

Plastring av fyllingsdammer

Modellforsøk, praktiske forhold og avvik fra regelverk

Guri Holte Veslegard

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Fjola Gudrun Sigtryggsdottir, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



MASTEROPPGÅVE

Student: *Guri Holte Veslegard*

Tittel: **Plastring av fyllingsdammer**

1 BAKGRUNN

Fyllingsdammer har tydelig adskilte soner for å ivareta filterkriteriene fra kjernen til støttefyllingen. Fyllingsdammer bygd i Norge etter ca. 1950 skiller seg noe ut sammenlignet med internasjonale fyllingsdammer ved at det i Norge er benyttet store steiner i det ytreste lag, det vil si skråningsvern. Stabiliteten til nedstrøms skråning er avgjørende for dammens sikkerhet. Det ytterste laget, skråningsvernet, er spesielt viktig element i nedstrøms skråning.

Steinene i skråningsbeskyttelsen legges ut en og en på en bestemt måte. Dette kalles plastring og er en utpreget norsk byggemetode. Skråningsvernets viktigste funksjon er at den skal hindre resten av støttefyllingen i å bli erodert vekk i en situasjon med utstrømmende vann eller overtopping. I den norske dam sikkerhetsforskrift samt tilhørende veiledere utgitt av NVE er der krav til minimum steinstørrelse for plastring samt flere krav.

Det er tidligere levert flere masteroppgaver fra tidligere forsøk og alt dette materialet er tilgjengelig og vil sammen med referansene danne grunnlaget for denne oppgava.

2 HOVUDPUNKT I MASTEROPPGÅVA

Formålet med oppgaven er at investigere plastring under overtopping av damkrona, samt undersøkelse av praktiske forhold med hensyn til steinstørrelse. Oppgave løses ved hjelp av fysiske modellforsøk, og data innsamling om plastring (ingeniørgeologiske egenskaper og anleggsteknisk forhold), samt analyse av dette.

Arbeidet vil inneholde følgende hovedpunkter:

1. Gjennomgang av tidligere innhenta grunnlagsmateriale i form av lærebøker, artikler og rapporter. Dette inkluderer rapport om kartlagninga av plastring i fyllingsdammer.
2. Studere kartlagnings rapporten til at identifisere avvik fra regelverkets krav til plastring.

3. Undersøke videre om de praktiske forholdene som kan ligge bak størrelse av stein i plastringen. Dette ville inkludere ingeniørgeologiske forhold, samt anleggsteknisk forhold. Informasjon må innsamles fra entreprenører, rådgivere og NVE.
4. Analyse av innsamlet data med hensyn på at identifisere praktiske forhold til steinstørrelse brukt i plastring, og avvik fra regelverkets krav.
5. Planlegging av fysiske modellforsøk på plastring med tanke i at se på påvirkning av plastring som avviker regelverkets krav.
6. Utføre de planlagte modellforsøk og dokumentere målingene.
7. Sammenlign resultatene med tidligere utførte forsøk.
8. Kritisk diskusjon av resultatene og rapportering.
9. Rapportering

Diskusjoner med veiledere brukes for å planlegge modellforsøkene i detalj samt valg av fyllingsdammer og det data som skal innsamles.

3 RETTLEDNING, DATA OG INFORMASJON

Førsteamanuensis Fjóla Guðrún Sigtryggisdóttir på NTNU vil være veileder.

Diskusjon med, og bidrag fra, kollegaer og medarbeidere med NTNU, SINTEF, NVE, NGI, NGU, kraftselskap og rådgivere og dameiere anbefales. Bidrag som går inn i oppgaven skal alltid refereres til på korrekt måte.

4 RAPPORTFORMAT, REFERANSAR OG ERKLÆRING

Opgaven skal skrives i et tekstbehandlingsprogram og figurer, tabeller, foto osv. skal være av god rapportkvalitet. Rapporten skal inneholde et sammendrag, en innholdsliste, en liste over figurer og tabeller, en litteraturliste og opplysninger om andre relevante referanser og kjelder. Oppgaven skal leverast som .pdf i DAIM og trykkes i tre eksemplar som sendes direkte fra trykkeri til veileder/institutt. Sammendraget skal ikke gå over mer enn 450 ord og skal være eigna for elektronisk rapportering.

Masteroppgaven skal ikke leverast senere enn den leveringsfristen som kommer fram i DAIM (20 veker + offentlige fridager vårsemesteret).

Trondheim, 13. januar 2017



Fjóla Guðrún Sigtryggisdóttir
Førsteamanuensis

Sammendrag

Formålet med masteroppgaven er å undersøke plastring utsatt for overtopping, teoretisk bakgrunn for valg av steinstørrelse og undersøke hvilke forhold som påvirker valg av steinstørrelse under bygging av plastring i felt.

Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg, damsikkerhetsforskriften fra olje- og energidepartementet (OED, 2009) stiller krav til plastring av nedstrøms skråning på fyllingsdammer. Ved plastring skal steinene plasseres med fall og lengderetning (a-aksen) innover i dammen. Bakgrunnen for kravet er å øke erosjonsmotstanden og dermed sikkerheten av dammen ved en eventuell overtoppingssituasjon eller lekkasje. Stein som benyttes i nedstrøms skråningsvern skal ha tilstrekkelig størrelse og kvalitet samt være ordnet i forband. Norges vassdrags og energidirektorat (NVE) gir anbefalinger til steinstørrelse og hvordan plastringen skal utføres.

Bakgrunn for dimensjonering og beskrivelse av steinstørrelse varierer og definisjoner har endret seg fra den første forskriften. I dag oppgis anbefalt steinstørrelse ut fra minimums diameter, men fyllingsdamveilederen mangler en klar definisjon på diameter. Å bestemme steinstørrelse ut fra vekt istedenfor steindiameter oppfattes som mer nøyaktig. Analyse av 14 utvalgte dammer fra kartleggingsdata indikerer at i gjennomsnitt er 10 % av plastringen med b-aksen med fall inn i dammen.

Følgene av forskjellig plassering av steinene er undersøkt ved modellforsøk, som fokuserer på forskyvninger som oppstår før brudd av plastringen. Fem modellforsøk er gjennomført plastringstein med midlere steinstørrelse $d_{50} = 0,057$ m er benyttet. Skråningshelning er 1:1,5 i alle forsøk og steinene er lagt med en helning på 60° . Plastringen er utsatt for overtopping og forskyvninger er målt. I to av forsøkene er 10 % av steinen lagt med b-akse inn. I tre av forsøkene er alle steiner lagt i henhold til damsikkerhetsforskriften. Bruddvannføring (q_c) varierer mellom 100 l/s/m og 175 l/s/m. Pakningsfaktor (P_c) varierer mellom 0,51 og 0,57. Resultatene viser at overtopping av plastring fører til store forskyvninger, som avhenger av pakningsfaktor, vannføring og belastningstid. Tett pakning øker stabiliteten av plastringen og reduserer potensielle forskyvninger. Resultatene i denne oppgaven indikerer at plastringen blir

svakere når steinene ikke er langt etter forskriften. Det konkluderes med at legging av plastringstein påvirker stabiliteten til plastringen, men flere modellforsøk kreves for å bekrefte dette.

Abstract

The purpose of this master thesis is to investigate placed riprap exposed to overtopping of a dam. By doing a literature review to determine the background of placed riprap requirements, and modelling the influence of the stones used in construction.

Norwegian dam safety regulations require that placed riprap (angular stones placed one by one in an interlocking pattern) is used as erosion protection on the downstream slopes of rockfill dams against accidental loads caused by overtopping and seepage. Stones used in the downstream slope must be of sufficient size and quality as well as be arranged in an interlocking pattern. The stones should be placed with the longitudinal direction (a-axis) perpendicular to the dam surface to achieve optimal stability. Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) provides recommendations for the stone size and how the riprap should be placed.

In literature, design and stone size definitions vary, and have changed from the first regulation. Today, the recommended stone size is given based on the minimum diameter. However, in the NVE guideline for embankment dams, a clear definition of the diameter of a stone is missing. Literature has also shown that determining the stone size by weight rather than by diameter is more accurate. Analysis of field data from previous investigations of downstream placed riprap indicates some deviations from requirements: on average 10% of the stones are placed with the b-axis perpendicular to the dam surface.

The consequences of differing stone placements are investigated by model tests, which focus on the displacement that occurs before failure of the riprap. Five model tests have been carried out on riprap stones with a median stone size ($d_{50} = 0.057$ m). The slope is 1: 1.5 in all tests and the stones are placed with a 60° inclination. The placed riprap is exposed to overtopping and displacements are measured. In two of the tests, 10% of the stones are placed with the b-axis perpendicular to the dam surface; in the three other tests, all of the stones are placed according to regulations. Critical discharge (q_c) for global failure varies between 100 l/s/m and 175 l/s/m. Packing factor (P_c) varies between 0.51 and 0.57. Results shows that overtopping the dam leads to large displacements in the placed riprap, which depend on the packing factor, discharge and overtopping time. Dense packing increases the stability of the placed riprap and reduces potential displacements. The results of this thesis also indicate that the placed riprap becomes

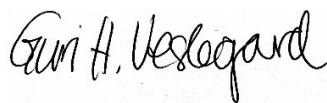
weaker when not all the stones are placed according to regulation. It is concluded that the placement of riprap stones likely has an influence on the stability of the riprap, but more model tests are required to confirm this.

Forord

Masteroppgaven «Plastring av fyllingsdammer – Modellforsøk, praktiske forhold og avvik fra regelverk» markerer slutten av det femårige studiet innen bygg-og miljøteknikk ved Norges teknisk- naturvitenskaplige universitet (NTNU). Oppgaven er en del av Energi Norges forskningsprosjekt «Plastring av fyllingsdammer, PlaF» som er finansiert gjennom forskningsrådet (prosjekt nr. 235730) og vannkraftbransjen. Oppgaven omhandler modellforsøk, teoretisk bakgrunn for valg av steinstørrelse og undersøkelse av hvilke forhold som påvirker valg av steinstørrelse under bygging av plastring i felt. Takk til alle som tok seg tid til å dele sin kunnskap om praktiske forhold ved plastring av fyllingsdammer.

Forberedende arbeid med forsøksmodellen og ett modellforsøk, ble gjennomført før jul i forbindelse med prosjektoppgaven. Dette gjorde oppstarten i laboratoriet lettere og arbeidet med forsøk kunne i gang settes etter planlegging av oppsett. En takk til tidligere doktorgradsstipendiat Priska Helene Hiller for å ha vært tilgjengelig med tips og triks ved modellforsøk i laboratoriet.

Arbeidet med oppgaven har til tider vært utfordrende, men også lærerikt og spennende. Jeg vil takke min hovedveileder Førsteamanuensis Fjóla Guðrún Sigtryggisdóttir, for motiverende veiledning og god oppfølging underveis. Takk til venner og familie for hjelp med gjennomlesning. Stor takk til medstudenter for god faglig diskusjon, hjelp underveis i arbeidet og fine år i Trondheim!



Guri Holte Veslegard

Trondheim, juni 2017

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	I
Abstract	III
Forord	V
Figurliste.....	IX
Tabelliste	X
Forsøksforklaring	XI
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Definisjoner	2
1.3 Formål og omfang	3
2 Bakgrunn for plastring av fyllingsdammer	5
2.1 Damsikkerhetsforskriften	5
2.2 Skråningsvern og steinstørrelse	7
2.3 Steinparametre	11
2.4 Kriterier for beregning av steinstørrelse	14
2.5 Anbefalt steinkvalitet benyttet i plastring.....	18
2.6 Sammendrag av krav til plastring i dagens regelverk.....	19
3 Kartlegging av plastring på nedstrøms skråning av fyllingsdammer.....	21
3.1 Tidligere kartlegging	21
3.2 Undersøkte parametere i felt sommeren 2015	22
3.3 Resultater fra analyse av kartleggingsdata	23
4 Praktisk erfaring.....	25
4.1 Kontroll.....	25
4.2 Valg av steinstørrelse.....	26
4.3 Forhold på stedet	27
4.4 Praktisk eksempel – Dam Hundålvatn.....	29
5 Teoretisk grunnlag for modellforsøk	33
5.1 Krefter på stein i plastring	33

5.2	Bruddmekanismer.....	35
5.3	Tidligere arbeid ved NTNU.....	36
5.4	Laboratorieteknikk.....	37
5.5	Bakgrunn for analyse av forsøksdata.....	39
6	Forsøksoppsett og metode for gjennomføring	41
6.1	Forsøksmodellen.....	41
6.2	Plastringstein	42
6.3	Gjennomføring av forsøk.....	44
7	Resultater	47
7.1	Resultater fra analyse av kartleggingsdata	47
7.2	Forsøksresultat.....	47
7.3	Forskyvning av stein.....	50
7.4	Bruddmekanismer.....	59
8	Oppsummering og diskusjon	61
8.1	Kommentar til fyllingsdamveilederen	61
8.2	Resultat av kartleggingsdata.....	62
8.3	Praktiske forhold ved valg av steinstørrelse	62
8.4	Forskyvning	63
8.5	Belastningstid	64
8.6	Erfaring.....	64
8.7	Bruddmekanismer.....	65
8.8	Sammenligning med tidligere forsøk	65
8.9	Feilkilder.....	67
9	Konklusjon.....	69
9.1	Forslag til videre arbeid.....	70
	Referanser.....	71
	Innholdsliste vedlegg.....	i

Figurliste

Figur 1– Prinsippskisse av fyllingsdam	2
Figur 2 – Definisjon steinens tre akser (Bunte og Abt, 2001).....	12
Figur 3 – Zinggs diamgram med NVEs anbefaling for steinform	13
Figur 4 – Nødvendig vekt av stein, hentet fra (NGI, 1983)	15
Figur 5 – Bergrunnskart (NGU, 2017)	30
Figur 6 – Beskrivelse av plastringstein fra (Huuse-Røneid, 2016).....	31
Figur 7 – Krefter på stein ved overtopping, modifisert etter (Dornack, 2001)	33
Figur 8 – Strømnings situasjon ved overtopping av dam, fritt oversatt fra Platzer (1983).....	39
Figur 9 – Snitt av modelloppsett modifisert etter Hiller Priska H, Aberle Jochen og Lia Leif (2016).....	41
Figur 10 – Boksplokk av steines gjennomsnittsverdi akser og vekt modifisert etter (Pettersen, 2015).....	43
Figur 11 – Zninggs diagram for plastringstein brukt i laboratoriet.....	43
Figur 12 – Plastringstein i forsøk 3 ^b se tabell 7.....	44
Figur 13 – t.v ferdigbygget plastring med markørsteine, t.h målepunkt med b-akse inn.....	46
Figur 14 – Eksempel på logging av vannstand og vannføring	49
Figur 15 – Dimensjonsløs analyse forsøk 1 ^a , x-forskyvning	51
Figur 16 – Dimensjonsløs analyse av forsøk 5 ^a i x-retning.....	52
Figur 17 – Sammenligning av forsøk 1 ^a og 5 ^a x-forskyvning.....	52
Figur 18 – Sammenligning av forskyvninger i x-retning i mm etter siste vannføring før bruddvannføring	53
Figur 19 – Sammenligning av forskyvninger i z-retning i mm etter siste vannføring før bruddvannføring	54
Figur 20 – t.v plott av utvikling av forskyvning, t.h plassering av markørstein	55
Figur 21 – Resultat forsøk 3 ^b , x-forskyvning.....	56
Figur 22 – Resultat forsøk 4 ^b , x forskyvning	57
Figur 23 – Forskyvning i z-retning for målepunkt i forsøk 4 ^b	58
Figur 24 – t.v. stein i damkrone ved vannføring 50 l/s/m, t.h stein i damkrone ved vannføring 75 l/s/m for forsøk 3 ^b	58
Figur 25 – Forsøk 2 ^a like før brudd.....	60
Figur 26 – Forsøk 4 ^b like før brudd.....	60
Figur 27 – Sammenheng pakningsfaktor og kritisk steinbassert Froudetall for Hiller og utførte forsøk.....	67

Tabelliste

Tabell 1 – Klassifiseringskriterier (OED, 2009)	6
Tabell 2 – Krav til anleggsleder hentet fra damsikkerhetsforskriften (OED, 2009)	7
Tabell 3 – Anbefalinger for steinstørrelse fra veileder for fyllingsdammer (NVE, 2012), inkludert beregnet diameter for $S = 0,67$ og kornformkoeffisient $C_f = 0,6$	11
Tabell 4 – Analyse av utvalgt kartleggingsdata	23
Tabell 5 – fortsettelse av analyse av utvalgt kartleggingsdata	24
Tabell 6 – Teknisk data for eksisterende dam fra (Huuse-Røneid, 2016).....	29
Tabell 7 – Beskrivelse av forsøk	45
Tabell 8 – Måleinstrument og usikkerhet.....	45
Tabell 9 – Belastningstid per vannføring og bruddvannføring	47
Tabell 10 – Total belastningstid i timer og vannmengde	48
Tabell 11 – Kritisk steinbasert Froudetall	49
Tabell 12 – Plastringstetthet og faktor P_c	50
Tabell 13 – Bruddmekanismer	59
Tabell 14 – Sammenligning, $L_s = 1,8$ m.....	66

Forsøksforklaring

Forsøksmodellen i vassdragslaboratoriet ved NTNU har vært bruk til forskning på plastring siden 2015. Det er benyttet egen nummerering av forsøkene i denne oppgaven. Original navngivning er rirap XX, der XX tilsvarer forsøksnummeret i rekken av utførte forsøk siden 2015.

Forsøk 1^a, utført 11.11.16 – rirap18

Forsøk 2^a, utført 17.02.17 – rirap20

Forsøk 3^b, utført 06.03.17 – rirap21

Forsøk 4^b, utført 23.03.17 – rirap22

Forsøk 5^a, utført 03.04.17 – rirap23

1 Introduksjon

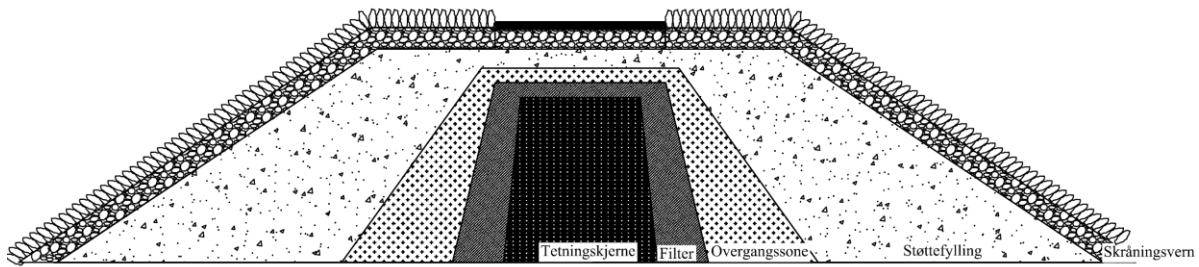
Plastring av nedstrøms skråning av fyllingsdammer er et krav i Norge gitt i Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg, kjent som damsikkerhetsforskriften fra Olje- og energidepartementet (OED, 2009). Bakgrunnen for kravet er å øke erosjonsmotstanden og dermed sikkerheten av dammen ved en eventuell overtoppingssituasjon eller lekkasje. Norges vassdrags og energidirektorat (NVE) gir anbefalinger til steinstørrelse og hvordan utføre plastringen. Praktiske erfaringer fra damanlegg indikerer avvik fra dette, derfor er det av interesse å undersøke hvilke avvik som forekommer og hva dette har å si for stabiliteten til plastringen ved overtopping. I denne oppgaven er dette undersøkt ved bruk av data fra tidligere kartlegging av dammer og effekten av avvik er undersøkt i laboratoriet.

1.1 Bakgrunn

Dammer benyttes til magasinering av vann. I Norge finnes det omkring 2500 dammer som ved dambrudd vil føre til skade på mennesker, miljø og eiendom. Fyllingsdammer er av de eldste formene for damkonstruksjoner i Norge. (Kvist Kjetil, 2009). Det stilles i dag strenge krav til sikkerhet ved damanlegg og mange av dammene må rehabiliteres. Rehabilitering og forsterkning vil ha stor økonomisk påvirkning for dameier.

I veilederen for fyllingsdammer fra NVE (2012) defineres to typer fyllingsdammer; jorddammer og steinfyllingsdammer. I en steinfyllingsdam består 50 % av volumet eller mer av sprengstein, og en jorddam består av minst 50 % finmasser som leire, silt, sand eller grus. Normal skråningshelning for steinfyllingsdammer er 1:1,5 ($S=0,67$). For å være stabil må damskråningen i det minste være slakere enn friksjonsvinkelen til massene. Dammens sikkerhet er blant annet avhengig av stabiliteten til nedstrøms skråning. Dambrudd som følge av overtopping av fyllingsdam er en av de mest vanlige bruddtypene i verden (Nicolaisen, Larsen og Daleng, 1992)

En steinfyllingsdam er bygd opp av ulike soner, sonene er adskilte for å ivareta filterkriteriene fra kjernen til støttefyllingen. Materialsonene blir grovere lenger ut fra kjernen, dette har til hensikt å hindre indre erosjon.



Figur 1– Prinsippskisse av fyllingsdam

En fyllingsdam med morenekjerne er bygd opp med tetningskjerne, filter, overgangssone, støttefylling, og skråningsvern som illustrert i figur 1. Steinene som beskytter nedstrøms skrånning legges ut en og en i mønster, kjent som plastring og er en norsk byggemetode. Plastringen fungerer som erosjonssikring og er av betydning for motstand mot erosjon ved en overtoppingsituasjon eller ved gjennomstrømning.

Selv om dammer i Norge har benyttet skråningsvern i form av stor stein siden 1960 tallet er det lite kunnskap om styrken ved forskjellige plastringsmetoder. Derfor ble det startet et forskningsprosjekt finansiert gjennom Energi Norge «Plastring av fyllingsdammer (Plaf)». Formålet med prosjektet var å utvikle en metode for optimal plastring av fyllingsdammer (Basberg, 2016). I februar 2013 startet et 4-årig doktorgradsstudie ved Norges tekniske naturvitenskaplige universitet (NTNU) i forbindelse med prosjektet, avsluttet i februar i år. Noe av forskningen blir videreført i denne oppgaven.

1.2 Definisjoner

Det er benyttet ulike forskrifter, veiledere og rapporter i denne oppgaven. Disse er ikke omtalt med originaltittel, hvorav henvisning er definert nedenfor.

Originaltittel

«Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg»
(OED, 2009)

«Veileder for fyllingsdammer» (NVE, 2012)

«Forskrift for dammer – del II Regler og anbefalinger» (NVE, 1981)

«Kartlegging av plastring på nedstrøms skrånning av fyllingsdammer» (Hiller, 2016)

Bakgrunnsdata fra kartleggingsrapport, tilgjengelig ved instituttet

Omtales som

Damsikkerhetsforskriften

Fyllingsdamveilederen

Forskrift for dammer

Kartleggingsrapport

Kartleggingsdata

1.3 Formål og omfang

Formålet med denne oppgaven er å undersøke bakgrunnen for valg av steinstørrelse og hvilke forhold som påvirker steinstørrelsen i felt. Deretter undersøke forskyvninger som oppstår ved overtopping av plastring i laboratoriet.

Hvert kapittel er presentert med en innledning. Oppgaven omfatter definisjon av steinstørrelse, anbefalinger fra gamle og nye forskrifter og veiledere. Kapittel 3 tar for seg analyse av kartleggingsdata. Praktiske erfaringer fra plastring av store fyllingsdammer fra senere år, virkningen av hvordan anbefalt dimensjonering påvirker valg av steinstørrelse basert på informasjon fra bransjen presenteres i kapittel 4. Teoretisk grunnlag for modellforsøk er gitt i kapittel 5. Effekt av avvik funnet i kartleggingsdata blir videre undersøkt i laboratoriet. I forbindelse med forsøkene utført i laboratoriet blir forskyvninger, belastningstid og bruddmekanisme diskutert. Resultatene fra modellforsøk, praktiske forhold og bakgrunn for valg av steinstørrelse oppsummeres og diskuteres i kapittel 8. Tilslutt er konklusjon og forslag til videre arbeid presentert.

Den geotekniske stabiliteten til damkonstruksjonen blir ikke diskutert i denne oppgaven. Alle forsøksdata er tilgjengelig ved institutt for bygg-og miljøteknikk.

2 Bakgrunn for plastring av fyllingsdammer

Kapitlet tar for seg damsikkerhetsforskriften, dimensjonering av steinstørrelse, steinparametre og beregning av disse, steinkvalitet og krav til gjennomføring. Innholdet i dette kapitlet bygger på lover, forskrifter og veiledere samt faglitteratur innenfor geoteknikk og vassdragsteknikk. Eldre faglitteratur er lånt ved universitetsbiblioteket eller tilgjengelig ved instituttet.

2.1 Damsikkerhetsforskriften

Damsikkerhetsforskriften fra OED (2009) sørger for sikkerhet ved vassdragsanlegg og forebygge skade på mennesker, miljø og eiendom. Damsikkerhetsforskriften har hjemmel i Lov om vassdrag og grunnvann, vannressursloven (OED, 2001). Damsikkerhetsforskriften omhandler vassdragsanlegg, dammer og vannveier med tilhørende konstruksjoner. Fyllingsdammer er omtalt i § 5-10, der nedstrøms skråning blir beskrevet i punkt f. Nedenfor gis en gjennomgang av bakgrunn og krav spesielt med hensyn på nedstrøms skråningsvern.

2.1.1 Den første damforskriften

Med oljealderen på 70-tallet kom et økt fokus på sikkerhet. Roppauulykken 17. mai 1976, gikk den 650 meter lange og 8 meter høye jordfyllingsdammen eid av Gausdal El-verk til brudd. Ingen mennesker ble skadet under ulykken. Ulykken forsterket behovet for en damforskrift (Kvist Kjetil, 2009). I 1981 fikk Vassdragstilsynet, kontrollavdelingen til NVE forskriften for dammer og i 1982 kom forskriften for tilsyn av dammer. Vassdragstilsynet fordoblet antall ansatte fram mot 1980, dette gjorde det lettere å utføre tilsyn og kontroll av vassdragsanlegg. I løpet av 1980 og-90 ble det gjennomført flere lovendringer.

Hensikten med forskrift for dammer fra 1981 var å utvikle et regelverk som skulle gi sikkerhet mot skader og brudd i damanlegg. Forskriften er delt i to, del I inneholder generelle bestemmelser. Del II inneholder dimensjoneringskriterier og detaljerte krav til utførelse av dammer der anbefalte beregningsmetoder blir beskrevet. Forskriften for dammer fikk stor betydning for sikkerhetsarbeidet, men med begrensning da forskriften gjaldt for nybygging og ombygging av større dammer. På denne tiden var de fleste dammer allerede bygget. Vassdragstilsynet hadde utført tilsyn på dammer siden 1909, og mente alderen ikke hadde noen betydning. Et avgjørende argument for tilbakevirkende kraft var at alle borgere hadde rett til

samme grad av sikkerhet uavhengig om de bodde nedstrøms en gammel eller ny dam (Kvist Kjetil, 2009)

2.1.2 Nyere sikkerhetsforskrifter

Fra 1987 til 1992 samarbeidet Vassdragstilsynet med bransjen, dette resulterte i ni fagrapporter med tittel «Prosjekt damsikkerhet». På bakgrunn av disse rapportene kom det fram at forskriften måtte endres. Ut fra ny kunnskap og nye krav skulle anleggene vurderes opp til en sikkerhetsstandard som gjaldt alle dammer, uansett alder. I 1994 ble det lagt fram et forslag til ny vassdragslov. Nye forskrifter skulle ta utgangspunkt i det nye lovforslaget. Forskriften fra 1994 er gitt ut, men ikke offentlig. Forskrift for sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg gjeldene fra 1.januar 2001, erstattet forskriften for dammer fra 1981. Med tilhørende retningslinjer for fyllingsdammer utgitt i 2007. Etter revisjon av damsikkerhetsforskriften ble ny forskrift gjeldene i 2010 (Kvist Kjetil, 2009). Med revisjon av damsikkerhetsforskriften kom også en revidert utgave av fyllingsdamveilederen.

2.1.3 Krav til gjennomføring fra damsikkerhetsforskriften

For å sikre gjennomføring av bygging og rehabilitering i praksis stiller damsikkerhetsforskriften krav til gjennomføring. Kravene avhenger av hvilken konsekvensklasse dammen tilhører. Konsekvensklassene er definert i §4-2, se tabell 1.

Tabell 1 – Klassifiseringskriterier (OED, 2009)

Konsekvensklasse	Boenheter
1	< 1 permanent boenhet
2	1-20
3	21-150
4	>150

Konsekvensvurderingene omfatter direkte skader og eventuelle følgeskader av dambrudd avhengig av antall boenheter som blir berørt.

Kapittel 2 i damsikkerhetsforskriften tar for seg organisatoriske krav. Det tekniske kontrollarbeidet ved bygging av vassdragsanlegg skal ledes av en kontrollør som oppfyller kravene gitt i tabell 2.

Tabell 2 – Krav til anleggsleder hentet fra damsikkerhetsforskriften (OED, 2009)

Konsekvensklasse	Utdanning	Praksis (av nyere dato)
3 og 4	Bachelor i ingeniørfag/eksamen fra ingeniørhøgskole som bygningsingeniør eller tilsvarende utdanning, med relevant fagkrets	Minimum 50 måneder relevant praksis
1 og 2	Eksamen fra fagskole innen bygg/anlegg eller tilsvarende utdanning	Minimum 30 måneder relevant praksis

Dersom vassdragsanlegget tilhører konsekvensklasse 1 og 2 er det krav til utførende foretak. Det kreves sentral godkjenning for ansvarlig utførende i tiltaksklasse 2 i relevant godkjenningsområde. For anlegg i konsekvensklasse 3 og 4 må utførende foretak ha sentral godkjenning som ansvarlig utførende i tiltaksklasse 3. Dersom foretaket ikke har den aktuelle sentrale godkjenningen må foretaket dokumentere kvalifiseringen. Byggesaksforskriften § 9-3 fastsettelse av tiltaksklasser definerer tiltaksklassene. Det er tre tiltaksklasser hvor tiltaksklasse 1 omfatter de enkleste tiltakene og oppgavene, mens tiltaksklasse 3 omfatter de mest kompliserte. Et tiltak kan for eksempel ha stor vanskelighetsgrad hvis det krever spesiell fagkompetanse å prosjektere eller utføre, eller hvis det anses krevende å gjennomføre korrekt (Direktoratet for byggkvalitet, 2016)

Kapittel 6 i damsikkerhetsforskriften tar for seg bygging og idriftsettelse. Det skal foregå kontroll av arbeid med damanlegg. For anlegg i konsekvensklasse 3 og 4 kreves det at kontrollen skal ledes av kontrollør uten tilknytning til utførende foretak og den ansvarlige for vassdragsanlegget. I konsekvensklasse 1 og 2 skal kontrollen ledes av kontrollør som er uavhengig av utførende foretak.

2.2 Skråningsvern og steinstørrelse

Skråningsvernet har til hensikt å sikre at dammen tåler stor vanngjennomstrømming og/eller overtopping som følge av ulykkeslaster eller skade på dam (OED, 2009).

Stein som benyttes i nedstrøms skråningsvern skal ha tilstrekkelig størrelse og kvalitet samt være ordnet i forband, forband vil si at steinene plasseres slik at det ikke oppstår loddrette fuger mellom steinene. Steinene skal plasseres med fall og lengderetning, (a-aksen definert i kapittel

2.3) innover i dammen for å oppnå høy stabilitet. Utførelsen av overgangen til støttefylling skal sørge for at utvasking av materialer innenfor ikke skjer.

Skråningsvernet, overgangssonen og støttefyllingen skal inneholde godt drenerende materialer med tilstrekkelig tykkelse som hindrer at det oppstår setninger på grunn av telefarlige masser. Skråningsvernet skal kunne motstå skader fra eventuelle ulykkeslaster (OED, 2009).

I damsikkerhetsforskriften stilles det også krav til utforming av damkronen. For dammer i konsekvensklasse 4 skal bredden være minimum 6,5 meter. Damkronen skal også sikres ned til 6 meter under høyeste regulerte vannstand (HRV) med store steiner i stabilt mønster. Damkronen skal kunne motstå skader som følge av klimapåvirkninger og ulykkeslaster. For dammer med tetningskjerne av morene eller andre telefarlige materialer skal topp av tetning dekket med tilstrekkelig ikke-telefarlig materialer for å unngå eller redusere teleskader. Det er gitt at kronen skal beskyttes av et kronevern av stor stein med god kvalitet.

2.2.1 Dimensjonering av steinstørrelse

Fyllingsdamveilederen fra NVE utdyper bestemmelser gitt i damsikkerhetsforskriften §5-10 og §6-1. Veilederen beskriver praksisen NVE følger for å sikre at kravene i forskriften følges.

Minimumsvekt av stein brukt i oppstrøms skråningsvern beregnes ved formel [1] fra Hudson.

$$W_{min} = \frac{\gamma_r H_s^3}{K \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1 \right)^3 n} \quad [1]$$

Hvor

H_s = Signifikant bølgehøyde [m]

γ_r = Tyngdetettheten til steinen [kN/m^3]

γ_w = Tyngdetettheten av vann, 10 kN/m^3

n = Skråningshelningens horisontalkomponent

K = Konstant avhengig av n , steinens form og om steinen er tippet eller ordnet i forband.

I Norge benyttes $K \leq 2,5$

Bakgrunnen for Hudsons formel belyses i kapittel 2.4.2

Formel [2] benyttes til å regne om fra steinvækt til steindiameter. D_{\min} gir minimum diameter for stein i oppstrøms skråningsvern.

$$D_{\min} = \left(\frac{W_{\min}}{C_f \cdot \gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [2]$$

Hvor

W_{\min} = Minste vekt av stein i kN beregnet etter Hudsons formel

C_f = Steinens formfaktor, varierer mellom 0,4 for skifrig og 0,8 for kubisk form.
Anbefalt faktor 0,6

γ_r = Tyngdetettheten til steinen [kg/m^3]

I fyllingsdamveilederen fra 2012 er D = steindiameter gitt i meter. Det er ikke gitt noen definisjon av diameteren til en stein. Definisjonen av D har endret seg fra den første anbefalingen. I del II av forskrift for dammer NVE (1981) er D definert som siktåpningen en stein akkurat vil kunne passere, angitt i meter. Følgende formel er gitt for å angi krav til steindimensjon.

$$D = \sqrt[3]{\frac{W}{k \cdot \gamma_s}} \quad [3]$$

k = Konstant avhengig av steinens form. Settes vanligvis lik 0,65, og kan variere mellom 0,45 for flatstenglig og 0,75 for kubisk

γ_s = Spesifikk vekt av stein

Formlene [2] og [3] er i utgangspunktet de samme, men definisjonen av D har endret seg fra å referere til siktåpning steinen vil passere til en udefinert diameter. Anbefalt faktor k/C_f er justert fra 0,65 til ny anbefalt verdi 0,6. Fyllingsdamveilederen gir at en skråning dimensjonert utfra anbefalingene til oppstrøms skråning, tilfredsstillende en stabilt ordnet erosjonssikring av nedstrøms skråning.

