

# Plastring av fyllingsdammer

Effekt av forband på styrken av plastringen

**Eirik Helgetun Pettersen**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Leif Lia, IVM

Medveileder: Priska Helene Hiller, IVM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for vann- og miljøteknikk





## MASTEROPPGAVE

**Student:** *Eirik Helgetun Pettersen*

**Tittel:** **Plastring av fyllingsdammer – effekt av forband på styrken av plastringen**

### 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 ytterste lag, det vil si skråningsvern. Stabiliteten til nedstrøms skråning er avgjørende for dammens sikkerhet. Det ytterste laget, skråningsvernet, er et 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 støttefyllinga i å bli erodert vekk i en situasjon med utstrømmende vann.

På tross av at norske dammer i de siste 30 til 40 år har blitt plastret er det lite kunnskap om styrken ved forskjellige plastringsmetoder. I 2011 startet forskningsprosjektet ”Fullskalaforsøk på plastring av fyllingsdam” som er finansiert gjennom Energi Norge. I dette forskningsprosjektet inngår noen storskala forsøk i felt og todimensjonale laboratorieforsøk som utføres på NTNU. Laboratorieforsøk og prototypforsøk for å undersøke parametere som helning på dammen, steinstørrelse og ulik plassering av plastringssteiner er utført i masteroppgaver i 2012 til 2014. I februar 2013 startet også en 4-årig doktorgradsstudie om temaet. Forskningsprosjektet er finansiert gjennom Energi Norge med støtte fra Forskningsrådet.

### 2 HOVEDPUNKT I OPPGAVEN

Formålet med oppgaven er finne ut hvordan kvalitet og styrken av plastring blir påvirket av forband. Det er viktig for å kvantifisere en mulig økning av sikkerhetsfaktoren ved å legge plastring pent i forband. I tillegg kan forskyvninger i plastringen under hydraulisk belastning være avhengig av plastringsmåten. Oppgaven løses ved hjelp av fysiske modellforsøk.

Oppgaven skal omfatte følgende hovedpunkter:

1. Litteraturstudie om plastring i både norsk og internasjonal litteratur.
2. Utarbeidelse av en hypotese om hvordan forband påvirker styrken i plastring.
3. Planlegging av en forsøksplan for fysiske modellforsøk for å teste hypotesen.
4. Bidra i forberedelsene av modellforsøk og utføre de.
5. Dokumentere målingene og tolke resultatene.
6. Sammenlign resultatene med tidligere utførte forsøk og litteraturen.
7. Diskutere resultatene kritisk.
8. Rapportering.

Diskusjoner med veiledere brukes for å planlegge modellforsøkene i detalj. Gjennomføring av modellforsøk skjer i sammenheng med en doktorgradsstudie.

### **3 RETTLEDNING, DATA OG INFORMASJON**

Professor Leif Lia vil være hovedveileder og vil sammen med stipendiat Priska Helene Hiller (medveileder) veilede arbeidet. Diskusjon med, og bidrag fra, kollegaer, studenter og medarbeidere ved NTNU, SINTEF, NVE og andre dameiere anbefales. Bidrag som går inn i oppgaven skal alltid refereres til på korrekt måte.

### **4 RAPPORTFORMAT, REFERANSER OG ERKLÆRING**

Oppgaven skal skrives i et tekstbehandlingsprogram og figurer, tabeller, foto etc. 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. Sammendraget skal ikke overskride 450 ord og skal være egnet for elektronisk rapportering. Elektroniske data fra modellforsøk (f. eks. video og rådata fra måleutstyr) skal innleveres elektronisk på en ryddig og strukturert måte. Oppgaven skal leveres som pdf i DAIM og trykkes i fire eksemplar som leveres faglærer/institutt.

Masteroppgaven skal ikke leveres senere enn onsdag **10. juni 2015**.

Trondheim, 7. januar 2015

---

Prof. Leif Lia

## SAMMENDRAG

Formålet med masteroppgaven er å finne ut hvordan kvalitet og styrke av plastring blir påvirket av forband. Plastring er en metode der steinene i skråningsvernet legges stabilt med fall inn mot dammen og med god innbyrdes kontakt. De skal også legges i forband slik at vertikale og horisontale sprekkesett unngås.

Det ble gjennomført 6 modellforsøk, utført med kantet plastringsstein med median steinstørrelse  $d_{50}$  på 57 mm, korngraderingstall  $C_u$  lik 1,16 og steinhelning  $\alpha$  på  $60^\circ$ . Skråningshelningen var 1:1,5 i alle forsøk, mens damhøyden var 1150 mm. Skråningsvernet ble utsatt for overtopping og ble utført på tre ulike måter:

- Plastring med forband
- Plastring uten forband
- Rauset steinfylling

Det ble registrert to ulike bruddvannføringer. Enhetsvannføring ved erosjon av første stein  $q_{init}$  og globalt brudd  $q_c$ . Det viste seg at plastring med forband har betydelig restkapasitet selv om steiner eroderes ut av plastringen. Det er derfor antatt at  $q_c$  er mest velegnet som bruddkriterium.

Plastring med forband hadde en enhetsvannføring ved globalt brudd  $q_c$  mellom 225-400 l/s/m. Til sammenligning var bruddverdiene henholdsvis 75 og 37 l/s/m for plastring uten forband og rauset steinfylling. Plastring med forband gir en relativ økning av global bruddvannføring på 3,0-5,3 i forhold til plastring uten forband.

I forsøkene med forband startet globalt brudd i tilknytning til en horisontal glippe over dammens bredde som oppstod i knekkpunktet mellom skråning og krone. Glippen ble dannet på grunn av forskyvninger i skråningen. Dammene gikk til brudd når steinene øverst i skråningen har forskjøvet seg med omtrent 6 % av skråningens lengde. Det virker å være direkte sammenheng mellom forskyvninger langs skråningen akse og globalt brudd. Bruddmekanismen ble ikke observert med de andre typene skråningsvern.

Forband øker plastringstettheten. Teknikken gjør at hver enkelt stein får flere kontaktpunkter. Dette gir til økt kontakt med omkringliggende stein, og bidrar til økt innlåsing. Forbandet gjør også at steiner i større grad virker som en enhet. Ved erosjon av enkeltsteiner sørger forbandet for at kreftene i større grad omfordes slik at steinene inntar en stabil posisjon. Det er antatt at forskyvningsforløpet er avhengig av

plastringstettheten i skråningen. Økt plastringstetthet gir mindre rom for steinene å forskyve seg i. Det må dermed mer kraft til for å fremskaffe forskyvningene.

Seks ulike beregningsmetoder for å anslå median steinstørrelse i skråningsvern ble sammenlignet med resultat fra forsøkene. Beregningsmetodene er i all hovedsak basert på rauset steinfylling, og ga best samsvar med forsøket med rauset steinfylling. For plastring med forband overdimensjonerer samtlige metoder nødvendig steinstørrelse. Dimensjoneringsformelen fra Norges vassdrags- og energidirektorat ga et gjennomsnittlig avvik på 486 % i forhold til observert steinstørrelse, og virker ikke å være egnet for dimensjonering av steinstørrelse for plastringsstein.

## ABSTRACT

The purpose of this master thesis is to investigate how quality and strength of placed riprap are affected by placing the stones in bond. Placed riprap is a method where the stones in the downstream slope protection layer are placed steady and with reciprocal contact. The stones should slope towards the dam, and be placed in bond to avoid vertical and horizontal joints.

6 model tests were performed using angular stones with a median stone size  $d_{50}$  of 57 mm, coefficient of uniformity  $C_u$  of 1.16 and inclination of the stones  $\alpha$  of  $60^\circ$ . The slope was 1:1.5 in all tests, while the dam height was 1150 mm. The test dams were tested against overtopping. The downstream slope protection layers were built in three different methods:

- Placed riprap with bond
- Placed riprap without bond
- Randomly placed riprap

Two different unit discharges for failure were registered throughout the tests. Unit discharge for erosion of the first single stone  $q_{init}$  and global failure  $q_c$ . Placed riprap with bond had considerable residual capacity even though single stones were eroded out of the riprap. Therefore, it is assumed that  $q_c$  is most suitable as failure criterion.

Placed riprap with bond failed globally with unit discharge  $q_c$  between 225 and 400 l/s/m. In comparison  $q_c$  were respectively 75 and 37 l/s/m for placed riprap without bond and randomly placed riprap. Placed riprap with bond gave a relative increase of global unit discharge of 3,0-5,3 compared to placed riprap without bond.

For the tests with bond, the global failure started in affiliation to a horizontal breach spanning across the dams width located in the break point between the slope and the crown. The breach was established because of displacements in the downstream slope. The riprap failed when the stones located at the top of the slope had an displacement of 6% of the total length of the slope. It seems to be a direct correlation between displacements along the slopes axis and global failure. The breach mechanism was not observed in the tests with different kinds of riprap.

Bond amplifies the ability to place the stones closely. The technique increases the number of contact points for each stone. This contributes to enhanced contact between the stones, which ultimately increases the interlocking effect. The bond also seems to have the ability to make the stones to act as an unit. When exposed to erosion of single stones, the bond seems to reappportion the acting forces to obtain a stable situation. It is

assumed that the progress of displacement is dependent of the slopes riprap tightness. By fitting more stones in the riprap, the available space for stones to move into decreases. Greater forces are then needed to acquire the displacements.

Six methods of calculating the median stone size were compared to the results from the tests. The methods are essentially based on tests with randomly placed riprap, and correlated best with the tests with randomly placed riprap. Compared with placed riprap with bond each and all of the methods over dimensions the necessary stone size. The dimensioning formula from Norwegian Water Resources and Energy Directorate gave a mean deviate of 486 % compared to observed stone size, and seems to be unfit to calculate stone size for placed riprap.



# INNHALDSFORTEGNELSE

<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>INNHALDSFORTEGNELSE</b> .....	<b>V</b>
<b>FIGURLISTE</b> .....	<b>VII</b>
<b>TABELLISTE</b> .....	<b>IX</b>
<b>FORORD</b> .....	<b>XI</b>
<b>SYMBOLLISTE</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Formål og omfang .....	2
<b>2 TEORI</b> .....	<b>3</b>
2.1 Parametere som beskriver stein .....	3
2.2 Brudd i skråningsvern .....	5
2.3 Krefter som virker på plastringstein .....	7
2.4 Tidligere modell- og prototypforsøk .....	10
2.5 Dimensjoneringskriterier for steinsikring i nedstrøms skråning .....	12
2.6 Tidligere masteroppgaven ved NTNU .....	17
<b>3 MATERIAL OG METODE</b> .....	<b>21</b>
3.1 Litteratursøk .....	21
3.2 Oppsett modellforsøk .....	21
3.3 Måleinstrumenter .....	24
3.4 Laboratorieteknikk .....	25
3.5 Forsøksmaterialer .....	28
3.6 Forsøksplan .....	33
3.7 Dokumentering, registrering og behandling av data .....	37
3.8 Bruddkriterier og registrering av bruddvannføring .....	41
<b>4 RESULTATER</b> .....	<b>43</b>
4.1 Belastningsmønster .....	43
4.2 Plastringstetthet .....	44
4.3 Bruddvannføring og bruddforløp .....	44
4.4 Forskyvninger .....	48
4.5 Strømningshastighet .....	51
<b>5 DISKUSJON</b> .....	<b>55</b>
5.1 Forsøksplan og gjennomføring .....	55
5.2 Styrke av plastring og bruddkriterier .....	55
5.3 Sammenligning med forsøk utført ved NTNU .....	58
5.4 Sammenligning med eksisterende metoder .....	60
5.5 Bruddmekanismer ved globalt brudd .....	64
5.6 Virkning av forband .....	65

5.7	Feilkilder .....	67
6	<b>KONKLUSJON</b> .....	71
7	<b>VIDERE ARBEID</b> .....	73
8	<b>REFERANSER</b> .....	75
	<b>INNHOLDSLISTE VEDLEGG</b> .....	
A.	<b>VEDLEGG – FORSØK 1</b> .....	
B.	<b>VEDLEGG – FORSØK 2</b> .....	
C.	<b>VEDLEGG – FORSØK 3</b> .....	
D.	<b>VEDLEGG – FORSØK 4</b> .....	
E.	<b>VEDLEGG – FORSØK 5</b> .....	
F.	<b>VEDLEGG – FORSØK 6</b> .....	
G.	<b>VEDLEGG - BEREGNINGSMETODER</b> .....	
H.	<b>VEDLEGG – STEINDATA</b> .....	
I.	<b>ELEKTRONISK VEDLEGG</b> .....	

# FIGURLISTE

FIGUR 2.1 – DEFINISJON AV STEINENS AKSER .....	4
FIGUR 2.2 – PRINSIPMODELL AV PARTIKKELEROSJON .....	5
FIGUR 2.3 – PRINSIPMODELL AV TRANSLASJONSUTGLIDNING .....	6
FIGUR 2.4 – PRINSIPMODELL AV MODIFISERT SLUMP .....	6
FIGUR 2.5 – PRINSIPMODELL AV SLUMP .....	7
FIGUR 2.6 – BRUDDMEKANISMER I PLASTRINGLAGET .....	7
FIGUR 2.7 – KREFTER SOM VIRKER PÅ ENKELTSTEIN .....	8
FIGUR 2.8 – KREFTER SOM VIRKER PÅ STEIN LAGT I PLASTRING .....	10
FIGUR 2.9 – SOLVIKS ENDELIGE DIMENSJONERINGSKURVE FOR STEINSTØRRELSE I NEDSTRØMS SKRÅNING .....	11
FIGUR 2.10 – PLASTRING LAGT I TO LAG .....	13
FIGUR 3.1 – PLAN OG SNITT AV FORSØKSRENNEN .....	22
FIGUR 3.2 – PRINSIPSKISSE AV MODELLOPPSETTET. ....	22
FIGUR 3.3 – MÅLESTAVER FOR MANUELL AVLESNING AV VANNSTAND .....	25
FIGUR 3.4 – KORNFORDELINGSKURVER FOR MATERIALER .....	28
FIGUR 3.5 – EKSEMPEL PÅ PLASTRINGS- OG FILTERSTEIN .....	29
FIGUR 3.6 – BOKSPLOTT FOR STEINFRAKSJONENS AKSER OG VEKT .....	30
FIGUR 3.7 – PLASTRINGSSTEINER LAGT MED FORBAND .....	35
FIGUR 3.8 – PLASTRINGSSTEINER LAGT UTEN FORBAND .....	36
FIGUR 3.9 – PLASTRINGSSTEINER LAGT SOM RAUSET FYLLING .....	36
FIGUR 3.10 – EKSEMPEL PÅ FORSØKSKJØRING FRA FORSØK 6 .....	38
FIGUR 3.11 – KURVER FRA KONDUKTIVITETSMÅLINGER FRA FORSØK 2. ....	39
FIGUR 3.12 – Plassering av markørsteiner i skrånningen .....	40
FIGUR 4.1 – EKSEMPLER PÅ HULL ETTER UTREVNE STEINER I FORSØK 6.45	
FIGUR 4.2 – MANGLENDE STEIN I PLASTRINGEN SOM FUNKSJON AV ENHETSVANNFØRING. ....	46
FIGUR 4.3 – KRONE OG KNEKKPUNKT I FORSØK 2 FØR BELASTNING .....	50
FIGUR 4.4 – KRONE OG KNEKKPUNKT I FORSØK 2 ETTER BELASTNING MED Q=340 L/S .....	50
FIGUR 4.5 – FORSKYVNINGSFØRSLØP FOR MARKØRSTEIN 0 .....	51
FIGUR 4.6 – MÅLTE OG BEREGNEDE HASTIGHETER .....	53

<b>FIGUR 5.1 – BEREGNINGSMETODER OG OBSERVERTE VERDIER FOR EROSJON AV FØRSTE STEIN .....</b>	<b>61</b>
<b>FIGUR 5.2 –BEREGNINGSMETODER OG OBSERVERTE VERDIER VED GLOBALT BRUDD .....</b>	<b>62</b>
<b>FIGUR 5.3 – KREFTER PÅ STEIN VED HULL ETTER ERODERT ENKELTSTEIN I PLASTRING MED FORBAND .....</b>	<b>66</b>
<b>FIGUR 5.4 – KREFTER PÅ STEIN VED HULL ETTER ERODERT ENKELTSTEIN I PLASTRING UTEN FORBAND .....</b>	<b>66</b>

# TABELLISTE

TABELL 2.1 – KRAV TIL STEINSTØRRELSE I NEDSTRØMS SKRÅNINGSVERN FOR ULIKE KONSEKVENSKLASSER .....	14
TABELL 2.2 – KRAV TIL KRONEVERN FOR ULIKE KONSEKVENSKLASSER ...	14
TABELL 2.3 – OVERSIKT OVER TIDLIGERE MASTEROPPGAVER VED NTNU	17
TABELL 3.1 – NØKKELVERDIER FOR MODELLEN.....	23
TABELL 3.2 – OVERSIKT OVER VIKTIGE MÅLEINSTRUMENTER.....	24
TABELL 3.3 – SKALERINGSFAKTORER FROUDES MODELLOV .....	26
TABELL 3.4 – MASSETETTHET AV DEN MÅLTE STEINFRAKSJONEN.....	30
TABELL 3.5 –RASVINKEL FOR MATERIALER UTFØRT MED VARIERENDE PLASTRINGSMETODER.....	33
TABELL 3.6 – UTFØRTE FORSØK.....	34
TABELL 4.1 – OVERSIKT OVER BELASTNINGSTID FOR FORSØK. ....	43
TABELL 4.2 – ANTALL STEINER OG PLASTRINGSTETTHET.....	44
TABELL 4.3 – REGISTRERTE ENHETSVANNFØRINGER .....	44
TABELL 4.4 – POSISJON AV STEIN SOM ERODERES FØRST UT .....	45
TABELL 4.5 – OVERSIKT OVER ANDEL MANGLENDE STEIN .....	46
TABELL 4.6 – BESKRIVELSE AV BRUDDMEKANISMER .....	47
TABELL 4.7 – OPPSUMMERTE FORSKYVNING I FORKANT AV EROSJON AV FØRSTE STEIN OG GLOBALT BRUDD FOR FORSØK 1.....	48
TABELL 4.8 – OPPSUMMERTE FORSKYVNINGER I FORKANT AV EROSJON AV FØRSTE STEIN OG GLOBALT FOR FORSØK 2.....	48
TABELL 4.9 – OPPSUMMERTE FORSKYVNINGER I FORKANT AV EROSJON AV FØRSTE STEIN OG GLOBALT BRUDD FOR FORSØK 3.....	49
TABELL 4.10 – OPPSUMMERTE FORSKYVNINGER I FORKANT AV EROSJON AV FØRSTE STEIN OG GLOBALT BRUDD FOR FORSØK 6.....	49
TABELL 4.11 – OPPSUMMERING AV MARKØRSTEINENENES FORSKYVNING I FORHOLD TIL TILGJENGELIG FORSKYVNINGSLENGDE .....	50
TABELL 4.12 –AVLEST VANNSTAND OG BEREGNET HASTIGHET.....	52
TABELL 5.1 – SAMMENLIGNING MED TIDLIGERE UTFØRTE MODELLFORSØK VED NTNU .....	59
TABELL 5.2 – TILLATT HELNING OG BRUDDKRITERIUM FOR BEREGNINGSMETODER .....	61
TABELL 5.3 – AVVIK MELLOM BEREGNET OG OBSERVERT D50 FOR BEREGNINGSMETODER .....	62



## FORORD

Masteroppgaven ”Plastring av fyllingsdammer – effekt av forband på styrken av plastringen” er skrevet av Eirik Helgetun Pettersen våren 2015. Oppgaven omhandler plastring av fyllingsdammer i likhet med prosjektoppgaven ”Plastring av fyllingsdammer – Kvalitet av plastring”, selv om denne oppgaven har et annet fokus. Oppgaven markerer slutten på tiden som student i Trondheim, og er det avsluttende arbeidet på Bygg- og miljøteknikkstudiet ved NTNU.

Oppgaven har bestått av et litteraturstudie og laboratoriearbeid, og har vært svært interessant. Det har gitt mulighet til å anvende kunnskap fra tidligere fag i studiet samtidig som jeg har lært utrolig mye nytt. Selv om laboratoriearbeidet har til tider har vært utfordrende og tidkrevende har det gitt nyttig og praktisk innsikt i utførelse og virkning av plastring på fyllingsdammer.

Jeg vil takke veileder Leif Lia for inspirerende og god veiledning. Videre vil jeg rette en stor takk til medveileder Priska H. Hiller for tett oppfølging, hjelp med arbeid i laboratoriet og gode faglige diskusjoner. Jeg vil også takke Geir Tesaker og Jochen Aberle for hjelp med praktiske utfordringer knyttet til arbeidet i laboratoriet. Jens Jakobsen takkes også for godt samarbeid i forbindelse med gjennomføring av laboratorieforsøk. Til slutt vil jeg takke Franzefoss Pukk AS som bidro med steinene som er benyttet i forsøkene.



Eirik Helgetun Pettersen





## SYMBOLLISTE

Symbol	Enhet	Forklaring
$a$	$mm$ $m$	a-akse, steinens lengste akse
$b$	$mm$ $m$	b-akse, steinens midlere akse
$c$	$mm$ $m$	c-akse, steinens korteste akse
$d$	$mm$ $m$	Steindiameter (generell).
$d_{xx}$	$m$ $mm$	xx % av steinmassen er mindre enn $d$
$m_s$	$kg$	Vekt av stein
$m_{s,v}$	$kg$	Vekt av stein neddykket i vann
$\rho_s$	$kg/m^3$	Tetthet av stein
$\rho$	$kg/m^3$	Tetthet av vann, $1000 kg/m^3$
$K$	–	Faktor for å beskrive steinens form
$F$	$N$	Kraft(generelt)
$C_D$	–	Dimensjonsløs dragkoeffisient
$C_L$	–	Dimensjonsløs løftekoeffisient
$A$	$m^2$	Areal(generelt)
$v$	$m/s$	Vannhastighet
$W_s$	$N$	Neddykket steinvikt
$g$	$m/s^2$	Tyngdeakselerasjon, $g=9,81 m/s^2$
$S$	–	Helning, $S=1:m=\tan\delta$
$\varphi_{rf}$	°	Friksjonsvinkel mellom filter- og plastrinslag
$q$	$l/s/m$ $m^3/s/m$	Enhetsvannføring
$q_{init}$	$l/s/m$ $m^3/s/m$	Enhetsvannføring med erosjon av første stein

$q_c$	$l/s/m$ $m^3/s/m$	Enhetsvannføring ved globalt brudd
$q_{maks}$	$l/s/m$ $m^3/s/m$	Største tålte enhetsvannføring over tid
$V$	$m^3$	Volum (generelt)
$C_u$	–	Korngraderingstall
$t$	$m$	Tykkelse av plastringslag
$SG$	–	Spesifikk tyngdetetthet
$\alpha$	°	Steinhelning
$H_d$	$m$	Damhøyde
$L$	$m$	Lengde (generelt)
$Fr$	–	Froudetall
$Fr_s$	–	Steinbasert Froudetall
$We$	–	Webertall
$Re$	–	Reynoldstall
$K_l$	$m/s$	Laminær permeabilitet
$K_t$	$m^2/s^2$	Turbulent permeabilitet
$k_s$	$m$	Sandruhet
$C_A$	–	Luftandel
$I_e$	–	Helning på energilinje
$\Delta x, y, z$	$mm$ $m$	Forskyvning
$h$	$mm$ $m$	Vanntand
$n$	%	Porøsitet
$N$	–	Antall steiner

---

# 1 INNLEDNING

## 1.1 Bakgrunn

En fyllingsdam består hovedsakelig av oppfylte og komprimerte materialer av jord, grus og stein. Dersom mer enn 50% av dammens volum er sprengstein betegnes dammen som en steinfyllingsdam (Kjærnsli et al., 1992). I følge Norges vassdrags- og energidirektoratets damdatabase (NVE) finnes det pr. februar 2014 186 steinfyllingsdammer som er høyere enn 15 meter. De fleste av disse er bygd i perioden mellom 1950 og 1990, med en topp på 60- og 70-tallet, da store vannkraftutbygginger ble gjennomført (Lia et al., 2013). Norske steinfyllingsdammer bygges ofte med en tett kjerne av morene eller asfalt i senter av dammen med lagdelte materialsoner utover. De typiske materialsonene er filtersone, overgangssone, støttefylling og skråningsvern fra innerst til ytterst. Lagene blir grovere jo lengere ut man kommer fra kjernen, og får en filtervirkning som skal hindre lekkasjer og massetransport gjennom dammen.

Skråningsvernet skal sikre at dammen tåler stor vanngjennomstrømning og overtopping forårsaket av ulykkeslast eller skade på dammen. Frem til 1960-tallet var det vanlig at steinfyllingsdammene ble bygget uten tilstrekkelig skråningsvern, og grunnet erosjonsproblemer på oppstrøms side (vannsiden) så man seg nødt til sikre denne siden bedre. Løsningen ble å dumpe store steiner ut i skråningen slik at de virket som erosjonssikring for de innenforliggende lagene. Denne metoden er kjent som rauset steinfylling. På 1970-tallet ble det satt et økt fokus på damsikkerhet, og det ble besluttet å benytte den samme type skråningsvern på nedstrøms side (luftsiden) av dammen. Det er forskjellig belastning på oppstrøms og nedstrøms skråning av dammen. Plastringen på luftsiden har som formål motstå krefter fra is, tele og bølger, mens plastring på nedstrøms side skal sikre at dammen tåler stor vanngjennomstrømning og overtopping. I forbindelse med klimaendringer der det spås mer ekstremvær må det tas høyde for at man kan få situasjoner der flom fører til overtopping av kjernen eller tilstopping av flomløp. For å sikre seg bedre mot dette sier gjeldende norsk regelverk at fyllingsdammer skal ha skråningsvern på både oppstrøms og nedstrøms side, bygd med en byggeteknikk kalt plastring. Teknikken består av at hver stein plasseres individuelt ved hjelp av gravemaskin. Steinene skal ordnes stabilt i forband slik at vertikale og horisontale sprekkesett unngås. Steinen legges med fall og lengderetning inn mot damkroppen. På denne måten skiller skråningsvernet på norske fyllingsdammer seg ganske klart fra internasjonale dammer, der man i større grad benytter seg av rauset steinfylling.

Kravet om at fyllingsdammer skal sikres med plastring på begge sider har tilbakevirkende kraft, og vil etter hvert gjelde alle norske fyllingsdammer. En rekke av de

eldre dammene vil de kommende årene være gjenstand for revurdering. Kostnaden ved å oppgradere norske fyllingsdammer for å imøtekomme kravene i forskriftene estimeres til ca. 8 milliarder NOK (Energi Norge, 2011). En stor del av dette arbeidet, både tidsmessig og økonomisk, vil være knyttet til plastring av nedstrøms skråning.

Selv om norske fyllingsdammer har blitt plastret de siste 30-40 årene, er det fortsatt behov for økt kunnskap om virkemåten og styrken av plastring. For å øke kunnskapen om plastring finansierte Energi Norge i 2011 et forskningsprosjekt kalt "Fullskalaforsøk på plastring av fyllingsdammer." I 2013 ble det også satt i gang en doktorgradsstudie på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) med mål om bidra til å optimalisere og effektivisere dagens plastring. Denne oppgaven utføres som et samarbeid med dette prosjektet. Det har vært diskutert i bransjen om det endrede regelverket virkelig vil gi mest sikkerhet for pengene. I en artikkel fra Teknisk Ukeblad (2015) omtales en rapport fra Norconsult som sier at *"Det er gått flere eksempler på at relativt små endringer i veiledere har store økonomiske konsekvenser uten at sikkerheten til allmenheten ble endret."*

## **1.2 Formål og omfang**

Oppgavens formål er å undersøke hvordan plastringens kvalitet og styrke påvirkes av at steinene legges i forband. Forband er et byggeteknisk uttrykk som stammer fra murerfaget. Oppgaven er løst ved hjelp av fysiske modellforsøk og er utført i samarbeid med doktorgradsstipendiat og medveileder Priska H. Hiller (PHH) og masterstudent Jens Jakobsen (JJ). Modellforsøkene omfatter kun skråningsvern utsatt for overtopping, da modellen ikke muliggjorde testing av gjennomstrømning.

## 2 TEORI

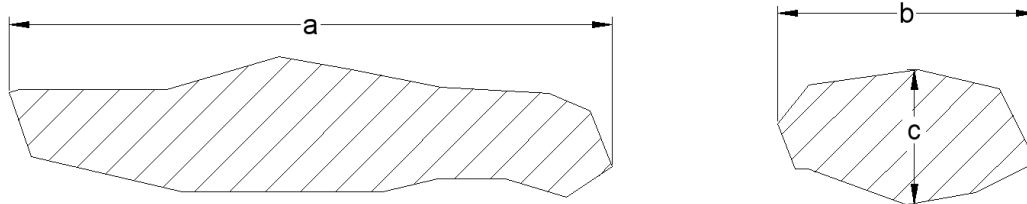
### 2.1 Parametere som beskriver stein

Plastring er en form for skråningsvern. I litteraturen er det flere definisjoner av hva plastring er. Skråningsvernet kan utføres med varierende materialer og metoder, men i denne oppgaven vil skråningsbeskyttelse omtales på følgende måter.

- Plastring er sammensetning av stein som er stabilt ordnet i forband. Forband vil si at steinene legges slik at vertikale og horisontale sprekkesett i skråningsvernet brytes opp. Plastringssteinene plasseres ut slik at andelen hulrom minimeres og samtidig sørger for god innlåsing mellom steinene. Formålet med en plastring er å beskytte en konstruksjon eller område mot vannet krefter. Stabiliteten til en plastring er en funksjon som er avhengig av steinenes størrelse, form, vekt og holdbarhet. I tillegg til den individuelle karakteristikken til enkelsteiner er plastringen også avhengig av forhold på stedet, gradering av steinen som benyttes og tykkelse av laget som legges (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2001). Internasjonal brukes ofte begrepet ”placed riprap” om skråningsvern der steinene plasseres ut individuelt med gravemaskin.
- Rauset fylling er en form for skråningsbeskyttelse der steinene dumpes slik at de faller på plass ved hjelp av gravitasjon. Denne metoden er gunstig økonomisk og er svært vanlig internasjonalt (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2001). I internasjonal litteratur omtales ofte rauset fylling som ”riprap”.

#### Størrelse

Normalt beskrives steinens størrelse og form ved hjelp av lengden til steinens tre akser. Aksene navngis ofte a-, b- og c-aksen der a-aksen er den lengste og deretter b- og c-aksen i avtagende rekkefølge. Det vil ikke alltid være slik at a, b og c-aksen er lengste-, midlere- og korteste akse samtidig som de står vinkelrett på hverandre. Det er derfor anbefalt å måle b-aksen først, og deretter måle a- og c-aksen normalt på b-aksen. Grunnen til at man begynner med b-aksen er at den ofte gir best samsvar sammenlignet med kornfordelingskurver basert på kvadratiske sikteprøver. (Jenssen & Tesaker, 2009).



Figur 2.1 – Definisjon av steinens akser

Ved hjelp av formel (2.1) kan karakteristisk steinstørrelse  $d$  regnes ut.

$$d = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \quad (2.1)$$

### Form

Den enkelte steinens form vil påvirke innlåsingsevnen mot de omkringliggende steinene. Det er fordelaktig å benytte helleformede skarpkantede steiner med relativt plane flater fremfor avrundede steiner. Avrundede steiner har dårlige innlåsingsegenskaper og blir dermed mindre motstandsdyktig mot bevegelser. Skarpkantede steiner som er avlange eller tavleformede har en tendens til å danne små broforbindelser over mer blokkaktige steiner som ligger under. Disse steinene har også en tendens til å stikke mer ut av plaststringens overflate. Steinformen er definert ved at forholdet mellom lengste og korteste akse er større enn 2,5 som vist i formel (2.2).

$$a/c > 2,5 \quad (2.2)$$

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2001) anbefaler at maksimalt 30% av steinene har denne formen. Jenssen & Tesaker (2009) har en mindre konservativ tilnærming til forholdet mellom lengste og korteste akse som vist i formel (2.3).

$$a/c > 3 \quad (2.3)$$

Siden avlange steiner får dårligere kontakt med de omkringliggende steinene og lettere blir skadet enn kubisk stein anbefaler enkelte håndbøker at andelen stein av denne typen blir begrenset til maksimalt 5% for tung steinsikring ( $m_s > 500$  kg) og 20% for lett stein ( $m_s < 40$  kg).

