformelen.

Videre kan det nevnes at det ved trykkstøt ser ut til at programmets initialiserer godt nok. Med andre ord når ikke programmet en likevekt før avslag finner sted, noe som kan forringe resultatene. Det er imidlertid ikke ansett som en stor feilkilde i resultatene, men bør utbedres for videre bruk av programmet.

12.4.2. Begrensninger i bruk av resultatene

Alle resultatene som er fremkommet i denne rapport er basert på et Manningstall på 33. Dette er et tall fremkommet av erfaring med sprengte tunneler, og resultatene må følgende brukes med forsiktighet om noen av tunnelene eller sjaktene bores eller av andre grunner må antas å ha lavere friksjon. For sprengte tunneler kan Manningstallet bli så høyt som 60-80, og nye simuleringer må utføres. Spesielt gjelder dette svingegrenser i svingesjaktene da Figur 28 viser at disse har stor avhengighet av friksjonen. Resultatet for massesvingninger i nedre svingesjakt bør kontrolleres da programmet mest sannsynlig gir feil resultat. Dette forringer imidlertid ikke resultatene oppstrøms turbin, og både trykkstøt foran turbin og massesvingninger i øvre svingekammer er realistiske. Som indikasjon på hvilke svingninger som vil opptre i nedre svingesjakt kan resultatene fra det uelastiske programmet benyttes. Dette behandler imidlertid ikke vannveien nøyaktig nok til å kunne brukes i detaljprosjektering, men resultatene antas å gi en god pekepinn på realistisk resultat.

Samtlige av analysene gjort i dette arbeidet neglisjerer vannføringen i bekkeinntak. Normalt sett vil en slik vannføring ha lite å si for de dynamiske egenskapene, med unntak av de steder hvor et vannspeil ligger så nært hovedtunnelen at bekkeinntaket vil fungere som svingesjakt. I de fleste tilfeller vil dette bedre de dynamiske egenskapene forutsatt at tverrsnittsareal er over Thoma-tverrsnittet, men om dette skaper to u-rørssvingninger med omtrentlig samme frekvens kan det gi resonans og ustabilitet. U-rørssvingninger som ikke er behandlet i denne rapport må kontrolleres for dette. I tillegg bør det vurderes om u-rørssvingninger vil forekomme mellom svingekammer og inntakbasseng i bekkeinntak. Dette har ikke blitt gjort i denne rapport grunnet usikkerheter i vannføring i bekkeinntak og vannspeilareal i inntaksbasseng. Spesielt gjelder dette i foreslått alternativ for Aldal, hvor tilførselstunnelens lengde er så kort og liten dempning av slike svingninger eksisterer. En u-rørssvingning mellom sjakt og bekkeinntak kan føre til overflom i bekkeinntak om inntaksbassenget ikke har stort nok areal til å ta opp svingemassene. Dette er spesielt viktig i inntaket ved Kvernelva hvor det går bilvei forbi inntaket. Om det finnes at uakseptable oppsving forekommer kan disse dempes ved å snevre inn tverrsnittet i bekkeinntaket en viss lengde for å strupe svingningen.

Da turbindata for turbinene ikke er tilgjengelig enda er turbindata fra Jørundland benyttet. Disse data er nødvendigvis ikke lik for Aldal og Nye Frøland, og en ny simulering kan gjøres når disse data er tilgjengelig for de nye turbinene. Resultatene bør derfor brukes med forsiktighet om det skulle vise seg å være stor forskjell på turbinene.

Under simuleringene ble det benyttet en antatt dykking på 10 meter. Om en annen dykking velges for videre prosjektering har dette ingen innvirkning på resultat av trykkfall bak turbin, men resttrykket bør korrigeres deretter.

13. Konklusjon

13.1. Nye Frøland Kraftverk

Foreslått svingesjakt for Nye Frøland Kraftverk har vist seg underdimensjonert, og anbefales derfor å endres. For å ivareta opp- og nedsving innen definerte svingegrenser anbefales det å flytte svingekammeret lenger opp i terrenget, slik at «gulvnivå» for overbygget ligger på kote 211. I tillegg avstand mellom gulvnivå og såle økes til to meter. For å ivareta nedsvingsvolumet bør selve svingesjaktens diameter øke fra Ø6 til Ø9, samt forlenges til kote 168. Disse tallene gjelder for en friksjon basert på Manningstall på 33, som gjelder for sprengte tunneler.

For ikke å overstige et akseptabelt nivå for trykkøkning som følge av avslag bør tunneltverrsnitt i nedre del av sjakt økes fra Ø2 m til Ø3 m. Største trykkøkning blir da 14,3 % for en lukketid på 7 sekunder for avslag med volumstrøm like slukeevne. Dette kan senkes mer ved å øke lukketiden eller øke tverrsnitt i nedre del av sjakt, noe som må vurderes basert på økonomiske betraktninger.

Også reguleringsstabiliteten blir kraftig forbedret ved økning av tverrsnittarealet fra Ø2 til Ø3. Ved å gjøre dette oppnås en meget hurtig regulering samtidig som turtall/last-forholdet kan holdes godt under 0 dB. T_d og b_t er da satt til henholdsvis 5 og 0,3.

13.2. Aldal Kraftverk

Simuleringer på opprinnelig geometri har vist at nedsving i tilførselstunnel for bekkeinntak forekommer. Dette er ikke kritisk for kraftverket, men kan føre til økt sedimenttransport.

Svingesjakten i alternativet gitt fra BKK er plassert i det nedre bekkeinntaket. Når lengden fra knutepunktet mellom øvre bekkeinntakstunnel og opp til inntaket er i størrelsesordenen, eller mindre enn lengden fra samme knutepunkt til overflaten i svingesjakten vil et avslag eller pådrag resultere i massesvingninger i bekkeinntaket og føre til overflom i bekkeinntaket. På bakgrunn av dette bør svingesjakten flyttes opp til øvre bekkeinntak. Opprinnelig svingekammerprinsipp bør da ikke benyttes da lengden på tunnel opp til vannspeilet blir for lang. En vertikal sjakt etter prinsipp vist i Figur 24 har vist seg å resultere i akseptable svingninger, men det kreves en treg regulering for å holde turtall/last-forholdet under kravet og selv da er kraftverket marginalt stabilt. Andre reguleringsformer kan bøte på dette, men om en PI eller en PID-regulator skal benyttes bør det vurderes to svingesjakter i overvannet. Dette vil forkorte vannveien fra turbin til nærmeste frie overflate, og stabiliteten vil forbedres. T_d og b_t er da satt til henholdsvis 16 og 0,8.

Svingesjakt i bekkeinntaket til Kvernelven må i alle tilfeller beholdes, med mindre det installeres en enveis ventil i nevnte bekkeinntak.

13.3. Programvare og friksjonsmodell

Programmet har vist seg å stemme godt med overslagsformler, med unntak av trykkstøt. Dette forklares med at overslagsformelen er for konservativ da den overvurderer de elastiske effektene når lukketiden ikke er i størrelsesorden med refleksjonstiden. I tillegg gir programmet urealistiske resultat for nedre svingesjakt, og det antas at dette skyldes en feil i kildekode for selve svingesjakten eller den tilknyttede node.

Den dynamiske friksjonsmodellen prøvd implementert gir imidlertid veldig urealistiske resultater. Dette kan være grunnet manglende kalibrering av konstanter i metoden, men sannsynligvis bør det innføres en «predictor-corrector»-metode som foreslått i «Pezzinga,2009» (10).

Amplitudeutslaget har vist seg svært avhengig av valgt Manningstall, og spesielt nedsving øker betraktelig ved simulering av lav friksjon. Oppsving er ikke fullt så avhengig av friksjonen, men også her ses det utslag.

14. Forslag til forbedringer

14.1. Nye Frøland Kraftverk

For å sikre mot overflom ved pådrag fra stillstand med etterfølgende avslag i verste fase må svingekammerdimensjoner og plassering endres. Svingekammer må flyttes lengre opp i terrenget, slik at «gulvnivå» ligger på kote 211. Videre må dybden i svingebassenget økes, i tillegg til at tverrsnittet i øvre del av sjakten må økes fra Ø6 til Ø9. I tillegg bør nederste del av sjakttverrsnitt utvides fra Ø2 til minst Ø3, og forlenges ned til kote 168.

14.2. Aldal Kraftverk

For å hindre overflom gjennom bekkeinntak til Kvernelva bør svingesjakt flyttes til knutepunkt mellom nevnte bekkeinntak og driftstunnel. Prinsippskisse for ny svingesjakt kan ses i Figur 24. I tillegg bør det vurderes å innføre et ekstra svingekammer i overvannet nærmere turbinen for å oppnå en bedre regulering.

15. Videre arbeid

Arbeidet i denne rapport er å betrakte som en del av et forprosjekt i dimensjoneringen av Aldal og Nye Frøland Kraftverk, og en naturlig videreføring av prosjekteringsdelen er selvfølgelig en videre detaljprosjektering. Videre bør underlag for vannføring i bekkeinntak og vannspeilareal i inntaksbasseng fra Kvernelva anskaffes og u-rørssvingninger mellom sjakt og inntaksbasseng bør utredes. Om dette finnes å være et problem bør en innsnevring av areal en viss lengde prosjekteres for å stoppe svingningene.

Lukketid bør velges basert på økonomiske betraktninger hvor vanntap og mekanisk påkjenning på generator som følge av lang lukketid veies opp mot kostnaden av dimensjonering mot høye trykkstøt foran turbin og lukkeapparat. Det bør også vurderes om reguleringen er god nok og eventuelt gjøre endringer i vannveien for å forbedre disse. Dette gjelder i hovedsak Aldal Kraftverk.

Programmet bør utvikles videre til å inkludere en bedre modellering av turbin. Dette vil gjøre programmet i stand til å simulere delvis avslag og påslag, samt kombinasjoner av disse. Funksjonaliteten med vannføring i bekkeinntak bør valideres og videreutvikles for å kunne simulere mer komplekse systemer. I tillegg kan det med fordel utvikles et grafisk grensesnitt for input av verdier og valg av hvilken resultatfremstilling som ønskes. Dette vil forenkle bruken betraktelig da programmet i dagens stand krever kjennskap til kodingen for at det skal kunne brukes fullt ut. Potensialet for å øke hurtigheten av beregningene er absolutt tilstede, og koden kan med fordel skrives mer effektiv og kompakt. Den dynamiske friksjonsmodellen i programmet bør også ses nærmere på, og det bør kontrolleres om den er implementert feil i koden da den ikke gir fornuftige resultater. Videre bør konstantene i denne metoden kalibreres for bygde kraftverk for å gi et realistisk resultat i fullskala.

Den antatte feilen i kildekode for nedre svingekammer må lokaliseres og utbedres. I tillegg bør programmets initialiseringsfunksjon utbedres slik at full likevekt oppnås før avslag eller pådrag.

16. Referanser

1. BKK. Frøland Kraftverk. [cited 2012 01.02]; Available from: http://www.bkk.no/om_oss/anlegg-utbygging/Kraftverk_og_vassdrag/samnangervassdraget/article28895.ece.
2. BKK. Utbygging i Samnangervassdraget. Bergen 2011.
3. BKK. Kravspesifikasjon bygg, vannvei Nytt Frøland kraftverk (2-032), Hovedstudie Aldal/Frøland, Samnanger. Bergen: 2010.
4. BKK. Kravspesifikasjon bygg, vannvei Aldal kraftverk (2-031), Hovedstudie Aldal/Frøland, Samnanger. 2011.
5. Nielsen T. Dynamisk dimensjonering av vannkraftverk. Trondheim: Sintef, 1990.
6. Nielsen T. Samtaler. 2012.
7. Xinxin L. Hydropower system modeling by structure matrix method. Trondheim: NTNU, 1988.
8. Wylie EB, Streeter VL. Solution by Characteristics Method. Fluid Transients in Systems. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.; 1993. p. 37-79.
9. White FM. Fluid Mechanics. New York: McGraw-Hill; 2008.
10. Pezzinga G. Local Balance Unsteady Friction Model 2009.
11. Småbrekke A. E-post-korrespondanse. In: Stople RA, editor. 2012.
12. Vogt-Svenden S. Simulation program for Stability Analysis of hydro power plants. Trondheim: NTNU; 2012.
13. Brekke H. A stability study on hydro power plant governing including the influence from a quasi nonlinear damping of oscillatory flow and from the turbine characteristics: NTH; 1984.
14. NVE. Veileder i planlegging, bygging og drift av små kraftverk. NVE's hustrykkeri: NVE; 2010.

Vedlegg

<u>VEDLEGG 1 – BEVIS FOR IMPLEMENTERING AV LRB-FRIKSJONSMODELL</u>	V-1
<u>VEDLEGG 2 – UNDERLAG FRA BKK</u>	V-2
<u>VEDLEGG 3 – TUNNEL- OG KARTUNDERLAG</u>	V-25
<u>VEDLEGG 4 – BEREGNING AV TURBINENS HOVEDDIMENSJONER</u>	V-32
<u>VEDLEGG 5 – SKISSE AV KRAFTSTASJON</u>	V-36
<u>VEDLEGG 6 – OVERSLAGSBEREGNINGER</u>	V-37
<u>VEDLEGG 7 – SIMULERINGSRESULTATER NYE FRØLAND</u>	V-40
<u>VEDLEGG 8 – SIMULERINGSRESULTATER ALDAL</u>	V-54

Bevis for implementering av LRB-friksjonsmodell

Tapsleddet i karakteristikkmetoden og LRB har samme fortegn. Dermed kan C_p og C_m settes inn i C^+ og C^- ligningene for å vise at de er korrekte.

C^+ :

$$H_i = C_p - B_p Q_i = H_{i-1} + B Q_{i-1} - gJ - (B + R |Q_{i-1}|) Q_i$$

$$H_{i-1} + B Q_{i-1} - gJ - B Q_i - R |Q_{i-1}| Q_i$$

$$H_{i-1} - B(Q_i - Q_{i-1}) - R |Q_{i-1}| Q_i - gJ$$

$$H_A - B(Q_p - Q_A) - R |Q_A| Q_p - gJ$$

C^- :

$$H_i = C_m - B_m Q_i = H_{i+1} - B Q_{i+1} + gJ + (B + R |Q_{i+1}|) Q_i$$

$$H_{i+1} - B Q_{i+1} + gJ + B Q_i + R |Q_{i+1}| Q_i$$

$$H_{i+1} + B(Q_i - Q_{i+1}) + R |Q_{i+1}| Q_i + gJ$$

$$H_B + B(Q_p - Q_B) + R |Q_B| Q_p + gJ$$



BKK Produksjon AS
Divisjon Prosjekter og Teknologi

Kokstadvegen 37
Postboks 7050
5020 BERGEN

Telefon: 55 12 70 00
Telefaks: 55 12 70 01
e-post: Firmapost@bkk.no

BKK dokumentnr.:

IDA.dok.: 11076783

Tittel:

Kravspesifikasjon bygg, vannvei Nytt Frøland kraftverk (2-032)

Hovedstudie Aldal/Frøland, Samnanger

Revisjon	Revisjonen gjelder	Utarb. av	Dato	Kontr. av	Godkjent av	Oppdragsgiver godkjent
0	Første utgave	MDE	7/9-10	OLØ	-	-
1	Div endringer	MDE	17/3-11	AHO		
Oppdragsgiver: Divisjon Produksjon				Ref.:		
				Prosjekteier K Andersen		
				Prosjektansvarlig K Rem		

1 Oppsummering

Frøland kraftverk vil utnytte et fall på 169 meter mellom inntaket i Grønsdalsvatnet og Frølandsvatnet. Kraftstasjonen blir plassert i fjellet bak eksisterende Frøland kraftverk. Avløpet fra kraftstasjonen går ut i Frølandsvatnet gjennom en 200 m lang avløpstunnel.

Driftstunnelen blir totalt 5550 m lang. Fra kraftstasjonen i ca 2000m lengde vil tunnelen (trykk tunnel) gå på jevnt stigning 1:18 til tverrslagstunnel i Børdalen. De første 50-70 m vil være stålføret.

Videre fortsetter ca 2550m langt driftstunnel på en stigning 1:210 til inntaket i Grønsdalsvatnet.

Tunnelane er planlagt bygd fra to anleggsområde, fra Frøland og fra et tunneltverrslag i Børdalen.

Det blir bygd svingesjakt med svingebasseng i overgangen mot terrenget. Svingesjakt vil komme ut litt ovenfor starten av rørgaten til dagen Frøland kraftverk. Det skal bygges et lite overbygg over svingebassengen.

Det blir bygd nytt inntak i Grønsdalsvatnet med inntaksluke i lukesjakt, lukehus og grindrensker.

2 Funksjonelle krav

2.1 Forskriftskrav (normer og standarder)

Forskriftskrav og normer som skal/bør følges er i hovedsak relatert mot NVEs Sikkerhetsforskrift, hjemlet i "Vannressursloven".

Likeledes prinsipper/normer for dimensjonering av vannvei.

Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften) skal anvendes på vassdragsanlegg i konsekvensklasse 0-4 (jfr § 1-4. Virkeområde)

Veiledere:

- NVE sin "Veileder i planlegging, bygging og drift av småkraftverk" fra 2010
- NVE sin "Små damer" veileder for planlegging, bygging og vedlikehold, fra 2006
- "Retningslinjer for betongdammer" til § 4.8 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg; utgave 2 – oktober 2005.

Betegnelsen "S" er referanse til "Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg"

Dam

(omfatter, dam Grønsdalsvatn og bekkeinntak/dam i Aldalselva og Kverneelva)

- o Adkomst:

Ingen konsise krav. men generelt formulert at der må være funksjonell adkomst i samsvar med betjeningsbehov.(S § 5-6)

- Inntak:
(omfatter hovedinntak i Grønsdalsvatn)
Stenge og tappeorgan i henhold til §5-14 i S
Styrkedimensjonering etter kriterier/lastsituasjoner i S §5-3 og påfølgende §§.

Sjakt

- Installasjoner i sjakt:
(Gjelder lukesjakt)
Nedstigningsleder med repoer, som må utføres etter relevante regler. Kfr Arbeidstilsynets forskrift, evt. Teknisk forskrift under PBL.
- Ventilasjonsluft:
Lukehus og evt. svingekammer blir utstyrt med lufterør som munner ut i dagen, og som kan gi kraftig sug eller utblåsning, med de farer som det medfører. Det bør opprettes sikringstiltak slik at uvedkommende ikke kommer i farlig nærhet til slike steder.

Vanntunneler

- Hydraulisk optimal tverrsnitt:

Ingen forskriftskrav, men det vises til pkt 3

- Overdekning:

Nødvendig overdekning til dagen finnes på to måter:

1. Ved å anta neddykket romvekt på fjell lik 1,6
2. Likevektsberegninger.

Beregningene nevnt i pkt 1 og 2 er utført av Multiconsult og er en del av rapport: BKK – utbygging av Samnanger vassdraget - Ingeniørgeologisk vurdering.

Beregningene viser at krav til minimum overdekning ved romvekt fjell lik 1,6 for Frøland kraftverk er 106m.

Kraftstasjon er planlagt plassert med en fjelloverdekning på ca 150m.

Ellers er det sikkert hjemler i Vannressursloven som slår inn i tilfelle en vannførende tunnel i noen grad endrer grunnvannsforholdene i terrenget(overflata), noe det er fare for hvis den ligger for nær opp mot overflata.

Ligger tunnelen så grunt at vekt av overliggende fjell ikke overgår hydraulisk løft, oppstår krav om hel foring av tunnelen; også hjemlet i S.

- Foring av trykktunnel:

Fra innløpsrøret for turbinen legges det trykkrør et stykke oppover i driftstunnel. Dette er av to grunner:

- For å oppnå nødvendig fjelloverdekning til dagen ift vanntrykket
- For å minimalisere lekkasjevann mot fjellhall

Beregningene utført av Multiconsult viser at minimumskrav til foring av trykktunnel er 34m.

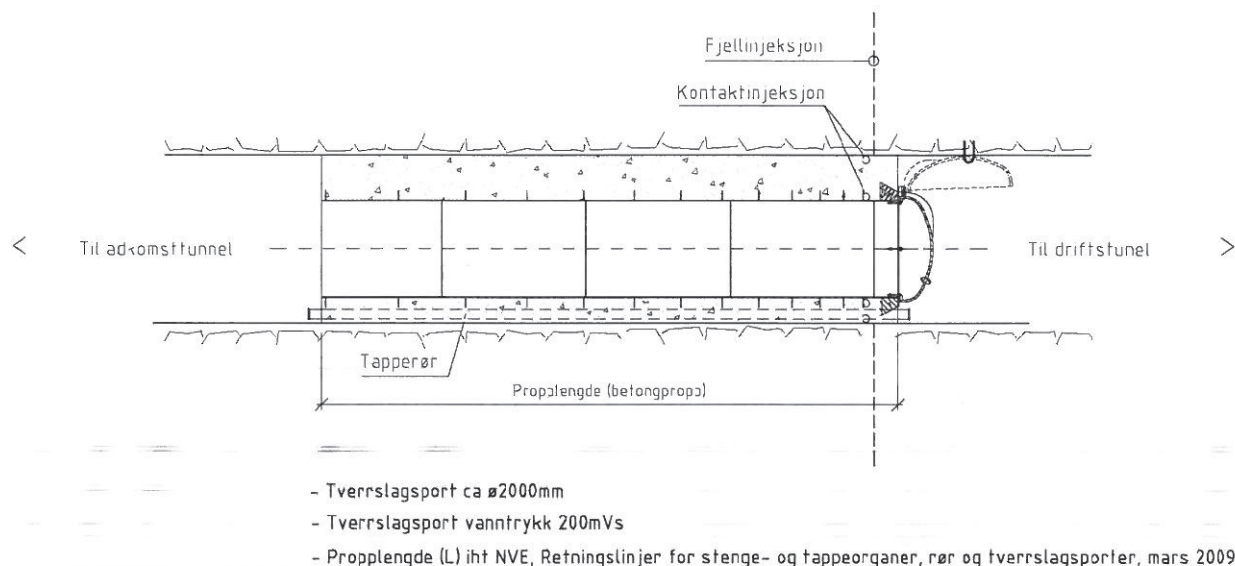
Betongpropp og tverrslagsport:

Det etableres en betongpropp/ tverrslagsport i overgangen transporttunnel og driftstunnel.

Tunnelen snevres inn for å redusere omfang av betongarbeidet.

Proppen skal dimensjoneres etter Utkast til retningslinje for rør- og tappeorganer fra mars 2009 med følgende krav:

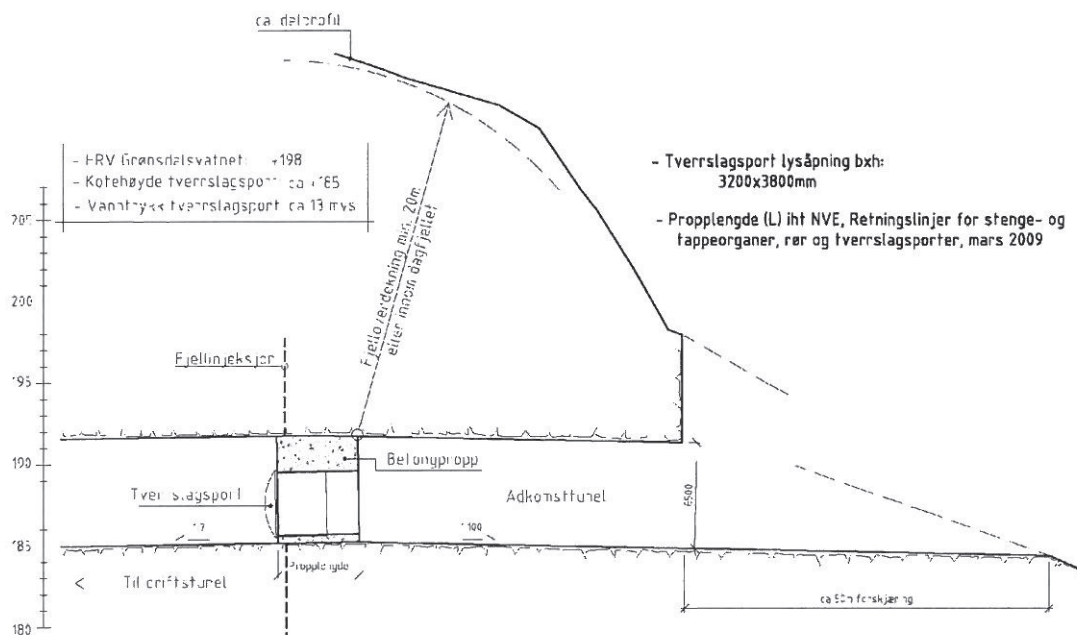
- o $L > 2xH$ (eller B)
- o Skjærspenning fjell/ betong $< 0,35 \text{ N/mm}^2$
- o Hydraulisk gradient $< 0,5 \text{ n/mm}^2/\text{m}$ eller 50 m vanntrykk per meter propplengde



Figur 1, Prinsipp tegning for betongpropp/ tverrslagsport ved steinfang

Porten må være tilstrekkelig stor til at utstyr for utkjøring av masser fra sandfang kan passere. Porten utformes og dimensjoneres for karakteristisk vanntrykk, og bør slå "innover", dvs inn mot vannsiden.

Tapperør med ventiler for tapping av restvann i tunnel mellom sandfang og propp støpes inn i proppen ved siden av tverrslagsporten.



Figur 2, Prinsipp tegning for tverrslagsport ved Børdalen

I tunneltverrslag ved Kvernelva skal etableres tverrslagsport som vist på figur 2.

Porten må være tilstrekkelig stor til at mindre gravemaskin, eller borerigg kan passere.

2.2 Sikkerhetskrav

Sikring av vannveier:

- Aktuelle tiltak i dagen er skjerming langs åpent vann med gjerde eller rekkverk, tilpasset de stedlige forhold.
- Risikovurdering skal foretas ut fra de konkrete forhold; konstruksjonens utforming og tilgjengelighet for almenheten; jfr S §7-6.
- Wire og blåser som sperrer eller fanger opp båt eller personer som flyter i strømmen mot inntaket/ damoverløpet.
- Rist i inntaksåpningen.
- Skilting ved dammer og inntaksområder, og langs regulerte elvestrekninger.
- Omfattende sikring mot uvedkommendes adgang til lukehus, tappeventiler, tverrslagsport, avløpstunnel og lignende; kfr S §7-7.
- S §5-16 krever omtanke angående risiko for luftutblåsning fra vannvei, og at det om nødvendig gjøres tiltak mot dette om det viser seg å skje.

Beskrivelser og anvisninger i "Faremomenter og sikringstiltak ved anlegg i vassdrag" gir eksempler på hva som må antas å kreves med hjemmel i lov/forskrift.

2.3 Krav fra drift og vedlikehold

- Tilsyn som krever nedtapping, frekvens:
Vannvei bør tørregges og inspiseres med henblikk på tunnelens tilstand og sedimenttransport etter 2-3 års drift, eventuelt kombinert med garantiutløpsbefaring på stålkomponentene etter 3 års drift.
Deretter kan frekvensen økes vesentlig, men avhengig av hva man finner ved første gangs inspeksjon, og knyttet opp mot tilstandsvurdering/korrosjonsbehandling av stålkomponentene i vannveien.
- Tilgang til komponenter i vannveien i driftsfasen
- Sikker tilgjengelighet til komponenter ved tilsyn og vedlikehold
- Revisjonsmuligheter
- Legge til rette for lett og sikkert grindrensk
- Sikkerhets mot allmennheten

2.4 Krav fra myndigheter/omgivelse

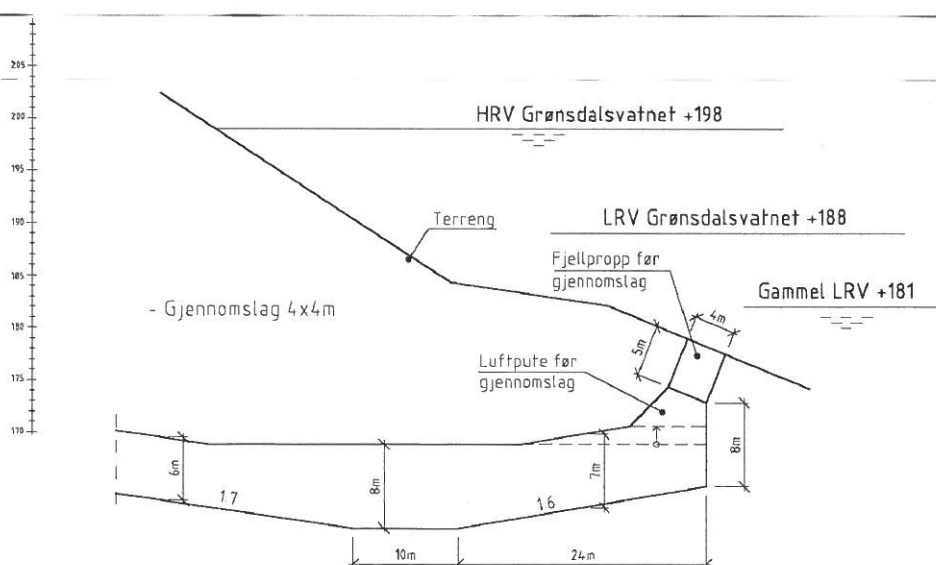
- Magasinoppfylling/ tapping etter manøvreringsreglement
- Krav til vannstandsmåling NV, i henhold til manøvreringsreglement.
- Krav til minstevannføring

3 Dimensjonering av vannvei

Inntak:

Utforming foran inntaket for mest mulig å opprettholde laminær innløpsstrømning og unngå virveldannelse.

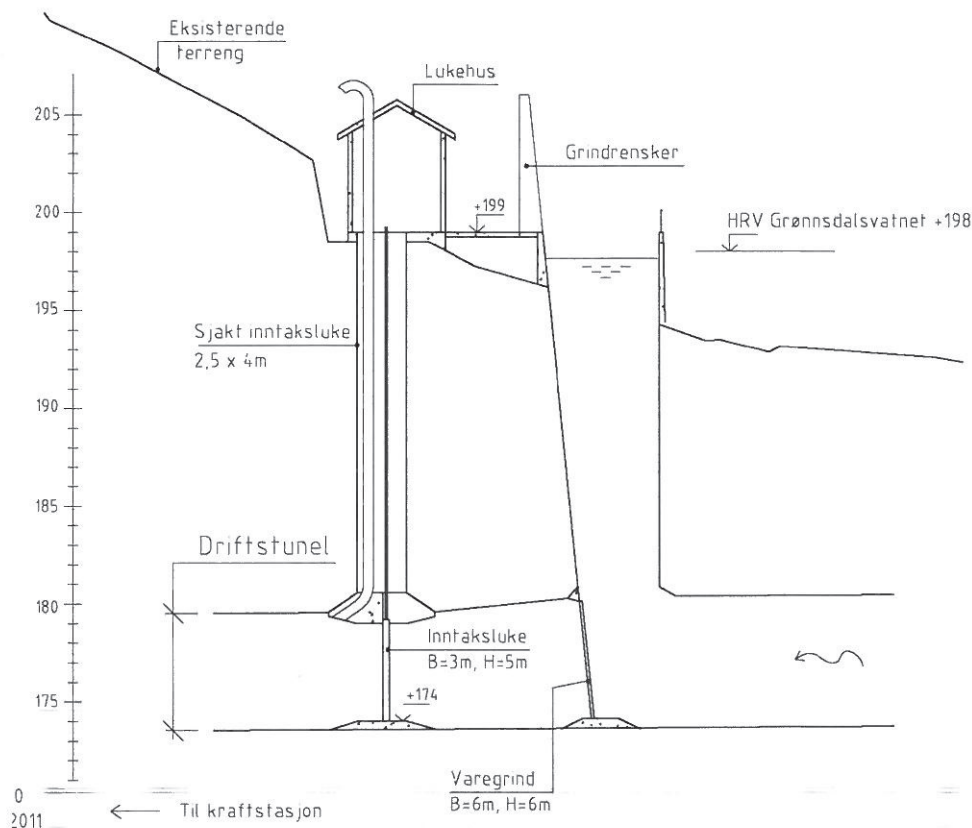
Dykking i innløpet avhengig av innstrømningstverrsnittet; anslagsvis 0,6 ganger tunnelhøgden når innløpshastigheten er 1m/sek. (ref Guttormsen Vassdragsteknikk II)



Figur 3, Utslag Grønsdalsvatnet, Prinsipptegning

Rist-tverrsnitt som gir 0,5-1 m/sek i gjennomstrømning, avhengig av hvor mye man vil basere seg på risterenssk.