Fyllingsdamveilederen anbefaler videre at minimum steinstørrelse i nedstrøms skråningsvern dimensjoneres utfra formel [4].

$$D_{min} = 1,0 \cdot S^{0.43} \cdot q^{0.78} \quad [4]$$

Hvor

- D_{min} = Minste diameter [m]
 S = Skråningshelning (for helning 1:1,5, S=0,67)
 q = Enhetsvannføring [m^3/s per meter]

Formelen [4] gjelder for dammer i konsekvensklasse 1-3, med gitte krav til enhetsvannføring se tabell 3. Formel for minimum steindiameter bygger på Energibedriftenes landsforening (EBL) sin publikasjon 186-2005 [33] (EBL Kompetanse, 2005). Opprinnelig formel er gitt i formel [5] og er basert på resultater fra forsøk med brudd av steinfyllingsdam bygget med rauset steinsikring utsatt for gjennomstrømning. Rauset steinsikring betyr at steinene er dumpet tilfeldig, orientering av aksene er ikke ordnet.

$$d_{50,kritisk} = 0,43 \cdot S^{0.43} \cdot q^{0.78} \quad [5]$$

Den anbefalte steindiameteren, d_{50} fra EBL er modifisert for å oppnå større sikkerhet.

Egil Hyllestad redaktør og medforfatter for fyllingsdamveilederen i NVE deler erosjonsutviklingen i nedstrøms skråning av en fyllingsdam opp i tre faser:

- Første stein som kommer i bevegelse på grunn av strømmende vann
- Første utglidning av en eller flere steiner (lokal utglidning i skråningen)
- Dambrudd

Kriteriet om første lokale utglidning i skråningen er utgangspunkt for bestemmelse av sikkerhetsfaktoren. Første lokale utglidning vurderes å være kritisk, ettersom det over tid kan true dammens sikkerhet. På grunn av myndighetsansvar legger NVE til en sikkerhetsfaktor på 3. Siden svakeste punktet ved utstrømmende vann vil være de minste steinene i plastringen (e-post fra E. Hyllestad i NVE, 13.11.2015).

Videre anbefalinger fra fyllingsdamveilederen er gitt i tabell 3, utfra anbefalingene om steinstørrelse er minimums steindiameter for de ulike konsekvensklassene beregnet. Beregningene er utført ved bruk av formel [2] og [4].

Tabell 3 – Anbefalinger for steinstørrelse fra veileder for fyllingsdammer (NVE, 2012), inkludert beregnet diameter for $S = 0,67$ og kornformkoeffisient $C_f = 0,6$

Konsekvensklasse	Minimum enhetsvannføring [m ³ /s/m]	Minimum steinvolum [m ³]	Beregnet minimum steindiameter [m]
4	Ikke oppgitt	0,15	0,63
3	0,5	Ikke oppgitt	0,49
2	0,3	Ikke oppgitt	0,33
1	0,3	Ikke oppgitt	0,33

På bakgrunn av minimum vekt og diameter av stein anbefaler fyllingsdamveilederen at forholdet mellom minste og største steindiameter skal være mindre eller lik 1,7, for å oppnå mest mulig ensgradert stein i plastringen. Gitt i formel [6].

$$D_{max} \leq D_{min} \cdot 1,7 \quad [6]$$

Grensen for maksimum diameter i forhold til minimum diameter bygger på erfaringer der ensgradert materiale gir det beste resultat med hensyn til materialsammensetning i skråningsvernet. Denne anbefalingen gjelder for alle steiner i plastringen. Videre anbefaler også veilederen at dersom hull i plastringen oppstår skal disse fylles med mindre steiner. Anbefalingen i formel [6] kommer av Société d'énergie de la Baie James (1997) sin anbefaling av forholdet mellom vekten av steiner brukt i plastring gitt i følgende formel:

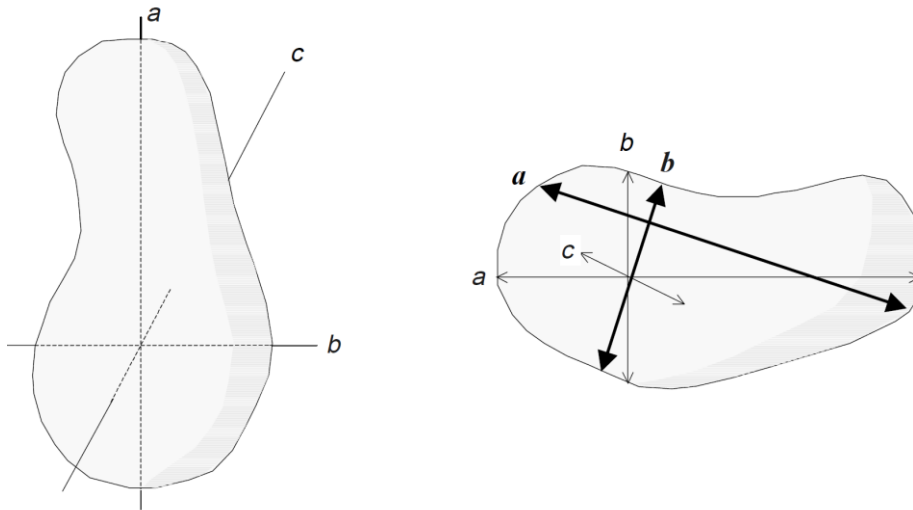
$$M_{maks} = M_{min} \cdot 3,0 \quad [7]$$

Formel [7] gir forholdet mellom maksimum og minimum vekt av stein, på bakgrunn av erfaringer fra forsøk der ensgradert steinmateriale viser å gi høyere stabilitet. Société d'énergie de la Baie James (1997) sier videre at i felt er det vanskelig å tilfredsstille forholdstallet, og erfaring tilsier at et forhold mellom maksimum og minimums vekt på 5 er lettere å oppnå i felt, noe som også er akseptabelt. NVE sin anbefaling gitt i formel [6] bygger på en faktor på 5 mellom maksimum og minimum vekt, omgjort til å gjelde for diameter.

2.3 Steinparametre

Steinstørrelse kan som beskrevet i tidligere kapittel beskrives med steinvekt, -volum eller -dimensjon. Dimensjon har vært beskrevet som diameter eller siktåpning som steinen akkurat passerer. Steinens form og størrelse er avgjørende for hvor god plastringen blir. Bestemmelse

av en steins diameter er vanskelig, diameter defineres i ordboka som «rett linje gjennom midtpunktet av en geometrisk figur, særlig en sirkel». En stein brukt i plastring vil ikke være sirkulær, men heller defineres ut fra aksene til steinen. Der a er lengste akse av steinen, b er midlere og c korteste akse. Figur 2 definerer de tre aksene.



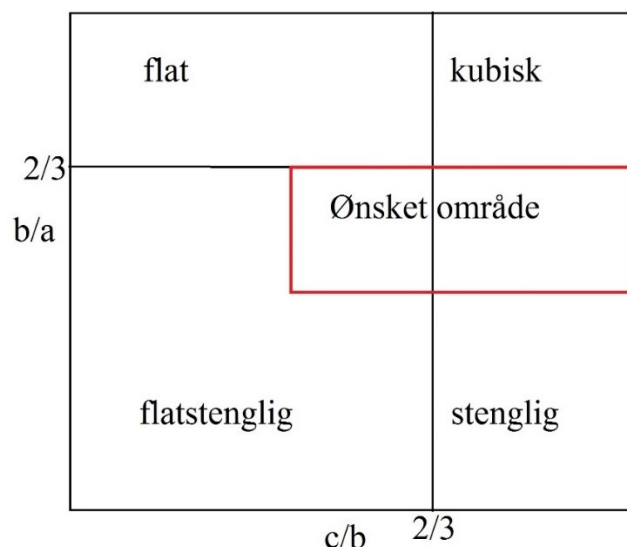
Figur 2 – Definisjon steinens tre akser (Bunte og Abt, 2001)

Ut fra definisjon av steinens tre akser er det mulig å uttrykke steindimensjon D som ekvivalent diameter av en terning, formel [8] er hentet fra Société d'énergie de la Baie James (1997)

$$D = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \quad [8]$$

Dimensjonene a, b og c beskriver hjørnene i en boks som steinen vil passe i. Société d'énergie de la Baie James (1997) understreker at dimensjonen D er vanskelig å se for seg ved utvelgelse av egnet plastringstein i felt. Derfor anbefales det å kontrollere maksimum og minimum dimensjon og bestemme maksimum volum av stein. Ønsket størrelse kan oppnås ved å kontrollere hoveddimensjonen av en stein og sørge for at den faller mellom D_{\min} og D_{\max} med en usikkerhet på 0,1m.

Akse forholdet b/a gir om steinen er isometrisk eller stenglig. Akseforholdet c/b indikerer hvor flat steinen er. Når $a > b > c$ varierer akseforholdet mellom 0 og 1 (Znigg, 1935). For å kunne oppnå god innlåsing mellom steinene er det mest hensiktsmessig at steinene er avlange. Figur 3 viser ønsket område for steinform i oppstrøms skråningsvern, anbefalingen er presentert av E. Hyllestad i NVE under EBLs vårmøte 23.05.2007.



Figur 3 – Zinggs diagram med NVEs anbefaling for steinform

Videre understreker NVE at egnet plastringstein er en faglig vurdering i hvert enkelt tilfelle.

2.3.1 Steinhåndboken, the rock manual

Kapittel 3 i håndboken Rock Manual (2007) beskriver sammenhengen mellom beregnet diameter utfra vekt og diameter definert utfra siktåpning. Den enkleste måten å definere steinstørrelse er med vekt oppgitt i kilogram. Ved dimensjonering brukes ofte nominell diameter D_n , definert som dimensjonen til en ekvivalent terning. En annen måte å beskrive steinens størrelse er ved diameteren til en ekvivalent kule, D_s i meter. Definisjonen er sjeldent brukt for sprengstein.

Ved bruk av densiteten til stein kan nominell diameter D_n , beskrives som forholdet mellom masse og fyllvekt.

$$D_n = \frac{M}{\rho_{app}}^{\frac{1}{3}} \quad [9]$$

M = Masse [kg]

ρ_{app} = Fyllvekt [kg/m³]

Siktstørrelsen D_{sikt} referer til den kvadratiske åpningen for siktestørrelse i meter. Nominell diameter D_n er proporsjonal med D for en gitt form av sprengstein. Laan (1981) utledet en

omregning basert på forsøk utført med flere forskjellige graderinger av sprengstein. Dette resulterte i følgende formel [10]

$$D_n = 0,84 \cdot D_{sikt} \quad [10]$$

Formel [10] gjør det mulig å regne mellom siktestørrelse og nominell diameter.

Sammenheng mellom middel siktestørrelse D_{50} og middel masse M_{50} gir en konstant som beskriver steinens form.

$$F_s = \frac{M_{50}}{(\rho_{app} \cdot D_{50}^3)} = (0,84)^3 \cong 0,6 \quad [11]$$

F_s i felt varierer vanligvis mellom 0,34 og 0,72, derfor er $F_s \cong 0,6$ sett på som god praksis. Altså den samme formfaktor som anbefalt for C_f i formel [2].

2.4 Kriterier for beregning av steinstørrelse

Dimensjonering av vekt av stein brukt til plastring av oppstrøms damskråning bygger på data fra bølgeopp skylning. Bølgene forekommer som følge av vind (Kjærnsli, Valstad og Höeg, 1992).

Bakgrunnen for steinstørrelse på oppstrøms side bygger på forsøk gjennomført av Hudson i 1958 og modifisering av forsøksdata fra modelltester av plastring på jordfyllingsdammer utført av Thomsen, Wohlt og Harrison (1972). Formlene for steinstørrelse er utviklet for oppstrøms side og når kravet om plastring av nedstrøms side kom i damsikkerhetsforskriften, ble formlene for oppstrøms side dimensjonert med hensyn til bølgeopp skylning overført til å også gjelde nedstrøms side. Her blir anbefalingene for skråningsvern fra veileder for fyllingsdammer fra Norges geotekniske institutt (NGI) utgitt i 1983 presentert og deretter bakgrunnen til formlene fra Hudson og Thomsen med flere beskrevet.

2.4.1 Dimensjonering mot bølgekrefter

Veilederen «Fyllingsdammer» er ment som et tillegg til forskrifter for dammer og er utarbeidet av damgruppen til NGI. Veilederen er beregnet for teknisk personale som jobber med dammer. Før den første forskriften kom var det NGI som prosjekterte de fleste fyllingsdammene i Norge.

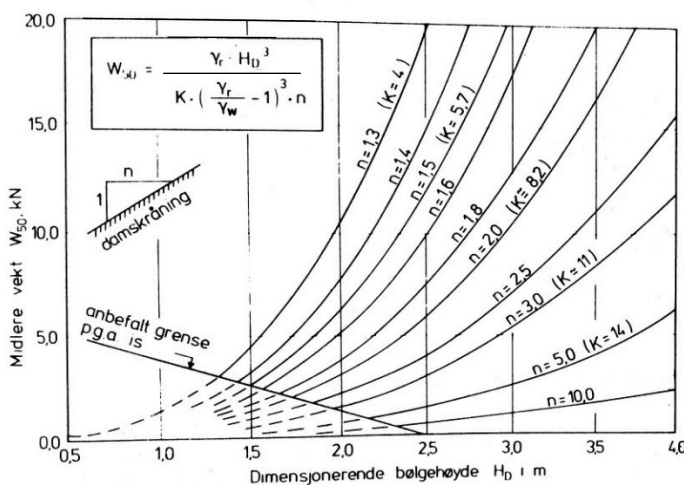
Stein i skråningsvern på oppstrøms side må ha tilstrekkelig vekt for å motstå bølgekrefter. Steinen må også ha den nødvendige bestandigheten for å kunne motstå påvirkning av vann og frost. Stein i fyllingstå og damkrone bør ha et volum på 1 m³(NGI, 1983).

Stein i oppstrøms skråning må være frostbestandig og stor nok til å motstå påkjenninger av bølger og is. Størrelsen på stein beregnes ut fra dimensjonerende bølge, H_d

$$H_d = 1,3 \cdot H_s \quad [12]$$

H_s = Signifikant bølgehøyde [m]

Figur 4 gir diagram for nødvendig midlere vekt av stein avhengig av dimensjonerende bølgehøyde samt helning på oppstrøms skråning. Figuren bygger på Hudson (1958) sine beregninger. Nødvendig steinstørrelse er avhengig av om steinene er ordnet eller tippet på plass. Når steinen er ordnet i forband, kreves bare halvparten av steinstørrelsen sammenlignet med dersom steinene er tippet, rauset steinsikring.



γ_r = tyngdetetthet av stein
 γ_w = tyngdetetthet av vann
 = 10 kN/m²
 K = koeffisient avhengig av n, av steinens form, og om steinen er ordnet i forband eller tippet. For ordnet tilnærmet kubisk stein varierer K med n som angitt på diagrammet.

Nødvendig vekt av stein i ordnet forband i skråningsvern, antatt $\gamma_r = 26 \text{ kN/m}^3$. (Tippet stein må være dobbelt så tung.)

Figur 4 – Nødvendig vekt av stein, hentet fra (NGI, 1983)

Diagrammet er laget for stein med densitet lik 2,6 t/m³. I praksis er det enklest å bestemme minstevekt på stein istedenfor midlere vekt. For ordnet steinskråning der størrelsen av stein varierer lite, er det enklest og sikrest dersom kravet til minste stein settes til midlere vekt

bestemt ut fra figur 4 (NGI, 1983). Det er ikke aktuelt å veie steinene som skal bygges inn i skråningsvernet, derfor er det praktisk å angi steinstørrelse i meter. En stein er karakterisert ved tre lengde mål – lengste, minste og midlere tverrmål, definert i kapittel 2.3. Ut fra gitt vekt eller volum for sprengstein i skråningsvernet kan minste tillatte midlere tverrmål på stein i skråningsvernet tas ut fra diagrammet i figur 4.

Tykkelsen av oppstrøms skråningsvern bør være minst to ganger største tverrmål av steinen. For små magasin der dimensjonerende bølgehøyde blir liten, vil påvirkning av is være dimensjoneringskravet for steinen i skråningsvernet. I figur 4 er det angitt krav til steinstørrelse for å motstå isvirkningen, avhengig av skråningshelning.

Veiledningen tar for seg steinsikring av oppstrøms side. Det vil være forskjellig belastning på nedstrøms og oppstrøms side av dam. På oppstrøms side skal plastringen motstå krefter fra is, tele og bølger mens plastringen på nedstrøms side skal sikre at dammen tåler overtopping og vanngjennomstrømning.

2.4.2 Steinstørrelse i molo

Hudson (1958) utførte en rekke forsøk med hensikt å sikre et optimalt dimensjoneringsgrunnlag for bygging av molo. Med utgangspunkt i bølgekrefter og dimensjonerende bølgehøyde H_d , definert i formel [12] Arbeidet ble satt i gang grunnet behovet for en omfattende studie for å få tilstrekkelig dimensjoneringsdata til bygging av moloer laget av stein. Forsøkene undersøkte stabiliteten til steinmoloer av ulikt design.

Flere forhold spiller inn ved bygging av molo, derfor kreves det bakgrunn om nødvendig vekt til steinene i det beskyttende laget langs strukturen, dette beskrives som en funksjon av:

- Enhetens form
- Enhetens egenvekt
- Spesifikke vekten av vann der konstruksjonen skal bygges
- Helning av stranden mot sjøen på moloen
- Dimensjon av bølgene ved plassering av konstruksjonen
- Helning til molo
- Porøsitet av beskyttende dekklag
- Dekklagets tykkelse
- Porøsitet og tykkelse av underlaget der steinene skal legges

To serier av stabilitetstester ble gjennomført for å få datagrunnlag til å utvikle et design kriteium for dekklaget til moloer.

Resultatene av forsøkene førte fram til følgende formel for vekt av stein i molo.

$$W_r = \frac{\gamma_r H^3}{k_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad [13]$$

k_d = Ødeleggelses koeffisient

H = Bølgehøyde [m]

α = Vinkel til moloskråningen, målt fra horisontalplan i grader

γ_r = Spesifikk vekt av stein

S_r = Spesifikk tyngdetetthet til stein, ρ_s/ρ_w

Formel [13] er utgangspunkt for formel [1] fra fyllingsdamveilederen. Og bølgehøyde H er samme som definert i formel [12]. Forsøksdataene fra Hudson viser at moloskråningen og bølgens steilhet er primære variabler som virker inn på bølgeopp skyllingen. Formel [13] for stabilitet av molo, og de eksperimentelle dataene som er oppnådd gjennom forsøkene, gir grunnlag for en metode for utforming av moloer med rauset skråningsvern av sprengstein.

Allerede før Hudson sin publisering i 1958, ble det ved tekniske universitet Delft i Nederland utviklet en ligning for steinstørrelse ved bølgeopp skylling over molo. Resultatene samsvarer med testresultatene til Hudson.

2.4.3 Steinstørrelse for dammer

Thomsen, Wohlt og Harrison (1972) studerte nødvendig steinstørrelse. Studiet ble satt i gang på grunn av høye kostnader med å finne og transportere gode stein til skråningsvern. Formålet var å komme fram til nye bestemmelser for ny dimensjonering og forbedring av eksisterende plastring. Modellen som ble benyttet representerte eksisterende konstruksjoner.

Skråningen til alle modellene var laget med ugjennomtrengelig kjerne med suksessive underlag av stein og sprengstein likt som i prototyp.

Som en generell studie av steinfyllingens stabilitet, inneholdt undersøkelsene følgende

- Underliggende lag
- Vannhøyde
- Sprengsteinens korngradering
- Viskositet
- Bølgeperiode
- Plassering av sprengstein
- Sprengsteinens form
- Fyllingens helning
- Tykkelse av laget med sprengstein

Studien er begrenset til å presentere resultatene av modellforsøkene og en generalisert analyse for å bestemme virkningen av variablene som inngår. Figurene og tabellene gitt i rapporten kan brukes til dimensjonering av steinstørrelse etter at bølgehøyden er tatt hensyn til for gjeldene konstruksjon og sikkerhetsfaktor er lagt til.

Thomsen, Wohlt og Harrison (1972) konkluderer med at median vekt av sprengstein er en effektiv størrelse med hensyn til stabilitet.

Stabiliteten skråningsvernet er en funksjon av bølgeperiode. Stabiliteten er størst ved korte bølgeperioder og minker dersom bølgeperioden øker. Sprengstein plassert en og en viser seg å ha høyere stabilitet enn rauset steinsikring. Stabiliteten øker med flatere fyllingsskråninger.

Nyere forskning fra 1992 har forbedret beregningen av steinvekt ved å ta med bølgeperiode og effekt av bølgebryting (Kjærnsli, Valstad og Höeg, 1992).

2.5 Anbefalt steinkvalitet benyttet i plastring

I fyllingsdamveilederen er det gitt at steiner benyttet i skråningsvernet skal ha god kvalitet og være motstandsdyktig mot forvitring.

For å oppnå sprengstein av god kvalitet må visse bergarter og forvitret fjell unngås. Det er viktig at steinbruddet plasseres i bergarter som gir best mulig kvalitet. Granittiske og gabbroide bergarter, som rene granitter, dioritter, gabbroer eller gneis er eksempler på steinmaterialer med høy kvalitet. Skifrige bergarter som glimmerskifer, klorittskifer, leirskifer og fyllitt gir lav steinkvalitet og oppfyller ikke kravene til kvalitet på stein i skråningsvern (NGI, 1983).

Fjellets oppsprekkingsgrad og sprengningsopplegget vil være avgjørende for steinstørrelse. Sprekkeavstanden må minst være så stor som dimensjonen på ønsket steinstørrelse. Mikrosprekker i eksempelvis kalkstein, vil gjøre det vanskelig å produsere stor stein, og dette kan ofte være vanskelig å oppdage uten prøvesprengning på stedet. Steinbrudd bør derfor, for store prosjekter undersøkes nøye ved ingeniørgeologisk kartlegging, prøvesprengning og laboratorieundersøkelser og velges ut fra kvalitetsmessige og anleggstekniske synspunkter (NGI, 1983)

2.6 Sammendrag av krav til plastring i dagens regelverk

Kort oppsummert er følgende faktorer avgjørende for et godt plastringresultat.

- **Steinstørrelse;** minimumstørrelse bestemmes ut fra formel [2] og [4]
- **Helning;** a-aksen, den lengste akse skal ha helning inn i dammen
- **Forband;** Plastringsteinene skal plasseres i forband, med ingen synlige vertikale eller horisontale sprekker i plastringsoverflaten
- **Kontaktflate;** Steinene skal plasseres i mønster slik at de låses innbyrdes, alle steinene skal være i kontakt med omliggende steiner

Helning, forband og kontaktflate er også presentert i (Lia, *et al.*, 2013) og omtales som vanlig praksis for plastring av dammer. I tillegg skal lengste akse skal plasseres vinkelrett på damaksen.

Videre i oppgaven undersøkes det om disse kravene er oppfylt ved bruk av kartleggingsdata. Da det ikke er beskrevet hvordan diameter defineres i fyllingsdamveilederen, er det av interesse å undersøke hvordan valg av steinstørrelse gjennomføres i praksis.

3 Kartlegging av plastring på nedstrøms skråning av fyllingsdammer

Kapittelet tar for seg tidligere kartlegging av plastring på nedstrøms skråning, gjennomføring og resultat. Samt analyse av kartleggingsdata.

3.1 Tidligere kartlegging

Prosjektoppgaven av Bogfjellmo (2013) «Nedstrøms skråning av steinfyllingsdammer – Analyse av eksisterende plastringer», undersøker nedstrøms plastring på fire dammer i Trøndelag. Ingen av dammene tilfredsstiller kravet fra NVE til minimum og maksimum diameter. Resultater fra oppgaven peker på at fyllingsdamveilederen er mangelfull ved beskrivelse av hvordan beregne fra steindiameter til steinvolum. Konklusjonen i prosjektoppgaven peker på at veilederen ikke inneholder krav til hvordan lengste akse skal legges i forhold til damskråningen og er til dels mangelfull ved steinstørrelse og volumkrav. En løsning er å bedre forståelsen for hvordan krav i retningslinjer kan utføres på byggeplassen.

Undersøkelsene av nedstrøms skråning fortsetter sommeren 2015, 33 dammer i Norge ble kartlagt. I den forbindelse er det laget en rapport av Hiller (2016). Resultatet av kartleggingen viser avvik fra anbefalingene i fyllingsdamveilederen. I konklusjonen fra kartleggingsrapporten pekes det på at minimum- og maksimumkravene for steindiameter ikke er oppfylt. Hovedgrunnen til dette er at steinene som benyttes er av naturlig materiale og dermed vil det alltid være variasjon i størrelsen fra steiner hentet fra steinbrudd. Det konkluderes også med at anbefalingene fra myndighetene bør ta hensyn til den naturlige variasjonen slik at minimum og maksimum diameter ikke er absolutt, men heller benytte persentiler som referansepunkter.

I følge kartleggingsrapporten oppfylder 64% av dammene anbefalingen om minste steinstørrelse fra formel [2] og [4], men ingen av dammene oppfylder kravet om forholdet mellom minimum og maksimum diameter fra formel [6]. Dersom persentiler blir brukt istedenfor minste krav til steinstørrelse ville alle dammene oppfylt kravene. Ved å bruke $d_{90}/d_{10} < 1,7$ ivaretas ønsket om bruk av ensgradert stein og 70 % av de kartlagte dammene vil oppfylle anbefalingen i motsetning til 0.

3.2 Undersøkte parametere i felt sommeren 2015

Alle målingene ble utført i grupper på to og to sommerstudenter. Stein størrelse, vinkel inn mot dammen og plastringstetthet var utgangspunkt for observasjonene. Måleområdet i plastringen ble tilfeldig plukket ut mellom damkrone og damtå, måleområdet var en firkant på 5x5 meter og/eller en firkant på 10x10 meter samt en 10 meter lang linje.

Innenfor firkanten ble alle tre aksene til steinene målt og under 10 meters linjen. Det er utfordringer knyttet til å måle aksene til steinen i plastringen, siden alle ligger i kontakt noe som gjør det vanskelig å komme til med meterstokk. Aksen som ligger inn mot dammen ble konsekvent målt først. Steindimensjon D er senere beregnet ut fra formel [8].

Plassering av steinene er målt ved hjelp av håndholdt avstands- og vinkelmåler med laser for å finne helningen på steinens akse. Vinkelen ble målt i forhold til horisontalen.

Plastringstettheten er også undersøkt under kartleggingsprosessen. Ved å telle antall steiner innenfor firkanten bestemmes plastringstettheten, P_T i formel [14]

$$P_T = N \cdot d_{50}^2 \quad [14]$$

P_T = Normert plastringstetthet

N = Antall steiner

d_{50}^2 = Midlere steinstørrelse

For lettere å kunne sammenligne plastringstetthet med ulik steinstørrelse innføres pakkingsfaktor P_c , brukes ved modellforsøk og er nærmere beskrevet i kapittel 5.5. Sammenligning av plastringstetthet fra felt med modellforsøk gjøres ved å regnes P_T om til P_c gitt i formel [15]. Pakkingsfaktoren er definert i Linford og Saunders (1967) og Olivier (1967).

$$P_c = \frac{1}{N \cdot d_{50}^2} \quad [15]$$

N = Antall steiner/ m^2

d_{50}^2 = Midlere steinstørrelse

Oppmåling av steinens lengste akse viser at ingen av de undersøkte dammene oppfylte kravet med alle steiner lagt med fall innover i dammen. På bakgrunn av dette er det valgt å undersøke bakgrunnen for bestemmelse av steinstørrelse og gjennomføre forsøk der plassering av a-aksen varierer for å se hvilken virkning dette har på forskyvning.

3.3 Resultater fra analyse av kartleggingsdata

Analyse av kartleggingsdata viser at kravet om plassering av plastringsteinene med lengderetning og fall innover i dammen fra damsikkerhetsforskriften ikke blir oppfylt for alle nedstrøms skråninger. Av de 33 kartlagte dammene fra 2015 er det valgt som en del av denne oppgaven å plukke ut dammer rehabilitert i nyere tid, tilbake til 2007, samt alle dammene i klasse 4. Ved kontroll av kravet om lengste akse inn i dammen viser det seg å være avvik, der hvor ikke a-aksen heller inn i dammen er lengde forskjellen aksene liten. tabell 4 og 5 viser resultater av dataanalyse, prosentandelen av antall steiner med b-akse inn blir beregnet ut fra antall oppmålte steiner. Analyse av bakgrunnsdata viser at i snitt er 9,19 % av steinene for klasse 3 og 4 dammer lagt med b-aksen inn, se tabell 4 og 5. Prosentvis avvik avrundes til 10%.

Tabell 4 – Analyse av utvalgt kartleggingsdata

Damnummer	Dammer	NVE damnummer	Konsekvensklasse	Damhøyde	Damlengde	Byggeår / år for fornying, plastrings år	Nedstrømskråning	Antall innmålte steiner
1	Stolsvatn	4038	4	25	600	1948/2009	1,5	57
2	Nersjø Hoveddam	2162	4	45	1030	1978/1999	1,5	76
3	Akersvatn	1007	4	53	485	1668/2009	1,5	58
4	Krokevatn	1813	3	21	150	1964/2011	1,5	58
5	Arstaddalen dam	1030	3	60	255	1963/2007	1,5	33
6	Finnkoihøgda hoveddam	1324	3	20	285	1969/2014	1,5	76
7	Kvittingvatn seksjon II og	1853	2	12	125	1931/2014	1,5	45
8	Årsdalsvatn	3095	2	44	125	1968/2011	1,5	33
9	Møsevatn	2088	2	28	118,8	1965/2007	1,4	44
10	Langvatn hoveddam	1897	2	13	190	1963/2010	1,7	126
11	Vessingsjø sekundærdam	2931	2	5	70	1959/2008	1,5	156
12	Svartavatn (SKL)	2695	1	14	19,3	1920/2007	1,7	55
13	Dam Nedre Mardalsvatn	3196	1	10	155	1975/2011	1,5	37
14	Dam Store Sandgrovatn	3195	1	10	330	1974/2012	1,5	32

Tabell 5 – fortsettelse av analyse av utvalgt kartleggingsdata

Damnummer	Målt i felt			Gitt i prosjekteringstegning				Antall steiner med b akse inn i dammen	%	gjen. plastringstetthet [ant. Stein/m ² *d50 ³]	P _c (Linford 1967), i.e. I/W
	d50 [cm]	dmin [cm]	dmaks [cm]	dmin [cm]	dmaks [cm]						
1	103	55	163				3	5,26	1,3	0,77	
2	123	41	167	0.2-0.5m ³			3	3,95	1,4	0,72	
3	89	48	110		50	85	5	8,62	1,4	0,73	
4	92	57	114	blokk 20-80			7	12,07	1,5	0,68	
5	87	47	133	V > 0.1 m ³			7	21,21	1,5	0,69	
6	100	57	139		70	119	5	6,58	1,7	0,58	
7	107	65	139	blokk >0.15 m ³ (d>0.6m)			3	6,67	1,4	0,73	
8	114	80	141	blokk >0.15 m ³			4	12,12	1,2	0,81	
9	100	38	148	d>60			10	22,73	1,3	0,79	
10	61	33	86	0.15m ³ <D<0.25m ³			4	3,17	1,5	0,67	
11	54	19	95		70	119	2	1,28	0,9	1,17	
12	94	46	137		35	60	8	14,55	1,6	0,64	
13	115	48	133		70	120	1	2,70	1,6	0,61	
14	105	60	141		70	120	2	6,25	1,2	0,84	
							Snitt alle	9,08			
							Snitt kl 4&3	9,19			

Sammenligning av steinstørrelse mellom prosjektert og benyttet viser at plastringen ikke er blitt gjennomført med dimensjonert steinstørrelse i prosjekteringstegning. Diameter er ikke oppgitt i alle prosjekteringstegninger, det er også ulik beskrivelse av diameter. For enkelte dammer er ikke minimum og maksimums diameter oppgitt i tegningen. Ut fra prosjekteringstegninger er det mulig å finne den teoretiske størrelsen på steinen beregnet fra formel i veileder, formel [4].

Pakningsfaktoren til utvalgte dammer i klasse 4 og 3 ligger mellom 0,58 og 0,77, se tabell 5. Dette indikerer at plastringen er stabil, siden anbefalte verdier for P_c er 0,8 og lavere. Videre finnes det enkelte dammer i klasse 1 og 2 med noe høyere pakningsfaktor, nedstrøms skråning defineres da som skåningsbeskyttelse og ikke plastring.

Det er viktig å skille mellom plastring og skåningsbeskyttelse. Erfaring tilsier at NVE i flere tilfeller beskriver utførelsen som ordnet skåningsbeskyttelse og ikke plastring, dermed er det andre krav til kvalitet og utførelse. Enkelte dammer i karleggingsrapporten går under kategorien ordnet skåningsbeskyttelse, ikke plastring. Siden 1999, og spesielt etter 2010 har forståelsen og utførelsen av plastring endret seg en god del (e-post fra A. Engesvoll, 17.03.2017).

4 Praktisk erfaring

Det er valgt å undersøke hvilke praktiske forhold som er avgjørende for valg av steinstørrelse benyttet i plastring. Praktiske erfaringer fra plastring av store fyllingsdammer fra seinere år indikerer at anbefalt design fra teori ikke nødvendigvis er optimal. Dette påvirker hovedsakelig utførende entreprenør som produserer og legger plastringsteinen. Informasjon er hentet fra dameier, entreprenør og rådgivere. Generelle spørsmål om valg av steinstørrelse og plastring ble sendt ut til rådgivende firma og entreprenører innenfor vannkraftfaget, se spørsmålene som ble stilt i vedlegg 1. Det har ikke lyktes å få svar fra alle, men enkelte har bidratt med nyttig informasjon om praktiske forhold. Personlig kommunikasjon, som telefonsamtaler og e-postkorrespondanse med rådgivere og entreprenører danner grunnlag for kapitlet. Anne Torild Engesvoll sivilingeniør ved avdeling for vannkraft og dammer hos Sweco region Oslo rådgivende ingeniørselskap, Olav Gunnar Tveiten i Hæhre Entreprenør, sivilingeniør innen vassdragsteknikk Øystein Huuse-Røneid i Sweco region Trondheim har bidratt med sin faglige kompetanse.

4.1 Kontroll

Ved kontroll av steinstørrelse på anlegg blir et utvalg steiner plukket ut og aksene a, b og c til steinene målt, dette utføres med meterstokk. Tilkomsten til oppmåling er ikke noe problem under bygging. Kontrollen bygger på erfaring fra tidligere prosjekter, noe som gjør det lett å se dersom en stein er plastret feil (telefonsamtale med A.Engesvoll, 17.03.2017).

For damrehabilitering finnes en kontrollorganisasjon bestående av fagansvarlig, ofte er det rådgivende ingeniør som er ansvarlig for oppfølging av entreprenøren. Ekstern kontrollør kommer hver fjortende dag. Kontrollleder og ekstern kontrollør har kontakt fortløpende (e-post fra A. Engesvoll, 17.03.2017).

Det utarbeides kontrollplaner for plastring, som blir fulgt opp av kontrollorganisasjonen. Kontrollorganisasjonen er avhengig av hvilken klasse dammen tilhører og består av:

- Kontroll utført av entreprenør to ganger om dagen. En visuell kontroll utført av plasterer
- Innleid rådgiver, tredjeparts kontrollør (ekstern)
- Byggherre kontroll, bruker ofte den innleide kontrolløren
- NVE kommer på kontroll, i gjennomsnitt hver tredje uke

Rådgiver ser spesielt på kontakten mellom steiner, fordi det er en viktig faktor for god stabilitet. Steinene skal være i innbyrdes kontakt, dersom det er hulrom flyttes steinen slik at den kiler seg fast. For oppstrøms plastring vil litt hulrom mellom steinene i plastringen gjøre strukturen mer åpen som medfører at drenasjekapasiteten øker. Dermed øker sikkerheten ved eventuell bølgeoppkylling på oppstrøms side (telefonsamtale med A.Engesvoll, 17.03.2017).