### Tetthet og vekt

Steinens vekt vil bidra til å motstå de drivende kreftene fra vannet. Tettheten av steinen er avhengig av bergart, og er vanligvis i området mellom 2400 og 2800 kg/m<sup>3</sup>. En vanlig metode for å bestemme tettheten til en bergart er å henge en stein fra en vekt og veie den både i luft og neddykket i vann (Jenssen & Tesaker, 2009). Tettheten finnes av formel (2.4), der  $\rho_s$  og  $\rho$  er tetthet av stein og vann i kg/m<sup>3</sup>.  $m_s$  er vekten av steinen, mens  $m_{s,v}$  er steinens vekt neddykket i vann.

$$\rho_s = \frac{\rho}{1 - \frac{m_{s,v}}{m_s}} \quad (2.4)$$

Det kan være utfordrende å finne vekten av en stein ute i felt, da det sjeldent er utstyr å veie steinene med. Det er derfor utviklet flere metoder som regner ut steinens vekt basert på form og lengde av akser. Formel (2.5) beregner steinens masse  $m_s$  som en funksjon av steinens tetthet  $\rho_s$  og lengde av steinens midlere akse  $b$ . I tillegg benyttes faktoren  $K$  som beskriver steinens form. I steinbrudd varierer  $K$  fra 0,34 til 0,72. Det er vanlig å anta  $K=0,6$  for bruddstein (Jenssen & Tesaker, 2009)

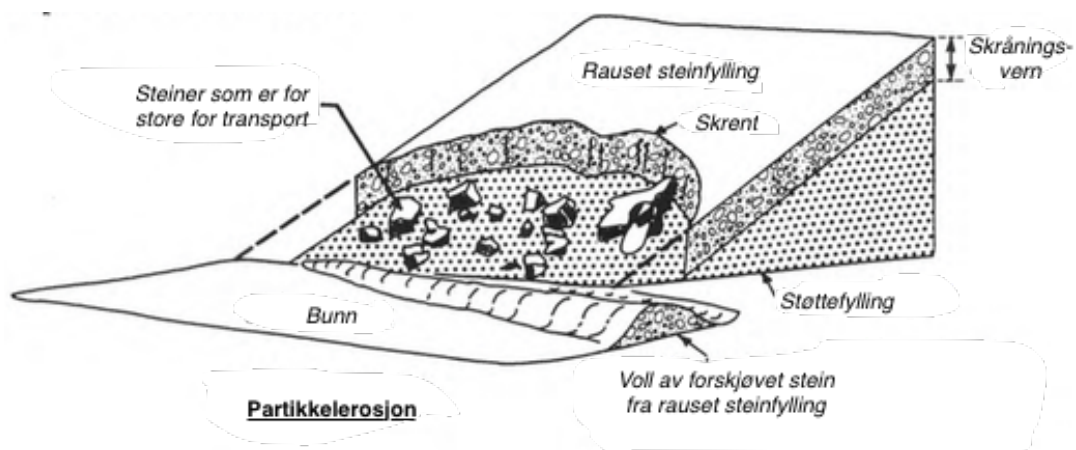
$$m_s = K \cdot \rho_s \cdot b^3 \quad (2.5)$$

## 2.2 Brudd i skråningsvern

Blodgett & McConaughy (1986) identifiserte fire standardtyper brudd i rauset fylling utsatt for overtopping.

### Partikkelerosjon

Partikkelerosjon er ansett å være den vanligste bruddtypen i plastring utsatt for overtopping. Erosjonsformen kjennetegnes med at steinene ikke er store nok til å motstå skjærbelastningen fra vannstrømmen ved overtopping. De mest sannsynlige årsakene til partikkelerosjon er at steinstørrelsen er for liten, for bratt skråning som gjør at skråningens friksjonsvinkelen overskrides og at graderingen av plastringssteinene er for uniform.

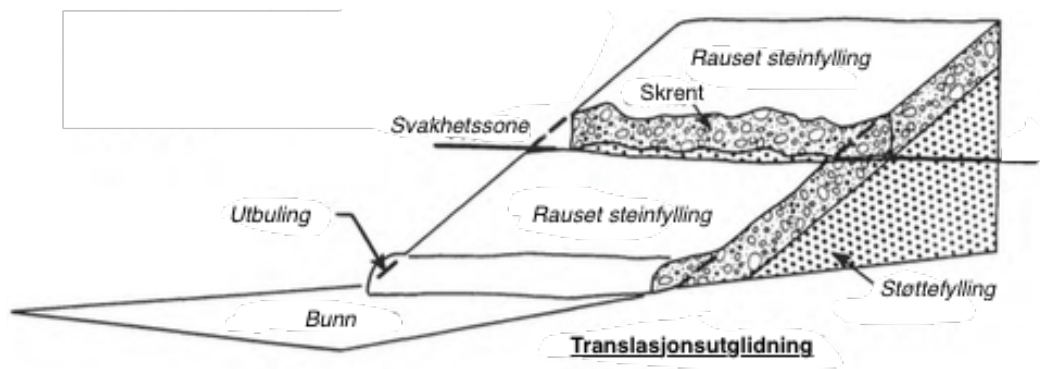


Figur 2.2 – Prinsippmodell av partikkelerosjon (Blodgett & McConaughy, 1986)

### Translasjonsutglidning

Translasjonsutglidning er en bruddtype som er forårsaket av at nedre del av fyllingen sklir ned. Dette fører til at det dannes en horisontal svakhetsone. Ved at den nedre delen av skråningsvernet sklir ned vil dette føre til at de overliggende massene

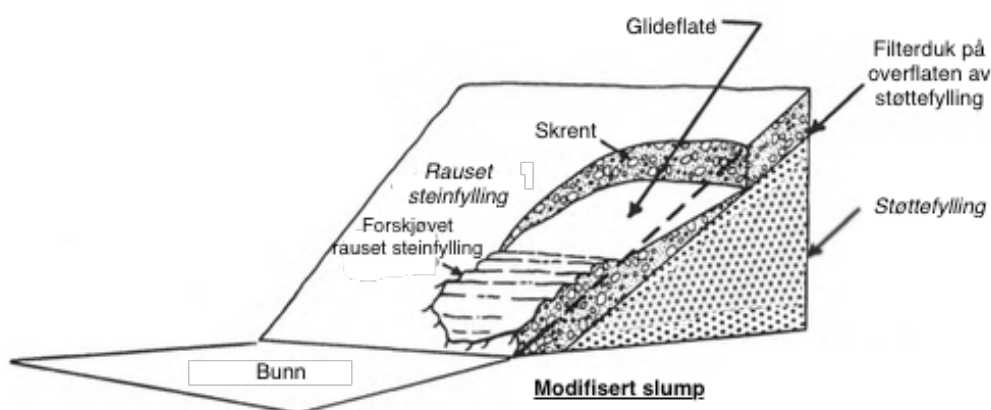
undergraves. Det er flere forklaringer på hvorfor vi får denne typen brudd. Skråningen kan være for bratt eller manglende tåstein i forbindelse med partikkelerosjon i plastringens nedre område. Ekstra poretrykk i støttefyllingen i forbindelse med store nedbørmengder eller stor variasjon i vannstand vil kunne redusere friksjonsmotstanden mot den rausede fyllingen. I denne forbindelse vil filterlag kunne virke negativt ved at det skaper et glideplan som plastringen kan gli langs.



Figur 2.3 – Prinsippmodell av translasjonsutglidning (Blodgett & McConaughy, 1986)

### Modifisert slump

Modifisert slump er bruddmekanisme der massene beveger seg langs en intern glideflate i plastringlaget. Bruddflaten er ofte et relativt flatt plan. Sannsynlige årsaker kan være at skråningen er så bratt at det ligger opp mot materialets friksjonsvinkel, og dermed kan små bevegelser føre til instabilitet og brudd.



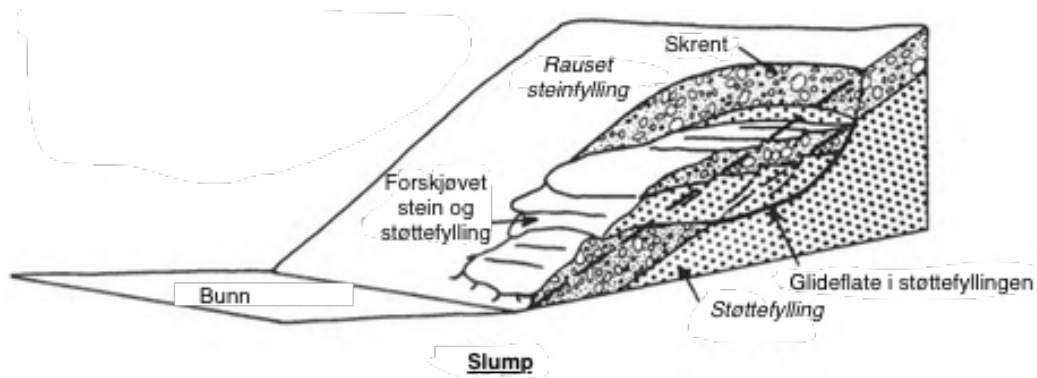
Figur 2.4 – Prinsippmodell av modifisert slump (Blodgett & McConaughy, 1986)

### Slump

Slump er en bruddtype der materialet får en rotasjonsbevegelse langs en konkav flate. Denne bruddtypen er ofte relatert til skjærbrudd langs glideflater i den underliggende

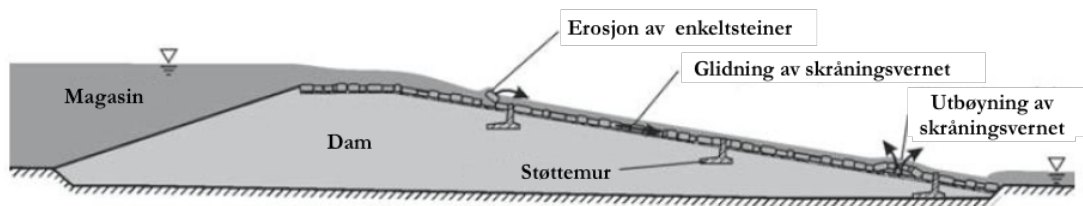


støttefyllingen. Andre årsaker kan være inhomogene materialer i støttefyllinger med impermeable lagstrukturer som virker som glideplan utsatt for høyt poretrykk. For bratt skråning og overbelastning av øvre del av skråningen kan også bidra til å utløse slumpbrudd.



Figur 2.5 – Prinsippmodell av slump (Blodgett & McConaughy, 1986)

Siebel (2007) oppsummerte også forskjellige bruddmekanismer som er mer spesifikt rettet for steiner lagt som plastring. Det ble her fokusert på bruddmekanismer som starter i plastringlaget. Erosjon av enkeltsteiner er en bruddmekanisme som har mye til felles med partikkelerosjon. Glidning av hele skråningsvernet ligner på translasjonsutglidning der plastringlaget sklir langs det en glideflate i overgangen til underliggende materiale. I tillegg ble en bruddmekanisme kalt utbøyning introdusert som vist i figur 2.6.



Figur 2.6 – Bruddmekanismer i plastringlaget (Siebel, 2007)

Utbøyningen utløses av høye skjærspenninger kombinert med stor løftekraft. Det ble gjort en rekke forenklinger i forbindelse med undersøkelsen. Undersøkelsen resulterte i et teoretisk og forenklet scenario for å tilnærme problemet. Siebel anbefalte ytterligere undersøkelser for å få en bedre forståelse av problemstillingen. Det er ikke funnet publikasjoner som omtaler utviklingen av det videre arbeidet omkring problemstillingen.

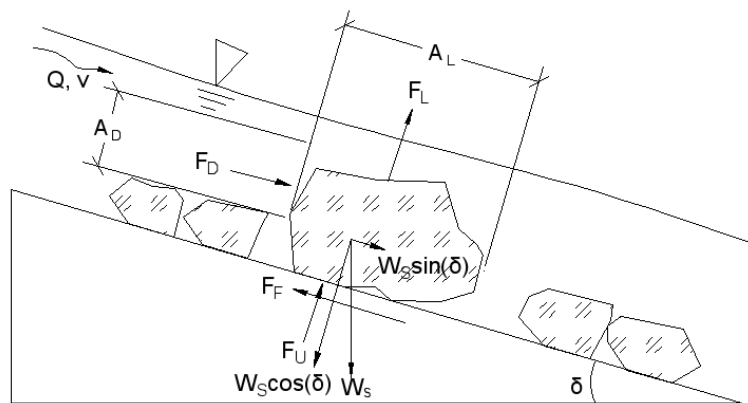
### 2.3 Krefter som virker på plastringstein

Når en steinfyllingsdam overtoppes vil strømmende vann påføre steinene i skråningsvernet krefter. Kraftene som virker på en plastringstein vil kunne føre til at de

løsner og rives ut av skråningsvernet. Steinene vil ligge i ro frem til kreftene blir store nok til å løfte eller rive steinene ut av skråningsvernet. Steinenes stabilitet vil være avhengig av om steinen ligger løst og virker som en enkeltstein eller om den er plassert i et plastret dekke med kontakt med de omkringliggende steinene.

### 2.3.1 Belastning og stabilitet av enkeltstein

I rauset steinfylling er det typisk med steiner som ligger løst, og dermed vil virke som enkeltstein. I et slikt tilfelle vil steinen bevege seg når de ytre skråningskreftene er store nok til skyve, velte eller løfte den. Krefter fra steinens vekt, størrelse og friksjon mot underlaget vil bidra til å motvirke bevegelse og ha en stabiliserende effekt. Kraftene som virker er illustrert i figur 2.7.



Figur 2.7 –Krefter som virker på enkeltstein

#### Dragkraft og løftekraft

Trykk fra det strømmende vannet og sug parallelt med underlaget vil gi en dragkraft som virker på den delen av steinen stikker opp over resten av skråningsvernet. Dragkraften  $F_D$  er gitt av formel (2.6), og beregnes i newton.  $C_D$  er dimensjonløs dragkoeffisient, mens  $A_D$  er arealet som er utsatt for drag.  $\rho$  er vannets tetthet og  $v$  er vannets representative strømningshastigheten over steinen i m/s.

$$F_D = C_D \cdot A_D \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.6)$$

Trykkforskjeller som dannes på grunn av lokale hastighetsvariasjoner over steinen danner løftekraften  $F_L$ . Denne kraften vil forsøke å løfte fra steinen fra skråningen. Løftekraften virker normalt på underlaget.  $C_L$  er løftekoeffisienten,  $A_L$  er arealet utsatt for løft.

$$F_L = C_L \cdot A_L \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.7)$$

### Steinens egenvekt

Steinens egenvekt vil ha en stabiliserende effekt. Siden steinen vil være dykket av vann når dammen overtoppes, må det regnes med neddykket steinvekt  $W_s$  [N] som vist i (2.8).  $V_s$  er steinens volum i kubikkmeter.

$$W_s = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot V_s \quad (2.8)$$

I damskråninger dekomponeres vanligvis  $W_s$  slik at man finner komponentene som virker normalt og parallelt med underlaget. Dette gjør at kreftene virker i samme plan som de resterende kreftene.

### Friksjonskraft

I underkant av steinen vil det virke en friksjonskraft  $F_F$  mot underlaget. Underlaget kan enten bestå av andre steiner enkeltsteiner eller en finere støttefylling.  $\delta$  er skråningshelningen gitt i grader, mens  $\varphi_{rf}$  er friksjonsvinkelen mellom bunn og steiner i grader.

$$F_F = (W_s \cdot \cos(\delta) - F_L) \cdot \tan(\varphi_{rf}) \quad (2.9)$$

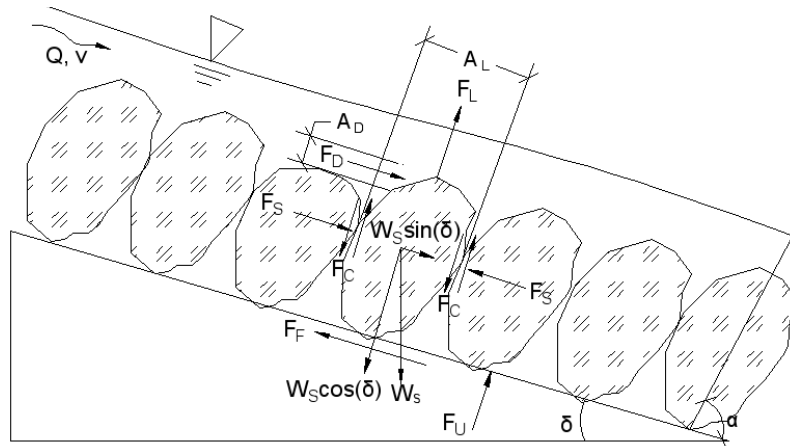
### Kraft fra utstrømmende vann

I tillegg vil det i tilfeller der damkroppen utsettes for gjennomstrømming induseres en kraft  $F_U$  fra det utstrømmende vannet som virker på steinen. Kraften vil forsøke å skyve steinen ut av skråningsvernet. Kraften omtales ikke ytterligere siden forsøkene i denne oppgaven er utført uten gjennomstrømming.

### 2.3.2 Belastning og stabilitet av enkeltstein lagt i plastring

Det er tatt utgangspunkt i strømkreftene som virker på en enkeltstein beskrevet i punkt 2.3.1. Det er forsøkt å sette opp en forenklet modell som viser virkningen av å legge steinene i forband med innbyrdes kontakt og fall innover mot dammen. Figur 2.8 illustrerer de virkende kreftene på en plastringsstein lagt i en plastring utsatt for overtoppende vannstrøm. Steinhelningen  $\alpha$  er definert som vinkelen mellom steinens lengste akse og bunnhelningen, og vil ha innvirkning på stabiliteten av plastringen ved overtopping av fyllingsdammer. Erfaringer fra tidligere forsøk viser at økt steinhelning medfører bedret stabilitet (Lia et al., 2013).

Ved at steinene legges som plastring vil steinene få overført krefter fra tyngden av overliggende masser. Denne kraften vil virke normalt på kontaktpunktene mellom steinene og er kalt sidekraften  $F_s$ . Ved en eventuell bevegelse av steinen vil sidekraften føre til at det dannes en friksjonskraft i kontaktpunktene mellom steinene. Kontaktkraften er markert med indeks  $F_C$  i figur 2.8.



Figur 2.8 – krefter som virker på stein lagt i plastring

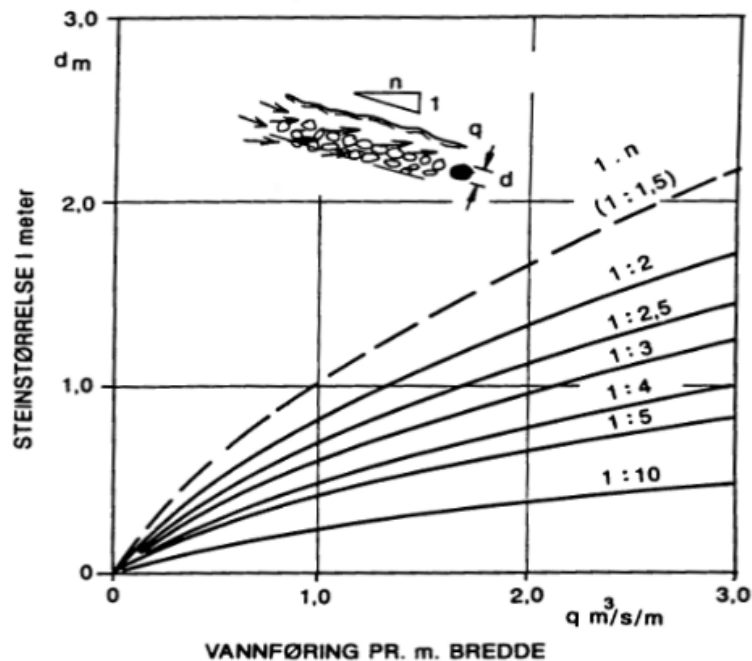
## 2.4 Tidligere modell- og prototypforsøk

I norsk sammenheng har det vært gjennomført flere forskningsprosjekter som involverer modell- og prototypforsøk av fyllingsdammer. I denne oppgaven vil to forskningsprosjekter presenteres, da disse er de største og mest relevante i norsk sammenheng.

### 2.4.1 Dimensjoneringskurver fra Solvik

Arbeidet Solvik (1962) gjorde i forbindelse med utarbeidelsen av dimensjoneringskurver for steinstørrelse i nedstrøms damskråning var i sin tid det mest omfattende og relevante for steinfyllingsdammer her til lands. Solvik utførte modellforsøk der forsøksdammene besto av homogene masser. Det var ikke lagt noen form for skråningsvern i dammene. Dimensjoneringskurvene var et resultat av resultater fra modellforsøk og formelverk basert på kraftlikevekt av steiner utsatt for strømmende vann. Kurvene omfattet steiner plassert i nedstrøms damskråning og damtå, og var kun gyldig for ensgraderte materialer (Solvik, 1962).

Solvik utviklet i 1987 sine endelige dimensjoneringskurver i forbindelse NVE-prosjektet damsikkerhet. Arbeidet resulterte i figurer ment brukt til praktisk dimensjonering av tåstein og stein i utstrømningsområdet i nedstrøms skråning. Kurvene for stein i nedstrøms skråning er vist i figur 2.9.



Figur 2.9 – Solviks endelige dimensjoneringskurve for steinstørrelse i nedstrøms skrånning (Damsikkerhetsprosjektet, 1992)

#### 2.4.2 Stabilitet og bruddforløp av dammer

Det største og mest omfattende norske forsknings- og utviklingsprosjektet som omhandler steinfyllingsdammers stabilitet ble satt i gang i 2003 av Energibedriftens Landsforening (EBL), nå Energi Norge. I forbindelse med prosjektet ble det gjennomført 23 modellforsøk i NTNUs laboratorier i tillegg til 12 storskalaforsøk ved Røssvatn Dam. Prosjektet ble gjennomført som tre delprosjekter (DP) (EBL Kompetanse, 2005, EBL Kompetanse, 2007, EBL Kompetanse, 2004).

- DP1: Skjærstyrke av steinfylling og stabilitet av damskråninger
- DP2: Stabilitet av støttefylling og damtå i steinfyllingsdam med stor lekkasje
- DP3: Bruddforløp i fyllingsdammer

Delprosjekt 2 tok spesifikt for seg stabilitet av støttefylling og damtå med hovedfokus på steinfyllingsdammer med stor lekkasje. Forsøkene hensikt var å tilegne seg mer kunnskap om stabilitet av støttefylling ved lekkasje slik at kunnskapen kunne brukes i forbindelse med utarbeiding av nye retningslinjer for fyllingsdammer innen sikring av støttefylling, damtå og skråningsvern (EBL Kompetanse, 2005). Som et resultat av forsøkene som ble gjennomført i forbindelse med DP2 ble det foreslått en formel (2.10) for dimensjonering av plastringsstein ved vanngjennomstrømning. Formelen ble senere brukt som utgangspunkt for formel (2.12) som i dag brukes for å dimensjonere nødvendig steinstørrelse i nedstrøms skrånning.  $d_{50}$  er median steinstørrelse i meter,

mens  $S$  er skråningshelningen (tangens til helningsvinkelen). Enhetsvannføringen  $q$  settes inn som  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

$$d_{50} = 0,43 \cdot S^{0,43} \cdot q^{0,78} \quad (2.10)$$

Det er verdt å merke seg at forsøkene som formelen bygger på ble gjort uten noen form for skråningsvern og kun besto av homogene steinfyllingsdammer. Forsøkene viste også at dimensjoneringskurvene til Solvik gjennomgående underestimerte bruddvannføring, både for skråning og damtå.

## 2.5 Dimensjoneringskriterier for steinsikring i nedstrøms skråning

Erosjon er uønsket i forbindelse med hydrauliske konstruksjoner, deriblant elveskråninger, bratte kanaler, rundt bro Pilarer og fyllingsdammer. På grunn av dette har det blitt utviklet en rekke metoder for å dimensjonere nødvendig steinstørrelse i det erosjonsbeskyttende laget. Den dimensjonerende steinstørrelsen sørger for at steinene er store nok og at det erosjonsbeskyttende laget er tykt nok til å motstå de virkende kreftene fra vannet.

### Norske retningslinjer

Den første damforskriften, Forskrift for dammer, ble utgitt i 1981. Før den tid ble dimensjonering og utførelse gjort på bakgrunn av erfaringer og publisert litteratur både nasjonalt og internasjonalt.

Siden den gang har regelverket og tilhørende norsk praksis utviklet og endret seg, og per dags dato er Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (2009), heretter omtalt som Damsikkerhetsforskriften og Veileder for fyllingsdammer (2012) som er gjeldende. Damsikkerhetsforskriften er hjemlet i Lov om vassdrag og grunnvann, heretter omtalt som vannressursloven (2000).

#### 2.5.1 Damsikkerhetsforskriften

Norske dameiere må forholde seg til Damsikkerhetsforskriften. Forskriften forvaltes av NVE med følgende formål: *"Forskriften skal fremme sikkerhet ved vassdragsanlegg og forebygge skade på mennesker, miljø og eiendom."* (Olje- og energidepartementet, 2009).

I §5-10 (2009) er tekniske planer og krav for fyllingsdammer beskrevet, og punkt f) tar for seg nedstrøms skråning av fyllingsdammer. Det er overordnede målet er beskrevet ved at *"Nedstrøms skråning skal ha skråningsvern som sikrer at dammen tåler stor vanngjennomstrømming og/eller overtopping som følge av ulykkeslaster eller skade på dam."* Videre beskrives det at stein som legges i skråningen skal ha tilfredsstillende størrelse og kvalitet i tillegg til å være stabilt ordnet i forband med fall og lengste akse orientert inn mot dammen. Det vektlegges også at overgangen mot støttefyllingen må utføres slik at innenforliggende materiale ikke blir vasket ut. Behovet for forsterkningstiltak med større

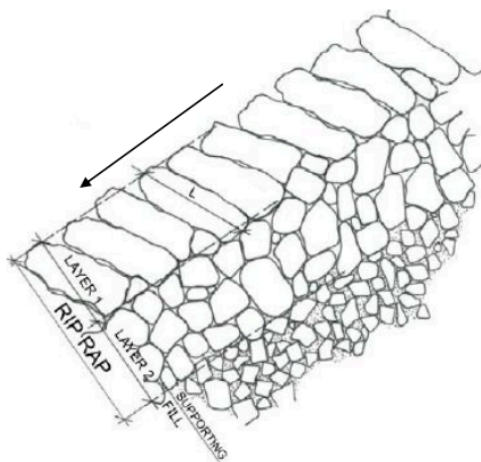
stein i laveste del av skåningen må vurderes i hvert enkelt tilfelle med hensyn til damprofil og potensielle ulykkestilfeller (Olje- og energidepartementet, 2009).

### 2.5.2 Veileder for fyllingsdammer

Veileder for fyllingsdammer (2012) er en publikasjon fra NVE som har som hensikt å utdype kravene som beskrevet i §5-10 og §6-1 i damsikkerhetsforskriften. Siden det ikke finnes noen egen norsk standard for fyllingsdammer, er veilederen relativt omfattende. Norske standarder for geoteknisk prosjektering er ikke gjeldende for fyllingsdammer. Løsningene som er beskrevet i veilederen er godkjente av NVE, men andre løsninger kan også godtas dersom sikkerheten kan dokumenteres.

#### Nedstrøms skråning

I veileder for fyllingsdammer anbefales det at skråningsvernet legges i to sjikt som illustrert i figur 2.10. Det ytterste laget er selve plastringslaget, mens det innenforliggende sjiktet skal fylle hulrom mellom steinene i plastringslaget og sørge for en gradvis overgang til støttefyllingen ligger innenfor skråningsvernet.



Figur 2.10 – Plastring lagt i to lag (Lia et al., 2013)

Sjiktet som ligger innenfor plastringslaget er heretter omtalt som filterlaget. I veilederen anbefales det at steinstørrelsen i filterlaget skal tilfredsstillе kriteriet i formel (2.11) der  $d_{max}$  er steindiameter for største stein i plastringslaget og  $d_{min,filter}$  er steindiameter for minste stein i filterlaget.

$$d_{min,filter} > d_{max}/4 \quad (2.11)$$

I veilederen for fyllingsdammer er det gitt en empirisk formel som kan benyttes til å beregne minimum steinstørrelse i for stein i plastringslaget i nedstrøms skråning. Denne formelen bygger på formel (2.10) fra EBL Kompetanse, omtalt i punkt 2.4.2. Formelen ble modifisert for å oppnå større sikkerhet, der NVE vektla bruddkriteriet for første lokale utglidning i de mest relevante forsøkene fra forskningsprosjektet. Ved bruk av

denne formelen beregnes minimum steinstørrelse  $d_{min}$  i meter. Skråningshelningen  $S$  settes inn som tangens til helningsvinkelen, og  $q$  er enhetsvannføringen gitt i  $m^3/s/m$ .

$$d_{min} = 1,0 \cdot S^{0,43} \cdot q^{0,87} \quad (2.12)$$

Krav til størrelse av plastringsstein er avhengig av dammens konsekvensklasse. Kravene er oppsummert i tabell 2.1.  $q_{min}$  er minste enhetsvannføring steinen må kunne motstå, mens  $V_{min}$  er minste tillate steinvolum.

Tabell 2.1 – Krav til steinstørrelse i nedstrøms skråningsvern for ulike konsekvensklasser (NVE, 2012)

Konsekvensklasse	Krav
1	$q_{min} \geq 0,3 [m^3/s/m]$
2	$q_{min} \geq 0,5 [m^3/s/m]$
3	$q_{min} \geq 0,5 [m^3/s/m]$
4	$V_{min} = 0,15 [m^3]$

Veilederen sier også at forholdet mellom største og minste steinstørrelse bør være mindre enn 1,7(NVE, 2012).

### Kronevern

Veileder for fyllingsdammer (2012) sier at "Damtoppen skal forsterkes med kronevern av stor stein av god kvalitet som er motstandsdyktig mot frost." Kravene til kronevern avhengig av dammens konsekvensklasse er oppsummert i tabell 2.2.

Tabell 2.2 – Krav til kronevern for ulike konsekvensklasser (NVE, 2012)

Konsekvensklasse	Krav
1	Skilles ikke mellom kronevern og nedstrøms skråningsvern
2	Yttersteinene skal ha størrelse som tilsvarer dimensjonering av oppstrøms skråningsvern, men skal ikke være mindre enn $0,15 m^3$
3	Yttersteinene skal ha $V_{min} = 0,5 m^3$
4	Yttersteiene skal ha $V_{min} \geq 1,0 m^3$ . Store hull plugges i tillegg med mindre stein.

### 2.5.3 Internasjonale beregningsmetoder og litteratur

I internasjonal litteratur er det publisert en rekke artikler om erosjonsbeskyttelse av skråninger. Skråningsvern benyttes ikke bare i forbindelse med steinfyllingsdammer, men også i forbindelse med andre hydrauliske konstruksjoner. Videre presenteres et



utvalg beregningsmetoder som kan benyttes til å beregne nødvendig steinstørrelse i skråningsvern. Det er forsøkt å velge de mest relevante og oppdaterte metodene. Det påpekes at dette ikke er dimensjoneringsformler med innlagt sikkerhetsfaktor. Beregningsmetodene er empiriske formler basert på regresjonsanalyser av eksisterende forsøksresultater.

#### 2.5.4 Siebel

Siebel (2007) gjennomførte testforsøk på små fyllingsdammer der helningen varierte mellom 1:3 og 1:15. Bakgrunnen for forsøkene var en økende tendens av flommer med økt vannføring. I Tyskland, der forsøkene ble utført, finnes det en rekke små fyllingsdammer som virker som fordrøyningsbasseng ved flommer. Disse dammene bygges sjelden med egne betongoverløp, da det foretrekkes å konstruere dammene slik at de kan motstå delvis eller fullstendig overtopping.