Tverrsnitt av inntaks-og evt revisjonsluke som gir 2-3 m/sek i maks strømningshastighet.



Figur 4, Prinsipptegning for lukehus, inntak i Grønnsdalsvatnet

Tunnel:

Tverrsnitt dimensjoneres ut fra å minimalisere kapitalisert falltapskostnad over kraftverkets levetid. Det er da vesentlig å legge inn antatt framtidig variasjon i driftsvannføring, da driftsvarighet ved og nær makslast slår vesentlig ut. Ellers er inngangsparametrene den framtidige prisbanen pr kWh, og tunnelens marginalkostnadsøkning ved tverrsnittøkning.

Beregning utføres naturlig i samband med produksjonssimulering.

For å stoppe sedimenttransporten langs tunnelsålen bør tunnelen nær tverrslag, og rett før vannet går inn i rørføring, utvides til at maks strømningshastighet blir kun 0,4-0,5 m/sek.

Derved får man sedimentert partikler ned mot 1-2mm, forutsatt omtrent horisontal såle. Erosjonsvolum fra tunnelsåle kan antas i størrelsesorden 20-40 l/ pr m²; masser som det da bør være plass til på den strekningen som utvides for sedimentoppsamling.

Der tunnel har vesentlig fall i strømningsretningen må det avveies om sålen må finrenses for løsmasse. Dette er helt åpenbart når fallet blir 1:10 og større, men hvor grensa går må vurderes i det konkrete tilfellet.

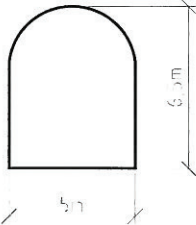
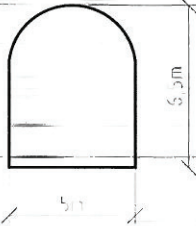
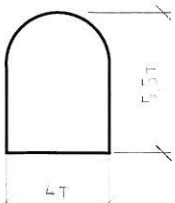
I denne sammenheng spiller det også vesentlig inn hvor forsiktig og langdryg oppfyllinga av vannsystemet utføres, både første gang og senere. I denne situasjonen vil jo tunnelsålen måtte fungere som et elveleie. Vanlig dybde av løsmasse i gjenliggende tunnelsåle er 0,3-0,6 m; altså vesentlige volum om de samler seg nederst i en tunnelparsell.

Med inntak i Grønsdalsvatn som det eneste er det gitt at fylling vil måtte skje derfra. Og "elvestrømning" vil da gjelde for hele tunnellengden.

Hele tunnellengden bør under alle driftsforhold ligge under trykklinja; dvs under trykklinja som beregnes ved Qmaks ved LRV vannstand i inntaksbassenget.

Lokale høgbrekk i tunnelen som ikke luftes ut automatisk bør unngås om mulig, da de samler luftlomme under drift og ved vassfylling av tunnelsystemet.

Lokale "lågbrekk" langs tunnelen som ikke kan dreneres via tappeventil, må forsøkes unngått. I alle fall må pumpevolum og løftehøyde gjøres så små som mulig.

Tunnel	Målskisse og areal	Beskrivelse
Trykktunnel		<ul style="list-style-type: none"> - Tunnellengde: 2 080 m - Tunnel tverrsnitt: 30 m² - Stigningsforhold: 1:18
Driftstunnel		<ul style="list-style-type: none"> - Tunnellengde: 3 470 m - Tunnel tverrsnitt: 30 m² - Stigningsforhold: ca 1:210
Avløpstunnel		<ul style="list-style-type: none"> - Tunnellengde: 200 m - Tunnel tverrsnitt: 20 m² - Stigningsforhold: 1:70

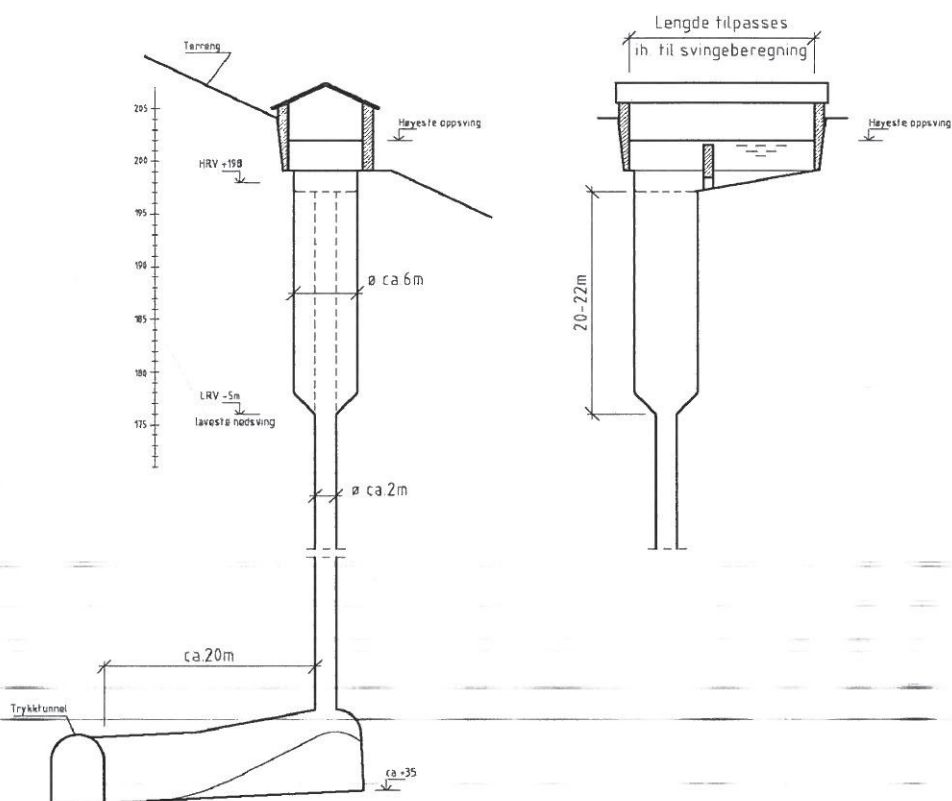
Figur 5, Vannvei oversikt, tverrsnitt, tunnellengde og stigning

Svingesjakt og svingekammer:

Hele det svingende systemet må modelleres (simuleres) i tid-sted-skala. Oppsving-volumet må tas vare på i kammer/basseng, så fremt det ikke kan gis utløp til vassdrag som uten skadevirkninger kan ta imot det aktuelle oppsving-volumet i form av utstrømning fra bassenget.

Norconsult har utført enkelt håndberegning basert på dagens forutsetninger og signalisert behov for svingesjakt/ svingekammer i vannvei. Prinsipp-tegning av svingesjakt er vist på figur 6.

I forbindelse med forprosjekt må svingemasse optimaliseres med tanke på totale byggekostnader.



Figur 6, Svingesjakt, prinsipp-tegning

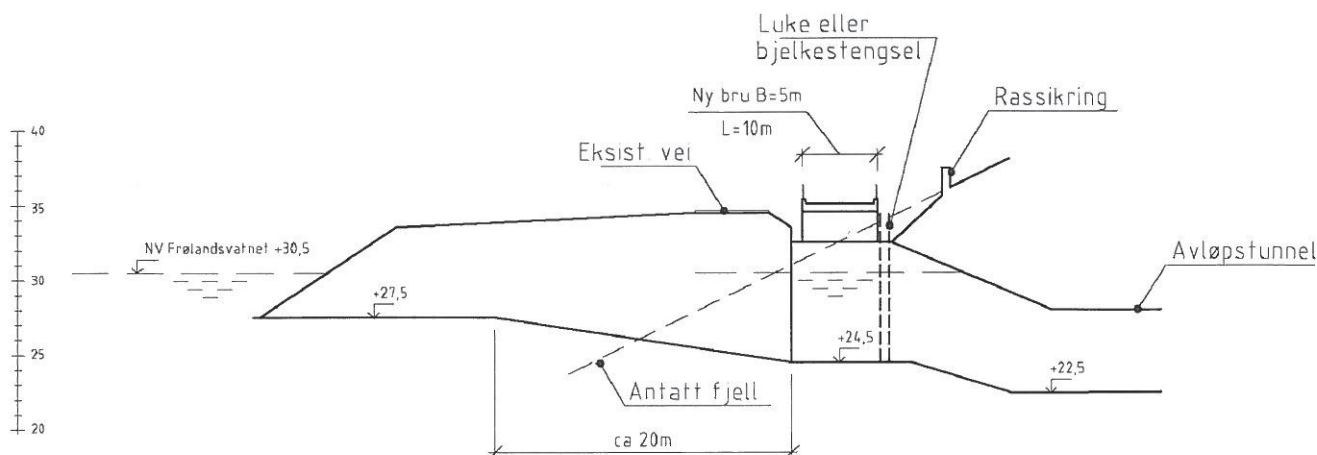
Avløpstunnel, utløp i Frølandsvatnet:

Avløpet fra kraftstasjonen går ut i Frølandsvatnet gjennom en 200 m lang avløpstunnel med utslaget øst for Fv134. Videre føres vannet under veien gjennom ca 40m langt avløpskanal ut i Frølandsvatnet.

Utløpet er planlagt å ligge på kote 27,5 som er ca 3m under NV Frølandsvatnet.

Over avløpskanal legges Fv134 om over ny ca 10m langt betong bru. Antatt brulengde er ca 10m. Prinsipp-skisse for utløp i Frølandsvatnet er vist på figur 7.

Endelig plassering og teknisk utforming av utløpet skal bestemmes under detaljprosjektering og etter utført grunnundersøkelse rundt utløpssted.



Figur 7, Utløp i Frølandsvatnet, prinsipptegning

Mekaniske komponenter i vannvei:

Det vil være en hovedstengeventil ovenfor turbinen som i kostnadsestimatet ligger inne i turbinkostnaden.

Inntaks- og revisjonsluke:

Inntaksluken har som hovedfunksjon å stenge tilløpstunnelen mot inntaksmagasinet.

Luken utformes

som en rulleluke som skal være selvlukkende ved full vannføring (for bruddkonsekvensklasse 2, 3 og 4 er det krav om automatisk og fjernutløst rørbruddsventil/-luke).

Av vedlikeholdshensyn kan plasseres en revisjonsluke oppstrøms inntaksluken (behov vurderes).

Varegrind plasseres normalt oppstrøms lukene, og må være tilgjengelig for rensing/vedlikehold.

Luke manøvreres med hydraulikkylinder og hydraulikkaggregat som er plassert i lukehuset over lukesjakten. Luke dimensjoneres mekanisk for maksimalt statisk trykk, og arealet av luker og varegrind er bestemt av tillatte strømningshastigheter.

Følgende foreløpige arealer er beregnet:

Inntaks- og evt. revisjonsluke: $A=15\text{m}^2$

Varegrind: $A=36\text{m}^2$

Sugerørsluker

Sugerørslukene sørger for avstenging mot avløpssiden i forbindelse med revisjon og vedlikehold av turbinene. Lukene åpnes med wirespill fra lukekammeret, og skal kunne lukke ved egen vekt.

Alternative drivordninger (hydraulisk sylinder, tannstang) kan vurderes.

Lukene dimensjoneres mekanisk for maksimalt statisk trykk i undervannet, og arealet av lukene er bestemt av tillatte strømningshastigheter. Lukene konstrueres for å slå utover i tilfelle feilmanøvrering, dvs. lukking under drift.

4 Vedlegg

Tegninger:

- | | | | |
|----|------------------|--|---------|
| 1. | Tegn.nr.: 118678 | Situasjonsplan og arealdisponeringsplan
Oversikt, Kraftstasjonsområde | Rev. F0 |
| 2. | Tegn.nr.: 118679 | Situasjonsplan og arealdisponeringsplan
Oversikt, tverrslag Børdalen og utslag
Grønsdalsvatnet | Rev. F0 |
| 3. | Tegn.nr.: 118681 | Vannvei lengdeprofil, Oversikt tunnelsystem | Rev. F0 |



BKK Produksjon AS
Divisjon Prosjekter og Teknologi

Kokstadvegen 37
Postboks 7050
5020 BERGEN

Telefon: 55 12 70 00
Telefaks: 55 12 70 01
e-post: Firmapost@bkk.no

BKK dokumentnr.:

IDA.dok.: 11076781

Tittel:

Kravspesifikasjon bygg, vannvei Aldal kraftverk (2-031)

Hovedstudie Aldal/Frøland, Samnanger

Revisjon	Revisjonen gjelder	Utarb. av	Dato	Kontr. av	Godkjent av	Oppdragsgiver godkjent
0	Første utgave	MDE	17/3-11	OLØ	AHO	-
1	Diverse revisjon	MDE	31/3-11	OLØ	AHO	

Oppdragsgiver: BKK Produksjon AS

**Ref.:
Prosjekteier K Andersen
Prosjektansvarlig K Rem**

1 Oppsummering

Aldal kraftverk vil utnytte et fall på 198 meter mellom inntaket i Grønsdalsvatnet og Samnangerfjorden ved Aldal. Kraftstasjonen blir plassert i fjell ved Aldal (under Lønnebakken- Helgetona). Avløpet fra kraftstasjonen går ut i sjøen gjennom en 450 m lang avløpstunnel ut i Aldalsbukta.

Driftstunnelen blir totalt 6000 m lang. Fra kraftstasjonen i ca 1000m lengde vil tunnelen (trykktunnel) gå på jevnt stigning 1:8 til avgreiningstunnel til Aldalselva. De første 50-70 m vil være stålføret.

Videre fortsetter ca 4000m langt driftstunnel på en stigning 1:150 til inntaket i Grønsdalsvatnet.

Avgreining til bekkeinntaket i Aldalselva blir ca 1000 m.

Tunnelane er planlagt bygd fra to anleggsområde, fra Aldal og fra et tunneltverrslag ved Kvernelva.

Kvernelva er planlagt inn på driftstunnelen i ett kort sjakt ned i tverrslagstunnelen. Tverrslagstunnelen ved Kvernelva vil bli om lag 300 m.

Like etter avgreiningen og mot bekkeinntaket i Aldalselva er planlagt bygd svingekammer med luftesjakt. Luftesjakta vil få et mindre overbygg i friluft ovenfor Dalane.

Det blir bygd nytt inntak i Grønsdalsvatnet med inntaksluke i lukesjakt, lukehus og grindrensker.

2 Funksjonelle krav

2.1 Forskriftskrav (normer og standarder)

Forskriftskrav og normer som skal/bør følges er i hovedsak relatert mot NVEs Sikkerhetsforskrift, hjemlet i "Vannressursloven".

Liketedes prinsipper/normer for dimensjonering av vannvei.

Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften) skal anvendes på vassdragsanlegg i konsekvensklasse 0-4 (jfr § 1-4. Virkeområde)

Veiledere:

- NVE sin "Veileder i planlegging, bygging og drift av småkraftverk" fra 2010
- NVE sin "Små damer" veileder for planlegging, bygging og vedlikehold, fra 2006
- "Retningslinjer for betongdammer" til § 4.8 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg; utgave 2 – oktober 2005.

Betegnelsen "S" er referanse til "Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg"

Dam

(omfatter, dam Grønsdalsvatn og bekkeinntak/dam i Aldalselva og Kvernelva)

- o Adkomst:

Ingen konsise krav. men generelt formulert at der må være funksjonell adkomst i samsvar med betjeningsbehov.(S § 5-6)

- Inntak:
(omfatter hovedinntak i Grønsdalsvatn og bekkeinntak Aldalselva og Kverneelva)
Stenge og tappeorgan i henhold til §5-14 i S
Styrkedimensjonering etter kriterier/lastsituasjoner i S §5-3 og påfølgende §§.

Sjakt

- Installasjoner i sjakt:
(Gjelder lukesjakt)
Nedstigningsleder med repoer, som må utføres etter relevante regler. Kfr Arbeidstilsynets forskrift, evt. Teknisk forskrift under PBL.
- Ventilasjonsluft:
Lukehus og evt. svingekammer blir utstyrt med lufterør som munn ut i dagen, og som kan gi kraftig sug eller utblåsning, med de farer som det medfører. Det bør opprettes sikringstiltak slik at uvedkommende ikke kommer i farlig nærhet til slike steder.

Vanntunneler

- Hydraulisk optimal tverrsnitt:
Ingen forskriftskrav, men det vises til pkt 3

- Overdekning:

Nødvendig overdekning til dagen finnes på to måter:

1. Ved å anta neddykket romvekt på fjell lik 1,6
2. Likevektsberegninger.

Beregningene nevnt i pkt 1 og 2 er utført av Multiconsult og er en del av rapport: BKK – utbygging av Samnanger vassdraget - Ingeniørgeologisk vurdering.

Beregningene vise at krav til minimum overdekning for Aldal kraftverk er 124m (pkt. 1).

Kraftstasjon er planlagt plassert med en fjelloverdekning på ca 160m.

Ellers er der sikkert hjemler i Vannressursloven som slår inn i tilfelle en vannførende tunnel i noen grad endrer grunnvannsforholdene i terrenget(overflata), noe det er fare for hvis den ligger for nær opp mot overflata.

Ligger tunnelen så grunt at vekt av overliggende fjell ikke overgår hydraulisk løft, oppstår krav om hel foring av tunnelen; også hjemlet i S.

- Foring av trykktunnel:

Fra innløpsrøret for turbinen legges det trykkrør et stykke oppover i driftstunnel. Dette er av to grunner:

- For å oppnå nødvendig fjelloverdekning til dagen ift vanntrykket
- For å minimalisere lekkasjevann mot fjellhall

Beregningene utført av Multiconsult viser at minimumskrav til foring av trykktunnel er 40m.

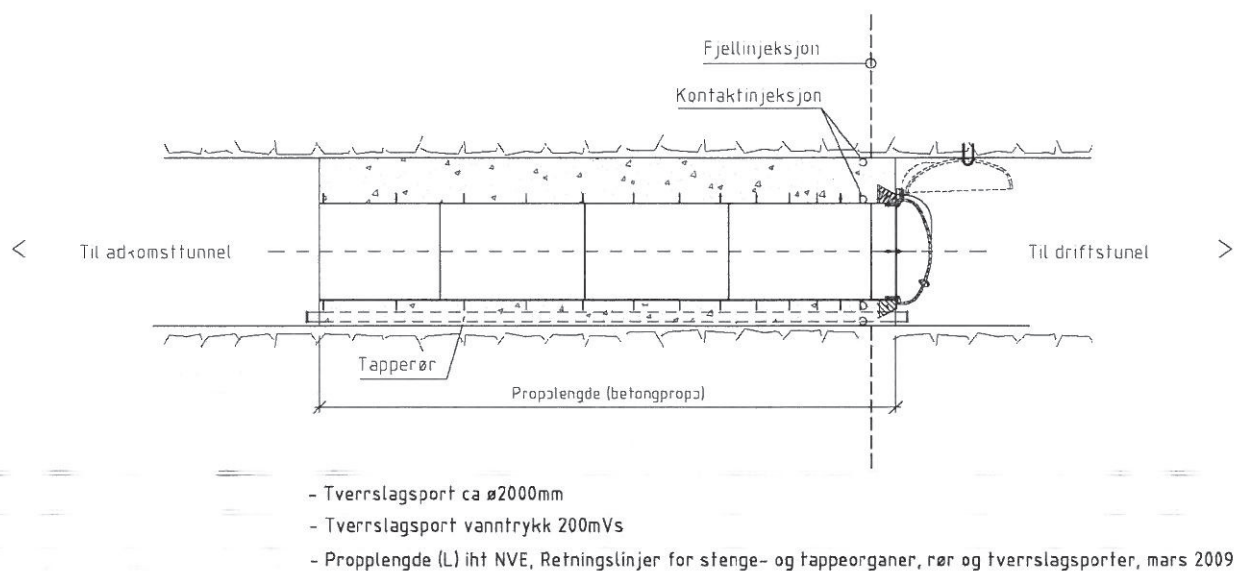
Betongpropp og tverrslagsport:

Det etableres en betongpropp/ tverrslagsport i overgangen transporttunnel og driftstunnel.

Tunnelen snevres inn for å redusere omfang av betongarbeidet.

Proppen skal dimensjoneres etter Utkast til retningslinje for rør- og tappeorganer fra mars 2009 med følgende krav:

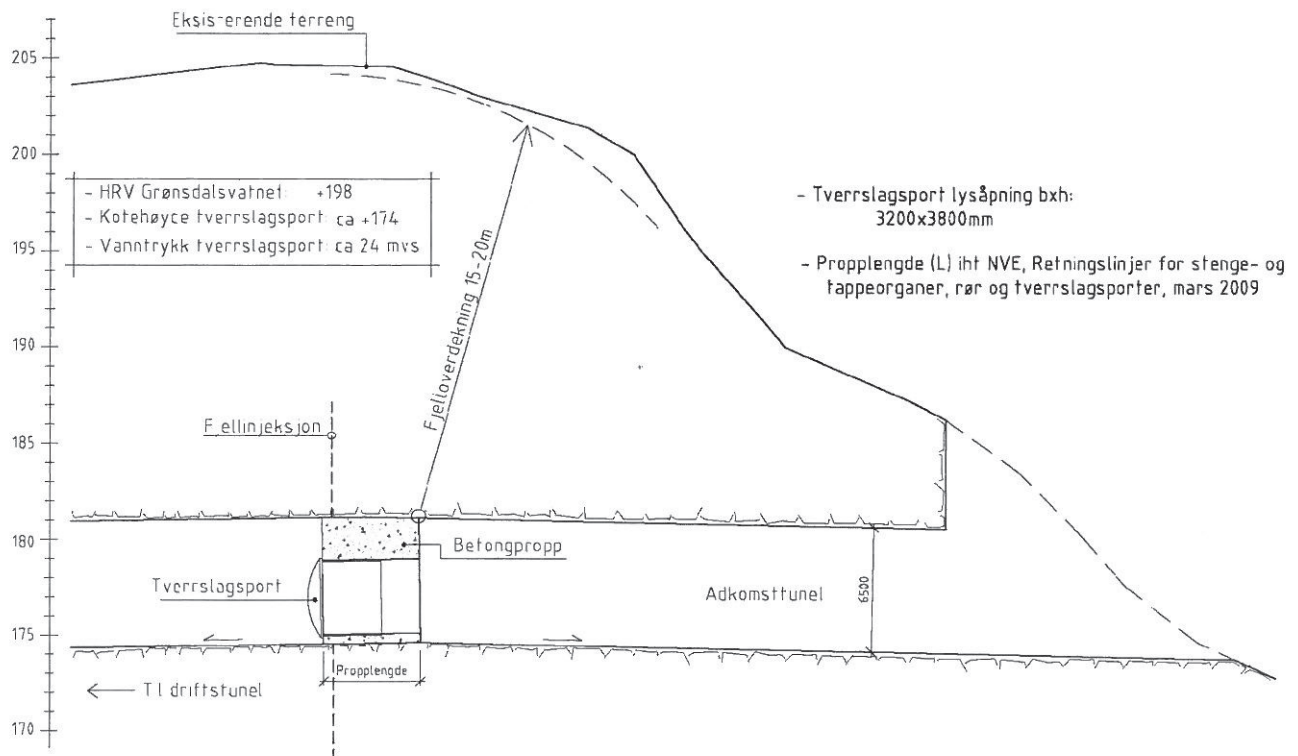
- $L > 2 \times H$ (eller B)
- Skjærspenning fjell/ betong $< 0,35 \text{ N/mm}^2$
- Hydraulisk gradient $< 0,5 \text{ n/mm}^2/\text{m}$ eller 50 m vanntrykk per meter propplengde



Figur 2 Prinsipp tegning for betongpropp/ tverrslagsport ved steinfang

Porten må være tilstrekkelig stor til at utstyr for utkjøring av masser fra sandfang kan passere. Porten utformes og dimensjoneres for karakteristisk vanntrykk, og bør slå "innover", dvs inn mot vannsiden.

Tapperør med ventiler for tapping av restvann i tunell mellom sandfang og propp støpes inn i proppen ved siden av tverrslagsporten.



Figur 3 Prinsipptegning for tverrslagsport ved Kvernelva

I tunneltverrslag ved Kvernelva skal etableres tverrslagsport som vist på figur 3.

Porten må være tilstrekkelig stor til at mindre gravemaskin, eller borerigg kan passere.

2.2 Sikkerhetskrav

Sikring av vannveier:

- Aktuelle tiltak i dagen er skjerming langs åpent vann med gjerde eller rekkverk, tilpasset de stedlige forhold.
- Risikovurdering skal foretas ut fra de konkrete forhold; konstruksjonens utforming og tilgjengelighet for allmennheten; jfr S §7-6.
- Wire og blåser som sperrer eller fanger opp båt eller personer som flyter i strømmen mot inntaket/ damoverløpet.
- Rist i inntaksåpningen.
- Skilting ved dammer og inntaksområder, og langs regulerte elvestrekninger.
- Omfattende sikring mot uvedkommendes adgang til lukehus, tappeventiler, tverrslagsporter og lignende; kfr S §7-7.
- S §5-16 krever omtanke angående risiko for luftutblåsning fra vannvei, og at det om nødvendig gjøres tiltak mot dette om det viser seg å skje.

Beskrivelser og anvisninger i "Faremomenter og sikringstiltak ved anlegg i vassdrag" gir eksempler på hva som må antas å kreves med hjemmel i lov/forskrift.

2.3 Krav fra drift og vedlikehold

- Tilsyn som krever nedtapping, frekvens:

Vannvei bør tørrlegges og inspiseres med henblikk på tunnelens tilstand og sedimenttransport etter 2-3 års drift, eventuelt kombinert med garantiutløpsbefaring på stålkompomentene etter 3 års drift. Deretter kan frekvensen økes vesentlig, men avhengig av hva man finner ved første gangs inspeksjon, og knyttet opp mot tilstandsvurdering/ korrosjonsbehandling av stålkompomentene i vannveien.

- Tilgang til komponenter i vannveien i driftsfasen
- Sikker tilgjengelighet til komponenter ved tilsyn og vedlikehold
- Revisjonsmuligheter
- Legge til rette for lett og sikkert grindrensk
- Sikkerhets mot allmennheten

2.4 Krav fra myndigheter/omgivelse

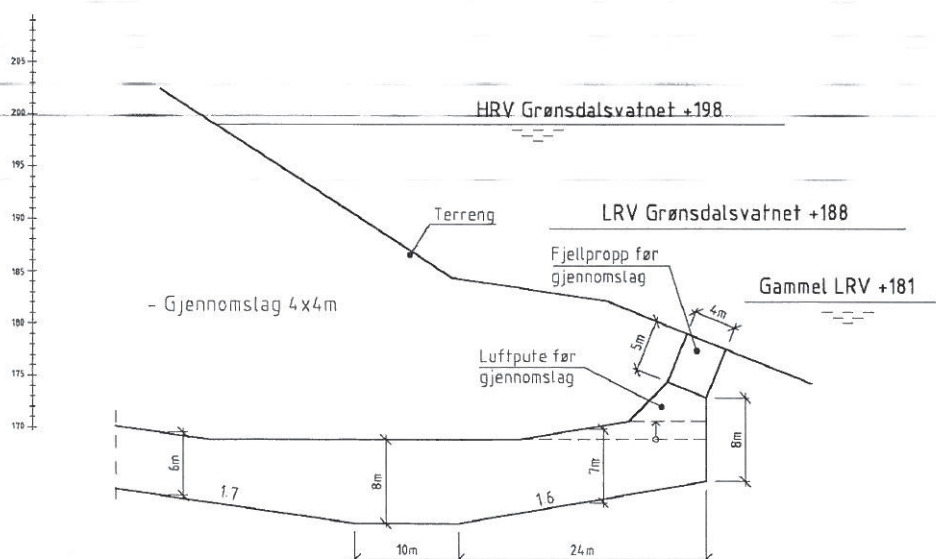
- Magasinoppfylling/ tapping etter manøvreringsreglement
- Krav til vannstandsmåling NV, i henhold til manøvreringsreglement.
- Krav til minstevannføring

3 Dimensjonering av vannvei

Inntak:

Utforming foran inntaket for mest mulig å opprettholde laminær innløpsstrømning og unngå virveldannelse.

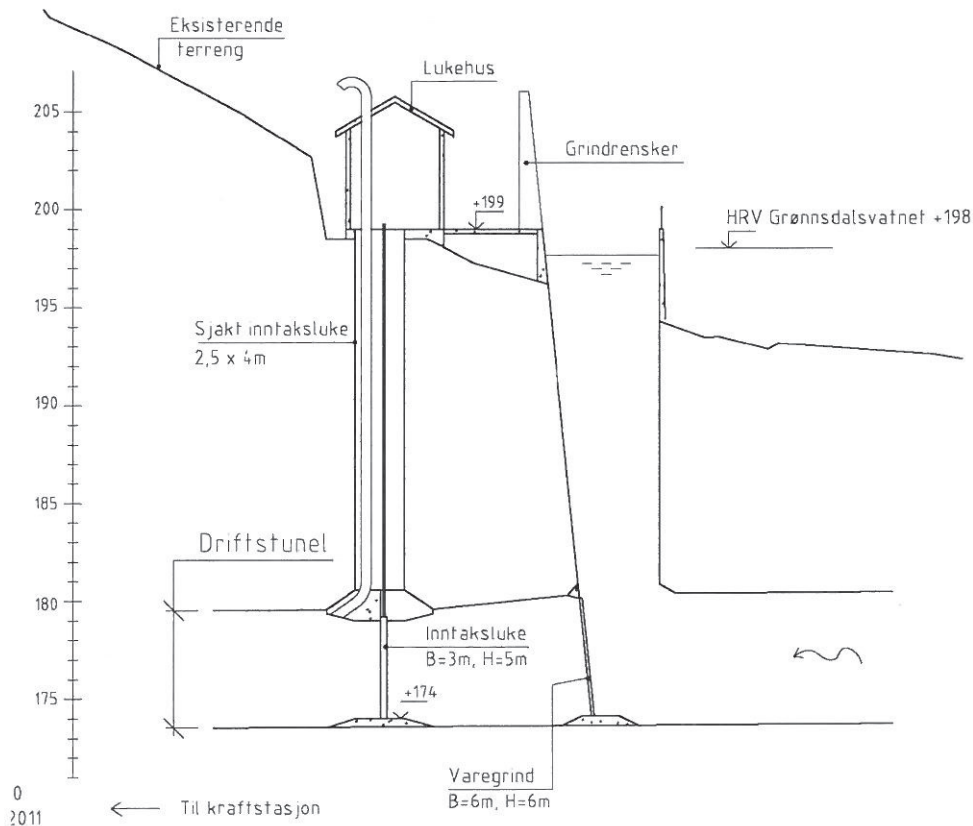
Dykking i innløpet avhengig av innstrømningstverrsnittet; anslagsvis 0,6 ganger tunnelhøgden når innløpshastigheten er 1m/sek. (ref Guttormsen Vassdragsteknikk II)



Figur 4, Utslag Grønsdalsvatnet, Prinsipptegning

Rist-tverrsnitt som gir 0,5-1 m/sek i gjennomstrømning, avhengig av hvor mye man vil basere seg på risterenssk.

Tverrsnitt av inntaks-og evt revisjonsluke som gir 2-3 m/sek i maks strømningshastighet.



Figur 5, Prinsipp tegning for lukehus, inntak i Grønnsdalsvatne

Tunnel:

Tverrsnitt dimensjoneres ut fra å minimalisere kapitalisert falltapskostnad over kraftverkets levetid. Det er da vesentlig å legge inn antatt framtidig variasjon i driftsvannføring, da driftsvarighet ved og nær makslast slår vesentlig ut. Ellers er inngangsparametrene den framtidige prisbanen pr kWh, og tunnelens marginalkostnadsøkning ved tverrsnittøkning.

Beregning utføres naturlig i samband med produksjonssimulering.

For å stoppe sedimenttransporten langs tunnelsålen bør tunnelen nær tverrslag, og rett før vannet går inn i rørføring, utvides til at maks strømningshastighet blir kun 0,4-0,5 m/sek.

Derved får man sedimentert partikler ned mot 1-2mm, forutsatt omtrent horisontal såle. Erosjonsvolum fra tunnelsåle kan antas i størrelsesorden 20-40 l/ pr m²; masser som det da bør være plass til på den strekningen som utvides for sedimentoppsamling.