4.2 Valg av steinstørrelse

Ved dimensjonering av steinstørrelse er entreprenøren ofte mest interessert i steinvolumet, men rådgivere oppgir også maksimum og minimum diameter på stein. Videre beskrives ønsket form av plastringstein, ønskelig med kubisk og ikke flislig med en lengste akse. Det understrekes at NVE sin minste og største steinstørrelse i veilederen er en anbefaling.

I kartleggingsrapporten fra 2015 fremgår det at få dammer oppfyller anbefalingen til forholdet mellom minste og største steinstørrelse gitt i NVE sin veileder. I følge respons på utsendte spørsmål gitt i vedlegg 1, brukes det i praksis ofte større steiner enn fyllingsdamveilederen anbefaler fordi det går forttere å plastre. Prisen på plastringsarbeid er avhengig av tiden, ved å bruke lang tid kan prosjekter fort bli dyre. Dersom entreprenøren har enhetspris per m³ eller lignende er det knyttet risiko til overskridelse av tid. Fordi NVE sin veileder kun er en anbefaling, blir ikke avvik fra dimensjonert maksimum steindiameter sett på som kritisk i bransjen. For å få til en god plastring er det flere faktorer enn kun steinstørrelse som spiller inn. Ved kontroll blir det også undersøkt om a-aksen har helning inn i dammen og kontroll av steinens helning (telefonsamtale med A.Engesvoll, 17.03.2017).

Dersom stein av veldig ulik størrelse benyttes inntil hverandre i plastringen, er det erfaringsmessig veldig vanskelig å oppnå en god utførelse. Steiner som er inntil hverandre bør derfor i stor grad tilfredsstillende anbefalingen om forhold 1,7. Dersom man benytter mye stor stein i deler av plastringen, og mindre stein i andre områder, blir det feil å vurdere forholdet mellom steinene fra de ulike område mot hverandre (telefonsamtale med A.Engesvoll, 17.03.2017).

Ved dimensjonering av steinstørrelse tas det vanligvis ikke hensyn til at oppgradering av dammens konsekvensklasse kan forkomme. Steinstørrelsen oppfyller kravet i sin klasse, men ikke klassen over. Det vil si en dam i klasse 2 dimensjoneres ikke for å oppfylle steinstørrelsekravet i klasse 3.

Steinstørrelsen påvirkes av kvaliteten på plastringsteinene. Kvaliteten avhenger av geologiske forhold på stedet og sprengning av steinbrudd. Det er viktig å unngå høy grad av oppsprekking,

rådgiver gir instruks om ønsket steinkvalitet utfra anbefalinger i veilederen fra NVE. Dersom en sprengning inneholder mye småstein slik at den ikke kan brukes til plastring, brukes det i støttefyllingen, eller vrakes (telefonsamtale med A.Engesvoll, 17.03.2017).

Det er flere forhold som avgjør et godt skråningsvern. Derfor bør det være rom for faglig forståelse der en kan akseptere at forholdet på 1,7 ikke nødvendigvis praktiseres absolutt.

4.3 Forhold på stedet

De praktiske forholdene har som regel liten effekt på valg av steinstørrelse. Det er dampsikkerhetsforskriften som regulerer steinstørrelse i damtå, skråningsvern og kronevern (telefonsamtale O.Tveiten, 23.03.17) Av hensyn til transportkostnader vil et steinbrudd søkes så nær dammen som mulig under forutsetning at steinkvaliteten er tilfredsstillende. Ut fra byggherrens ønsker utfører rådgivende ingeniørfirma en geologisk undersøkelse for å stadfeste kvaliteten på grunnforholdene, og kartlegging av forkastninger. Det er mange faktorer som spiller inn ved plassering av steinbrudd siden entreprenøren ønsker god borbarhet, lite boreavvik og gunstige sleppe retninger. Entreprenøren peker på viktigheten av bruddet sin høyde for optimale pallhøyder til sprengning. Det kreves at avslutning av bruddet tilpasses landskapet igjen. Helst skal det ikke være mulig å se at det er gjort inngrep i naturen.

4.3.1 Kostnader ved uttak av stein og effekt på valg av steinstørrelse

På anleggsplassen legges det ut maler for hvordan plastringsteinen skal se ut. Ut fra bergarten beregnes densiteten og volum, noen av steinene kan kontrollveies med vekt på hjullaster eller montert på graver. Vekt på gravemaskin i skuffe blir mer og mer vanlig på nye maskiner (telefonsamtale O.Tveiten, 23.03.17). Dersom det var slik at det bare var steinstørrelsen som avgjorde et godt skråningsvern, ville en mer nøyaktig målemetode som veiing av hver stein eller volumet og måling av maskimum diameter og minimum diameter vært mer hensiktsmessig.

Entreprenøren utarbeider en sprengningsplan ut fra geologi, borbarhet, sprengbarhet tilpasset steinstørrelse og pallhøyde. Deretter skytes det inn etter denne. Det stilles ofte strenge krav i kontrakten til hvilke retningslinjer for sprengning som gjelder. Elektroniske tennere, kun enrastsalver, skanning av stuff ved hver salve, logging av alle borehull, GPSinnmåling av stuff som refereres til i salveplan og rapport er noen av kravene (telefonsamtale O.Tveiten, 23.03.17). Disse kravene skyver prisnivået opp, men sikrer et best mulig resultat.

Ut i fra produksjon i bruddet optimaliseres boremønster og ladning etter hvor mye det er mulig å laste ut. Ofte benyttes to stuffer å skyte på, dette gjør det mulig å jobbe uforstyrret på en stoff mens det pågår forberedelser, boring og ladning på den andre. Det stilles strenge krav til bruk av sprengstoff som gjør at boring og ladning ikke kan foregå samtidig. Dette gjør det sikrere for arbeiderne, mens fremdriften blir lavere siden det ikke kan produseres bormeter mens det lades. Da er det greit å flytte borevogn over på ny stoff. Generelt vil boremønsteret utgjøre forskjellen på gode og dårlige salver, siden det er avgjørende for hvor store blokkene blir (telefonsamtale O.Tveiten, 23.03.17).

4.3.2 Betydning av gravemaskinførerens kompetanse og erfaring

Alle plastrere utvikler sin egen teknikk som gjør utslag i hvordan jobben utføres. Noen vil plastre alt under seg, mens andre vil plastre mye over seg. Kvaliteten på det som utføres avhenger mye av kontrollorganet på damanlegget. Erfaring tilsier at kvaliteten på plastringen blir bedre med årene, ettersom maskinføreren blir flinkere. Det er teknikken og fasongen på steinen som avgjør resultatet og dernest fremdrift. Med riktig fasong på blokkene får maskinførerne ett godt utgangspunkt og jobben går fortere. Å plastre en fyllingsdam er sammensatt, steinkvalitet, driving av brudd og utførende plastrer har stor påvirkning på kvaliteten av resultatet (telefonsamtale O.Tveiten, 23.03.17).

4.3.3 Samspill – riktig kvalitet

Det er ikke alltid det er samsvar mellom teori og praksis. Kontrolløren er ofte nyutdanna uten erfaring med plastring, og vil følge fyllingsdamveilederen nøye (telefonsamtale O.Tveiten, 23.03.17). Dette kan føre til uenigheter på anleggsplassen. Entreprenøren er opptatt av at arbeidet skal være gjort ordentlig, men samtidig ikke bli for langtekkelig. Entreprenøren ønsker å tjene penger.

Videre krever byggherren ut fra krav i damsikkerhetsforskriften at utførende entreprenør skal ha erfaring med 50 måneder relevant nyere praksis. Det viser seg at det ikke alltid er sammenheng mellom pris på arbeidet og erfaring.

4.3.4 Mulige løsninger

Ved bruk av samhandlingsentreprise økes samspillet i prosjektet. I en slik entrepriser plikter entreprenøren å samhandle aktivt med øvrige entreprenører, byggherrens prosjektleder og byggeleder. Dersom andre forhold enn kun pris vektlegges i valg av tilbyder kan det sikre økt

kvalitet. Dersom entreprenøren har referanser fra lignende prosjekt, vil det øke sannsynligheten for et godt resultat.

Gode beskrivelser og arbeidstegninger i rett tid sørger for økt kvalitet og sørger gir et godt resultat.

4.4 Praktisk eksempel – Dam Hundålvatn

Dam Hundålvatn ligger i Vefsn kommune i Nordland, eid av Helgelandkraft AS. Steinfyllingsdammen stod ferdig i 1961, og er i konsekvensklasse 2 med frontal tetningsplate av betong. Tekniske data for dammen er listet i tabell 6. Skråningshelning S er målt til ca. 1:1,4 altså 35,5°.

Tabell 6 – Teknisk data for eksisterende dam fra (Huuse-Røneid, 2016)

Lengde	173	[m]
Dimensjonerende flom Q_{1000}	411	[m ³ /s]
Ulykkesflom Q_{pmf}	617	[m ³ /s]

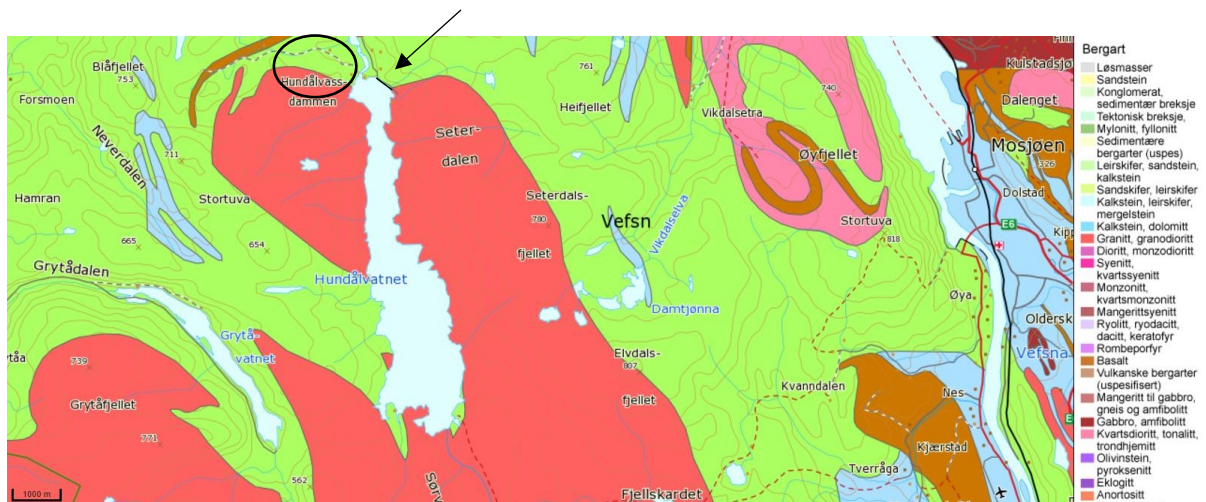
Eksisterende nedstrøms skråningsvern er ikke utført som plastring. Beregninger viser at støttefyllingen har høy permeabilitet, dermed vil det ikke oppstå poretrykk i fyllingen bak eksisterende tetteplate oppstrøms. Revurdering av dammen konkluderer med at dammens nedstrøms skråning utfra beregninger er stabil for både dimensjonerende flomvannstand og ulykkesgrensetilstand. På grunn av mangelfull steinplastring er stabiliteten av nedstrøms skråning likevel ikke tilstrekkelig. Derfor etableres det en ny støttefylling og nytt skråningsvern med helning 1:1,5 på nedstrøms side. (Huuse-Røneid, 2016)

Skråningsvernet er planlagt med 2 meter horisontal tykkelse. Størrelsen på steinene i sjikt 1 er bestemt av anbefalt minste steinstørrelse som oppgitt i fyllingsdamveilederen. Minste diameter er beregnet til $D_{\min} = 500$ mm, med formel [4] også gitt i veilederen.

Da kravet til minste steinstørrelse for nedstrøms skråningsvern og kronevernet er tilnærmet lik, skilles det ikke mellom disse sonene. Derfor er det valgt i dette prosjektet å dimensjonere steinstørrelsen i nedstrøms skråningsvern etter krav til kronevern (e-post fra Ø.Huuse-Røneid 23.01.17).

Lokalisering av steinbrudd blir bestemt utfra geologien i området. I skråningsvernet skal det benyttes stein av god kvalitet som er motstandsdyktig mot forvitring. Granittiske og gabbroide

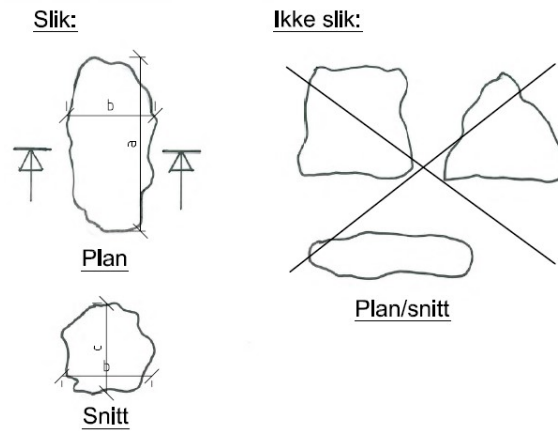
bergarter, som rene granitter, dioritter, gabbroer eller gneiser er av egnet kvalitet (Johannessen og Yugsi Molina, 2016).



Figur 5 – Bergrunnskart (NGU, 2017)

Kartutsnitt fra Norges geologiske undersøkelser (NGU) i figur 5 viser grunnforholdene i området. Dammens lokasjon er vist med pil. Sirkelen illustrer plassering av steinbruddet. Hovedbergart i området er granitt, granodioritt angitt med rød farge. De grønne områdene i figuren er glimmergneis, glimmerskifer, metasandstein, amfibolitt hovedbergartene. Dette betyr at ønsket kvalitet på stein er tilgjengelig.

Videre i prosjektbeskrivelsen beskrives prinsipp ved plastring av fyllingsdammer, der god og ønsket plastring er beskrevet med figurer og bilder. Ønsket steinstørrelse er beskrevet i figur 6.



Figur 6 – Beskrivelse av plastringstein fra (Huuse-Røneid, 2016)

God plastringstein skal være:

- Noe avlange $1/3 < b/a < 2/3$
- Ikke flate $c/b > 2/3$
- Ikke for lange/stenglige i forhold til tykkelse $a/b < 3$
- Stein av god kvalitet som er motstandsdyktig mot forvitring

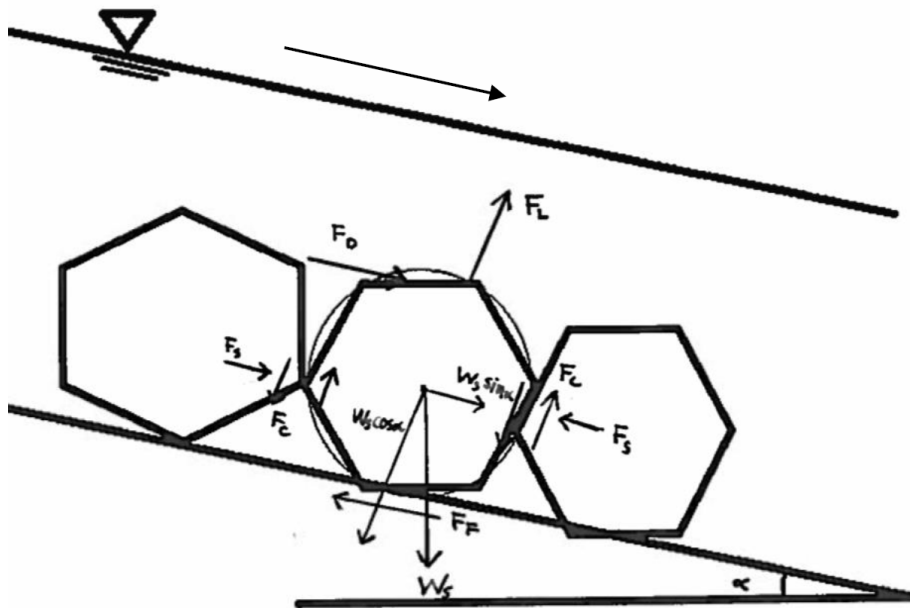
5 Teoretisk grunnlag for modellforsøk

Innholdet i dette kapittelet bygger på faglitteratur innenfor hydraulikk og vassdragsteknikk. Kapittelet danner grunnlaget for forsøkene som er utført.

5.1 Krefter på stein i plastring

Ved overtopping av en plastret fyllingsdam utsettes plastringsteinene for krefter fra vannet. Kraftene som virker vil føre til at steinene kan løsne og bli revet ut av plastringen. Steinene vil eroderes ut når de drivende kreftene er større enn de stabiliserende. Steinens egenvekt, friksjon fra underlaget og kontaktkrefter mellom steinene virker stabiliserende. Strømningskrafta fra vannet ved overtopping er drivende kraft (NVE, 2010).

Figur 7 illustrerer kreftene som virker ved overtopping. Strømningsretning er markert med pil.



Figur 7 – Krefter på stein ved overtopping, modifisert etter (Dornack, 2001)

Dragkraften F_D oppstår på grunn av trykk fra det strømmende vannet og sug parallelt med underlaget.

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad [16]$$

C_D = Dimensjonsløs dragkoeffisient

A = Arealet utsatt for drag [m^2]

ρ = densiteten til vann [kg/m^3]

v = strømningshastigheten over steinen [m/s]

Løftekraften F_L kommer av trykkforskjellen som oppstår på grunn av lokale hastighetsvariasjoner over steinen. Krafta vil forsøke å løfte steinen fra underlaget, og virker normalt på underlaget.

$$F_L = C_L \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad [17]$$

C_L = Løftekoeffisient

A = Areal utsatt for løft [m^2]

Steinens egenvekt W_s er stabiliserende kraft. Fordi steinen vil være dykket når dammen overtoppes blir W_s for neddykket steinvekt benyttet.

$$W_s = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot V_s \quad [18]$$

V_s = Steinens volum [m^3]

ρ_s = Densitet til stein [kg/m^3]

Grunnet helningen på nedstrøms skråning dekomponeres W_s . Dekomponering i normal og parallell retning gir kreftene som virker i samme plan som de resterende kreftene.

Friksjonskraften F_F virker fra underlaget på steinen.

$$F_F = (W_s \cdot \cos(\alpha) - F_L) \cdot \tan(\varphi) \quad [19]$$

Hvor

α = Skråningshelning

φ = Friksjonsvinkelen mellom bunnen og steinene

Steiner lagt i plastring blir påvirket av hverandre, steinene overfører tyngden fra massene over. Kontaktkraft mellom steinene F_s virker normalt på kontaktpunktet og ved bevegelse vil friksjonskraft F_c oppstå.

For stabilitet mot glidning må kraftlikevekten gitt i formel [20] være oppfylt.

$$F_F > F_D + \cdot (W_s \cdot \sin(\alpha)) \quad [20]$$

For stabilitet mot plukking, at steinen ikke eroderes ut må kraftlikevekt være oppfylt.

$$(W_s \cdot \cos(\alpha) > F_L) \quad [21]$$

5.2 Bruddmekanismer

Som følge av vannstand over dimensjonerende flomvannstand kan brudd av fyllingsdammer oppstå. I forbindelse med «Prosjekt damsikkerhet» fra 1992 beskriver Nicolaisen, Larsen og Daleng (1992) følgende bruddmekanismer som følge av overtopping av tetningskjernen av fyllingsdammer.

- **Erosjon** i nedstrøms damtå eller damskråning grunnet vanngjennomstrømning i dammen.
- **Utglidning** på grunn av for høy magasin vannstand og oppbygging av poretrykk i nedstrøms støttefylling.
- **Erosjon** av damkrone og øvre del av nedstrøms skråning som følge av høy vannstand og bølger i magasin.
- Ved for **stor vannføring** i flomløpets vannvei vil erosjon i nedstrøms damtå kunne oppstå.

Motstandsevnen mot brudd er avhengig av hvor godt damtåen klarer å motstå vanngjennomstrømningen i dammen.

Blodgett og McConaughy (1986) definerer også 4 ulike bruddtyper for rauset steinsikring, der steinene er dumpet i tilfeldig mønster.

- **Partikkel erosjon;** beskrives som den mest vanlige bruddtypen. Erosjonen skjer når steinene er for små til å motstå skjærbelastningen fra vannet som strømmer over ved overtopping. Denne type erosjon forekommer ofte der skråningshelningen er for bratt slik at friksjonsvinkelen overskrides, og dersom steinene er for ensgraderte vil det ikke finnes steiner som kan fylle hulrom og sørge for sidestøtte.
- **Translasjonsutglidning;** nedre del av steinsikringen sklir ned, bruddet oppstår tvers over skråningen. Bruddkanten er skrap og fyllingen sprekker opp i øvre del. Et slikt brudd kan oppstå, ved for bratt skråningen, eller ved dårlig sikring i tåa av skråningen. Det hydrostatiske vanntrykket reduserer friksjonen langs steinsikringslaget og filterlaget, slik at steinene sklir ned.
- **Modifisert slump;** masse forflytter seg langs en indre glide flate. Bruddet har et flatt plan. Denne type brudd skjer dersom skråningen er for bratt, slik at steinene ligger nær friksjonsvinkelen, små bevegelser kan føre til brudd.
- **Slump;** brudd der materialet får en rotasjonsbevegelse. Årsaker til brudd kan være inhomogene materialer i støttefylling eller skjærbrudd langs glideflater i støttefyllingen under.

Erosjon og utglidning pekes på som hovedårsaker for brudd i begge beskrivelsene av bruddmekanisme. Forskyvning er ikke nevnt som årsak til brudd i plastring.

5.3 Tidligere arbeid ved NTNU

Tidligere arbeid ved NTNU har blant annet undersøkt stabiliteten av plastring ved overtopping og gjennomstrømning, samt identifisering av bruddmekanismer. Det er blitt utført:

- Forsøk i laboratoriet med plastring av skråning og rauset steinsikring
- Storskalaforsøk i felt
- Kartlegging av eksisterende plastring

Priska Helene Hiller har gjennomført doktorgradstudie av plastring av fyllingsdammer ved NTNU. Under doktorgradsstudiet er det utført modellforsøk og feltforsøk med hensikt å utvikle

en optimal metode for plastring av fyllingsdammer. Doktorgraden er en del av Energi Norge sitt forskningsprosjekt «Plastring av fyllingsdammer (Plaf)». Resultater fra modellforsøkene viser at plastring der steiner er lagt i et innbyrdes låsende mønster, har i gjennomsnitt et sju ganger større kritisk steinbasert Froudetall enn rauset steinsikring (Hiller, 2017). Gjentatte modellforsøk viser at bruddet starter i overgangen mellom damkrone og nedstrøms skråning. Det utvikler seg en glippe i plastringen og glippen blir større over tid ved økende vannføring. Når forskyvningene blir tilsvarende en steinlengde og vannføringen økes går plastringen til brudd. Forskyvning avhenger av pakningstettheten til plastringen, steinstørrelse, vannføring og tiden plastringen blir utsatt for overtopping.

Det er tidligere blitt skrevet flere masteroppgaver om fyllingsdammer. For oversikt over alle masteroppgaver fra 2012 og til nå henvises det til prosjektoppgaven (Veslegard, 2016).

Resultatet fra de mest relevante masteroppgavene presenteres her: Eirik Helgetun Pettersen og Jens Jakobsen arbeidet sammen med Priska Helene Hiller i laboratoriet våren 2015. I oppgaven til Pettersen (2015) konkluderes det med at forskjellige skråningsvern har stor påvirkning på styrken til skråningsvernet. Plastring med forband gir høyest bruddvannføring på 225 – 400 l/s/m. For forsøksdammen der plastringen er lagt uten forband er bruddvannføringen på 75 l/s/m, en relativ forskjell på 3,0 til 3,5. Rauset steinsikring hadde dårligst styrke med bruddvannføring på 37 l/s/m.

Jakobsen (2015) undersøker forskyvninger i plastring ved bruk av smartstones. Smartstones har potensiale for å registrere bevegelse i plastring ved hydraulisk belastning, men grunnet vanskeligheter med å sette smartstones i opptaksmodus ble det ingen suksess. Videre har Jakobsen de samme resultater som Pettersen.

5.4 Laboratorieteknikk

Det finnes ulike metoder for å undersøke hydrauliske sammenhenger. Enten ved gjennomføring av feltundersøkelser, numerisk modellering eller ved fysisk testing i modell. I denne oppgaven blir en fysisk modell benyttet.

En fysisk modell er en miniatyr av et fysisk system. Fysiske modeller er mye brukt innenfor vassbyggingsteknikk og fluidmekanikk, og brukes til å finne optimale tekniske og økonomiske løsninger. Ved bruk av fysiske modeller er det mulig å gjøre direkte simuleringer i mindre skala som gir en god fremstilling av virkeligheten.

Fysisk modellering er fordelaktig siden det gir et umiddelbart inntrykk av hva som skjer. Dette gir en mer fokusert studie hvilket kan redusere planlagt testing. Det er også et nyttig grunnlag for myndighetene sine krav til sikkerhet, og viktig for læring og utdanning.

For at resultatene fra forsøkene skal være overførbare, må forsøkene og den fysiske modellen dimensjoneres slik at det ligner mest mulig på virkeligheten. Det er nødvendig å bestemme hvilke krefter som dominerer og hvilke som kan neglisjeres, siden full dynamisk likhet ikke er mulig i en skalert modell. Den mest brukte modelloven ved frispeilsstrømning er Froudes modellov. Ved frispeilsstrømning, hvilket er strømmingssituasjonen ved overtopping av dam, er gravitasjonskreftene dominerende, noe Froude tar hensyn til i sin betraktning. Froude benyttes ved turbulent strømning og er ikke avhengig av Reynoldstallet (Jirka, 2007).

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad [22]$$

Hvor

v = Hastighet [m/s]

L = Lengde [m]

Froude modellov bygger på Forudetallet gitt i formel [22]. For å kunne regne mellom virkelighet og modell settes F_r prototyp lik F_r modell, liten r står forholdet mellom dem. Hastighet, v_r er gitt i formel [23] der $g_r=1$.

$$v_r = \sqrt{g_r L_r} \quad [23]$$

Vannføring Q_r er gitt ved formel [24], og er forholdstallet mellom vannføring i modell og prototyp.

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{v_m A_m}{v_p A_p} = v_r A_r = \sqrt{L_r} L_r^2 = L_r^{2.5} \quad [24]$$

Tid er gitt ved

$$T_r = \sqrt{L_r} \quad [25]$$

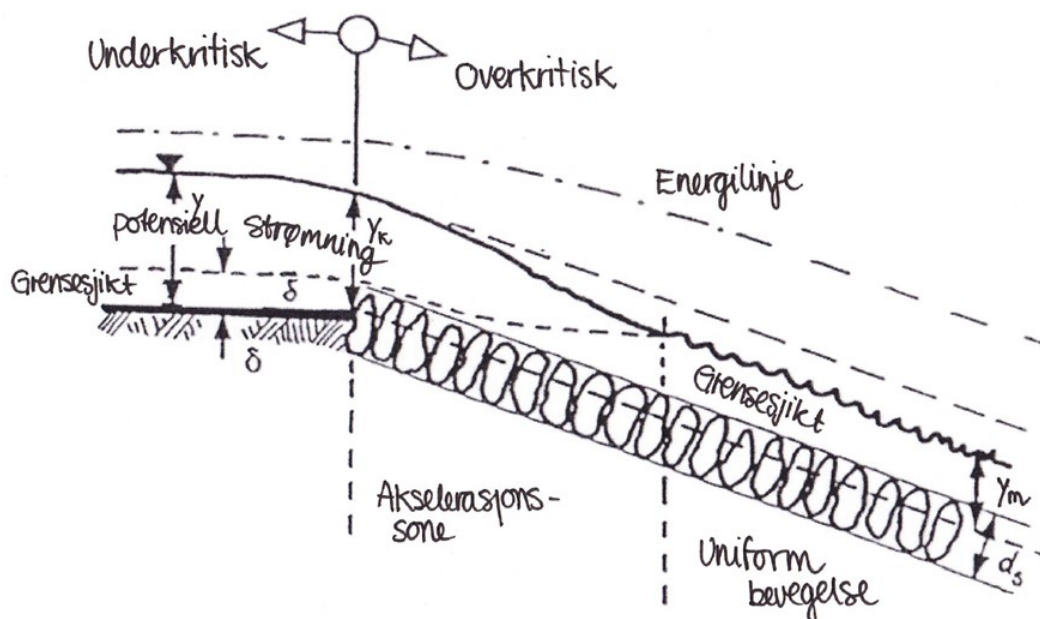
Skaleringseffekter vil oppstå ved bruk av Froudes modellov. For å redusere effekten av skaleringen er det viktig å være klar over hvilke forhold som ikke skaleres riktig. Effekten av

skalering vil avhenge av hvilken modellov som blir benyttet (Heller, 2011). Froudes modellov neglisjerer overflatespenningen. Dette vil ha betydning ved lave vannstander, men er ikke av betydning for de gjennomførte forsøkenen i denne oppgaven. Luftbobler er ikke nedskalerbare og vil kunne påvirke resultatene. Strømningskrefter er mer dominerende i modell enn i prototyp, grunnet lavere vannstand.

Plastringens tilfeldighet og steinens porøsitet er relativ enkel å kontrollere i et laboratorium under ideelle forhold med småskala modeller, konstruert for hånd. Imidlertid er det vanskeligere å kontrollere leggingen av plastring i samme grad i prototyp, med gravemaskin. Effektene av manuell plassering sammenlignet med maskin er viktig å ta hensyn til i tolkning av resultat og sammenligning med virkelighet (De Gregorio, *et al.*, 2014).

5.5 Bakgrunn for analyse av forsøksdata

Strømningssituasjonen ved overtopping av dam kan beskrives ved Froudetallet, F_r . Ved overtopping akselererer vannet nedover damskråningen inntil strømmingen blir stabil.



Figur 8 – Strømningssituasjon ved overtopping av dam, fritt oversatt fra Platzler (1983)

Figur 8 illustrerer strømningssituasjonen ved overtopping. Ved damkronen er strømmingen kritisk $F_r = 1$. Videre nedover oppstår overkritisk strømning, $F_r > 1$. Strømningmønsteret er også avhengig av ruheten til plastringen, helning på skråning og vannføring. Farten v og vannstand y vil variere og er vanskelig å bestemme ved overtopping. Ved å innføre

enhetsvannføring $q=v \cdot y$, og beskrive steinen hvor vannet strømmer over som y/d , er det mulig å utføre en dimensjonsløs analyse som resulterer i det steinbasert Froudetallet, F_s . Ved vannføring der plastringen går til brudd beskrives det steinbaserte Froudetallet som kritisk, F_{sc}

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}} \rightarrow F_r \cdot \left(\frac{y}{d}\right)^{\frac{3}{2}} \quad [26]$$

$$F_{sc} = \frac{q_c}{\sqrt{d^3 \cdot g}} \quad [27]$$

q_c = Enhetsvannføring ved brudd i plastring

d = Midlere steinstørrelse

F_{sc} gir hvor stabil en stein er mot erosjon og representerer stabiliteten uavhengig av steindiameter. Høyere F_{sc} betyr høyere stabilitet. Det kritiske steinbaserte Froudetallet gjør det mulig å sammenligne forsøksdata direkte fra forskjellige studier under kritiske forhold. Formelen tar ikke hensyn til varigheten av lasten fra vannet.

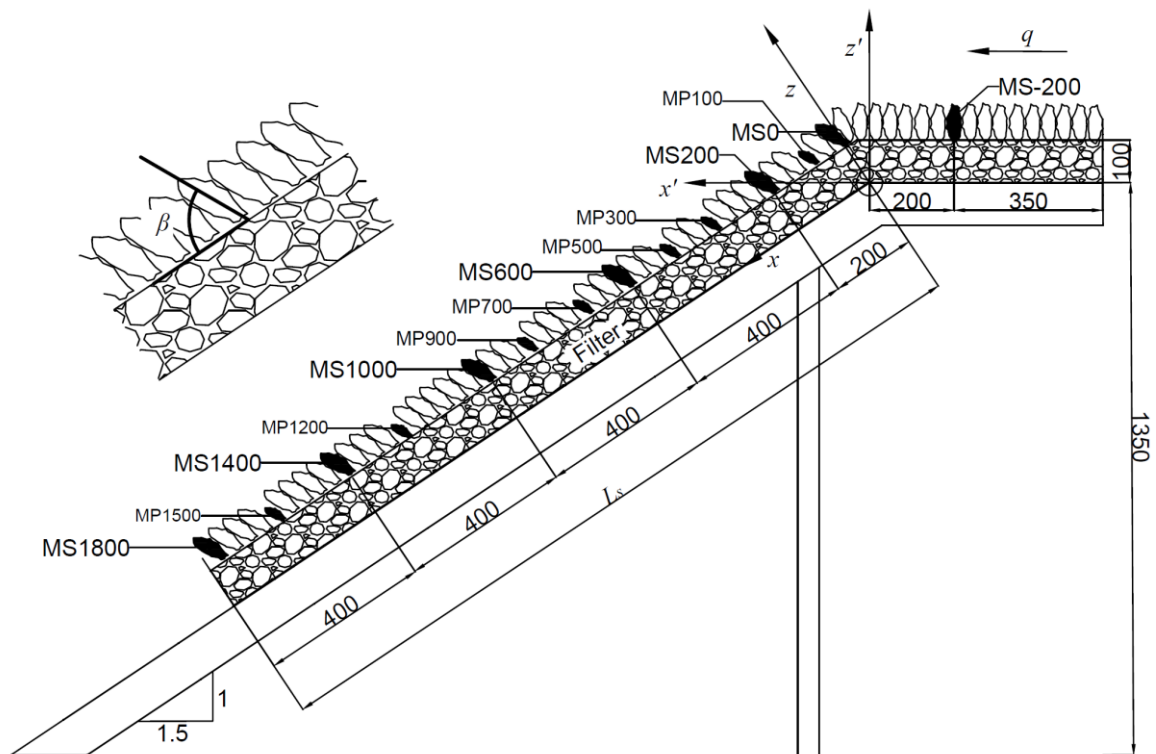
Formel [15] presentert i kapittel 3.2 for pakningsfaktor P_c gjør det mulig å sammenligne plastring med forskjellig steinstørrelse. Formelen tar utgangspunkt i at steinoverflaten er kvadratisk, noe som i praksis ikke er tilfelle. Verdier for P_c varierer avhengig av hvor tett det er plastret. Lav P_c betyr at plastringen er tettpakket. Rauset steinfylling ligger rundt 1,2 i pakningsfaktor, hvilket indikerer løs pakking. P_c fra 0,8 og lavere indikerer stabil pakningsfaktor (Linford og Saunders, 1967).

6 Forsøksoppsett og metode for gjennomføring

Analyse av kartleggingsdata danner grunnlaget for å undersøke effekten av å legge enkelte steiner med b-asken inn. Dette kapittelet beskriver forsøksoppsett og tekniske data for steiner brukt i laboratoriet. Samt en beskrivelse av gjennomføring av forsøkene.

6.1 Forsøksmodellen

Alle forsøk er gjennomført ved Vassdragslaboratoriet til NTNU i D-renna. Renna har bredde 1 meter og høyde av modellen er 1,35 meter. Maksimal vannføring i D-renna er 500 l/s. Modellen består av en horisontal damkrone og skråning med helning $S = 0,67$. I forsøkene er det kun nedstrøms side av dam som blir undersøkt. Modellen er bygget i skala 1:10, og Froude likhet er benyttet.