Steinene som ble benyttet i forsøkene hadde en median steinstørrelse  $d_{50}=54-77$  mm. Damskråningene ble bygget med to lag rauset fylling. Siebel undersøkte flere brudd- og erosjonstyper. Deriblant ble stabiliteten av enkeltsteiner utsatt for strømming i et gitt tidsintervall undersøkt. Dette ble gjort ved å måle vekten av de eroderte steinene i forhold til den totale steinvekten av hele fyllingen. Dette forholdstallet ble brukt til å utvikle et erosjonskritisk Froudetall, som ble videreutviklet til formel (2.13) som angir median steinstørrelse  $d_{50}$  for å unngå erosjon. Parameterne som inngår settes inn med SI-enheter.  $S$  er skråningshelning,  $q$  er maksimal tillatt enhetsvannføring og  $\rho$  og  $\rho_s$  er tetthet av henholdsvis vann og stein.

$$d_{50} = 1,71 \cdot S^{0,68} \cdot q^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right)^{1/3} \quad (2.13)$$

#### 2.5.5 Khan & Ahmed

I 2011 brukte Khan og Ahmed resultatene fra 53 stabilitetstester utført med rauset erosjonssikring til å utvikle en beregningsmetode for nødvendig steinstørrelse for rauset erosjonssikring. Resultatene var hentet fra Robinson et al. (1998) og Abt & Johnson (1991).

I de 53 forsøkene ble det benyttet stein med median steinstørrelse  $d_{50}$  mellom 15-178 mm. Videre varierte spesifikke tyngdetettheten  $SG$  fra 2,54-2,82, mens korngraderingstallet  $C_u$  var 1,25-2,30. Forsøkene ble utført med skråningshelning,  $S$ , som varierte mellom 1:100 og 1:2,5.

Khan & Ahmeds brukte den samme databasen bestående av de 53 forsøkene til å gjennomgå eksisterende beregningsmetoder der observert  $d_{50}$  ble sammenlignet med beregnet  $d_{50}$ . Resultatene fra analysen viste blant annet at steinstørrelsen blir betydelig overestimert i tillegg til at det ikke tas hensyn til viktige parametere for å beskrive plastringen (Khan & Ahmed, 2011).

Som et resultat av dette gjennomførte Khan & Khan en multivariabel ikke-lineær regresjonsanalyse. Analysen resulterte i en empirisk beredningsformel (2.14) som angir median steinstørrelse for kantet stein med  $\pm 20\%$  margin.

$$d_{50} = 0,66 \cdot t^{0,58} \cdot S^{0,22} \cdot C_u^{-0,45} \cdot q_{brudd}^{0,22} \quad (2.14)$$

Tykkelse av plastringslaget  $t$  målt i antall  $d_{50}$ , skråningshelningen  $S$ , korngraderingstallet  $C_u$  og kritisk enhetsvannføring  $q$  gitt i  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  er brukt som inngangsparametere i formelen.

### 2.5.6 Abt et. al.

Abt et al. (2013) publiserte en artikkel der 21 beregningsmetoder for å beregne stabil steinstørrelse i plastring utsatt for overtopping ble gjennomgått. Artikkelen gir et godt innblikk i en del av forskning som har blitt gjort fra 1936 og frem til i dag. Beregningsmetodene ble testet ved å benytte en regresjonsanalyse der observert stabile steinstørrelser ble sammenlignet med beregnet stabil steinstørrelse.

De observerte stabile steinstørrelsene ble hentet fra 10 forskjellige studier der rauset plastring ble utsatt for overtopping i laboratorier eller i kontrollerte former i felt. Totalt ble 96 datapunkter brukt som datagrunnlag (Abt et al., 2013).

Parameterne som var inkludert fra testene var median steinstørrelse, skråningshelning, enhetsvannføring, korngraderingstall og tykkelse av plastringslaget. Median steinstørrelsen  $d_{50}$  varierte mellom 15 og 655 mm. Skråningshelning  $S$  varierte fra 1:500 til 1:2, og enhetsvannføring ved brudd, fra 0,04-1,63  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Korngraderingstallet,  $C_u$ , varierte i et område mellom 1,25-5,33.

Forfatterne angir en rangering av hvilke metoder som gir best korrelasjon sammenlignet med de observerte verdiene. Khan & Ahmeds beregningsmetode (2013) er rangert som den beste, mens Siebel (2007) også befinner seg i det øvre området. Det blir også påpekt at datagrunnlaget for bratte skråninger med store steiner ( $>254$  mm) er lite, og ekstrapolering må utføres med stor forsiktighet.

### 2.5.7 Thornton et. al.

Thornton et al. (2014) tok utgangspunkt i Abt et al. (2013). Til sammen ble datapunkter fra til sammen 102 overtoppingsforsøk utført i 10 forskjellige undersøkelser benyttet til å utforme en ny beregningsmetode for stabil steinstørrelse gitt i formel (2.15). Analysen ble gjort ved hjelp av en multivariabel regresjonsanalyse. I tillegg til parameterne som ble omtalt i Abt et al. (2013), ble også spesifikk tyngdetetthet,  $SG$ , inkludert. Median steinstørrelse varierte mellom 15 og 655 mm, skråningshelning i området mellom 1:500 og 1:2 og korngraderingstall fra 1,14-5,33. I tillegg varierte enhetsvannføring ved brudd fra 0,03-1,63  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  og spesifikk tyngdetetthet fra 2,29-2,82.

Formel (2.15) ble sammenlignet med flere av beregningsmetodene omtalt i Abt et al. (2013). Beregnet median steinstørrelse ble sammenlignet med median steinstørrelsene fra databasen ved hjelp av regresjonsanalyser. Formel (2.15) ga en korrelasjonskoeffisient  $R^2 = 0,97$  og varians på 11%. Khan&Ahmeds formel (2.14) ga korrelasjonskoeffisient  $R^2 = 0,96$  og varians på 12 %, noe som indikerer at formel (2.15) gir en bedre tilpasning til databasen.

Formel (2.15) tar i bruk flere parametere, noe som gjør at behovet for å ekstrapolere verdier blir mindre. Thornton et. al. er i midlertidig klar på at overtoppingsforsøk er nødvendige hvis man har kombinasjoner som inneholder skråninger brattere enn 1:4, median steinstørrelse større enn 25,4 cm, steiner med spesifikk tyngdetetthet mindre enn 2,30 og korngraderingstall større enn 5,33.

$$d_{50} = 0,57 \cdot S^{0,20} \cdot C_u^{-0,28} \cdot q^{0,21} \cdot t^{0,21} \cdot [1,16/(SG - 1)^{0,30}] \quad (2.15)$$

Formelen er utviklet av amerikanske forfattere, og parameterne er derfor oppgitt i det amerikanske enhetssystemet.  $d_{50}$  er median steinstørrelse målt i tommer.  $S$  er dammens skråningshelning på nedstrøms side i prosent, og  $C_u$  er korngraderingstallet.  $q$  er kritiske enhetsvannføringen oppgitt i kubikkfot per sekund per fot. Parameteren  $t$  er en mål på plastringlaget tykkelse, og er oppgitt i antall lag multiplisert med  $d_{50}$ . Den siste parameter som inngår i ligningen er den spesifikke tyngdetettheten av steinen på dimensjonsløs form.

## 2.6 Tidligere masteroppgaven ved NTNU

De senere år har det blitt skrevet flere masteroppgaver som omhandler plastring av fyllingsdammer. I flere av oppgavene er det gjennomført lignende laboratorieforsøk som denne oppgaven. Et utvalg av de mest relevante oppgavene er oppsummert i tabell 2.3, og vil bli presentert kort i dette kapitlet.

Tabell 2.3 – Oversikt over tidligere masteroppgaver ved NTNU

Forfatter	År	Tittel
Amundsen, Jon Magnus	2012	Laboratorieforsøk av plastring av nedstrøms skråning på fyllingsdammer
Langaker, Ole Kristian	2013	Plastring av nedstrøms skråning på fyllingsdammer. Prototyp- og modellforsøk
Bajracharya, Pajun	2013	Throughflow capacity of downstream slope and rip rap structure of Kulekhani Dam
Røer, Hans Edward	2014	Nedstrøms skråning av steinfyllingsdammer – modellforsøk av plastring under ulike strømningsforhold

### 2.6.1 Amundsen

I Amundsen (2012) ble det undersøkt i hvilken grad viktige parametere påvirker styrken ved ulike plastringmetoder. Relevante parametere ble kartlagt gjennom de innledende forsøkene og litteraturstudien, før de ble analysert. Det ble valgt å fokusere på steinhelning  $\alpha$  og effekt av steinstørrelse. Som et resultat av analysen ble det laget forsøksplaner etter Froudes modellover. Forsøkene ble gjennomført på NTNU og Universitetet i Madrid. De fleste modellene ble bygget med nedstrøms damhelning 1:1,5. Damhøyden varierte fra 300-1000 mm. Steinstørrelsen  $d_{50}$  varierte fra 26-76 mm.

Forsøkene ble gjennomført med tre ulike plastringmetoder, deriblant rauset steinfylling. Det to andre metodene ble plastret for hånd etter Retningslinjer for fyllingsdammer (NVE, 2007). Plastringssteinene ble enten lagt med horisontal orientering av plastringssteinens lengste akse ( $\alpha = 33,7^\circ$ ) eller plastringssteinens lengste akse normalt på damhelningen ( $\alpha = 90^\circ$ ). Ved Universitet i Madrid hadde de en større forsøksrenne, og forsøkene som ble gjennomført her ble hovedsakelig gjort for undersøke skalaeffekter. Plastringen ble utført på samme måte som i forsøkene ved NTNU.

Forsøkene viste at plastring lagt i forband økte bruddvannføring for modellforsøkene fra 2,8 til 5,9 relativt til støttefylling med rauset steinfylling. I tillegg viste resultatene at økt steinhelning  $\alpha$  øker styrken av plastringen betydelig i forhold til plastring med horisontal orientering.

### 2.6.2 Langaker

Formålet med oppgaven var å studere i hvilken grad utførte prototypforsøk av nedstrøms plastring lar seg gjenskape i modellforsøk. I Langaker (2013) ble det forsøkt å kartlegge repeterbarheten til modellforsøk av denne typen og hvilke tilhørende modelleffekter som virker inn. Prototypforsøk utført ved Sira Kvinas anlegg ved Svartevassdammen i Sirdal Kommune skulle gjenskapes.

Langaker gjennomførte modellforsøkene i den samme renna som Amundsen (2012) benyttet i sine forsøk. Parameterne som ble variert i forsøkene var steinstørrelse og steinhelningen  $\alpha$ . Det ble benyttet tre ulike steinfraksjoner; 27, 31 og 41 mm. Plastringen ble lagt på fire ulike måter i likhet med prototypforsøkene. De fire metodene var rauset, horisontal orientering av plastringssteinen i forhold til damhelningen ( $\alpha = 33,7^\circ$ ) i tillegg til plastringsstein med steinhelning  $\alpha$  på  $63^\circ$  og  $71^\circ$ . Skråningshelningen ble holdt konstant til 1:1,5. Vannføringen ble gradvis økt frem til det oppstod brudd. Langaker brukte følgende definisjon for brudd: "... *senking av damkronen, eller eventuelt utglidning i bunn for de tilfeller der damtå var kritisk punkt. I de tilfeller der en stein løsner fra bakerste rad i kronevernet, men ytterste stein fortsatt er stabil er derfor ikke definert som brudd.*" (Langaker, 2013).

De nedskalerte modellene overestimerte bruddvannføringen ved oppskalering til størrelsen i prototypforsøkene og sammenlignet med de faktiske verdiene fra målingene i felt. En økning i styrke fra 24-51 % ble observert. I de fleste laboratorieforsøkene skjedde bruddene langs dammens randsoner. Dette stemte godt med observasjonene i prototypforsøkene.

Repetibarheten ved kronevernsbrudd var relativt god, men variasjonene ved tåsteinsbrudd var for store til å se noen klar tendens. Langaker observerte økt kronevernsstyrke ved økende kronesteinsvinkel. Stor overtopping var nødvendig for å få brudd. Det ble observert lokal erosjon på kronevernet hvis plastringsteinene hadde fall inn mot damskråningen. Ved horisontal orientering av plastringsteinene fikk man rask og fullstendig erosjon av hele eller store deler av plastringen. Bevegelsen av den første steinen hadde som regel ikke betydning for ødeleggelse av kronevernet, mens det for damtå ofte førte til fullstendig brudd.

### **2.6.3 Bajracharya**

Formålet med oppgaven var å se på plastring som alternativt skråningsvern på Kulekhani Dam i Nepal (Bajracharya, 2013). Kulekhani Dam er den eneste høye steinfyllingsdammen i Nepal. Skråningssikringen på nedstrøms side består av rauset steinfylling. Dammen ble sjekket mot overtopping ved påregnelig maksimal flom (PMF), og ble funnet å være stabil under disse forholdene. Med lukkede flomløpsluker vil dammen derimot overtoppes. Forholdene med overtopping ble testet ut ved hjelp av ulike laboratorietester i rennene ved vassdragslaboratoriet på NTNU.

Testresultatene viste at den eksisterende utførelsen med rauset steinfylling ikke er motstandsdyktig mot overtopping. Dermed ble det forsøkt å bruke plassert plastring for å se om dette ville gi noen forbedring. Plastringsmetodene og beregning av steinstørrelse ble gjort ved hjelp av tilgjengelige metoder fra litteratur, eksisterende praksis og regelverk.

Det ble fokusert på hvordan orienteringen av steinens lengste akse i forhold til damaksen påvirket plastringens styrke. Resultatene viste at nødvendige enhetsvannføringen for å ødelegge plastringen økte med brattere steinhelning. I enkelte tilfeller ble det observert at plassert plastring kunne motstå 12 ganger så stor enhetsvannføring som testene utført med rauset fylling. Resultatene viste i tillegg at drenejekapasiteten er sterkt avhengig av steinenes orientering og størrelse. Kapasiteten økte når steinhelningen var større enn damhelningen. Pakningsgraden ble også studert, men det var ikke mulig å se noen direkte påvirkning på resultatene.

### **2.6.4 Røer**

I Røer (2014) ble det undersøkt hvordan ulike strømningsforhold påvirker styrken av et plastret erosjonsdekke på nedstrøms side av en dam. I hovedsak ble effekten av vannstrømmet over plastring, gjennom plastring samt en kombinasjon av disse to undersøkt.

Totalt ble 15 modellforsøk gjennomført i en renne på vassdragslaboratoriet på NTNU. I forsøkene ble det benyttet kantet plastringsstein der median steinstørrelse ( $d_{50}$ ) var 25 mm. Steinfraksjonen hadde korngraderingstall  $C_u$  lik 1,44 og det en gjennomsnittlig steinhelning  $\alpha$  på  $63^\circ$ . Skråningshelningen  $S$  ble holdt konstant til 1:1,5 i samtlige forsøk, mens damhøyden  $H_d$  varierte mellom 135-300 mm (Røer, 2014).

Resultatene viste at gjennomstrømmende vann ga lavest bruddvannføring (27-28 l/s/m), mens overtoppende strømning ga de høyeste verdiene (117-153 l/s/m). En kombinasjon av overtoppende og gjennomstrømmende strøm ga verdier fra 69-157 l/s/m.

Det ble antatt at gjennomstrømning er ugunstig strømningssituasjon siden denne typen strømning gjør at innlåsing, kontakt og forband mellom plastringssteinene mister sin funksjon. Forsøkene tydet også på at overtopping reduserer den ugunstige virkningen av gjennomstrømmende vann hvis dammen er utsatt for en kombinasjon av de to. På grunnlag av dette ble det konkludert med at overtoppende vannstrøm har en stabiliserende effekt på plastringen. Forsøkene viste ingen indikasjon på at bredden i modellen hadde betydning for verken ruset eller plastret skråning. Det ble derimot påvist at bruddvannføringen økt med 63% ved å øke damhøyden  $H_d$  fra 135 mm til 300 mm.

Røer sammenlignet resultatene sine med en del av beregningsmetodene for stabil median steinstørrelse for tilfeldig ruset plastring. Metoden i Khan & Ahmed (2011) ga minst avvik ved at den overdimensjonerte steinstørrelsen.

## 3 MATERIAL OG METODE

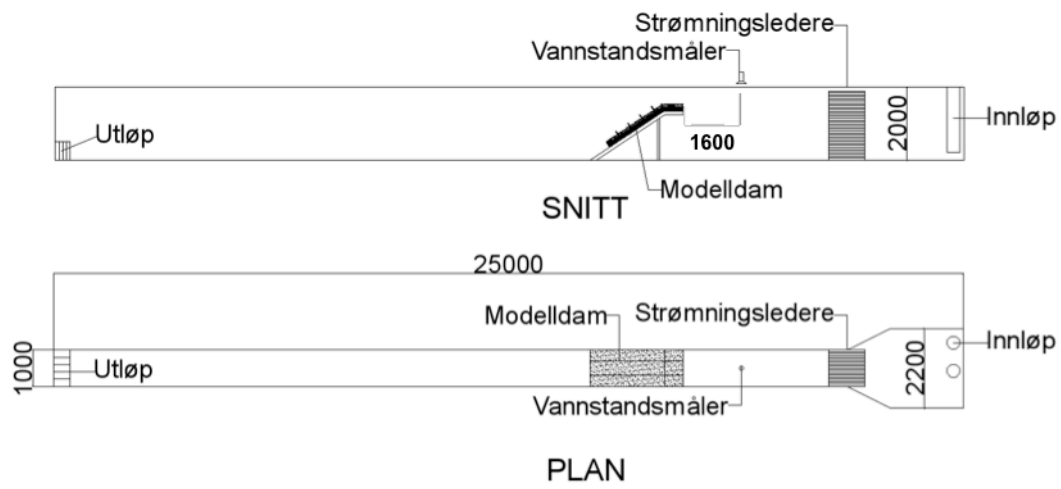
*Dette kapittelet beskriver forskningsmetoden som er benyttet for å vurdere problemstillingen som er beskrevet i oppgaveteksten. Dette inkluderer oppsett, tilhørende måleutstyr og beskrivelse av modellen med tilhørende forsøksplan. Metodikk for fremstilling av resultater er også forklart i dette kapittelet der det er nødvendig for forståelsen av fremgangsmåten.*

### 3.1 Litteratursøk

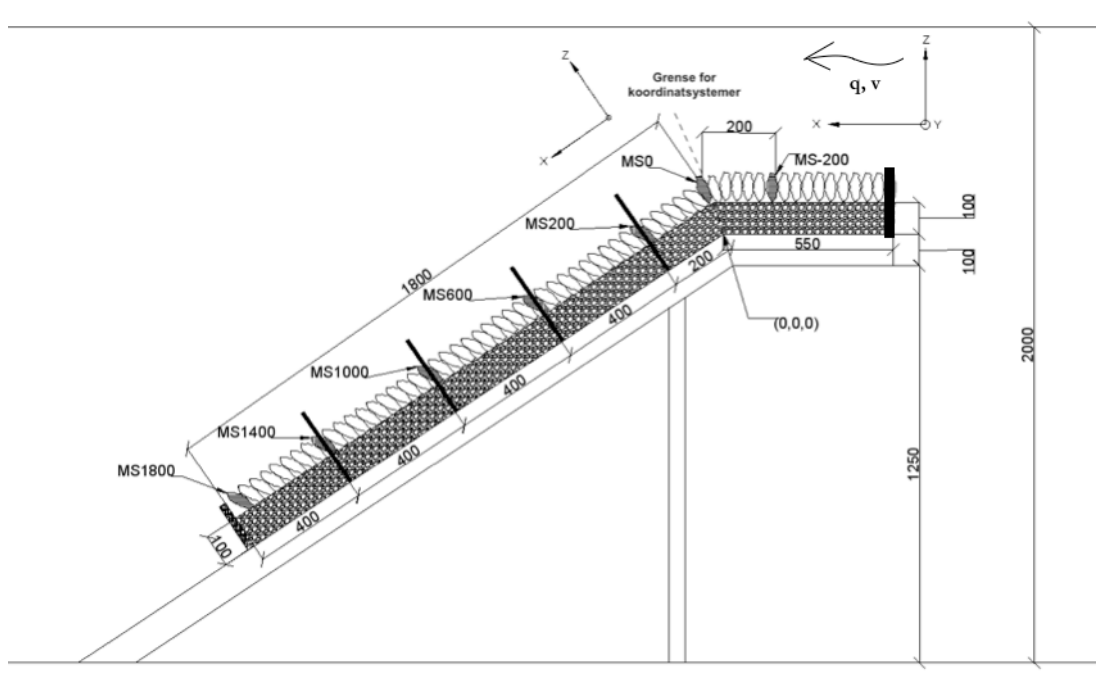
Et litteratursøk ble gjennomført for å få en bedre forståelse av problemstillingen og hvilken forskning og litteratur som eksisterer. Fagbøker innenfor hydraulikk og vassdragsteknikk samt lover, forskrifter og veiledere har blitt benyttet. I tillegg har det blitt gjennomført artikkelsøk på de store fagdatabasene som er tilgjengelig gjennom universitetsbibliotekets nettsider (Ei Village, SCOPUS og Google Scholar)(ntnu.no/ub). Deler av litteraturstudiet ble gjennomført i forbindelse med prosjektoppgaven ”Plastring av fyllingsdammer – Kvalitet av plastring” som ble gjennomført høsten 2014 (Pettersen, 2014). Noe av det teoretiske grunnlaget beskrevet i kapittel 2 er hentet fra denne prosjektoppgaven, og vil av denne grunn kunne ha lignende ordlyd. Hensikten med prosjektoppgaven var å undersøke hvordan erfaring påvirker kvalitet av en utført plastring. Siden tematikken er den samme som i denne masteroppgaven er mye av teorien direkte overførbare.

### 3.2 Oppsett modellforsøk

Modellforsøkene ble gjennomført i D-renna ved Vassdragslaboratoriet ved NTNU. Modelldammen består av et fastmontert profil, og illustrerer nedstrøms skråning og deler av kronen på en fyllingsdam. Den nedstrøms skråningen har et helningsforhold på 1:1,5, noe som er typisk for en norsk fyllingsdam. Dammens to ytterste lag, plastringlaget og filterlaget, bygges opp mot profilet som vist i figur 3.2. Nedre ende av skråningen bygges mot en rist plassert ca. 500 mm opp i skråningen. Dette gjøres for å unngå at vannstanden som bygger seg opp nedstrøms modellen skal påvirke plastringen. Den effektive damhøyden  $H_d$  blir dermed ca. 1000 mm. Oppsettet til modellen er skissert i figur 3.1. Rennens nøkkeldimensjoner er oppsummert i tabell 3.1.



Figur 3.1 – Plan og snitt av forsøksrenna



Figur 3.2 – Prinsippskisse av modelloppsettet. Introdusert koordinatsystem er også markert.



Tabell 3.1 – Nøkkeverdier for modellen

Del av modell	Mål
Lengde av renne	25 m
Bredde av renne	1 m
Høyde av renne	2 m
Bunnhelning på renne	0 [-]
Helningsvinkel modell	1:1,5 [-]
Høyde av modell	1,35 m
Damhøyde	1,0 m
Lengde av krone	550 mm
Maksimal vannføring	400 l/s/m

Vanntilførsel til modellen reguleres ved hjelp av manuelle ventiler. Innløpet er i oppstrøms ende av modellen, og pumpes inn i et fordrøyningsbasseng. Nedstrøms bassenget er det installert strømningsavrettere. Hensikten med disse er å sørge for kontrollerte strømningsforhold frem til dammen. Vannføringen leses av i l/s, men siden renna er 1 meter bred omtales heretter vannføringen som enhetsvannføring  $q$  med enhet l/s/m.

Det fastmonterte profilet er bygd opp av en hulprofilrist av stål som er sveiset til T-profiler. I toppen av skråningen knekker rista og profilene over i en tilnærmet horisontal del som er damkrona. Mellom rista og T-profilene er det klemt inn liggeunderlag som tetning. I tillegg er det fuget med tetningsmasse mellom veggene i renna og modellen. Lekkasje målinger viser at lekkasjen gjennom modellen er mindre enn 1 l/s/m. Siden modellen er tilnærmet tett, illustrerer forsøkene en tett dam som utsettes for overtopping, eksempelvis som i en flomsituasjon. En filterduk ble festet til rista ved hjelp av tynn ståltråd. Filterduken ble montert med tanke på gjennomstrømning. Selv om forsøkene ikke ble gjennomført med gjennomstrømning bør forsøksoppbygningen være lik uavhengig av hvilken strømnings situasjon dammen utsettes for.

### Definisjon av koordinatsystem

For å lettere kunne orientere seg i forhold til modelldammen ble det innført to koordinatsystemer med felles nullpunkt. Koordinatsystemene nullpunkt ligger ved ristas knekkpunkt helt inn mot rennas vegg. Det ene koordinatsystemet gjelder for delene som ligger på oppstrøms side av knekkpunktet, deriblant den horisontale krona. Dette koordinatsystemet er et vanlig høyrehåndssystem der x-aksen er orientert horisontalt. Positiv x-verdi er samme retning som vannstrømmen. For den skrå delen av dammen, som ligger på nedstrøms side av nullpunktet, er koordinatsystemet rotert slik at x-aksen ligger langs damaksen. Også dette er et høyrehåndssystem der y- og z-aksene står normalt på x-aksen. Også her er x-aksen positiv i strømningsretningen. Orientering av koordinatsystemene og nullpunktet er illustrert i figur 3.1. Rista i nedre ende av skråningen, som markerer foten av plastringen, ligger ved  $x=1800$  mm. Rista, som er bakre grense for krona, er plassert ved  $x=-550$ .

### 3.3 Måleinstrumenter

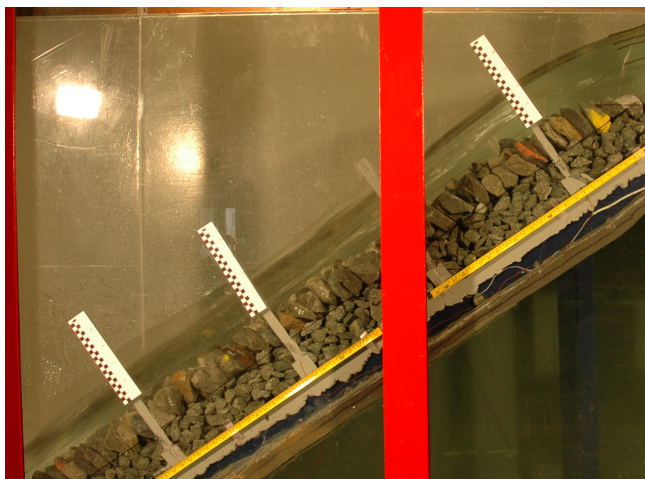
Flere typer måleinstrumenter ble benyttet i forbindelse med oppgaven, både manuelle og automatiske. De benyttede måleinstrumentene er gjengitt i tabell 3.2.

Tabell 3.2 – Oversikt over viktige måleinstrumenter

Måling	Måleinstrument	Måleusikkerhet
Vannhastighet	Elektrisk konduktivitetsmåler	
Vannføring	Siemens Sitrans Mag 5000	1 l/s
Magasin vannstand	Microsonic mic+340	1 %
Koordinater(x- og y)	Isel Traverse med Pro NC-programvare	0,01 mm
Koordinater(z)	Leica Disto X310	1 mm
Vekt (plastringsstein)	Ohaus Ranger 3000	1 g
Akser (plastringsstein)	Tengtool Digital Caliper 0-150 mm	0,5 mm
Sikting	Retsch AS 450 Control	
Vannstand i skråning	Meterstav	1 cm
Videokamera 1	Sony HDR-SR12E	
Videokamera 2	Sony HDR-CX115E	
Fotokamera	Nikon D70	

Måleren for oppstrøms magasin vannstand er plassert 1600 mm oppstrøms modellen. Den måler avstanden mellom målerens hode og vannoverflaten, men er programmert slik at vannstanden  $h$  har samme nullpunkt som z-aksen i koordinatsystemet. Dette vil si at  $h$  er positiv når dammen overtoppes.

Det er montert fire sett med elektriske konduktivitetsmålere i forbindelse med måling av vannhastighet i nedstrøms skråning av modellen. Målerne er plassert ved henholdsvis  $x=200, 600, 1000$  og  $1400$  som vist i figur 3.2. Ved å helle en saltløsning i vannet endres vannets konduktivitet i det saltløsningen passerer målerne. Siden målerne har lik innbyrdes avstand, samtidig som spenningsendringen i vannet blir logget som en funksjon av tiden, er det mulig å beregne hastigheten mellom målerne. Det ble i tillegg montert målestaver med 1 cm oppløsning på glasset ved samme posisjon som vannstandsmålerne (figur 3.3). Hensikten med disse var å kunne måle vannstanden  $h$  i z-retning ved forskjellige punkter i skråningen, og deretter beregne strømningshastigheten  $v$  manuelt.



*Figur 3.3 –Målestaver for manuell avlesning av vannstand over plastringen*

Det ble forsøkt å benytte en tredimensjonal laserskanner for å skanne plastringens overflate. Grunnet tekniske problemer og stor usikkerhet i dataene er det valgt å ikke benytte disse resultatene. Manuell innmåling av merkede markørsteiner ble i stedet benyttet. Selve innmålingen ble gjort ved hjelp av en Leica Disto X310 avstandsmåler som var montert på en traverskran plassert oppå rennas vegger. Ved å navigere kрана slik at laserpunktet fra måleren traff markørsteinens markerte punkt kunne x- og y-koordinater leses av fra traverskranas programvare ProNC. Z-koordinaten ble målt ved å måle avstanden med lasermåleren. De registrerte koordinatene ble senere regnet om til det introduserte koordinatsystem ved automatiske regneark.

### **3.4 Laborieteteknikk**

Forsøkene som er utført i forbindelse med denne oppgaven bygger på en prinsippmodell. Modellen er altså ikke en nedskalering av en spesifikk dam, men en modell av vilkårlig dam med helning 1:1,5. Et nedskalert laborieforsøk gir muligheten for å kunne studere oppførselen til en nedstrøms skråning som er plastret under kontrollerte forhold. Ved modellforsøk er det viktig å ta hensyn til hvilke krefter som påvirker det man ønsker å modellere. Hvilken modellov som benyttes som skaleringskriterium bør derfor velges etter hvilke krefter som er dominerende i tilfellene som skal undersøkes. Det er vanlig å tilfredsstille forskjellige likhetskriterier når man jobber med modellforsøk:

- Geometrisk likedannethet: Forholdet mellom alle romlige dimensjoner i modell og prototyp er like.
- Kinematisk likedannethet: Forholdet mellom hastighetsvektorer i modell og prototyp er skalert i lengde med lik retning
- Dynamisk likedannethet: Forholdet mellom alle kraftvektorer i to geometrisk og kinematisk likedannede systemer er like.

Eksakt likhet forutsetter at alle fysiske parametere er skalert. Dette inkluderer geometri, væskers egenskaper og atmosfærisk trykk. Hvis væsken som benyttes i modellen er lik som i prototypen er det kun mulig å mulig å tilfredsstille et kraftforhold mellom modell og prototyp. Dermed blir dynamisk likedannethet umulig (Heller, 2011).

### Froudes modellov

I modellforsøk med friskeilsstrømning vil gravitasjonskreftene være dominerende. I slike tilfeller benyttes ofte Froudes modellov som forholdet mellom treghetskrefter og gravitasjonskrefter som vist i formel (3.1).

$$\frac{\text{Treghet}}{\text{Gravitasjon}} = \frac{ma}{mg} = \frac{\rho L^2 v^2}{\rho L^3 g} = \frac{v^2}{gL} = Fr^2 \quad (3.1)$$

Med strømmende vann over testdammene vil Froudes modellov være et godt skaleringskriterium. Forholdet mellom Treghetskrefter og gravitasjonskrefter vil være likt om forholdet i formel (3.2) blir tilfredsstilt.  $Fr_r$  er forholdet mellom froudetallet i modell og prototyp.

$$Fr_r = \frac{Fr_m}{Fr_p} = 1 \quad (3.2)$$

Tabell 3.3 oppsummerer hvilke forhold som kan benyttes til opp- og nedskalering ved bruk av Froudes modellov som skaleringskriterium (Lysne, 1982).