Der tunnel har vesentlig fall i strømningsretningen må det avveies om sålen må finrenses for løsmasse. Dette er helt åpenbart når fallet blir 1:10 og større, men hvor grensa går må vurderes i det konkrete tilfellet.

I denne sammenheng spiller det også vesentlig inn hvor forsiktig og langdryg oppfyllinga av vannsystemet utføres, både første gang og senere. I denne situasjonen vil jo tunnelsålen måtte fungere som et elveleie. Vanlig dybde av løsmasse i gjenliggende

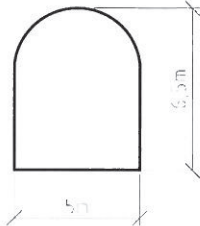
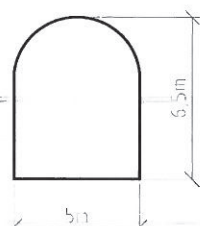
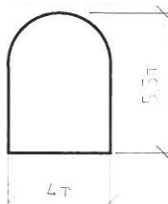
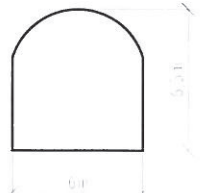
tunnelsåle er 0,3-0,6 m; altså vesentlige volum om de samler seg nederst i en tunnelparsell.

Med inntak i Grønsdalsvatn som det eneste er det gitt at fylling vil måtte skje derfra. Og "elvestrømning" vil da gjelde for hele tunnallengden.

Hele tunnallengden bør under alle driftsforhold ligge under trykklinja; dvs under trykklinja som beregnes ved Q_{maks} ved LRV vannstand i inntaksbassenget.

Lokale høgbrekk i tunnelen som ikke luftes ut automatisk bør unngås om mulig, da de samler luftlomme under drift og ved vassfylling av tunnelsystemet.

Lokale "lågbrekk" langs tunnelen som ikke kan dreneres via tappeventil, må forsøkes unngått. I alle fall må pumpevolum og løftehøyde gjøres så små som mulig.

Tunnel	Målskisse og areal	Beskrivelse
Trykktunnel		<ul style="list-style-type: none"> - Tunnellengde: 1 190m - Tunnel tverrsnitt: 30 m² - Stigningsforhold: 1:8
Driftstunnel		<ul style="list-style-type: none"> - Tunnellengde: 3 880m - Tunnel tverrsnitt: 30 m² - Stigningsforhold: variere fra 0 - 1:150
Tunnel til bekkeinntak Aldalselva		<ul style="list-style-type: none"> - Tunnellengde: 1 040m - Tunnel tverrsnitt: 20 m² - Stigningsforhold: variere fra 1:13 - 1:170
Avløpstunnel		<ul style="list-style-type: none"> - Tunnellengde: 460m - Tunnel tverrsnitt: 35 m² - Stigningsforhold: varierer fra 0 - 1:7

Figur 7, Vannvei oversikt, tverrsnitt, tunellengde og stigning

Bekkeinntak:

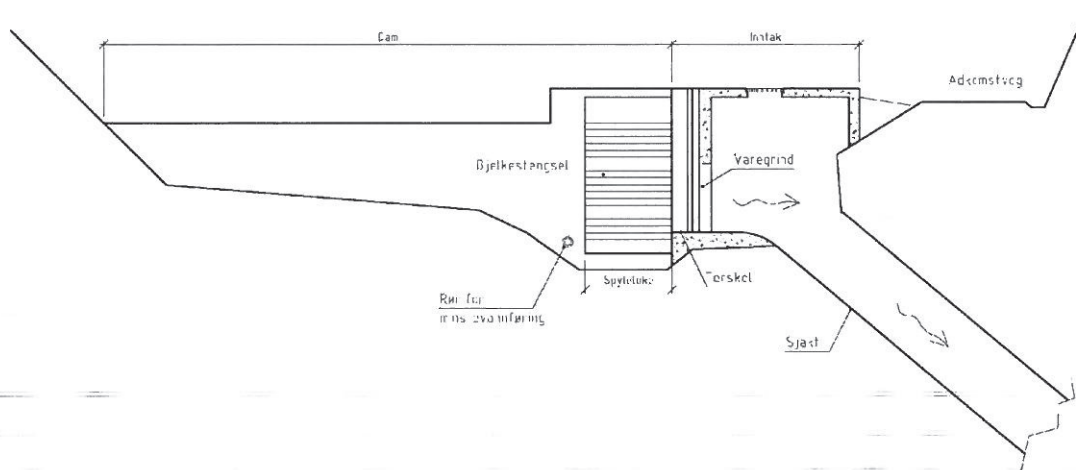
Kvernelva er planlagt inn på driftstunnelen i en kort sjakt ned i tverrslagstunnelen.

Aldalselva tas inn i driftstunell med en ca 1000m langt avgreiningstunnel og en kort sjakt mot inntaket.

Inntakene er planlagt utført som et sideinntak utstyrt med varegrind og bjelkestengsel. Inntaksdam er planlagt utført som massivdam i betong og utstyrt med spyleluke med bjelkestengsel og arrangement for slipping og logging av pålagt minstevannføring. Prinsippskisse for bekkeinntak er vist på figur 6.

Det er planlagt å bygge ny (kjørbart) adkomstvei til begge bekkeinntak. Behov for inntakshus vurderes under detaljprosjektering.

For detaljprosjektering vises det til NVEs rapport 6/2003 Grunne inntak.



Figur 6, Bekkeinntak, Prinsippskisse (oppriss)

Foreslått minstevannføring:

- Aldalselva nedenfor bekkeinntak: 50 l/s vinter og 100 l/s sommer
- Kvernelva nedenfor bekkeinntak: 20 l/s hele året

Sjakt:

Tverrsnittdimensjonering etter samme økonomioptimalisering som tunnel under forutsetning at den er del av tilløpssystemet.

I tilfelle det er en bekkeinntakssjakt blir det mer skjønnsmessig i forhold til hvor stor slukeevne man vil ha inn fra bekkeinntaket, avveid mot inntakets overhøyde i relasjon til trykklinja.

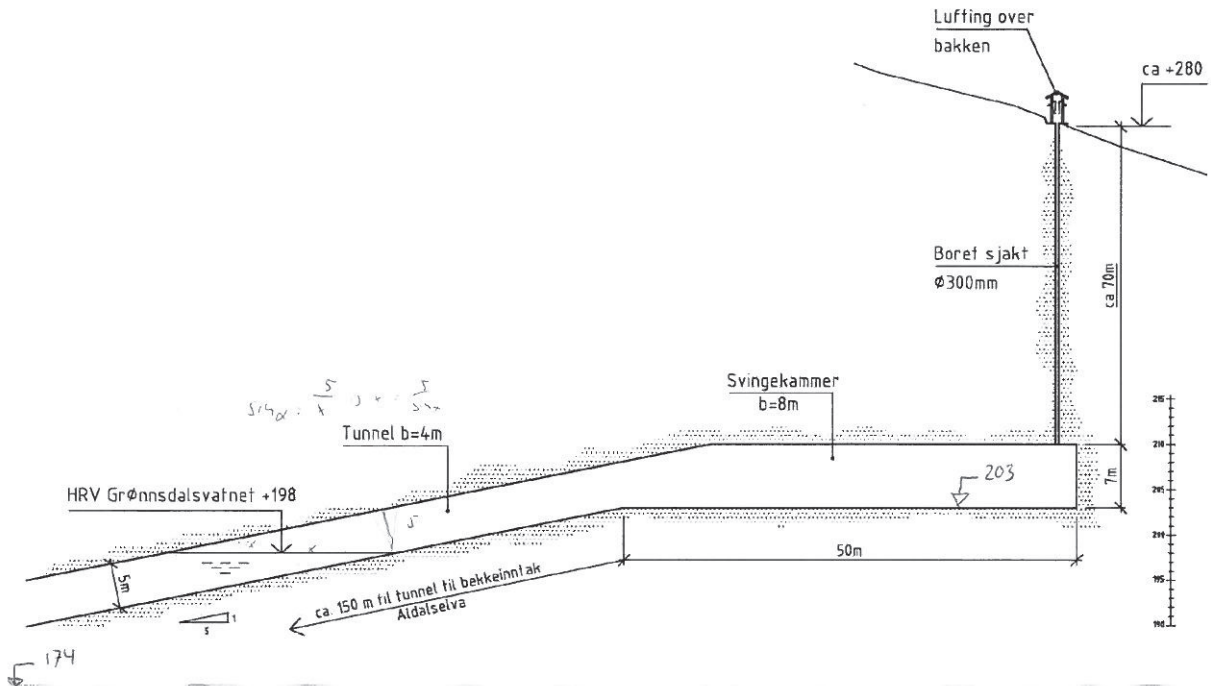
Svingesjakt og svingekammer:

Hele det svingende systemet må modelleres (simuleres) i tid-sted-skala.

Oppsving-volumet må tas vare på i kammer/basseng, så fremt det ikke kan gis utløp til vassdrag som uten skadevirkninger kan ta imot det aktuelle oppsving-volumet i form av utstrømning fra bassenget.

Norconsult har utført enkelt håndberegning basert på dagens forutsetninger og signalisert behov for svingesjakt/ svingekammer i vannvei. Prinsipptegning av svingekammer er vist på figur 8.

I forbindelse med forprosjekt må svingemasse optimaliseres med tanke på totale byggekostnader.



Figur 8, Svingekammer, prinsipptegning

Avløpstunnel, neddykket avløp:

Avløpet fra kraftstasjonen går ut i sjøen gjennom en 450 m lang avløpstunnel ut i Aldalsbukta. Utløpet er planlagt å ligge på kote minus 25. Det medfører at siste 45 -60 m av avløpstunnelen blir drevet under sjøen. På grunnlag over sjødybde kart over Samnanger fjorden er gjennomsnittlig helling på sjøbunnen over avløpstunnelen er ca 22°. Avløpstunnelen har ca 14m overdekning ved sjøoverflate.

Det er å forvente at under driving av avløpstunnelen oppstår overflatesprekker som kan påvirke stabiliteten og innlekkasje av vann. Det bør legges stor vekt på planlegging og gjennomføring av økende sikringstiltak i tunnelen.

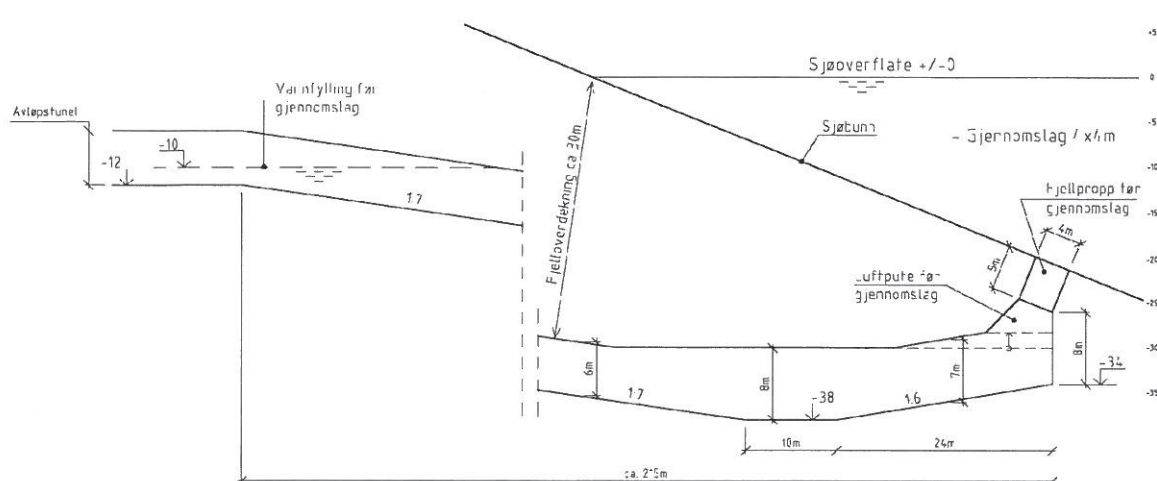
Selve utslaget bør utformes mest mulig vinkelrett på bergoverflaten. Det er viktig med god salvegeometri av pluggen som skal sprenges.

Tunnelen utføres et markert lavbrekk, i den hensikt å hindre inntrengning av saltvann mot turbinen.

Endelig plassering av utslaget skal bestemmes under detaljprosjektering og etter at seismiske innmålinger av utslagssted er utført.

Atkomst til avløpstunnelen drives på synk fra transporttunnelen. Denne fungerer også

som svingekammer for avløpssiden.



Figur 9, Utslag under sjø, prinsipptegning

Mekaniske komponenter i vannvei:

Det vil være en hovedstengeventil ovenfor turbinen som i kostnadsestimatet ligger inne i turbinkostnaden.

Inntaks- og revisjonsluke:

Inntaksluken har som hovedfunksjon å stenge tilløpstunellen mot inntaksmagasinet.

Luken utformes

som en rulleluke som skal være selvlukkende ved full vannføring (for bruddkonsekvensklasse 2, 3 og 4 er det krav om automatisk og fjernutløst rørbruddsventil/-luke).

Av vedlikeholdshensyn kan plasseres en revisjonsluke oppstrøms inntaksluken (behov vurderes).

Varegrind plasseres normalt oppstrøms luken, og må være tilgjengelig for rensking/vedlikehold.

Luke manøvreres med hydraulikksylinder og hydraulikkaggregat som er plassert i lukehuset over lukesjakten. Luke dimensjoneres mekanisk for maksimalt statisk trykk, og arealet av luker og varegrind er bestemt av tillatte strømningshastigheter.

Følgende foreløpige arealer er beregnet:

Inntaks- og evt. revisjonsluke: $A=15\text{m}^2$

Varegrind: $A=36\text{m}^2$

Sugerørsluker

Sugerørslukene sørger for avstenging mot avløpssiden i forbindelse med revisjon og vedlikehold av turbinene. Lukene åpnes med wirespill fra lukekammeret, og skal kunne lukke ved egen vekt.

Alternative drivordninger (hydraulisk sylinder, tannstang) kan vurderes.

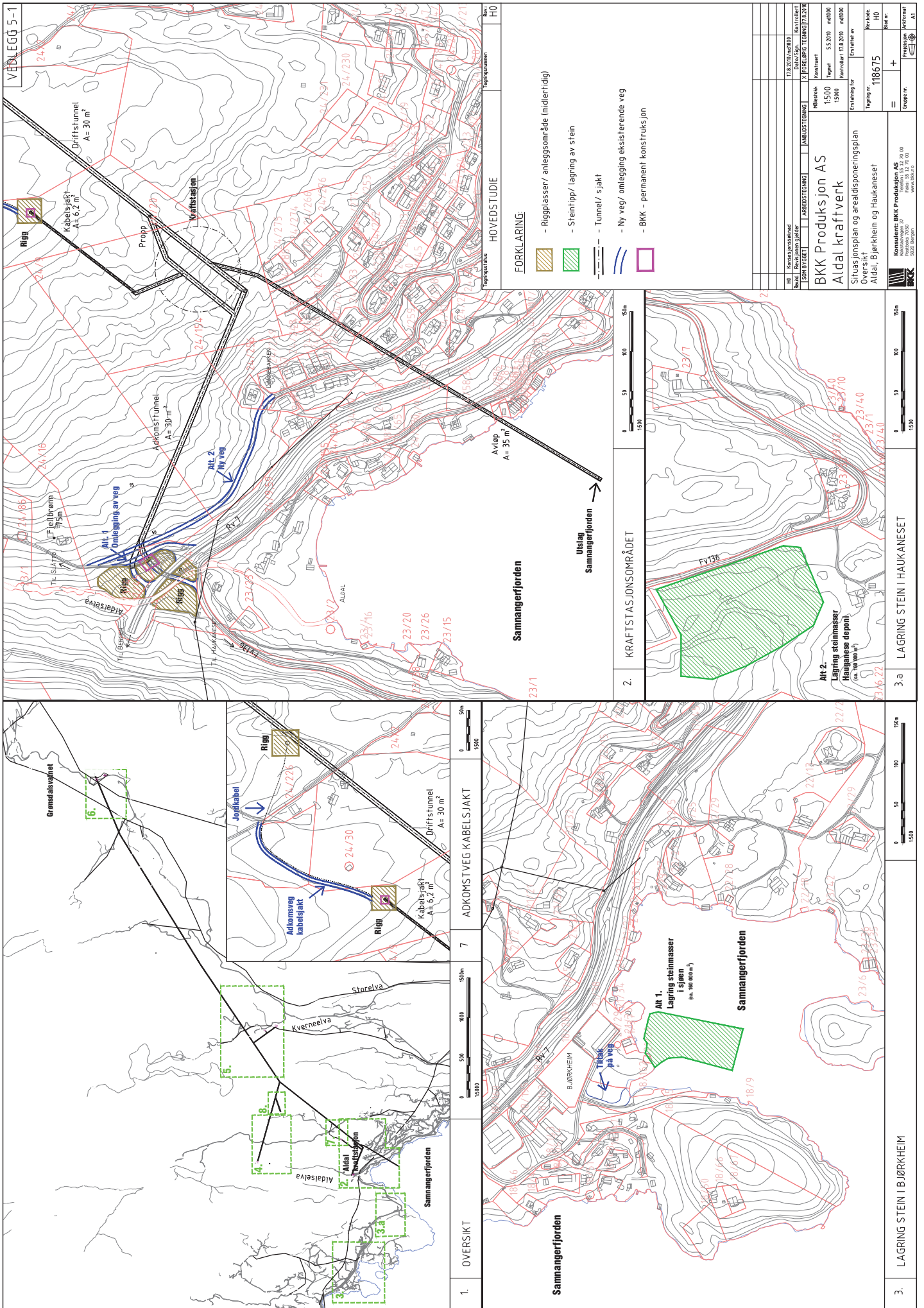
Lukene dimensjoneres mekanisk for maksimalt statisk trykk i undervannet, og arealet av lukene er bestemt av tillatte strømningshastigheter. Lukene konstrueres for å slå utover i tilfelle feilmanøvrering, dvs. lukking under drift.

4 Vedlegg

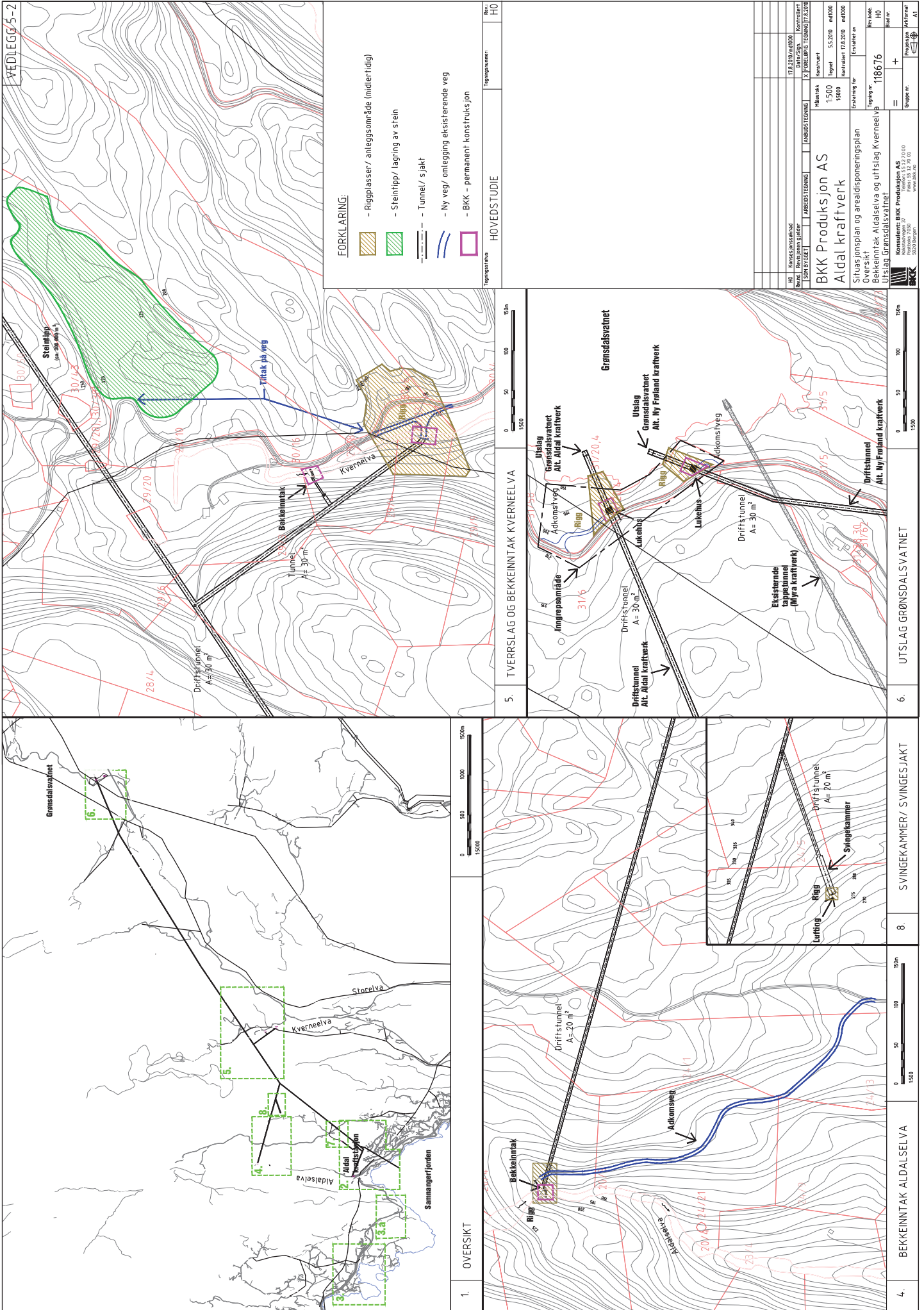
Tegninger:

- | | | | |
|----|------------------|---|---------|
| 1. | Tegn.nr.: 118675 | Situasjonsplan og arealdisponeringsplan
Aldal, Bjørkheim og Haukaneset | Rev. F0 |
| 2. | Tegn.nr.: 118676 | Situasjonsplan og arealdisponeringsplan
Bekkeinntak Aldalselva, utslag Kverneelva,
utslag Grønsdalsvatnet | Rev. F0 |
| 3. | Tegn.nr.: 118680 | Vannvei lengdeprofil, Oversikt tunnelsystem | Rev. F0 |

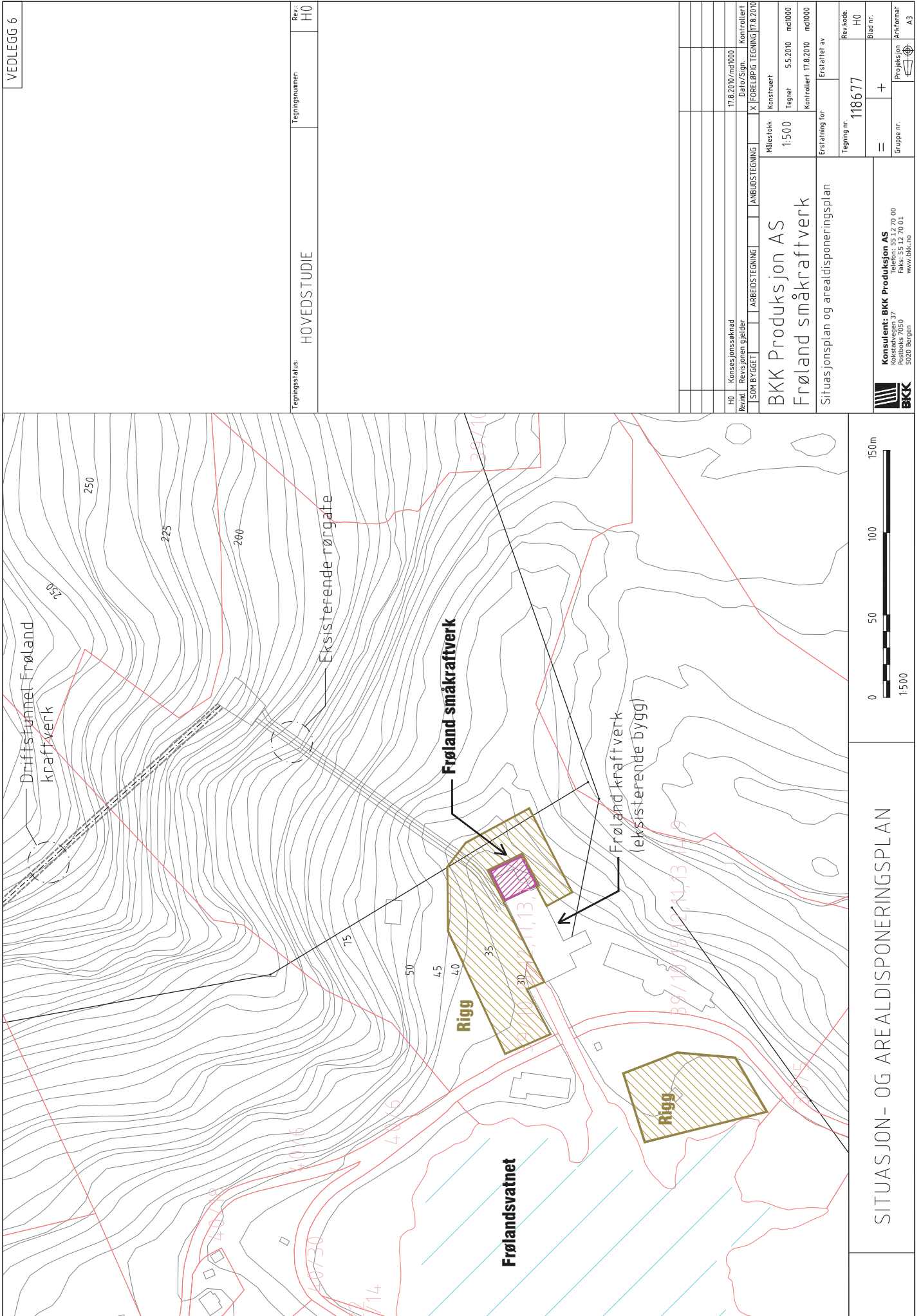
Vedlegg 3 - Tunnel- og kartunderlag



Vedlegg 3 - Tunnel- og kartunderlag



Vedlegg 3 - Tunnel- og kartunderlag



VEDLEGG 6	
Tegningsstatus: HOVEDSTUDIE	Rev. H0
Tegningsnummer:	

H0	Konsesjonsaknad	17.8.2010/md1000	Kontrollert
Rev.	Revisjonen gjelder		
SOM BYGGET	ARBEDS-TEGNING	ANBUDS-TEGNING	X FORELØP-TEGNING (17.8.2010)
Målestokk	1:500	Konstruert	
Tegnet	5.5.2010	md1000	
Kontrollert	17.8.2010	md1000	
Erstatning for	Erstatning av		
Tegning nr.	118677	Rev.kode	H0
Blad nr.	=	Blad nr.	
Gruppenr.		Prosjektnr.	Artfornr.
			A3

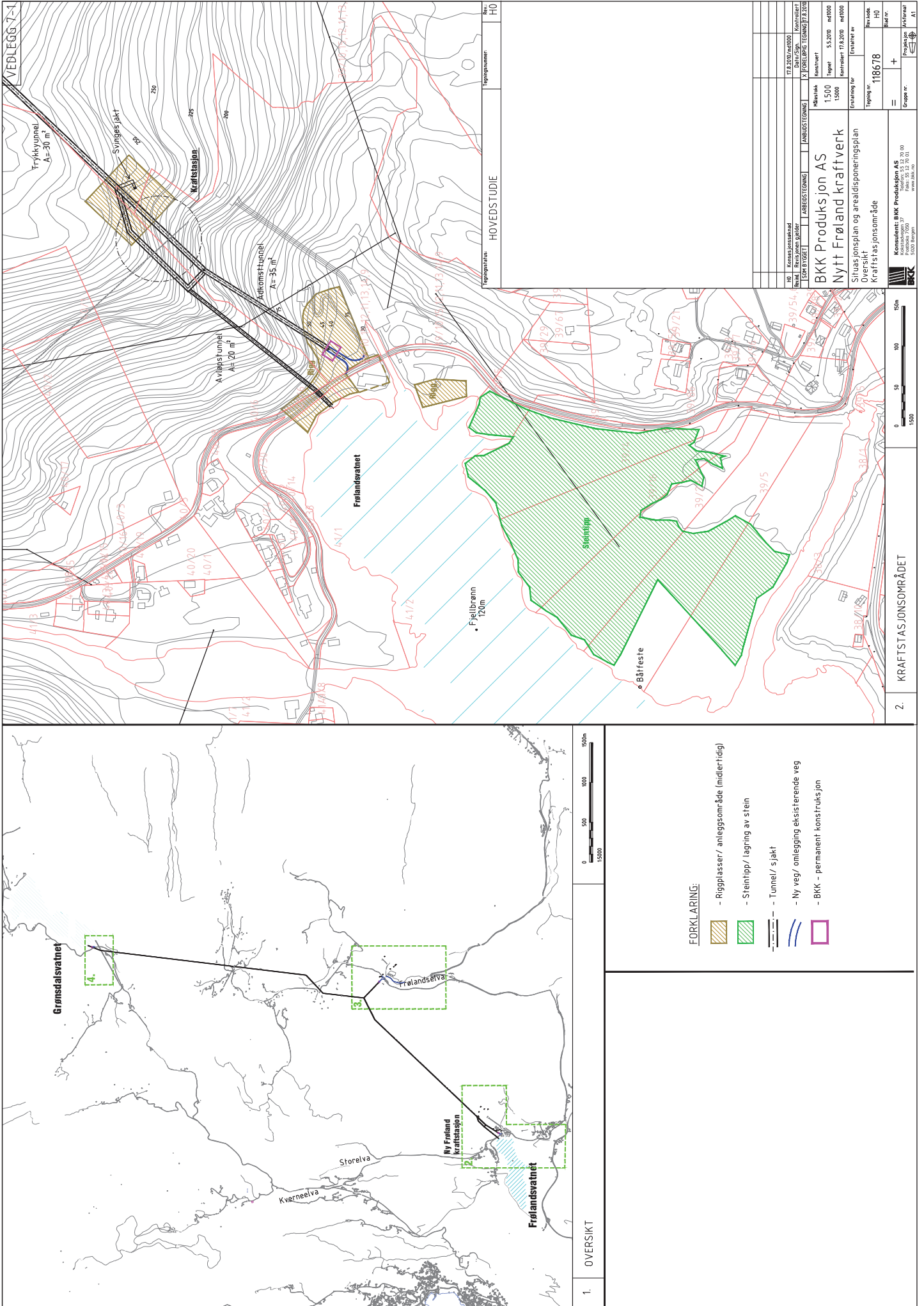
BKK Produksjon AS
Frøland småkraftverk
 Situasjonsplan og arealdisponeringsplan

Konsulent: BKK Produksjon AS
 Kokstadvegen 37
 Postboks 7050
 5022 Bergen
 Telefon: 55 12 70 00
 Faks: 55 12 70 01
 www.bkk.no