Figur 9 – Snitt av modelloppsett modifisert etter Hiller Priska H, Aberle Jochen og Lia Leif (2016)

Alle mål i figur 9 er gitt i mm. Under forsøk er forskyvninger som oppstår i plastringen målt. Forskyvningene er målt med punkt innmåling av utvalgte plastringstein. MS indikerer markørstein og angir faste punkter der forskyvning er målt for alle forsøk. Vannets strømningsretning er illustrert med pil. $L_s = 1,8$ m og er den totale tilgjengelige

forskyvningslengden for markørstein MS0. For forsøkene med b-aksen inn er målepunktene (MP) brukt til å måle forskyvning av utvalgte steiner med b-aksen inn. Nullpunktet til koordinatsystemet x , y og z og x' , y' og z' er definert i knekkpunktet til damkronen. Under forsøk måles forskyvninger i x , y , z koordinatsystemet, målingene er videre omregnet til det merkede koordinatsystemet x' , y' , og z' ved bruk av rotasjon og translasjon. Det merkede koordinatsystemet gjør det lettere å beskrive forskyvningene.

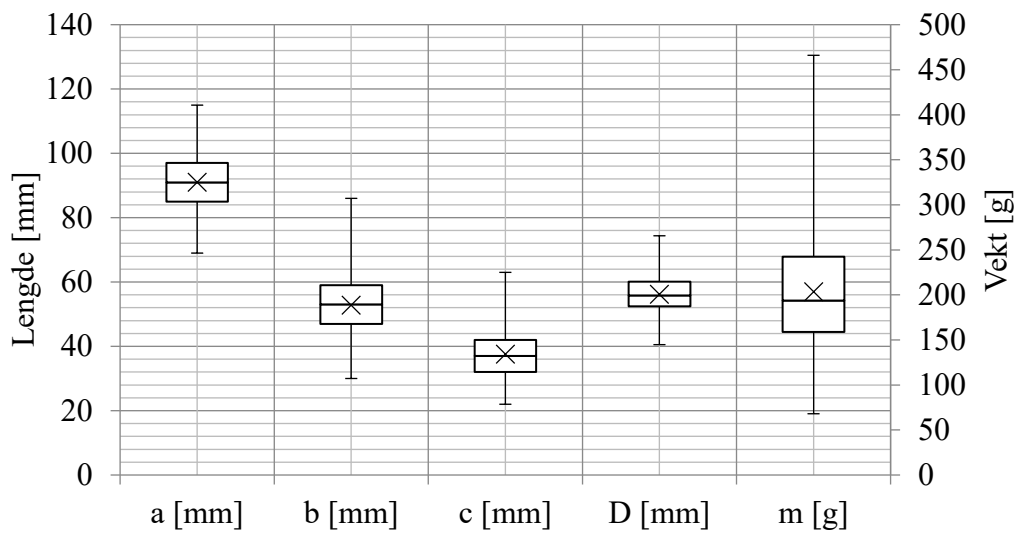
Modellen er bygget opp med liggeunderlag som tetningsmateriale mellom vannside og tørr side. Over liggeunderlaget benyttes en geotekstil duk som skaper friksjon mellom filterlaget og modellen. Nederst i damskråningen er det montert en fast rist som hindrer utglidning av plastringen i damtåa.

6.2 Plastringstein

Steinene brukt i modellforsøk er hentet fra steinbrudd i Vassfjellet, Trondheim og bergarten er ryholitt. I forbindelse med byggingen av modellen i 2015 er midlere diameter, d_{50} regnet ut fra analyse av 500 plastringstein. Aksene a , b og c er målt med skyvelære, gjennomsnittlig verdi for a -aksen = 0,091 m, b = 0,053 m, c = 0,038 m. Steinfraksjonens midlere steinstørrelse d_{50} = 0,057 m, densitet ρ = 2710 kg/m³ og gjennomsnittlig masse m = 0,24 kg (Pettersen, 2015). Midlere steinstørrelse d_{50} er regnet ut ved bruk av formel [8] for steindimensjon D .

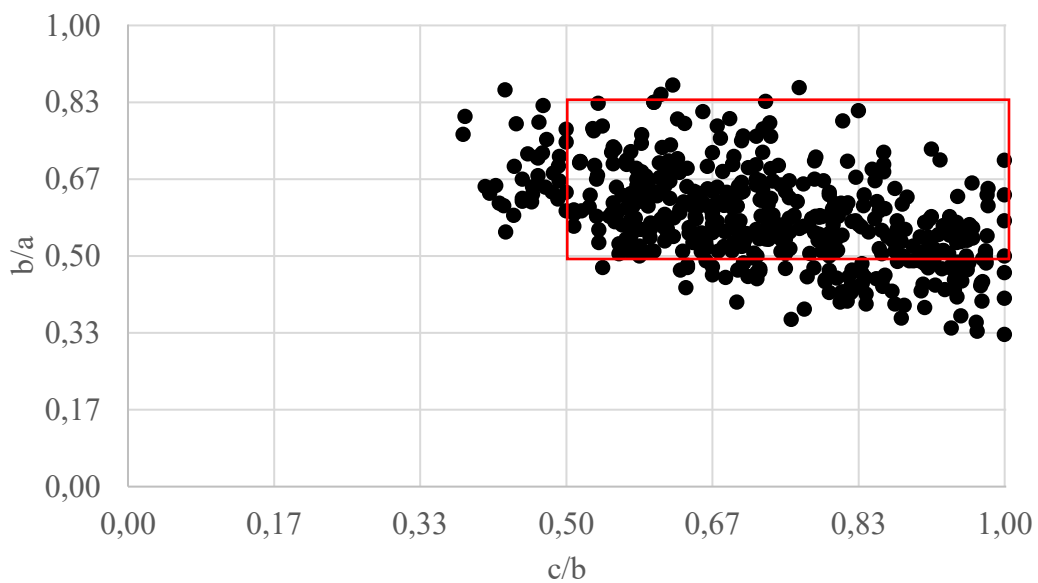
Ut fra kornfordelingskurve er steinene klassifisert som uniforme $d_{60}/d_{10} = 1,17$, med maksimal diameter på 0,074 m og minimums diameter på 0,041 m. Oppmålt steinfraksjon for stein benyttet i forsøkene gir at forholdet mellom minste og største diameter er 1,83, altså for høy variasjon i forhold til NVE sin anbefalinger (Jakobsen, 2015).

Figur 10 gir gjennomsnittsverdien for akser og vekt av de 500 plastringsteinene som er benyttet i modellforsøkene. Det er minst spredning for utregnet verdi D fra formel [8], videre er b -aksen i samme område som steindimensjonen D .



Figur 10 – Bokplott av steines gjennomsnittsverdi akser og vekt modifisert etter (Pettersen, 2015)

Figur 11 gir Zinggs diagram av plastringstein benyttet i laboratoriet, innenfor den røde firkanten er ønsket område av steinstørrelse etter NVE sin anbefaling. For nærmere beskrivelse av plastringstein analysearbeidet, henvises det til Pettersen (2015) og Jakobsen (2015)



Figur 11 – Zinggs diagram for plastringstein brukt i laboratoriet

Figur 12 viser nærbilde av ferdig bygget plastring.



Figur 12 – Plastringstein i forsøk 3^b se tabell 7.

6.3 Gjennomføring av forsøk

Plastringen bygges for hånd, en og en stein blir lagt oppå et 100 mm tykt filterlaget nedenfra og opp. Filterlaget kastes på plass ved bruk av spade, som gir tilfeldig orientering av steinene. Plastringsteinene legges i låsende mønster med innbyrdes kontakt. Erfaringer fra kartleggingsrapporten indikerer at plastring utført med gravemaskin gjør det vanskelig å legge plastringsteinene normalt på damskråningen. Derfor legges ikke steinene i modellforsøkene med lengste akse loddrett på dammen, for å rekonstruere en mer realistisk plastring.

Kartleggingsdata viser at lengste akse av steinen ikke alltid har fall inn mot dammen, det er derfor ønskelig å se på hva dette har av betydning for stabiliteten av plastringen. 10% av steinene i plastringen ligger ikke med lengste akse inn mot dammen. I disse tilfellene er b-aksen lagt inn.

Det er planlagt og gjennomført totalt fem forsøk, det første forsøket er utført under arbeidet med prosjektoppgaven høsten 2016. Det er tidkrevende å bygge opp forsøkene med sortering av stein og deretter legge plastring. Forsøkene er gjennomført med varierende parametere som belastningstid og hvilken steinaske som heller inn. En beskrivelse av alle forsøkene finnes i tabell 7.

Tabell 7 – Beskrivelse av forsøk

	Plastringsmetode	Belastningstid [h]
Forsøk 1^a	Alle steiner med a-akse inn	1
Forsøk 2^a	Alle steiner med a-akse inn	0,5
Forsøk 3^b	10 % av utvalgte steiner legges tilfeldig med b-akse inn *	1
Forsøk 4^b	10 % av utvalgte steiner legges tilfeldig med b-akse inn *	1
Forsøk 5^a	Alle steiner med a-akse inn	1

* Se resultater fra analyse av kartleggingsdata i kapittel 3.3.

Steinene er forsøkt lagt med helning $\beta = 60^\circ$ i skråning og med $\beta = 90^\circ$ helning i damkrone. β er definert i figur 9. Under bygging av plastring, er steinene plukket ut tilfeldig og lagt i skråningen. Utførende plastrer har vært den samme for alle forsøkene, dette gjør det mulig å se på sammenhengen mellom kvalitet på grunn av økt erfaring.

Følgende utstyr gjengitt i tabell 8 benyttes under forsøkene.

Tabell 8 – Måleinstrument og usikkerhet

	Instrument	Usikkerhet
Vannføring	Simens Sitrans Mag 5000	1 l/s
Magasin vannstand	Microsonic mic+340	1 %
x- og y koordinater	Isel Traverse med Pro NC-programvare	0,01 mm
z koordinater	Leica Disto X310	1 mm
Videokamera 1	Sony HDR-SR12E	
Videokamera 2	Sony HDR-CX115E	

Agilent Measurement måler vannstand og vannføring, dataene registreres med en målefrekvens på 10 Hz.

Figur 13 viser ferdigbygget plastring for forsøk med alle steiner med a-akse inn i dammen til venstre og til høyre er målepunktene som ble brukt ved forsøk 3 og 4, tilfeldige utvalgte oransje steiner. Steiner med tilnærmet like lang a og b akse ble plukket ut i laboratoriet og plassert med b-akse inn. De gule horisontale linjene indikerer markørsteinene som er tilsvarende de samme for alle forsøk.



Figur 13 – t.v ferdigbygget plastring med markørsteine, t.h målepunkt med b-akse inn

Markørsteinene er markert med gult og punktene registreres før forsøksstart med og uten vannfylt renne, deretter måles de igjen etter belastning av overtopping. Alle steinene markert med oransje er b-akse steiner.

7 Resultater

Her presenteres kort resultater fra analyse av kartleggingsdata og deretter forsøksresultatene.

7.1 Resultater fra analyse av kartleggingsdata

I kapittel 3.3 presenteres analyse av data fra kartleggingsrapporten som danner grunnlaget for to av de gjennomførte forsøkene, forsøk 3^b og 4^b.

Kravet i damsikkerhetsforskriften om å plassere steinene med lengderetning og fall innover i dammen er ikke oppfylt for de undersøkte nedstrøms skråningene. Det kommer ikke fram i forskriften om kravet gjelder for alle steiner eller kun en prosentandel.

7.2 Forsøksresultat

Våren 2017 er det gjennomført fire forsøk, masteroppgaven inkluderer også ett forsøk fra prosjektoppgaven fra 2016, forsøk 1^a. For å få best mulig datagrunnlag er også resultatene fra dette forsøket analysert. Alle forsøkene ble utsatt for overtopping og kjørt til globalt brudd. For nærmere beskrivelse av forsøkene se vedlegg 2-6, der beskrives bygging av plastring i detalj med bilde av plastring før belastning, registrering av antall steiner som eroderes ut av plastring, vannføring og belastningstid i prototyp, registrering av vannstand og vannføring, samt forsøkslogg. Grafisk framstilling av alle forskyvninger i x og z-retning er også tilgjengelig i vedlegg 2-6.

Belastningstiden til forsøkene og bruddvannføring er gjengitt i henholdsvis tabell 9 og tabell 10.

Tabell 9 – Belastningstid per vannføring og bruddvannføring

	Belastningstid [h]	Bruddvannføring [l/s/m]
Forsøk 1 ^a	1	120
Forsøk 2 ^a	0,5	150
Forsøk 3 ^b	1	100
Forsøk 4 ^b	1	125
Forsøk 5 ^a	1	175

Bruddvannføring har en variasjon på 75 %, flere faktorer avgjør bruddvannføringen som plastringstett og belastningstid. Forsøk 1^a og 2^a har samme belastningsmønster, men ulik

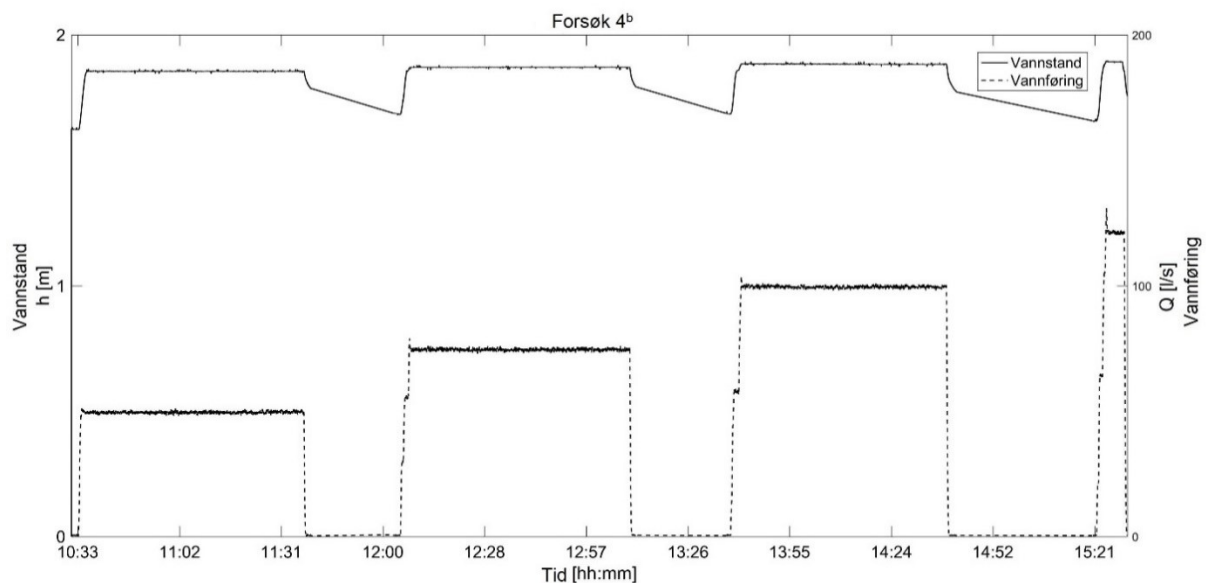
belastningstid. Forsøk 3^b, 4^b og 5^a er gjennomført med samme belastningsmønster slik at de kan sammenlignes på samme grunnlag. Videre er forsøk 1^a, 2^a og 5^a forsøkt plastret likt, for beskrivelse av plastringsmetode se kapittel 6.3 Gjennomføring av forsøk.

Tabell 10 – Total belastningstid i timer og vannmengde

Vannføring [l/s/m]	Forsøk 1 ^a	Forsøk 2 ^a	Forsøk 3 ^b	Forsøk 4 ^b	Forsøk 5 ^a
50	1	0,5	1	1	1
75	-	-	1	1	1
100	1	0,5	0,052	1	1
120	0,1	0,5		-	-
125		-		0,097	1
150		0,35			1
175					0,047
Total belastningstid [h]	2,1	1,35	2,052	3,097	5,047
Total vannføring [l/s]	270	300	225	260	600
Totalt vannvolum over dam [m ³]	2041	1458	1662	2899	10901

Totalt vannvolum er størst for forsøk 5^a, hvilket betyr at denne plastringen er mest motstandsdyktig. Mengden vann som plastringen i forsøk 5^a var utsatt for er også betraktelig større enn for de resterende forsøkene.

Eksempel på måledata fra Agilent er gitt i figur 14. Grafen beskriver hvordan forsøket er gjennomført. Vannføringen økes gradvis til bestemt vannføring og er stabil i belastningstiden.



Figur 14 – Eksempel på logging av vannstand og vannføring

Høyeste kritiske steinbaserte Froudetall ble oppnådd i forsøk 5^a, vist i tabell 11. Steinbasert kritisk Froudetall er definert i formel [27]. Bruddvannføringen er avgjørende for verdien, siden midlere steinstørrelse d_{50} er konstant i alle gjennomførte forsøk. Et høyt Froudetall betyr sterkere plastring. I snitt er plastringen med alle steiner der a-aksen heller inn i dammen funnet å være 1,3 ganger større enn plastringen med b-akse inn. Resultatene viser at maksimumsverdien for det kritiske steinbaserte Froudetallet kontra minimumsverdien for det kritiske steinbaserte Froudetallet er nærmest dobbelt så stort.

Tabell 11 – Kritisk steinbasert Froudetall

	F_{sc}
Forsøk 1 ^a	2,8
Forsøk 2 ^a	3,5
Forsøk 3 ^b	2,3
Forsøk 4 ^b	2,9
Forsøk 5 ^a	4,1

Alle pakningsfaktorene er gitt i tabell 12, ordnet fra minst til størst verdi. Antall steiner per kvadratmeter er økende med antall gjennomførte forsøk, for a -forsøkene. Det samme gjelder for forsøkene med b-aksen inn. Forsøk 1^a har lavest plastringstetthet av alle, mens forsøk 5^a har høyest. Plastringstettheten bestemmes ved å telle antall steiner benyttet i damskråningen,

steinene i damkronen utelukkes. Utfra antall steiner brukt i plastringen bestemmes pakningsfaktoren, P_c . Totalt varierte antall steiner i damskråningen mellom 970 til 1081. En høy plastringstetthet betyr sterkere plastring, det er større kontakt mellom steinene på samme areal. Høy tetthet gir lavere P_c .

Tabell 12 – Plastringstetthet og faktor P_c

	Plastringstetthet [antall steiner/m²]	P_c
Forsøk 5 ^a	601	0,51
Forsøk 2 ^a	581	0,53
Forsøk 3 ^b	562	0,55
Forsøk 4 ^b	573	0,54
Forsøk 1 ^a	539	0,57

Variasjon i pakningsfaktor er 12 %, variasjonen er antatt akseptabel. Høyest pakningsfaktor i forsøk 1^a, ved minst erfaring. Sett i forhold til variasjonen for bruddvannføring er forskjellene i pakningsfaktor liten. For forsøk^b er prosentavviket 2 %, mulig årsak til lavere avvik kan være på grunn av det bestemte mønsteret å legge steinene i. Dersom forsøk 1^a ekskluderes i vurderingen og heller betraktes på som en øvelse i å legge plastring, er variasjonen i pakningsfaktor på kun 8 %.

7.3 Forskyvning av stein

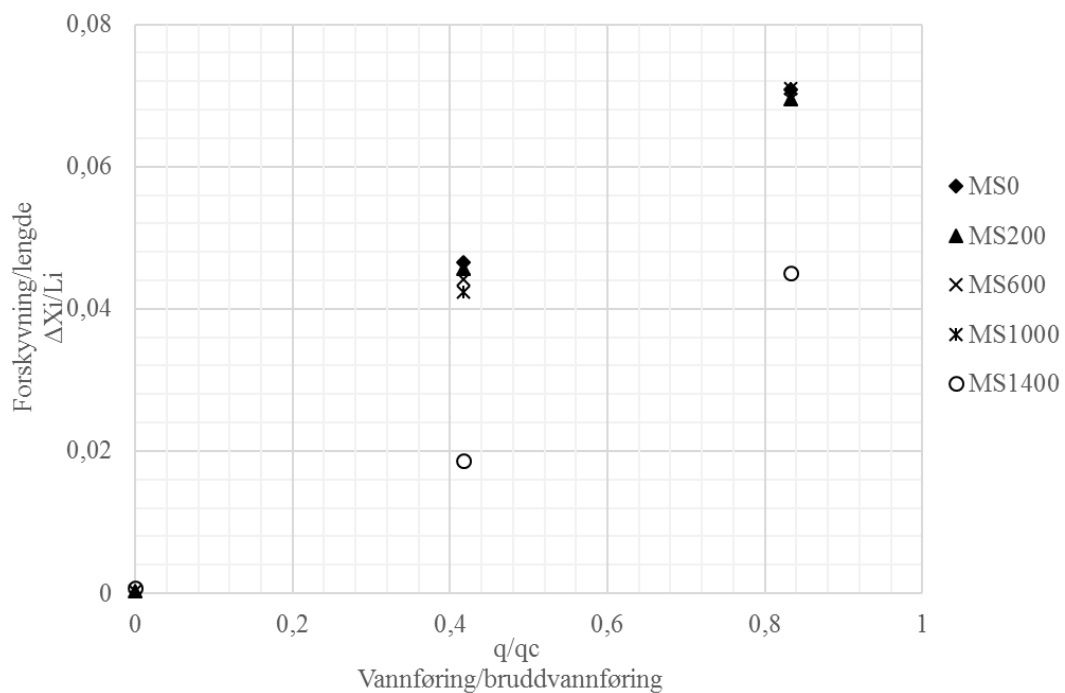
Resultatene av forskyvning baserer seg på målingene av markørsteinene. Forskyvningene når globalt brudd inntreffer er ikke målt, og siste måling før bruddvannføring står som gjeldene. Videoanalyse har også vært et nyttig verktøy for å undersøke forskyvningene som oppstår og utviklingen av disse. Størst forskyvning oppstår i lengderetningen x, definert i figur 9. Forskyvningene er økende med vannføring og tid. Observasjoner under forsøk og videoanalyse indikerer at plastringsteinene presses opp ved overtopping, danner grunnlaget for undersøkelse av z-forskyvninger. Forskyvningene i y-retning, normalt på strømningsretningen, er minimale og derfor ikke analysert i denne oppgaven. Grunnet svært mange målinger er det valgt å fremstille et utvalg av forsøksresultatene grafisk.

Figur 15 viser dimensjonsløs sammenheng for forsøk 1^a. Forskyvningen til markørstein MS-200 er ikke fremstilt grafisk fordi steinen ligger i damkrona. Markørstein MS1800 er også

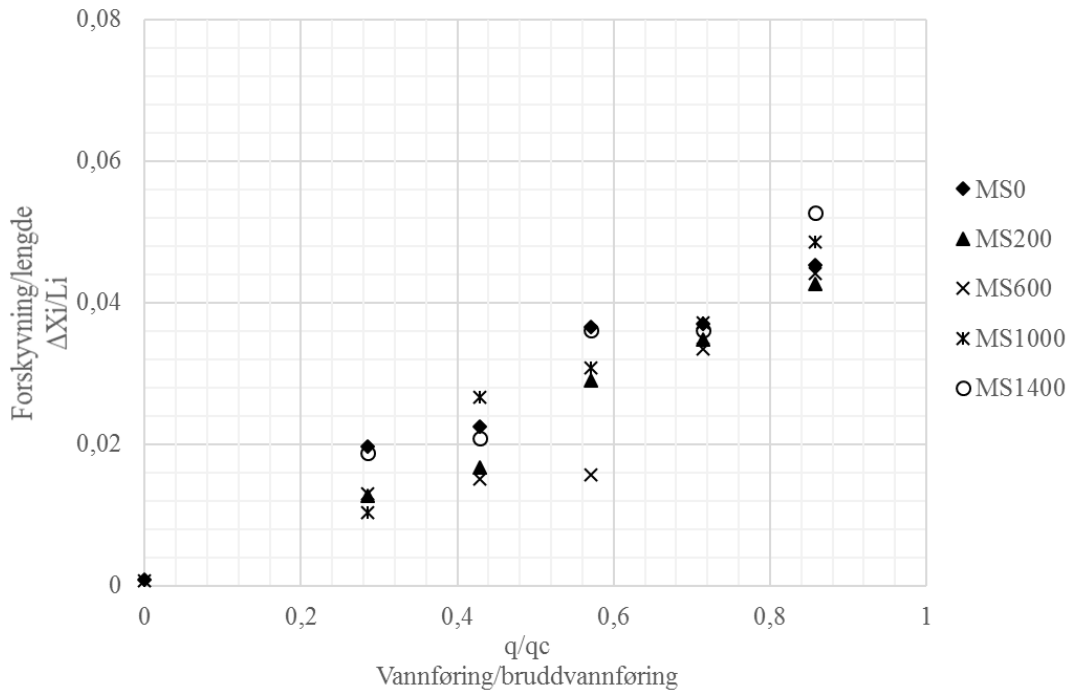
utelatt fordi steinen ikke har noen tilgjengelig forskyvningslengde, på grunn av risten som er fastmontert nederst i forsøksdammen. Forskyvning av steinene i x-retning er avhengig av tilgjengelig forskyvningslengde. Den dimensjonsløse fremstillingen gjør det mulig å sammenligne verdiene direkte med andre forsøk. Forskyvningene øker med økt vannføring.

Forskyvningene i forsøk 1^a er større enn i forsøk 5^a. For forsøk 1^a er det markante forskyvninger etter første vannføring på 50 l/s/m, forholdet mellom forskyvning og lengde er allerede over 0,04. Til sammenligning kreves det i forsøk 5^a flere økninger i vannføring før forskyvningene er over 0,04. Forskjellene i forskyvning fra første og siste gjennomførte forsøk er store. Dette peker på at erfaring i å legge plastring har mye å si for hvor store forskyvninger som oppstår før globalt brudd inntreffer. Se figur 15 og figur 16.

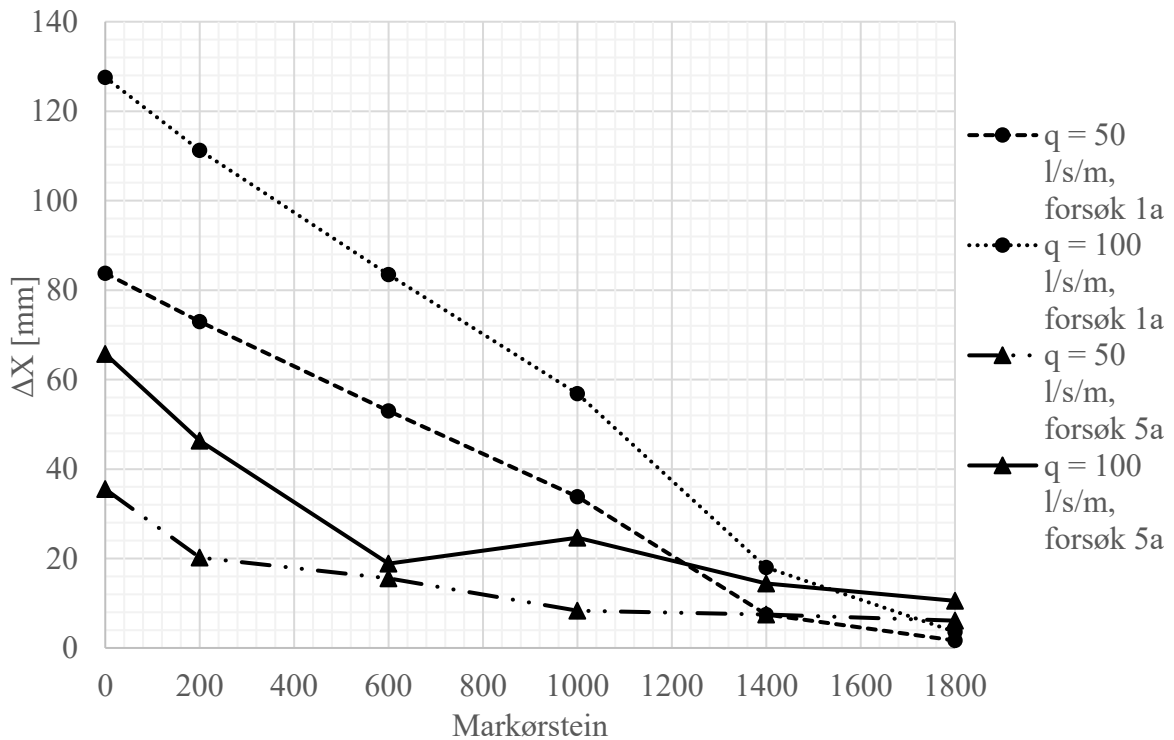
Figur 17 viser akkumulerte verdier for forskyvningene for begge forsøkene, etter samme vannføring. For forsøk 5^a er plastringen belastet med en vannføring på 75 l/s/m mellom 50 og 100 l/s/m. Forskyvningen i forsøk 5^a er mindre enn første registrerte forskyvning i forsøk 1^a.



Figur 15 – Dimensjonsløs analyse forsøk 1^a, x-forskyvning



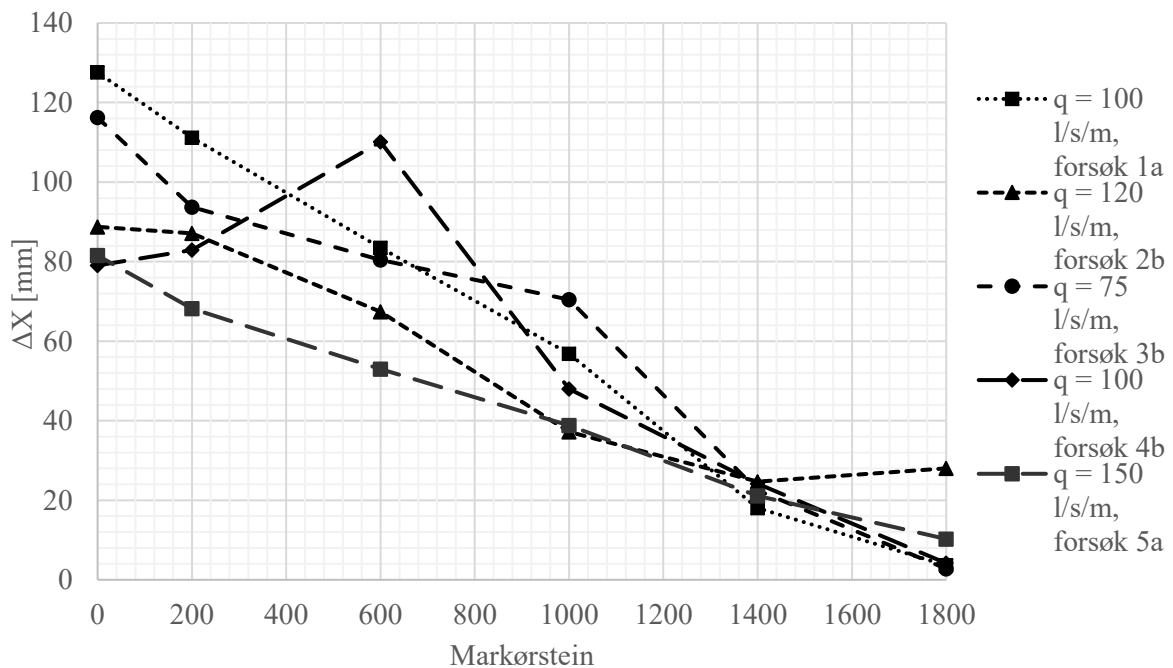
Figur 16 – Dimensjonsløs analyse av forsøk 5^a i x-retning



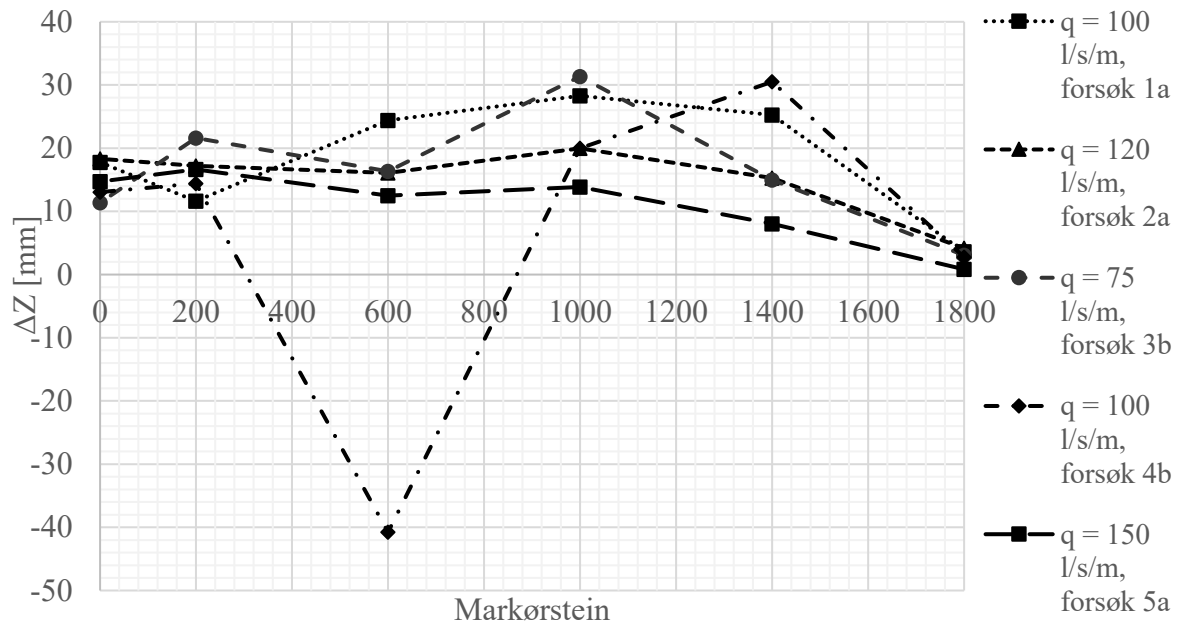
Figur 17 – Sammenligning av forsøk 1^a og 5^a x-forskyvning

Sammenligning av alle forsøk er gitt i figur 18. Største forskyvning i x-retning er 128 mm for markørstein, MS0 ved forsøk 1^a. Minste forskyvning for MS0, er $x = 77$ mm ved forsøk 4^b. Lengste akse av stein har gjennomsnittlig verdi $a = 0,091$ m, $a_{\min} = 0,069$ m og $a_{\max} = 0,115$ m. Maksimimsverdien for forskyvning overskrider maksimumsverdien til a-aksen.

Grafen i figur 19 sammenligner alle forskyvninger i z-retning ved siste vannføring før brudd. z- retning er normalt på x-retning, som vist i figur for modelloppsett Figur 9. Positive z-verdier betyr at plastringen skyves opp i planet og ut av plastring. Negative z-verdier betyr at steinene forskyves i negativ retning i forhold til første innmålte referansepunkt. Grafen viser et tydelig utliggerpunkt for forsøk 4^b ved markørstein MS600. Resterende målepunkter har en jevnere fordeling i forskyvning. Det er kun MS600 som er blitt forskjøvet ned i plastringen, en forskyvning på 40 mm nedover i filterlaget er av betydning. Mulig forklaring kan være feil i avlesning for z-koordinat under forsøket. Midlere diameter $d_{50} = 57$ mm, derfor er det etter all sannsynlighet målefeil som er årsaken til utliggerpunktet i grafen.