Tabell 3.3 – Skaleringsfaktorer Froudes modellov

Parameter	Skaleringsfaktor
Lengde	$L_r$
Areal	$L_r^2$
Volum	$L_r^3$
Tid	$L_r^{0,5}$
Hastighet	$L_r^{0,5}$
Vannføring	$L_r^{2,5}$

### Parameterstudie

Som en øvelse for å øke forståelsen av hvilke parametere som påvirker plastringen ble det gjennomført en parameterstudie. Alle relevante parametere ble listet opp etter idémyldring. Ved å uttrykke alle de relevante parameterne som en funksjon av vannhastigheten, ble Buckingham's  $\Pi$ -teorem brukt til å utføre en dimensjonsløs analyse. Resultatet av analysen er vist i formel (3.3).

$$Fr = f\left(Re, We, \frac{d}{y}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{B}{y}, \frac{A_L}{y^2}, \frac{K_l}{\sqrt{gy}}, \frac{k_t}{gy}, \frac{k_s}{y}, \frac{H_d}{y}, \right. \\ \left. \text{kvalitet, geometri, } C_u, C_d, C_L, \tan\varphi_{rf}, C_A, S, \sin\alpha, I_e\right) \quad (3.3)$$

Følgende parametere inngår:

- d* – karakteristisk steindiameter [m]
- $\rho_s$  – tetthet av stein [ $kg/m^3$ ]
- $\rho$  – tetthet av vann [ $kg/m^3$ ]
- $A_L$  – areal utsatt for løft [ $m^2$ ]
- y* – vannstand [m]
- $K_l$  – Laminær permeabilitet [m/s]
- g* – tyngdeakselerasjon [ $m/s^2$ ]
- $k_t$  – turbulent permeabilitet [ $m^2/s^2$ ]
- $k_s$  – sandruhet [m]
- $H_d$  – damhøyde [m]
- kvailitet* – ukvantifiserbar [–]
- geometri* – ukvantifiserbar [–]
- $C_u$  – Graderingstall [–]
- $C_d$  – dragkoeffisient [–]
- $C_l$  – løftekoeffisient [–]
- $\tan\varphi_{rf}$  – Friksjonsvinkel mellom filter – og plastringslag [–]
- $C_A$  – luftandel [–]
- sin* $\alpha$  – steinhelning [–]
- $I_e$  – energilinje [–]
- We* – webertallet [–]
- Re* – Reynoldstallet [–]

Som vist i formel (3.3) er Reynolds- og Webertallet en del av det dimensjonsløse uttrykket. Pfister & Chanson (2012) konkluderer med at Reynoldstallet vil være neglisjerbart hvis det er større enn  $2 \cdot 3 \cdot 10^5$ . Med utgangspunkt i beregnede hastigheter i kapittel 4.5, gjør en antatt strømningshastighet på 3,5 m/s at man befinner seg akkurat i dette grensesjiktet. Webertallet uttrykker forholdet mellom treghetskrefter og overflatespenning. Dette er som regel en liten kraft som normalt kan neglisjeres (Lysne, 1982).

### **Steinbasert Froudetall**

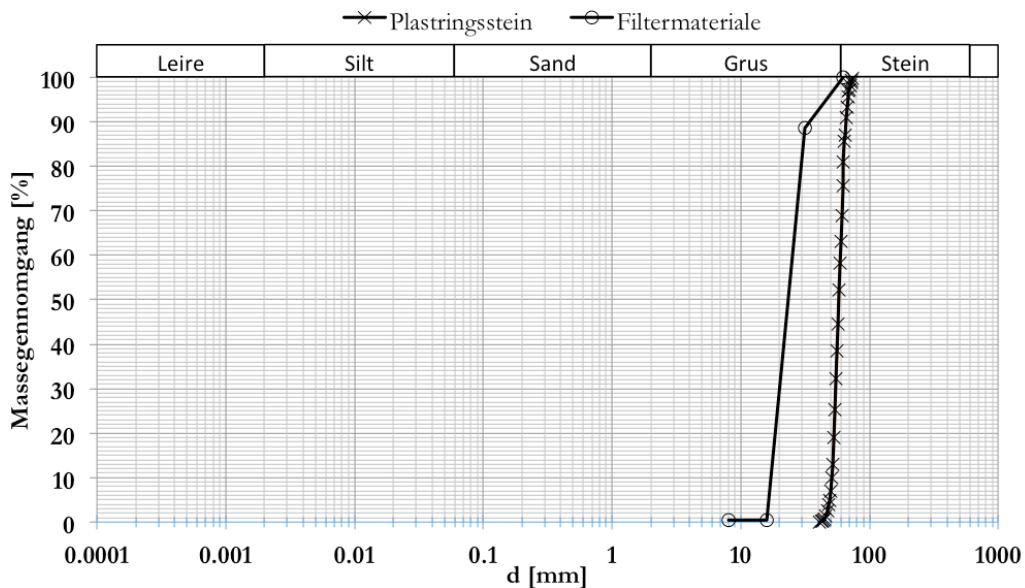
Med utgangspunkt i parameterstudien ble det også introdusert et steinbasert Froudetall med utgangspunkt i Froudetallet som er definert som forholdet mellom treghetskrefter og tyngdekrefter som vist i formel (3.4).

$$Fr_s = \frac{v}{\sqrt{gy}} \cdot \left(\frac{d}{y}\right)^{-\frac{3}{2}} = \frac{q}{\sqrt{d^3 \cdot g}} \quad (3.4)$$

Det steinbaserte Froudetallet vil gi en indikasjon på hvor stabil steinen er mot erosjon. Høyere  $Fr_s$  gir høyere stabilitet.

### 3.5 Forsøksmaterialer

I de gjennomførte forsøkene ble det benyttet to ulike steinfraksjoner, filtermateriale og plastringsstein. Ingen av disse fraksjonene har tidligere blitt benyttet i forsøk, og det ble derfor gjennomført sikting og kontrollmåling. Kornfordelingskurve for disse steinfraksjonene er vist i figur 3.4.



Figur 3.4 – Kornfordelingskurver for materialer benyttet i modellforsøk

Plastringssteinens kurve er veldig bratt, noe som indikerer at den er ensgradert. Det samme kan sies om filtermaterialet, men på grunn av få sjikt under siktingen kommer ikke dette like tydelig frem av figuren. Typiske steinstørrelser i de respektive steinfraksjonene er illustrert i figur 3.5



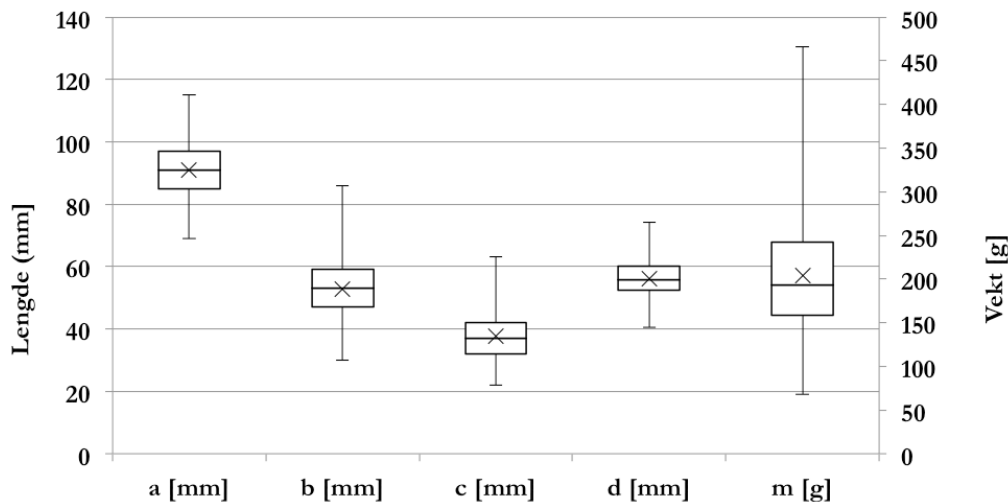
Figur 3.5 – Eksempel på plastrings- (venstre) og filterstein (høyre)

### 3.5.1 Plastringsstein

Det ble anslått at den totale steinfraksjonen som ble benyttet i forsøket besto av 1500 steiner. Steinene ble valgt på bakgrunn av rennens kapasitet, og resultater av enhetsføringer fra tidligere forsøk i forbindelse med masteroppgaver nevnt i kapittel 2.6.

En tredjedel, 500 steiner, ble tilfeldig valgt ut, og aksene  $a$ ,  $b$  og  $c$  og masse  $m_s$  ble målt ble målt som beskrevet i kapittel 2.1. Steinene ble i tillegg nummerert slik at man har muligheten til å kontrollere om det er de samme steinene som beveger seg ved bruddvannføring i forsøkene. Nummereringen ble ikke benyttet i disse forsøkene, men kan være nyttig hvis den samme steinfraksjonen skal benyttes senere i forhold til kontrollmåling av steinene. Karakteristisk steinstørrelse  $d$  ble regnet ut ved hjelp av formel (2.1).

Figur 3.6 viser den målte steinfraksjonens akser og karakteristisk diameter i tillegg til steinfraksjonens masse  $m_s$ . Resultatene er presentert som bokplott (Walpole, 2007). I tillegg er gjennomsnittsverdiene markert som punkter. Den karakteristiske diameteren  $d$  gi best samsvar med midlere akse  $b$ . Steinfraksjonens mediane steinstørrelse  $d_{50}$  var 57 mm. Steinene hadde en gjennomsnittlig masse,  $\bar{m}_s$ , på 204 g. Den tyngste steinen veide 466 g, mens den letteste veide 68 g.



Figur 3.6 - Boksplott med gjennomsnittsverdi for den målte steinfraksjonens akser og vekt

Steinene ble hentet fra et steinbrudd i Vassfjellet, Trondheim hos Franzefoss Pukk AS, og ble oppgitt til å være av bergarten rhyolitt med en omtrentlig tetthet på  $2700 \text{ kg/m}^3$ . 10 % av de 500 oppmålte steinene ble benyttet til å kontrollmåle tettheten. Målingene ble gjort ved å benytte prinsippene som ble introdusert i tilknytning til formel (2.4). Tabell 3.4 gir en oversikt over massetettheten til de kontrollmålte steinene.

Tabell 3.4 – Massetetthet av den målte steinfraksjonen

Verdi	$\rho_s [\text{kg/m}^3]$
Gjennomsnitt	2709
Standardavvik	36
Maksimum	2774
Minimum	2636

Tettheten av plastringssteinene stemmer godt med det som ble anslått på forhånd, og standardavviket, samt minimums- og maksimumsverdien, viser at gjennomsnittsverdien på  $2709 \text{ kg/m}^3$  er representativt.

### Forhold mellom aksene

Helleformede eller avlange steiner er definert av formel (2.2), og det er anbefalt at maksimalt 30% av steinene har denne formen. For den oppmålte fraksjonen av plastringsstein har 47,4% av steinene en form der forholdet mellom lengste og korteste akse er større enn 2,5. Det mindre konservative forholdet i formel (2.3) der forholdet mellom lengste og korteste akse er økt til 3 viser at 15,6 % av steinene er avlange.



Anbefalingen knyttet til dette forholdstallet sier at maksimalt 20% av steinene bør være avlange. For større stein ( $m_s > 500$  kg) var det anbefalt at maksimalt 5% av steinene var avlange.

Plastringssteinene ble ikke kontrollert mot noen av disse kravene under utvelgelsen, og har bare blitt kontrollert i ettertid. Sammenlignet med anbefaling for lettere stein der maksimalt 20% kan ha  $\frac{a}{c} > 3$  er steinfraksjonen godkjent. Det er lett å følge slike anbefalinger i forbindelse med laboratorieforsøk ved å måle steinens akser nøyaktig med skyvelær. Ved plastring av fyllingsdammer i virkeligheten er dette imidlertid upraktisk, og utvelgelse av steiner gjøres i større grad ved hjelp av øyemål. I norsk regelverk er det ikke satt noen formelle krav til forholdet mellom steinens akser, og det er derfor grunn til å tro at disse anbefalingene ikke følges konsekvent når dammer plastes i virkeligheten.

Selv om steinene benyttet i forsøkene ikke tilfredsstilte samtlige overnevnte anbefalinger, har de allikevel vist betydelig motstand mot brudd ved overtopping. Større variasjon i steinform gjorde det er lettere å gjøre tilpasninger slik at steinene ble lagt i forband. Det viste seg å være mer problematisk å legge steiner med kort a-akse. Det bør allikevel påpekes at det ikke er optimalt med veldig lang a-akse, da dette vil føre til at steinene stikker utenfor resten av plastringsslaget. Dette vil føre til at steinen utsettes for en større belastning ved overtopping, side det er et større areal som er utsatt for drag. Dette kan i verste fall føre til at steinen rives ut av plastringen.

### **Forhold mellom største og minste steinstørrelse**

Veileder for fyllingsdammer (NVE, 2012) anbefaler at forholdet av mellom største og minste steindiameter er mindre eller lik 1,7 siden det er ønskelig med relativt ensgradert stein i plastringslaget. For den oppmålte steinfraksjonen er forholdet mellom største og minste stein 1,83. Dette indikerer at steinfraksjonen har for stor variasjon.

Det stilles spørsmål om bruk av største og minste steinstørrelse er en fornuftig metode for å kontrollere graderingen av materialet. Ved å bruke ekstremalverdier som befinner seg i hver sin ende av skalaen er det potensielt enkeltsteiner som skiller seg betraktelig ut og ikke er representativ for resten av steinfraksjonen. Dette kan gi en uriktig fremstilling av steinfraksjonens gradering. Ved å bytte ut maksimums- og minimumsdiameter med  $d_{95}$  og  $d_5$  vil man få en mer representativ fremstillingen av materialets gradering. For den kontrollmålte steinfraksjonen var  $d_{95}/d_5 = 1,39$ . Ved bruk av samme kriterium med 1,7 som grenseverdi vil steinene benyttet i forsøkene være godt innenfor og materialet er svært ensgradert. Av denne grunn ble det valgt å benytte steinfraksjonen uten å gjøre ytterligere justeringen selv om anbefalingen gitt i veileder for fyllingsdammer ikke tilfredsstilles.

### **Forhold mellom plastringsstein og filtermateriale**

I veileder for fyllingsdam er det anbefalt at steindiameter for største stein i plastringslaget maksimalt er fire ganger større enn minste steindiameter i plastringslaget som beskrevet i formel (2.11). Største registrerte steindiameter i plastringslaget var 74 mm. Steinene i filterlaget var siktet, så minste steinstørrelse er ikke målt eksakt. Siktekurven ble brukt til å få et anslag på minste steindiameter. Sikteprøven viste 0,3 % massegjennomgang gjennom siktet med rektangulære maskevidder på 8 mm. I henhold til anbefaling i veilederen vil derfor minste steindiameter være mindre enn 8 mm, og formel (2.12) tilfredsstilles dermed ikke. Som tidligere beskrevet stilles det spørsmål om det er hensiktsmessig å benytte ekstremalverdier for steinfraksjonene. Med tanke på at det bare er 0,6 % massegjennomgang ved 16 mm vil så godt som hele steinfraksjonen være større enn 16 mm, og det anses som mer fornuftig å benytte en verdi som er representativ for majoriteten av steinfraksjonen. Ved å bruke bruker  $d_{95}=68$  mm og  $d_{5,filter}=17$  mm vil forholdet være 4. Hensikten med å ha et finere materiale innenfor plastringslaget er at det skal tette hulrom mellom steinene i plastringslaget. Ingenting tydet på at steinene i filterlaget var så små at de forsvant ut mellom plastringssteinene, og det er av denne grunn godtatt at anbefalingen i veileder for fyllingsdammer ikke er møtt på dette punktet.

#### **3.5.2 Filtermateriale**

Filtermaterialet ble først manuelt grovsortert med 20 og 30 mm sikt. For å få større nøyaktighet og en mer nøyaktig kornfordelingskurve ble 25,8 kg av filtermaterialet siktet i henhold til NS 8005 kapittel 4.4 Tørresikting. Siden steinprøven hovedsakelig besto av steiner større enn 20 mm og allerede var tørre etter å ha ligget innendørs over lengere tid ble ikke prøven tørket i tørkeovn før den ble veid og siktet.

Siktingen ble gjennomført i en Retsch AS 450 Control siktemaskin. Under siktingen ble det benyttet 63, 31,5, 16 og 8 mm sikt. Prøvene ble gjennomført i sju delprøver der hver delprøve ble siktet i 10 minutter i henhold til NS 8005. Resultatene ble benyttet til å lage en kornfordelingskurve for filtermaterialet som er vist i figur 3.4. Siktetapet i prøvene, som er differansen mellom prøvens masse før sikting og summen av sikterestene, skal ikke utgjøre mer enn 1% av den opprinnelige massen. Samtlige delprøver tilfredsstilte dette, og det totale siktetapet var 0,58 %

#### **3.5.3 Rasvinkel**

Friksjonsvinkelen til et materiale i tradisjonell geoteknisk betydning beskriver den naturlige rasvinkelen massene får om man heller de ut i en kjegleformet haug. I og med at man i denne oppgaven ordner steinene som plastring vil man kunne få en innlåsende effekt. Vinkelen et erosjonsdekke må ha før den raser ut er heretter omtalt som rasvinkelen. Å kvantifisere og måle rasvinkelen til de forskjellige plastringsmetodene beskrevet i kapittel 3.6.2 vil bidra til å få en bedre forståelse av de bidraget fra forband og innbyrdes kontakt mellom steinene.

Forsøkene ble gjennomført i en tett trekasse med innvendige målt på 500x500 mm. Bunnplaten av laget av glatt finerplate, men for å økt friksjon mellom steinene og kassebunnen ble det festet en hulprofilrist i bunnen av kassen etter anbefaling i Røer (2014). Rista var av samme type som den som ble benyttet i modelldammen. Før forsøksmaterialet ble plassert i kassen på samme måte som beskrevet i kapittel 0, ble kassen plassert med en helning som tilsvarte  $S=1:1,5$ .

Etter at boksen var ferdig plastret, ble vinkelen økt ved hjelp av den påmontert vinsjen. Vinsjen var manuell, men vinkelen ble målt ved hjelp av en digital vinkelmåler. Både første steins og global rasvinkel ble registrert. De forskjellige plastringsmetodene som ble testet med tilhørende rasvinkel er oppsummert i tabell 3.5.

*Tabell 3.5 – Rasvinkel for materialer utført med varierende plastringsmetoder*

Metode	Materiale	Tilstand	Filter	Første steins rasvinkel	Global rasvinkel
Plastring m/forband	Plastringsstein	Tørr	Ja	-	84 °
Rauset	Plastringsstein	Tørr	Nei	24 °	51 °
Rauset	Plastringsstein	Fuktig	Nei	34 °	53 °
Rauset	Filtermateriale	Tørr	-	38 °	50°
Rauset	Filtermateriale	Fuktig	-	35 °	49°
Plastring u/forband	Plastringsstein	Tørr	Ja		83°

Det ble ikke registrert første steins rasvinkel ved plastring. I de rausede forsøkene var rasvinkel av første stein løst plasserte steiner. Det er en betydelig økning av rasvinkelen ved at steinene plasseres som plastring. Det var ikke mulig å se noen betydelig forskjell i global rasvinkel for plastring med og uten forband. Verdiene stemmer godt overens med det som ble presentert i Bajracharya (2013)(83°). I Røer (2014) ble det observert noe lavere verdier(76°), men det var mistanke om at utglidning skjedde på grunn av manglende friksjon mot underlaget.

### **3.6 Forsøksplan**

Det ble totalt gjennomført 6 forsøk i Vassdragslaboratoriet ved NTNU. Forsøkene ble gjennomført med varierende parametere, deriblant belastningmønster, utførende plastrer og plastringsmetoder. Tabell 3.6 gir en oversikt over de gjennomførte forsøkene.

Tabell 3.6 – Utførte forsøk

Forsøk	Utført av	Plastringsmetode	Filterkomprimering	Belastningstid	Steinhelning $\alpha$
1	EHP	Plastring m/forband	Ingen	30	60
2	JJ	Plastring m/forband	Noe	60	60
3	JJ	Plastring m/forband	Ingen	60	60
4	PHH	Rauset fylling	Ingen	60	Tilfeldig
5	EHP	Plastring u/forband	Ingen	60	60
6	EHP	Plastring m/forband	Ingen	60	60

### 3.6.1 Utførende plastrer

Siden det var en relativt tidkrevende prosess å bygge en forsøksdam, ble det arbeidet fordelt mellom de involverte. Det ble bestemt at kun en person skulle være involvert i byggingen av hver plastring. Dette ble gjort fordi man ønsket å ha kontroll på om plastringsteknikken til den enkelte påvirket kvaliteten for plastringen, og dermed blir hvert forsøk mer etterprøvbart. Ved å gjøre det på denne måten vil det også være mulig å se om det er noen sammenheng mellom kvalitet og erfaring.

### 3.6.2 Plastringsmetoder

Grunnet ønske om å undersøke styrken av forskjellige plastringsmetoder, og spesielt hvordan forband påvirker styrken av plastringen, ble forsøkene utført med forskjellige plastringsmetoder. Alle forsøksdammene ble bygget med to lag, et filterlag og et lag med plastringsstein. Det ble i all hovedsak tatt utgangspunkt i de norske retningslinjene med Damsikkerhetsforskriften og Veileder for fyllingsdammer når plastringene ble bygget. Det er tatt hensyn til tre tommelfingerregler som er beskrevet i retningslinjene:

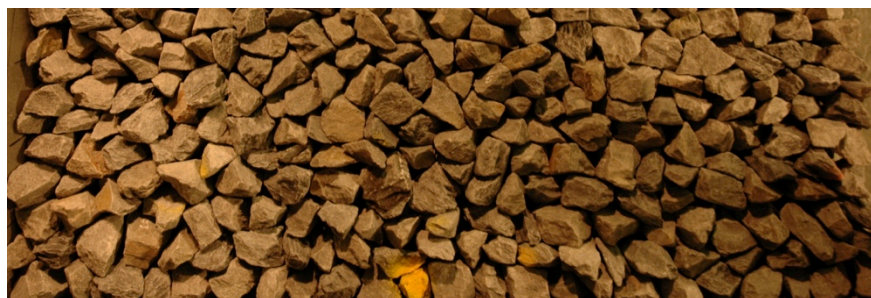
- **Innbyrdes innlåsing og kontakt.** Plastringssteinene skal ligges stabilt og med kontakt med de omkringliggende steinene.
- **Helning.** Plastringssteinens lengste akse plasseres slik den faller inn mot damkroppen.
- **Forband.** Plastringssteinene legges slik at synlige vertikale og horisontale sprekkesett i plastringen unngås.

Samtlige forsøksdammer ble bygget med den samme filtermengden. Filterlaget var 100 mm tykt, og ble måket opp i skråningen ved hjelp av spade, før det ble jevnet ut ved hjelp av forsiktig håndmakt og rive.

Med unntak av forsøket der dammen ble bygget med rauset fylling, ble plastringssteinene forsøkt lagt med steinhelning  $\alpha = 60^\circ$  i skråningen. Steinhelningen  $\alpha$  er definert som vinkelen mellom plastringssteinens lengste akse og skråningshelningen. Som omtalt i kapittel 2.6 blir plastringen sterkere med økende steinhelning (Amundsen, 2012, Langaker, 2013). Retningslinjene sier at steinens lengste akse (a-aksen) skal ha fall i mot damkroppen. Erfaringer fra fullskalaforsøk der plastringen legges med gravemaskin viser at det problematisk å plassere plastringssteinene normalt i forhold til damskråningen ( $\alpha=90^\circ$ ). I samråd med veileder av oppgaven ble det valgt  $\alpha=60^\circ$  siden dette er praktisk mulig å utføre med gravemaskin på en dam i fullskala. For å ha bedre kontroll på helningsvinkelen ble det tegnet siktelinjer på veggen i renna. I tillegg ble det skåret til planke med vinkel på  $60^\circ$  som ble lagt mot plastringens siste rad for å kontrollere vinkelen. Ved runding av knekkpunktet hvor skråningen går over i kronen ble steinhelningen økt slik at plastringssteinens lengste akse står tilnærmet normalt på kronen.

### **Plastring med forband uten komprimering av filter**

Denne plastringsmetoden er utført etter tidligere omtalte tommelfingerregler. I disse forsøkene ble ikke filtermaterialet komprimert, men bare forsiktig jevnet ut ved hjelp av forsiktig håndmakt og rive.



*Figur 3.7 – Plastringssteiner lagt med forband*

### **Plastring med forband med komprimering av filter**

I likhet med plastring med forband uten komprimering av filter ble også denne metoden utført i henhold til tommelfingerreglene. Med denne metoden ble filteret i større grad komprimert. Komprimeringen ble utført ved å legge press og jevne ut filterlagets overflate ved hjelp av en planke.

### **Plastring uten forband uten komprimering av filter**

Ved denne plastringsmetoden ble det forsøkt å legge plastringssteinene uten forband. Dette ble gjort ved å legge steinene i faste rader. Etter utlegging av første rad ble neste rad lagt slik at hver enkelt stein ble liggende oppå en enkelt stein fra underliggende rad. Plastringssteinene ble bevisst lagt slik at den overliggende steinene ikke overlappet og laget en bro over to steiner fra underliggende rad. Filterlaget ble ikke komprimert, og utført på samme måte som beskrevet for plastring med forband uten komprimering av filter.



*Figur 3.8 – Plastringssteiner lagt uten forband*

### **Rauset fylling uten komprimering av filter**

Forsøksdammen som ble bygget med denne plastringsmetoden hadde ikke plastring som fulgte tommelfingerreglene i de norske retningslinjene. Det ble i stedet benyttet en metode som er mye brukt internasjonalt. Plastringssteinene ble tilfeldig plassert i skråningen uten å ta hensyn til helningsvinkel eller orientering, og er ofte omtalt som rauset fylling. Det ble benyttet den samme mengden plastringsstein som i de resterende forsøkene. Også her ble filteret lagt uten noen form for komprimering.



*Figur 3.9 – Plastringssteiner lagt som rauset fylling*

### **3.6.3 Belastningsmønster**

I prinsippet ble belastningen av forsøksdammene gjort på samme måte i samtlige forsøk. Vannføringen ble økt gradvis til man fikk globalt brudd. Vannføringen ble økt etter at dammen hadde stått med en gitt vannføringen i en belastningstid uten at man fikk globalt brudd. Belastningstiden var 30 minutter i forsøk 1 og 60 minutter i de resterende forsøkene. Etter at den tilmålte belastningstiden var fullført ble vannføringen stoppet slik at man kunne utføre forskyvningsmålinger og dokumentere plastringens tilstand ved hjelp av bilder. Deretter ble vannet skrudd på igjen med økt vannføring. Det varierte hvor store steg man økte vannføringen med i hvert intervall. Det var fast praksis at man minsket vannføringsøkningen ved mistanke om at dammen kunne gå til brudd innen kort tid. Dette ble gjort for å få større nøyaktighet i bruddvannføringen. Tabell 4.1 og figurer i vedlegg A.2-F.2 viser hvordan hvert enkelt forsøk belastes og dermed hvor stor vannføringsøkning det er mellom hvert intervall der vannføringen

skrus av. Det var i hovedsak to grunner til at belastningsmønsteret ble variert. I de første forsøkene ble det valgt for små vannføringsøkninger, noe som førte til en meget tidkrevende prosess. Det ble derfor justert til større intervaller. I tillegg var det av interesse å se på hvordan ulike belastningsmønster påvirket forskyvningene og stabiliteten av plastringene. Vannføringen ble økt trinnvis i pådraget opp til ønsket belastningsvannføringen. For hvert trinn i pådraget ventet man til enhetsvannføringen var tilnærmet stabil før videre økning. Dette tok om lag 2 minutter.

### **3.7 Dokumentering, registrering og behandling av data**

Det ble utført omfattende dokumentering og dataregistrering i forbindelse med forsøkene. Disse dataene har senere blitt behandlet, og fremgangsmåten for både registrering og behandling er utdypet i dette delkapittelet.

#### **Synkronisering av klokke**

Alt måleutstyr som inneholdt klokke ble synkronisert med en masterklokke før hvert forsøk. Dette inkluderer interne klokke på alle kamera i tillegg til en mobilklokke som ble festet over renna slik at tidspunktpunktet var synlig i bildeutsnittet for videokameraet. Den interne klokken på datamaskinen der datafiler ble lagret ble benyttet som masterklokke.

#### **Loggføring**

For å sørge for god planlegging av forsøkene ble det laget veiledende sjekklister i starten av forsøksperioden som ble benyttet som grunnlag for gjennomføringen av forsøkene. Med utgangspunkt i denne sjekklisten ble det sørget for så lik gjennomføring som mulig hver gang. I tillegg ble det skrevet en detaljert logg under hvert forsøk der alt som ble gjort ble beskrevet og merket med tidspunkt i tillegg til å referere til tilhørende datafiler. Komplette forsøkslogger er vist i vedlegg A.3-F.3

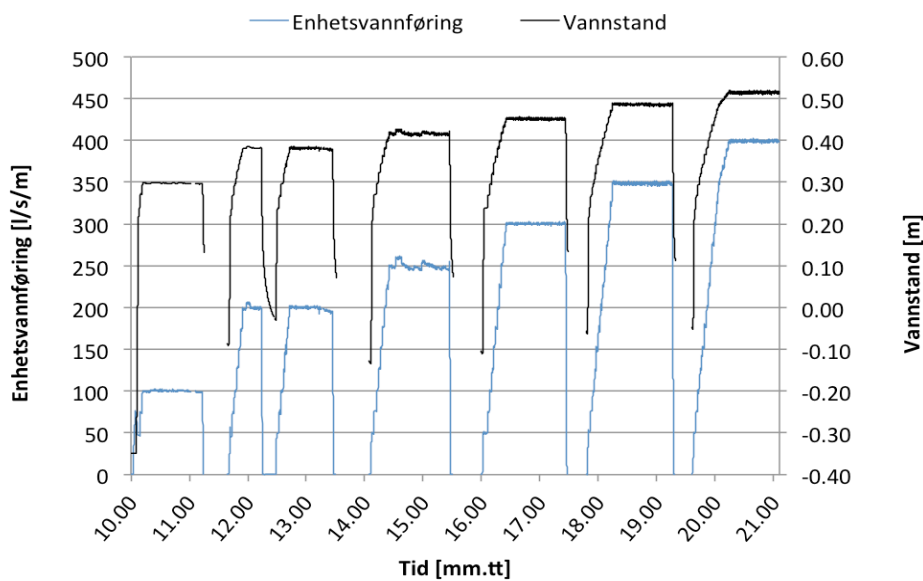
#### **Antall steiner og plastringstetthet**

Antall plastringssteiner benyttet i hvert forsøk ble ikke opptelt nøyaktig da dette vil tatt uhensiktsmessig mye tid. I stedet ble antall stein benyttet i forsøk 1 telt og brukt som referanse. For de resterende forsøkene ble det dokumentert hvor mange steiner som ble til overs eller lagt til i forhold til det første forsøket. Antallet steiner er oppgitt i intervall på fem steiner siden det vil være noe usikkerhet i hvor stor differanse det faktisk var. Usikkerheten skyldes at det ble gjort observasjoner på at enkelte plastringsstein ble knust når plastringen gikk til globalt brudd, og dermed ikke kunne benyttes med samme formål i neste forsøk.

Antall steiner i plastringen er brukt til å regne ut plastringstetthet, som er et mål på hvor mange steiner som legges pr  $m^2$ . Det er tatt utgangspunkt i at plastringen har et overflateareal på  $2,35 m^2$ . Antall steiner benyttet og plastringstetthet for hvert forsøk er presentert i underkapittel 4.2. I tillegg ble antallet steiner som forsvinner ut av plastringen mellom hver vannføring registrert.