BKK

SITUASJON- OG AREALDISPONERINGSPLAN

Vedlegg 3 - Tunnel- og kartunderlag



1. OVERSIKT

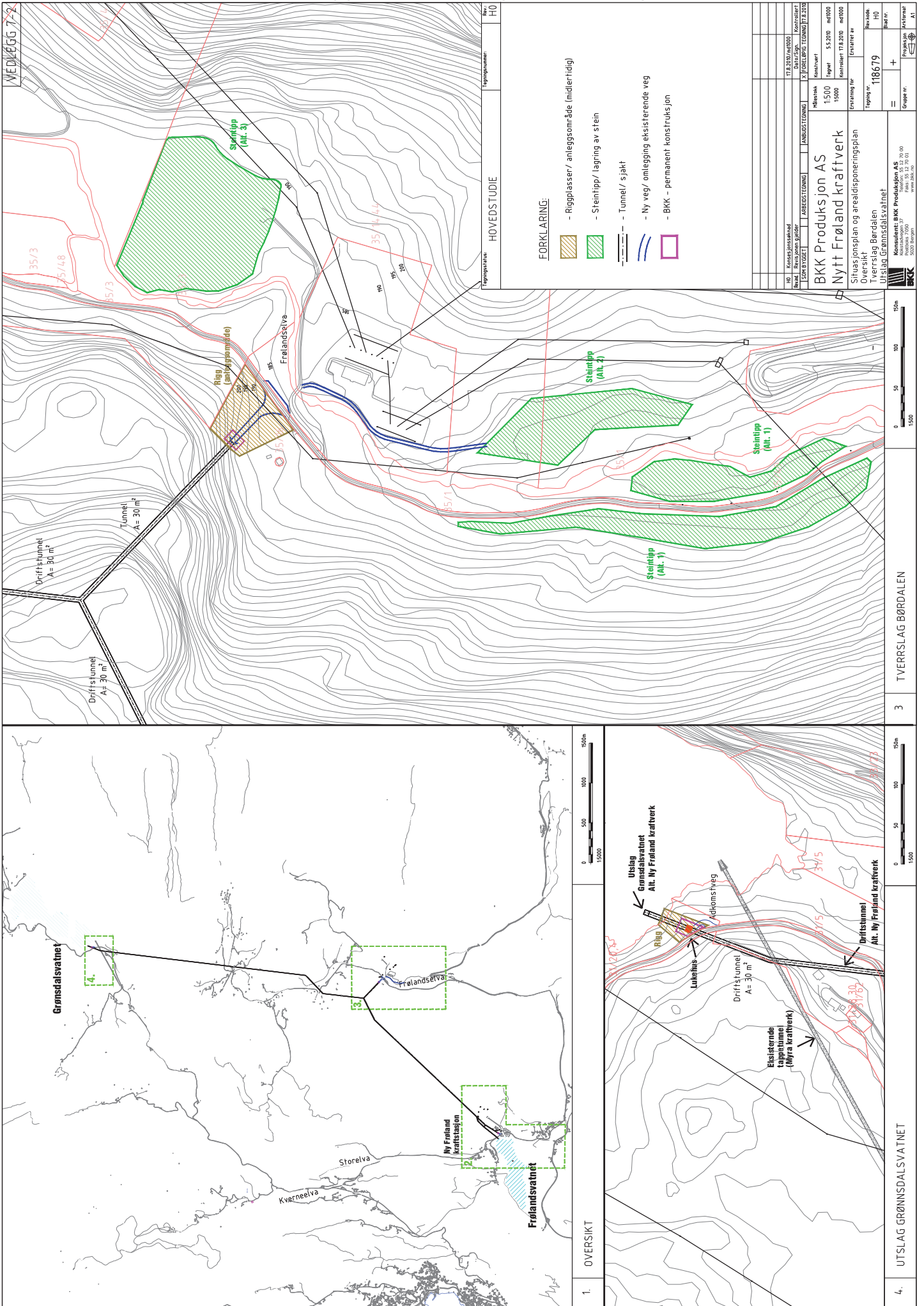
2. KRAFTSTASJONSOMRÅDET

FORKLARING:

- Rigglasser/ anleggsområde (midlertidig)
- Steinlipp/ lagring av stein
- Tunnel/ sjakt
- Ny veg/ omlegging eksisterende veg
- BKK - permanent konstruksjon

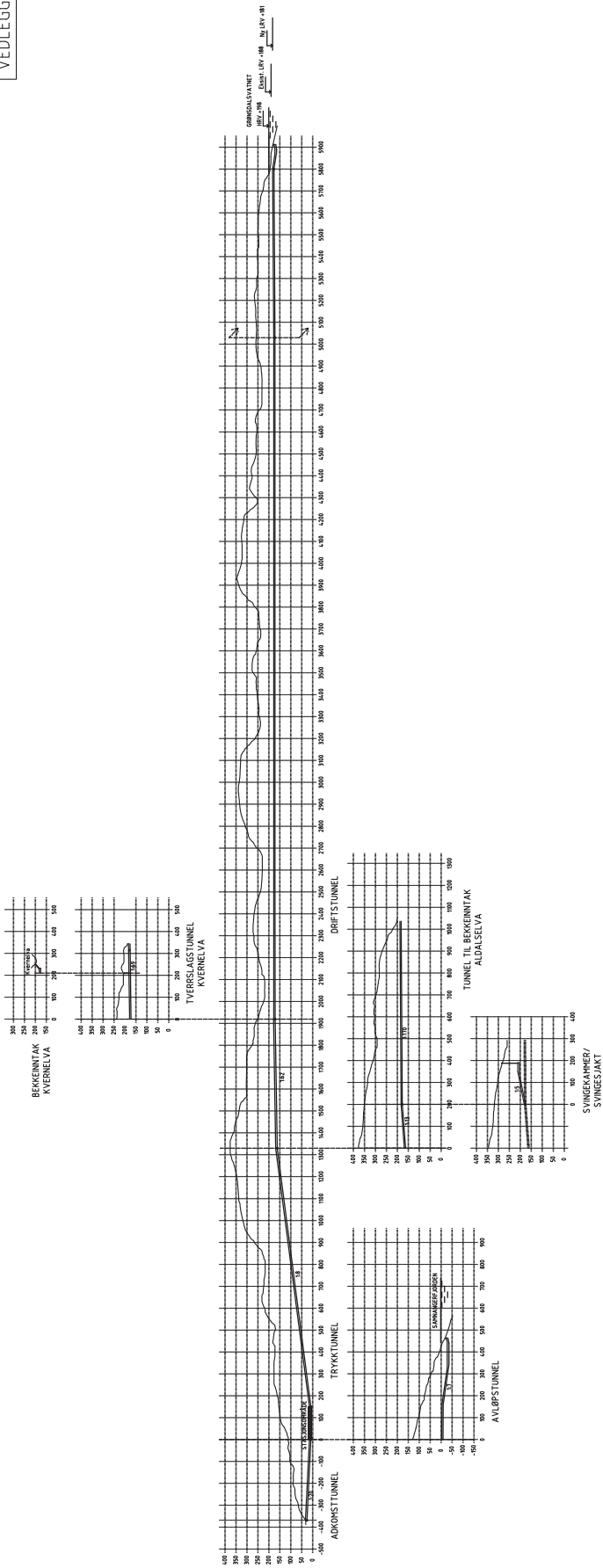
HOVEDSTUDIE		Revisjon:	H0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Tegningsnavn:		Tegningsnummer:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
<table border="1"> <tr> <td>IB</td> <td>Konseptstudie</td> <td>17.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>Studieplan</td> <td>18.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>Studieplan</td> <td>19.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>Studieplan</td> <td>20.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>Studieplan</td> <td>21.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>VI</td> <td>Studieplan</td> <td>22.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>VII</td> <td>Studieplan</td> <td>23.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>VIII</td> <td>Studieplan</td> <td>24.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>IX</td> <td>Studieplan</td> <td>25.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>Studieplan</td> <td>26.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XI</td> <td>Studieplan</td> <td>27.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XII</td> <td>Studieplan</td> <td>28.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XIII</td> <td>Studieplan</td> <td>29.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XIV</td> <td>Studieplan</td> <td>30.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XV</td> <td>Studieplan</td> <td>31.8.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XVI</td> <td>Studieplan</td> <td>1.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XVII</td> <td>Studieplan</td> <td>2.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XVIII</td> <td>Studieplan</td> <td>3.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XIX</td> <td>Studieplan</td> <td>4.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XX</td> <td>Studieplan</td> <td>5.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXI</td> <td>Studieplan</td> <td>6.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXII</td> <td>Studieplan</td> <td>7.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXIII</td> <td>Studieplan</td> <td>8.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXIV</td> <td>Studieplan</td> <td>9.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXV</td> <td>Studieplan</td> <td>10.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXVI</td> <td>Studieplan</td> <td>11.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXVII</td> <td>Studieplan</td> <td>12.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXVIII</td> <td>Studieplan</td> <td>13.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXIX</td> <td>Studieplan</td> <td>14.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXX</td> <td>Studieplan</td> <td>15.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXXI</td> <td>Studieplan</td> <td>16.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXXII</td> <td>Studieplan</td> <td>17.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXXIII</td> <td>Studieplan</td> <td>18.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXXIV</td> <td>Studieplan</td> <td>19.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXXV</td> <td>Studieplan</td> <td>20.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXXVI</td> <td>Studieplan</td> <td>21.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXXVII</td> <td>Studieplan</td> <td>22.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXXVIII</td> <td>Studieplan</td> <td>23.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XXXIX</td> <td>Studieplan</td> <td>24.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL</td> <td>Studieplan</td> <td>25.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL I</td> <td>Studieplan</td> <td>26.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL II</td> <td>Studieplan</td> <td>27.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL III</td> <td>Studieplan</td> <td>28.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL IV</td> <td>Studieplan</td> <td>29.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL V</td> <td>Studieplan</td> <td>30.9.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL VI</td> <td>Studieplan</td> <td>1.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL VII</td> <td>Studieplan</td> <td>2.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL VIII</td> <td>Studieplan</td> <td>3.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL IX</td> <td>Studieplan</td> <td>4.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL X</td> <td>Studieplan</td> <td>5.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XI</td> <td>Studieplan</td> <td>6.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XII</td> <td>Studieplan</td> <td>7.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XIII</td> <td>Studieplan</td> <td>8.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XIV</td> <td>Studieplan</td> <td>9.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XV</td> <td>Studieplan</td> <td>10.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XVI</td> <td>Studieplan</td> <td>11.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XVII</td> <td>Studieplan</td> <td>12.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XVIII</td> <td>Studieplan</td> <td>13.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XIX</td> <td>Studieplan</td> <td>14.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XX</td> <td>Studieplan</td> <td>15.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXI</td> <td>Studieplan</td> <td>16.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXII</td> <td>Studieplan</td> <td>17.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXIII</td> <td>Studieplan</td> <td>18.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXIV</td> <td>Studieplan</td> <td>19.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXV</td> <td>Studieplan</td> <td>20.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXVI</td> <td>Studieplan</td> <td>21.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXVII</td> <td>Studieplan</td> <td>22.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXVIII</td> <td>Studieplan</td> <td>23.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXIX</td> <td>Studieplan</td> <td>24.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX</td> <td>Studieplan</td> <td>25.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX I</td> <td>Studieplan</td> <td>26.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX II</td> <td>Studieplan</td> <td>27.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX III</td> <td>Studieplan</td> <td>28.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX IV</td> <td>Studieplan</td> <td>29.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX V</td> <td>Studieplan</td> <td>30.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX VI</td> <td>Studieplan</td> <td>31.10.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX VII</td> <td>Studieplan</td> <td>1.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX VIII</td> <td>Studieplan</td> <td>2.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX IX</td> <td>Studieplan</td> <td>3.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX X</td> <td>Studieplan</td> <td>4.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XI</td> <td>Studieplan</td> <td>5.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XII</td> <td>Studieplan</td> <td>6.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XIII</td> <td>Studieplan</td> <td>7.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XIV</td> <td>Studieplan</td> <td>8.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XV</td> <td>Studieplan</td> <td>9.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XVI</td> <td>Studieplan</td> <td>10.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XVII</td> <td>Studieplan</td> <td>11.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XVIII</td> <td>Studieplan</td> <td>12.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XIX</td> <td>Studieplan</td> <td>13.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XX</td> <td>Studieplan</td> <td>14.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXI</td> <td>Studieplan</td> <td>15.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXII</td> <td>Studieplan</td> <td>16.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXIII</td> <td>Studieplan</td> <td>17.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXIV</td> <td>Studieplan</td> <td>18.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXV</td> <td>Studieplan</td> <td>19.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXVI</td> <td>Studieplan</td> <td>20.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXVII</td> <td>Studieplan</td> <td>21.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXVIII</td> <td>Studieplan</td> <td>22.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXIX</td> <td>Studieplan</td> <td>23.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX</td> <td>Studieplan</td> <td>24.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX I</td> <td>Studieplan</td> <td>25.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX II</td> <td>Studieplan</td> <td>26.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX III</td> <td>Studieplan</td> <td>27.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX IV</td> <td>Studieplan</td> <td>28.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX V</td> <td>Studieplan</td> <td>29.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX VI</td> <td>Studieplan</td> <td>30.11.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX VII</td> <td>Studieplan</td> <td>1.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX VIII</td> <td>Studieplan</td> <td>2.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX IX</td> <td>Studieplan</td> <td>3.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX X</td> <td>Studieplan</td> <td>4.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XI</td> <td>Studieplan</td> <td>5.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XII</td> <td>Studieplan</td> <td>6.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XIII</td> <td>Studieplan</td> <td>7.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XIV</td> <td>Studieplan</td> <td>8.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XV</td> <td>Studieplan</td> <td>9.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XVI</td> <td>Studieplan</td> <td>10.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XVII</td> <td>Studieplan</td> <td>11.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XVIII</td> <td>Studieplan</td> <td>12.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XIX</td> <td>Studieplan</td> <td>13.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XX</td> <td>Studieplan</td> <td>14.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXI</td> <td>Studieplan</td> <td>15.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXII</td> <td>Studieplan</td> <td>16.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXIII</td> <td>Studieplan</td> <td>17.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXIV</td> <td>Studieplan</td> <td>18.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXV</td> <td>Studieplan</td> <td>19.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXVI</td> <td>Studieplan</td> <td>20.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXVII</td> <td>Studieplan</td> <td>21.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXVIII</td> <td>Studieplan</td> <td>22.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXIX</td> <td>Studieplan</td> <td>23.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXX</td> <td>Studieplan</td> <td>24.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXX I</td> <td>Studieplan</td> <td>25.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXX II</td> <td>Studieplan</td> <td>26.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXX III</td> <td>Studieplan</td> <td>27.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXX IV</td> <td>Studieplan</td> <td>28.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXX V</td> <td>Studieplan</td> <td>29.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXX VI</td> <td>Studieplan</td> <td>30.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> <tr> <td>XL XXX XXX XXX VII</td> <td>Studieplan</td> <td>31.12.2017</td> <td>140100</td> </tr> </table>				IB	Konseptstudie	17.8.2017	140100	II	Studieplan	18.8.2017	140100	III	Studieplan	19.8.2017	140100	IV	Studieplan	20.8.2017	140100	V	Studieplan	21.8.2017	140100	VI	Studieplan	22.8.2017	140100	VII	Studieplan	23.8.2017	140100	VIII	Studieplan	24.8.2017	140100	IX	Studieplan	25.8.2017	140100	X	Studieplan	26.8.2017	140100	XI	Studieplan	27.8.2017	140100	XII	Studieplan	28.8.2017	140100	XIII	Studieplan	29.8.2017	140100	XIV	Studieplan	30.8.2017	140100	XV	Studieplan	31.8.2017	140100	XVI	Studieplan	1.9.2017	140100	XVII	Studieplan	2.9.2017	140100	XVIII	Studieplan	3.9.2017	140100	XIX	Studieplan	4.9.2017	140100	XX	Studieplan	5.9.2017	140100	XXI	Studieplan	6.9.2017	140100	XXII	Studieplan	7.9.2017	140100	XXIII	Studieplan	8.9.2017	140100	XXIV	Studieplan	9.9.2017	140100	XXV	Studieplan	10.9.2017	140100	XXVI	Studieplan	11.9.2017	140100	XXVII	Studieplan	12.9.2017	140100	XXVIII	Studieplan	13.9.2017	140100	XXIX	Studieplan	14.9.2017	140100	XXX	Studieplan	15.9.2017	140100	XXXI	Studieplan	16.9.2017	140100	XXXII	Studieplan	17.9.2017	140100	XXXIII	Studieplan	18.9.2017	140100	XXXIV	Studieplan	19.9.2017	140100	XXXV	Studieplan	20.9.2017	140100	XXXVI	Studieplan	21.9.2017	140100	XXXVII	Studieplan	22.9.2017	140100	XXXVIII	Studieplan	23.9.2017	140100	XXXIX	Studieplan	24.9.2017	140100	XL	Studieplan	25.9.2017	140100	XL I	Studieplan	26.9.2017	140100	XL II	Studieplan	27.9.2017	140100	XL III	Studieplan	28.9.2017	140100	XL IV	Studieplan	29.9.2017	140100	XL V	Studieplan	30.9.2017	140100	XL VI	Studieplan	1.10.2017	140100	XL VII	Studieplan	2.10.2017	140100	XL VIII	Studieplan	3.10.2017	140100	XL IX	Studieplan	4.10.2017	140100	XL X	Studieplan	5.10.2017	140100	XL XI	Studieplan	6.10.2017	140100	XL XII	Studieplan	7.10.2017	140100	XL XIII	Studieplan	8.10.2017	140100	XL XIV	Studieplan	9.10.2017	140100	XL XV	Studieplan	10.10.2017	140100	XL XVI	Studieplan	11.10.2017	140100	XL XVII	Studieplan	12.10.2017	140100	XL XVIII	Studieplan	13.10.2017	140100	XL XIX	Studieplan	14.10.2017	140100	XL XX	Studieplan	15.10.2017	140100	XL XXI	Studieplan	16.10.2017	140100	XL XXII	Studieplan	17.10.2017	140100	XL XXIII	Studieplan	18.10.2017	140100	XL XXIV	Studieplan	19.10.2017	140100	XL XXV	Studieplan	20.10.2017	140100	XL XXVI	Studieplan	21.10.2017	140100	XL XXVII	Studieplan	22.10.2017	140100	XL XXVIII	Studieplan	23.10.2017	140100	XL XXIX	Studieplan	24.10.2017	140100	XL XXX	Studieplan	25.10.2017	140100	XL XXX I	Studieplan	26.10.2017	140100	XL XXX II	Studieplan	27.10.2017	140100	XL XXX III	Studieplan	28.10.2017	140100	XL XXX IV	Studieplan	29.10.2017	140100	XL XXX V	Studieplan	30.10.2017	140100	XL XXX VI	Studieplan	31.10.2017	140100	XL XXX VII	Studieplan	1.11.2017	140100	XL XXX VIII	Studieplan	2.11.2017	140100	XL XXX IX	Studieplan	3.11.2017	140100	XL XXX X	Studieplan	4.11.2017	140100	XL XXX XI	Studieplan	5.11.2017	140100	XL XXX XII	Studieplan	6.11.2017	140100	XL XXX XIII	Studieplan	7.11.2017	140100	XL XXX XIV	Studieplan	8.11.2017	140100	XL XXX XV	Studieplan	9.11.2017	140100	XL XXX XVI	Studieplan	10.11.2017	140100	XL XXX XVII	Studieplan	11.11.2017	140100	XL XXX XVIII	Studieplan	12.11.2017	140100	XL XXX XIX	Studieplan	13.11.2017	140100	XL XXX XX	Studieplan	14.11.2017	140100	XL XXX XXI	Studieplan	15.11.2017	140100	XL XXX XXII	Studieplan	16.11.2017	140100	XL XXX XXIII	Studieplan	17.11.2017	140100	XL XXX XXIV	Studieplan	18.11.2017	140100	XL XXX XXV	Studieplan	19.11.2017	140100	XL XXX XXVI	Studieplan	20.11.2017	140100	XL XXX XXVII	Studieplan	21.11.2017	140100	XL XXX XXVIII	Studieplan	22.11.2017	140100	XL XXX XXIX	Studieplan	23.11.2017	140100	XL XXX XXX	Studieplan	24.11.2017	140100	XL XXX XXX I	Studieplan	25.11.2017	140100	XL XXX XXX II	Studieplan	26.11.2017	140100	XL XXX XXX III	Studieplan	27.11.2017	140100	XL XXX XXX IV	Studieplan	28.11.2017	140100	XL XXX XXX V	Studieplan	29.11.2017	140100	XL XXX XXX VI	Studieplan	30.11.2017	140100	XL XXX XXX VII	Studieplan	1.12.2017	140100	XL XXX XXX VIII	Studieplan	2.12.2017	140100	XL XXX XXX IX	Studieplan	3.12.2017	140100	XL XXX XXX X	Studieplan	4.12.2017	140100	XL XXX XXX XI	Studieplan	5.12.2017	140100	XL XXX XXX XII	Studieplan	6.12.2017	140100	XL XXX XXX XIII	Studieplan	7.12.2017	140100	XL XXX XXX XIV	Studieplan	8.12.2017	140100	XL XXX XXX XV	Studieplan	9.12.2017	140100	XL XXX XXX XVI	Studieplan	10.12.2017	140100	XL XXX XXX XVII	Studieplan	11.12.2017	140100	XL XXX XXX XVIII	Studieplan	12.12.2017	140100	XL XXX XXX XIX	Studieplan	13.12.2017	140100	XL XXX XXX XX	Studieplan	14.12.2017	140100	XL XXX XXX XXI	Studieplan	15.12.2017	140100	XL XXX XXX XXII	Studieplan	16.12.2017	140100	XL XXX XXX XXIII	Studieplan	17.12.2017	140100	XL XXX XXX XXIV	Studieplan	18.12.2017	140100	XL XXX XXX XXV	Studieplan	19.12.2017	140100	XL XXX XXX XXVI	Studieplan	20.12.2017	140100	XL XXX XXX XXVII	Studieplan	21.12.2017	140100	XL XXX XXX XXVIII	Studieplan	22.12.2017	140100	XL XXX XXX XXIX	Studieplan	23.12.2017	140100	XL XXX XXX XXX	Studieplan	24.12.2017	140100	XL XXX XXX XXX I	Studieplan	25.12.2017	140100	XL XXX XXX XXX II	Studieplan	26.12.2017	140100	XL XXX XXX XXX III	Studieplan	27.12.2017	140100	XL XXX XXX XXX IV	Studieplan	28.12.2017	140100	XL XXX XXX XXX V	Studieplan	29.12.2017	140100	XL XXX XXX XXX VI	Studieplan	30.12.2017	140100	XL XXX XXX XXX VII	Studieplan	31.12.2017	140100
IB	Konseptstudie	17.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
II	Studieplan	18.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
III	Studieplan	19.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
IV	Studieplan	20.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
V	Studieplan	21.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
VI	Studieplan	22.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
VII	Studieplan	23.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
VIII	Studieplan	24.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
IX	Studieplan	25.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
X	Studieplan	26.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XI	Studieplan	27.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XII	Studieplan	28.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XIII	Studieplan	29.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XIV	Studieplan	30.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XV	Studieplan	31.8.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XVI	Studieplan	1.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XVII	Studieplan	2.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XVIII	Studieplan	3.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XIX	Studieplan	4.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XX	Studieplan	5.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXI	Studieplan	6.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXII	Studieplan	7.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXIII	Studieplan	8.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXIV	Studieplan	9.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXV	Studieplan	10.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXVI	Studieplan	11.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXVII	Studieplan	12.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXVIII	Studieplan	13.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXIX	Studieplan	14.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXX	Studieplan	15.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXXI	Studieplan	16.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXXII	Studieplan	17.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXXIII	Studieplan	18.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXXIV	Studieplan	19.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXXV	Studieplan	20.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXXVI	Studieplan	21.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXXVII	Studieplan	22.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXXVIII	Studieplan	23.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XXXIX	Studieplan	24.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL	Studieplan	25.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL I	Studieplan	26.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL II	Studieplan	27.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL III	Studieplan	28.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL IV	Studieplan	29.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL V	Studieplan	30.9.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL VI	Studieplan	1.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL VII	Studieplan	2.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL VIII	Studieplan	3.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL IX	Studieplan	4.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL X	Studieplan	5.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XI	Studieplan	6.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XII	Studieplan	7.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XIII	Studieplan	8.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XIV	Studieplan	9.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XV	Studieplan	10.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XVI	Studieplan	11.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XVII	Studieplan	12.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XVIII	Studieplan	13.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XIX	Studieplan	14.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XX	Studieplan	15.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXI	Studieplan	16.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXII	Studieplan	17.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXIII	Studieplan	18.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXIV	Studieplan	19.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXV	Studieplan	20.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXVI	Studieplan	21.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXVII	Studieplan	22.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXVIII	Studieplan	23.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXIX	Studieplan	24.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX	Studieplan	25.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX I	Studieplan	26.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX II	Studieplan	27.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX III	Studieplan	28.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX IV	Studieplan	29.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX V	Studieplan	30.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX VI	Studieplan	31.10.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX VII	Studieplan	1.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX VIII	Studieplan	2.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX IX	Studieplan	3.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX X	Studieplan	4.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XI	Studieplan	5.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XII	Studieplan	6.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XIII	Studieplan	7.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XIV	Studieplan	8.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XV	Studieplan	9.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XVI	Studieplan	10.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XVII	Studieplan	11.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XVIII	Studieplan	12.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XIX	Studieplan	13.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XX	Studieplan	14.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXI	Studieplan	15.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXII	Studieplan	16.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXIII	Studieplan	17.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXIV	Studieplan	18.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXV	Studieplan	19.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXVI	Studieplan	20.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXVII	Studieplan	21.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXVIII	Studieplan	22.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXIX	Studieplan	23.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX	Studieplan	24.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX I	Studieplan	25.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX II	Studieplan	26.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX III	Studieplan	27.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX IV	Studieplan	28.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX V	Studieplan	29.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX VI	Studieplan	30.11.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX VII	Studieplan	1.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX VIII	Studieplan	2.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX IX	Studieplan	3.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX X	Studieplan	4.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XI	Studieplan	5.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XII	Studieplan	6.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XIII	Studieplan	7.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XIV	Studieplan	8.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XV	Studieplan	9.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XVI	Studieplan	10.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XVII	Studieplan	11.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XVIII	Studieplan	12.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XIX	Studieplan	13.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XX	Studieplan	14.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXI	Studieplan	15.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXII	Studieplan	16.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXIII	Studieplan	17.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXIV	Studieplan	18.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXV	Studieplan	19.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXVI	Studieplan	20.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXVII	Studieplan	21.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXVIII	Studieplan	22.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXIX	Studieplan	23.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXX	Studieplan	24.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXX I	Studieplan	25.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXX II	Studieplan	26.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXX III	Studieplan	27.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXX IV	Studieplan	28.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXX V	Studieplan	29.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXX VI	Studieplan	30.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
XL XXX XXX XXX VII	Studieplan	31.12.2017	140100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				

Vedlegg 3 - Tunnel- og kartunderlag



Vedlegg 3 - Tunnel- og kartunderlag

VEDLEGG 8



2. LENGDEPROFIL

HØVEDSTUDIE

Prosjekt: **BKK Produksjon AS Aldal kraftverk**
 Oppdragsgiver: **Lengdeprofi**
 Oppdragsnr.: **118680**

Rev: **H0**

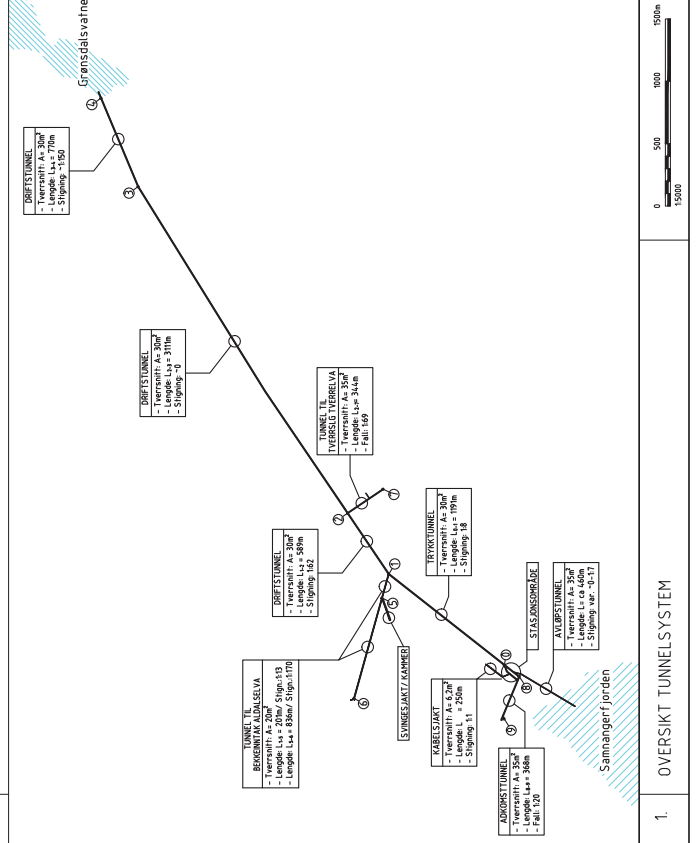
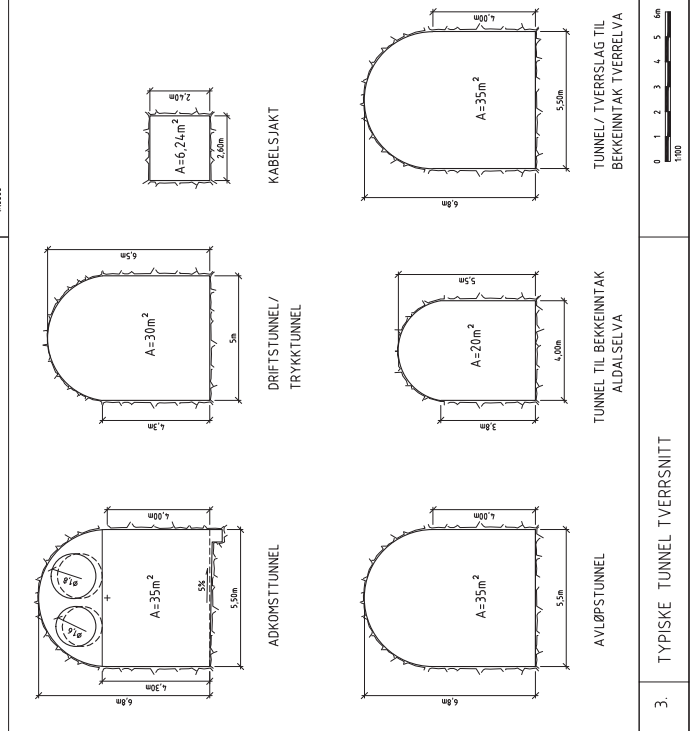
IB	Kontrollert	17.8.2010/MS/200	Kontrollert	17.8.2010/MS/200
DR	Drøyt signert		Drøyt signert	
DR	Drøyt signert		Drøyt signert	

Skala: 1:10000

Prosjekt: **BKK Produksjon AS**
 Aldal kraftverk
 Oversikt tunnelsystem
 Typiske tunnelversnitt

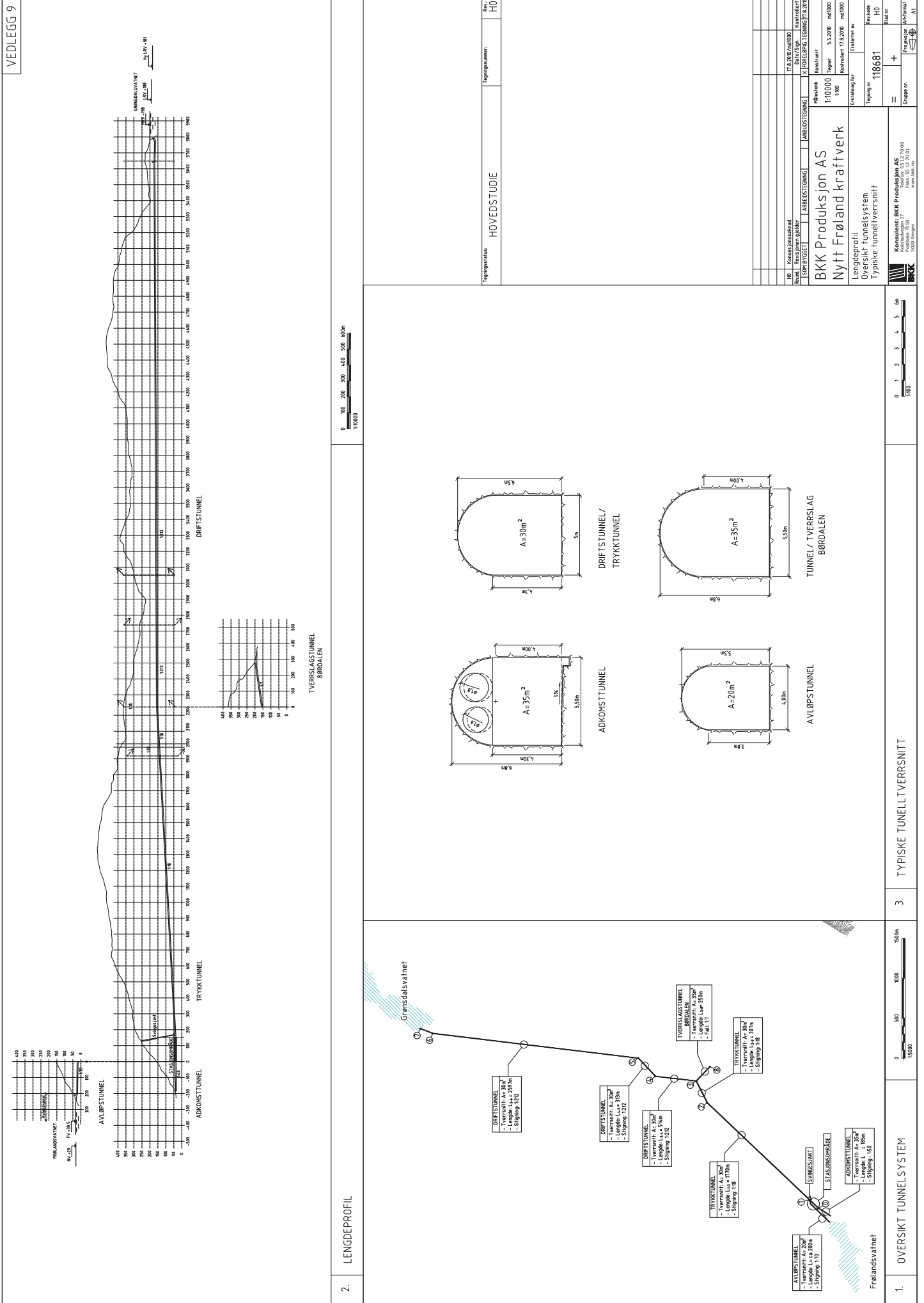
Oppdragsnr.: **118680**

Prosjekt: **BKK Produksjon AS**
 Aldal kraftverk
 Oversikt tunnelsystem
 Typiske tunnelversnitt



1. OVERSIKT TUNNELSYSTEM

Vedlegg 3 - Tunnel- og kartunderlag



VEDLEGG 9

HØVEDSTUDIET

Revisjon: H0

BKK Prosjekt AS
Nytt Freland kraftverk

Langdeprofil
Oversikt tunnelssystem
Typiske tunneltverrsnitt

Prosjekt nr.: 118661

Konsultants BKK Prosjekt AS
Kontaktskissene 17
Kontrollert 17.01.00
www.bkk.no

Vedlegg 4 - Beregning av turbinens hoveddimensjoner

Vedlegg 4 - Beregning av turbinens hoveddimensjoner

Beregning av turbinens hoveddimensjoner er basert på metode forklart i kapittel 3 i «Pumper og Turbiner» (1). Det velges initiale verdier av virkningsgrad, turbinenes reduserte periferiehastighet ved innløp, samt inn- og utløpsvinkel på bladet basert på erfaringsdata. Fra hastighetsdiagram for innløp kan da c_{u1} og c_{m1} beregnes. Om det antas 10 % akselerasjon av c_m gjennom turbin kan c_{m2} finnes. Basert på volumstrøm finnes da utløpsdiameter, og deretter periferiehastighet ved utløpet. Dermed er også innløpsdiameteren gitt, og innløpshøyde finnes basert på volumstrøm og c_{m1} . Turtall kan så finnes basert på periferiehastigheter. Dette turtall må korrigeres for synkronturtall, og innløpsdiameter og høyde korrigeres. Nødvendig dykking finnes videre som en funksjon av periferiehastighet ved utløp, u_2 , og middelhastighet perpendikulært på utløpstverrsnittet, c_{m2} .

$$\underline{c_{u1}} = \frac{\eta}{2\underline{u_1}}$$

$$\underline{c_{m1}} = \underline{c_{u1}} \tan \alpha_1$$

$$\underline{c_{m2}} = 1,1 \times \underline{c_{m1}}$$

$$\underline{u_2} = \frac{\underline{c_{m2}}}{\tan \beta_2}$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4Q^*}{\pi \cdot \underline{c_{m2}} \sqrt{2gH^*}}}$$

$$D_1 = D_2 \frac{\underline{u_1}}{\underline{u_2}}$$

$$B = \frac{Q^*}{\underline{c_{m1}} \sqrt{2gH^*} \pi \cdot D_1}$$

$$Z_p = \frac{50 \cdot 60}{60 \cdot \underline{u_1} \sqrt{2gH^*} / \pi \cdot D_1}$$

Velger ny Z_p som er heltall

$$n = \frac{50 \cdot 60}{Z_p}$$

$$u_2 = \underline{u_2} \sqrt{2gH^*}$$

Vedlegg 4 - Beregning av turbinens hoveddimensjoner

$$c_{m2} = \underline{c_{m2}} \sqrt{2gH^*}$$

$$NPSH_t = a \frac{c_{m2}^2}{2g} + b \frac{u_2^2}{2g}$$

a og b er konstanter basert på erfaring.

$$H_s = h_b - h_{va} - NPSH_t$$

hvor h_b er atmosfæretrykk og h_{va} er damptrykk for vannet. Nødvendig dykking blir da den negative av sugedyden H_s . Disse beregningene blir gjort med excelark, vedlagt på CD.