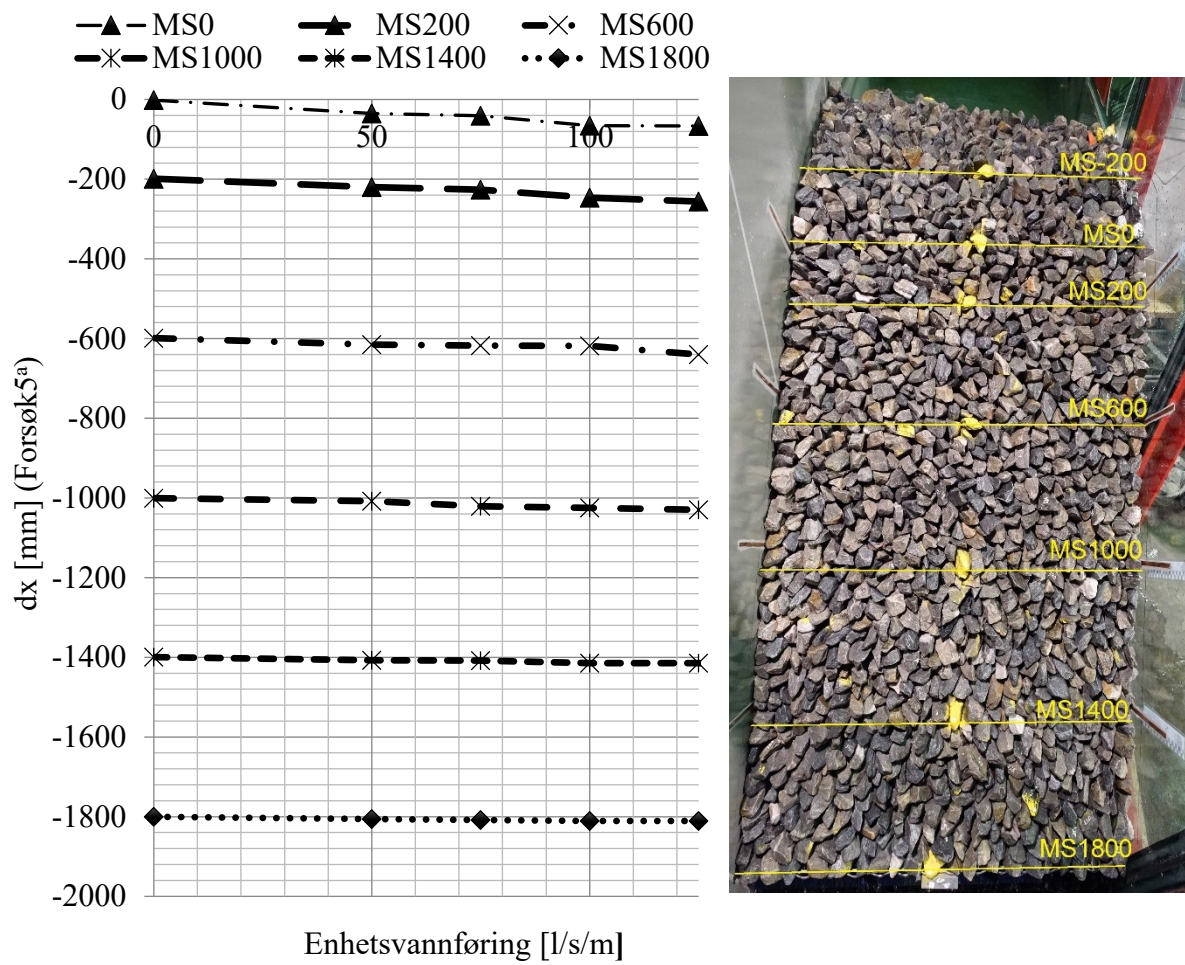


Figur 18 – Sammenligning av forskyvninger i x-retning i mm etter siste vannføring før bruddvannføring



Figur 19 – Sammenligning av forskyvninger i z-retning i mm etter siste vannføring før bruddvannføring

Figur 20 illustrerer hvordan steinene flytter seg nedover i plastringen og bilde til høyre viser plassering i skråningen. Forskyvningen er størst for markørstein MS0.



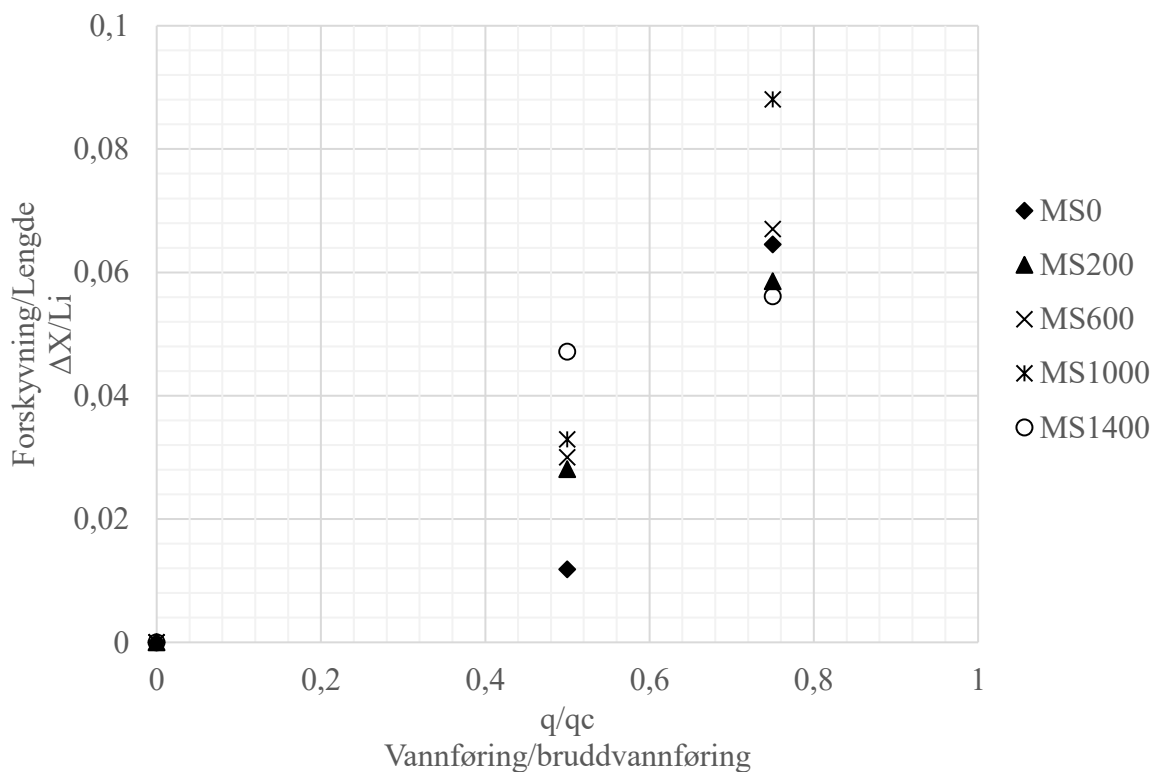
Figur 20 – t.v plott av utvikling av forskyvning, t.h plassering av markørstein

7.3.1 Resultat av b-akse inn

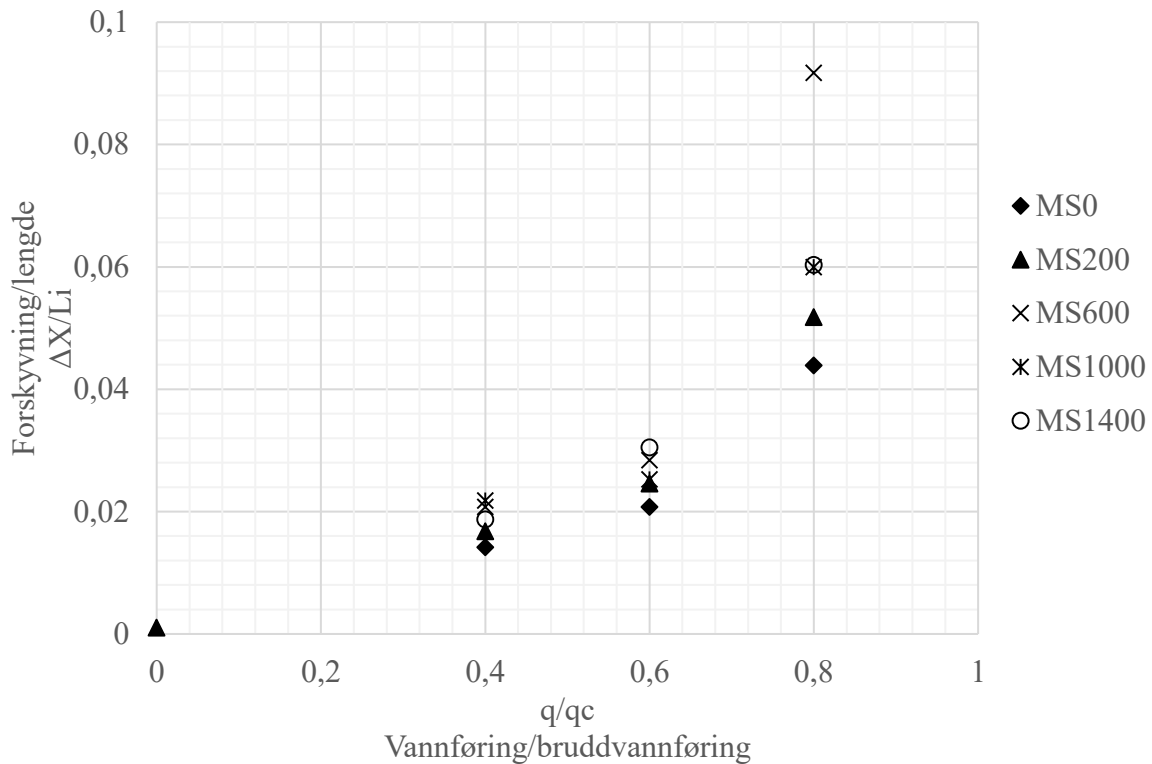
Med bevisst legging av b-aksen inn mot dammen reduseres stabiliteten til plastringen, bruddvannføringen er lavere. Videre er den siste plastringen sterkest, hvilket tyder på at erfaring i å bygge plastring har innvirkning på bruddvannføringen.

Resultatene fra forsøk 3^b er vist i figur 21 ved siste vannføring før brudd er forskyvningene markante. Markørstein MS1000 har størst forskyvning per tilgjengelig forskyvningslengde.

Figur 22 viser resultat fra forsøk 4^b. Til sammenligning er målte forskyvninger størst for forsøk 3^b, mens bruddvannføringen er høyere for forsøk 4^b. I forsøk 4^b har markørstein MS600 størst forskyvning per tilgjengelig forskyvnings lengde. MS1000 har høyest verdi i forsøk 3^b. Både MS600 og MS1000 er midt i plastringen.

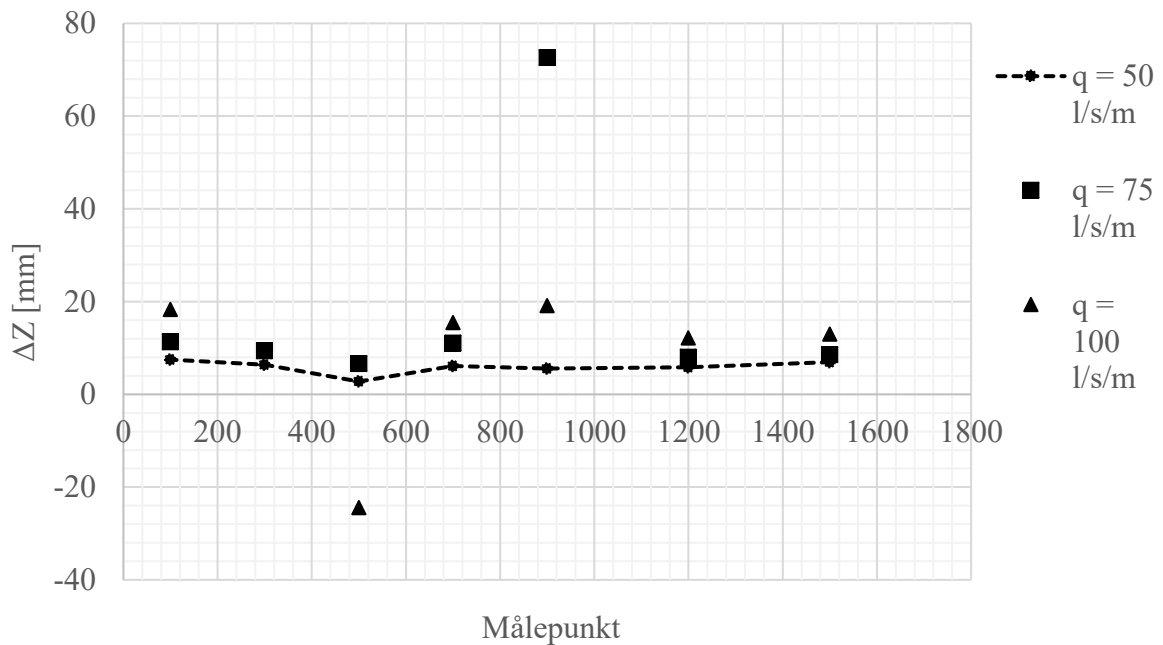


Figur 21 – Resultat forsøk 3^b, x-forskyvning



Figur 22 – Resultat forsøk 4^b, x forskyvning

Figur 23 viser forskyvningene for utvalgte målepunkt for forsøk 4^b med b-aksen inn. Steinen som ligger ved $x = 900$ ved vannføring 75 l/s/m forskyves markant. Fordi forskjellene i forskyvning ikke har sammenheng for vannføring 75 og 100 l/s/m er det valgt å kun presentere målepunktene. Videre stilles det spørsmål til målepresisjon, siden forskjellene er betydelige. En mulig forklaring kan også være at steinen har rotert i plastringen og at målepunktet ikke er mulig å sikte inn med laseren. Målepunktet ved $x = 300$ har falt ut ved vannføring 100 l/s/m, derfor mangler datapunkter for denne vannføringen.



Figur 23 – Forskyvning i z-retning for målepunkt i forsøk 4^b

Dirkete sammenligning av bruddvannføring for forsøkene a og b, gir at normal plastring der alle steiner plasseres med lengste akse med fall inn i dammen er mest stabil. Videre har plastringen med b-akse inn høyere pakningsfaktor enn de første forsøkene utført med a-aksen inn, dette kommer av økt erfaring i å legge plastring.

Bildene i figur 24 viser glippen som oppstår i knekken til damkronen og steinene her forskyves i strømningsretningen nedover damskråningen. Vannet renner fra høyre.



Figur 24 – t.v. stein i damkrone ved vannføring 50 l/s/m, t.h stein i damkrone ved vannføring 75 l/s/m for forsøk 3^b

7.4 Bruddmekanismer

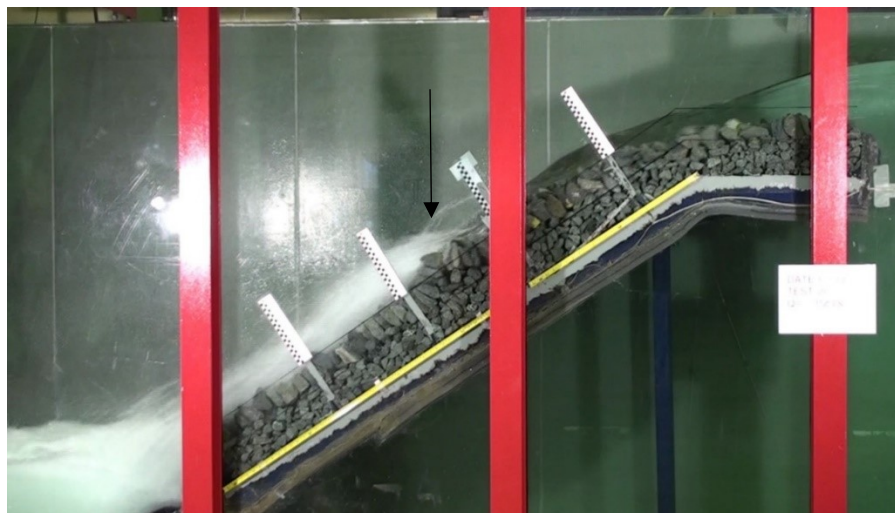
På bakgrunn av videoanalyse er bruddmekanisme for forsøkene beskrevet i tabell 13. Bruddfilmene for alle forsøk sett fra siden er tilgjengelig i elektronisk vedlegg.

Tabell 13 – Bruddmekanismer

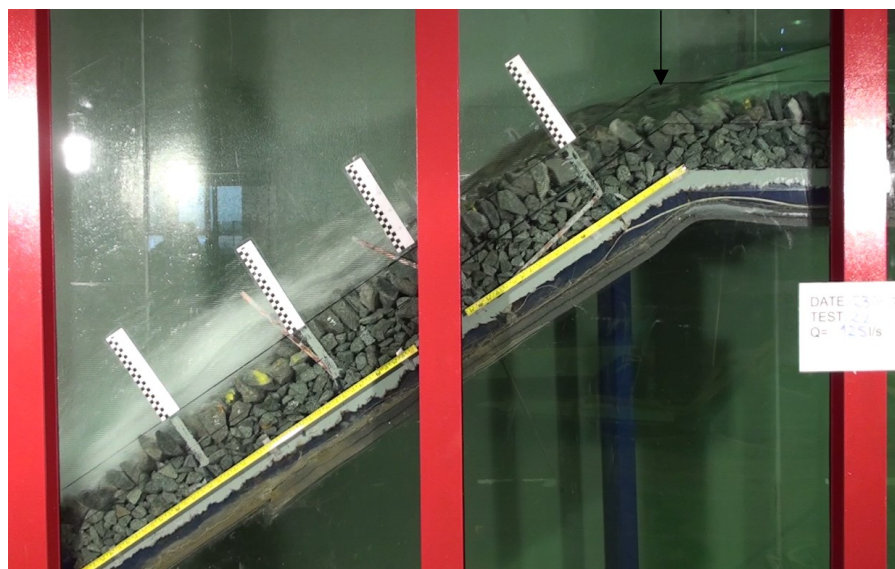
	Beskrivelse av brudd
Forsøk 1 ^a	Det oppstår en glipe i knekkpunktet til damkrona, plastringen presses sammen og forskyves nedover skråningen. Enkelte steiner eroderes ut midt i plastringen. Glipen blir større og større, kraften fra vannet blir for stor og plastringen skrelles av nedover. Øverste halvdel raser ut først før hele plastringen forsvinner videre nedover.
Forsøk 2 ^a	Forskyvningene i knekkpunktet er så store at steinene presses opp nær midten av skråningen. Glippen i damkrona er mindre for forsøk 1 ^a . Steinene presses opp på midten, og spretter ut. Plastringen går til brudd, øverste halvdel først deretter resten av plastringen.
Forsøk 3 ^b	Det oppstår en glipe i knekkpunktet til damkrona, plastringen presses sammen og forskyves nedover skråningen. Glipen blir større og større, kraften fra vannet blir for stor og plastringen skrelles av nedover. Øverste halvdel raser ut først før hele plastringen forsvinner videre nedover.
Forsøk 4 ^b	Det oppstår en glipe i knekkpunktet til damkrona, plastringen presses sammen og forskyves nedover skråningen. Enkelte steiner eroderes ut midt i plastringen. Glipen blir større og større, kraften fra vannet blir for stor og plastringen skrelles av nedover. Øverste halvdel raser ut først før hele plastringen forsvinner videre nedover.
Forsøk 5 ^a	Forskyvningene i knekkpunktet er så store at steinene presses opp nær midten av skråningen. Glippen i damkrona er mindre enn for de foregående forsøkene. Steinene presses opp på midten, og spretter ut. Plastringen går til brudd, øverste halvdel først deretter resten av plastringen.

Forsøkene 1^a, 3^b og 4^b har tilnærmet lik bruddmekanisme. Det samme gjelder for forsøk 2^a og 5^a, der plastringen heves mye mer lokalt ved midten før brudd. Figur 25 viser plastringen like før brudd i forsøk 2^a, pilen viser forskyvningene i z-retning. Til sammenligning i figur 26

oppstår ikke den samme hevingen nær midten av plastringen før brudd. Der er forskyvningene i damkronen hovedårsak til globalt brudd.



Figur 25 – Forsøk 2^a like før brudd



Figur 26 – Forsøk 4^b like før brudd

8 Oppsummering og diskusjon

I dette kapittelet oppsummeres og diskuteres utviklingen av fyllingsdamveilederen og undersøkelsene av praktisk erfaring. Videre diskuteres forsøkene utført i laboratoriet.

8.1 Kommentar til fyllingsdamveilederen

Både veiledere og damsikkerhetsforskriften har utviklet seg med tiden. Definisjonen av steinstørrelse er endret og i dagens fyllingsdamveileder er det steindiameter som er gjeldene dimensjoneringskrav. Ved å beskrive steinstørrelsen utfra steinens tre akser, og forholdet mellom aksene er definert, vil dette være en klarere beskrivelse for å oppnå ønsket form på plastringstein. I veilederen er det gitt minstekrav til steindiameter, men en definisjon av steindiameter er ikke gitt. Plastring av damskråning er en relativ enkel del av selve fyllingsdammen, men kan bli vanskelig når ulike definisjoner blandes.

Formel [4] for minimum diameter bygger på EBL Kompetanse (2005) forsøkene utført i denne studien er bygget med rauset steinsikring. Derfor kan det stilles spørsmål til hvor relevant formelen er for dimensjonering av plastringstein i dag. Sikkerhetsfaktoren lagt til av NVE øker størrelsen på steinen, men minimumskravet resulterer likevel i en relativt liten steindiameter. Med mindre steiner vil det ta lenger tid å utføre plastringen, og dammen er antatt mer motstandsdyktig ved overtopping ved bruk av større steiner.

Selv om steinene brukt i laboratoriet er håndplukket fra steinbrudd oppfyller de ikke anbefalingen om forholdet mellom minimum og maksimum diameter. Dette viser at forholdstallet på 1,7 er svært vanskelig å overholde, når det ikke lar seg gjøre ved utvelgelse fra en mengde steiner i steinbrudd. Samtidig anbefaler veilederen også å fylle på med mindre steiner dersom det oppstår hull i plastringen. Dersom dette blir gjort vil det være vanskelig å oppnå anbefalingen om forholdstallet til minimum og maksimum diameter. Slik som plastring utføres og kontrolleres i dag, er ikke kravene absolutt og både rådgivere og entreprenører har et subjektivt syn på anbefalingen. Enkelte plastringsprosjekter som prosjekteringstegninger fra Dam Hundålvatn gitt fra Sweco (Huuse-Røneid, 2016) inneholder nøye beskrivelser for hvordan plastringen skal se ut, med bilder og eksempler på god plastring, samt eksempler på hvordan det ikke skal gjøres. Ved å innarbeide denne typen standardbeskrivelse av god plastring i alle prosjekter, sikres kvaliteten til flere prosjekt.

Krav til steinstørrelse på plastringstein nedstrøms er nødvendig. Sett i lyset av klimaendringer med stadig mer ekstremvær, må det tas høyde for at situasjoner der flom fører til overtopping av dam eller tilstopping av flomløp kan skje. I bransjen benyttes veilederen til beregning, men anbefalingene blir ikke oppfylt ved alle prosjekter. Veilederen oppfattes som noe uklar, men enkelte entreprenør og rådgivere har høy erfaring med plastring og utviklet sin egen praksis.

Damsikkerhetsforskriften stiller krav til erfaring av anleggsleder for damprosjekter, dette sikrer bedre gjennomføring og pekes på som et viktig krav for økt kvalitet fra entreprenørens side. Ved økt erfaring med plastringsarbeid etableres egne rutiner og det gjøres tilpassinger ut fra forholdene på anlegg.

8.2 Resultat av kartleggingsdata

Kartleggingsdata viser avvik på 10 % i orientering av a-akse inn i dammen. Der det er avvik er flest steiner lagt med b-aksen inn i de eldste rehabiliteringsprosjektene. Skråningshelningen ser også ut til å ha påvirkning på orienteringen av aksene til steinene. Avvik kan komme av endring i begrep. Det er viktig å skille mellom plastring og skråningsbeskyttelse. Steindiameter er ikke alltid oppgitt i prosjekteringstegninger, og ved de eldre rehabiliteringsprosjektene er ønsket volum av steinen oppgitt. I praksis er det lettere å forholde seg til volumet av en stein, kontra diameter.

8.3 Praktiske forhold ved valg av steinstørrelse

For dam Hundålvatn er kravet til minste steinstørrelse for nedstrøms skråningsvern og kronevernet tilnærmet lik, derfor skilles det ikke mellom sonene. Steinstørrelsen i nedstrøms skråningsvern dimensjoneres etter krav til kronevern. Når prosjekter utføres slik sparer entreprenøren mye tid på å kun ta ut stein i en størrelse fra steinbruddet. Ved å spare tid, blir prosjektet også billigere.

Kvaliteten på plastringen er avhengig av gode grunnforhold i nærheten av dammen, for å sikre plastringstein med god kvalitet. Tilgjengelig bergart kan ha stor innvirkning på hva som er mest gunstig i et spesifikt prosjekt. Ingeniørgeologiske og anleggstekniske vurderinger, basert på erfaringer fra relevante damprosjekter, bør inkluderes i veilederen. En bransjeorganisasjon der rådgivere, byggherre og entreprenør går sammen for å vurdere hvilke forhold som er viktig å ta hensyn til for et best mulig resultat til en fornuftig pris.

For en bredere kartlegging av hvilke momenter som er utslagsgivende under arbeidet med plastring av fyllingsdammer, ville det vært fordelaktig å intervju flere i bransjen. Med kun en

representert rådgiverbedrift og en fra entreprenør er det ikke mulig å sammenligne opplysningene som ble gitt. Det er ikke sikkert at oppfatningen gjelder for alle prosjekter og det kan være ulik praksis fra bedrift til bedrift. Utfra svarene som ble gitt til spørsmålene listet i vedlegg 1, tyder det på at størrelsen av steinene er en viktig faktor for tiden det tar å legge plastringen. Fyllingsdamveilederen er kun en anbefaling og derfor et det ikke kritisk med små avvik i steinstørrelse, god kvalitet av plastring avhenger av flere faktorer enn kun steinstørrelse. Steinstørrelse påvirkes av kvaliteten på bergarten benyttet i plastringen. I praksis prøver man å benytte steinstørrelse som er oppgitt, men den kan justeres dersom det er hensiktsmessig. Kontroll av plastring krever samspill mellom alle involverte parter for å oppnå et best mulig resultat.

8.4 Forskyvning

De største forskyvningene oppstår i x-retning, nedover langs damskråningen. Ved overtopping oppstår en glippe i knekkpunktet til damkronen som ved økende vannføring blir større. Analyse av forskyvningsdata indikerer at globalt brudd oppstår ved forskyvninger i x-retning på en Forskyvning må derfor betraktes som en mulig bruddmekanisme for plastring. Resultatene bekreftes i Hiller (2017)

Forskyvningene i z-retning er lavere enn forskyvningene som oppstår i x-retning, her er forskyvningene størst midt på dammen. Etter hvert som glippen i damkrona oppstår, presses hele plastringen nedover og dermed skyves steinene på midten opp av plastringen.

Utviklingen av forskyvning underveis i forsøkene varierer. For forsøk 1^a er forskyvningene store etter første belastning med 50 l/s/m, mens for forsøk 5^a oppnås ikke like store forskyvninger. Ved økende vannføring øker forskyvningene. Det er sammenheng mellom hvor fort forskyvningene utvikler seg og pakningsfaktoren. Ved høy pakningsfaktor utvikles forskyvningen raskere. Maksimum forskyvningsintervall i x-retning er $x_{maks} = [0,077 \text{ m}, 0,128 \text{ m}]$ Minste forskyvning forekommer ved høy pakningstetthet. Til sammenligning er gjennomsnittlig verdi av a-aksen til steinene benyttet i modellforsøk $a = 0,091 \text{ m}$, $a_{min} = 0,069 \text{ m}$ og $a_{max} = 0,115 \text{ m}$. Maksimumsverdien for forskyvning overskrider maksimumsverdien til a-aksen. Likevel er a-akse et godt mål for hvor store forskyvninger som kan oppstå før brudd inntreffer. Siden avviket ikke er større enn 11 %.

Endring i forsøksparametre gir endring i stabilitet, hvilken akse av steinen som peker inn i dammen har betydning for pakningsfaktoren. Videre resulterer en høyere pakningsfaktor i

lavere kritisk Froudetall. I b-forsøkene der 10 % av steinene ikke har lengste akse inn i dammen tåler plastringen mindre belastning enn for a-forsøkene. Damsikkerhetsforskriften krever at stein skal plasseres med fall og lengderetning innover i dammen, lengderetning tolkes som a-aksen. I forskriften er det ikke spesifisert om dette gjelder for alle steiner eller kun et utvalg. Utførte forsøk gir grunnlag for å konkludere med at forskyvninger i plastringen under hydraulisk belastning er avhengig av plastringsmetode.

Analyse av målepunktene i b-forsøkene viser at steinene plassert med b-akse inn forskyves i samme grad som målesteinene. Forskyvningen er størst for steiner lagt nærmest damkrona. For b-forsøkene som ble gjennomført, var det vanskelig å plassere målepunktet på samme sted for de to forsøkene. Dette gjør det vanskelig å sammenligne de to resultatene siden målepunktet er plassert forskjellig.

Ved høy plastringstetthet er steinene pakket tettere, og tilgjengelig forskyvningslengde blir mindre. Bruddvannføringen er avhengig av plastringstettheten til plastringen. Ved å bestemme steinstørrelsen utfra hvilken plastringstetthet det er mulig å oppnå, vil stabilitet sikres ved en eventuell overtopping.

Det er kun forsøkene med samme belastningsmønster som er direkte sammenlignbare. Utfra bruddvannføring og ved å studere det totale vannvolumet ved overtopping kan likevel den mest stabile plastringen bestemmes.

8.5 Belastningstid

Forskyvning utvikler seg over tid og virkningen av belastningstid er derfor undersøkt. Det er kun gjennomført ett forsøk med kortere belastningstid på 30 minutter. Resultatene fra forsøk 2^a sammenlignet med de resterende forsøkene viser at ved kortere belastningstid blir bruddvannføringen høyere, plastringstettheten er også høyere enn for forsøk 1^a hvilket indikerer at plastringen er mer motstandsdyktig mot overtopping. Samtidig er den totale mengden vann som strømmer over dammen ved overtopping mindre.

8.6 Erfaring

Forsøkene viser at ettersom utførende plastrer blir mer erfarne, blir plastringen sterkere og tåler mer før brudd. For forsøk 1^a, 2^a og 5^a er det en markant økning i plastringstettheten fra de første forsøkene til det siste, ved høyere plastringstetthet blir også det kritiske steinbaserte Froudetallet høyere fordi plastringen har høyere bruddvannføring. Erfaring med plastring spiller en vesentlig rolle, derfor er det av betydning hvem som utfører jobben. Til

sammenligning forteller entreprenøren at det også er slik for plastring i felt. Plastring med gravemaskin kan ikke direkte sammenlignes med plastring utført for hånd i forsøksmodell, men entreprenøren peker på at alle plastrere utvikler sin egen teknikk. Erfaring fra anlegg tilsier at kvaliteten på plastringen blir bedre med årene, ettersom maskinføreren blir flinkere. En god plastring bygger på erfaring, noe det også stilles krav til i dam sikkerhetsforskriften. Erfaring ses på som en viktig faktor for et godt resultat og det er viktig at dette følges opp.

8.7 Bruddmekanismer

Steiner som ikke lenger er i kontakt med hverandre begynner å vibrere og vil kunne erodere ut av plastringen. Vibrasjonen av steinene oppstår som følge av dragkraften fra vannet som strømmer over steinene. Arealet som er utsatt for drag øker, noe som gjør dragkraften større. De drivende kreftene blir etterhvert som vannføringen øker større enn de stabiliserende, og dermed kan steinene eroderes ut av plastringen. Vannhastigheten er større i skråningen enn ved damkronen, noe som gjør løftekraften der større. Når steinene ikke lenger har innbyrdes kontakt, løftes steinen opp og forsvinner med vannet

Bruddvannføringen avhenger av hvor tett plastringen er utført. Gjentatte forsøk viser at ved lav pakningsfaktor, tettere pakning tåler plastringen høyere bruddvannføring. Analyse av bruddmekanismer viser at brudd oppstår ettersom glippen i knekkpunktet til damkronen blir større, der er det ikke luftinnblanding i strømmingen og kritisk strømning oppstår med Froudetall $F_r = 1$. På grunn av forskyvningene som oppstår i damkronen, komprimeres plastringen lenger ned. Når plastringen skyves ned, kan enkelte steiner presses opp i z-retning. Dette bidrar til svakere plastring og brudd kan oppstå.

Bruddmekanismen påvirkes ikke i stor grad av plastringsmetoden. Forsøkene har samme bruddmekanisme uavhengig av plastring, for forsøk 2^a, 3^b og 4^b. Dette kan ha sammenheng med at plastring i damkronen er utført likt for alle forsøk, slik at øverste del av plastring av den grunn ikke er svakere.

8.8 Sammenligning med tidligere forsøk

Det er tidligere utført flere forsøk ved NTNU, det er mest relevant å sammenligne med den nyeste forskningen på området. Sammenligning med Hiller (2017) sine resultater er vist i tabell 14. Fra forsøkene til Hiller er det valgt å plukke ut de utført med $L_s = 1,8$ m.

Tabell 14 – Sammenligning, $L_s = 1,8 \text{ m}$.

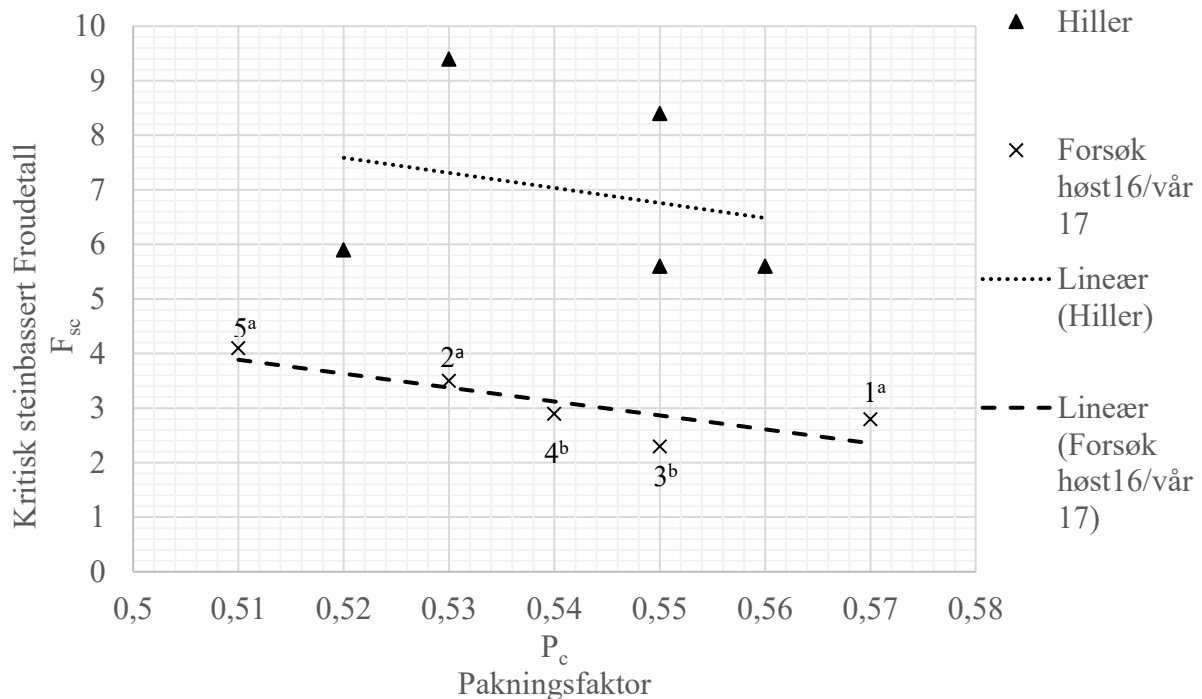
		P_c	$q_c \text{ [m}^2/\text{s]}$	$F_{s,c}$
Hiller	P01	0,56	0,24	5,6
	P02	0,55	0,36	8,4
	P03	0,52	0,25	5,9
	P04	0,53	0,40	9,4
	P08	0,55	0,24	5,6
	D02	1,05	0,04	1,2
Forsøk utført høst16/vår17	Forsøk 1 ^a	0,57	0,12	2,8
	Forsøk 2 ^a	0,53	0,15	3,5
	Forsøk 3 ^b	0,55	0,10	2,3
	Forsøk 4 ^b	0,54	0,125	2,9
	Forsøk 5 ^a	0,51	0,175	4,1

P står for plastringforsøk og D står for «dumped», rauset steinsikring. Generelt er plastringen til Hiller mer stabil på grunn av høyere bruddvannføring. Resultatene ligger i samme intervall for pakningsfaktor, men bruddvannføringen er klart høyere. Variasjon i P_c for forsøk utført utført av Hiller er 7 %.