### Enhetsvannføring og vannstandsmåling

Enhetsvannføring, vannstand oppstrøms modellen og hastighetsmålinger ble registrert automatisk i datafiler ved hjelp av programvaren Agilent Measurement. Målingene som ble gjort for å registrere enhetsvannføring og vannstand ble utført med en målefrekvens på 10 Hz. Målingene ble startet før man slo på vannføring og målte kontinuerlig frem til vannet ble slått av igjen med unntak av tidsrommet der konduktivitetmålinger ble utført. På bakgrunn av disse dataene ble det utarbeidet figurer som viser enhetsvannføring og vannstand som en funksjon av tiden. I figurene er det valgt å fremstille dataene med en oppløsning på ett sekund. Fra rådataene var det gitt 10 målepunkter hvert sekund, og for å redusere antall punkter i plottene regnes det ut gjennomsnitt av ti punkter.



Figur 3.10 – Eksempel på forsøkskjøring fra forsøk 6

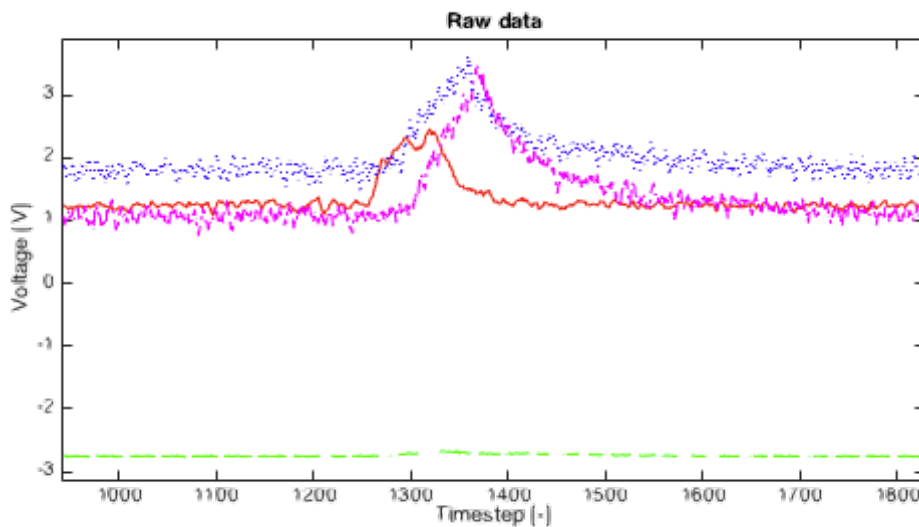
Figur 3.10 viser et eksempel på forsøkskjøring i forsøk 6. Enhetsvannføring og vannstand like oppstrøms dammen vises som en funksjon av tiden. Det er opphold i kurvene siden dataregistreringen ble stoppet når vannføringen ble stoppet for innmåling av markørsteiner.

### Hastighetsmålinger

Konduktivitetmålingene ble gjort med en målefrekvens på 100 Hz, da det viste seg at 10 Hz var for lavt til dette formålet. For å gjennomføre hastighetsmålingene ble dataregistreringen med målefrekvens på 10 Hz stoppet, før en hastighetsmåling med 100 Hz på gjennomført. Målingen ble gjort ved å helle en saltløsning bestående av omtrent 30 g salt oppløst i 0,4 l vann i vannet. Løsningen ble sluppet i vannet omtrent 1 meter oppstrøms bakre ende av forsøksdammen slik at det fordelte seg over hele rennas bredde. Målingen ble stoppet ca. 100 sekunder etter at løsningen ble tilsatt. Rådataene fra hastighetsmålingene ble behandlet ved hjelp av et Matlab-program som automatisk



regnet ut hastigheten mellom de forskjellige målerne. Tidspunktet med en tilhørende en topp i konduktivetsmålingene som følge av at saltløsningen passerer måleren er satt som ankomsttiden (figur 3.11). Programmet finner ankomsttiden ved de ulike målerne automatisk og beregner hastigheten mellom de ulike målerne ved hjelp av disse ankomsttid og distansene mellom målerne. Selv om hastighetsmålerne også måler konduktivitet i filter- og plastringslaget er det gjort en antagelse om at vannet vil strømme med mindre hastighet gjennom disse lagene, og at ankomsttiden som hentes ut fra rådataene vil være representativ for vannet som strømmer over plastringen. Dette stemmer bra med observasjonene gjort i kapittel 4.5.



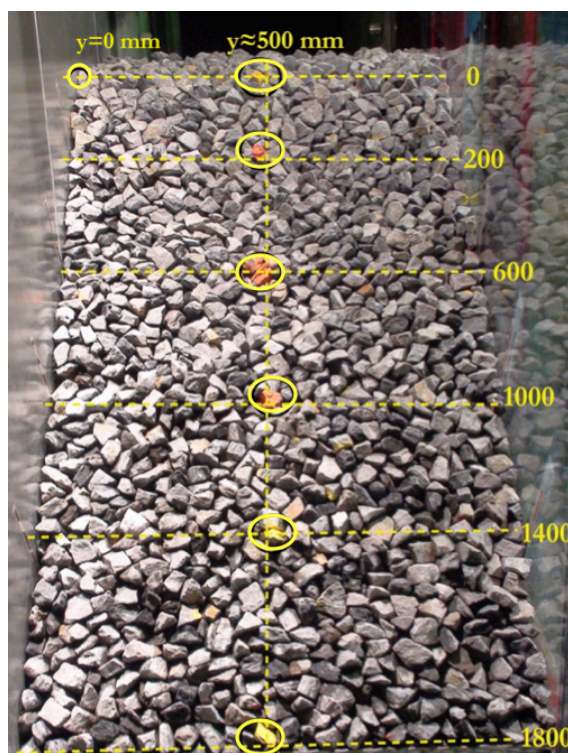
Figur 3.11 –Kurver fra konduktivetsmålinger fra forsøk 2. Grønn kurve er flat på grunn av defekt sensor

I tillegg er det forsøkt å beregne hastighetene manuelt ved avlesning av vannstanden  $h$  i z-retning over plastringssteinene fra bilder ved ulike vannføringen. Vannstanden måles fra toppen av plastringslaget, og leses av på den midtre måleren vist i figur 3.3. For å få et estimat på hvor stor andel som renner gjennom filter- og plastringslaget er det tatt utgangspunkt i verdier fra forsøk 1. Det ble kjørt 11,5 l/s/m gjennom steinlagene. Som et resultat av dette er beregningene gjort med utgangspunkt i at 11,5 l/s/m strømmer gjennom steinlagene, mens den resterende mengden strømmer over plastringen. Beregningene er gjort ved bruk av prinsippet om kontinuitet. Hastighetene er oppsummert i delkapittel 4.5.

### Markørsteiner og forskyvninger

Sju steiner som ble liggende på bestemte steder i plastringen benyttet som markørsteiner. I tre av steinene var det plassert Smartstones-sensorer. Disse var en del av undersøkelsene til en annen masterstudent, og er ikke videre omtalt i denne oppgaven. Steinene var plassert på rekke omtrent i midten av plastringen ( $y=500$ ). For å lettere kunne identifisere steinene ble de markert med gul maling. Steinene var fordelt

jevnt i x-retning. En stein var plassert i dammens knekkpunkt ( $x=0$ ), og videre nedover i skråningen på nivå med konduktivitetmålerne ( $x=200, 600, 1000, 1400$  mm). I tillegg var en stein plassert nederst i plastringen mot rista som ligger i bunn ( $x=1800$ ). Det ble også plassert en markørstein i krona, ca. 200 mm oppstrøms knekkpunktet ( $x=-200$  mm). Markørsteinene er heretter omtalt som MS0, MS200, MS600, MS1000, MS1400, MS1800 og MS-200 etter deres plassering i plastringen. Figur 3.12 illustrerer plasseringen av markørsteinene i skråningen.



Figur 3.12 – Plassering av markørstein i skråningen

Markørsteinene ble målt inn hver gang etter at vannet ble stoppet ved fullført belastning ved en gitt vannføring. De gangene det ikke var mulig å fullføre forsøkene i løpet av en dag ble det også foretatt innmåling av markørsteiene før man fortsatte å belaste plastringen neste dag. Innmålingen av markørsteinenes posisjon ble gjort ved hjelp av måleinstrumenter, og er forklart i kapittel 3.3. Data fra innmålingene ble registrert i en Excel-mal som automatisk regnet om koordinatene til det gjeldende koordinatsystemet. Forskyvningene ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ) er definert ved å subtrahere koordinatene til steinens opprinnelige posisjon fra koordinatene til steinens nye posisjon. I kapittel 4.4 er forskyvningsforløpene i x-retning presentert ved å plote forholdet mellom enhetsvannføring før innmåling mot forholdet mellom forskyvning og tilgjengelig forskyvningslengde ( $\Delta x/L$ ). Forskyvningene er summert som en kumulativ kurve som viser de totale forskyvningene.

## Bilder og video

Samtlige forsøk ble dokumentert ved hjelp av videokamera. Under det første forsøket var kun videokamera 1 tilgjengelig, og det ble montert slik at det filmet normalt på plastringen. Det viste seg i ettertid at dette videokameraet var uegnet til formålet, da det hadde en funksjon som gjorde at det automatisk sluttet å filme når det utsatt for høy lyd, slik som når plastringen gikk til raste ut og gikk til globalt brudd. For de resterende forsøkene ble det benyttet to videokamera. Grunnet usikkerhet om også det nye kameraet, videokamera 2, hadde samme ugunstige funksjonen, filmet begge kameraene normalt på plastringene i forsøk 2 og 3. Etter at det viste seg at videokamera 2 fungerte som ønsket, var det ikke lengere behov for å filme fra samme posisjon med begge kameraene. Videokamera 1 ble derfor flyttet ut av rennen, slik at det filmet plastringen fra siden gjennom glasset. Fotokamera ble benyttet til å ta stillbilder av plastringen fra faste posisjon. Bildene ble tatt for å dokumentere plastringens overflate mellom de forskjellige vannføringer og mens det kjørt vann over dammen.

### 3.8 Bruddkriterier og registrering av bruddvannføring

Et eksempel på gjennomføring av et forsøk er vist i figur 3.10. Den viser hvordan vannføringen og vannstanden like oppstrøms forsøksdammen varierer i løpet av forsøket. Vannstanden vil normalt bruke lengere tid på å nå et stabilt nivå etter regulering av vannføringen. I forsøkene ble det registrert det to typer brudd. Enhetsvannføring ved erosjon av første stein er definert som  $q_{init}$  og betyr at første stein blir erodert ut av plastringen. Den andre bruddtypen er globalt brudd, og enhetsvannføringen for globalt brudd  $q_c$  forteller hvor mye vann som strømmer over plastringen i det den bryter sammen. Med global brudd menes det at plastringen blir ødelagt slik at den ikke lengere tjener sitt formål. I tillegg registreres den høyeste enhetsvannføring dammen belastes med i en belastingsperiode uten at globalt brudd inntreffer,  $q_{maks}$ .

For bestemmelse av bruddtidspunkt for erosjon av første stein er man avhengig av å observere at steinen forsvinner ut av plastringen. Dette ble enten gjort ved at man faktisk observerte at steinen forsvinner eller at man så at det lå løse steiner i renna nedstrøms dammen etter at vannet ble stengt av. I tilfellet med observasjon av at steinen blir dratt ut av plastringen ble tidspunktet notert slik at kurvene som viser forsøksforløpet kan benyttes til å lese av vannføringen. I tilfellene der det ikke var mulig å se at steinen ble erodert ut av plastringen ble det forsøkt å benytte video for å finne bruddtidspunktet. Det viste seg å være utfordrende på grunn av stor vannhastighet med luftinnblanding som gjorde det vanskelig å identifisere steinen. I tilfellene der det ikke er mulig å indentifisere når første stein forsvinner ble bruddvannføringen satt til intervallet mellom minste og største vannføring som er kjørt i tidsrommet der steinen forsvant. Dette ble gjort i forsøk 1, der man observerte en løs stein i renna etter å ha stengt vannet etter å ha belastet plastringen med 100 l/s/m i en time. Det var ikke mulig å

observere når steinen forsvant ved hjelp av video, og dermed ble bruddvannføringen satt til  $q_{init}=0-100 \text{ l/s/m}$ .

Det var enklere å bestemme bruddvannføringen for globalt brudd. Globalt brudd er lett å se og høre. Bruddtidspunktet ble notert, og dersom plastringen ble belastet med en stabil enhetsvannføring er dette bruddvannføringen. Hvis plastringen gikk til globalt brudd under vannføringsøkning ble bruddtidspunktet notert, og man benyttet de registrerte dataene til å finne vannføringen. Ved globalt brudd vil det være en brå nedgang i vannstand oppstrøms dammen siden man ofte får en senkning eller fjerning av damkroppen som fører til endrede strømningsforholdene. Ved å se etter reduksjonen av vannstand kan bruddvannføringen identifiseres med større sikkerhet.

## 4 RESULTATER

Det ble totalt gjennomført 6 forsøk i forbindelse med denne masteroppgaven. Alle forsøkene var utsatt for overtopping. Dammene ble bygget med forskjellige plastringsmetoder. I dette kapitlet presenteres de viktigste resultatene og observasjonene som ble gjort i forbindelse med modellforsøkene. Leseren henvises til vedlegg A-F for dokumentasjon av forsøkene.

### 4.1 Belastningsmønster

Tabell 4.1 gir en oversikt over belastningsmønsteret ved de respektive forsøkene. Tabellen forteller hvor lenge man belastet med forskjellige enhetsvannføringer. Kun belastninger der den tilmålte tiden ble fullført er inkludert i tabellen.

Tabell 4.1 – Oversikt over belastningstid for forsøk. Belastningstid er gitt i timer.

q [l/s/m]	Forsøk 1	Forsøk 2	Forsøk 3	Forsøk 4	Forsøk 5	Forsøk 6
6	-	-	-	1	-	-
7	1	-	-	-	-	-
12	1	-	-	-	-	-
20	-	-	-	1	-	-
50	1	1	-	-	-	-
100	0,5	1	-	-	-	1
120	0,5	-	-	-	-	-
140	0,5	-	-	-	-	-
150	-	1	-	-	-	-
160	0,5	-	-	-	-	-
180	0,5	-	-	-	-	-
200	0,5	1	1	-	-	1
220	0,5	1	-	-	-	-
240	0,5	1	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-	1
260	-	1	-	-	-	-
275	-	-	-	-	-	-
280	-	1	-	-	-	-
300	-	1	-	-	-	1
320	-	1	-	-	-	-
340	-	1	-	-	-	-
350	-	-	-	-	-	17
360	-	-	-	-	-	-
380	-	-	-	-	-	-
400	-	-	-	-	-	5
Totalt belastningstid	7	11	1	2	0	26

## 4.2 Plastringstetthet

Plastringstettheten til de enkelte forsøkene er definert som antall stein pr m<sup>2</sup>. Tabell 4.2 angir antall steiner i hvert forsøk, og dens ekvivalente plastringstetthet.

Tabell 4.2 – Antall steiner og plastringstetthet

Forsøk	Antall steiner	Plastringstetthet [antall/m <sup>2</sup> ]
1	1185	504
2	1215	517
3	1240	528
4	1240	528
5	1120	477
6	1260	536

Oversikten viser at plastringstettheten er størst for forsøk 6, mens den er lavest for forsøk 5 som ble gjort med plastring uten forband. Differansen i antall steiner i forsøket med flest og færrest steiner er 140. I forsøk 4 ble skråningsvernet lagt som rauset steinfylling, noe som gjør at plastringstettheten ikke kan sammenlignes direkte med de andre forsøkene.

## 4.3 Bruddvannføring og bruddforløp

De forskjellige enhetsvannføringene som ble registrert i forbindelse med brudd er presentert i tabell 4.3.

Tabell 4.3 – Registrerte enhetsvannføringer ved erosjon av første stein, globalt brudd og tålt belastning i en belastningsperiode

Forsøk	$q_{init}$ [l/s/m]	$q_c$ [l/s/m]	$q_c/q_{init}$ [-]	$q_{maks}$ [l/s/m]
1	0-100	225	>2,25	240
2	100	360	3,6	340
3	250	250	1,0	200
4	37	37	1,0	20
5	75	75	1,0	IR
6	200	400	2,0	400

IR – Ikke registrert

Det er verdt å merke seg at det ikke var mulig å bestemme enhetsvannføring for erosjon av første stein  $q_{init}$  i forsøk 1, og at den dermed er satt som et intervall. I forsøk 3, 4 og 5 er  $q_{init}$  og enhetsvannføringen for globalt brudd  $q_c$  like, noe man ser av at forholdet  $q_c/q_{init} = 1$ . Erosjon av første stein skjedde i forbindelse med globalt brudd. Enhetsvannføringen for maksimal tålt belastning over en belastningsperiode  $q_{maks}$  er ikke målt for forsøk 5 siden dammen gikk til globalt brudd under første vannføringsøkning.

### 4.3.1 Posisjon av første steins bevegelse

Det var utfordrende å få med seg når første stein ble revet ut av plastringene, siden det ofte skjedde veldig raskt. Stor luftinnblanding vanskeliggjorde også situasjonen siden det ble vanskelig å identifisere bevegelse av steinene. Tabell 4.4 oppsummerer plasseringen (x- og y-koordinat) av steinen som først forsvant ut av plastringen.

Tabell 4.4 – Posisjon av stein som eroderes først ut av plastringen

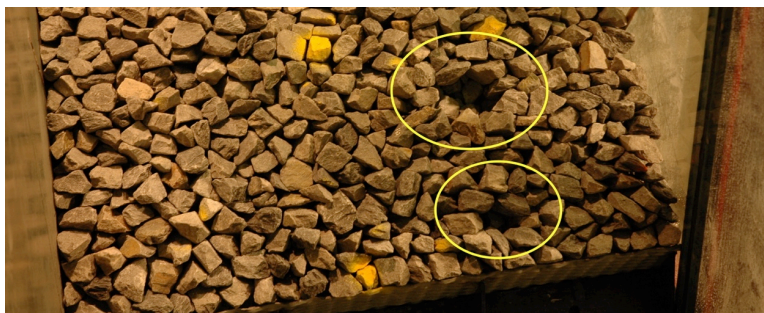
Forsøk	Posisjon	
	x [mm]	y [mm]
1	IR	IR
2	900	580
3	IR	IR
4	IR	IR
5	IR	IR
6	600	660

IR – Ikke registret

For forsøk 3, 4 og 5 rives første stein ut av plastringen i forbindelse med globalt brudd, og posisjon er dermed ikke registret. I forsøk 1 var det verken mulig å identifisere bruddtidspunkt eller plassering.

### 4.3.2 Manglende stein før globalt brudd og hull i plastring

I flere av forsøkene ble flere plastringsstein revet ut av plastringen før den gikk til globalt brudd. Dette resulterte i hull i plastringen der steinene opprinnelig var plassert. Disse hullene er markert på bilder tatt normalt på plastringens overflate for hvert enkelt forsøk i vedlegg A.5-F.5, og figur 4.1 eksemplifiserer to slike hull.



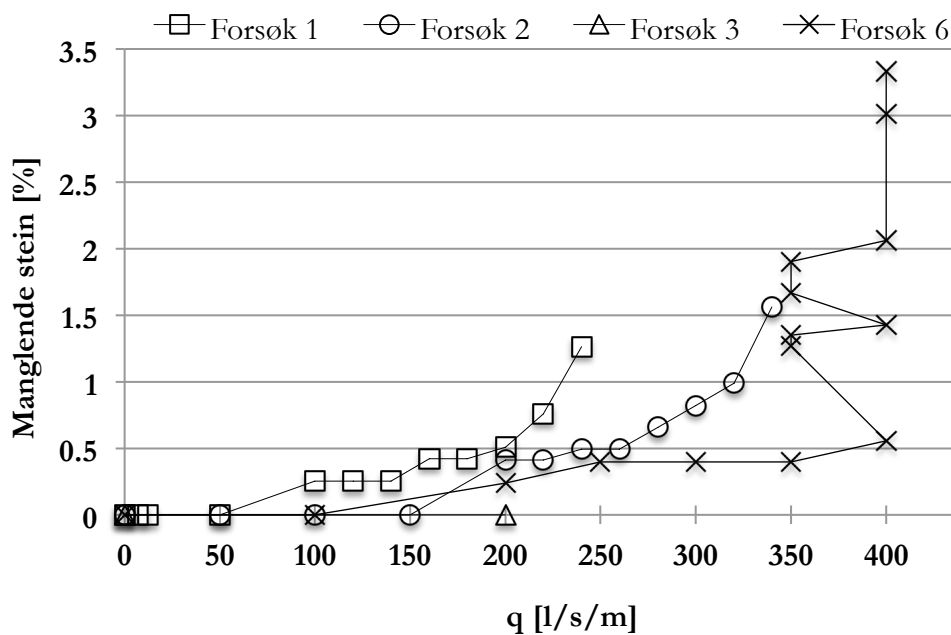
Figur 4.1 – Eksempler på hull etter utrevne steiner i forsøk 6

Tabell 4.5 oppsummerer hvor mange av steinene som ble erodert ut av plastringen før globalt brudd inntraff. Antallet er også presentert som prosentandel av det totale antallet steiner som ble brukt i plastringslaget. Antall stein benyttet i hvert forsøk er presentert i kapittel 4.2. Det ble gjort observasjoner på at de fleste hullene etter utrevet stein befant seg på høyre side av plastringen (x=500-1000).

Tabell 4.5 – Oversikt over andel manglende stein før globalt brudd

Forsøk	Antall manglende stein før globalt brudd	Manglende stein før globalt brudd [%]
1	15	1,4
2	19	1,6
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	42	3,3

Forsøk 3, 4 og 5 har 0 % manglende stein siden første stein ble erodert ut av plastringen i forbindelse med globalt brudd. Verdiene fra tabell 4.5 indikerer at plastringene der steinene er lagt i forband fortsatt har restkapasitet selv om enkeltsteiner eroderes ut av plastringen. Figur 4.2 viser hvor stor andel stein som mangler som en funksjon av enhetsvannføring. Andelen er gitt i prosent og summeres kumulativt.



Figur 4.2 – Oversikt over manglende stein i plastringen som funksjon av enhetsvannføring.

Forsøk 2 har en helt flat kurve siden ingen steiner ble erodert ut av plastring før dammen gikk til globalt brudd. Forsøk 6 har en litt annerledes form etter  $q=400$  l/s/m. Dette kan forklares ved at rennas maksimal kapasitet ble nådd, og dermed ble plastringen belastet videre med flere intervaller med  $q=350$  og  $400$  l/s/m frem til den gikk til brudd.



### 4.3.3 Beskrivelse av global bruddmekanisme

Alle forsøkene gikk til globalt brudd, dog med svært varierende global bruddvannføring  $q_c$  som oppsummert i tabell 4.3. Forskjellige bruddmekanismer ble observert i de forskjellige forsøkene og er beskrevet i tabell 4.6.

Tabell 4.6 – Beskrivelse av bruddmekanismer

Forsøk	Bruddmekanisme
1	Bruddet starter i overgang mellom skråning og krone der man observerer store forskyvninger. Dannes en horisontal glippe i y-retning i knekkpunktet mellom skråning og krone. Steiner i knekkpunktet forsvinner først, før det skrelles videre av nedover i skråningen fra toppen og ned. Resten av skråningsvernet skylles bort når filterlaget eksponeres. Vanskelig å beskrive bruddmekanismen da videoopptaket stoppet like før dammen gikk til brudd. Erosjon av flere enkeltsteiner før globalt brudd.
2	Globalt brudd starter i overgang mellom skråning og krone der man observerer store forskyvninger. Observasjon av samme type glippe som i forsøk 1. Steiner ved $x=0$ mm, $y=200-300$ mm rives først ut, før resten av plastringen gradvis skylles bort nedover skråning når filtermaterialet blir eksponert. Bruddmekanismen er tilnærmet identisk som i forsøk 1. Erosjon av flere enkeltsteiner før globalt brudd.
3	Bruddet starter i overgang mellom skråning og krone der store forskyvninger registreres. Også her observeres samme glippe som i forsøk 1 og 2. Initieres av steiner som rives ut ved $x=0$ , $y=600-800$ før resten av materialet i skråningen skrelles av nedover når filterlaget eksponeres. Ingen erosjon av enkeltsteiner før plastringen gikk til globalt brudd.
4	Ser ut som øvre del av skråningen sklir som en enhet i x-retning slik at filterlaget eksponeres. Materialet skylles deretter bort. Kan virke som om bruddet skyldes utglidning i filterlaget, men ingen entydige resultater. Ingen erosjon av enkeltsteiner før dammen gikk til globalt brudd.
5	Vanskelig å identifisere noen tydelig bruddmekanisme grunnet stor andel luftinnblanding i vannet som strømmer over skråningen. Fra siden kan man se at steinene i øvre del av skråningen setter seg og beveger seg i x-retning like før bruddet inntreffer, slik at filtermaterialet eksponeres. Usikkert om det er svikt i filter- eller plastringslag som utløser bevegelse. Plastringen skrelles deretter av fra knekkpunktet og videre ned skråningen. Ingen erosjon av enkeltsteiner før globalt brudd.
6	Samme bruddmekanisme som i forsøk 1, 2 og 3. Også her ble det observert en betydelig glippe i knekkpunktet mellom skråning og krone. Første steiner i forbindelse med globalt brudd forsvinner fra knekkpunktet. Ser tydelig at hele skråningen setter seg like før globalt brudd. Erosjon av flere enkeltsteiner før globalt brudd.

I forsøkene der plastringen var lagt i forband var det symptomatisk at man fikk store forskyvninger i overgangen mellom krone og skråning, slik at det ble dannet en horisontal glippe i y-retning langs hele dammens bredde. I tillegg var det en klar tendens til at kronesteinene nærmest knekkpunktet som opprinnelige var plassert med steinhelning  $\alpha=90^\circ$  la seg i en mer horisontal posisjon for å tette igjen glippen som oppstod. Før globalt brudd var forskyvningene ofte så store at det ikke lengere var kontakt mellom øvre del av skråningen og kronesteinene som hadde lagt seg horisontalt. Globalt brudd startet ved at steinene øverst i skråningen ble erodert bort. Deretter ble plastringslaget i skråningen skrellet av fra toppen og ned slik at filterlaget ble eksponert og skylt bort.

#### 4.4 Forskyvninger

Forskyvningene ble målt etter hver vannføring, men grunnet svært mange målinger er det valgt å oppsummere de samlede forskyvningene registrert ved siste innmåling før erosjon av første stein og globalt brudd. Oppsummerte forskyvningsverdier i alle tre retninger ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$  og  $\Delta z$ ) fra forsøk med forskyvningsmålinger er oppsummert i tabell 4.7-4.10. Enhetsvannføringen  $q$  dammen ble belastet med før gjennomføring av målingene indikert.

Tabell 4.7 – Oppsummerte forskyvning i forkant av erosjon av første stein og globalt brudd for forsøk 1

Markør-stein	$q$ [l/s/m]	Forskyvning før erosjon av første stein [mm]			$q$ [l/s/m]	Forskyvning før globalt brudd [mm]		
		$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$		$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$
-200	50	-3	2	-2	240	44	12	-28
0	50	5	0	-1	240	109	-7	9
200	50	3	0	1	240	123	-3	23
600	50	0	1	1	240	79	3	14
1000	50	1	0	1	240	53	-2	18
1400	50	-3	2	1	240	27	-3	17
1800	50	-7	0	-1	240	-2	1	3

Tabell 4.8 – Oppsummerte forskyvninger i forkant av erosjon av første stein og globalt for forsøk 2

Markør-stein	$q$ [l/s/m]	Forskyvning før erosjon av første stein [mm]			$q$ [l/s/m]	Forskyvning før globalt brudd [mm]		
		$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$		$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$
-200	150	4	-2	0	340	17	-1	-3
0	150	22	1	7	340	106	6	34
200	150	18	3	9	340	89	10	16
600	150	14	-1	8	340	70	-2	32
1000	150	8	-2	9	340	39	4	31
1400	150	5	0	6	340	32	6	27
1800	150	1	-1	6	340	12	0	15

Tabell 4.9 – Oppsummerte forskyvninger i forkant av erosjon av første stein og globalt brudd for forsøk 3

Markør-stein	$q$ [l/s/m]	Forskyvning før erosjon av første stein [mm]			$q$ [l/s/m]	Forskyvning før globalt brudd [mm]		
		$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$		$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$
-200	200	10	0	-7	200	10	0	-7
0	200	65	12	17	200	65	12	17
200	200	68	1	14	200	68	1	14
600	200	50	0	18	200	50	0	18
1000	200	29	-12	31	200	29	-12	31
1400	200	12	2	14	200	12	2	14
1800	200	4	-1	6	200	4	-1	6

Det er verdt å merke seg at forskyvningene i forsøk 3 er like før erosjon av første stein og globalt brudd siden første stein forsvant ut av plastringen i forbindelse med globalt brudd.

Tabell 4.10 – Oppsummerte forskyvninger i forkant av erosjon av første stein og globalt brudd for forsøk 6

Markør-stein	$q$ [l/s/m]	Forskyvning før erosjon av første stein [mm]			$q$ [l/s/m]	Forskyvning før globalt brudd [mm]		
		$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$		$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$
-200	100	4	1	-2	400	32	-8	-10
0	100	14	2	3	400	108	4	15
200	100	13	2	5	400	98	12	28
600	100	11	0	7	400	79	6	19
1000	100	10	2	12	400	52	10	19
1400	100	4	-1	8	400	20	-2	17
1800	100	2	-1	5	400	4	0	5

Siden forsøk 4 ble utført med rauset steinfylling ble det ikke målt forskyvninger i skråningsvernet, og derfor er det ikke noen tabell for dette forsøket. Det er heller ikke noen tabell som oppsummerer forskyvningene i forsøk 5, da dammen gikk til globalt brudd før innmålingene av markørsteiner ble gjennomført.

#### 4.4.1 Forskyvning av forskjellige akser

Sammenligning av forskyvningene i de tre forskjellige aksene viser tydelig at forskyvningene i y-retning, normalt på strømningsretningen, er minimale. Tabellene viser at markørsteinene som er plassert i skråningen har positiv forskyvning i z-retning, mens MS-200 i kronen gjennomgående har negativ forskyvning. Positiv z-verdi i skråningen betyr at steinene beveger seg ut fra underlaget, mens negativ z-verdi i krona betyr at steinen befinner seg på et lavere nivå enn opprinnelige. Oppsummert viser det samlede forskyvningsbildet små forskyvninger normalt på strømningsretning ( $\Delta y$ ) og moderate forskyvninger i z-retning. Forskyvningene i x-retning, langs dammens akse, er dominerende. Av denne grunn er det valgt å fokusere videre på disse forskyvningene.

#### 4.4.2 Forskyvning i forhold til plassering i skråningen

Med videre fokus på forskyvningene i strømningsretningen ( $\Delta x$ ) er det forsøkt å se på hvordan størrelsen av forskyvning er avhengig av markørsteinenes plassering i plastringen. Tabell 4.11 presenterer forholdet  $\Delta \bar{x}/L$  som sier hvor mye hver enkelt markørstein har forskjøvet seg i forhold til tilgjengelig forskyvningslengde.  $\Delta \bar{x}$  er den gjennomsnittlige forskyvningen målt før globalt brudd for de fire forsøkene. Distansen  $L$  er tilgjengelig forskyvningslengde, avstanden fra markørstein til nedre ende av plastringen ( $x=1800$ ). Dette gjør at  $L$  vil være 1800 mm for MS0, mens  $L$  vil være 800 mm for MS1000.

Tabell 4.11 – Oppsummering av markørsteinenes forskyvning i forhold til tilgjengelig forskyvningslengde

Markørstein	$\Delta \bar{x}$ [mm]	$L$ [mm]	$\Delta \bar{x}/L$ [%]
0	97	1800	5,4
200	95	1600	5,9
600	70	1200	5,8
1000	43	800	5,4
1400	23	400	5,8

MS-200 er ikke inkludert i tabellen siden steinen ligger i krona hvor steinene vil ha et annet forskyvningsmønster. MS1800 er også utelatt siden den ligger helt nederst i plastringen hvor det teoretisk ikke er noen tilgjengelig forskyvningslengde. Av verdiene i tabell 4.11 ser man at samtlige markørsteiner forskyver seg omtrent like mye i forhold til tilgjengelig forskyvningslengde. De relative forskyvningene viser tydelig at forskyvningene er størst i området rundt knekkpunktet (MS0 og MS200), med avtagende verdier jo lengere ned i skråningen steinen er plassert.