Nye Frøland Kraftverk

Startverdier

	Max	Design
Høyeste fallhøyde [m]	190	168
Slukeevne [m ³ /s]	30	27
Hydraulisk virkningsgrad [-]		0,96
u1-redusert		0,72
Innløpsvinkel, alpha1 [grader]		15,1
Utløpsvinkel, beta2 [grader]		21,9
cu1-redusert	0,67	
cm1-redusert	0,18	
cm2-redusert	0,20	
u2-redusert	0,49	
D2 [m]	1,74	
D1 [m]	2,54	
B1 [m]	0,33	
Zp	9,66222081	
Valgt Zp	8	
Turtall	375,00	

Korrigerede verdier

D1	2,11
B1	0,39
alpha1	15,1
beta1	73,5
D2	1,74
beta2	21,9
Turtall [rpm]	375,00
omega [1/s]	39,27
Polpar, Zp	9,66222081
Effekt [MW]	42,68
Moment [kNm]	1086,7419

Vedlegg 4 - Beregning av turbinens hoveddimensjoner

u1	41,4
c1	39,66
u2	28,27
cm2	11,37

Dykking

a	1,15	
b	0,15	
hva	0,125	mVs
hb	10,3	mVs
NPSHt	13,67	m
Hs<=	-3,49	m

Dykking > **3,49**

Aldal Kraftverk

Startverdier

	Max	Design
Høyeste fallhøyde [m]	190	190
Slukeevne [m ³ /s]	35	31,5
Hydraulisk virkningsgrad [-]		0,96
u1-redusert		0,72
Innløpsvinkel, alpha1 [grader]		15,1
Utløpsvinkel, beta2 [grader]		21,9

cu1-redusert	0,67
cm1-redusert	0,18
cm2-redusert	0,20
u2-redusert	0,49
D2 [m]	1,82
D1 [m]	2,66
B1 [m]	0,34
Zp	9,51627784
Valgt Zp	8
Turtall	375,00

Korrigerte verdier

D1	2,24
B1	0,41
alpha1	15,1
beta1	73,5
D2	1,82
beta2	21,9

Vedlegg 4 - Beregning av turbinens hoveddimensjoner

Turtall [rpm]	375,00
omega [1/s]	39,27
Polpar, Zp	9,51627784
Effekt [MW]	56,31
Moment [kNm]	1433,8956

u1	44,0
c1	42,18
u2	30,07
cm2	12,09

Dykking

a	1,15	
b	0,15	
hva	0,125	mVs
hb	10,3	mVs
NPSHt	15,46	m
Hs<=	-5,28	m

Dykking > **5,28**

1. Brekke H. Pumper & Turbiner. Trondheim: Vannkraftlaboratoriet NTNU; 2003.

Overslagsberegninger for Nye Frøland Kraftverk

I alle overslagsberegninger benyttes den fallhøyden som gir det verst tenkelige scenarioet, samt full volumstrøm. Høyeste fallhøyde, som tilsvarer 168,1 meter benyttes i beregningen av Thoma-tverrsnitt, mens laveste fallhøyde, tilsvarende 158 meter, benyttes i de øvrige beregninger.

Svingesjakt

$$\Delta z = \pm \Delta Q \sqrt{\frac{L/A_T}{gA_s}} = 30 \sqrt{\frac{\frac{3424}{30} + \frac{2077}{30} + \frac{20}{30} + \frac{141}{3,14} + \frac{22}{28,27}}{9,82 \times 28,27}} = 27,3m$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{A_s L / A_T}} = \sqrt{\frac{9,82}{28,27 \left(\frac{3424}{30} + \frac{2077}{30} + \frac{20}{30} + \frac{141}{3,14} + \frac{22}{28,27} \right)}} = 0,0389$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{0,0389} = 161,5sek$$

Trykkøkning foran turbinen

$$\Delta h_{Tl=7sek} = 2 \frac{\Delta Q}{T_L} \frac{L}{gA} = 2 \frac{30}{7 \times 9,82} \left(\frac{50}{6,15} + \frac{20}{30} + \frac{141}{3,14} + \frac{22}{28,27} \right) = 47,55m$$

$$\Delta h_{Tl=8sek} = 2 \frac{30}{8 \times 9,82} \left(\frac{50}{6,15} + \frac{20}{30} + \frac{141}{3,14} + \frac{22}{28,27} \right) = 41,6m$$

$$\Delta h_{Tl=9sek} = 2 \frac{30}{9 \times 9,82} \left(\frac{50}{6,15} + \frac{20}{30} + \frac{141}{3,14} + \frac{22}{28,27} \right) = 37m$$

Stabilitet

$$T_a = \frac{J \times \omega_0^2}{P_0} = \frac{J \times (\pi n_0)^2}{30^2 \rho g Q_0 H_0 \eta_0} = \frac{183 \times 10^3 \times (\pi \times 375)^2}{30^2 \times 998 \times 9,82 \times 30 \times 168 \times 0,96} = 5,95s$$

$$T_w = \frac{Q}{gH} \sum \frac{L}{A} = \frac{30}{9,82 \times 158} \left(\frac{200}{20} + \frac{50}{6,15} + \frac{20}{30} + \frac{141}{3,14} + \frac{22}{28,27} \right) = 1,25s$$

$$\frac{T_a}{T_w} = \frac{5,95}{1,25} = 4,76$$

$$A_{th} = 0,0085 \frac{M^2 A^{5/3}}{H_0} = 0,0085 \frac{35^2 \times 30^{5/3}}{168,1} = 17,94m^2$$

Anbefalt minsteareal for sjaktens tverrsnitt er som følger.

Vedlegg 6 - Overslagsberegninger

$$A_{s,\min} = 1,5 A_h = 1,5 \times 17,94 = 26,91 m^2$$

Overslagsberegninger for Aldal Kraftverk

Øvre svingesjakt

$$\Delta z = \pm \Delta Q \sqrt{\frac{L/A_T}{g A_s}} = 35 \sqrt{\frac{\frac{4470}{30} + \frac{201}{20} + \frac{150}{20}}{9,82 \times 102}} = 14,3 m$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{A_s L / A_T}} = \sqrt{\frac{9,82}{102 \left(\frac{4470}{30} + \frac{201}{20} + \frac{150}{20} \right)}} = 0,024$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{0,024} = 262 \text{ sek}$$

Nedre svingesjakt

$$\Delta z = \pm \Delta Q \sqrt{\frac{L/A_T}{g A_s}} = 35 \sqrt{\frac{\frac{50}{22} + \frac{390}{35} + \frac{50}{22}}{9,82 \times 156}} = 3,54 m$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{A_s L / A_T}} = \sqrt{\frac{9,82}{156 \left(\frac{50}{22} + \frac{390}{35} + \frac{50}{22} \right)}} = 0,0633$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{0,0633} = 99,3 \text{ sek}$$

Trykkøkning foran turbinen

$$\Delta h_{T=7s} = 2 \frac{\Delta Q}{T_L} \frac{L}{g A} = 2 \frac{35}{7 \times 9,82} \left(\frac{50}{6,15} + \frac{1191}{30} + \frac{200}{20} + \frac{150}{20} \right) = 66,5 m$$

$$\Delta h_{T=8s} = 2 \frac{35}{8 \times 9,82} \left(\frac{50}{6,15} + \frac{1191}{30} + \frac{200}{20} + \frac{150}{20} \right) = 58,2 m$$

$$\Delta h_{T=9s} = 2 \frac{35}{9 \times 9,82} \left(\frac{50}{6,15} + \frac{1191}{30} + \frac{200}{20} + \frac{150}{20} \right) = 51,7 m$$

Stabilitet

$$T_a = \frac{J \times \omega_0^2}{P_0} = \frac{J \times (\pi n_0)^2}{30^2 \rho g Q_0 H_0 \eta_0} = \frac{263 \times 10^3 \times (\pi \times 375)^2}{30^2 \times 998 \times 9,82 \times 35 \times 198 \times 0,96} = 6,22 s$$

Vedlegg 6 - Overslagsberegninger

$$T_w = \frac{Q}{gH} \sum \frac{L}{A} = \frac{35}{9,82 \times 188} \left(\frac{70}{35} + \frac{50}{22} + \frac{50}{6,15} + \frac{1191}{30} + \frac{201}{20} + \frac{150}{20} \right) = 1,7$$

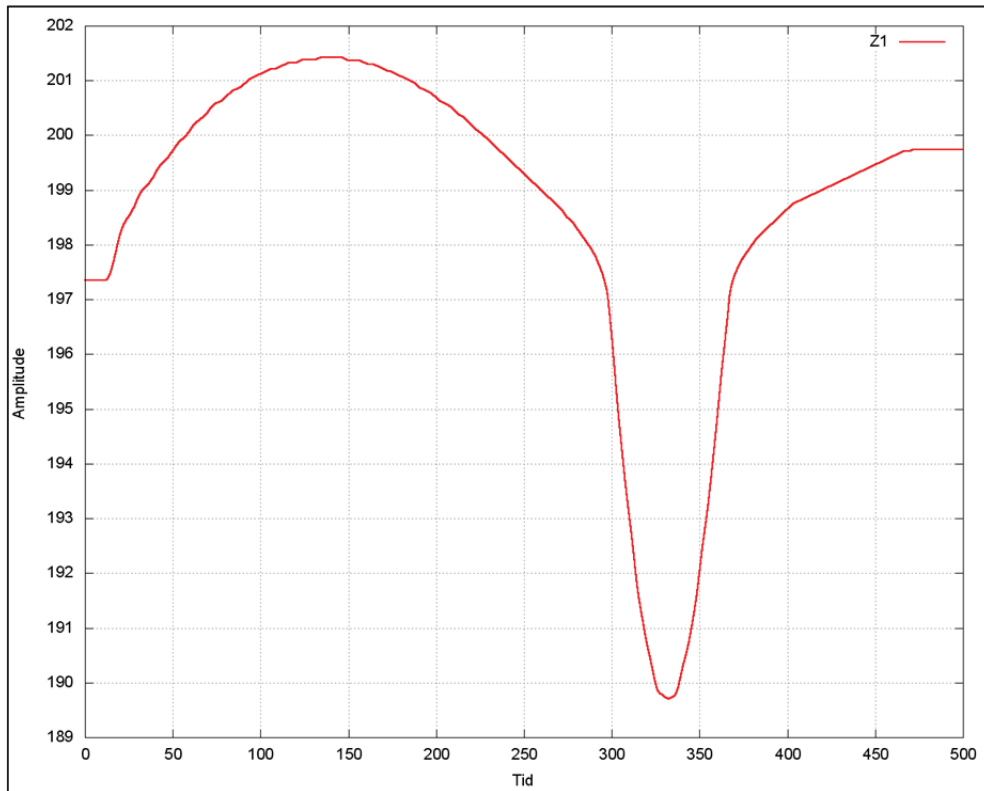
$$\frac{T_a}{T_w} = \frac{6,22}{1,7} = 3,66$$

$$A_{th} = 0,0085 \frac{M^2 A^{5/3}}{H_0} = 0,0085 \frac{35^2 \times 30^{5/3}}{188} = 16,04 m^2$$

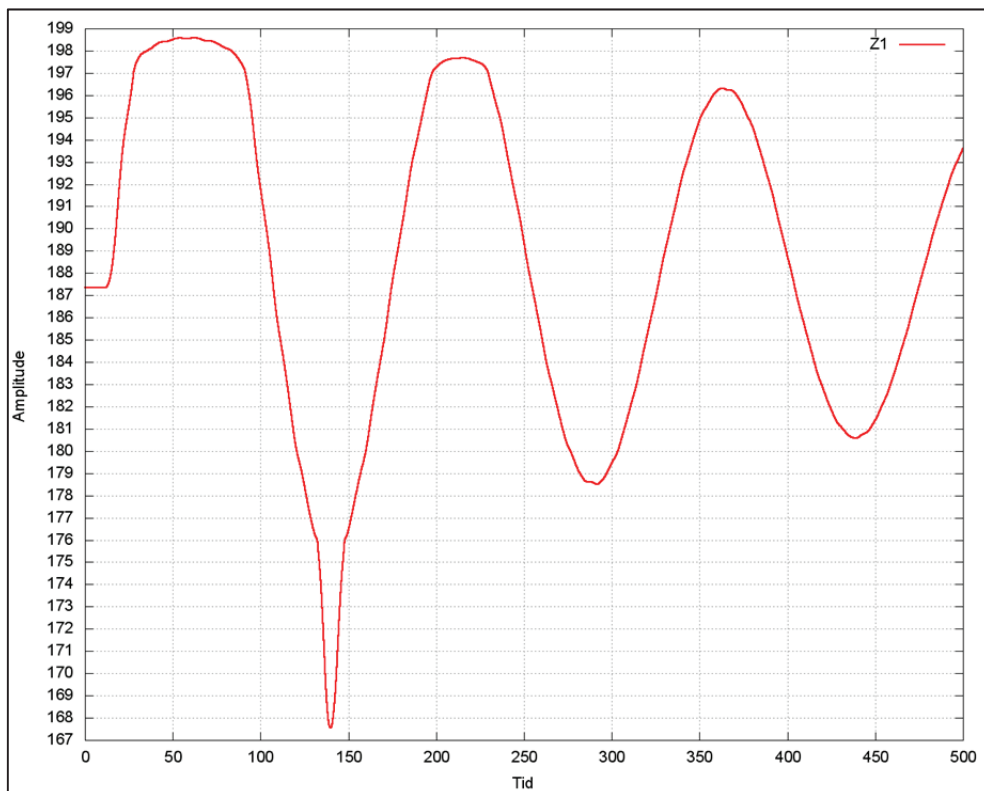
Anbefalt minsteareal for sjaktens tverrsnitt er som følger.