Forsøkene med rauset steinsikring er svakere enn forsøkene der utvalgte steiner ikke ligger med lengste akse inn. Under forsøket D02 med rauset steinsikring ble ikke markørsteiner benyttet, dermed finnes det ingen data å sammenligne forskyvningene med. Bruddvannføring er registrert på 40 l/s/m, noe som er vesentlig lavere enn for forsøkene 3^b og 4^b.

Resultatene fra modellforsøkene utført i denne oppgaven indikerer at plastring lagt med innbyrdes låsende mønster har et 3,4 ganger høyere kritisk steinbasert Froudetall, i forhold til Hiller sine for modellforsøk med plastring som er gitt å være sju ganger sterkere enn rauset steinsikring.

Figur 27 gir sammenheng mellom pakningsfaktor og kritisk steinbasert Froudetall. Forsøkene utført i denne oppgaven har større grad av sammenheng, illustrert med trendlinje. Trendlinjen for forsøk utført høst16/17 viser at b-akse forsøkene ligger i underkant av trenden for forsøkene. Plastringen blir sterkere med høyere plastringstetthet



Figur 27 – Sammenheng pakningsfaktor og kritisk steinbassert Froudetall for Hiller og utførte forsøk

Fra analysen av utvalgte dammer fra kartleggingsrapporten varierer pakningsfaktor for klasse 4 og 3 mellom 0,58 og 0,77, hvilket gir en variasjon på 32 %. Dette er en mye høyere variasjon enn det som oppnås ved modellforsøk. Det kan være ulike grunner til dette, forskjeller i plastring med gravemaskin kontra å legge steiner for hånd, helning på stein og steinstørrelse.

8.9 Feilkilder

Metoden for å måle lengden av aksene i kartleggingsrapporten er ikke helt nøyaktig fordi det er vanskeligheter knyttet til måling av lengde av aksene på steinen inne i plastring, det er vanskelig å komme til på grunn av omliggende steiner.

Plastringen i laboratoriet ble ikke kontrollert av eksterne under bygging, kun utførende plaster var ansvarlig for kontroll. Med ekstern kontroll er det grunn til å tro at plastringen kunne vært mer stabil.

Modellen har en liten lekkasje langs sidene og nederst i damtåa. Lekkasjen er forsøkt tettet, men er anslått å ikke ha påvirkning på forskyvningsresultatene.

Ved bestemmelse av pakningstetthet telles alle steiner som er brukt i forsøk ut fra bilde, her kan det oppstå tellefeil og kameravinkelen har mye å si for hvor lett det er å få telt alle steinene.

For å gjennomføre målingene utført under forsøk kreves det to personer, ettersom flere personer har vært involvert i avlesning av forskyvning av punkter er det knyttet usikkerhet til disse målingene. Det er også knyttet usikkerhet til hvor nøyaktig plassering av laseren for innmålingen er, her vil det oppstå variasjon i de forskjellige målingene.

Dersom alle forsøkene hadde vært gjennomført med eksakt samme vannføringsmønster, slik at antall trinn vannføringen øker hadde vært det samme, er en sammenligning mer absolutt. Det ville vært lettere å peke på forskjellene fra de ulike forsøkene. Videre kan forskjell i belastningsmønster gi utslag på plastringsteinens forskyvningsforløp og styrke.

9 Konklusjon

Det er flere praktiske forhold som ligger til grunn for bestemmelse av steinstørrelse brukt i plastring. Berggrunnen rundt dammen er avgjørende for kvaliteten på plastringsteinene, og vil også ha innvirkning på steinstørrelsen. Undersøkelse av praktiske forhold med hensyn på steinstørrelse gir avvik fra dimensjonerings grunnlag.

Det er mer presist å bestemme steinstørrelse ut fra vekt enn steindiameter. Steindiameter oppfattes som et dårlig begrep fordi diameter er definert utfra en sirkel og plastringstein vil ikke være formet som en kule. Siden vekt er utgangspunktet for formler som beskriver diameter vil det være fordelaktig å produsere plastringstein med utgangspunkt i vekt. Ved å gjennomføre veiing av enkelte steiner på anlegg vil anbefalingen om vekt være lettere å kontrollere

Det er ikke bare steinstørrelsen som er avgjørende for et godt skråningsvern. Flere faktorer spiller inn, derfor er ikke målemetodene og bestemmelsen av minimum og maksimum diameter etterprøvd eksakt. Formlene til minimum og maksimum steindiameter er anbefalinger, og skal gi en indikasjon på hvor stor stein som kreves for stabilt skråningsvern. Entreprenøren er mer opptatt av volumet, fordi det er lettere å bestemme ved sprengning. Anbefalte ligning for minimum steindiameter fra fyllingsdammer burde fornyes på bakgrunn av manglete definisjon av steindiameter.

Forsøk der alle stein har a-aksen inn representerer ikke alltid plastring slik det utføres på anlegg. Analyse av kartleggingsdata peker på at b-aksen ligger inn i 10 % av de kartlagte dammene. Resultatet i denne oppgaven indikerer at dette gjør plastringen svakere. Det konkluderes derfor med at hvordan plastringen er lagt i praksis har mye å si for stabiliteten, men det kreves flere forsøk for å bekrefte dette.

Undersøkelse av plastring ved overtopping av damkrone viser at store forskyvninger vil oppstå. Forskyvningene er avhengig av pakningsfaktor, vannføring og belastningstid. Tett pakning øker stabiliteten av plastringen og reduserer potensielle forskyvninger. Ved å ikke legge alle steiner med lengste akse inn i dammen, reduseres stabiliteten til plastringen

Observerte bruddmekanisme er den samme som beskrevet av Hiller (2017), ved forskyvning i x-retning på en steinlengde går plastringen til brudd. Videre viser analyse av bruddmekanisme

at forskyvning i z-retning påvirker bruddet. Ved forskyvning i overgang mellom damkrone og plastring presses steinene opp av plastring og brudd oppstår.

9.1 Forslag til videre arbeid

Siden kun et fåtall av rådgivere og entreprenører hadde mulighet til å svare på utsendte spørsmål, ville det være hensiktsmessig å kontakte flere i bransjen for å skaffe et større grunnlag for hvilke praktiske forhold som er av betydning ved plastring. Ved å hente inn mer informasjon fra bransjen vil det være mulig å utarbeide en bedre beskrivelse av hvordan praktiske forhold på stedet gir avvik fra teoretiske bestemmelser.

I de gjennomførte forsøkene er det kun studert nedstrøms skråningsvern. Det er av interesse å bygge dammer i samme skala med støttefylling for å undersøke påvirkningen dette har på skråningsvernet. Til videre arbeid burde stabiliteten av damtå for nedstrøms plastring undersøkes. I utførte forsøk er damtåen sikret med en rist, en utglidning i damtå pekes på som en mulig bruddmekanisme i litteraturen og fra modellforsøk, burde derfor inkluderes en stabilitetsvurdering av skråningsvern.

For videre forsøk kunne det vært interessant å generere en overtopping som følge av skred i magasin, bølgeovertopping. Samt gjennomføre flere forsøk for å sammenligne virkningen av b-aksen med fall inn i dammen.

Referanser

Basberg, L. (2016) *Platring av fyllingsdammer (Plaf)*. Tilgjengelig fra: <https://www.energinorge.no/energiforskning/fornybar-energiproduksjon/vannkraft/dam/platring-av-fyllingsdammer/> (Hentet: 12. oktober 2016).

Blodgett, J. C. og McConaughy, C. E. (1986) *Rock riprap design for protection of stream channels near highway structures; Volume 2, Evaluation of riprap design procedures*. U. S. Geological Survey, [Reston, VA], United States.

Bogfjellmo, E. (2013) Nedstrøms skråning av steinfyllingsdammer – Analyse av eksisterende plastringer.

Bunte, K. og Abt, S. R. (2001) *Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring*. U. S. Depart. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO, United States.

De Gregorio, V. P., *et al.* (2014) Placement, porosity and randomness of cube and Cubipod armor layers, i *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. American Society of Civil Engineers.

Direktoratet for byggkvalitet (2016) § 9-3. *Fastsettelse av tiltaksklasser*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/no/byggeregler/sak/3/9/9-3/> (Hentet: 02/05 2017).

Dornack, S. (2001) *Überströmbare Dämme - Beitrag zur Bemessung von Deckwerken aus Bruchsteinen*, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.

EBL Kompetanse (2005) Stability and breaching of embankment dams, *Publikasjon nr.186-2005*.

Heller, V. (2011) Scale effects in physical hydraulic engineering models, *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), s. 293-306.

Hiller, P. H. (2016) *Kartlegging av plastring på nedstrøms skråning av fyllingsdammer*. NTNU: Institutt for vann- og miljøteknikk.

Hiller, P. H. (2017) *Riprap design on the downstream slopes of rockfill dams*, Faculty of Engineering. Norwegian University of Science and Technology.

Hiller Priska H, Aberle Jochen og Lia Leif (2016) *Displacements as failure origin of placed riprap on steep slopes*. Journal of Hydraulic Research.

Hudson, R. (1958) *Design of Quarry-Stone Cover Layers for Rubble-Mound Breakwaters*. DTIC Document.

Huuse-Røneid, Ø. (2016) *Dam Hundålvatn - teknisk plan*. (Sweco Norge AS for Helgeland Kraft AS). Rapport 585631-001-A01.

Jakobsen, J. (2015) *Plastring av fyllingsdammer-forskyving i plastring og anvendelse av Smartstone sensorer*.

Jirka, G. H. (2007) *Einführung in die Hydromechanik*. KIT Scientific Publishing.

Johannessen, F. og Yugsi Molina, F. (2016) *Adkomstveg Hundålvatn skredfarevurdering* (Sweco Norge AS for Helgeland Kraft AS). Rapport 585631-R02-A02.

Kjærnsli, B., Valstad, T. og Höeg, K. (1992) *Rockfill Dams - Design and Construction*. Tapir, Trondheim: Norwegian Institute of Technology, Division of Hydraulic Engineering.

Kvist Kjetil (2009) *Norsk vassdragstilsyn 1909-2009*. Oslo: Norges vassdrags-og energidirektorat.

Laan, G. (1981) *The relation between shape and weight of pieces of rock*, Report MAW-R.

Lia, L., et al. (2013) *Rip Rap protection of downstream slopes of rock fill dams-A measure to increase safety in an unpredictable future climate*, i *9th ICOLD European Club Symposium, Venice, Italy*.

Linford, A. og Saunders, D. (1967) *A hydraulic investigation of through and overflow rockfill dams*. British Hydromechanics Research Association.

NGI (1983) *Fyllingsdammer*. Norges geotekniske institutt.

NGU (2017) *Kart og data*. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/minkommune/?kommunenr=1824> (Hentet: 19. januar 2017).

Nicolaisen, B., Larsen, S. og Daleng, J. (1992) *Prosjekt damsikkerhet - Overtopping av tetningskjernen i fyllingsdammer*. Norges geotekniske institutt, Sintef NHL.

NVE (1981) *Forskrift for dammer, del II Regler og anbefalinger*. Larvik: Universitetsforlaget.

- NVE (2010) *Vassdragshåndboka*. 2. utg. Bergen: Fagbokforlaget Vigmostad & Bjørke AS.
- NVE (2012) *Veileder for fyllingsdammer*. Oslo: NVE.
- OED (2001) *Lov om vassdrag og grunnvann (vannressursloven)*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2000-11-24-82>.
- OED (2009) *Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (Damsikkerhetsforskriften)*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-12-18-1600>.
- Olivier, H. (1967) Through and overflow rockfill dams - new design techniques, *Institution of Civil Engineers*, Paper No. 7012.
- Pettersen, E. H. (2015) Plastring av fyllingsdammer-Effekt av forband på styrken av plastringen.
- Platzer, G. (1983) Die Hydraulik der breiten Blocksteinrampe - 1. Teil, *Sonderheft der Bundesanstalt für Wasserbauversuche und hydrometrische Prüfung*.
- Rock Manual (2007) *The Rock Manual: The use of rock in hydraulic engineering*. London: Ciria.
- Société d'énergie de la Baie James (1997) Practical Guide. Riprap Sizing.
- Thomsen, A. L., Wohlt, P. E. og Harrison, A. S. (1972) *Riprap Stability on Earth Embankments Tested in Large-and Small-Scale Wave Tanks*. DTIC Document.
- Veslegard, G. H. (2016) Plastring av fyllingsdammer - Forskyvning i plastring.
- Znigg, T. (1935) *Beitrag zur Schotteranalyse*, Eidgenössischen Technischen Hochschule. ETH

Innholdsliste vedlegg

Vedlegg 1 – Spørsmål til bransjen	ii
Vedlegg 2 – Forsøk 1 ^a – 11.11.16	iii
Forsøkslogg	vii
Vedlegg 3 – Forsøk 2 ^a – 20.02.17	ix
Forsøkslogg	xiii
Vedlegg 4 – Forsøk 3 ^b – 06.03.17	xv
Forsøkslogg	xx
Vedlegg 5 – Forsøk 4 ^b – 23.03.17	xxii
Forsøkslogg	xxvii
Vedlegg 6 – Forsøk 5 ^a – 03.04.17	xxix
Forsøkslogg	xxxiii
Vedlegg 7 – Elektroniske vedlegg	xxxvi

Vedlegg 1 – Spørsmål til bransjen

I min masteroppgave skal jeg blant annet undersøke praktiske forhold med hensyn til steinstørrelse. Jeg ønsker å finne ut mer om praktiske erfaringer fra plastring av store fyllingsdammer fra seinere år, og sammenligne "optimal design" utfra teori, med optimal steinstørrelse for de som skal gjøre jobben med å produsere og legge plastringstein.

På bakgrunn av dette har jeg noen generelle spørsmål, jeg ønsker å få svar på

1. Hvordan blir steinstørrelse kontrollert på anleggsplassen?

- Utfra minste målte dimensjon av stein?
- Utfra dimensjonene a, b og c, (lengste, middel og minste dimensjon) med følgende formel $D_{min} = (a+b+c)/3$
- Utfra dimensjonene a, b og c, (lengste, middel og minste dimensjon) med følgende formel $D_{min} = \sqrt[3]{a \times b \times c}$, der $a/c < 3$
- Annet?
- Vennligst gi eksempel på damanlegg hvis mulig?

2. Har steinstørrelse av enkeltstein alltid vært kontrollert på den samme måte?

- Har det vært endringer i kontrollering av steinstørrelse ettersom damsikkerhetsforskriften/veileder for fyllingsdammer har blitt oppdatert?

3. Hva med bakgrunnen for valg av steinstørrelse?

- Ofte er det avvik fra NVEs veileder, hva er årsaken til dette?
- Tenkes det fram i tid, dersom det blir oppgradering av dammens klasse, slik at steinstørrelse for dam i klasse N (N=1, 2, eller 3) oppfyller krav for steinstørrelse for dam i klasse (N+1)?
- Vennligst gi eksempel på damanlegg hvis mulig?

4. Kan praktiske forhold på stedet ha effekt på valg av steinstørrelse?

- Ingeniørgeologiske forhold? Plassering av steinbrudd?
- Kostnader ved uttak av stein ha effekt på valg av steinstørrelse
- Vennligst gi eksempel på damanlegg hvis mulig?

5. Andre praktiske erfaringer vedrørende plastring som kunne være av interesse?

- Vennligst gi eksempel på damanlegg hvis mulig?

Vedlegg 2- Forsøk 1^a – 11.11.16

Forsøk 1^a ble bygget over to dager 2. og 3. november. Bestående av 100 mm tykt filterlag under plastringen, steinene ble lagt med helning 60° og kronsteinene forsøkt lagt med helning 90°. Alle steiner ble langt med a-akse inn. Legging av selve plastringen tok ca. 7 timer.

Plassering av markørsteiner var den samme som for tidligere forsøk utført ved NTNU og markert med gult. Se figur 2-1.



Figur 2-1 - Plastring før start

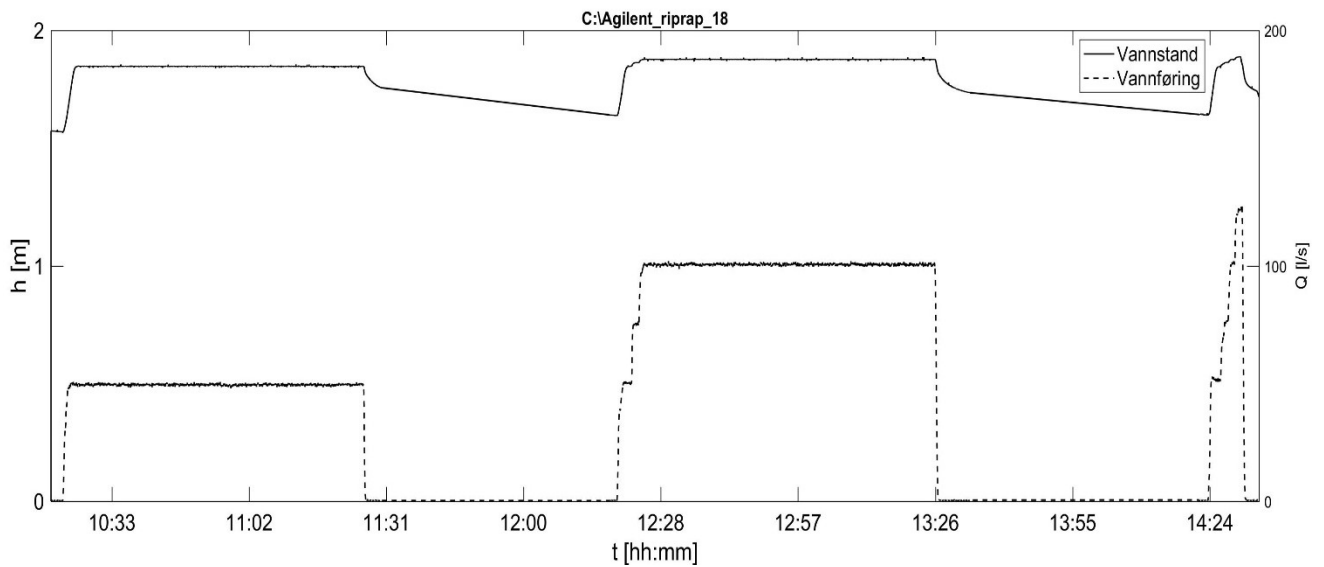
Første vannføring var på 50 l/s/m og belastningstid 1 time. Måler store forskyvninger etter første vannføring. Vannføringen økes til 100 l/s/m. Etter en times belastning med 100 l/s/m er forskyvingene blitt over en steinlengde, det forventes brudd ved økning av vannføring. Vannføringen økes til 125 l/s/m, etter noen minutters belastning går plastringen til brudd som forventet.

Tabell 2-1 - Antall steiner i renne

Vannføring [l/s/m]	Antall steiner i renne
50	-
100	

Tabell 2-2 - Vannføring og belastningstid

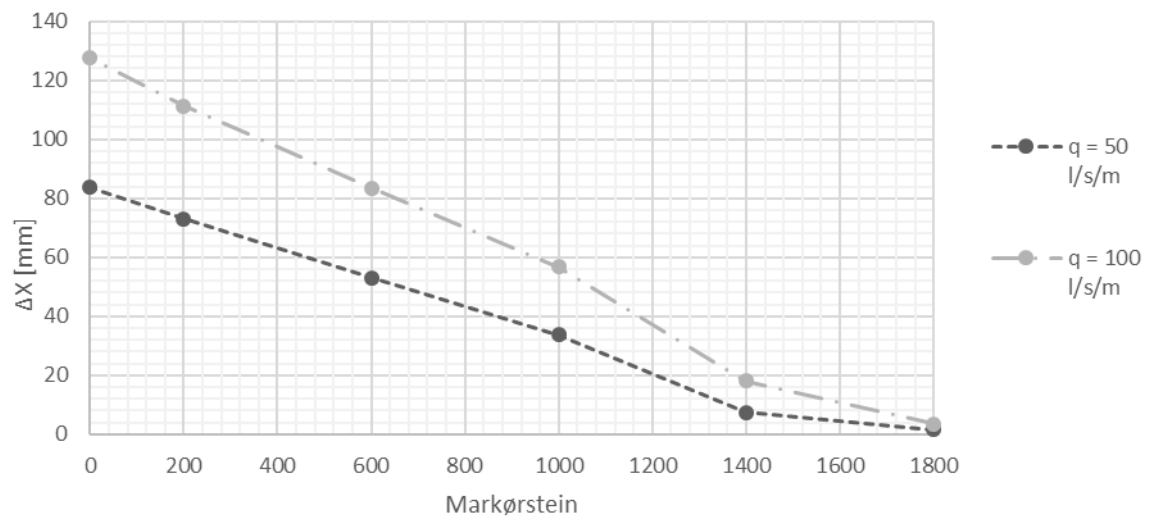
q_{prototyp} , [m ³ /s/m]	Tid [h]
1,6	3,2
2,4	3,2



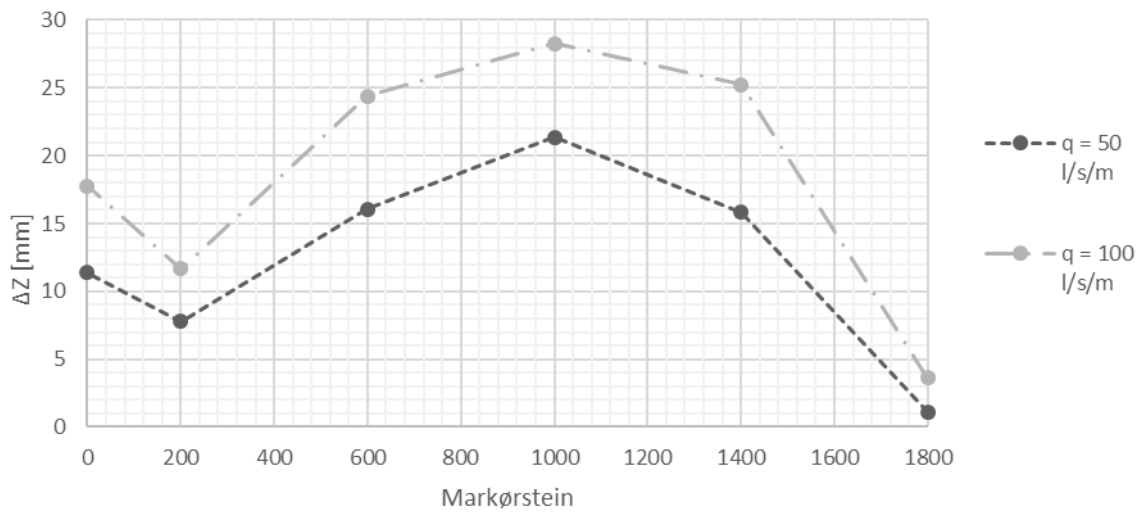
Figur 2-2 – Vannføring og vannstand



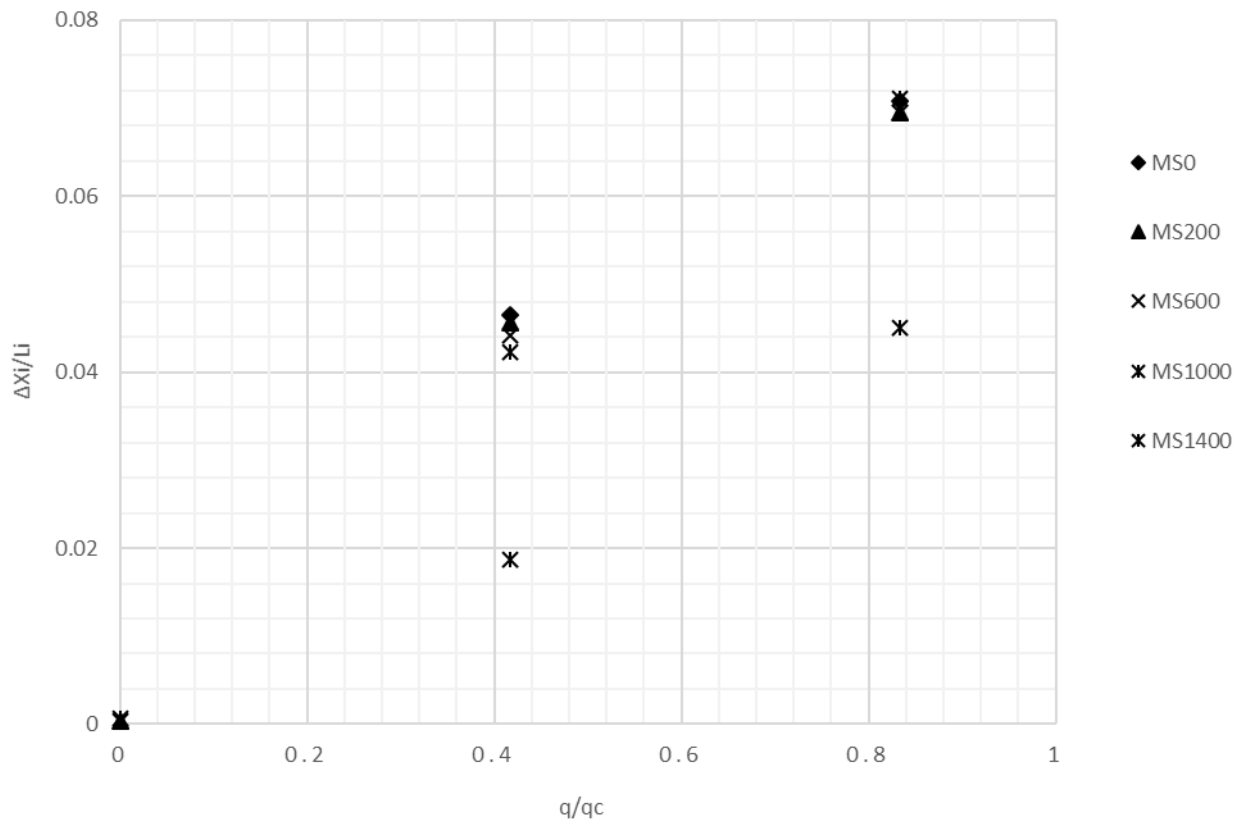
Figur 2-3 - Forskyvninger etter vannføring 100 l/s/m



Figur 2-4 – x-forskyvninger



Figur2- 5 - Forskyvninger i z-retning



Figur 2-6 - Dimensjonsløs framstilling av x-forskyvninger

Forsøkslogg

Riprap18 - 11.11.2016
PHH, GV

Tid	Logg	Filer
8:25	Stille klokke på videokamera	
8:32	Byttet batteri på Disto laseren	
8:35	Lyssetting, 3 lamper	
8:46	Stiller klokke på kamera til PHH	
8:46	Tar bilde av plastring	
8:52	Åpnet Agilent og lastet config file (opprinnelig 150429riprap6, oppdatert navn)	161111_riprap18.xml
9:08	Lyssetting til kamera, utsiden av renne, vil unngå skygge og lysrefleks fra glasset	
9:30	Innmåling av steiner, tom boks	
9:40	Laserscann ved y=540mm	161111_940_Scan_Riprap_emphybox
9:51	Lukker bypass	
9:51	Pumper på, 100 l	
10:09	Innmåling av steiner, full boks	
10:10	Laserscann	161111_1010_scan_riprap_fullbox
10:20	Agilent på med 10 Hz	
10:20	Skru på kamera	
10:21	Oppdaterer skilt	
10:21	Skrur på vann	
	Flere steiner beveget seg litt, da overtopping startet	
10:26	Starter på 1 time med 50 l/s	
10:29	Tydelige forskyvninger i toppen av plastring	
11:20	Bilderunde	
11:26	Skrur av vann	
11:29	Ingen steiner i renna	
11:30	Slår av Agilent	
11:30	Innmåling av steiner	
11:50	ProNC gått i lås, skrur av og på systemet. Reference run	
12:10	Laserscan ved y=540 mm	
12:13	Bilderunde	
12:15	Oppdaterer skilt fra 50 til 100 l/s	
12:16	Skru på pumpe 200 l/s	
12:17	Starter Agilent	
12:18	Video på	
12:19	Vann på igjen 50 l/s (målet er 100 l/s)	
12:23	Øker til 75 l/s	
12:24	Øker til 100 l/s	

12:26	Start på 60 min	
12:28	Stein vibrerer i knekkpunkt på krona, liftkraft på stein. Steinen ligger ikke i kontakt med andre steiner	
12:30	Bilderunde	
12:31	Glipe har blitt større, bilde PHH	
12:40	En stein løsner og en til	
12:43	Bilderunde	
13:14	Bilderunde PHH	
13:26	Skrur av vann	
13:27	Slår av kamera, noe rart med kamera på utsiden av renne. Må bytte batteri	
13:33	Stopper Agilent	
13:34	Bilderunde, Fem steiner i renna. Større forskyvninger i topp av plastring Ser ut som plastringen buler litt ut på midten	
13:39	PHH plukker opp fem steiner fra renne	
13:40	Innmåling av steiner	
14:06	Bilderunde	
14:10	Oppdatert skilt	
14:10	Kopperstripe ved $x=200$ på vinduet begynner å løsne. Ikke så mye å gjøre med akkurat nå.	bilde
14:21	Slå på Agilent	
14:22	Slå på Videokamera	
14:23	Vannføring først 50, 100 \rightarrow 125 l/s	
14:29	Øker til 125	
14:30	Brudd	
14:32	Vann av	
14:32	Skru av kamera	
14:34	Stopper Agilent	
14:34	Bilderunde	
14:35	Skrur av pumpe	
14:37	Skrur av laser	
14:42	Overfører data	

Vedlegg 3 – Forsøk 2^a – 20.02.17

Plastringen ble påbegynt 15. februar og avsluttet 16. februar. 100 mm filterlag under plastringen, steinene ble lagt med helning 60° og kronesteinene forsøkt lagt med helning 90°. Å legge plastringen tok ca. 5 timer. Noe hulrom mellom steinene i plastringen ble observert.



Figur 3-1 - Plastring før forsøk

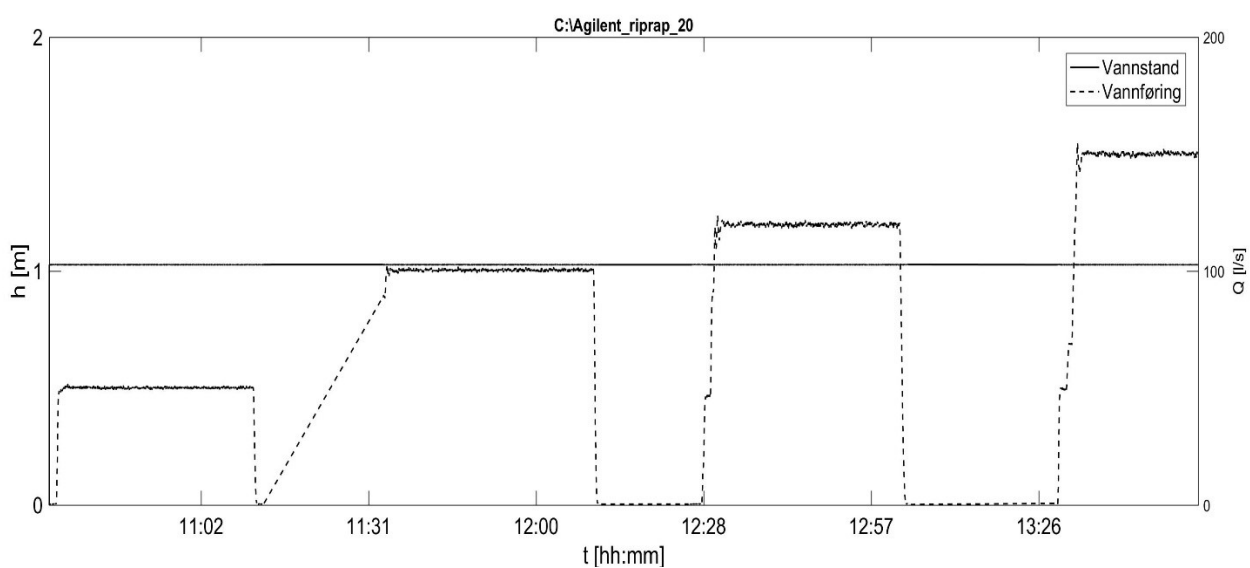
Første vannføring 50 l/s/m med belastningstid 30 min. Økning til vannføring til 100 l/s/m, deretter 120 l/s/m brudd ved 150 l/s/m.