Figur 4.3 – Krone og knekkpunkt i forsøk 2 før belastning

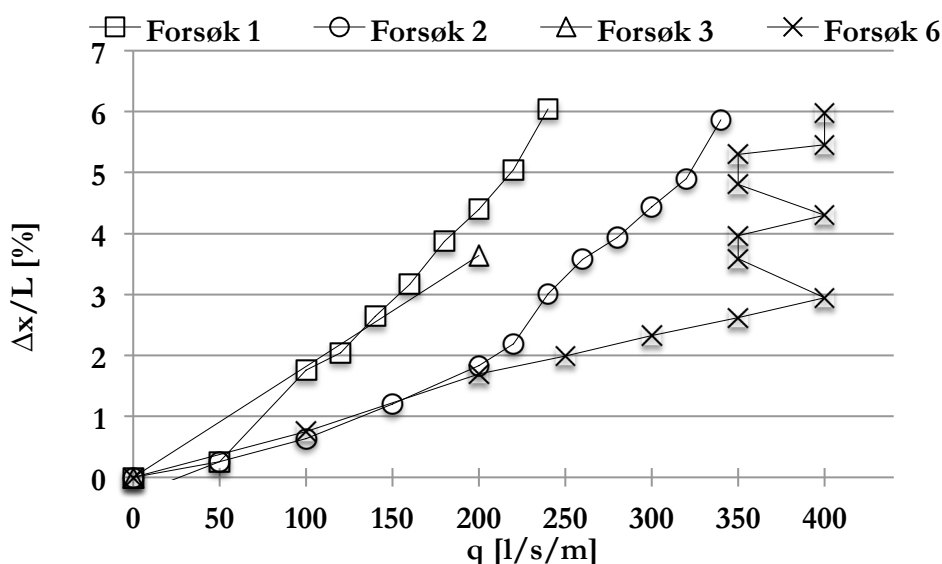


Figur 4.4 – Krone og knekkpunkt i forsøk 2 etter belastning med  $q=340$  l/s

Figur 4.3 og 4.4 illustrerer hvordan forskyvningene rundt knekkpunktet har utviklet seg fra før belastning til like før brudd. Flere bilder som viser utviklingen av forskyvningene finnes i vedlegg A-F.

#### 4.4.3 Sammenligning av forskyvning i forsøkene

Av tabell 4.6 fremgår det at forsøkene der det ble målt forskyvninger har en relativt lik bruddmekanisme som starter i knekkpunktet der skråningen og kronen møtes. Det ble observert store forskyvninger i dette området, som førte til en glippe som vist i figur 4.4. Dette området virker å være kritisk med tanke på globalt brudd, og det er derfor valgt å se nærmere på forskyvningsforløpet av markørsteinene i dette området. Figur 4.5 illustrerer forskyvningsforløpet i de ulike forsøkene for MS0. Forskyvningene er gitt som forholdet mellom forskyvning i x-retning og tilgjengelig forskyvningslengde( $\Delta x/L$ ) som en funksjon av enhetsvannføringen  $q$  dammen belastes med før den enkelte forskyvningsmålingen.



Figur 4.5 – Forskyvningsforløp for markørstein 0 i knekkpunktet

Figur 4.5 viser at tre av forsøkene (forsøk 1, 2 og 6) oppnår tilnærmet lik forskyvning ved siste måling før globalt brudd inntreffer, med en forskyvning på omtrent 6% av den tilgjengelige forskyvningslengden. Det er imidlertid stor variasjon i belastningen som skaper denne forskyvningen. Det er verdt å merke seg at det bare ble foretatt en innmåling av markørsteinene før dammen gikk til brudd i forsøk 3. Forskyvningene er vesentlig lavere med 3,5 %

#### 4.5 Strømningshastighet

Strømningshastigheten over plastringssteinene i skråningen er beregnet på to ulike måter. Ved hjelp av automatiske konduktivitetmålinger og manuelle beregninger basert på avlesning av vannstand i skråningen.

### Konduktivitetmålinger

Ved å se på grafiske fremstilling av konduktivitetmålingene (figur 3.11) var det klart at det er svært stor usikkerhet knyttet til om Matlab-programmet fant en fornuftig topp for konduktivitet. Det var dermed stor usikkerhet knyttet til den beregnede ankomsttiden, og majoriteten av målingene ble derfor forkastet. Usikkerhetene skyldtes mye støy i målingene og problemer med funksjonen av måleutstyret. I figur 4.6 er resultatene av de tilfredsstillende hastighetsmålingene plottet. Ved flere godkjente verdier ved samme enhetsvannføring beregnes en gjennomsnittshastighet

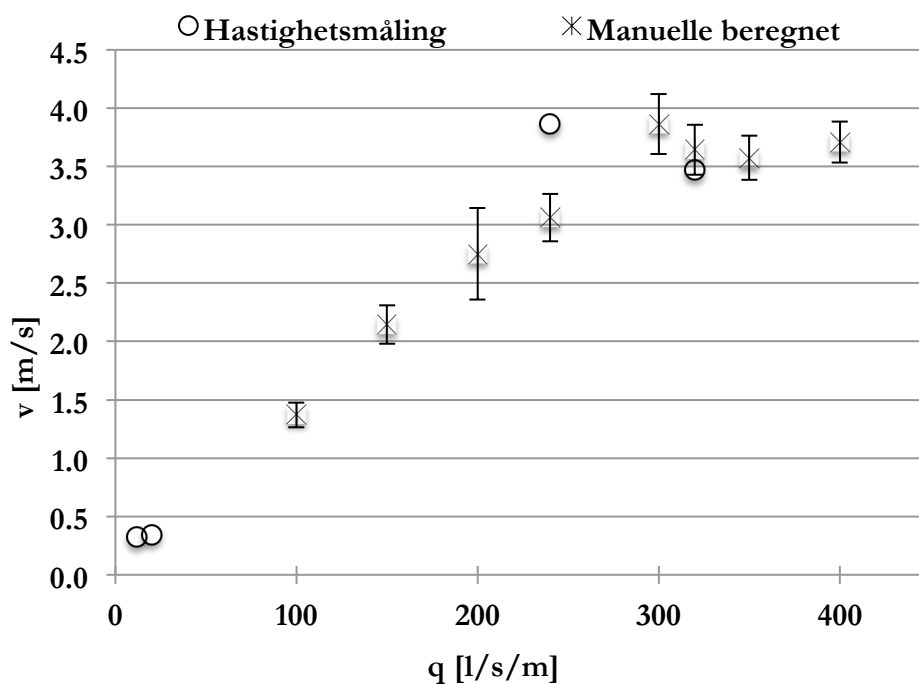
### Manuelle beregninger av hastighet

Tabell 4.12 viser de manuelt beregnede hastighetene og vannstanden som benyttes i beregningene. Vannstanden  $h$  og strømningshastigheten  $v$  er gitt i intervaller siden det er en viss variasjon i vannstanden over plastringen i x-retning. I tillegg er det er en viss usikkerhet i de manuelle avlesningene.

Tabell 4.12 – Manuelt avlest vannstand og beregnet hastighet

$q$ [l/s/m]	$y$ [m]	$v$ [m/s]
100	0,06-0,07	1,3-1,5
150	0,06-0,07	2,0-2,3
200	0,06-0,08	2,4-3,1
240	0,07-0,08	2,9-3,1
300	0,07-0,08	3,6-3,9
320	0,08-0,09	3,4-3,9
350	0,09-0,10	3,4-3,8
400	0,10-0,11	3,5-3,9

De manuelt beregnede hastighetene er plottet i figur 4.6 sammen med de godkjente verdiene fra konduktivitetmålingene.



Figur 4.6 – Målte og beregnede hastigheter over skråningsvernet

Figuren viser at hastighetsmålingene ved enhetsvannføring på 240 og 340 l/s/m gir relativt godt samsvar med de manuelle beregningene med en hastighet på omtrent 3,5 m/s. I det lavere sjiktet fra 50-240 l/s/m finnes det bare manuelt beregnede hastigheter siden verdiene fra konduktivitetsmålingene var ugyldige i dette området. Målinger ved  $q=11,5$  og 20 l/s/m der vannet kun renner gjennom skråningsvernet, henholdsvis ved plastring og rauset fylling gir godt samsvar med  $v \approx 0,3$  m/s.





## 5 DISKUSJON

*I dette kapittelet vil arbeidet som er gjort i forbindelse med forsøkene diskuteres. Dette inkluderer forsøksplan, materialer og gjennomføring av forsøk. I tillegg vil de oppnådde resultatene diskuteres og sammenlignes med tidligere utførte forsøk med NTNU samt eksisterende beregningsmetoder fra norsk og internasjonal litteratur.*

### 5.1 Forsøksplan og gjennomføring

Det viste seg at forsøksdammene tålte større belastning enn antatt på forhånd, noe som førte til at forsøkene ble svært tidkrevende. Dette førte også til at rennas maksimale kapasitet ble nådd, og i forsøk 6 var det derfor ikke mulig å øke enhetsvannføringen mer selv om plastringen hadde tålt en belastning på  $q = 400$  l/s/m i den tilmålte belastningstiden. For fremtidige forsøk belastet med kun overtopping vil det være hensiktsmessig å bruke mindre steiner eller å ha et system med utvidet kapasitet. Det var som regel minst to personer til stede under gjennomføring av forsøkene, noe som var nødvendig med tanke på innmåling av steiner og logistikk rundt forsøkskjøringen.

Registrering av vannstand og vannføring ble som regel stoppet etter at vannføringen ble stoppet, noe som førte til brudd i kurvene. For videre forsøk bør det vurderes å benytte en egen datamaskin som logger vannføring og vannstand kontinuerlig uten avbrudd, noe som vil forenkle arbeidet med å konstruere diagrammer ved at man får en enkelt fil å arbeide med.

Forskyvningene er beregnet med tanke på enkeltsteiner plassert på strategiske punkter i plastringen. Det er viktig å huske at forskyvningene gjelder for enkeltsteiner, og ikke plastringen som en helhet. Det hadde vært mer ideelt om man kunne benytte lasermålingene slik at man kan se på forskyvningene for plastringen som en helhet. Det antas allikevel at forskyvningene av markørsteinene er representative for steinene i området rundt, men det må utvises skjønn ved vurdering av forskyvningene. En markørstein kan for eksempel være løst plassert, noe som fører til større forskyvninger enn steinene rundt.

### 5.2 Styrke av plastring og bruddkriterier

Forsøkene viste stor variasjon i hvor stor enhetsvannføring som måtte til før det ble observert erosjon av første stein og globalt brudd. Sammenlignet med kravene fra veileder for fyllingsdammer i tabell 2.1 tåler plastringene utført med  $d_{50} = 57$  mm i flere av forsøkene større vannføring enn kravet til  $q_{min}$  (300 l/s/m) for en dam i konsekvensklasse 1. Av praktiske grunner vil det ikke være hensiktsmessig å bruke så små steiner i fullskala siden påkjenninger fra snø- og islast vil kunne plukke med seg

steinene. Steinene vil i tillegg være så små at personer som ferdes på dammen lett vil kunne løfte og plukke ut steinene med håndmakt.

### 5.2.1 Erosjon av første stein

I tabell 4.3 er enhetsvannføring ved erosjon av første stein oppsummert. I forsøkene med rauset fylling og plastring uten forband ble første stein erodert i forbindelse med globalt brudd. I tre av fire forsøk utført med plastring med forband forsvant første stein ut av plastringen ved vesentlig lavere enhetsvannføring enn global bruddvannføring. Enhetsvannføring for erosjon av første stein varierte mellom 0-100 l/s/m og 250 l/s/m i disse forsøkene. Det er vanskelig å se noen sammenheng ved at første stein forsvant ved en bestemt enhetsvannføring. Bilder tatt i forkant av belastning ble studert, men det var ikke mulig å identifisere noen visuelle tegn på svake områder der første stein ville forsvinne.

Tabell 4.4 presenterer plasseringen til første stein som ble revet ut av plastringen. Plasseringen av steinen som først eroderes ut av plastringen ble identifisert i to av tre forsøk der dette var aktuelt (forsøk 1,2 og 6). Plasseringen av steinene som forsvant først i forsøk 2 og 6 virker ikke å gi noen tydelig korrelasjon. Begge steinene forsvant fra omtrent samme posisjon i y-retning, men dette er av liten interesse siden det ikke vil være noen betydelige variasjoner av hastighet eller vannstand i denne retningen. I x-retning er det et avvik på 300 mm, og det er ikke mulig å si om det er noen sammenheng mellom plasseringen. Med mer nøyaktige hastighetsmålinger kunne det vært av relevans å studere strømningshastigheten over områdene der første stein forsvant for å verifisere om det er en kritisk hastighet som fører til at steinen eroderes ut av plastringen. Det er lite trolig at dette er tilfelle. En mer naturlig forklaring er at steinene som forsvinner først ligger løst plassert med dårlig kontakt til de omkringliggende steinene. Dette vil føre til at det skal mindre belastning til for at steinene rives ut.

Av tabell 4.3 ser man at forholdet mellom enhetsvannføring ved globalt brudd og erosjon av første stein ligger i området mellom 2,0-3,6 for tre av fire forsøk med plastring lagt i forband. I motsetning er det samme forholdet 1,0 for rauset steinfylling og plastring lagt uten forband. Dette illustrerer at man har stor restkapasitet i plastringen med forband selv om første stein eroderes ut av plastringen. Det vurderes derfor dit hen at det har liten hensikt å bruke erosjon av første stein som bruddkriterium for plastring.

### 5.2.2 Globalt brudd

Bruddvannføringer for globalt brudd er oppsummert i tabell 4.3. Selv om det ble utført relativt få forsøk, kommer det klart frem at det er store variasjoner i tålt enhetsvannføring ved de forskjellige plastringemetodene. Forsøkene der plastringen ble lagt i forband har størst styrke. Den globale bruddvannføringen var 6,2-10,8 ganger større enn for rauset steinfylling. Sammenlignet med plastring uten forband var plastring med forband 3,0-5,3 ganger sterkere. Plastring uten forband behøvde dobbelt så stor enhetsvannføring før den gikk til brudd sammenlignet med rauset steinfylling. Det er

imidlertid usikkert om dette er representativt siden det bare ble utførte et forsøk med plastring uten forband og rauset steinfylling. Den store forskjellen i styrke av plastring med og uten forband og virkning av forband diskuteres mer inngående i kapittel 5.6.

### **Variasjon i global bruddvannføring for plastring med forband**

Det er ikke bare de ulike plastringsmetodene som gir variasjoner i global bruddvannføring  $q_c$ . For de fire forsøkene som ble utført med plastring lagt i forband ble det observert bruddvannføringer som varierte mellom 225 og 400 l/s/m. Det er imidlertid grunn til å tro at forsøk 6 ville ha tålt større enhetsvannføringen enn 400 l/s/m, men siden systemets maksimale kapasitet ble nådd var det ikke mulig å belaste med større enhetsvannføring. I forsøk på å forstå hvorfor slike variasjoner i bruddvannføring oppstår, er det naturlig å se nærmere på en del av de kvantifiserbare faktorene som ble målt og presentert i kapittel 4.

Tre av fire forsøk gikk til globalt brudd når forskyvningene for markørsteinen i toppen av skråningen nådde omtrent 6% av den tilgjengelige forskyvningslengden ( $\Delta x/L$ ). Forskyvningene er målt før man øker vannstanden siste gang, så man kan ikke utelukke ytterlige forskyvninger før bruddet inntreffer. Dette kan forklare at forskyvningen i forsøk 3 var noe mindre med 3,5 %. Globalt brudd startet i overgangen mellom krone og skråning i tilknytning til glippen som oppsto som følge av forskyvningene av plastringlaget i skråningen. Forskyvningene økte gradvis med økende enhetsvannføring frem til plastringen gikk til globalt brudd. Bruddmekanismene diskuteres nærmere i delkapittel 5.5. Det er verdt å påpeke at forskyvningene kun er målt for enkeltsteinene, men det antas at verdiene er representative for plastringssteinene i samme område. Det er stor variasjon i hvor stor belastning som måtte til for å fremskaffe forskyvningene. Alle forsøkene er i prinsippet plastret på samme måte, men siden stein er et naturmateriale vil det ikke være mulig å utføre plastringene helt identisk. I forsøk 2 ble filterlaget lettere komprimert, og det antas at dette kan være med å gi økt styrke. Imidlertid viste forsøk 6 større styrke mot brudd uten noen form for komprimering. Det anbefales derfor at det utføres systematiske undersøkelser for å se hvilken virkning dette har på styrken av plastringen.

En annen parameter som varierte i forsøkene var plastringstettheten. Det virker å være en sammenheng mellom plastringstetthet og hvor raskt forskyvningene øker. Forsøk 1 som gikk til globalt brudd ved lavest enhetsvannføring hadde også den klart laveste plastringstettheten av forsøkene som der plastringen ble lagt i forband. Forsøk 6 som viste størst styrke hadde i motsetning den høyeste plastringstettheten. Plastringstettheten økte suksessivt fra første forsøk, og det kan tyde på at den som legger plastringen greier å legge steinene tettere etter hvert som erfaringer øker. Dette samsvarer godt med resultater fra en prosjektoppgave (Pettersen, 2014). Det var ikke mulig å se noen markant forskjell ut i fra hvem som utførte plastringene. Høyere plastringstetthet vil også medføre at det er mindre rom for steinene å forskyve seg i, og det antas at det må økte krefter til for å tvinge steinene til å innta en tettere posisjon.

Forsøk 1 med lav plastringstetthet har eksempelvis et mye raskere forskyvningsforløp enn forsøk 3 og 6 der steinene er lagt tettere. Dette illustreres godt av figur 4.5. Ved at steinene plasseres tettere er det også grunn til å tro at steinene får bedre innbyrdes kontakt og innlåsing ved høyere plastringstetthet.

Det ble også gjort observasjoner på at en rekke enkeltsteiner forvant ut av plastringen før den gikk til globalt brudd. Steiner som eroderes ut av plastringen vil frigjøre plass i skråningen slik at steinene kan forforskyve seg ytterligere for å innta en tettere posisjon. Det er forsøk å se om det er noen sammenheng mellom andel manglende steiner i plastringen og forskyvningsforløpet. I forsøk 1 som hadde lavest plastringstetthet er grunn til å tro at det er dårligere kontakt mellom steinene, noe som fører til at enkeltsteiner forsvinner ut av plastringen ved lavere enhetsvannføringer enn de andre forsøkene. Sammenligning av forskyvningene for MS0 i forsøk 3 og 6 (figur 4.5) viser at forskyvningsforløpet er omtrent identisk frem til  $q=200$  l/s/m. Etter dette punktet øker forskyvningene til forsøk 3, noe som kan sees ved at kurven blir brattere. Til sammenligning fortsetter kurven til forsøk 6 med tilnærmet det samme stigningstallet. Ved å sammenligne forskyvningsforløpet med figur 4.2 som viser andel manglende stein som funksjon av enhetsvannføringen, ser man at andel manglende stein er tilnærmet lik frem til  $q=200$  l/s/m. Forsøk 3 viser en tendens til at andelen manglende stein øker samtidig som forskyvningene akselereres etter  $q=200$  l/s/m. I forsøk 6 holdes andelen manglende stein tilnærmet konstant fra  $q=200$  til  $400$  l/s/m samtidig som det forskyvningene øker i samme tempo som tidligere. Det kan tyde på at økt andel manglende plastringsstein vil bidra til å akselerere forskyvningene ved at det skapes rom slik at steinene lettere kan flytte på seg.

Forsøkene ble også utsatt for forskjellige belastningsmønstre, noe som kan gi utslag på plastringssteinenes forskyvningsforløp og styrke. I forsøk 1 ble for eksempel belastningen økt med relativt små intervaller, og den totale belastningstide (6 timer) var mye større ved  $q=200$  l/s/m sammenlignet med forsøk 6 (2 timer). Dette kan ha gjort at store deler av forskyvningene i forsøk 1 skjer ved lavere enhetsvannføringer, og gjør at plastringen potensielt går til brudd ved en lavere enhetsvannføring enn om den hadde blitt belastet på samme måte som i forsøk 6.

Som belyst ovenfor, er det flere parametere som kan bidra til at bruddvannføringen varierer selv om forsøkene tilsynelatende er utført likt. Flere av parameterne henger sammen og påvirker hverandre, og det er utfordrende å forstå eksakt hvordan dette samspillet virker. For å kunne forstå dette bedre anbefales det å utføre systematiske tester der så mange av parameterne som mulig holdes konstante, slik at man kan se hvordan endring av en parameter påvirker resultatet.

### 5.3 Sammenligning med forsøk utført ved NTNU

Som omtalt i kapittel 2.6 er det tidligere utført en rekke modellforsøk med plastring i forbindelse med masteroppgaver på NTNU. I dette kapitlet vil de mest relevante

forsøkene sammenlignes med forsøkene utført i forbindelse med denne oppgaven i et forsøk på å sette resultatene i et større perspektiv. Ved å se på tidligere utførte forsøk vil det være mulig å sammenligne hvordan plastring utsatt kun for overtopping oppfører seg sammenlignet med en kombinasjon av overtopping og gjennomstrømning.

Forsøkene som brukes i sammenligningen er hentet fra Amundsen (2012), Langaker (2013) og Røer (2014). Forsøkene er gjennomført med vidt forskjellige oppsett og strømningssituasjoner. Alle forsøkene er gjennomført med skråningshelning lik 1:1,5, men grunnet varierende steinstørrelser og enhetsvannføringer benyttes det dimensjonsløse uttrykket for steinbasert Froudetall  $Fr_s$  til sammenligningen. Stabiliteten vil være økende med økt  $Fr_s$ . I de tidligere studiene ble det utført forsøk der steinene ble lagt som rauset steinfylling i tillegg til forskjellige former for plastring. Blant annet er dammene utsatt for varierende strømningssituasjoner og steinhelning, og forsøkene er derfor sortert etter oppsett. Froudetallet for de ulike forsøksoppsettene er presentert som forholdet mellom det steinbaserte Froudetallet for det respektive oppsettet og forsøk utført med rauset steinfylling. Tabell 5.1 oppsummerer forsøksoppsett og  $Fr_s/Fr_{s,rauset}$ . I forsøkene utført av Amundsen og Langaker er det benyttet flere ulike steinfraksjoner.

Tabell 5.1 – Sammenligning av steinbasert Froudetall for tidligere utførte modellforsøk ved NTNU

Utført av	$d_{50}$ [mm]	Steinhelning $\alpha$ [°]	Over- topping	Gjennom- strømning	$Fr_s$ [-]	$\frac{Fr_s}{Fr_{s,rauset}}$
Amundsen	26, 31, 41, 51, 73	Rauset	Ja	Ja	0,9	1,0
Langaker	27, 35, 41	Rauset	Ja	Ja	0,8	1,0
Langaker	27, 35, 41	63	Ja	Ja	3,6	4,8
Røer	25	Rauset	Ja	Ja	0,8	1,0
Røer	25	63	Ja	Nei	10,9	14,3
Røer	25	63	Ja	Ja	7,9	10,3
Pettersen	57	Rauset	Ja	Nei	0,9	1,0
Pettersen	57	60 u/forband	Ja	Nei	1,8	2,0
Pettersen	57	60 m/forband	Ja	Nei	7,2	8,3

Forsøkene utført med rauset steinfylling viser meget godt samsvar i verdiene for steinbasert Froudetall. Selv om verdiene tilsier at det ikke er noen forskjell om plastringen belastes med og uten gjennomstrømning, er det vanskelig å dra noen slutninger om dette siden det bare er utført ett forsøk med rauset fylling uten gjennomstrømning.

Forsøkene som er utført med plastring er lagt med tilnærmet lik steinhelning (60-63°), Siden stein er et naturmateriale vil det alltid være en viss variasjon, og et avvik på 3° vil være tilstrekkelig for sammenligning. Forsøkene som er gjort i forbindelse med denne

oppgaven er utført uten gjennomstrømning. Av de tidligere forsøkene gjorde Røer to forsøk med lik strømnings situasjon. Forsøkene i Røer Røer (2014) viste at det steinbaserte Froudetallet økte 14,3 ganger relativt til forsøk utført med rauset steinfylling. Til sammenligning er forholdet 8,3 for forsøkene utført dette semesteret. Røer gjorde forsøkene sine med fastlåsing av damtå, noe som kan føre til økt stabilitet. Generelt viser begge forsøkene at plastring med forband har betraktelig økt stabilitet sammenlignet med forsøk utført med rauset fylling.

Ved å sammenligne forsøkene som er gjort med både gjennomstrømning og overtopping med forsøkene uten gjennomstrømning, viser resultatene til Røer at dammer belastet med gjennomstrømning har lavere stabilitet. Forsøkene til Langaker ble også utført med samme strømnings situasjon, men viste vesentlig lavere stabilitet i forhold til rauset fylling enn i forsøkene til Røer. Det er uvisst hva denne store variasjonen kommer av.

Det har ikke blitt gjennomført forsøk der plastringen legges uten forband tidligere. Med tanke på at det bare ble gjennomført ett forsøk, er det en viss usikkerhet i om dette forsøket er representativt. Det steinbaserte Froudetallet indikerer at stabiliteten er dobbelt så stor som for rauset fylling. Stabiliteten er derimot mye lavere enn for plastring lagt der steinene legges i forband. Det anbefales at det utføres ytterligere forsøk slik at får en større database med resultater.

Sammenligningen gir godt samsvar med en rekke av betraktningene belyst i forbindelse med tidligere forsøk. I Røer (2014) konkluderes det med at gjennomstrømning virker å være ugunstigste strømnings situasjon, men at overtoppende vann reduserte virkningen av gjennomstrømningen ved å stabiliserer skråningsvernet. Siden det ikke ble gjort forsøk med gjennomstrømning er det vanskelig å etterprøve denne påstanden.

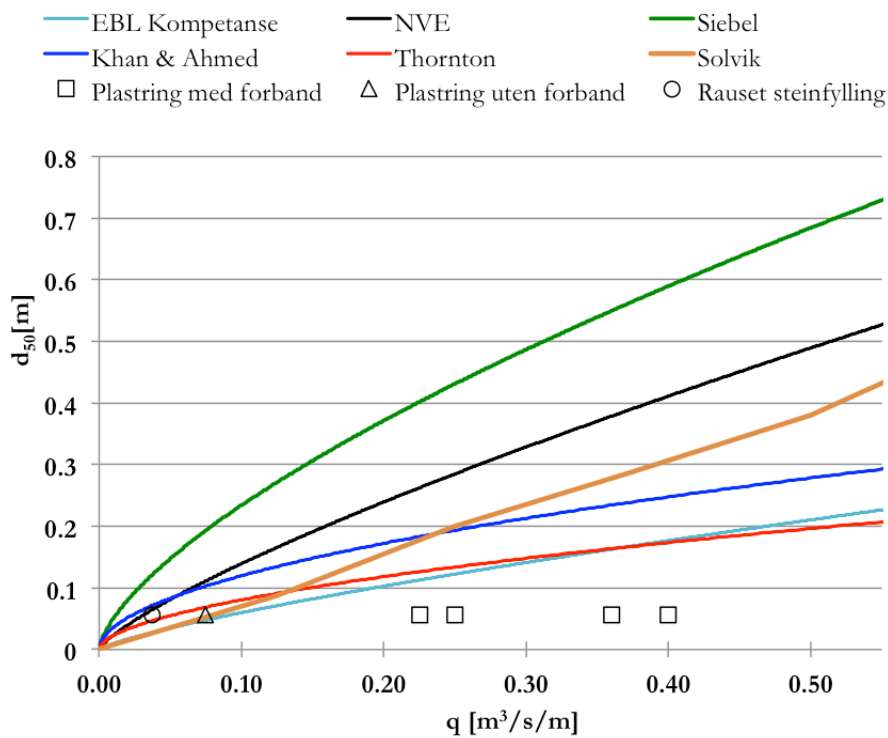
#### **5.4 Sammenligning med eksisterende metoder**

Resultatene fra modellforsøkene sammenlignes her med beregningsmetodene presentert i kapittel 2.5. Samtlige beregningsmetoder bygger på empiriske formler utviklet fra forsøk der steinene ble lagt som rauset steinfylling. Metodene har i tillegg varierende gyldighetsområde hva angår helning av skråningen. Bruddkriterium er også varierende i de ulike metodene. Dette er oppsummert i tabell 5.2.

Tabell 5.2 – Tillatt helning og bruddkriterium for beregningsmetoder

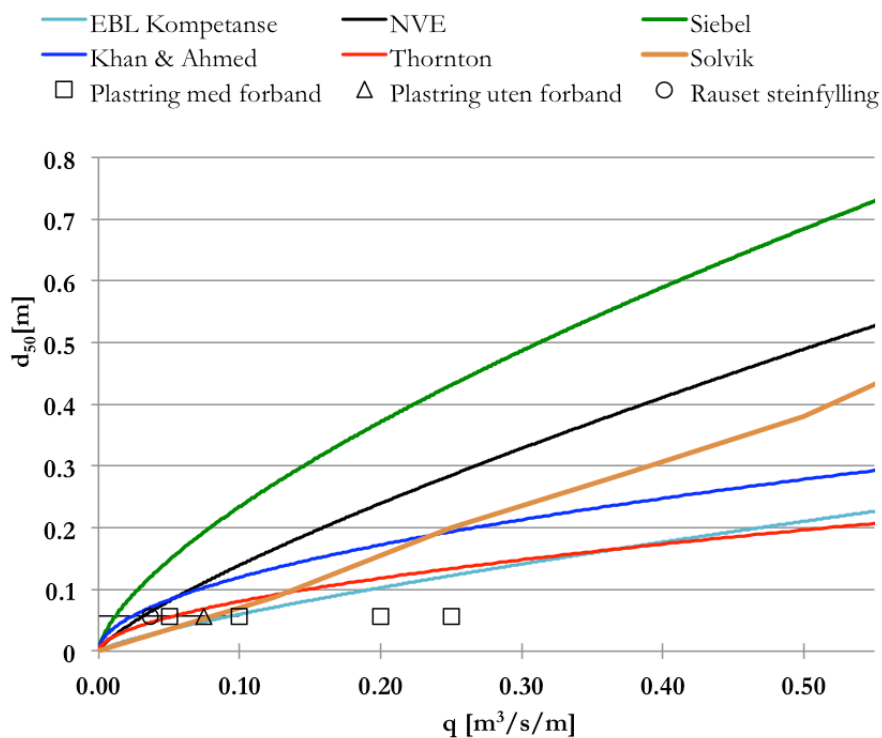
Metode	Formel	Bruddkriterium	Tillatt helning S
EBL Kompetanse	(2.10)	Begynnende brudd	1:1,5
NVE	(2.12)	Begynnende brudd	1:1,5
Siebel	(2.13)	Bevegelse av første stein	1:26-1:3
Khan & Ahmed	(2.14)	Underliggende lag eksponert	1:100-1:2
Thornton et. al.	(2.15)	Variierende	1:100-1:2
Solvik	Figur 2.9	Ukjent	1:10-1:1,5

Siden bruddkriteriene varierer er det besluttet å sammenligne metodene mot både observert  $q_{init}$  og  $q_c$  i forsøkene. Sammenligningen er gjort ved å utarbeide kurver for beregningsmetodene som viser forholdet mellom enhetsvannføring  $q$  og steinstørrelse  $d_{50}$  for damhelning 1:1,5. Observert steinstørrelse  $d_{50}$  sammenlignes med beregnet  $d_{50}$  for  $q_{init}$  og  $q_c$ . Inngangsparameterne som er benyttet for å utarbeide kurvene er oppsummert er presentert i vedlegg G.



Figur 5.1 – Beregningsmetoder og observerte verdier for erosjon av første stein

I figur 5.1 er enhetsvannføringen ved erosjon av første stein sammenlignet med beregningsmetodene, mens det i figur 5.2 sammenlignes med observerte enhetsvannføringer for globalt brudd.