$$A_{s,\min} = 1,5 A_{th} = 1,5 \times 16,04 = 24,06 m^2$$

Massesvingninger - Opprinnelig geometri

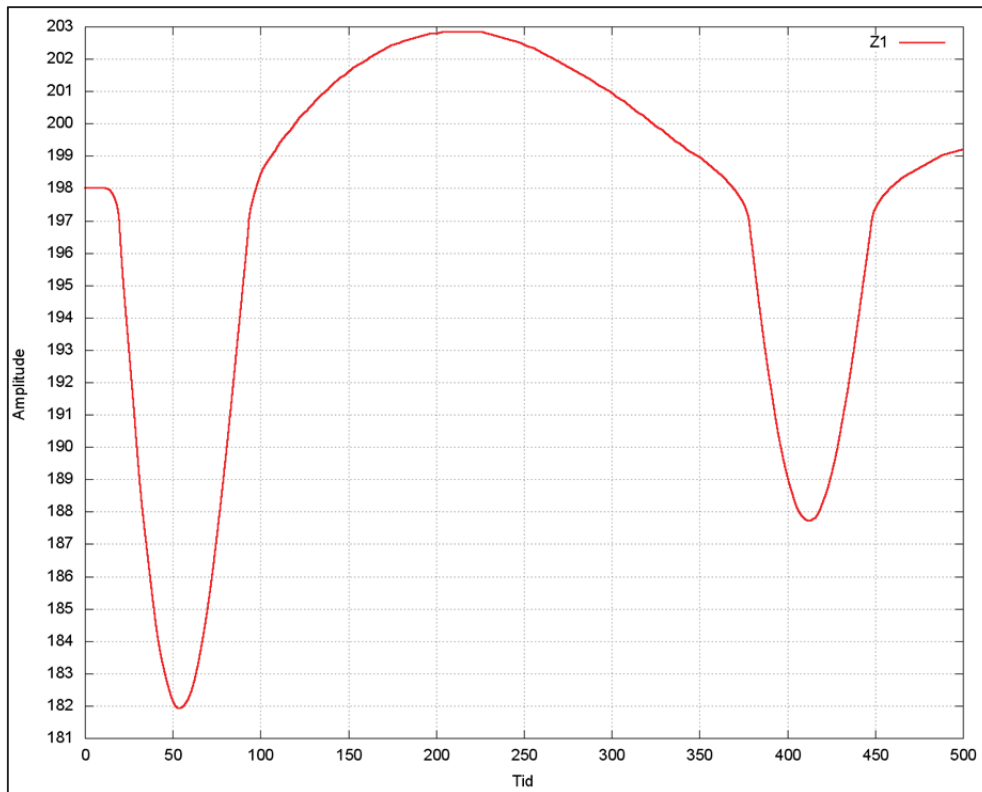


Figur 1 - Avslag-HRV

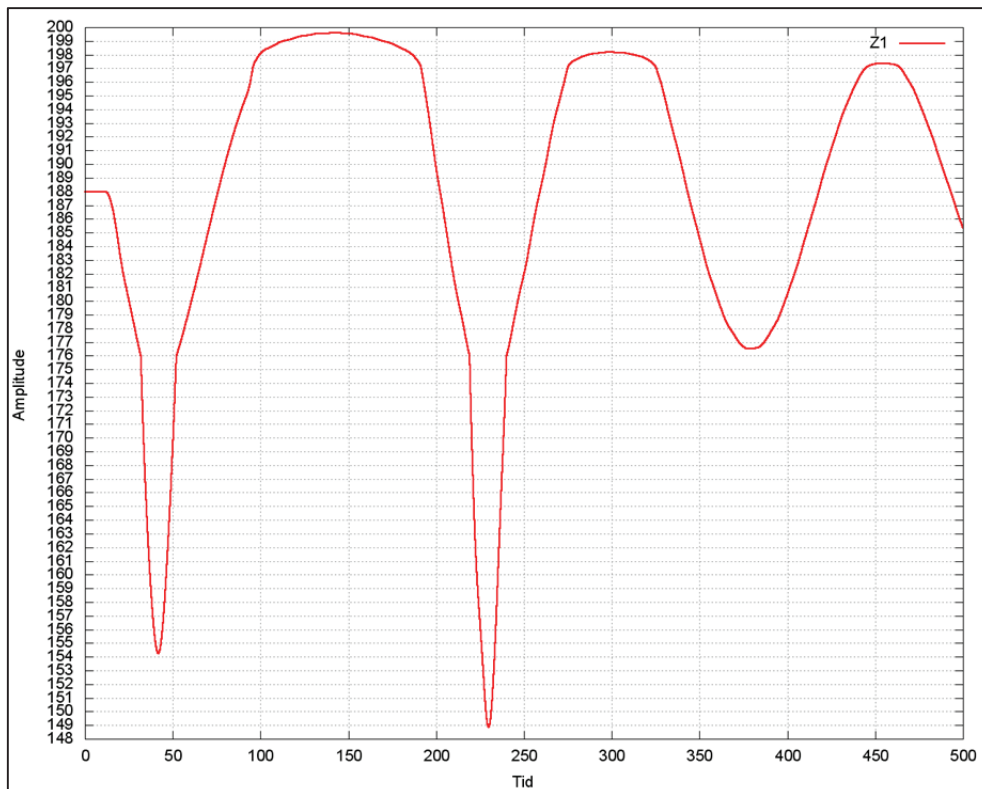


Figur 2 - Avslag - LRV

Vedlegg 7 - Simuleringsresultater Nye Frøland

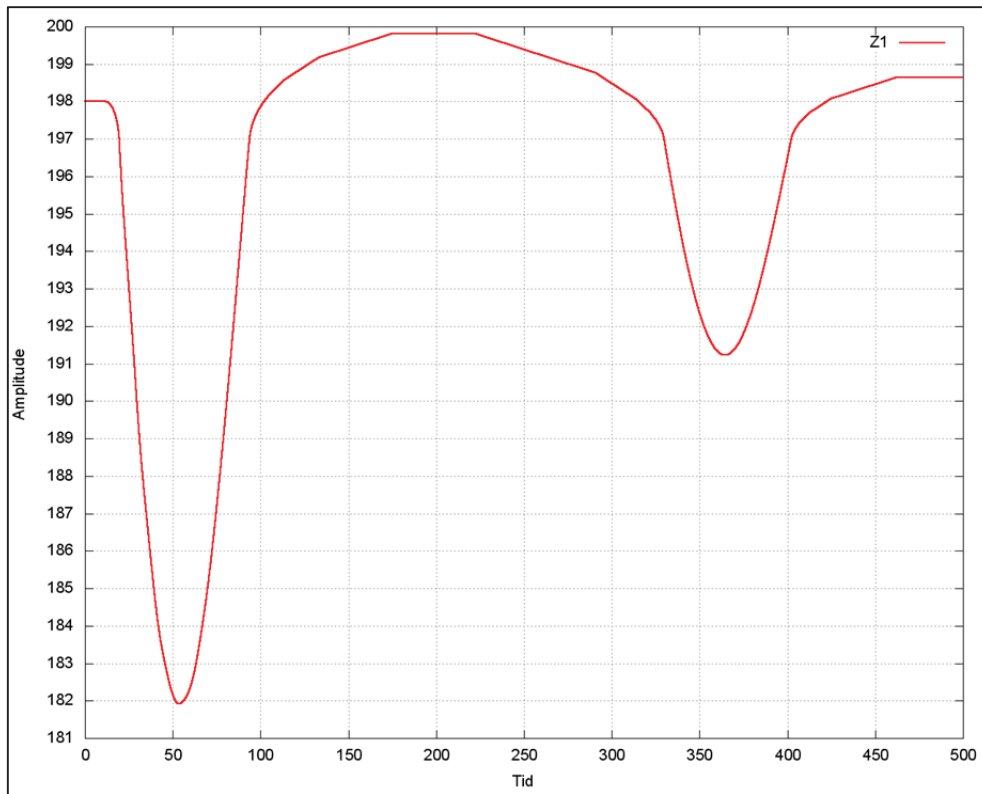


Figur 3 - Pådrag+avslag-HRV

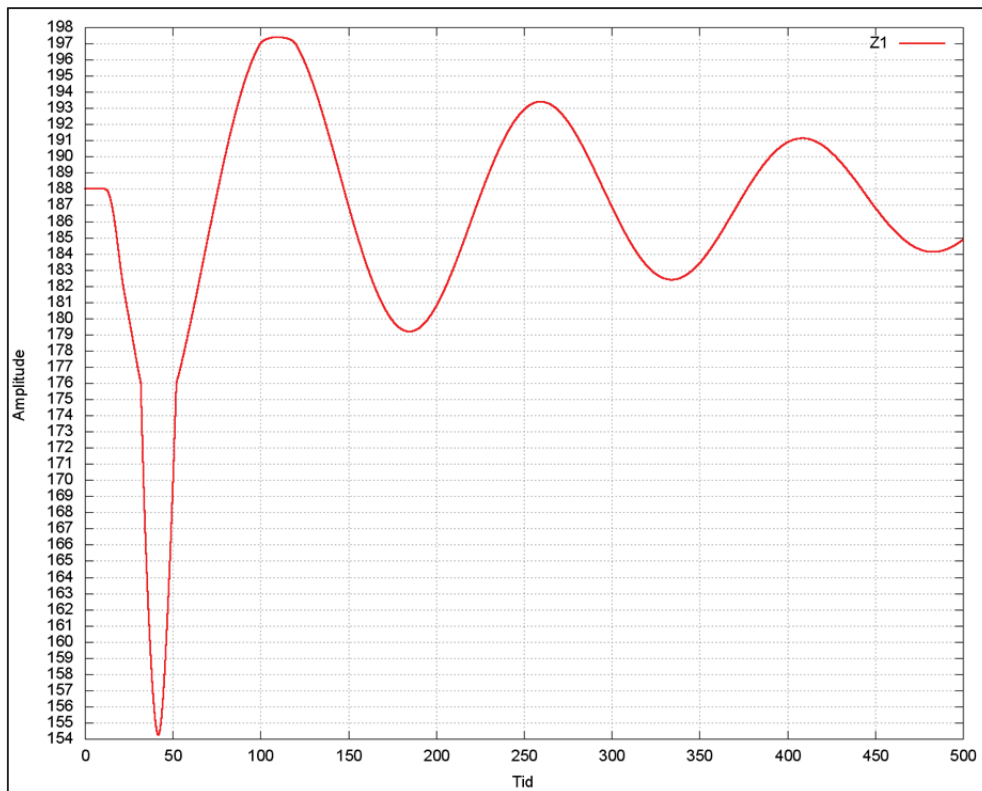


Figur 4 - pådrag+avslag-LRV

Vedlegg 7 - Simuleringsresultater Nye Frøland

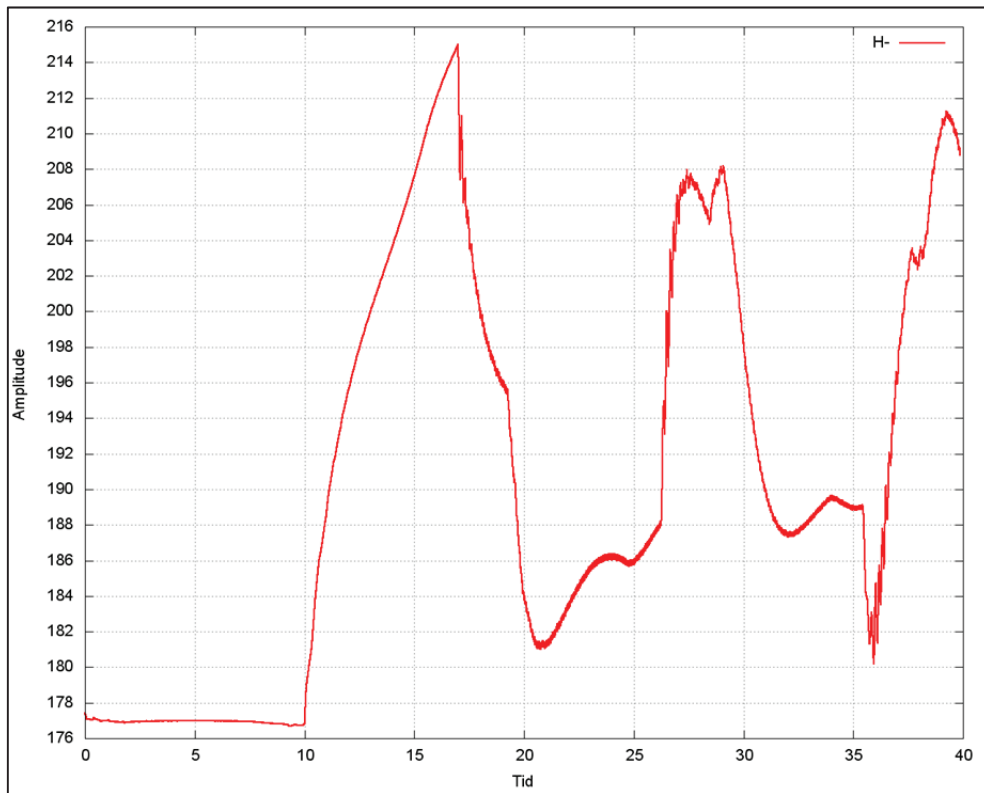


Figur 5 - Pådrag-HRV

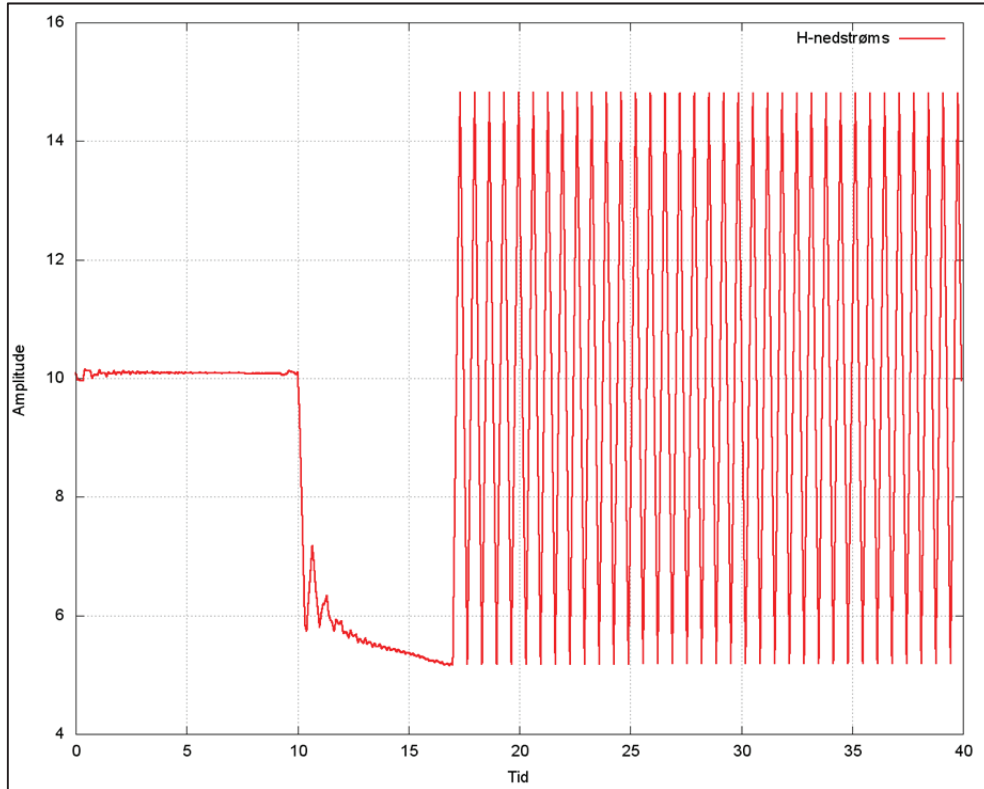


Figur 6 - Pådrag-LRV

Retardasjonstrykk - Opprinnelig geometri

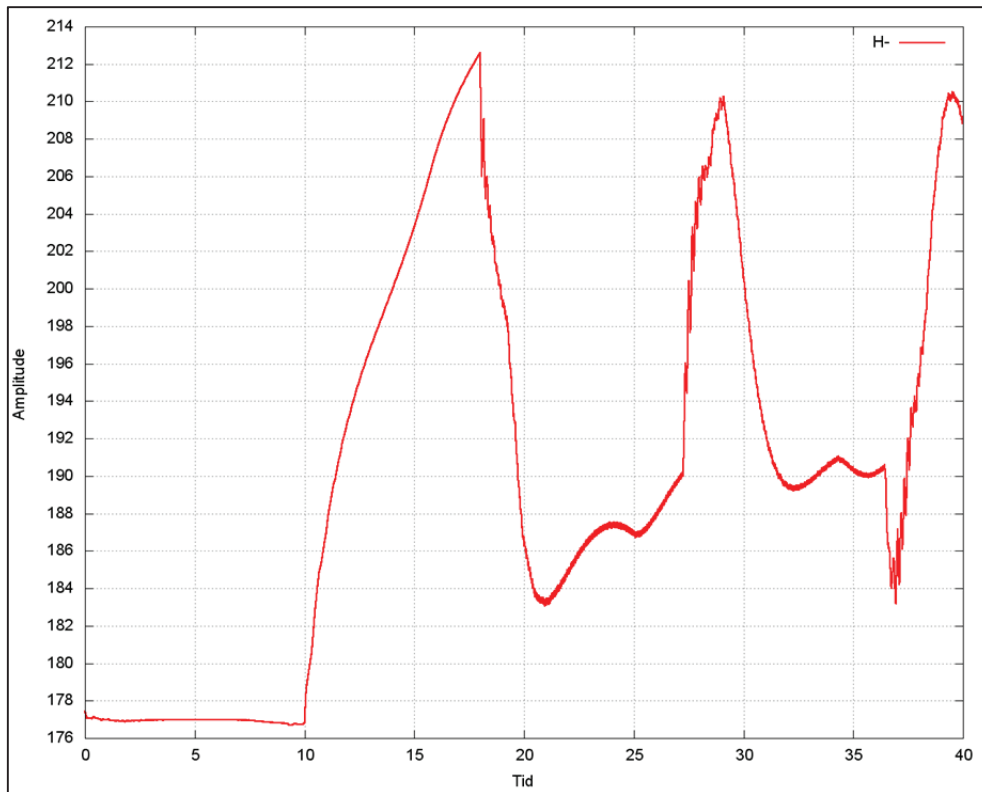


Figur 7 - Avslag-HRV-TI7

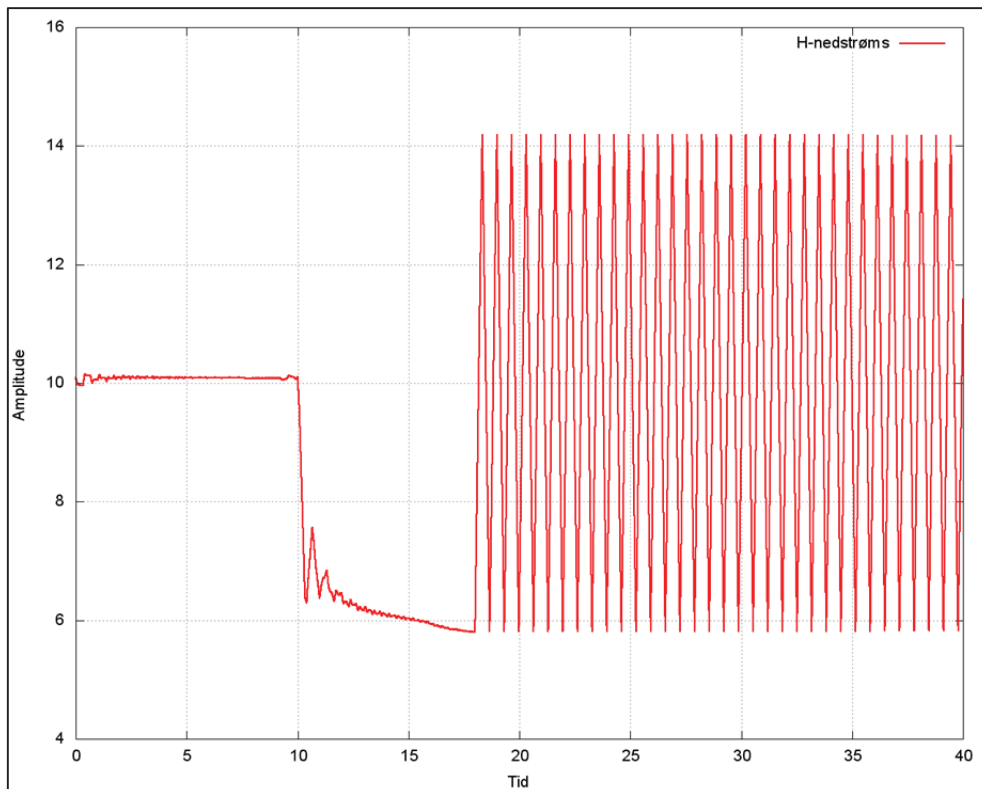


Figur 8 - Avslag-HRV-TI7

Vedlegg 7 - Simuleringsresultater Nye Frøland

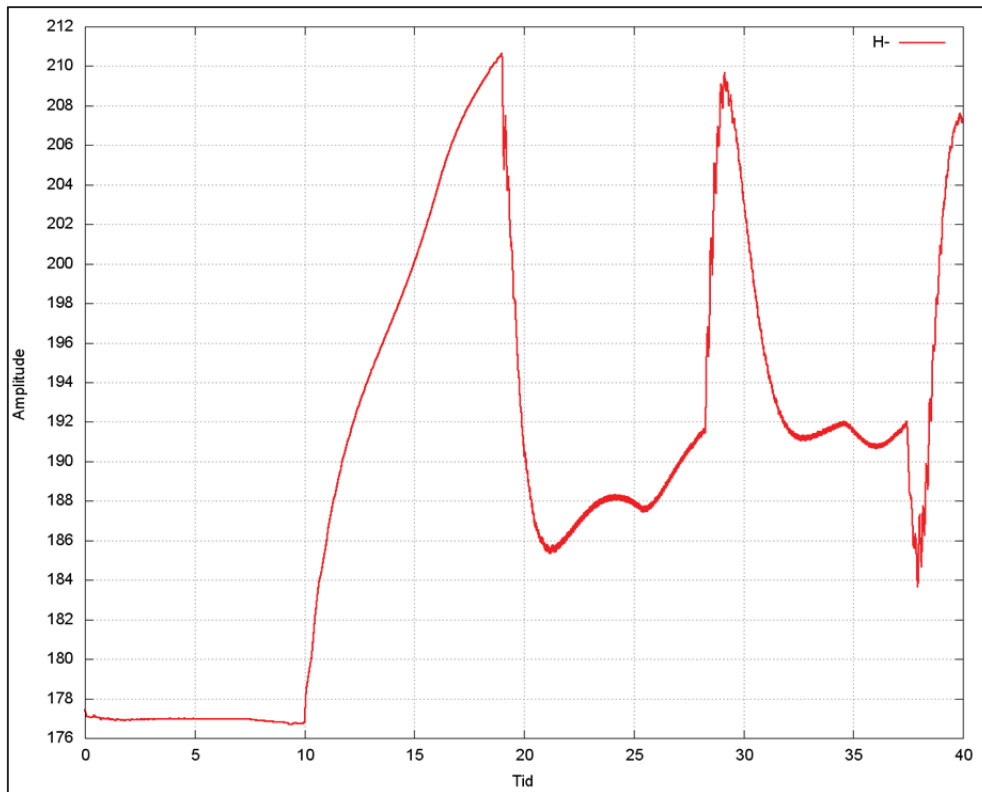


Figur 9 - Avslag-HRV-TI8

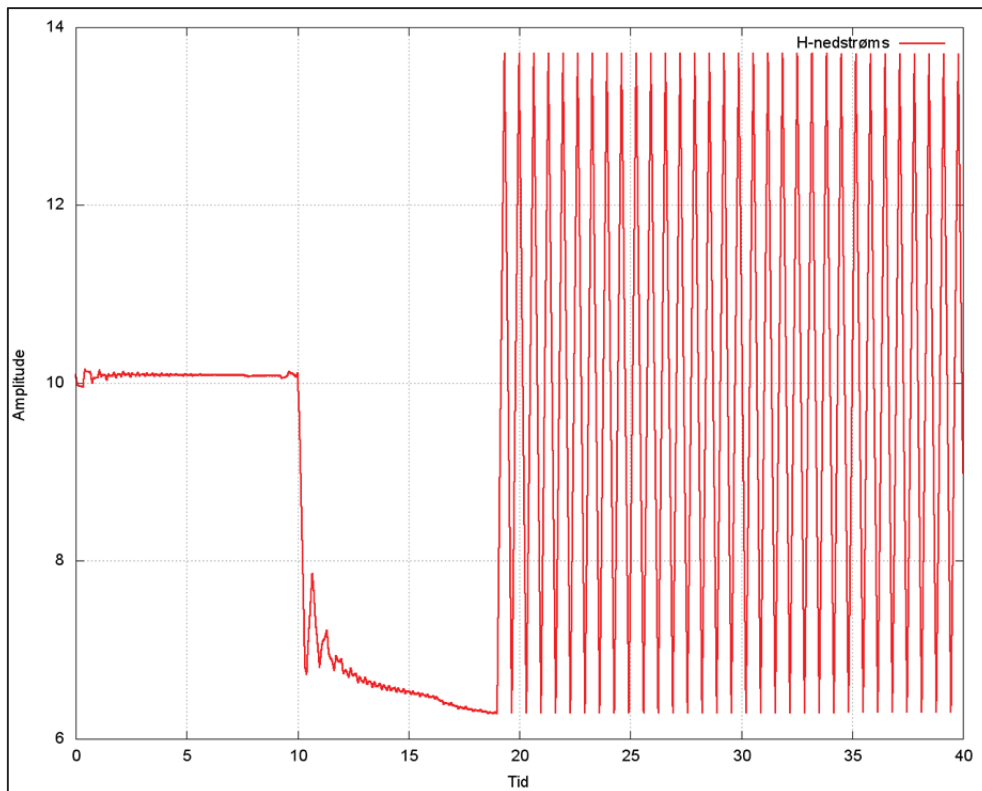


Figur 10 - Avslag-HRV-TI8

Vedlegg 7 - Simuleringsresultater Nye Frøland

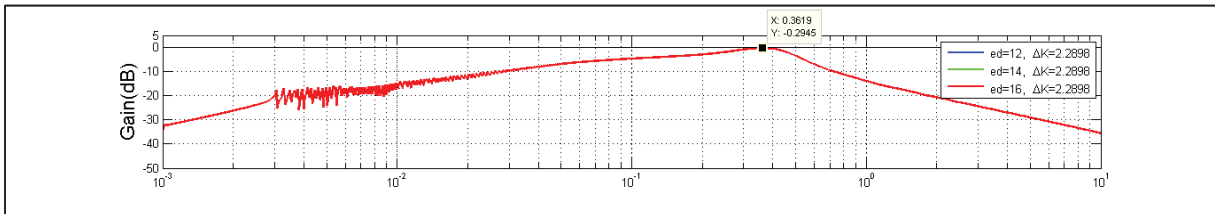
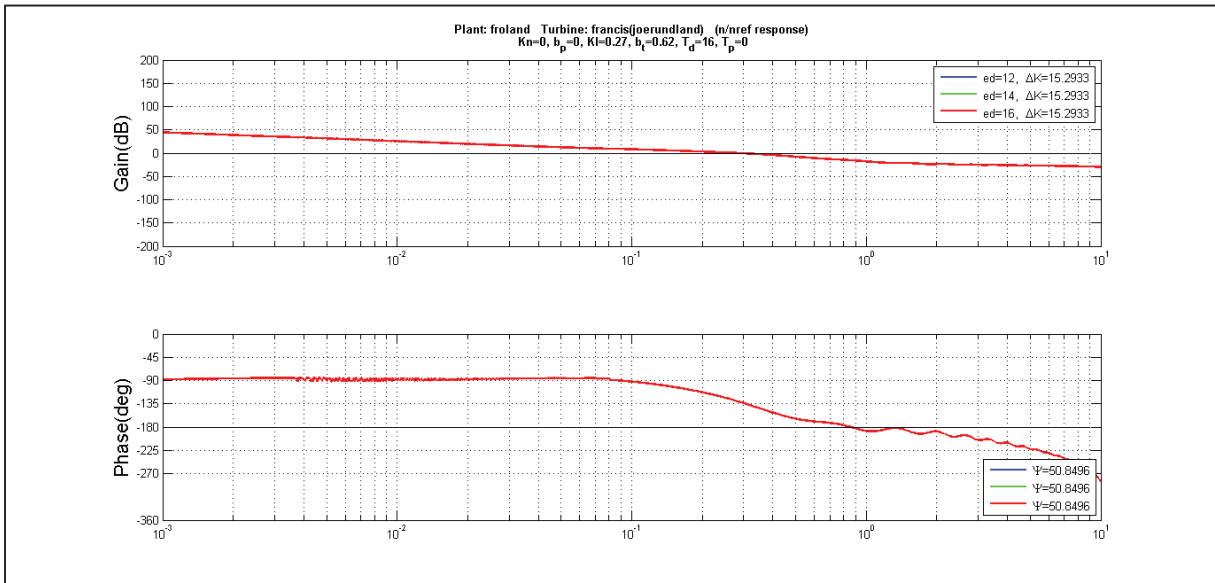
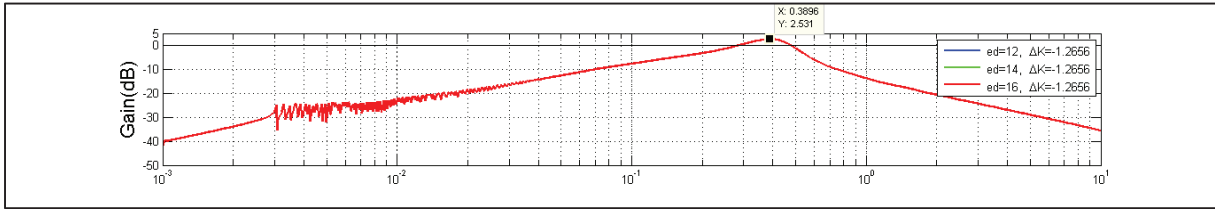
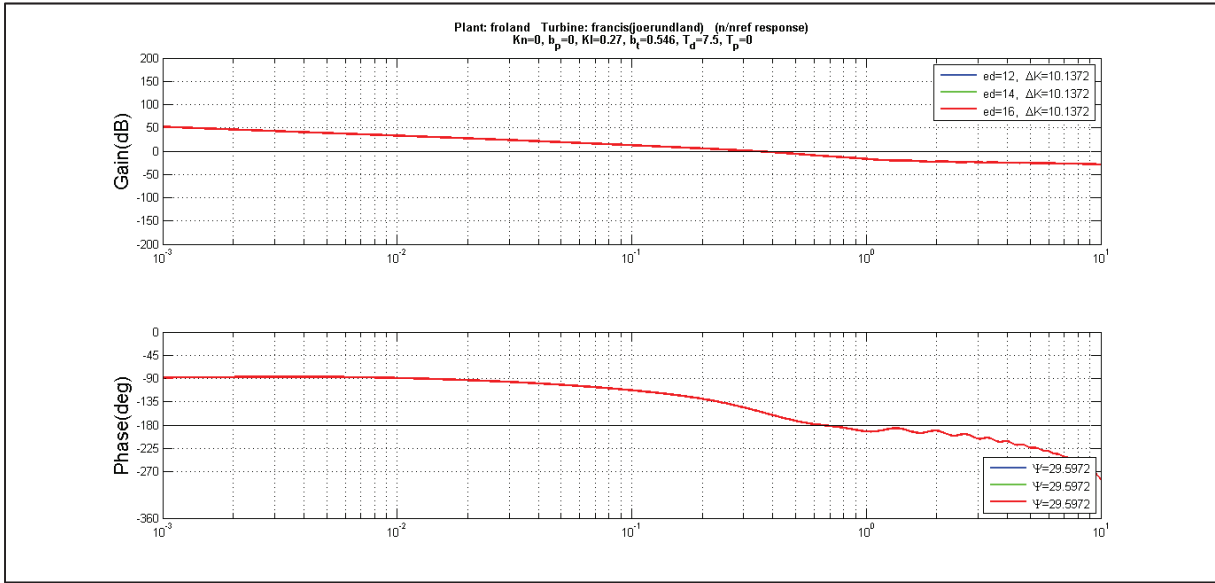


Figur 11 - Avslag-TI9

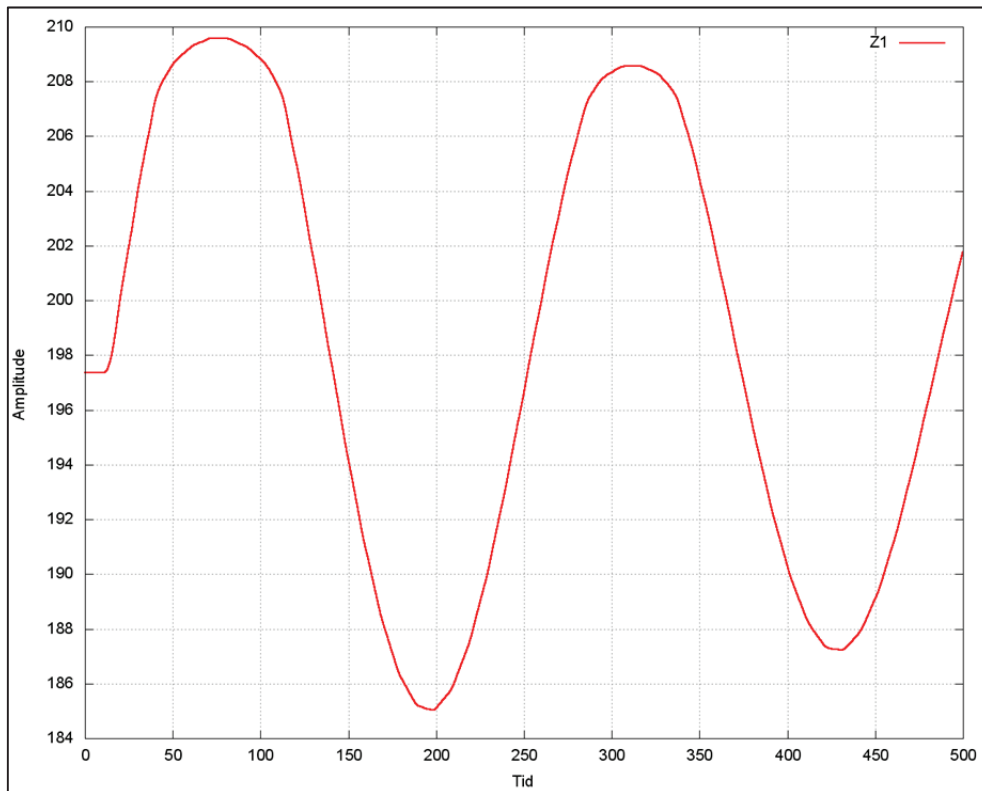


Figur 12 - Avslag-HRV-TI9

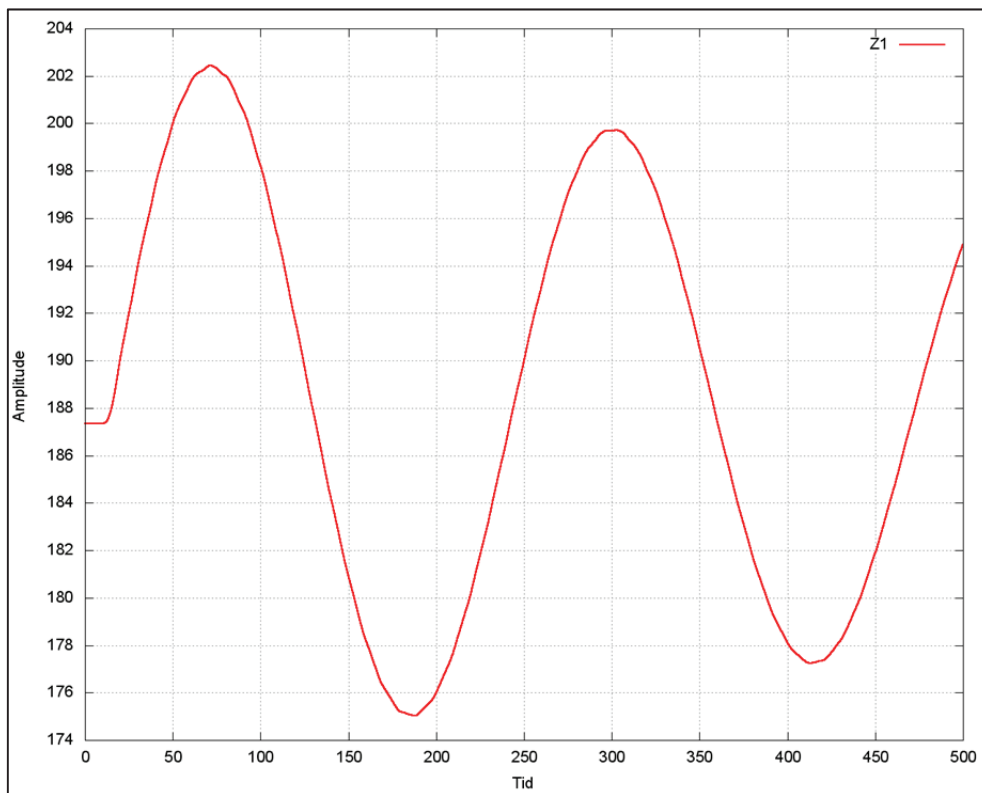
Reguleringsstabilitet - Opprinnelig geometri