Tabell 3-1 - Antall steiner i renne

Vannføring [l/s/m]	Antall steiner i renne
50	-
100	6
120	12

Tabell 3-2 - Vannføring og belastningstid i prototyp

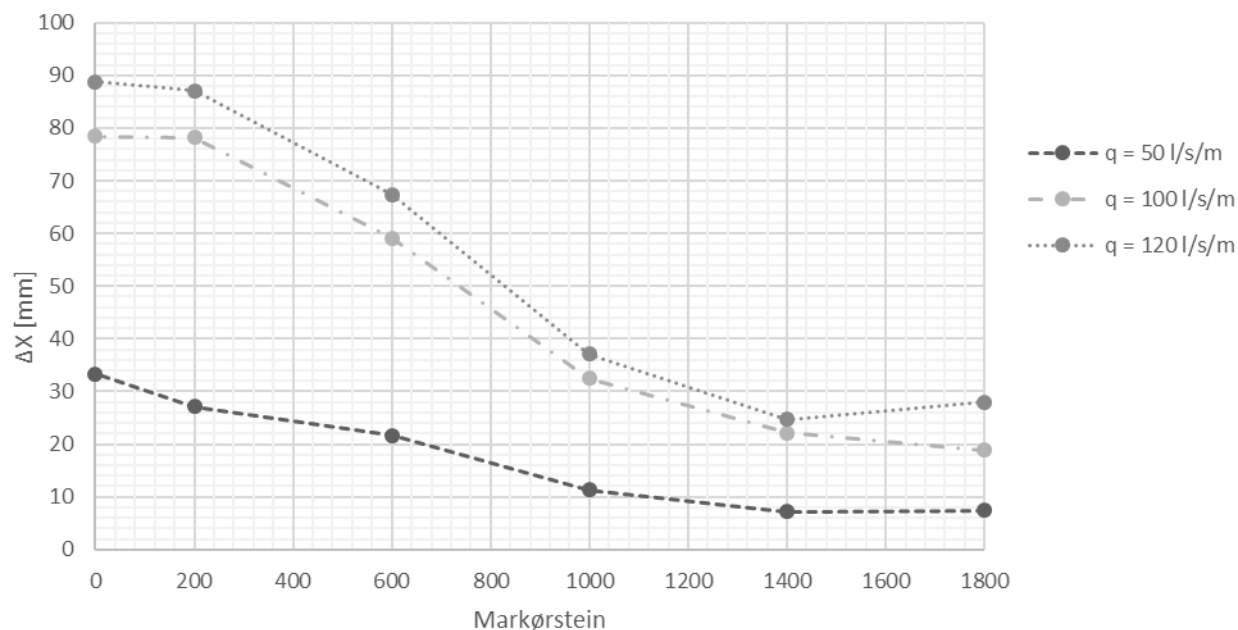
q_{prototyp} , [m ³ /s/m]	Tid [h]
1,6	8,9
3,2	8,9
3,8	8,9
4,7	-



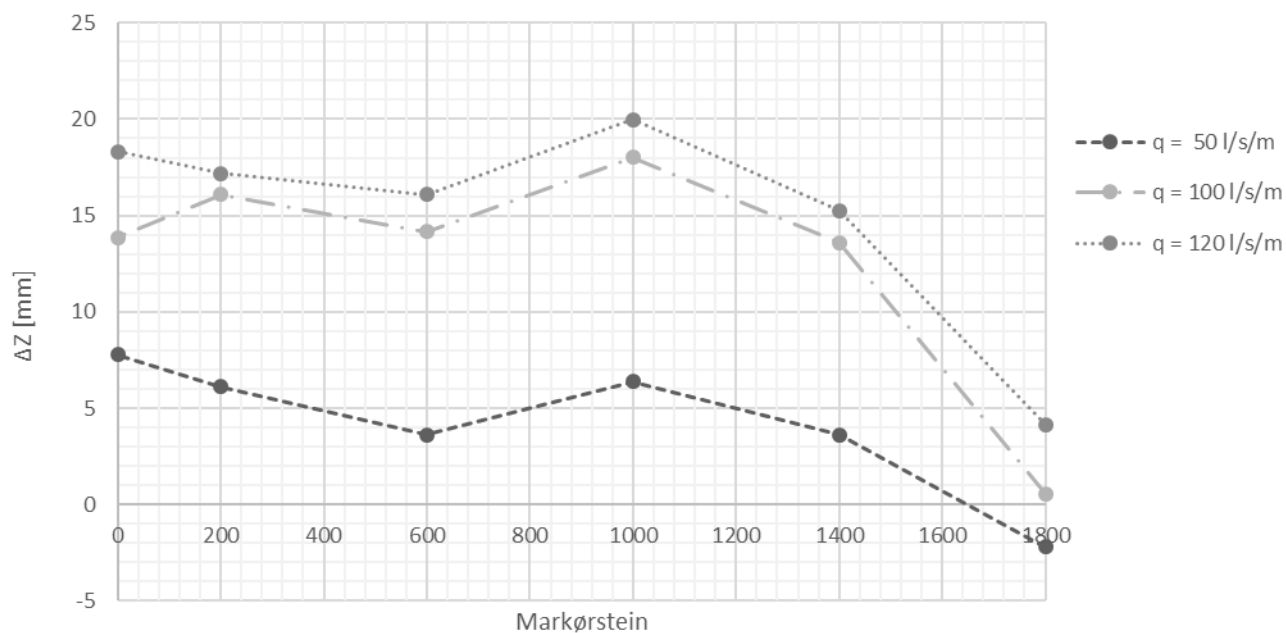
Figur 3-2 - Forsøkskjøring

Grunnet feil med strømforskyvningen til vannstandsmåleren ble vannstanden ikke logget, ingen andre forsøk ble kjørt i samme tidsrom i laboratoriet. derfor antas vannstanden å være stabil. Se figur 3-2.

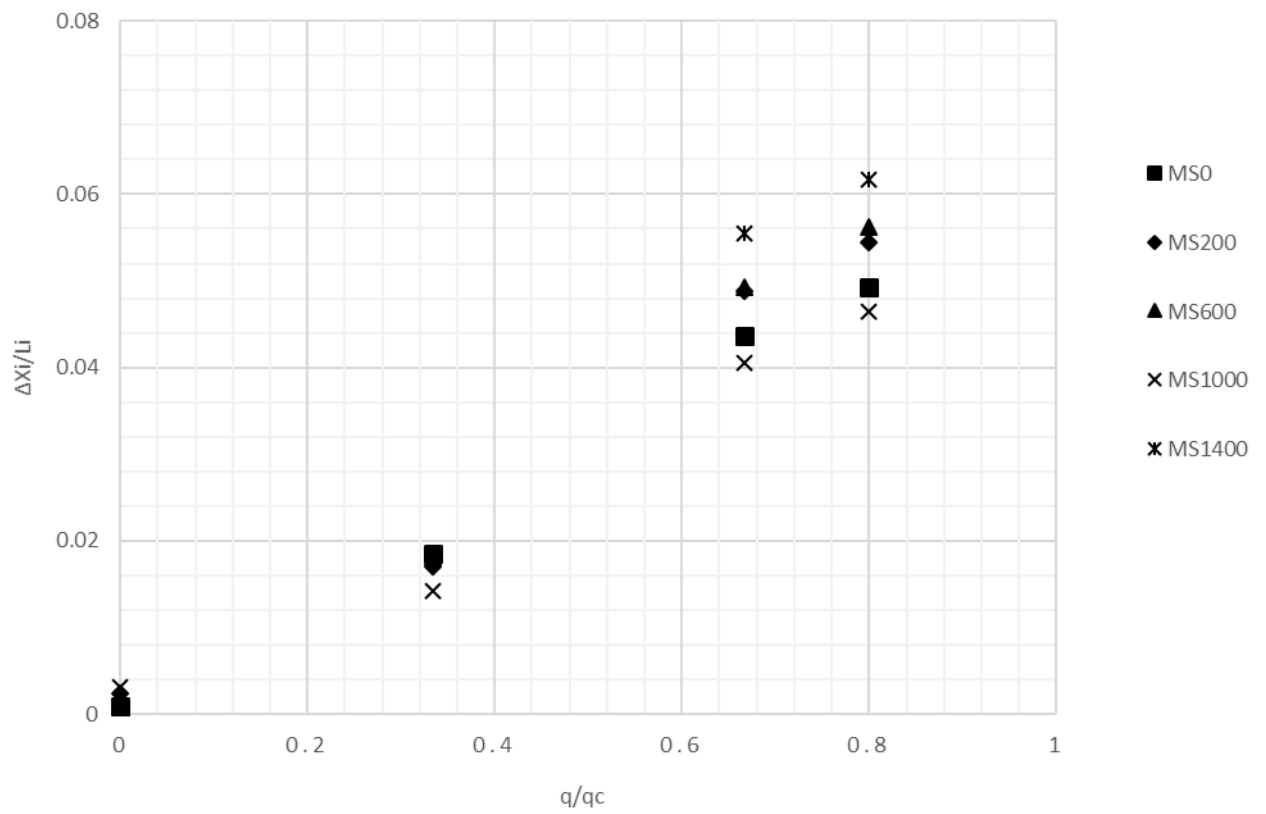
Forskyvningene for markørstein 0, 200, 600, 1000, 1400 og 1800 plottes. Markørstein -200 tas ikke med fordi forskyvningene i damkrone er negative i forhold til de resterende forskyvningene.



Figur 3-3 - Akkumulerte forskyvninger i x-retning for riprap20



Figur 3-4 - Akkumulerte forskyvninger i z-retning for riprap20



Figur 3-5 - Dimensjonsløs sammenligning, forskyvning over tilgjengelig lengde og vannføring over bruddvannføring

Forsøkslogg

Riprap20 - 17.02.2017

GV

Tid	Logg	Filer
8:30	Stille klokke på videokamera	
8:45	Stiller klokke på kamera	
8:50	Lyssetting, 3 lamper	
9:49	Bytte batteri disto laser	Litt oppstarts problemer med travers
9:53	Tar bilde av plastring	
9:57	Åpnet Agilent og lastet config file (opprinnelig 150429riprap6, oppdatert navn)	170217riprap20.xml
9:57	Lyssetting til kamera, utsiden av renne, vil unngå skygge og lysrefleks fra glasset	
9:57	Innmåling av steiner, tom boks	
10:15	Lukker bypass	
9:51	Pumper på, 200 l	
10:12	Innmåling av steiner, full boks	
10:35	Agilent på med 10 Hz	
10:35	Skru på kamera	
10:32	Oppdatere skilt	
10:38	Slår på vann	
	Observerer litt lekkasjer i nedre venstre hjørne	
10:40	Starter på 30 min med 50 l/s	
11:12	Skrur av vann	
11:13	Slår av agilent	
11:13	Slår av kamera	
11:14	Bilderunde	
11:17	Ingen tydelige forskyvninger	
11:17	Ingen steiner i renna	
11:21	Innmåling av steiner	
11:34	Oppdaterer skilt fra 50 til 100 l/s	
11:34	Video på	
11:34	Vann på	
11:35	Øker til 100 l/s	
11:40	30 min	
11:50	Observerer glippe i damkrone	
12:10	Vann av	
12:10	Aglinet av	
12:10	Video av	
12:15	bilderunde	
12:15	Seks steiner i renne	
12:15	Glippe i damkrone	
12:24	Kamera på	

12:26	Agilent på	
12:29	Oppdater skilt	
12:29	Vann på	
12:32	øker til 120 l/s	
12:32	Stein vibrerer i knekkpunkt på krona, liftkraft på stein. Steinen ligger ikke i kontakt med andre steiner	
12:40	Bilderunde	
12:48	Glippe blir større, men ingen vibrering av steiner lenger.	
12:57	bilderunde	
13:02	Vann av	
	Agilent av	
13:04	Video av, bytte batteri på store kamera også lite batteri på lille kamera. Må lades	
13:09	Bilderunde	
13:15	Seks steiner til i renna	
13:16	Scan	
13:30	Vannføring økes til 150 l/s	
13:34	150 l/s	
13:38	Glippe i damkrone fortsatt stor, ingen steiner som vibrerer	
13:55	brudd	
14:00	Vann av	
14:00	Skru av kamera	
14:00	Stopper Agilent	
14:02	Bilderunde	
14:35	Skrur av pumpe	
14:37	Skrur av laser	
14:50	Overfører data	

Vedlegg 4 – Forsøk 3^b – 06.03.17

Plastringen ble bygget 2. mars. På forhånd ble 100 steiner plukket ut, av disse steinene var b-aksen og a-aksen nesten like lang. Hver 10. stein ble plassert med b-aksen inn og merket oransje. Totalt ble 87 steiner plastret med b-akse inn. I damkrone ble alle steiner forsøkt plastret på vanlig måte med a-akse inn og helning 90 grader. Legging av plastring tok ca. 7 timer.

Plassering av markørsteiner var den samme som tidligere og markert med gult. Av de oransje steinene ble sju steiner plukket ut og målt inn med laser, målepunkt (MP)



Figur 4-1 - Plastring før forsøk

Første vannføring 50 l/s belastningstid 1 time. Deretter økes vannføring til 75 l/s belastningstid 1 time

Etter vannføring på 75 l/s i en time, er det en tydelig glippe i plastringen ved damkronen. Akkumulert forskyvning der var 103 mm, hvilket er over en steinlengde. Dermed forventes brudd ved økning av vannføring.

Øker vannføring gradvis til 100 l/s etter noen minutters belastning går plastringen til brudd.

Totalt sett er dette den svakeste plastringen, hvilken har sammenheng med bevisst feilplassering av steiner.

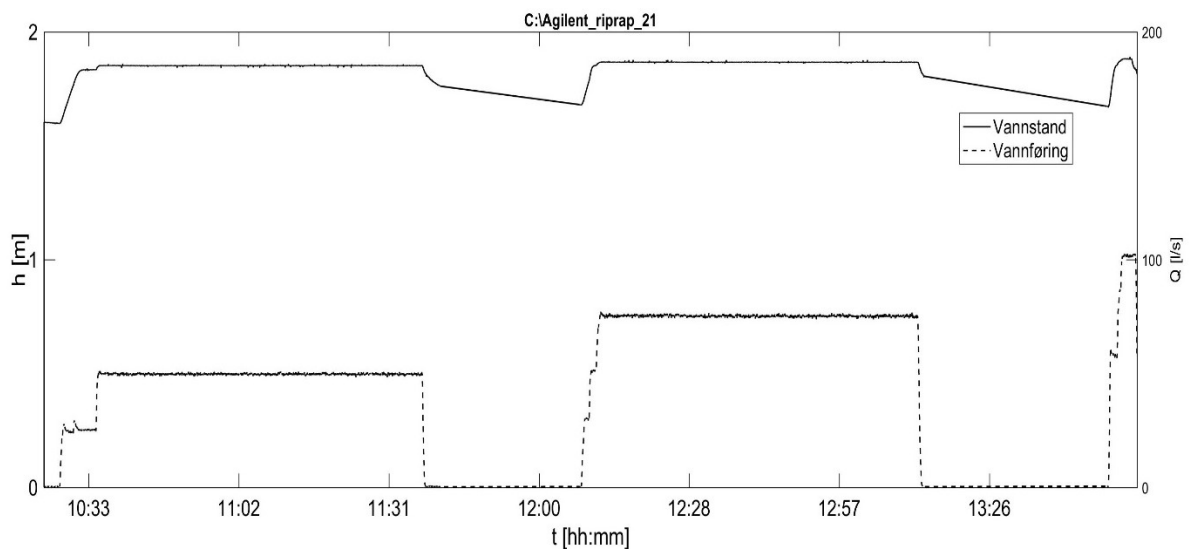
Tabell 4-1 - Antall steiner i renne

Vannføring [l/s/m]	Antall steiner i renne
50	-
75	1

Tabell 4-2 - Vannføring og belastningstid

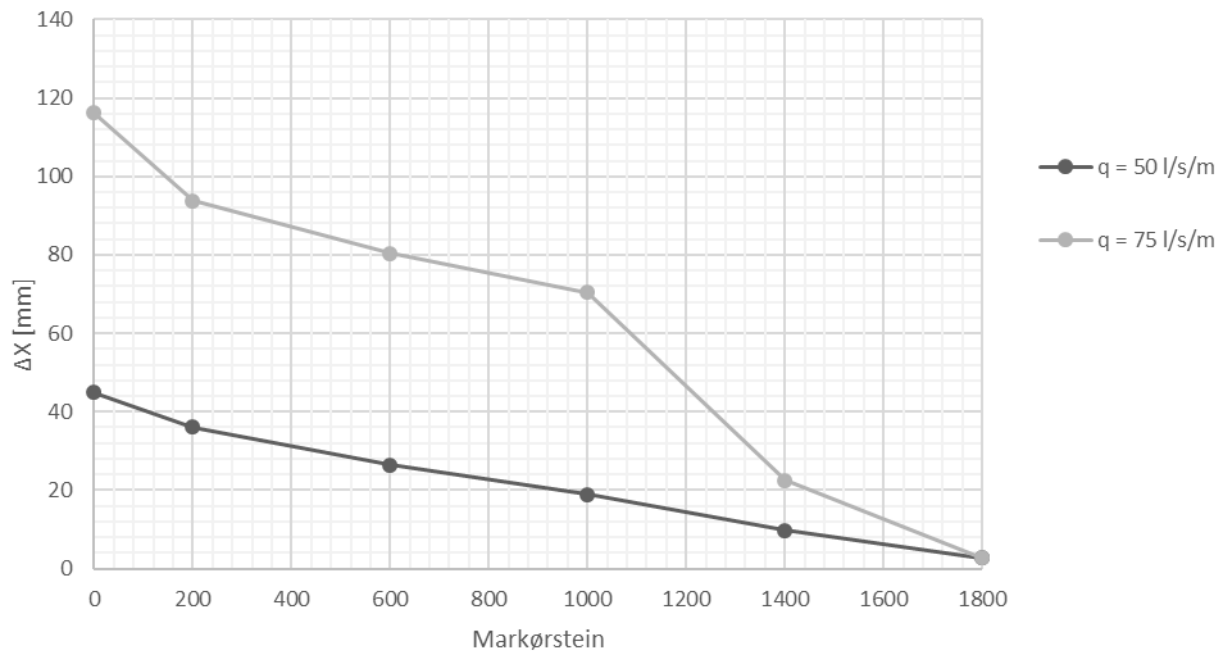
q_{prototyp} , [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]	Tid [h]
1,6	3,2
2,4	3,2
3,2	0,052

Kun en stein i renne før brudd, noe som er veldig lite. Men observerer store forskyvninger som indikerer at brudd vil oppstå etter end kjøring av vannføring på 75 l/s

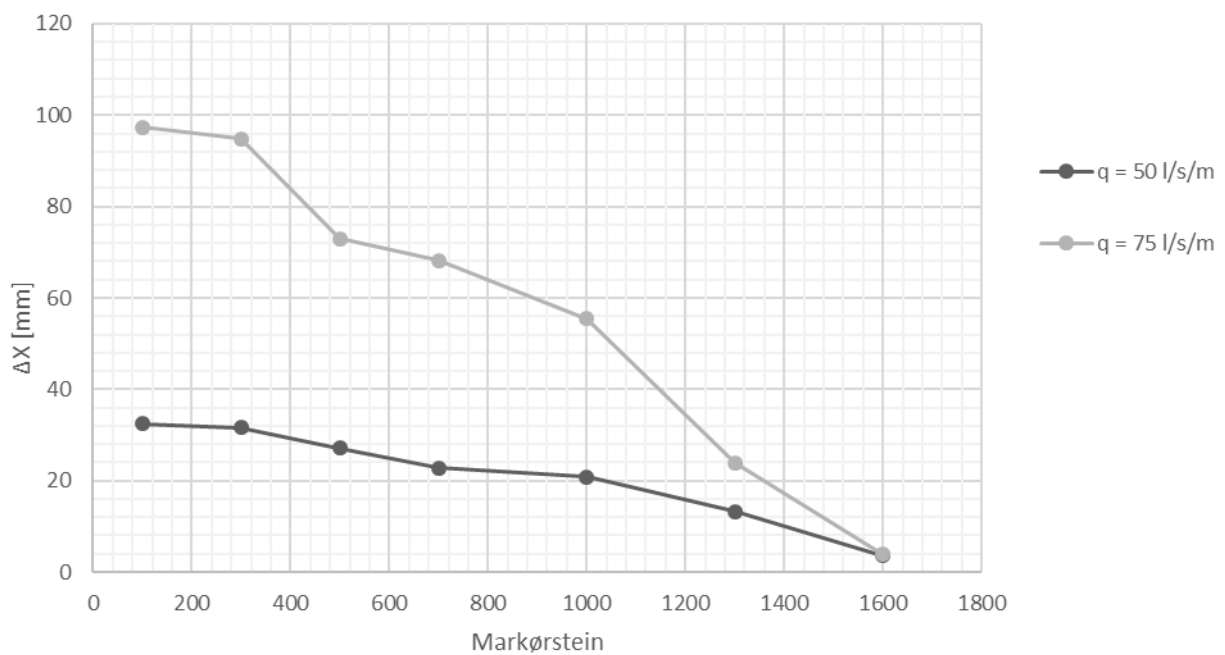


Figur 4-2 - Vannstand og vannføring

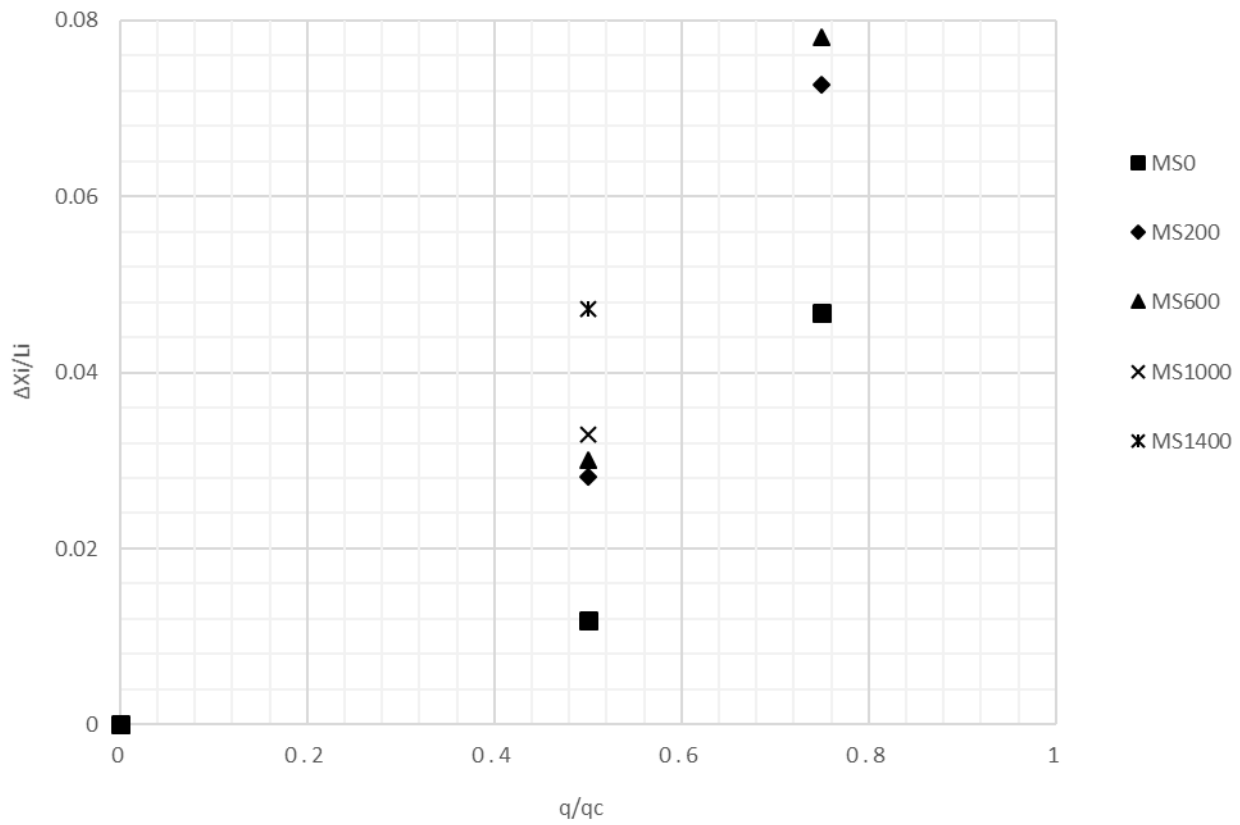
Overgangen skråning damkrone er den delen som er vanskeligst å plastre bra.



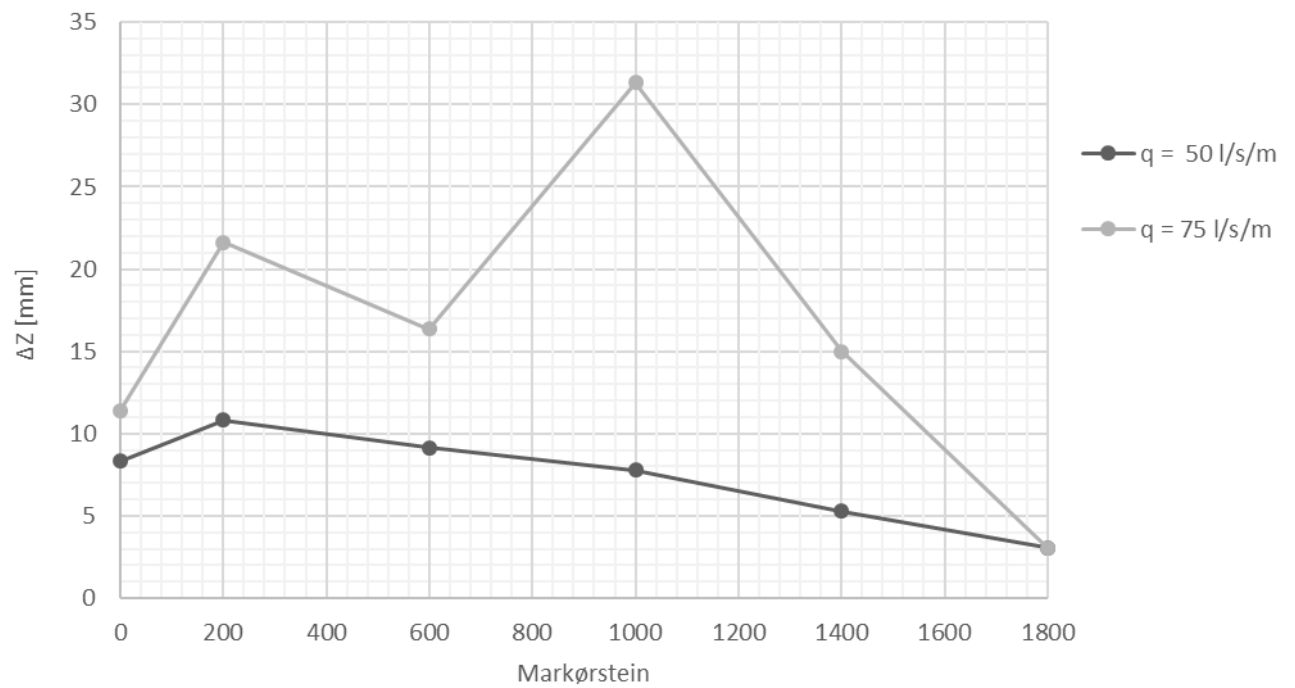
Figur 4-3 - Forskyvning av gule markørsteiner



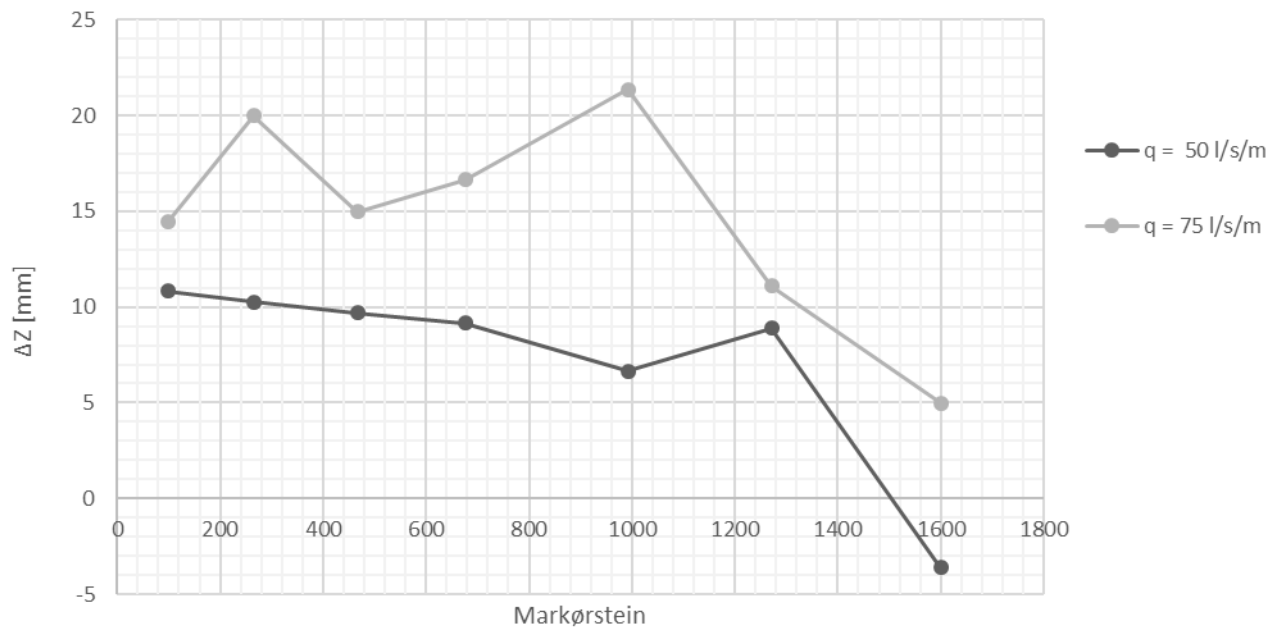
Figur 4-4 - Forskyvning av utvalgte oransje steiner



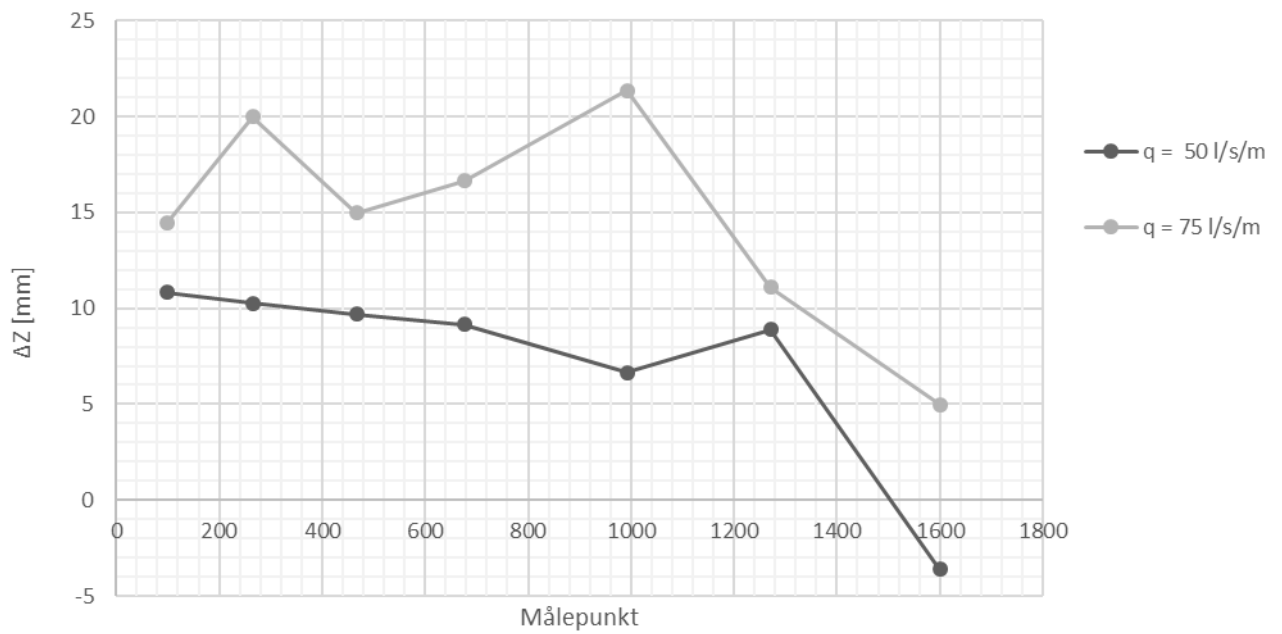
Figur 4-5 – Dimensjonløs sammenligning



Figur 4-6 – z-forskyvning for markørsteiner



Figur 4-6 – z-forskyvning for markørsteiner



Figur 4-7 – z-forskyvning for målepunkt

Forsøkslogg

Riprap21- 06.03.2017

GV

Tid	Logg	Filer
ok	Sjekk vannstandsmåler lyser rødt, output symbol.	
8:48	Stille klokke på videokamera	
8:50	Stiller klokke på kamera	
8:53	Lyssetting, 3 lamper	
8:55	Bytte batteri disto laser	
9:02	Oppsett av videokamera	
9:08	Tar bilde av plastring	
9:13	Åpnet Agilent og lastet config file (opprinnelig 150429riprap6, oppdatert navn)	170306riprap21.xml
9:16	Lyssetting til kamera, utsiden av renne, vil unngå skygge og lysrefleks fra glasset	
9:25	Innmåling av steiner, tom boks	
9:23	Lukker bypass	
10:01	Pumper på, 200 l	
10:12	Innmåling av steiner, full boks	
10:25	Agilent på med 10 Hz	
10:35	Skru på kamera	
10:32	Oppdatere skilt	
10:38	Slår på vann	
	Observerser litt lekkasjer i nedre venstre hjørne	
	Øker vannføringen gradvis, først til 25, deretter 50 l/s	
10:37	Starter på 1 time med 50 l/s	
10:40	Tar bilder	
11:37	Skrur av vann	
11:40	Slår av agilent	
11:40	Slår av kamera	
11:42	Bilderunde	
11:42	Ingen tydelige forskyvninger	
11:42	Ingen steiner i renna	
11:43	Innmåling av steiner	
12:02	Oppdaterer skilt fra 50 til 75 l/s	
12:06	bilder	
12:06	Video på	
	Agilent på	
11:34	Vann på	
11:35	Øker til 75 l/s	
12:13	1 time	
12:15	Bilder	

12:15	Observerer glippe i damkrone	
12:39	Kobberremse til hastighetsmåler er løs	
13:13	Vann av	
13:15	Agilinet av	
13:16	Video av	
	Lillevideo er tom for batteri	
13:16	bilderunde	
13:16	en stein i renne	
13:23	Nokså stor glippe i damkrone	
13:24	Måle forskyvning	
12:24	Kamera på	
12:26	Agilent på	
12:29	Oppdater skilt	
13:50	Vann på	
13:53	øker til 100 l/s	
13:54	Steinen ligger ikke i kontakt med andre steiner	
13:57	Brudd på 100 l/s	
14:00	Vann av	
14:00	Skru av kamera	
14:00	Stopper Agilent	
14:06	Skrur av pumpe	
14:07	Skrur av laser	
14:11	Åpne bypass	
14:14	Overfører data	

Vedlegg 5 – Forsøk 4^b – 23.03.17

Plastringen til forsøk 4 ble bygget over to dager 16. og 17. mars. Steinene plukket ut fra forrige forsøk ble brukt om igjen. Hver 10. stein ble plassert med b-aksen inn og merket oransje. Totalt ble 87 steiner plastret med b-akse inn. I damkrone ble alle steiner forsøkt plastret på vanlig måte med a-akse inn og helning 90°. Legging av selve plastringen tok ca. 5 timer.

Plassering av markørsteiner var den samme som tidligere og markert med gult. Av de oransje steinene ble sju steiner vilkårlig plukket ut og målt inn med laser.