Figur 5.2 – Sammenligning av beregningsmetoder og observerte verdier ved globalt brudd

Tabell 5.3 viser oversikt over gjennomsnittlig avvik fra observert  $q_{init}$  og  $q_c$  for de ulike beregningsmetodene. Siden det ikke er gitt noen formel som beskriver Solviks kurve i figur 2.9, var det ikke mulig å lese av noen nøyaktige verdier. Av denne grunn er Solvik ikke inkludert i tabellen.

Tabell 5.3 – Avvik mellom beregnet og observert  $d_{50}$  for beregningsmetoder

Plastringsmetode	Beregningsmetode	Gjennomsnittlig avvik [%]	
		$d_{50}$ for $q_{init}$	$d_{50}$ for $q_c$
Raset steinfylling	EBL	-52	-52
	NVE	12	12
	Siebel	112	112
	Khan & Ahmed	25	25
	Thornton et.al.	-12	-12
Plastring u/forband	EBL	-16	-16
	NVE	95	95
	Siebel	239	239
	Khan & Ahmed	81	81
	Thornton et.al.	21	21
Plastring m/forband	EBL	41	152
	NVE	227	486
	Siebel	419	764
	Khan & Ahmed	185	277
	Thornton et.al.	71	162



### **Rauset steinfylling**

Forsøk 4 som ble utført med rauset steinfylling gikk globalt brudd ved  $q_c=37$  l/s/m. Første stein forsvant ved samme vannføring, og er punktene identiske i begge figurene. Forsøket gjort med rauset steinfylling gir relativt godt samsvar med flere av beregningsmetodene, noe som var forventet siden beregningsmetodene er utviklet med basis i forsøk som ligner. Beregningsmetoden fra NVE gir best samsvar ved at den overestimerer  $d_{50}$  med 12 %. Siebel gir dårligst samsvar med et avvik på 112 %. Kurvene fra EBL og Thornton et.al. underestimerer beregnet steinstørrelse.

### **Plastring uten forband**

Forsøket der steinene ble plastret uten forband gikk til globalt brudd ved  $q_c=75$  l/s/m. Også her forsvant første stein i forbindelse med globalt brudd. Av beregningsmetodene er det bare kurven fra EBL Kompetanse som underestimerer beregnet steinstørrelse. De resterende metodene overestimerer  $d_{50}$ . Thornton et.al. gir best samsvar ved et avvik på 21%. Beregningsmetodene overestimerer generelt steinstørrelsen. Dette er naturlig da metodene er utviklet med hensyn på forsøk utført med rauset steinfylling som gir lavere motstand mot brudd sammenlignet med forsøk lagt som plastring.

### **Plastring med forband**

Tabell 5.3 viser at det er store avvik i observert og beregnet  $d_{50}$ . Sammenligning gjort med basis i observerte enhetsvannføringer for erosjon av første stein viser at samtlige beregningsmetoder overestimerer beregnet  $d_{50}$ . EBL Kompetanse gir best samsvar ved at formelen i gjennomsnitt overestimerer beregnet steinstørrelse for erosjon av første stein med 41 %. De resterende overestimerer steinstørrelsen med godt over 100 %. Dårligst er Siebel som beregner en steinstørrelse som er over 4 ganger større enn den observerte. Det var forventet at beregningsmetodene ville overestimere for  $d_{50}$  basert på enhetsvannføring for erosjon av første stein, siden en stein som ligger i plastring vil oppføre seg på en annerledes måte enn en stein i rauset fylling som formlene baseres på.

Ved bruk av enhetsvannføring ved globalt brudd som basis for utregningene overestimeres beregnet  $d_{50}$  ytterligere. Også her gir EBL Kompetanse best samsvar med 152 % større stein. For de andre beregningsmetodene ligger det gjennomsnittlige avviket mellom 179 og 765 %. Det er verdt å merke seg at samtlige beregningsmetoder med unntak av formel (2.12) fra veileder for fyllingsdammer er regresjonslinjer som er ment å gi best mulig samsvar med et visst datasett.

Formel fra veileder for fyllingsdammer er en dimensjoneringsformel med innlagt sikkerhetsfaktor som benyttes for i praktisk dimensjonering. Den overdimensjonerer tydelig steinstørrelsen med et avvik på 227 og 486% i forhold til observert  $d_{50}$  avhengig av hvilken enhetsvannføring man sammenligner med. Med dette som basis kan man slå fast at beregningsformelen ikke er egnet til å beregne steinstørrelse i plastring utsatt for overtopping, i og med at den ser ut til å overdimensjonere minste steinstørrelse kraftig. Dette var forventet i og med at formelen bygger på forsøk med rauset steinfylling. I et

samfunnsøkonomisk perspektiv kan man spørre seg om det er riktig bruk av ressurser å bygge plastringen med kraftig overdimensjonerte plastringssteiner. Det påpekes at dette gjelder for overtopping, og at nødvendig steinstørrelse for dammer utsatt for gjennomstrømning kan ligge nærmere beregnet steinstørrelse i beregningsformelen.

Det er tydelig at beregningsmetodene ikke er egnet for å beregne nødvendig steinstørrelse for dammer der steinene legges i plastring med forband. Mye antas å skyldes at formlene bygger på forsøk gjort ved rauset fylling. At man er utenfor gyldighetsområdet når det gjelder helning kan også bidra til at avviket forsterkes. Det er viktig å påpeke at det kun er gjort beregninger for dammer utsatt for overtopping. Som diskutert i kapittel 5.3 konkluderte Røer (2014) med at gjennomstrømning vil senke bruddvannføringen, noe som sannsynligvis vil føre til at avviket mellom observert og beregnet steinstørrelse minker. Det antas å være lite sannsynlig at dette fører til godt samsvar mellom verdiene. Formlene er konservative siden de vil gi en for stor steinstørrelse. For å få en bedre tilpasning, burde det tas sikte på å utvikle en empirisk formel basert på forsøk der skråningsvernet er lagt ut som plastring.

## 5.5 Bruddmekanismer ved globalt brudd

I dette underkapittelet vil de ulike bruddmekanismene som er beskrevet i tabell 4.6 diskuteres og sammenlignes med de teoretiske bruddmekanismene som ble introdusert i delkapittel 2.2.

### **Rauset steinfylling utsatt for overtopping (Forsøk 4)**

I det ene forsøket som ble utført med rauset steinfylling skled øvre halvdel av skråning som en enhet i x-retning slik at filterlaget ble eksponert i knekkpunktet. Det er imidlertid usikkert om det er filterlaget eller plastringslaget som initierer bruddet. Bruddsituasjonen stemmer godt med definisjonen av slump eller modifisert slump i delkapittel 2.2 avhengig av hvilket lag bruddet starter i. En sannsynlig bruddårsak er at steinene ligger nær materialets naturlige friksjonsvinkel. Friksjonsvinkelen vil senkes når materialet blir fuktig, og det trengs små belastninger for å utløse et globalt brudd. Grunnet usikkerhet rundt bruddinitiering anbefales det at fremtidige forsøk filmer plastringen fra siden slik at det er mulig å se hvilket av de to lagene bruddet starter i. Ingen steiner ut av plastringen før globalt brudd.

### **Plastret skråningsvern lagt uten forband utsatt for overtopping (Forsøk 5)**

I forsøket der skråningsvernet ble utført som plastring uten forband var det vanskelig å definere noen tydelig bruddmekanisme på grunn av stor luftinnblanding i vannstrømmen. Kameraet som filmet knekkpunktet fra siden viste at øvre halvdel av skråningen forskjøv seg i x-retning like før bruddet inntreffer. Det kan også se ut som plastringslaget knekker ut, ikke ulikt Siebels bruddmekanismen beskrevet i punkt 2.2. Det er ikke mulig å se om det er svikt i filterlaget eller plastringslaget som er årsaken til det globale bruddet. Grunnet stor usikkerhet i bruddmekanismen er det vanskelig å

sammenligne med bruddmekanismene beskrevet av Blodgett & McConaughy (1986). Det var ingen erosjon av enkeltsteiner.

### **Plastret skråningsvern lagt i forband utsatt for overtopping (Forsøk 1, 2, 3 og 6)**

I tre av fire forsøk ble enkeltsteiner erodert ut av skråningsvernet, hovedsakelig fra skråningen. Hull etter eroderte steiner kan sees i bildene fra forsøkene i vedlegg A.5-F.5. Dette samsvarer godt med bruddmekanismen partikkelerosjon der enkeltsteiner eroderes ut av plastringen.

En annen tendens var at steinene i skråningen forskjøv seg i x-retning ved at steinene inntok en tettere formasjon. Forskyvningene skapte en tydelig glippe i knekkpunktet mellom krone og skråning i y-retning. Steinene i øvre del av skråningen forskjøv seg nedover uten at steinene i kronen ble forskjøvet etter. Dette resulterte i at plastringssteinene i kronen plassert nærmest knekkpunktet, veltet og inntok en mer stabil situasjon da de ikke lengere var støttet opp at steiner på nedstrøms side, og på denne måten ble glippen til en viss grad tettet. Denne typen glippe ble også observert i forsøkene beskrevet i Røer (2014). Steinene i skråningen forskjøv seg etter hvert mer, men siden de veltede steinene i kronen ligger med lengste akse orientert horisontalt, vil de ikke ha mulighet til å tette glippen ytterligere. Steinene øverst i kronen vil da miste kontakten med kronesteinene. I punkt 2.3.1 er det presentert hvordan enkeltkrefter påvirker en stein utsatt for strømmende vann. Det er ikke hensiktsmessig å bruke kraftlikevekten til å beregne stabil steinstørrelse, men den gir et godt innblikk i hvilke krefter som påvirker steinene. Manglende kontakt med kronesteinene vil blant annet føre til at arealet utsatt for drag øker. De drivende kreftene som forsøker å løfte steinen ut av plastringen vil etter hvert bli større enn de stabiliserende kreftene, noe som fører til at den blir erodert. Prosessen fortsetter ved at steinene som ligger i toppen av skråningen eroderes fortløpende fra toppen og ned. Filtermaterialet vil dermed eksponeres ved at det overliggende plastringslaget eroderes bort. Siden filtersteinene er vesentlig mindre enn plastringssteinene vil de raskt eroderes på grunn at stor vannføring. Den beskrevne bruddmekanismen er ikke beskrevet i studert litteratur.

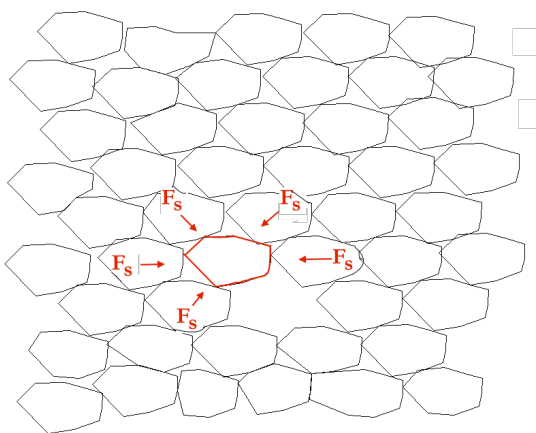
## **5.6 Virkning av forband**

Det har ikke vært mulig å måle og kvantifisere virkningen av forband direkte ved hjelp av måleutstyr, men ved betrakte de presenterte resultatene kan man indirekte få et innblikk i hvordan kvalitet og styrke av plastring blir påvirket av forband.

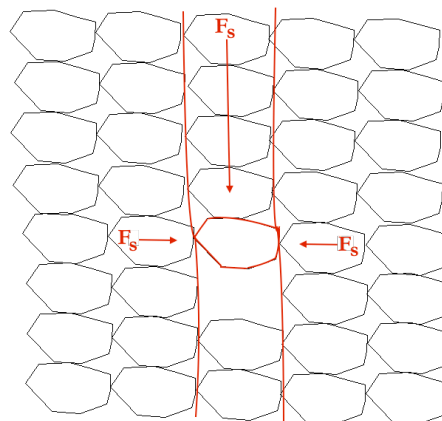
En av de tydeligste virkningene av forband er at det er til flere steiner i en plastring med forband, altså økt pakningsgrad. Ved at man plasserer plastringssteinene i forband vil steinen få flere kontaktpunkter enn en stein lagt uten forband, som illustrert i figur 5.3 og 5.4. I forsøkene med forband var plastringstettheten 5,7-12,4% høyere enn i forsøket der steinene ble lagt uten forband. Økt plastringstetthet vil også kunne kobles til plastringens evne til å la seg gjennomstrømme. Utsatt for overtopping vil det være sannsynlig å anta at økt pakningsgrad vil bidra til at en mindre andel av den

overtoppende vannstrømmen finner vei gjennom filter- og plastringlaget. Det er vanskelig å anslå hvordan dette påvirker styrken av plastringen, men en mulighet er at økt vannvekt over plastringen som vil bidra til å stabilisere plastringen. Som tidligere diskutert vil økt plastringstetthet også bidra til at steinene får mindre tilgjengelige areal å forskyve seg i, som kan føre til at det må større krefter til for å få den samme forskyvningen sammenlignet med en plastring med lavere tetthet. Dette vil dermed bidra til å øke plastringens styrke siden globalt brudd virker å ha direkte sammenheng med forskyvningene.

Ved at steinene i plastringlaget plasseres tettere er det naturlig å anta at kontaktflaten mellom steinene øker. Den økte kontaktflaten vil kunne bidra til å øke den innbyrdes innlåsing mellom steinene ved at kontaktkraft  $F_c$  (introdusert i punkt 2.3.2) som gir økt motstand når steinene blir forsøkt dratt ut av drivende krefter. Dette er spesielt relevant ved erosjon av enkeltsteiner i plastringen. En skulle tro at hull etter erodert stein vil føre til rask erosjon av steinene plassert i hullets rand. Som belyst i punkt 5.2.1 virker ikke erosjon av enkeltstein å være kritisk med tanke på globalt brudd, men kan bidra til å akselerere forskyvningene som leder til globalt brudd. I forsøkene med forband kunne man tydelig se relativt store hull i skråningen etter erodert stein uten at dette utviklet seg til globalt brudd.



Figur 5.3 – Krefter på stein ved hull etter erodert enkeltstein i plastring med forband



Figur 5.4 – Krefter på stein ved hull etter erodert enkeltstein i plastring uten forband

Figur 5.3 og 5.4 viser en prinsippskisse som illustrerer hvordan det er tenkt at sidekraften  $F_s$  virker på en plastringsstein plassert i tilknytning til et hull etter en erodert enkeltstein for plastring med og uten forband. Plastringssteinen ligger i ro, så kontaktkraftene  $F_c$  vil ikke virke før krefter prøver å dra steinen ut av plastringen. Av denne grunn er de ikke markert i skissene. Det antas at en plastring med forband vil oppføre seg annerledes enn en plastring uten forband når enkelsteiner eroderes ut av dekket. Forbandet virker å bidra til at steinene i større grad oppfører og virke seg som en enhet. Med dette menes det at plastringen er i stand til å omlagre kreftene slik at de

omkringliggende steinene støtter opp og holder steinene som ligger i nærheten av hullet på plass. Ved at skjøtene mellom steinene forskyves vil hver enkelt stein ha kontakt med to underliggende steiner, og dermed vil ikke steinen løsne selv om en av de underliggende steinene forsvinner. Som tidligere nevnt sørger forbandet også for at innlåsingskraften mellom steinene blir større, og denne kraften bidrar til at mer enn en stein bidrar til å låse den fast i posisjonen.

I en plastring der steinene legges uten forband forventes det at steinene i større grad vil virke som individuelle steiner. Steinene vil plasseres oppå hverandre uten noen form for forskyvning av skjøtene, og forenklet vil hver enkelt stein ha kontakt med fire omkringliggende steiner. Det er viktig å påpeke at denne mekanismen ikke ble observert i forsøkene siden forsøket som ble gjort uten forband gikk til globalt brudd før enkeltsteiner ble erodert ut av plastringen. Dette er en tenkt teoretisk bruddmekanisme. Hvis en stein eroderes ut av plastringen vil steinen i raden over miste fundamentet den ligger opplagret på som illustrert i figur 5.4. Det vil være en viss innlåsing på hver side av steinene. Mangelen på skjøter gir potensielt hele rekker der steinene hviler oppå hverandre. Tyngden at de overliggende steinene i kombinasjon med dårligere innlåsing vil kunne bidra til at steinen lokalisert over hulrommet lettere eroderes bort. Mangelen på forband kan altså bidra til en domino-effekt der erosjon av en enkeltstein kan bidra til at flere andre i samme område utsettes for det samme.

## **5.7 Feilkilder**

Det er viktig å ta hensyn til at forsøk som gjøres med plastring utføres med naturmaterialer, noe som vil gjøre det umulig å utføre forsøkene identisk. Dette i kombinasjon med ulike typer måleutstyr gjør at det er flere potensielle feilkilder som kan ha innvirkning på resultatene fra forsøkene.

### **5.7.1 Målefeil**

Det ble benyttet flere typer måleutstyr i forbindelse med forsøkene. Feilkilder som kan påvirke resultatene vil i noen grad kunne knyttes til måleutstyret.

#### **Registrering av stein**

Innmålingen av plastringssteinene ble gjort ved hjelp av skyvelær med nøyaktighet på 1 mm. I all hovedsak ble a-aksen målt først, og deretter ble b- og c-aksen orientering normalt i forhold til denne. Variasjon og unøyaktighet i hvordan aksene leses av kan påvirke resultatet av utregnede steindiameter, men siden det ble målt en fraksjon på 500 steiner vil unøyaktighet i innmåling av aksene på noen steiner har lite å si for fraksjonenes kornfordelingskurve.

25 kg av steinene som ble benyttet som filtermateriale ble kontrollmålt ved hjelp av sikteprøver. Siktingen ble gjort i henhold til NS8005, med unntak av at steinene ikke ble tørket i tørkeskap. Steinene hadde tørket i flere dager før siktingen ble gjennomført, og sannsynligheten for store vannmengder lagret i porer og sprekker ble vurdert som

minimal. Det ble i tillegg benyttet en digital vekt både til veiing av sikteprøver og plastringssteiner. Vekten ble kalibrert slik at den sto i vater før veiing. Det er antatt at det er liten sannsynlighet for målefeil i tilknytning til målingene som ble utført med vekten. For å fremskaffe en mer nøyaktig kornfordelingskurve hadde det vært fordelaktig å benytte et ekstra sjikt på 19 mm.

De fleste innmålingene ble registrert manuelt i Excel-ark. En potensiell feilkilde kan være skrivefeil under registreringen av innmålingene. Denne typen målefeil ble forsøkt eliminert ved at en person leste opp verdien som skulle registreres, mens en annen gjentok verdien og fikk bekreftet at dette var riktig før den ble skrevet inn i Excel-dokumentet.

### **Vannstandsmålinger**

Vannstandsmålingene ble gjort ved hjelp av en elektronisk vannstandsmåler der dataverdiene ble registrert automatisk i datafiler. For nøyaktige målinger anbefales det at sensoren startes 30 minutter før den skal brukes slik at den blir oppvarmet. I forsøk 3 hadde man hadde strømbrudd på sensoren, og den fikk kun 20 minutters oppvarmingstid før forsøksstart. Sensoren er gitt til å ha en måleusikkerhet på 1%, så det antas at målingene fra forsøk 3 vil være fullt brukbare siden man ikke har noen stor interesse av målingene som gjøres de 10 første minuttene etter at vannføringen startes.

### **Hastighetsmålinger ved hjelp av konduktivetsmålere**

Hastighetsmålingene ble gjort ved hjelp av hjemmelagde konduktivetsmålere. I de første forsøkene ble det benyttet kobberlimbånd som målere. Limbåndet viste seg å ha dårlig holdbarhet. Limet hadde ikke tilstrekkelig heft i kontakt med vann og løsnet. I tillegg ble limbåndet revet av når steinene som var plassert inn mot rennas vegger flyttet på seg. Dette førte til at øvre del av sensoren ikke fungerte, og målingene ble dermed utilstrekkelige. Før limbåndene fikk skader virket sensorene som de skulle og ga flere brukbare hastighetsmålinger.

Limbåndene ble byttet ut med sensorer laget av kobberplater. Disse sensorene viste seg å være mer robust med tanke på kontakt nærkontakt med steiner, men ga dårligere målinger ved at det ble registrert større mengder støy. Dette gjorde det problematisk å benytte resultatene. Det var problemer med loddepunktene til sensorene, og av den grunn var enkelte sensorene ute av funksjon i deler av forsøkene.

Totalt ble svært få av de registrerte hastighetsmålingene benyttet grunnet stor unøyaktighet og problemer med måleutstyret. Små feil i antatt ankomsttid kan gi svært store utslag i beregnet hastighet. Sensorene viste seg å ikke være egnet til å måle hastigheten med stor nøyaktighet, og har derfor bare blitt brukt til å gi et overslag på hastighetene ved forskjellige enhetsvannføringer.

### **Manuell avlesning av vannstand og beregning av hastighet**

Manuelle avlesninger av vannstanden over plastring ble gjort ved hjelp av bilder tatt fra siden av plastringen gjennom vinduet i renna. Det var ikke-uniform strømming i skråningen, og dermed vil vannstanden variere etter hvor den leses av. Det ble valgt å lese av vannstanden ved måleren plassert ved  $x=1200\text{mm}$ . Det viste seg å være vanskelig å lese av hastigheten med stor nøyaktighet. Målelinjene hadde en oppløsning på 1 cm, og var ikke plassert slik at nullpunktet traff plastringens overflate eksakt. Vannstanden i skråningen ble derfor lest av i et intervall som ble brukt til å regne ut hastigheten.

Hvor mye vann som strømmer gjennom de permeable lagene med filter- og plastringsstein er usikkert. Det ble tatt utgangspunkt i målinger fra forsøk 1, og beregningene ble gjort med antagelse om at 11,5 l/s/m strømmer gjennom steinene. Dette er en forenkling, og vann som strømmer over skråningsvernet vil øke vanntrykket. Økt vanntrykk vil sannsynligvis vil øke strømningskapasiteten gjennom skråningsvernet noe. Anslaget med  $q = 11,5 \text{ l/s/m}$  er konservativt siden strømningshastigheten etter alt og dømme overestimeres. Formålet med utregningene var kontroll av hastighetsmålingene og kan i bestefall brukes til å gi et grovt overslag på strømningshastigheten i skråning grunnet den beskrevne usikkerheten i avlesning i vannstand og strømming gjennom de permeable massene.

### **Innmåling av steiner og forskyvninger**

Innmålingene av markørsteinene som ble benyttet til å beregne forskyvninger er beskrevet i kapittel 3.7. Det kan knyttes en viss usikkerhet til innmålingene av markørsteinene. Noe av usikkerheten skyldes at innmålingen ble gjort ved hjelp av en batteridrevet avstandsmåler. I forsøkene som ble gjennomført over flere dager var målerens batterikapasiteten utilstrekkelig, og den måtte tas ned fra den fastede posisjonen. Det er vanskelig å kontrollere om måleren plasseres i eksakt samme posisjon som før batteribytting, noe som kan skape små avvik i målingene.

Det ble også etablert et referansepunkt for innmålingene. Punktet var markert i bunnen av profilet. Referansepunktet var ikke optimalt, da det rant et tynt vannlag over punktet ved innmåling etter kjørt vannføring. Det er allikevel antatt at dette maksimalt utgjør en målefeil på 2-3 mm i z-retning. Innmåling av referansepunktet ga i flere tilfeller verdier som avvek betydelig fra den opprinnelige innmålingen, hovedsakelig i x- og z-retning. Referansepunktet ble målt inn uten noen form for vanntrykk bak dammen før belastning, mens det til sammenligning var rundt 1,4 meter vanntrykk ved innmåling underveis i forsøkene. Det mistenkes at vanntrykket presser hele damkonstruksjonen i nedstrøms retning, og siden referansepunktet er markert på damprofilet vil også det flytte seg. Innmålingen av referansepunktet burde ha blitt gjort med vann bak dammen slik at forholdene blir så like som mulig. Plasseringen av referansepunktet ikke var ideelt.

### **Vannføringsmålinger**

Vannføringen ble målt ved stengeventilene før vannet kom inn i renna. Det hadde vært optimalt å måle vannføringen direkte over plastringen, men av praktiske grunner er

dette vanskelig. Vannføringsmålingene viser relativt nøyaktige målinger såfremt vannstanden har stabilisert seg slik at vannstanden er konstant. I tilfellene der bruddet skjedde i pådraget ved justering av vannføring vil ikke den avleste vannføringen i bruddtidspunktet nødvendigvis være lik mengden som strømmen over plastringen. Det er antatt at det vil ta relativt kort tid fra vannføringen ved stengeventilen er lik vannføringen over plastringen, siden volumet bak dammen er relativt lite. Verdier for brudd under pådrag vil ikke være eksakte, men vil gi et godt overslag. Vannføringsmålingene vil heller ikke ta høyde for lekkasjer. Lekkasjene ble målt til ca. 1 l/s/m før første forsøk. Lekkasjen på 1 l/s/m vil utgjøre under 1% av den totale vannføringen så fort enhetsvannføringen blir større enn 100 l/s/m. Etter forsøk 2 ble dammen tettet ytterligere, og det antas at lekkasjene var neglisjerbare etter dette.

### **Erosjon av første steiner**

Alle forsøk ble dokumentert med videokamera for å ha god dokumentasjon på bruddtidspunkt og bruddmekanismer. Det var utfordrende å identifisere erosjon av første stein, selv med video. Som tidligere nevnt opplevde man også tekniske problemer i forbindelse med det ene videokameraet, noe som resulterte i at det global bruddet ikke ble filmet i forsøk 1. Erfaringsmessig anbefales det å ha to kamera som filmer plastringen, ett som filmer overflaten og ett som filmer fra siden. Klokkene i kameraene bør synkronisert med en masterklokke, i tillegg til at det festes en klokke som er synlig i kamerautsnittet. Dette vil gjøre det enklere å navigere seg frem i videoen.

### **5.7.2 Skalaeffekter**

Det vil alltid være avvik mellom modell og fullskala siden det ikke er mulig å skalere alle relevante krefter og forhold i modellen i riktig skala ved den valgte modelloven. Et godt eksempel på dette er luftinnblanding, siden det ikke er mulig å skalere ned størrelsen på luftboblene i modellen. Siden tettheten til luft er den samme både i prototyp og modell vil dette påvirke en modell som er skalert ved hjelp av Froudes modellov. Forsøkene ble utført med én steinfraksjon, og det er derfor ikke valgt å se videre på skalaeffekter.



## 6 KONKLUSJON

Etter endt forsøksprogram konkluderes det med at forskjellige skråningsver har betydelig påvirkning på styrken til et skråningsvern. Forsøk der steinene legges som plastring med steinene i lagt i forband gir høyest bruddvannføringer for globalt brudd, med verdier i intervallet 225-400 l/s/m. Til sammenligning gikk dammen der steinene var lagt uten forband til brudd ved belastning på 75 l/s/m. Dette gir en relativ forskjell til 3,0-5,3. Raset steinfylling viste dårligst styrke med bruddvannføring på 37 l/s/m. Dette tyder på at forband bidrar til å gi økt styrke av plastringen utsatt for overtopping. Datagrunnlaget i imidlertid for lite til å konkludere med entydige svar, og det anbefales at det utføres ytterlige forsøk for å fremskaffe et større datagrunnlag.

Det ble registrert enhetsvannføring etter to ulike bruddkriterier i forsøkene. Enhetsvannføring ved erosjon av første stein  $q_{init}$  og global bruddvannføring  $q_c$ . I forsøkene med rauset steinfylling og plastring uten forband ble første stein erodert ut av plastringen i forbindelse med globalt brudd. I tre av fire forsøk med der plastringssteinene ble lagt i forband, ble første stein erodert ut av plastringen ved vesentlig lavere enhetsvannføring enn ved globalt brudd. Her var forholdet  $q_c/q_{init}$  mellom 2,0 og 3,6, noe som viser at plastringen har betydelig restkapasitet selv om en enkeltstein eroderes. Totalt ble mellom 1,4 og 3,3 % av det alle steinene ble erodert som enkeltsteiner før plastringen gikk til globalt brudd. Dette gir en god indikasjon på erosjon av enkeltsteiner ikke er kritisk for plastring lagt i forband. Det konkluderes på grunnlag av dette med at det er av liten hensikt å benytte erosjon av første stein som bruddkriterium.

Plastringsmetodene ga ulike bruddmekanismer. Forsøkene med plastring med forband viste lik bruddmekanisme i samtlige forsøk. Steinene i nedstrøms skråning hadde størst forskyvninger i x-retning, noe som førte til at det oppsto en horisontal glippe over dammens bredde i knekkpunktet mellom skråningen og krone. I tre av fire forsøk var forskyvningene i toppen av skråningen 6 % av tilgjengelig forskyvningslengde ved siste måling før globalt brudd. Det globale bruddet ble deretter initiert ved at de øverste steinene i skråningen ble erodert bort, før resten av plastringslaget ble raskt ble skrellet av fra toppen og ned. Det virker å være en klar sammenheng mellom forskyvninger i skråningen og globalt brudd. Bruddmekanismen er ikke definert i studert teori.

Det er flere virkninger av å legge plastringssteinene i forband. I forsøkene med forband øker plastringstettheten med 5,7-12,4% sammenlignet med forsøket uten forband. Ved at steinene legges i forband får hver enkelt stein flere kontaktpunkter og større kontaktflate med de omkringliggende steinene. Dette antas å bidra til økt innlåsing og motstand mot erosjon av enkeltsteiner.

Lav plastringstetthet gir dårligere kontakt og innlåsing av steinene, noe som fører til at enkeltsteiner lettere eroderes. Manglende steiner virker å bidra til at forskyvningsforløpet akselereres siden det finnes mer tilgjengelig rom for de gjenværende steinene å forskyve seg i. Det ble ikke observert erosjon av enkeltsteiner i forsøket der plastringen ble lagt uten forband. Plastringssteiner lagt i forband ser ut til å virke som enhet i større grad enn steiner som legges uten forband. Forbandet gjør at kreftene omfordes slik at steiner i tilknytning av et hull etter erodert stein ikke løsner og bidrar til ytterligere erosjon.

Sammenligning med resultater fra tidligere masteroppgaver ved NTNU underbygger teorier plastring gir økt styrke i forhold til rauset steinfylling.

Eksisterende beregningsmetoder er ikke egnet for å beregne dimensjonerende steinstørrelse siden de stort sett er empiriske formler basert på forsøk med rauset steinfylling. Beregningsmetodene er konservative ved at de overdimensjonerer nødvendig steinstørrelse for dammer utsatt for overtopping. Beregningsformel fra veileder for fyllingsdammer overestimerer steinstørrelsen grovt med et gjennomsnittlig avvik på 486 %, selv om denne faktisk brukes til å finne dimensjonerende steinstørrelse for plastringsstein. Dimensjoneringsformelen virker ikke å være egnet for dimensjonering av plastringsstein lagt i forband.

Steinfraksjonene som ble benyttet i filter- og plastringslag tilfredsstilte ikke alle krav og anbefalinger fra litteratur. Anbefaling om forhold mellom største og minste steinstørrelse i plastringslaget er 1,83, selv om anbefalingen fra NVE sier maksimalt 1,7. Kravet om at forholdet mellom største plastringsstein og minste filterstein skal være mindre enn fire ble heller ikke overholdt. Skråningsvernene i forsøkene har allikevel vist stor mostand mot brudd. En potensiell forbedring i anbefalingene til NVE vil være å gå bort i fra ekstremalverdier, og heller benytte  $d_5$  og  $d_{95}$  som er vanlig i annen litteratur.

## 7 VIDERE ARBEID

Siden modelldammene i de utførte forsøkene kun er belastet med overtopping anbefales det at det i fremtiden utføres supplerende forsøk med samme oppsett der det også belastes med gjennomstrømning og en kombinasjon av gjennomstrømning og overtopping. Det ble utført ett forsøk med plastringen uten forband. For å kontrollere etterprøvbareheten anbefales det at det utføres ytterligere forsøk med denne typen oppsett slik for å se om resultatet fra dette forsøket er representativt.