Massesvingninger - Foreslått geometri

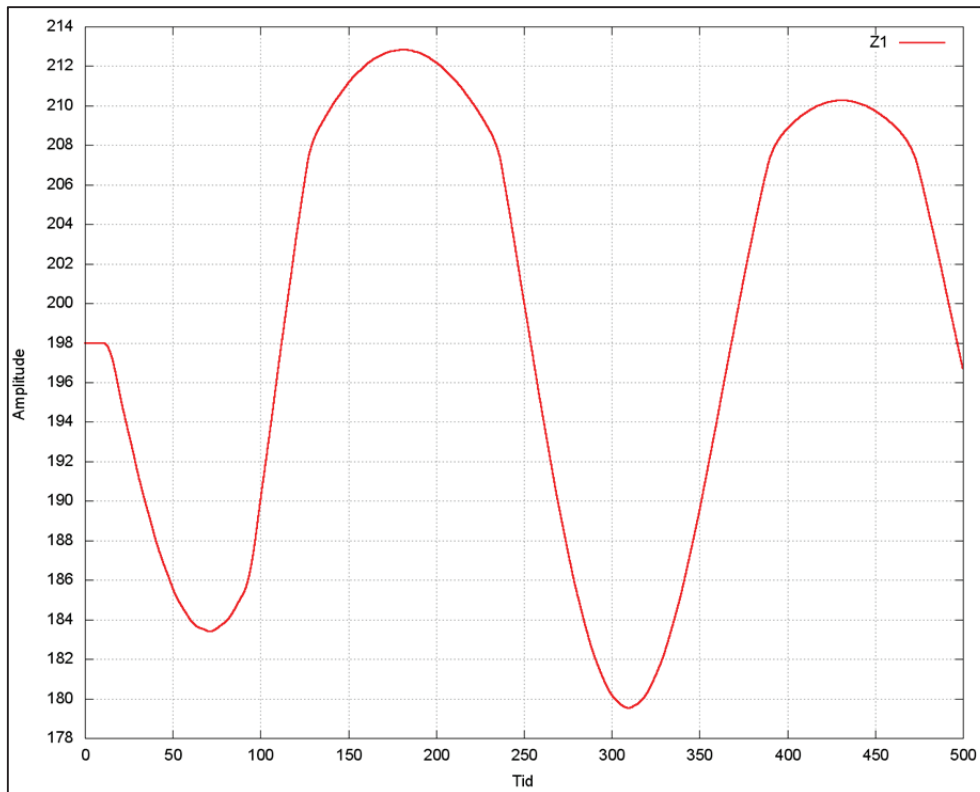


Figur 13 - Avslag-HRV

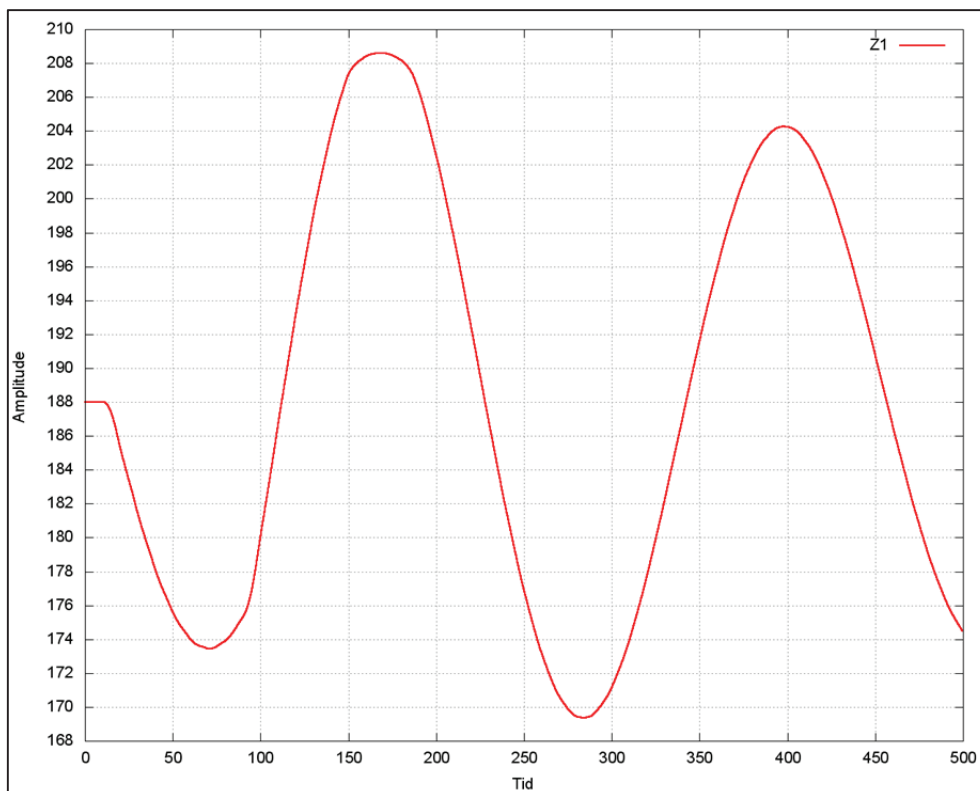


Figur 14 - Avslag - LRV

Vedlegg 7 - Simuleringsresultater Nye Frøland

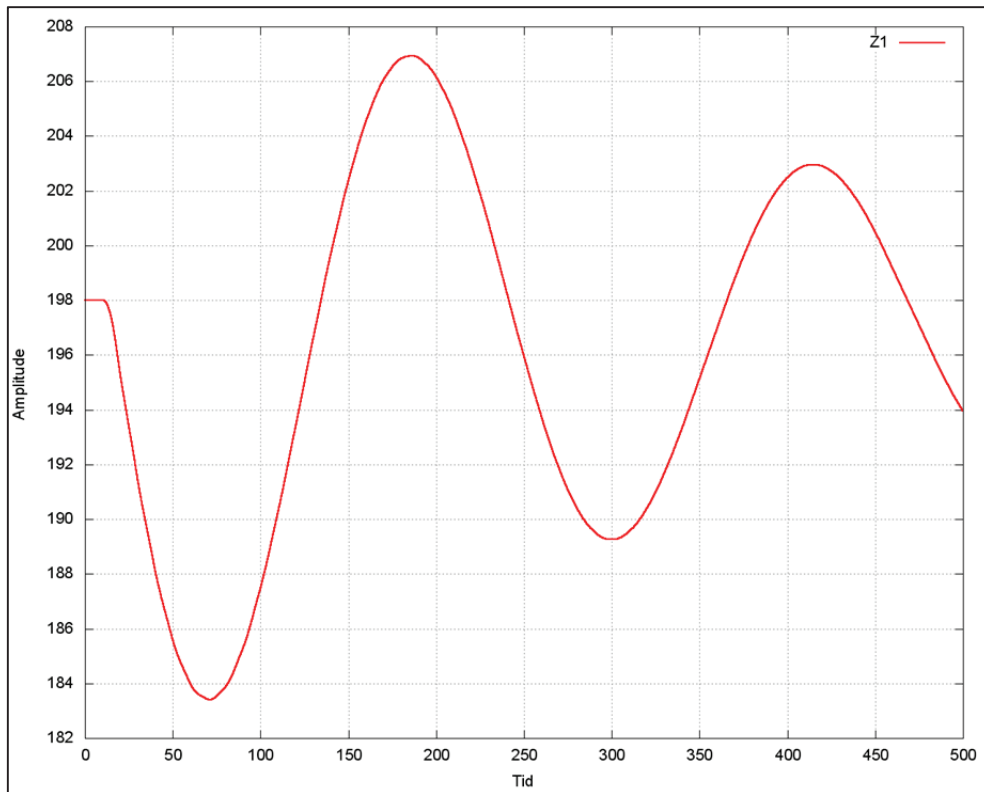


Figur 15 - Pådrag+avslag-HRV

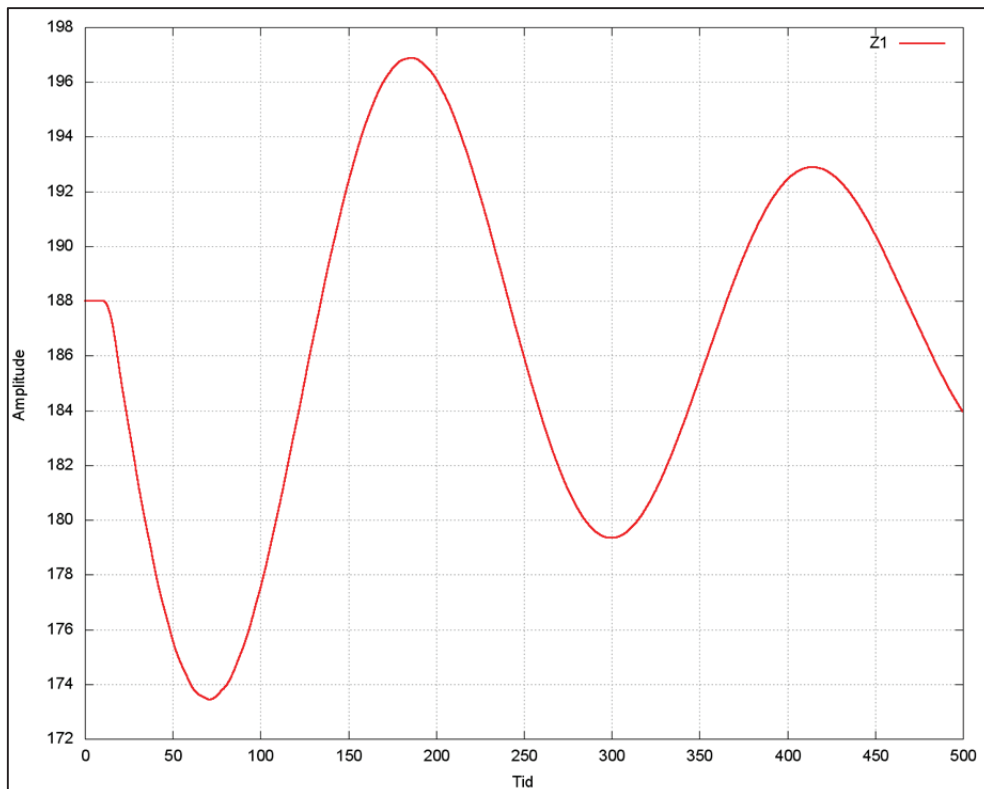


Figur 16 - pådrag+avslag-LRV

Vedlegg 7 - Simuleringsresultater Nye Frøland

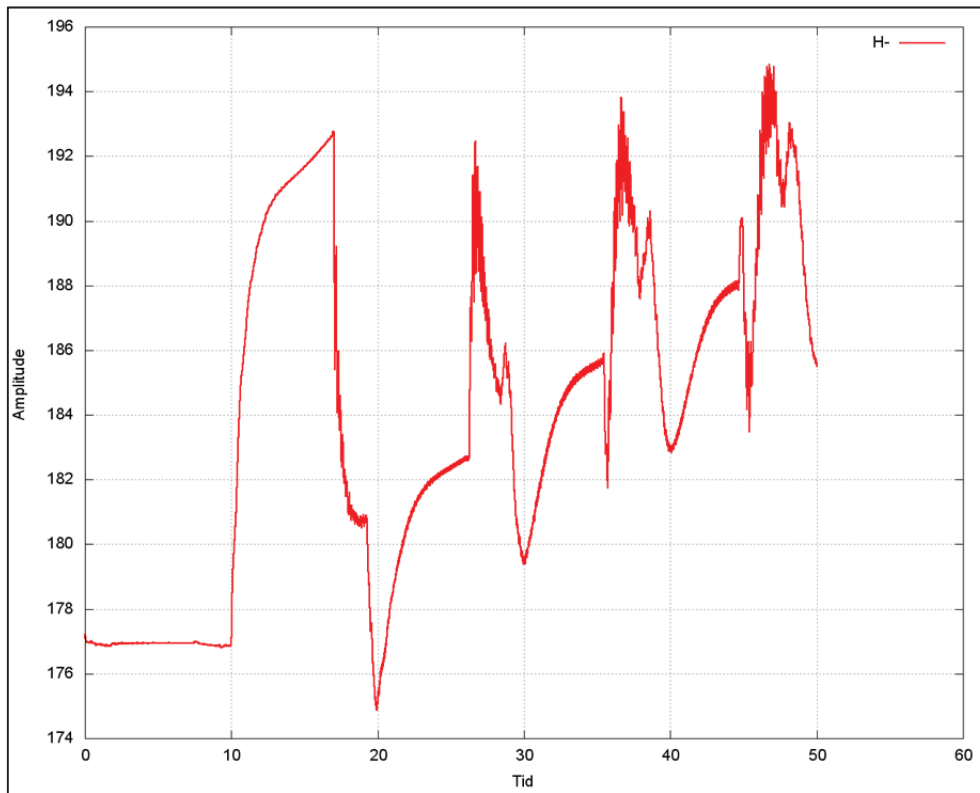


Figur 17 - Pådrag-HRV

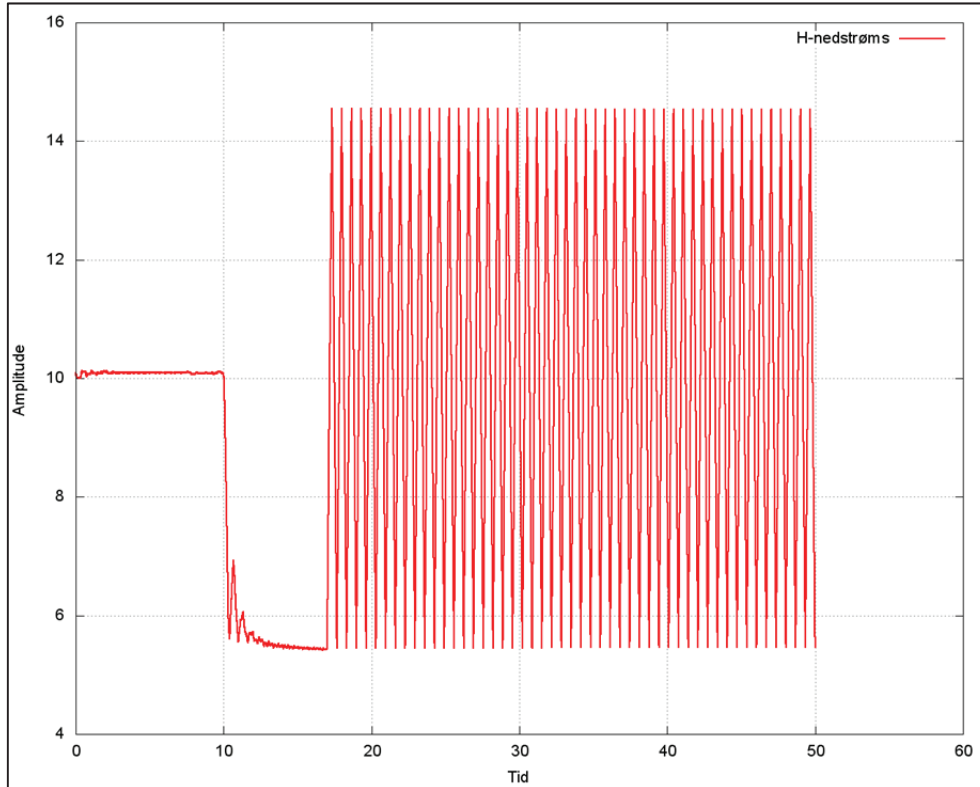


Figur 18 - Pådrag-LRV

Retardasjonstrykk - Foreslått geometri

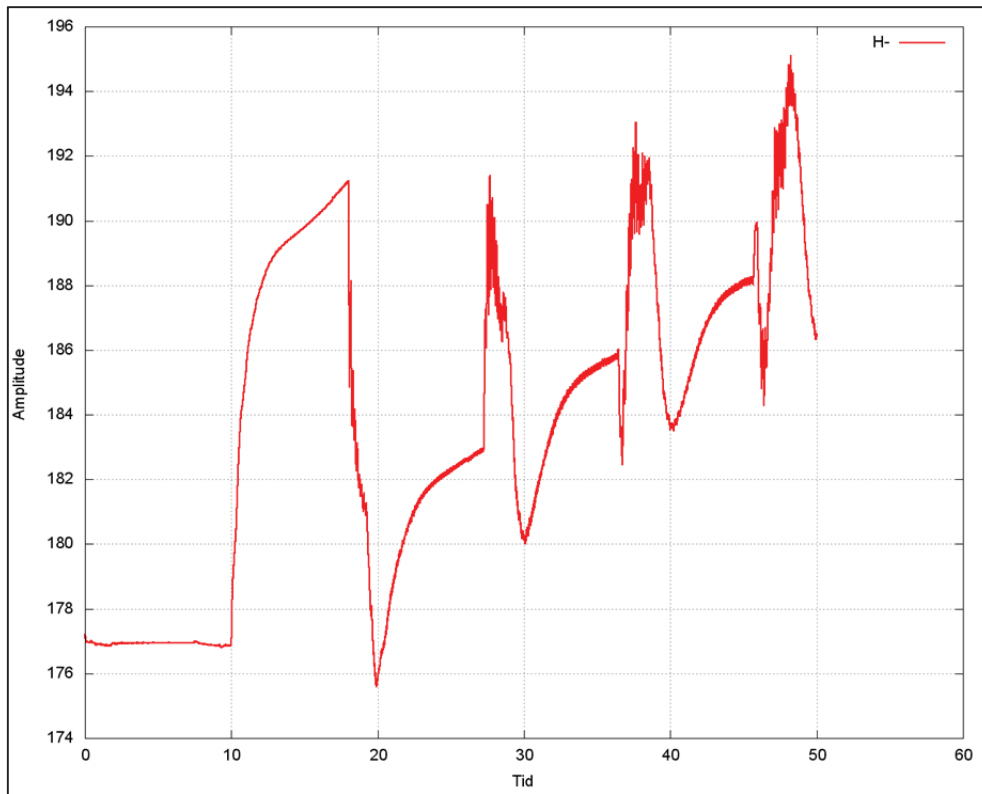


Figur 19 - Avslag-HRV-T17

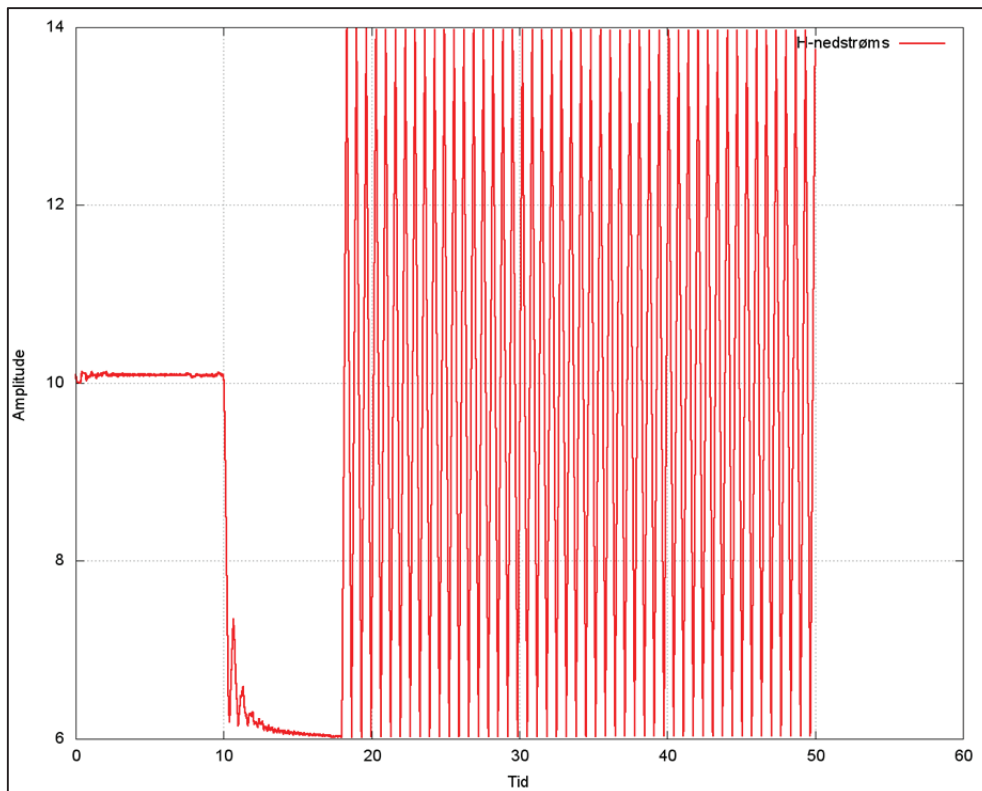


Figur 20 - Avslag-HRV-T17

Vedlegg 7 - Simuleringsresultater Nye Frøland

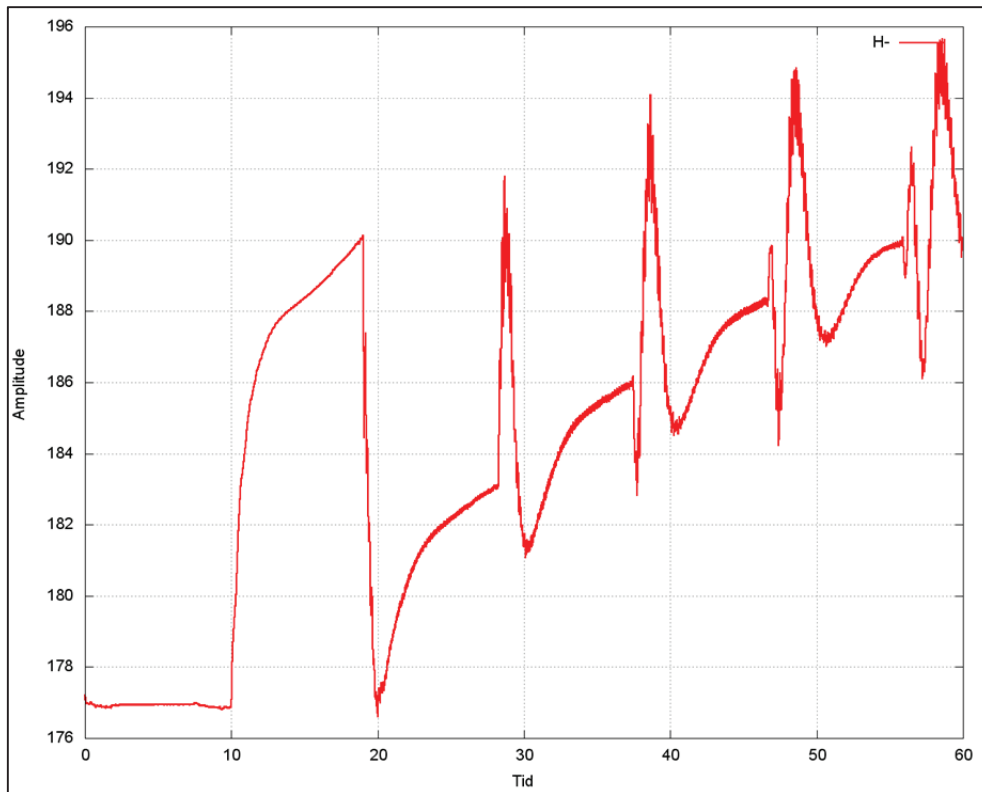


Figur 21 - Avslag-HRV-T18

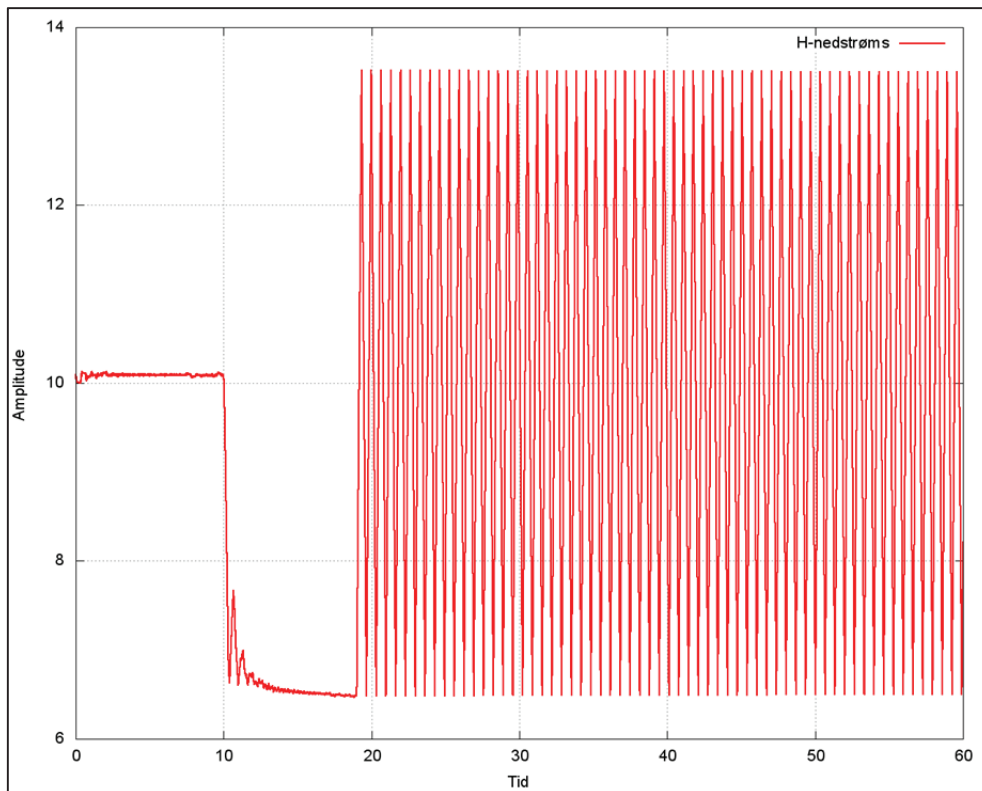


Figur 22 - Avslag-HRV-T18

Vedlegg 7 - Simuleringsresultater Nye Frøland

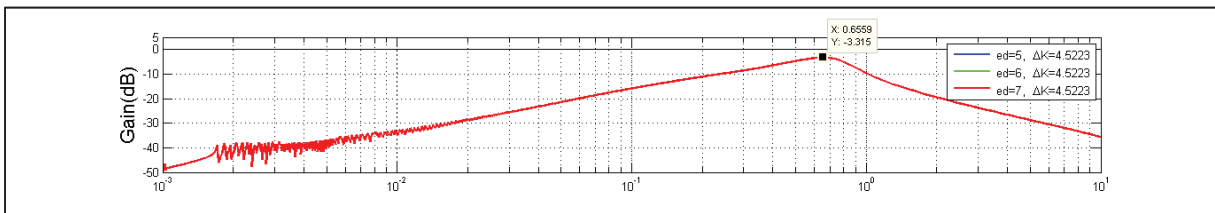
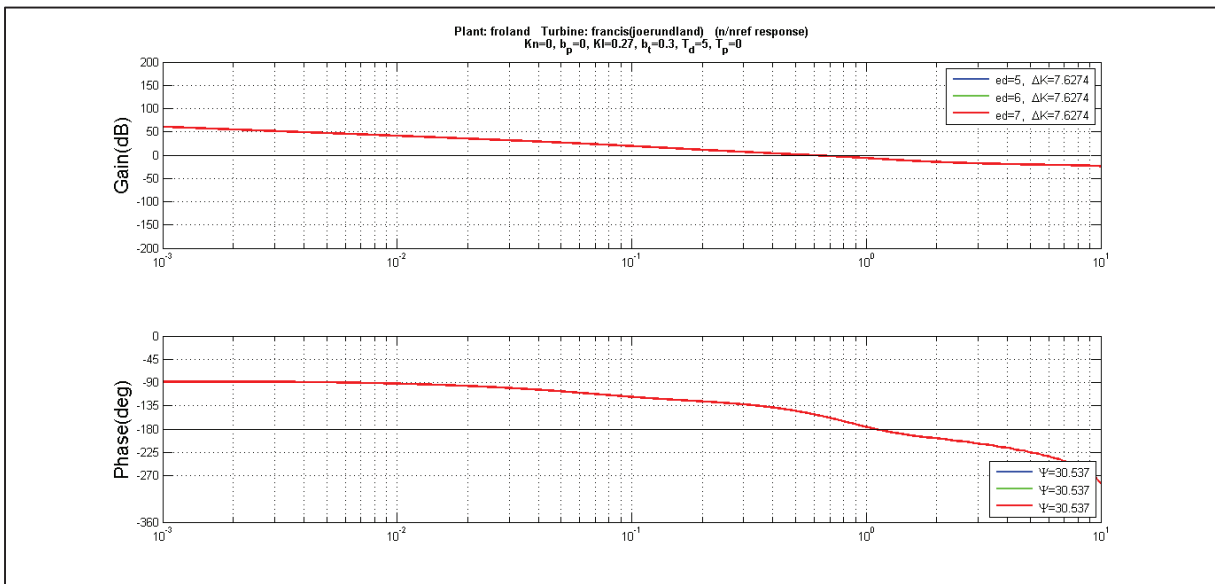
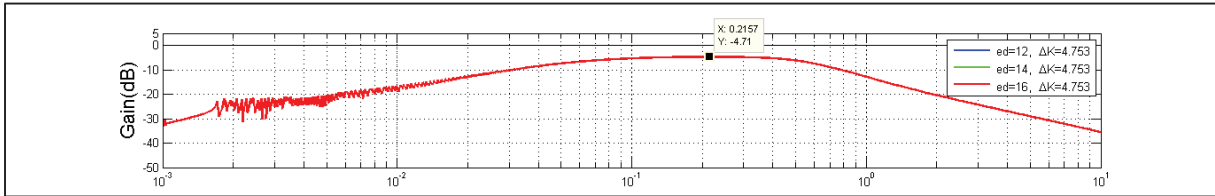
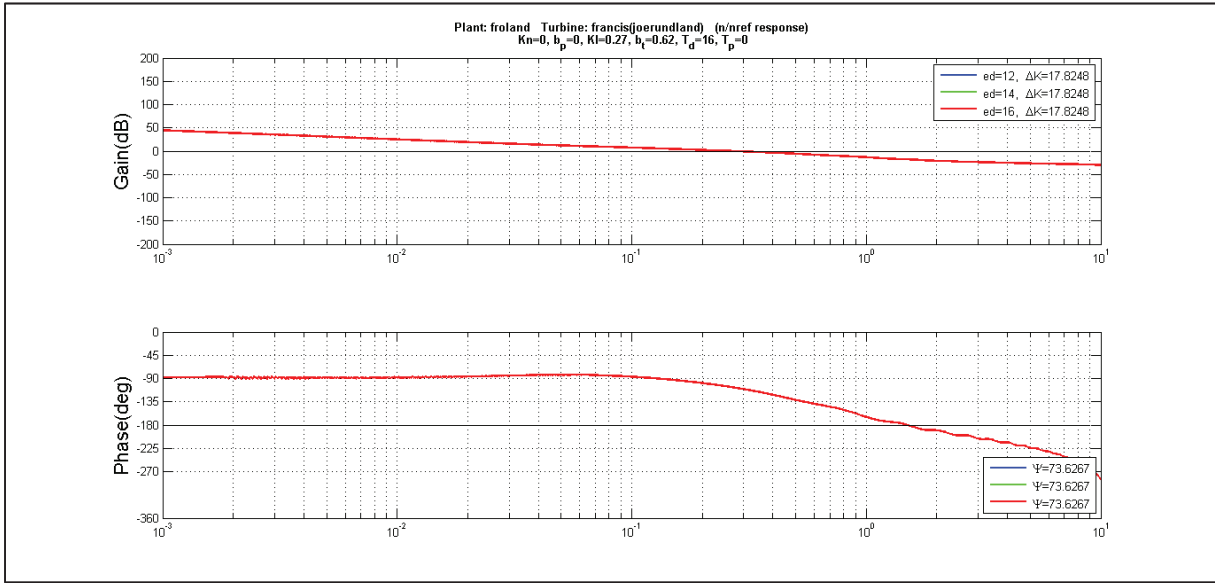


Figur 23 - Avslag-TI9

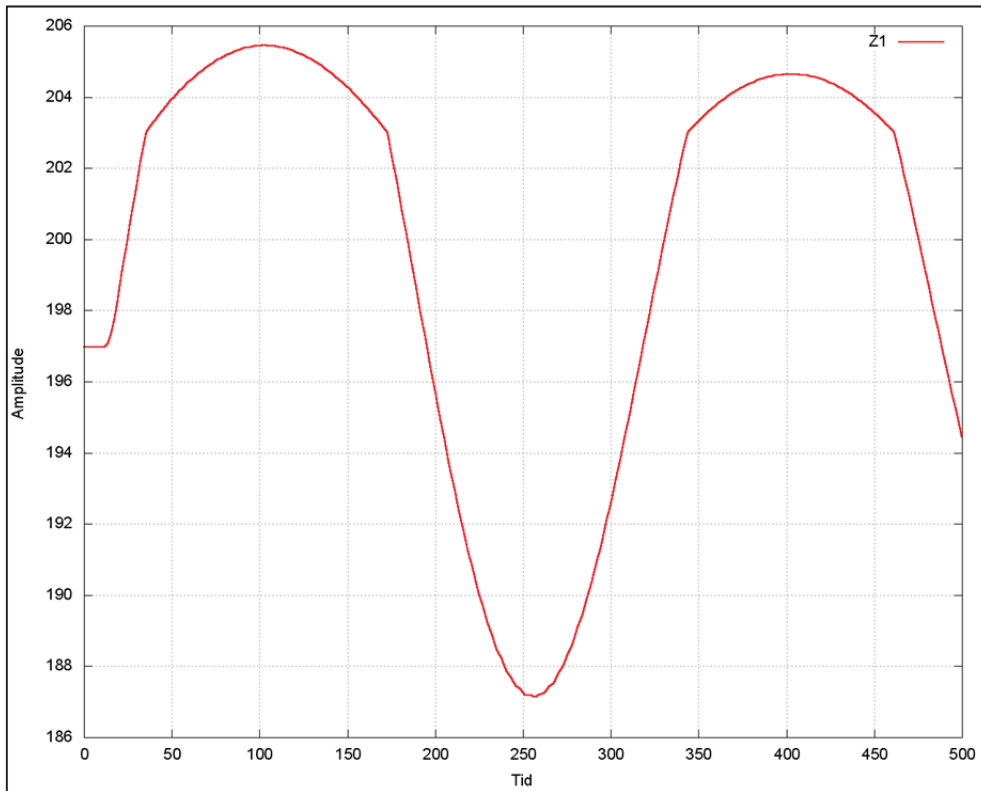


Figur 24 - Avslag-HRV-TI9

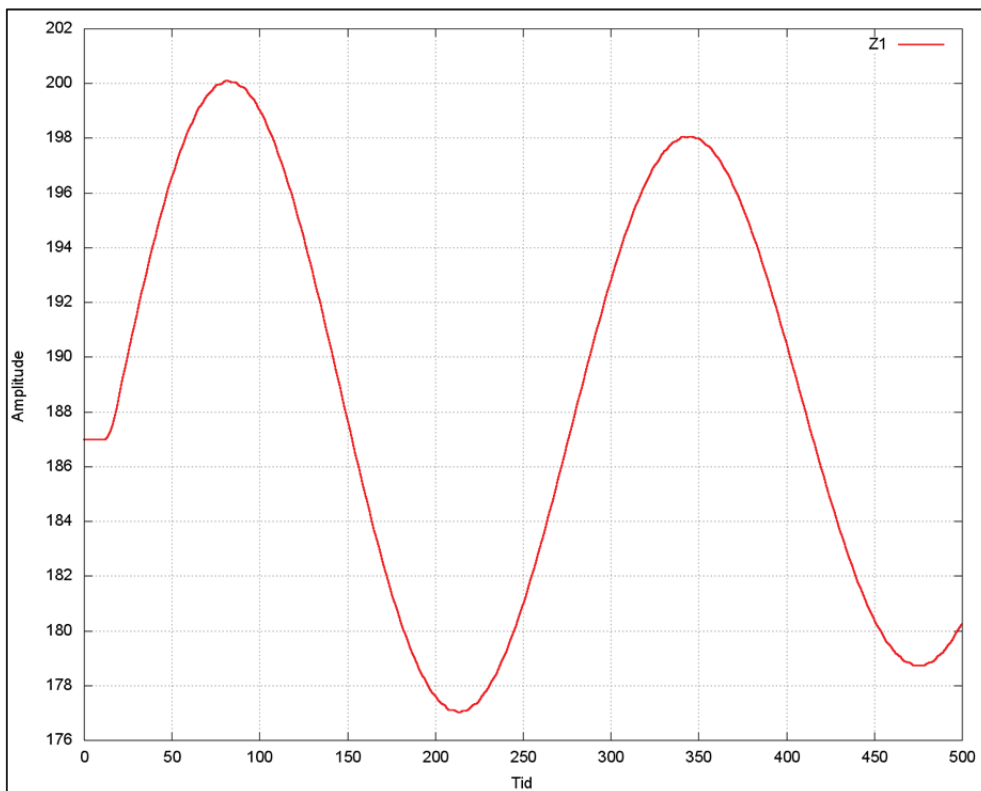
Reguleringsstabilitet- Foreslått geometri