Figur 5-1 - Plastring før start

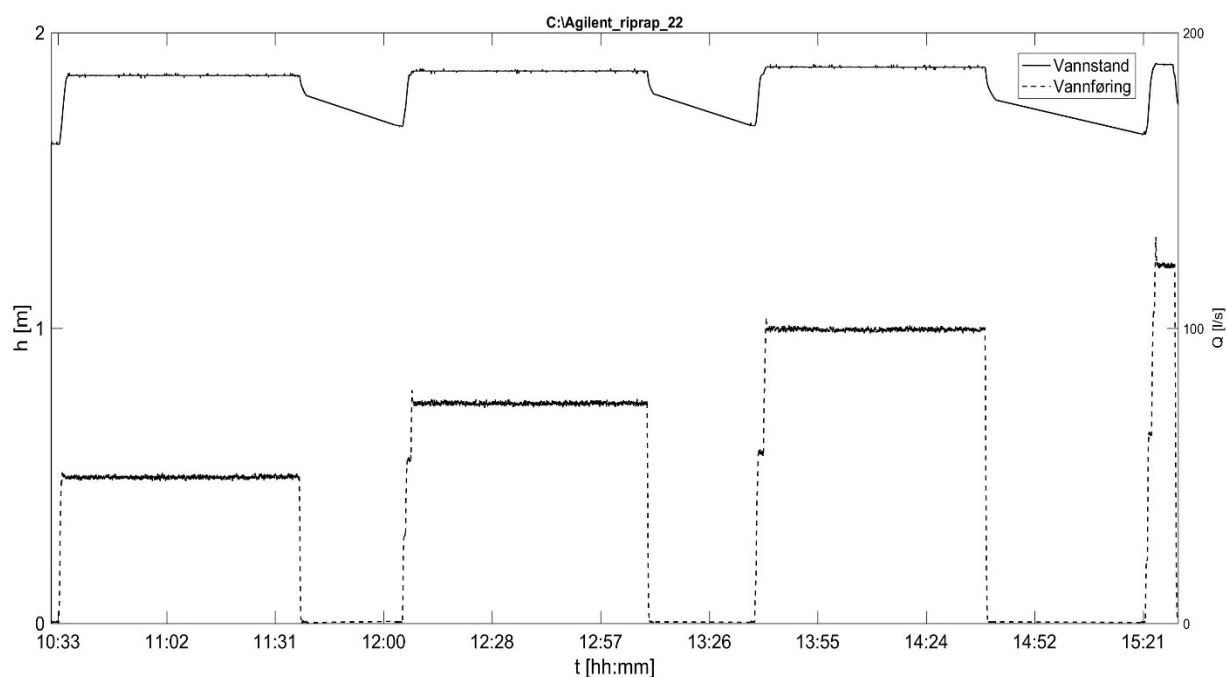
Første vannføring 50 l/s belastningstid 1 time. Deretter økes vannføringen til 75 l/s samme belastningstid. Forskyvningene er ikke blitt veldig markante, øker vannføring til 100 l/s. Etter en times belastning med 100 l/s er forskyvningene blitt over en steinlengde, det forventes brudd ved økning av vannføring. Øker vannføring til 125 l/s, etter noen minutters belastning går plastringen til brudd som forventet.

Tabell 5-1 - Antall steiner i renne

Vannføring [l/s/m]	Antall steiner i renne
50	-
75	0
100	4

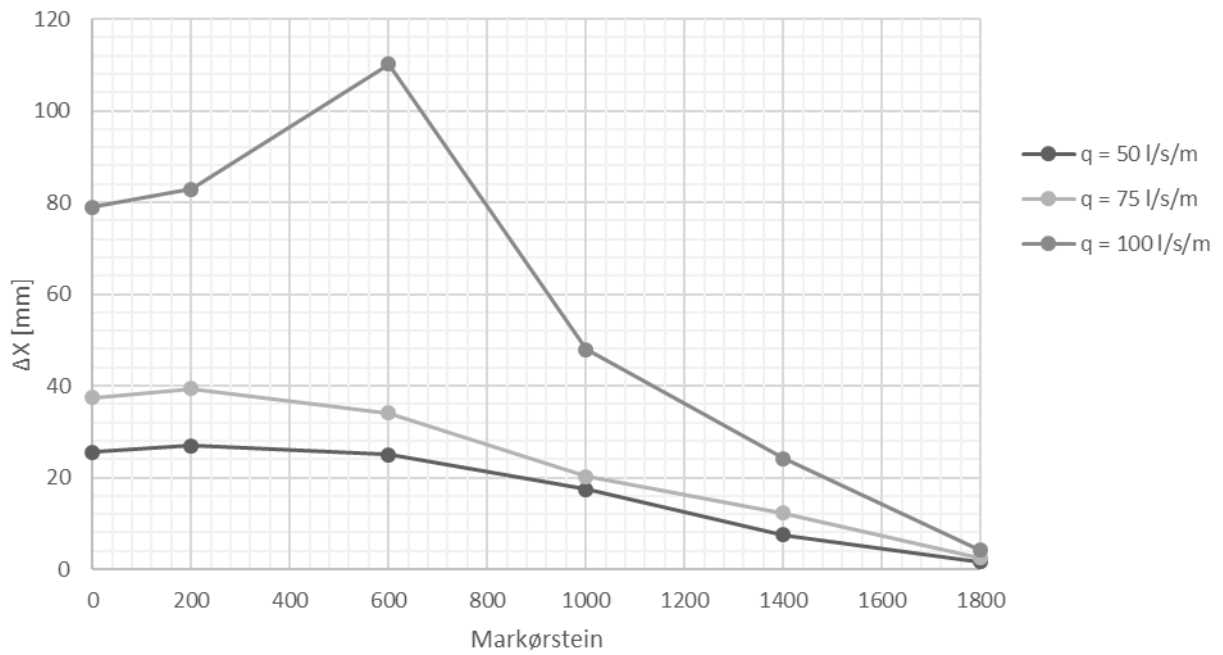
Tabell 5-2 - Vannføring og belastningstid

q_{prototyp} , [m ³ /s/m]	Tid [h]
1,6	3,2
2,4	3,2
3,2	3,2
4,0	0,3

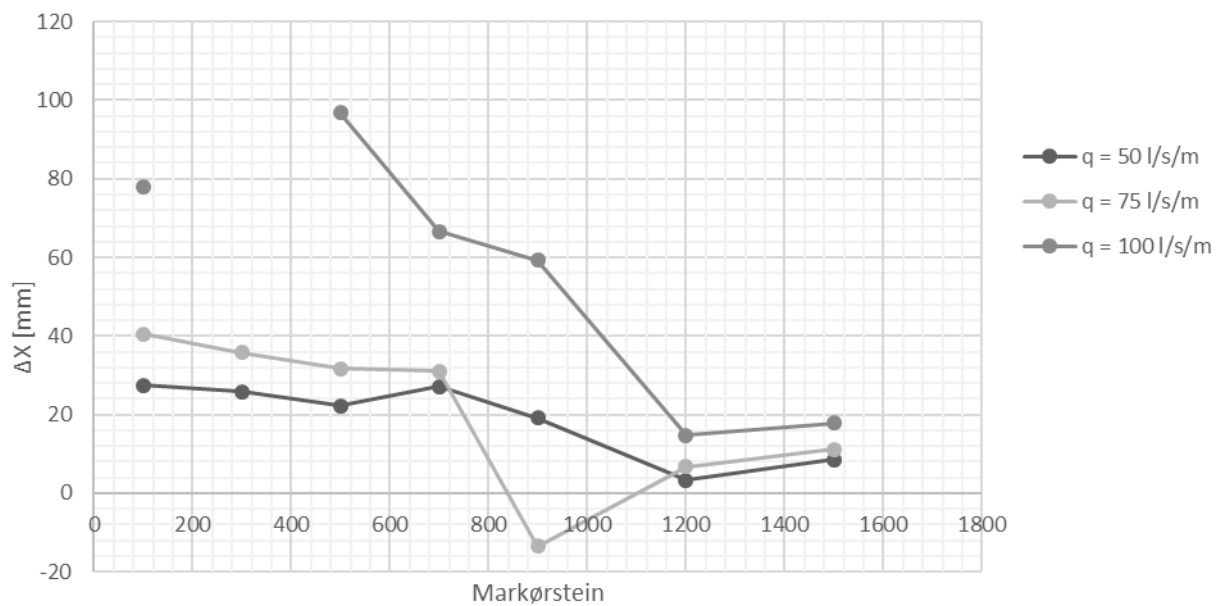


Figur 5-2 - Vannstand og vannføring

Plott av forskyvninger

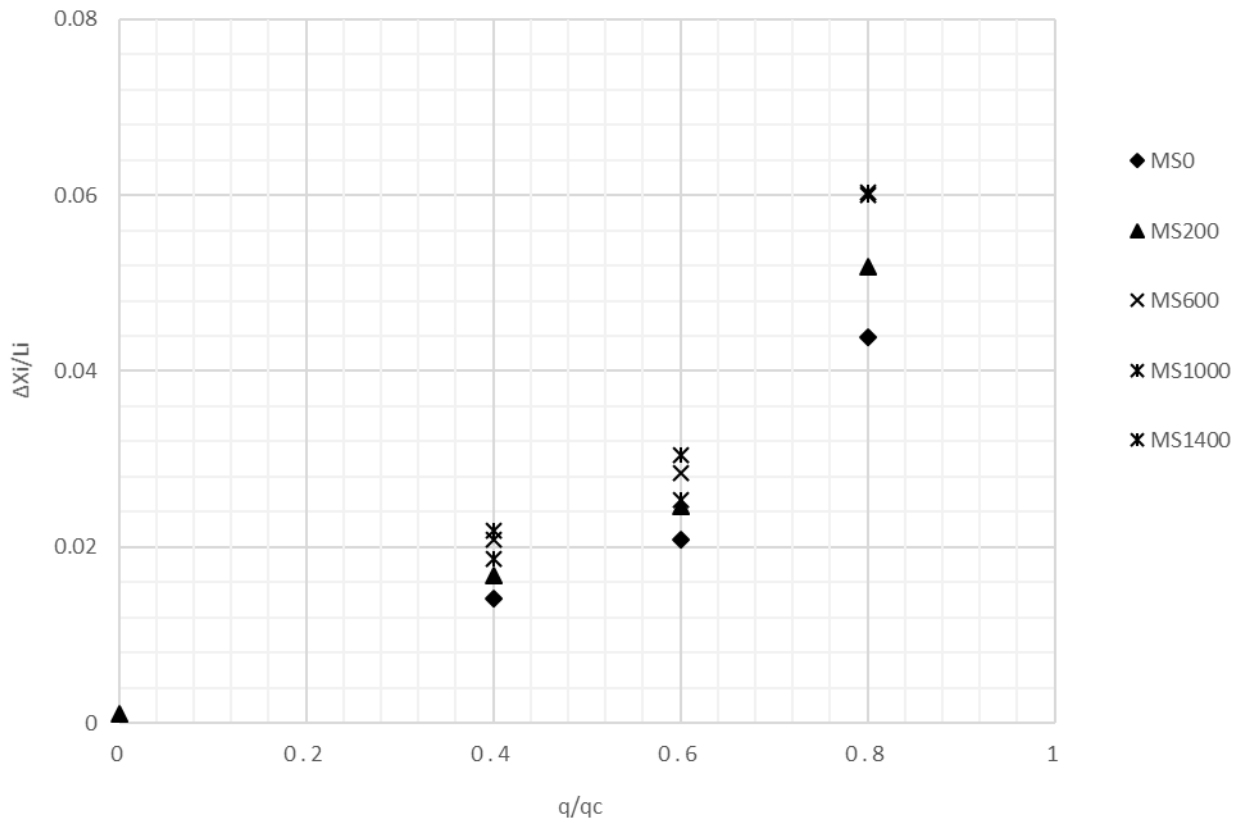


Figur 5-3 - Forskyvninger i x-retning

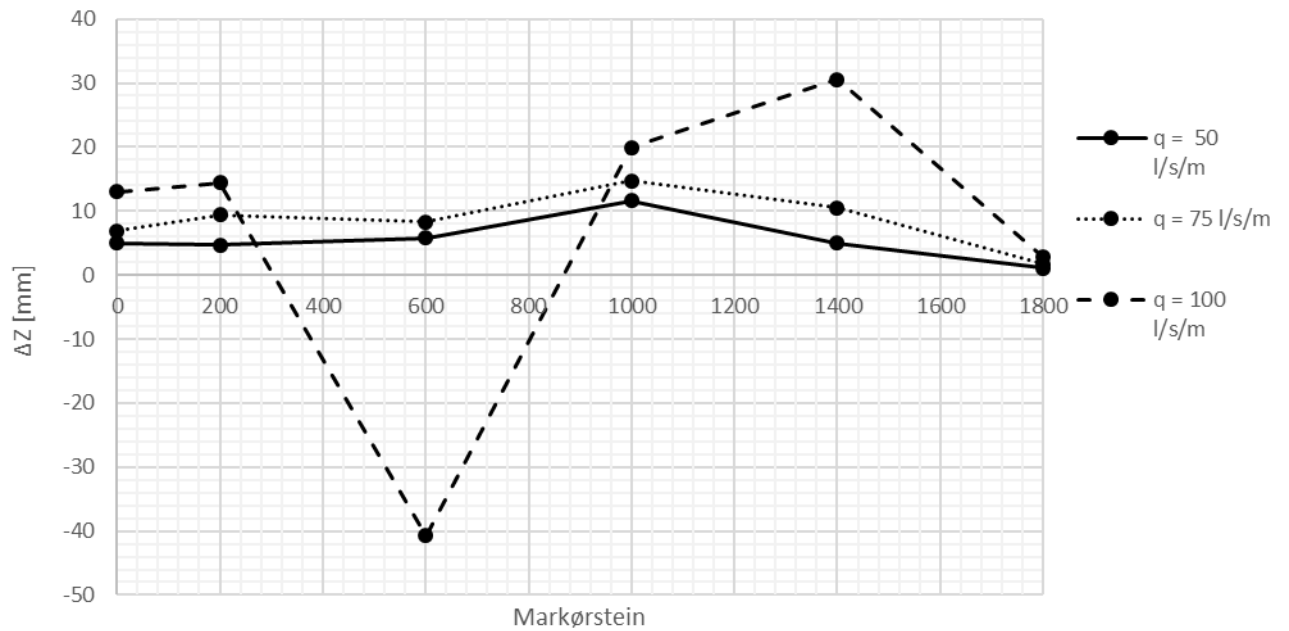


Figur 5-4 - Forskyvning av utvalgte steiner med b-akse inn

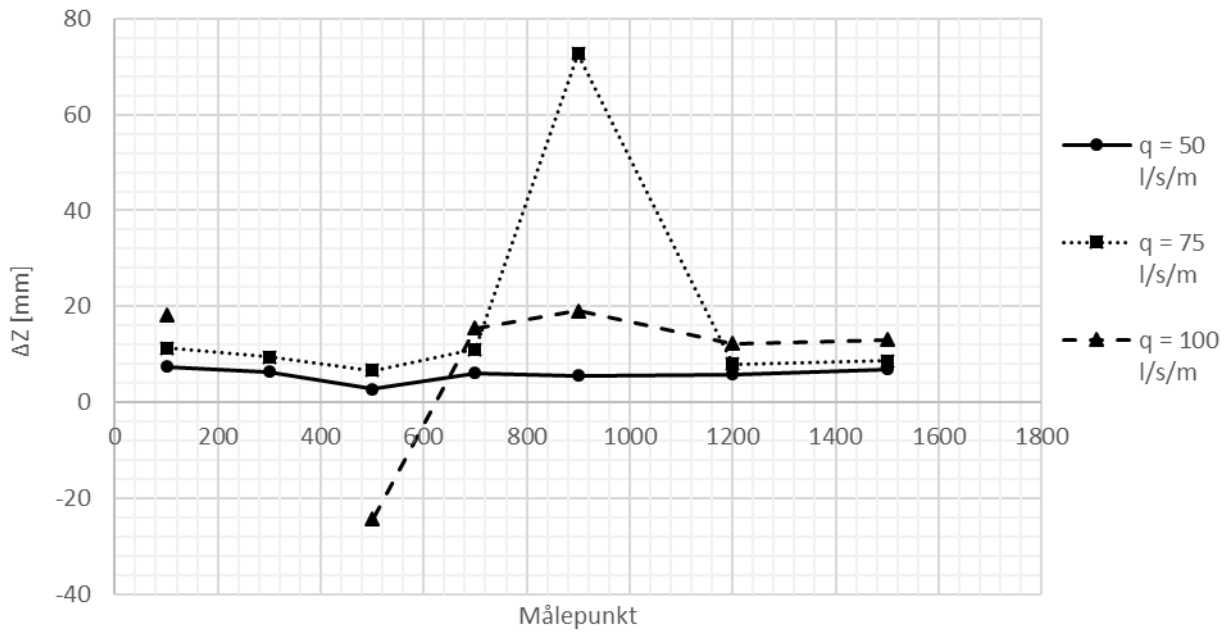
I figur 5-4 er det et hopp i grafen for vannføring $q = 100$ l/s/m, fordi markørsteinen har falt ut av plastringen.



Figur 5-5 – Dimensjonsløs sammenligning av x-forskyvning



Figur 5-6 – Forskyvninger i z-retning



Figur 5-7 – Forskyvninger i z-retning for målepunkt

Forsøkslogg

Riprap22 - 23.03.2017

GV

Tid	Logg	Filer
Ok	Sjekk vannstandsmåler lyser rødt, output symbol.	
8:15	Leter etter lille video	
9:06	Stille klokke på videokamera	
8:45	Stiller klokke på kamera	
8:30	Lyssetting, 3 lamper	
9:28	Bytte batteri disto laser	
9:29	Tar bilde av plastring	
9:28	Åpnet Agilent og lastet config file (opprinnelig 150429riprap6, oppdatert navn)	170323riprap22.xml
9:00	Lyssetting til kamera, utsiden av renne, vil unngå skygge og lysrefleks fra glasset	
9:40	Innmåling av steiner, tom boks	
9:59	Lukker bypass	
10:00	Pumper på, 200 l	
10:12	Innmåling av steiner, full boks	
10:35	Agilent på med 10 Hz	
10:35	Skrur på kamera	
10:32	Oppdatere skilt	
10:35	Slår på vann	
	Observerer litt lekkasjer i nedre venstre hjørne	
10:37	50 l/s i en time	
10:55	Bilderunde	
11:15	Bilderunde	
11:37	Skrur av vann	
11:40	Slår av agilent	
11:40	Slår av kamera	
11:41	Bilderunde	
11:43	Noe forskyvninger i damkrone	
11:43	Ingen steiner i renna	
11:45	Innmåling av steiner	
12:05	Oppdaterer skilt fra 50 til 75 l/s	
12:05	Video på	
12:07	Vann på	
12:09	Øker til 75 l/s	
12:09	1 time	
12:12	Bilde av krone	
12:30	Glippe i damkrone	
12:45	Store video har skrudd seg av, bytter batteri	

13:00	Bilder	
13:10	Vann av	
13:12	Agilinet av	
13:10	Video av	
13:15	bilderunde	
13:20	Ingen stein i renne	
13:20	Glippe i damkrone	
	Oppdatere skilt	
	Innmåling av steiner	
13:37	Kamera på	
13:37	Agilent på	
13:40	Vann på	
13:41	Øker til 100 l/s	
13:45	Bilder	
14:00	Bilder	
14:02	Glippe blir større, men fortsatt ikke markant.	
14:21	Glippe i damkrone er blitt større	
14:40	Vann av	
14:41	Video av	
14:43	Agilent av	
14:47	Bilder	
14:47	Antall stein i renne, 4. 3 oransje og en uten merking.	
14:48	Glippen er stor nå, plastringen er ruglete. Noen steiner stikker opp her og der.	
15:00	Innmåling av steiner, en oransje målestein er borte. Den har falt ut	
15:21	Vann på øker	
15:22	Agilent på	
15:21	Video på	
15:26	125 l/s	
15:27	Bilder	
15:31	Brudd på 125 l/s	
15:31	Vann av	
15:31	Agilent av	
15:31	Video av	
	Starter å overføre data	
15:40	Åpner bypass	
15:43	Pumpe av	
15:45	Skru av laser	
16:17	Data overført til harddisk	

Vedlegg 6 – Forsøk 5^a – 03.04.17

Plastringen ble bygget over to dager 29. og 30. mars. Plastringen ble bygget på vanlig måte med plassering av alle steiner og lengste akse a inn i dammen. I damkrone ble alle steiner forsøkt med a-akse inn og helning 90°. Legging av selve plastringen tok ca. 4 timer.

Plassering av markørsteiner var den samme som tidligere og markert med gult.



Figur 6-1 - Plastring før start

Første vannføring 50 l/s belastningstid 1 time. Deretter økes vannføringen til 75 l/s samme belastningstid. Forskyvningene er ikke blitt veldig markante, øker vannføring til 100 l/s. Etter en times belastning med 100 l/s er forskyvningene blitt større. Øker vannføring til 125 l/s, observerer at noen steiner beveger seg i det vannføring blir satt på. Etter endt kjøring av

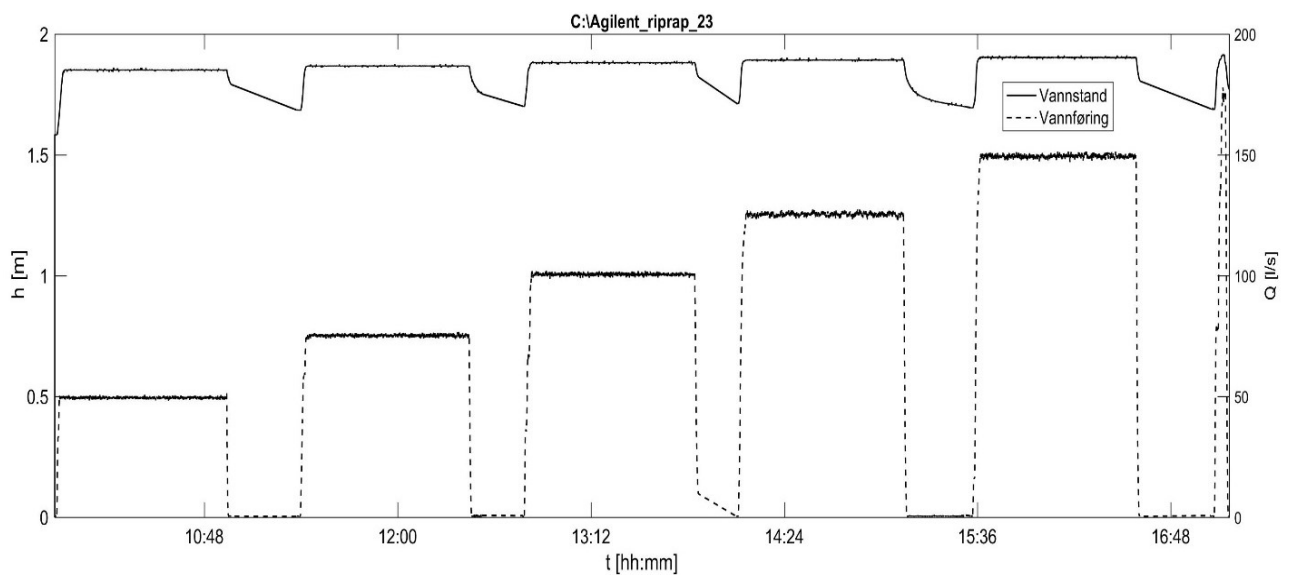
vannføringen på 125 l/s er forskyvningene blitt større, men glippen er ikke kritisk. Øker vannføring til 150 l/s, etter en time er forskyvningene større og plastringen buler mer ut. Forskyvningene er såpass store at det forventes brudd ved økt vannføring. Øker til 175 l/s og brudd oppstår kort tid etter å ha nådd vannføringen.

Tabell 6-1 - Antall steiner i renne

Vannføring [l/s/m]	Antall steiner i renne
50	-
75	-
100	3
125	1
150	

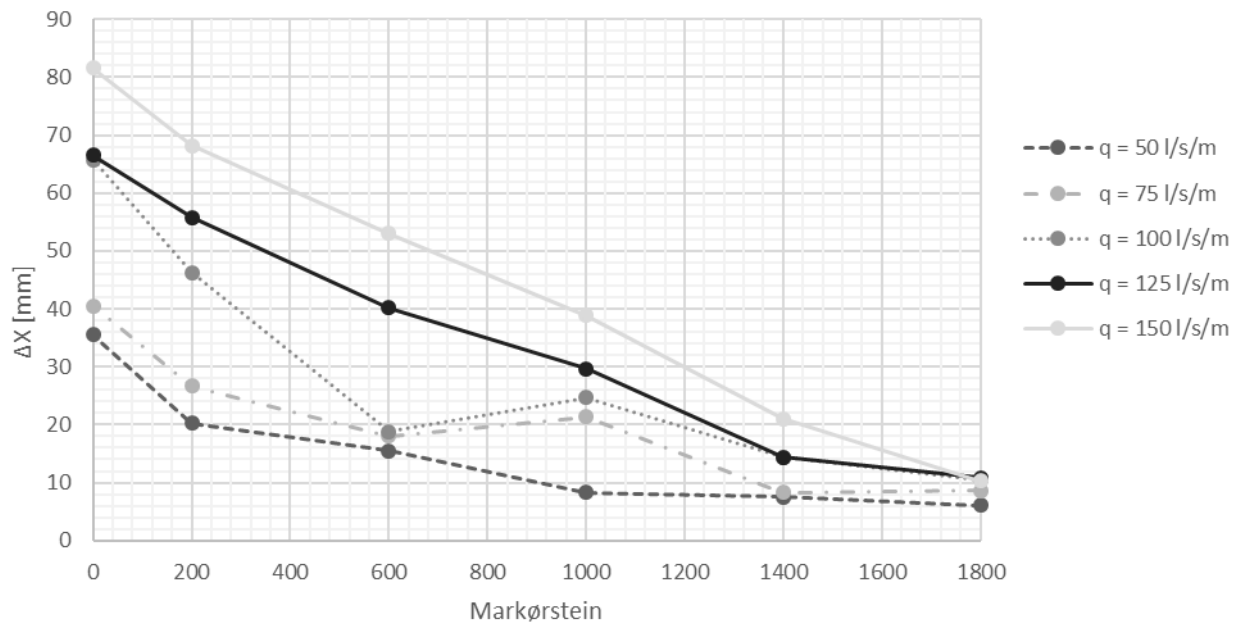
Tabell 6-2 - Vannføring og belastningstid

q _{prototyp} , [m ³ /s/m]	Tid [h]
1,6	3,2
2,4	3,2
3,2	3,2
4,0	0,3

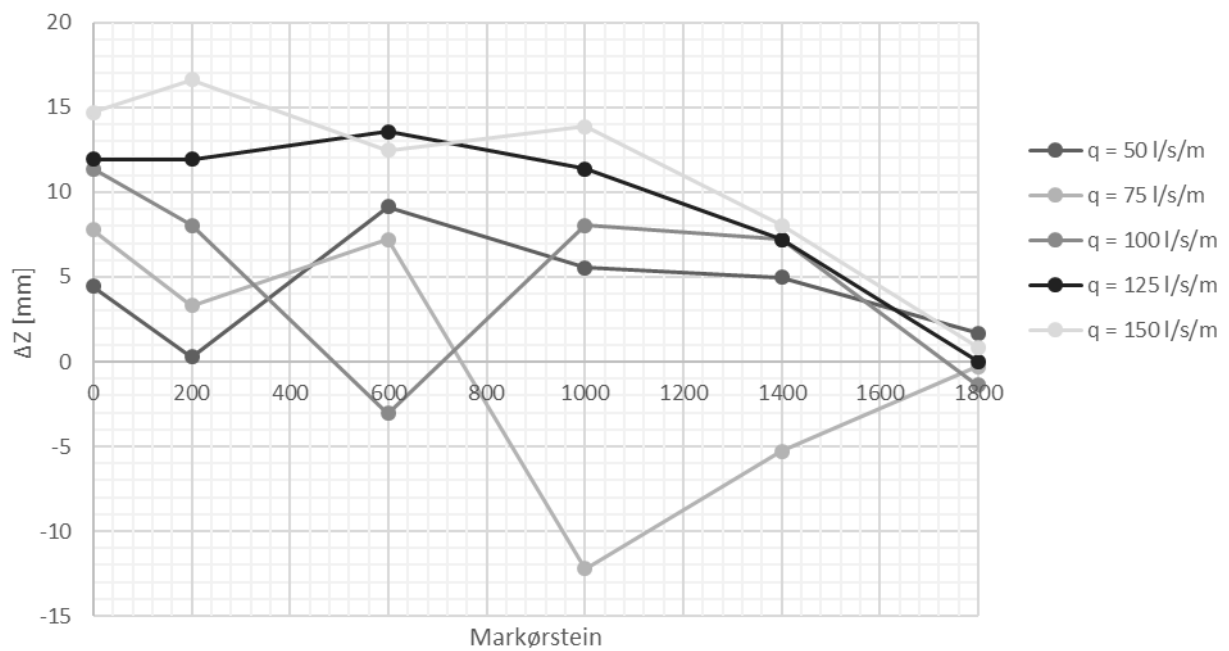


Figur 6-2 - Forsøkskjøring

Forskyvninger



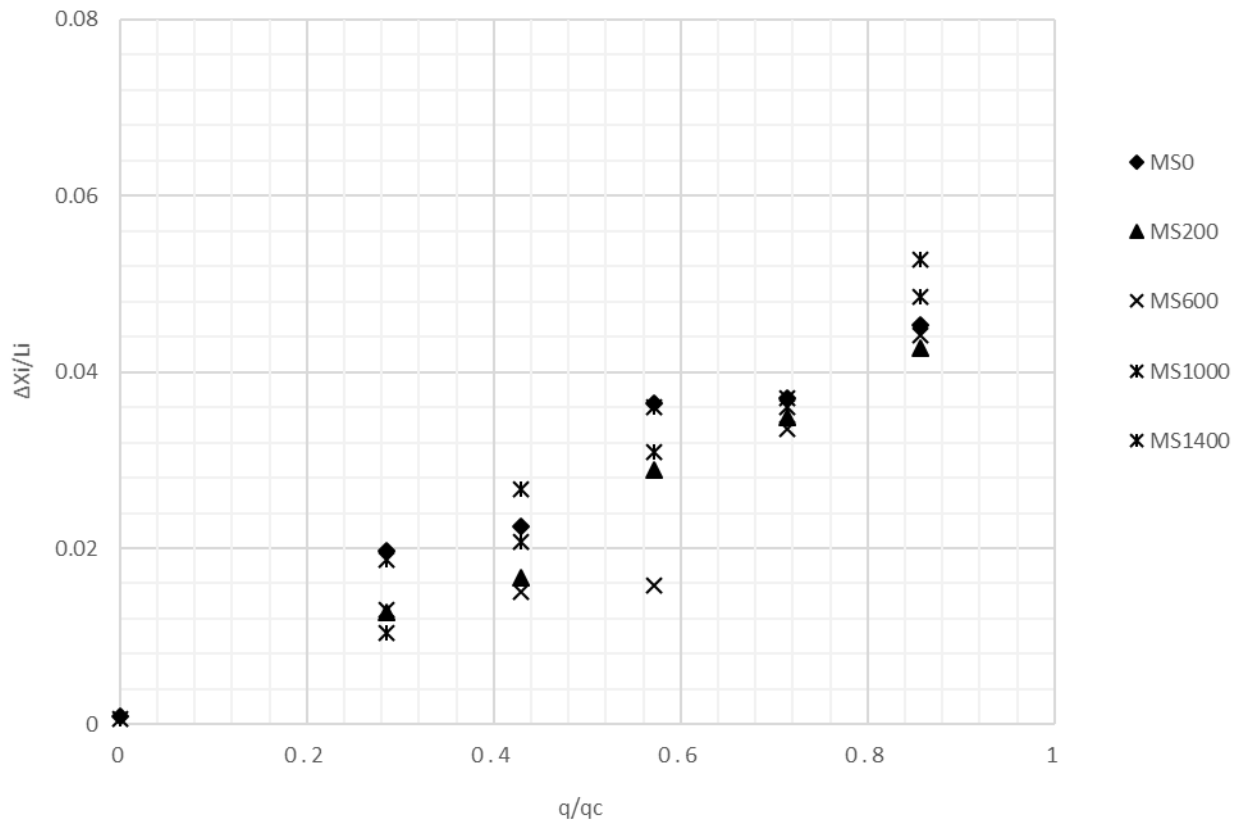
Figur 6-3 - Forskyvninger i x-retning



Figur 6-4 - Forskyvning i z-retning

Negative z verdier betyr at steinene klemmes ned, og positive betyr at steinen dyttes opp.

Figur 6-5 gir dimensjonsløs forskyvning.



Figur 6-5 – Dimensjonsløs sammenligning av x -forskyvning

Forsøkslogg

Riprap23 - 03.04.2017

GV

Tid	Logg	Filer/kommentar
	Sjekk vannstandsmåler lyser rødt, output symbol.	
8:30	Stille klokke på videokamera	
8:30	Stiller klokke på kamera	
8:34	Lyssetting, 3 lamper	
8:44	Bytte batteri disto laser	
8:45	Tar bilde av plastring	
8:52	Åpnet Agilent og lastet config file (opprinnelig 150429riprap6, oppdatert navn)	170403riprap23.xml
8:57	Lyssetting til kamera, utsiden av renne, vil unngå skygge og lysrefleks fra glasset	
9:00	Innmåling av steiner, tom boks	Stian hjelper til
8:52	Lukker bypass	
9:13	Pumper på, 200 l	
9:30	Innmåling av steiner, full boks	Mathilde hjelper til
9:52	Agilent på med 10 Hz	
9:52	Skru på kamera	
9:32	Oppdatere skilt	
9:53	Slår på vann	
9:56	Starter på 1time med 50 l/s	
10:56	Skrur av vann	
10:58	Slår av agilent	
11:00	Slår av kamera	
11:00	Bilderunde	
11:00	Ingen tydelige forskyvninger	
11:00	Ingen steiner i renna	
11:04	Innmåling av steiner	Netsanet hjelper til
11:07	Bytte batteri distolaser	Oppladbare batterier fungerer ikke like godt
11:22	Oppdaterer skilt fra 50 til 75 l/s	
11:24	Video på	
11:25	Vann på	
11:26	Øker til 75 l/s	
11:27	1 time	
11:48	Store video har skrudd seg av	
11:49	Bytte batteri store video	
11:50	Bilderunde	
12:27	Vann av	
12:28	Aglinet av	

12:27	Video av	
12:30	Lille video tom for strøm	Glemt å sette i lader
12:30	bilderunde	
12:30	0 steiner i renne	
12:34	Innmåling av stein	Mathilde hjelper
12:50	Kamera på	
12:50	Agilent på	
12:50	Oppdater skilt	
12:50	Vann på	
12:52	Øker til 100 l/s	
12:54	Bilderunde	
13:15	Bilder	
13:19	Observerer et hull i damkrone	
13:52	Vann av	
13:52	Video av	
13:53	Agilent av	
13:54	Bilderunde	
13:54	3 steiner i renna	
13:58	Innmåling av stein	Netsanet hjelper til
14:08	Agilent på	
14:08	Video på	
14:09	Vann på	
14:33	bilderunde	
15:06	Store video tom for batteri	
15:09	Vann av	
15:09	Video av	
15:10	Agilent	Glemte vist å skru av Agilent
15:13	En stein i renne	
	Bilder	
15:17	Innmåling av steiner	Netsanet hjelper til
15:30	Agilent av	
15:34	Agilent på	
15:35	Video på	
15:35	Vann på	
15:36	Øker til 150 l/s	
15:45	Bilder	
16:09	Bilder	
16:36	Vann av	
	Video av	
16:37	Agilent av	
16:42	Bilder	
	Ingen stein i renne, plastringen buler litt ut på midten, tydelig at enkelte steiner er lengere ut	
16:44	Innmåling av stein	Netsanet
17:02	Agilent på	
17:03	Vann på	

17:03	Video på	
	Øker til 175 l/s	
17:08	Brudd	
17:09	Vann av	
17:10	Skru av kamera	
17:10	Stopper Agilent	
17:13	Åpner bypass	
Ok	Skrur av pumpe	
Ok	Skrur av laser	
17:18	Overfører data	

Vedlegg 7 – Elektroniske vedlegg

Film av globalt brudd for alle forsøk.

	Filnavn
Forsøk 1^a	Brudd_store_video_riprap18
Forsøk 2^a	Brudd_store_video_riprap20
Forsøk 3^b	Brudd_store_video_riprap21
Forsøk 4^b	Brudd_store_video_riprap22
Forsøk 5^a	Brudd_store_video_riprap23

Alle filmene er sett fra utsiden av renne på plastringen.