Massesvingninger øvre svingekammer – Opprinnelig geometri

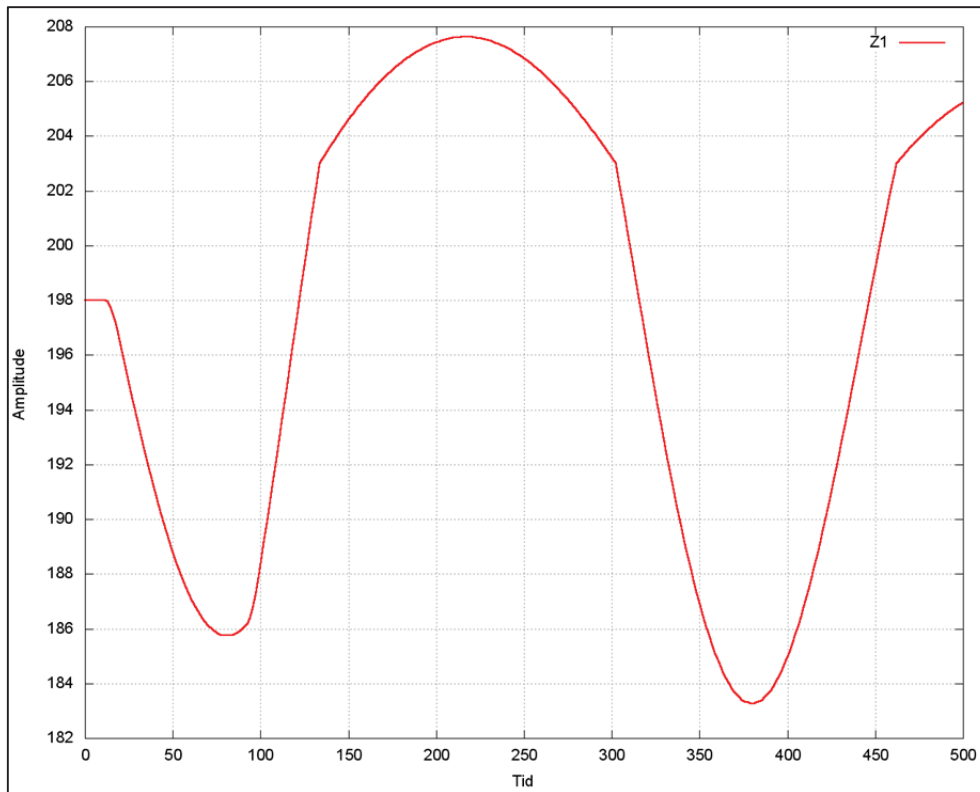


Figur 1 - Avslag-HRV

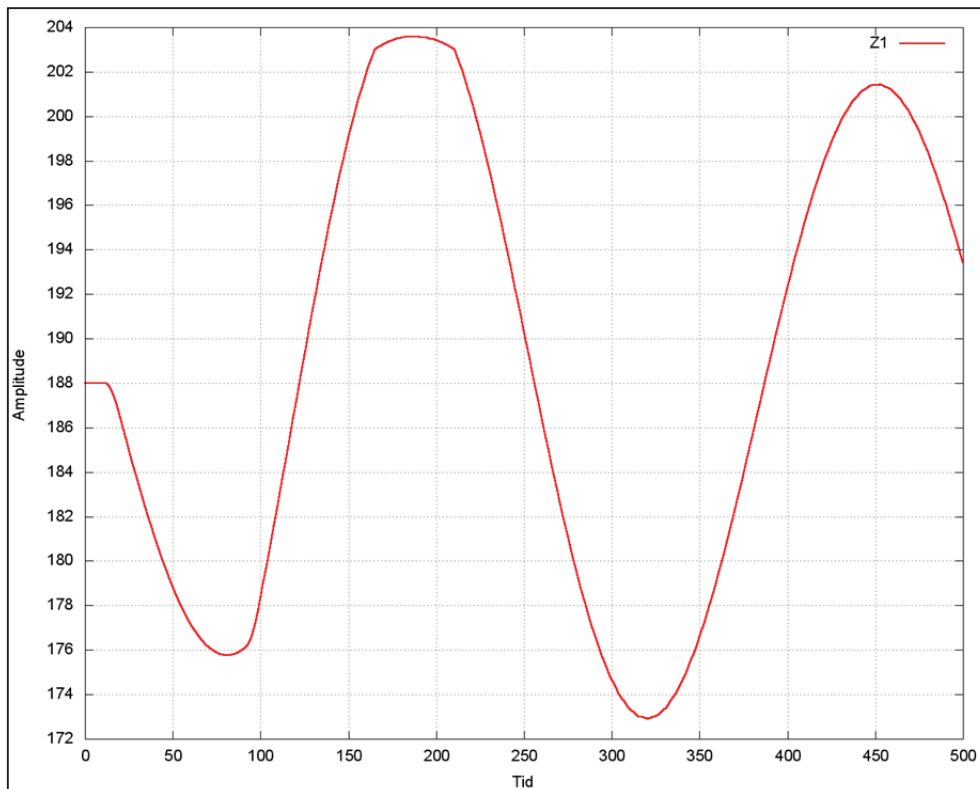


Figur 2 - Avslag – LRV

Vedlegg 8 - Simuleringsresultater Aldal

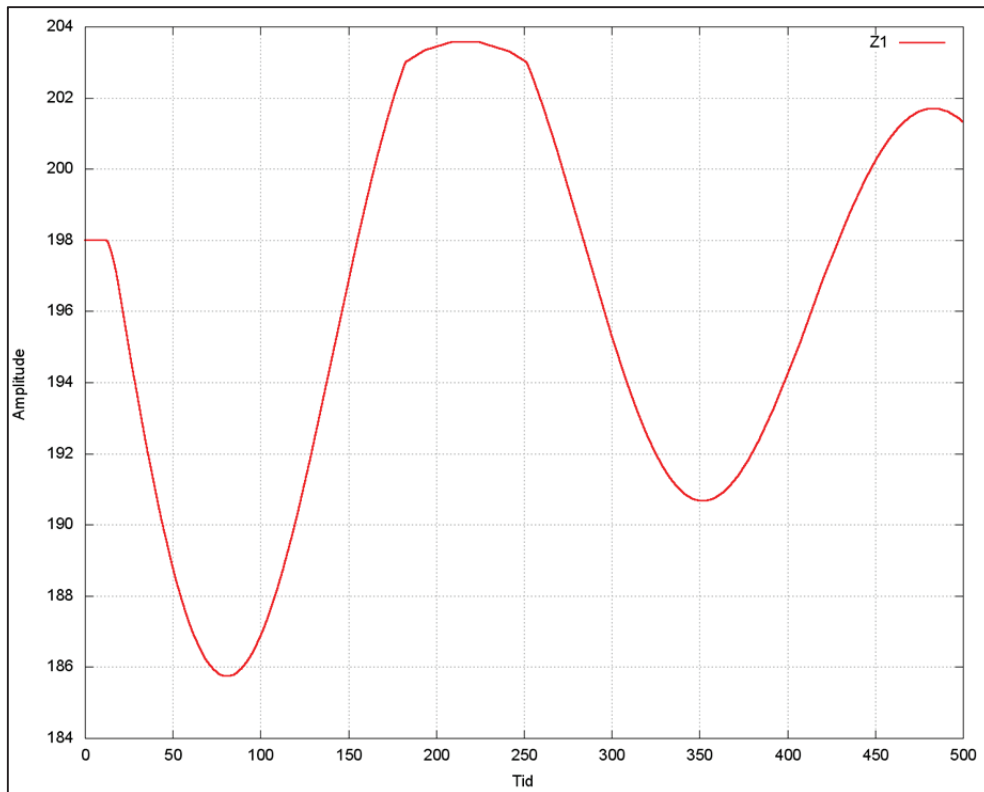


Figur 3 - Pådrag+avslag-HRV

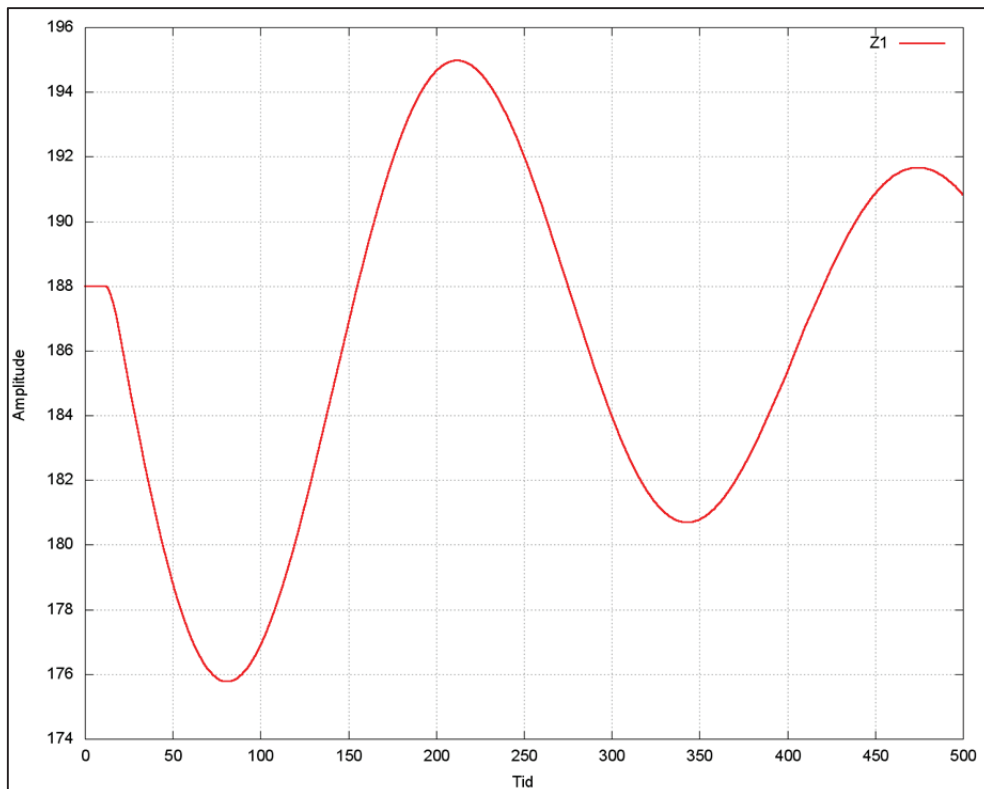


Figur 4 - Pådrag+avslag-LRV

Vedlegg 8 - Simuleringsresultater Aldal

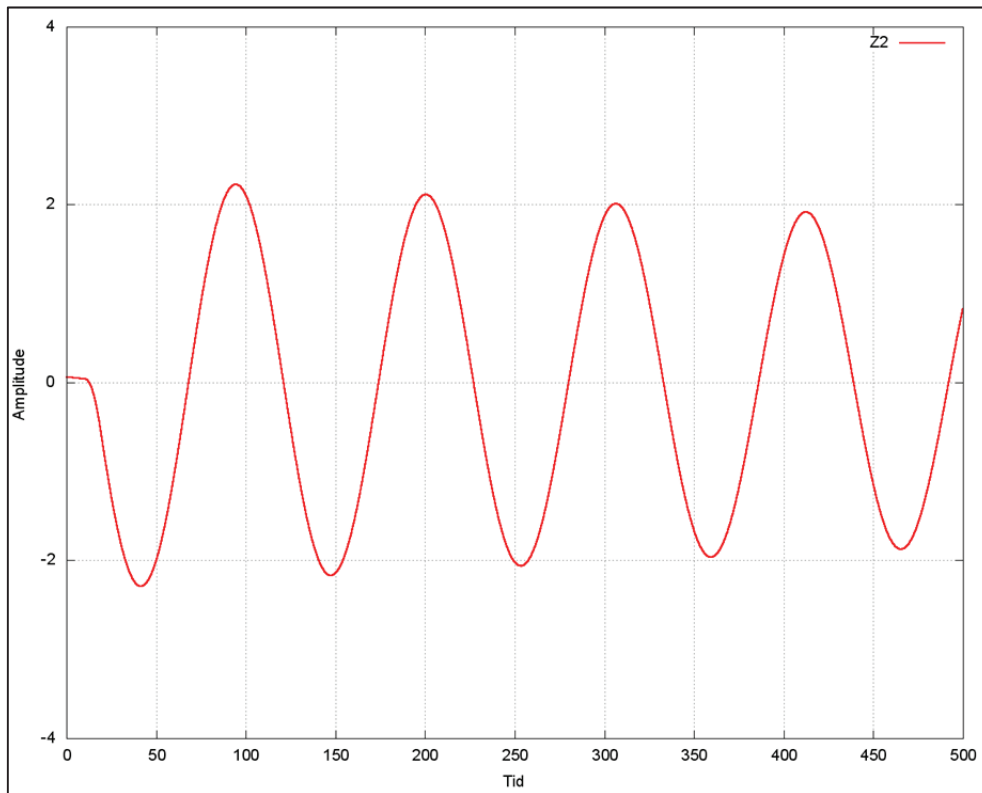


Figur 5 - Pådrag-HRV

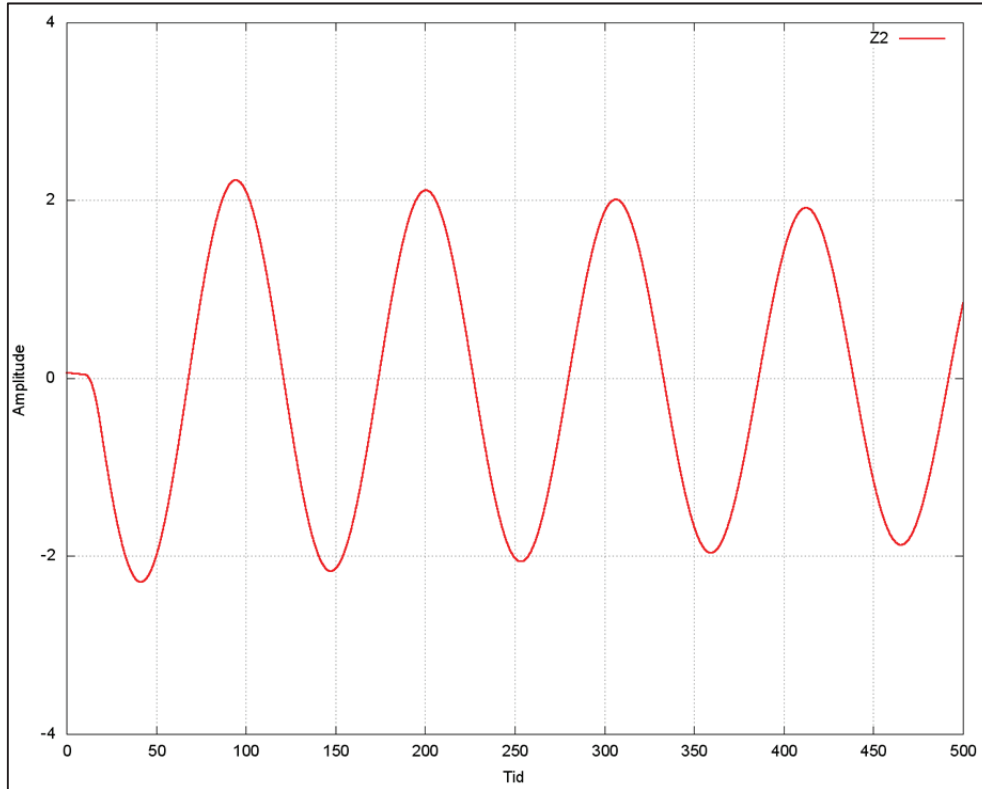


Figur 6 - Pådrag-LRV

Massesvingninger nedre svingekammer – Opprinnelig geometri

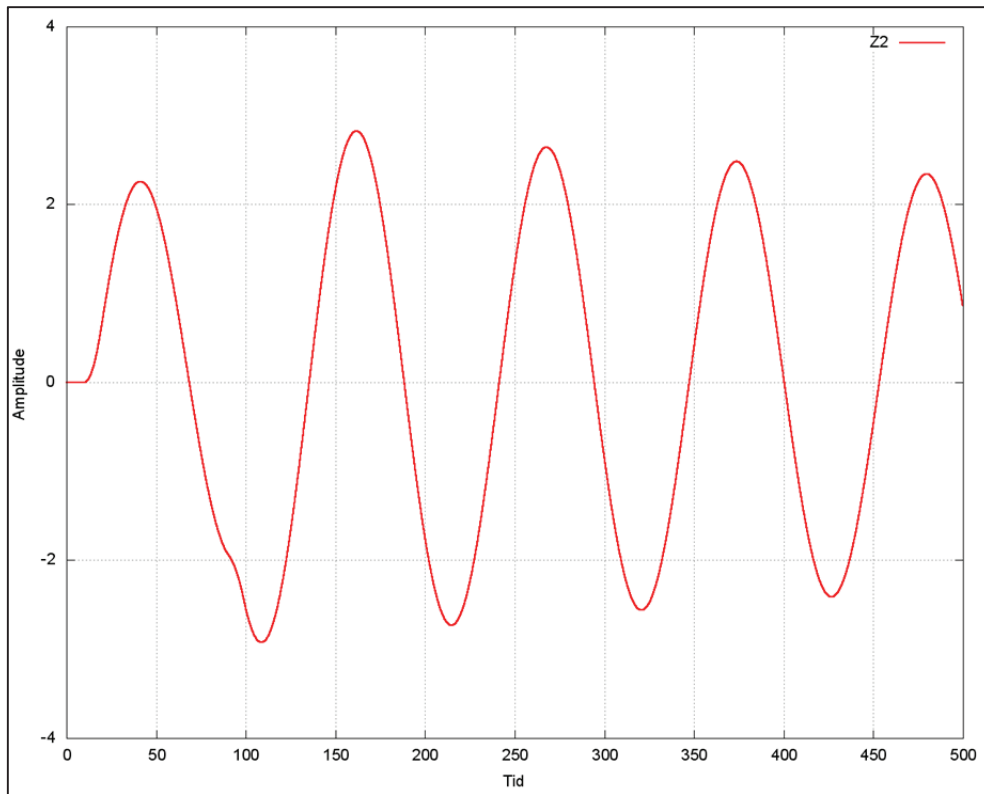


Figur 7 - Avslag-HRV

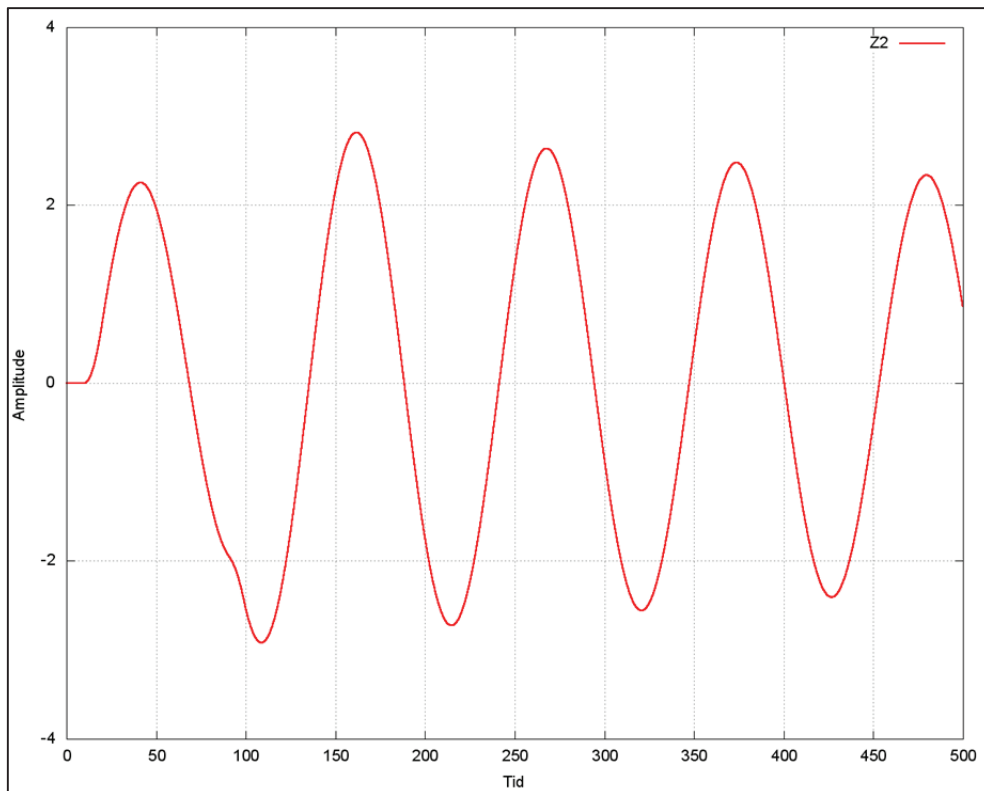


Figur 8 - Avslag – LRV

Vedlegg 8 - Simuleringsresultater Aldal

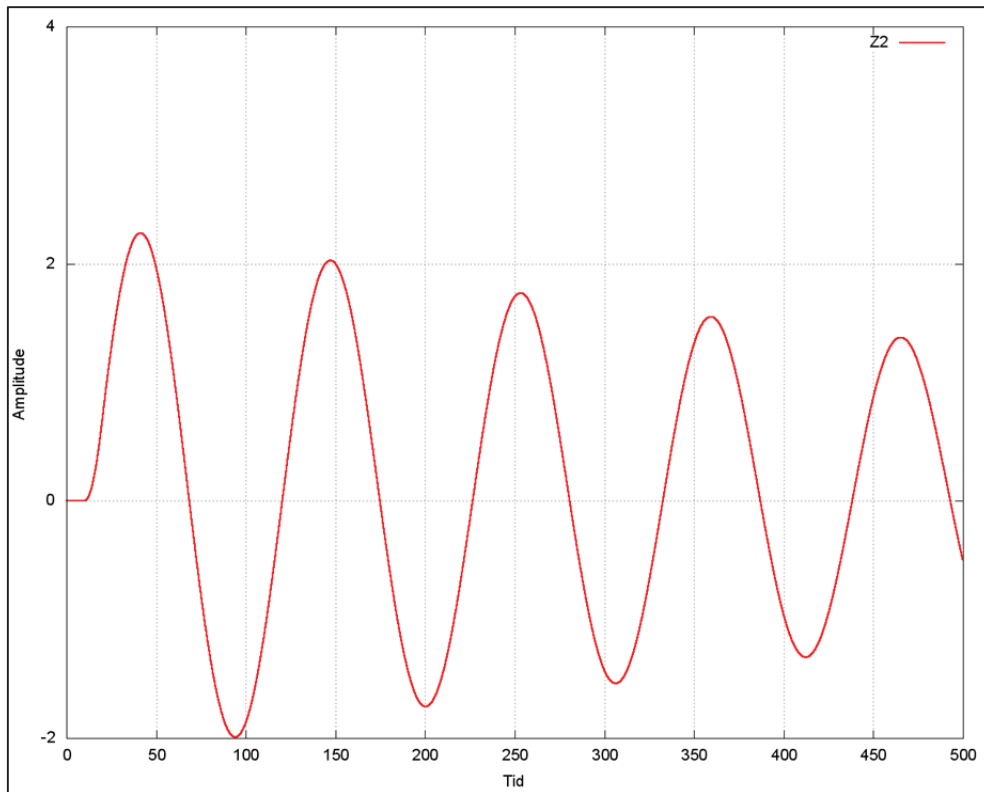


Figur 9 - Pådrag+avslag-HRV

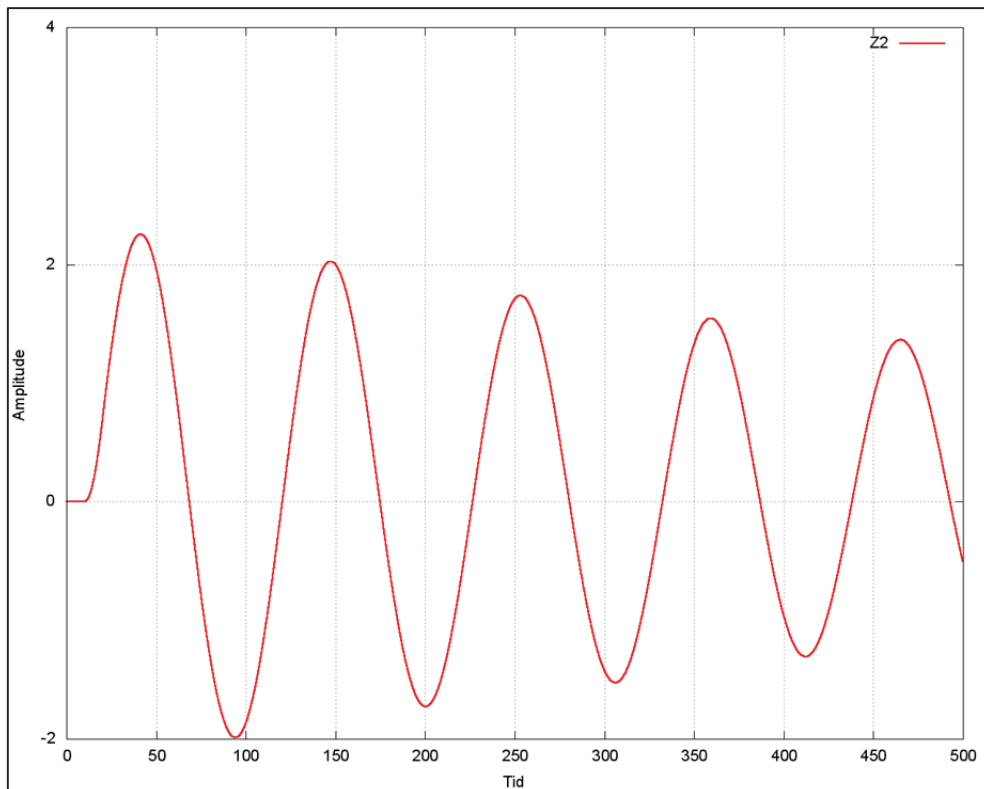


Figur 10 - pådrag+avslag-LRV

Vedlegg 8 - Simuleringsresultater Aldal

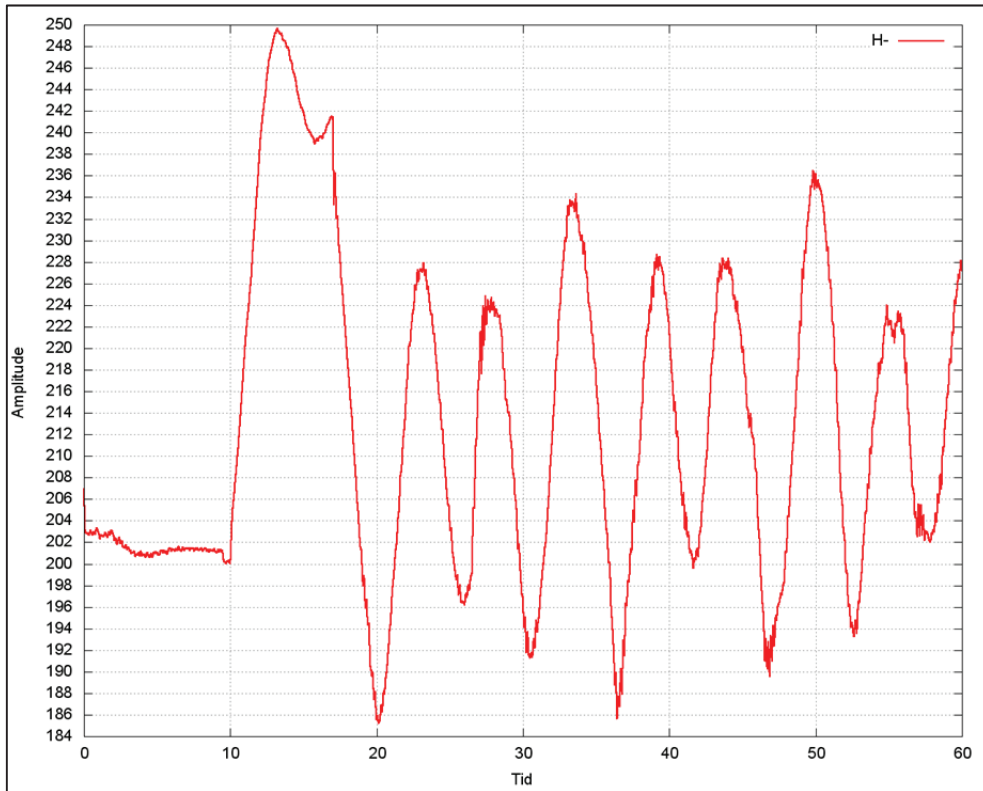


Figur 11 - Pådrag-HRV

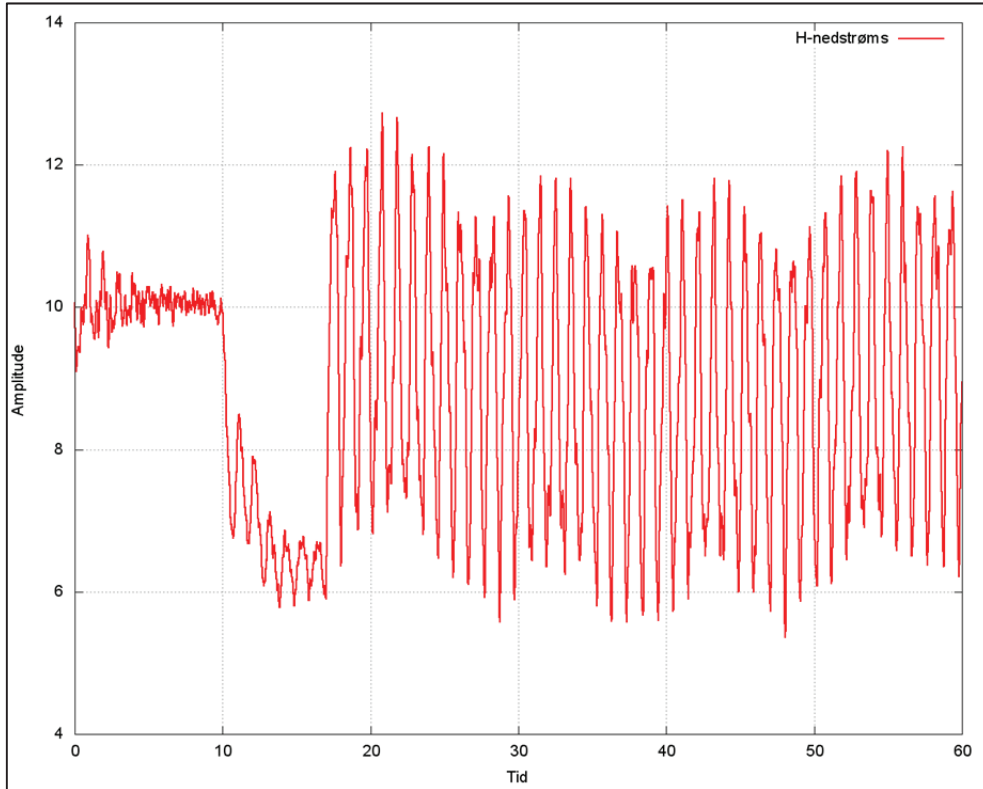


Figur 12 - Pådrag-LRV

Retardasjonstrykk - Opprinnelig geometri

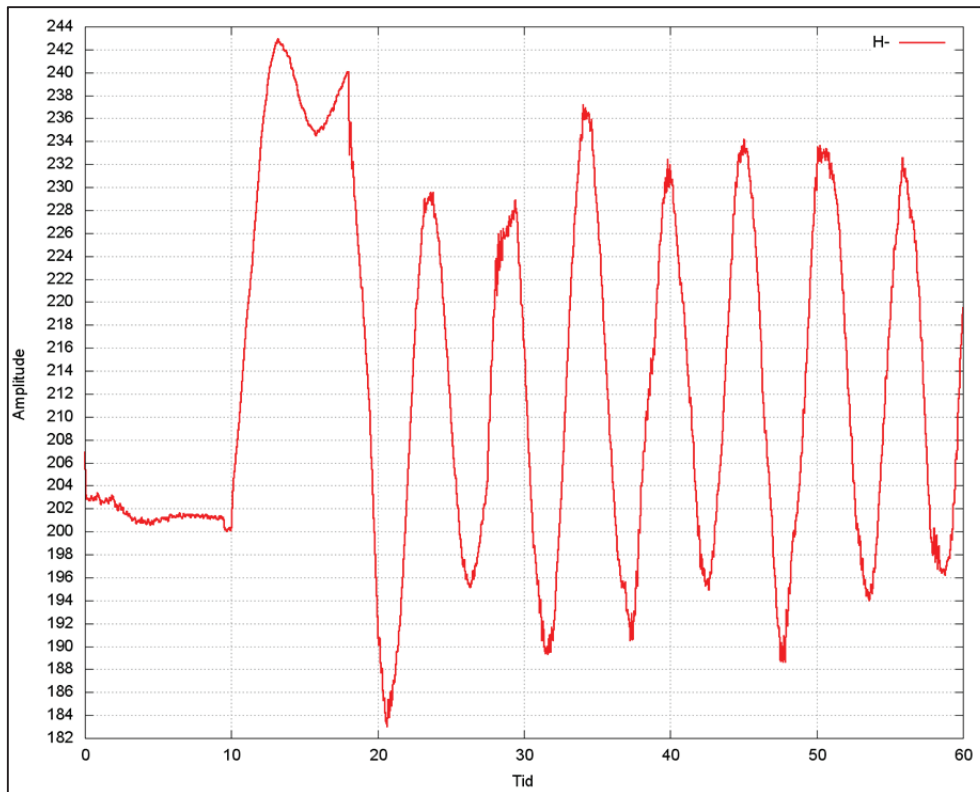


Figur 13 - Avslag-HRV-T17

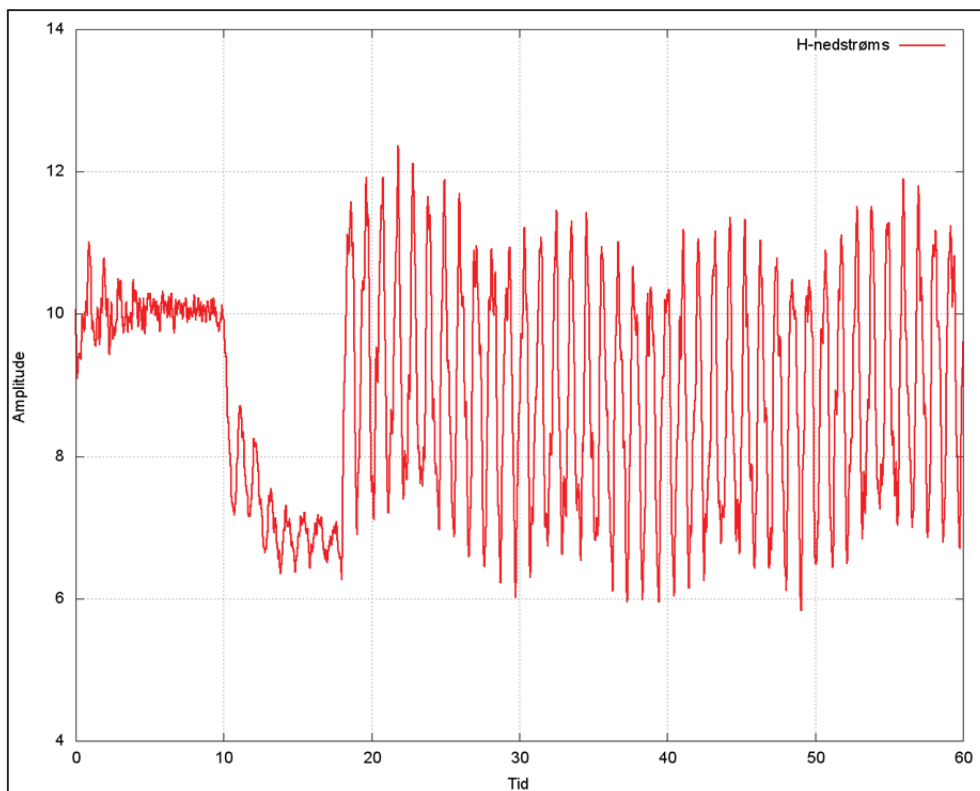


Figur 14 - Avslag-HRV-T17

Vedlegg 8 - Simuleringsresultater Aldal



Figur 15 - Avslag-HRV-TI8



Figur 16 - Avslag-HRV-TI8

Vedlegg 8 - Simuleringsresultater Aldal

Figur 17 - Avslag-T19

Figur 18 - Avslag-HRV-T19