I forsøkene ble dammene bygget uten støttefylling. Det kunne ha vært av interesse å bygge dammer i samme skala med underliggende støttefylling for å undersøke om dette påvirker styrken av skråningsvernet og om man observerer de samme bruddmekanismene. Ved videre arbeid i samme forsøksrenne anbefales det å redusere steinstørrelsen siden plastringen viste seg å være stabile nært systemets maksimale kapasitet.

De eksisterende beregningsmetodene for dimensjonerende steinstørrelse er ikke egnet for skråningsvern der steinene legges som plastring. Et mål med videre arbeid bør være å utvikle en egnet empirisk formel som tar hensyn til at skråningsvernet plastres. Det er også viktig at et slik formel er gyldig for skråninger med helning inntil 1:1,5. For å fremskaffe en tilstrekkelig database må det gjennomføres forsøk på flere dammer, både i laboratorier og i fullskala.

Det viste seg at hastighetsmålingene som ble utført med konduktivitetmålinger ikke var tilfredsstillende. Så fremt man ikke greier å fjerne støy og gjøre målingene mer nøyaktige, anbefales det å heller bruke manuelle beregninger basert på vannstand til å gjøre overslag på strømningshastigheten i plastringen. For innmåling av forskyvninger er man avhengig av å finne et bedre referansepunkt som kan brukes til å kontrollere innmålingene. Det foretrukne alternativet er å benytte laserskanning til å dokumentere hele plastringens overflate, så fremt man er sikker på at dataene er brukbare. Det anbefales også at fremtidige forsøk dokumenteres med video filmet fra to ulike posisjon; normalt på skråningens overflate og fra siden. Dette vil bidra til at det blir lettere å identifisere bruddmekanismer.



## 8 REFERANSER

- ABT, S. R. & JOHNSON, T. L. 1991. Riprap Design for Overtopping Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117, 959-972.
- ABT, S. R., THORNTON, C. R., SCHOLL, B. A. & BENDER, T. R. 2013. Evaluation of Overtopping Riprap Design Relationships. *Journal of The American Water Resources Association*, 49, 15.
- AMUNDSEN, J. M. 2012. Laboratorieforsøk av plastring av nedstrøms skråning på fyllingsdammer. *Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim*.
- BAJRACHARYA, P. 2013. Throughflow capacity of downstream slope and rip rap structure of Kulekhani Dam. *Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim*.
- BLODGETT, J. C. & 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.
- DAMSIKKERHETSPROSJEKTET 1992. Prosjekt damsikkerhet, rapport nr. 5: Overtopping av tetningskjernen i fyllingsdammer.
- EBL KOMPETANSE 2004. CD: Stability and Breaching of Embankment Dams.
- EBL KOMPETANSE 2005. *Stability and breaching of embankment dams, Report on Sub-project 2, Stability of downstream shell and dam toe during large through-flow*, Oslo, EBL kompetanse AS.
- EBL KOMPETANSE 2007. *Stability and breaching of embankment dams, Report on Sub-project 3 (SP3), Breaching of embankment dams*, Oslo, EBL kompetanse AS.
- ENERGI NORGE 2011. Forvaltningspraksis ved norsk damsikkerhet. In: KJELLESVIG, H. M. (ed.). Energi Norge.
- HELLER, V. 2011. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 49, 293-306.
- JENSSEN, L. & TESAKER, E. 2009. Veileder for dimensjonering av erosjonssikring av stein.
- KHAN, D. & AHMED, Z. 2011. Stabilization of Angular-Shaped Riprap under Overtopping Flows. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 59, 5.
- KJÆRNSLI, B., VALSTAD, T. & HØEG, K. 1992. *Rockfill dams: design and construction*, Trondheim, Norwegian Institute of Technology. Department of Hydraulic Engineering.
- LANGAKER, O. K. 2013. Plastring av nedstrøms skråning på fyllingsdammer. Prototyp- og modellforsøk. *Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim*.
- LIA, L., VARTDAL, E. A., SKOGLUND, M. & CAMPOS, H. E. 2013. Rip Rap Protection of Downstream Slopes of Rock Fill Dams - A Measure to Increase Safety in an Unpredictable Future Climate. 10.
- LIE, Ø. 2015. *Knusende kritikk for NVE: Risikerer å bruke milliarder på damsikring uten effekt* [Online]. <http://www.tu.no/kraft/2015/04/13/knusende-kritikk-for-nve>

[risikerer-a-bruke-milliarder-pa-damsikring-uten-effekt:](#)  
[Accessed 15.04 2015].

Teknisk Ukeblad.

- LYSNE, D. K. 1982. Laws of Similitude. 8.
- NVE 2007. Retningslinjer for fyllingsdammer. *Oslo: NVEs hustrykkeri.*
- NVE 2012. Veileder for fyllingsdammer. *Oslo: NVEs hustrykkeri.*
- OLJE- OG ENERGIDEPARTEMENTET 2000. Lov om vassdrag og grunnvann (vannressursloven).
- OLJE- OG ENERGIDEPARTEMENTET 2009. Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften).
- PETTERSEN, E. H. 2014. Plastring av fyllingsdammer - Kvalitet av plastring. 75.
- PFISTER, M. & CHANSON, H. 2012. Scale effects in physical hydraulic engineering models By VALENTIN HELLER, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No. 3 (2011), pp. 293–306. *Journal of Hydraulic Research*, 50, 244-246.
- ROBINSON, K. M., RICE, C. E. & KDAVY, K. C. 1998. Design of rock chutes. *Transaction of the ASAE*, 41.
- RØER, H. E. 2014. Nedstrøms skråning av steinfyllingsdammer - modellforsøk av plastring under like strømningsforhold. *Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim.*
- SIEBEL, R. 2007. Experimental investigations on the stability of riprap layers on overtoppable earthdams. *Environmental Fluid Mechanics*, 7, 455-467.
- SOLVIK, Ø. 1962. To-dimensjonal turbulent strømning gjennom isotrop steinfylling. *Vassdrags og havnelaboratoriet ved Norges Tekniske Høyskole. Trondheim.* .
- THORNTON, C. I., ABT, S. R., SCHOLL, B. N. & BENDER, T. R. 2014. Enhanced Stone Sizing for Overtopping Flow. 4.
- U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION 2001. Engineering Geology Field Manual. II.
- WALPOLE, R. E. 2007. *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*, Pearson Prentice Hall.

# INNHOOLDSLISTE VEDLEGG

<b>A. VEDLEGG – FORSØK 1</b> .....	<b>A-1</b>
A.1 BESKRIVELSE AV FORSØK.....	A-1
A.2 FORSØKSKJØRING .....	A-2
A.3 FORSØKSLOGG 1 .....	A-4
A.4 INNMÅLING AV MARKØRSTEINER.....	A-11
A.5 BILDER AV FORSØK 1.....	A-12
<b>B. VEDLEGG – FORSØK 2</b> .....	<b>B-1</b>
B.1 BESKRIVELSE AV FORSØK .....	B-1
B.2 FORSØKSKJØRING .....	B-2
B.3 FORSØKSLOGG 2.....	B-3
B.4 INNMÅLING AV MARKØRSTEINER .....	B-11
B.5 BILDER AV FORSØK 2.....	B-12
<b>C. VEDLEGG – FORSØK 3</b> .....	<b>C-1</b>
C.1 BESKRIVELSE AV FORSØK .....	C-1
C.2 FORSØKSKJØRING .....	C-1
C.3 FORSØKSLOGG 3.....	C-2
C.4 INNMÅLING AV MARKØRSTEINER.....	C-4
C.5 BILDER AV FORSØK 3.....	C-4
<b>D. VEDLEGG – FORSØK 4</b> .....	<b>D-1</b>
D.1 BESKRIVELSE AV FORSØK .....	D-1
D.2 FORSØKSKJØRING.....	D-1
D.3 FORSØKSLOGG 4.....	D-2
D.4 BILDER AV FORSØK 4.....	D-3
<b>E. VEDLEGG – FORSØK 5</b> .....	<b>E-1</b>
E.1 BESKRIVELSE AV FORSØK 5.....	E-1
E.2 FORSØKSKJØRING .....	E-1
E.3 FORSØKSLOGG 5.....	E-2
E.4 BILDER AV FORSØK 5.....	E-3
<b>F. VEDLEGG – FORSØK 6</b> .....	<b>F-1</b>
F.1 BESKRIVELSE AV FORSØK 6 .....	F-1
F.2 FORSØKSKJØRING .....	F-2
F.3 FORSØKSLOGG 6.....	F-5
F.4 INNMÅLING AV MARKØRSTEINER .....	F-16
F.5 BILDER AV FORSØK 6 .....	F-18
<b>G. VEDLEGG - BEREGNINGSMETODER</b> .....	<b>G-1</b>
<b>H. VEDLEGG - STEINDATA</b> .....	<b>H-1</b>
<b>I. ELEKTRONISK VEDLEGG</b> .....	<b>I-1</b>

# A. VEDLEGG – FORSØK 1

## A.1 Beskrivelse av forsøk

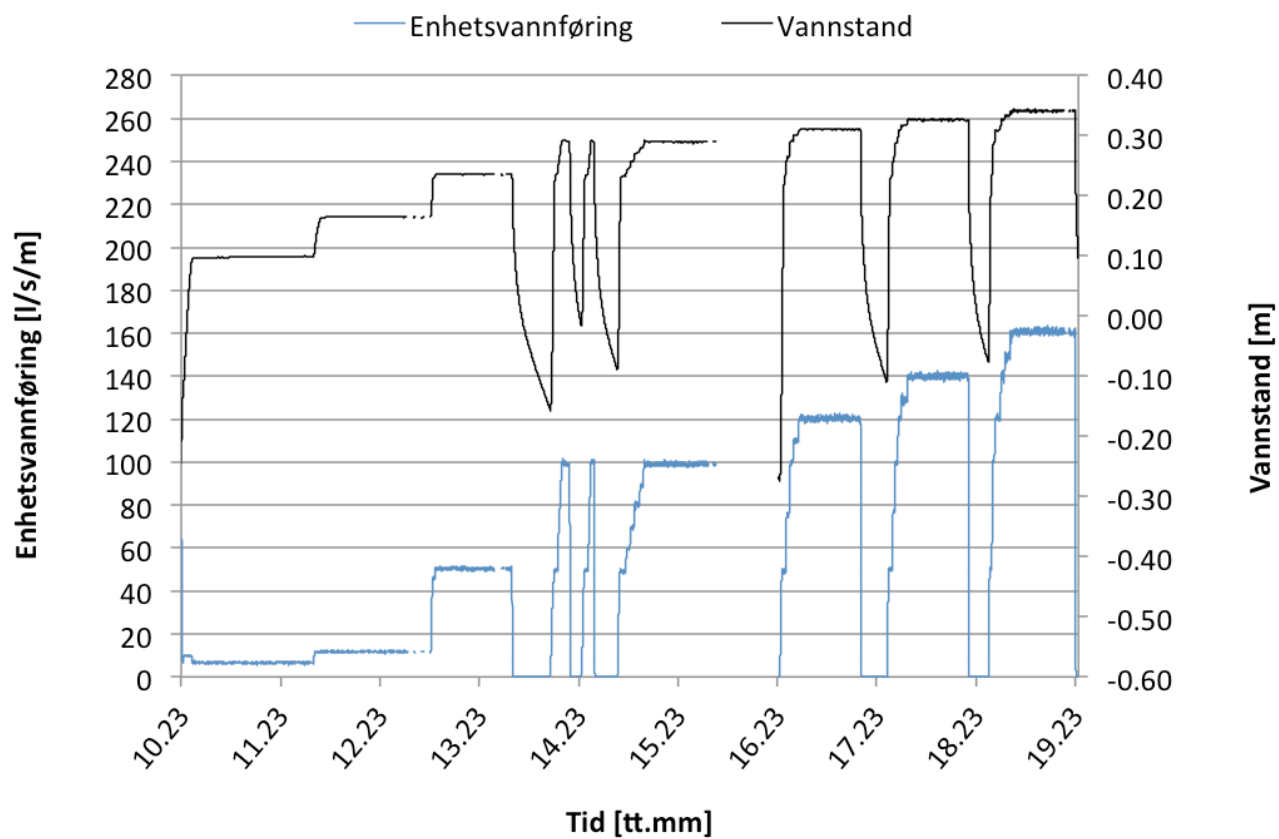
Forsøk 1 var det første forsøket som ble gjennomført, og ble dermed et slags testforsøk der man undersøkte om den tiltenkte forsøksplanen fungerte. Plastringen var bygget med et 10 centimeter filterlag og et plastringslag. Plastringssteinene var lagt med en steinhelning  $\alpha=60^\circ$ . I damkrona var det også benyttet plastringsstein som var plassert med steinhelning  $\alpha\approx 90^\circ$ . Forsøket ble gjennomført gjennom tre dager; 27.03.15, 07.04.15 og 08.04.15. Forsøket startet klokken 10:18, Vannføringen ble tilpasset slik at vannet kun rant gjennom filteret med en enhetsvannføring  $q_f=7$  l/s/m. Deretter ble vannføringen økt slik at det rant vann gjennom filter og plastringslag med enhetsvannføring  $q_{rf}=12$  l/s/m. Klokken 12:53 ble enhetsvannføringen økt til 50 l/s/m. Klokken 13:04 ble de første bevegelsene av steinene observert gjennom glasset, men steinen stabiliserte seg i løpet av kort tid. Etter 30 minutter belastning med 50 l/s/m ble vannføringen skrudd av, og markørsteinene målt inn. Klokken 14:05 ble vannføringen skrudd på igjen. Først 50 l/s/m, og etter at den hadde stabilisert seg, på samme vannstand som før innmålingen, ble vannføringen økt til 100 l/s/m. Klokken 14:15 hørtes en lyd, og vannet ble skrudd av siden det var mistanke om at det er første stein som dras ut av plastringen. Det viste seg at 1 stein hadde forsvunnet ut av plastringen. Steinens sannsynlige posisjon ble lokalisert før man skrudde på vannet igjen. Vannet ble også skrudd av etter at man observerte at stein 2 og 3 forsvant kl. 14:32. Fra 100 l/s/m ble vannføringen deretter økt med intervaller på 20 l/s/m. Før man avsluttet forsøket klokken 27.04.15 hadde man nådd en enhetsvannføring på 160 l/s/m.

Grunnet avvikling av påskeferie ble ikke forsøket fortsatt før 07.04.15. For å sikre at plastringen ikke hadde blitt ødelagt ble markørsteinene målt inn på nytt, og det viste seg at det var svært små endringer. Man fortsatte å øke vannføringen i intervaller på 20 l/s/m og nådde  $q=240$  l/s/m før man måtte avslutte forsøkene. I løpet av dagen ble 10 steiner dratt ut av plastringen.

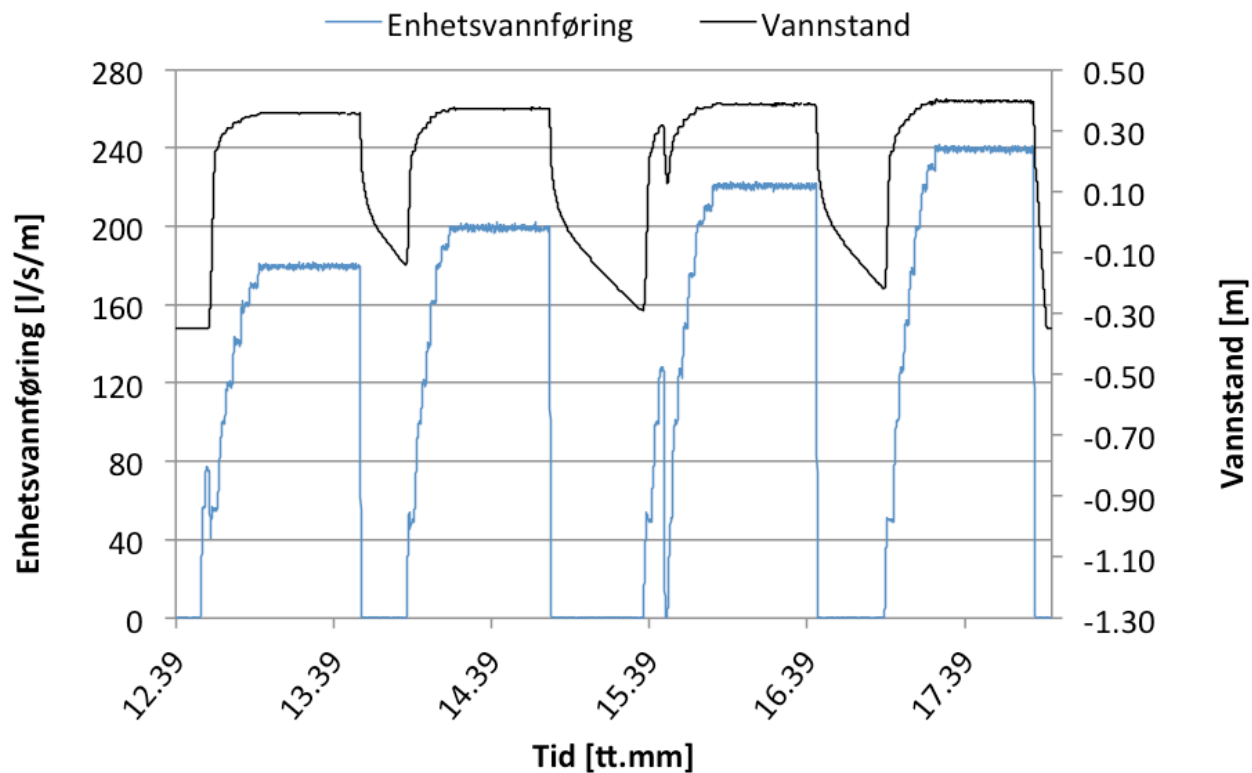
Forsøket ble fortsatt 08.04.15. Under oppkjøring til 260 l/s/m forsvant først to steiner før man observerte at hele plastringen i skråningen forskøv seg i x-retning. Dette skjedde ved  $q\approx 225$  l/s/m. Like etter raste hele plastringen ut. Det viste seg at videoopptaket stoppet like før bruddet skjedde, så det er ikke mulig å kontrollere hvordan bruddet utviklet seg. Observasjoner tyder på at det starter i knekkpunktet mellom skråning og krone.



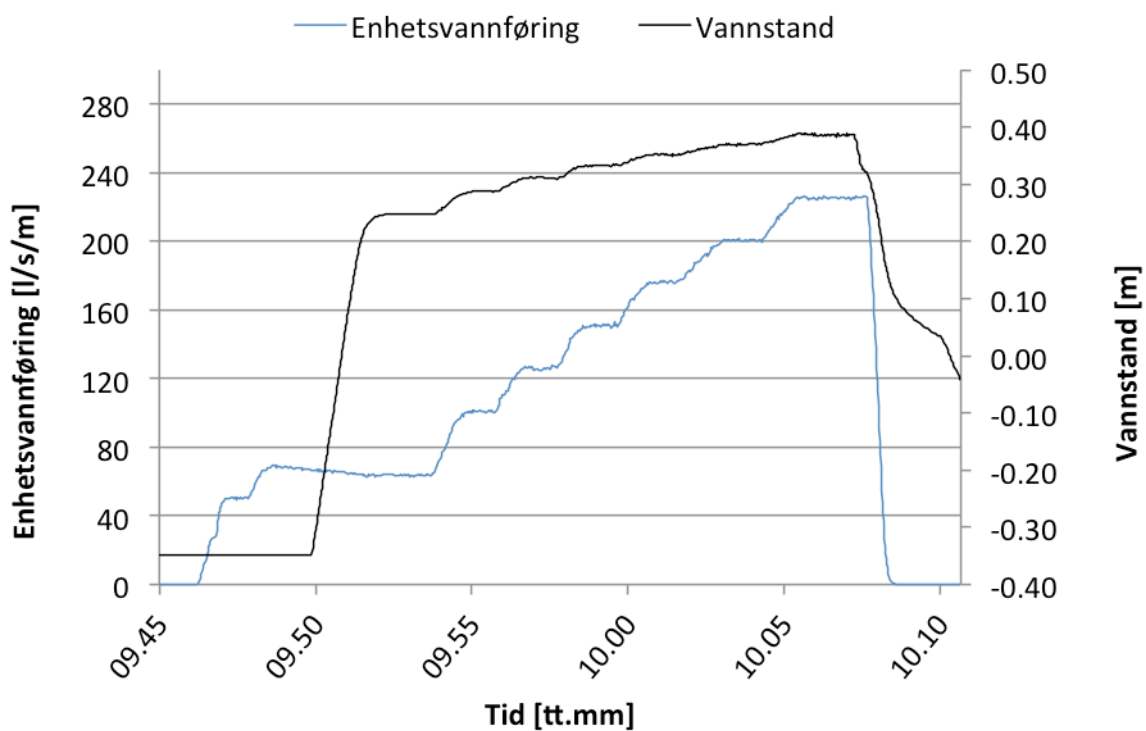
## A.2 Forsøkskjøring



Figur A. 1 – Forsøkskjøring 27.03.15



Figur A. 2 – Forsøkskjøring 07.04.15



Figur A. 3 – Forsøkskjøring 08.04.15

### A.3 Forsøkslogg 1

Forsøk nr.1 - logg

**Forsøksdager:** 27.03, 07.04, 08.04

**Deltagere:** Eirik Helgtun Pettersen, Jens Jakobsen, Priska Helene Hiller

27.03.2015 – dag 1 av 3

Tid	Logg	filer
	Tatt bilder med og uten målestokk fra videokamera og med speilrefleks Bypass stengt Forhåpentligvis alt klar	
10:18	Start. Første vannføring tilpasses til at alt vann renner i filteret	
10:24	Startet Agilent	
10:27	Vannet begynner å renne over konstruksjonen og gjennom filteret	
10:34	Q=7.4 l/s (fra måling på rør) Q=6.7 l/s Agilent (sjekk nøyaktig etterpå i datafilen) En god del vann går langs vinduet. Video på	
11:05	Tar bilder med kamera og speilrefleks Dropper saltmåling fordi bare få kopperstriper har litt kontakt med vann Måler inn de gule steinene mens vannet står på Ikke noe overtopping	
11:41	Øker vannføring til like før overtopping av plastringsteiner Ny video	
11:49	Tar bilder Vannstand =1.54 m Q=12.3 l/s måling på rør Q=ca 11.5 l/s fra Agilent	
12:20	Tar bilder Måler inn steiner	
12:39	Stopper Agilent registrering for å gjøre en saltmåling Øker sampling frequency til 100 Hz fra 10 Hz 30 g salt oppløst i 0.4 l vann, helt i like oppstrøms plastring Gjentar målingen og lagrer data litt lengre slikt at vi sikkert får integrert under	
12:50	Agilent skrus på igjen med 10 Hz, ny fil	
12:53	Q økes til 50 l/s	
13:00	Bilderunde med speilrefleks	
13:04	Hvit stein ved 200 mot vinduet rister/beveger seg.	Se bilde
13:10	Hvit stein ved 200 har stabilisert seg, og rister ikke lengere.	
13:34	Stoppet Agilent, vannstand ser stabil ut Saltmåling 30g 0.4 l, ser ok ut	
13:39	Starter Agilent igjen, Bilderunde	
14:00	Målte inn steiner Skrudde på kamera	
14:05	Slår på vannføring til 50 l/s	
14:10	Øker Q rolig til 100 l/s	
14:15	Hørte at noe flyttet på seg	

14:17	Tok bilde Slår av vannet	
	Tatt bilde. 1 stein mangler. Sannsynligvis var den ca. 43 cm nedstrøms knekkpunktet. Like til høyre (sett nedstrøms fra) fra smartstone 400	
14:24	Slår på vann igjen, Q til 50 l/s	
14:28	Q økes til 100 l/s	
14:32	PHH så en stein, Eirik hørte og synes at det var flere Stenger vannet.	
	En stein gikk i knekkpunktet ca 10 cm fra vinduet, sannsynligvis gikk det 2 steiner derfra Det ligger nå totalt 3 steiner nedstrøms i renna dvs 2 ekstra Nå plukker Eirik opp steinene slik det blir enklere å se hvor mange som går Ingen av steinene har nummer Tatt bilder også med kamera. Startet ny video	
14:46	Vi slår på vann igjen starter med 50 l/s	
14:51	Saltmåling med 30 g 0.4 l, nå bare 10 Hz for å kunne ha Agilent gående. Vannføring økes nå til 60 l/s	
14:53	Saltmåling ved ca. 60 l/s, tatt speilrefleksbilde Øker til 70 l/s	
14:55	Saltmåling ved ca. 70 l/s, tatt speilrefleksbilde Øker til 80 l/s	
14:58	Saltmåling ved ca. 80 l/s, tatt speilrefleksbilde Øker til 90 l/s	
15:02	Saltmåling ved ca. 90 l/s, tatt speilrefleksbilde Øker til 100 l/s	
15:04	Saltmåling ved ca. 100 l/s, tatt speilrefleksbilde Jens hører en stein som dirrer	
15:14	Stein som dirrer ca. 80 cm nedstrøms knekkpunkt ca. stein nr.3 fra vinduet	
15:27	Saltmålt med 30 g 0,4 l med 10 Hz med vannføring på ca. 100 l/s. Målte 5 ganger for å kunne sjekke repeterbarheten i målingene.	
15:44	Video stopp Bilderunde Vannføringsmåling med 100 Hz	
	Vann stopp	
15:53	Bilderunde Oppmåling av steiner	
16:10	Laserskanning ved y533	
	Husk å starte Agilent	
16:21	Bilderunde Video på Agilent på	
16:21	Slår på vannføring 50 l/s (målet blir 120 l/s)	
16:28	Øker til 75 l/s	
16:30	Øker til 100 l/s	
16:32	Øker til 110 l/s	
16:34	Stein som rister 110 cm nedstrøms knekkpunkt nr 2 fra vinduet saltmåling	
16:35	Øker til 120 l/s	
16:37	saltmåling	

17:09	Agilent stopp 10 Hz Saltmåling med 100 Hz Bilderunde Agilent på igjen med 10 Hz	
17:12	Vann av Innmåling av steiner	
17:15	Ingen steiner ligger nedstrøms for plastringa	
17:27	bilderunde	
17:29	Slår på vannføring 50 l/s (målet blir 140 l/s)	
17:32	Øker til 75 l/s	
17:34	Øker til 100 l/s	
17:36	Øker til 120 l/s	
17:38	Øker til 130 l/s	
17:40	Saltmåling ved ca. 130 l/s på 10 Hz	
17:41	Øker til 140 l/s	
	Saltmåling ved ca. 140 l/s	
17:55	Kobberstripe 200 og 1000 begynner å løsne fra vinduet, fint på veggen	
18:07	Stein nr.4, 95 cm nedstrøms knekkpunkt rister. Stein ved 110 cm (logg 16:34) har sluttet å riste	
18:14	Agilent stopp Saltmåling med 100 Hz Bilderunde Agilent på igjen med 10 Hz Videostopp og bilde	
18:19	Vann av Innmåling av steiner	
18:30	Video på igjen	
18:31	Slå på vann 50 l/s (målet er 160 l/s)	
18:32	Øker til 100 l/s	
18:34	Øker til 120 l/s	
18:35	Stein beveger seg like oppstrøms knekkpunktet, en annen stein oppstrøms knekkpunktet beveget seg. De har ikke lengre kontakt mot oppstrøms steiner, men presses mot de nedstrøms	
18:47	Øker til 140 l/s	
18:39	Øker til 150 l/s	
18:43	Bilde Saltmåling med 10 Hz	
18:44	Øker vannføring til 160 l/s	
18:46	Saltmåling med 10 Hz, Bilderunde	
19:16	Agilent av Saltmåling med 100 Hz Bilderunde Agilent på igjen med 10 Hz	
19:23	Video av Video bilde Vann av	
19:25	Agilent stopp bilderunde	
19:39	Ferdig med å måle inn steiner	
19:41	Rydding Merker stativet med speilrefleks	

	Merker kameraposisjon for video Siste bilderunde Laste ned data fra speilrefleks Laste ned data fra video Lagret Agilent	
	Husk backup på server og ekstern HD	

07.04.2015 – dag 2 av 3

10:15	Begynner å gjøre klar for å fortsette med forsøket	
10:25	Laserscan ved y 533, men det er mange røde faser	
10:40	Måler inn steiner for å dobbeltsjekke Plastringen samt hele filteret er tørt (det ser i hvert fall slikt ut fra vinduet) Steinene er ikke helt på samme plass. De nederste ser ut som de har sunket (ut ifra innmåling med disto)	
11:00	To plastringssteiner ligger i renna (41 og en til) Vi kan ikke huske om de var der på fredag 27.3. eller ikke	
	Fikset også kopperstripene langs glasset med tape (de som løsnet litt i toppen)	
12:35	Bypass stengt, 200ls pumpe på	
12:39	Agilent på Lys på Kamera på Smartstones klar (Jens skriver egen logg)	
12:44	OBS sjekker tid på kameraer. Siste test 27.3. var med normaltid. Vi stiller nå alt om til sommertid. Tar bilde av PC (den med Agilent og traverse) NB: bildene som ble tatt 7. april, men før 12:44 har normaltid som tidsstempel.	
12:48	Setter på vann. Starter med ca. 50 l/s (målet er 180 l/s)	
12:55	Øker sakte til ca. 100 l/s	
12:58	Øker sakte til ca. 120 l/s	
	Vannlinjen over toppen er utformet litt annerledes fordi noen steiner mangler, se bilde	
13:00	Øker til 140 l/s	
	Noen steiner rister litt	
13:04	Øker til 160 l/s	
13:07	Øker til 170 l/s	
13:10	Saltmåling med 10 Hz ved ca. 170 l/s	
13:11	Øker til 180 l/s	
13:13	Saltmåling med 10 Hz ved ca. 180 l/s	
	Starter på 30 min venting	
13:42	Flere og flere steiner begynner å riste, men de er fortsatt inn i plastringen.	
13:44	Stopp Agilent for å måle hastighet med 100 Hz bilderunde	
	1000 og 200 mm kopperstripe på vinduet løsnet igjen (tape var ikke nok for å fikse)	
13:46	Agilent på igjen med 10 Hz	
13:49	Vann av	
	Ingen plastringssteiner i renna	

14:04	Ferdig med å måle inn steiner	
	Bilder og starte kamera igjen. Sjekket at Agilent er på med 10 Hz	
14:06	Setter på vann. Starter med ca. 50 l/s (målet er 200 l/s)	
14:09	Øker sakte til ca. 100 l/s	
	Det er en dunk ved ca. 600 mm nedstrøms knekken. Ev. de to oppstikkende steiner som endret strømmingen og forårsaket det?	
14:12	Øker til ca. 120 l/s	
14:14	Øker til ca. 140 l/s	
14:16	Øker til ca. 160 l/s	
14:18	Øker til ca. 180 l/s	
14:20	Øker til ca. 190 l/s	
14:22	Saltmåling med 10 Hz og ca. 190 l/s	
14:23	Øker til ca. 200 l/s	
14:26	Saltmåling med 10 Hz og ca. 200 l/s Starter 30 min venting	
14:56	Justert zero for saltmåling	
	Stopp Agilent Saltmåling med 100 Hz Agilent på igjen med 10 Hz Bilderunde	
15:00	Vann av	
	1 stein ligger i renna Ser ut som steinen er fra knekken Eirik hørte en lyd 14:19. Tenkte at det var steiner som vibrerte og slo mot hverandre, og ikke en stein som ble dratt ut plastringen. Må sjekkes mot video.	
	Oppmåling av steiner Bilderunde Kamera på igjen	
	100 l/s pumpe på i tillegg	
	Blå 100 l/s pumpe er også på, fikk ikke beskjed når den ble skrudd på	
15:36	Setter på vann. Starter med ca. 50 l/s (målet er 220 l/s)	
15:40	Øker til 100 l/s	
15:42	Øker til 125 l/s	
15:44	Eirik hørte noe. Vi stenger vannføringen for å sjekke om det var en stein	
15:46	Ingenting. Slå på vann, starter med 50 l/s	
15:48	Øker til 100 l/s	
15:50	Øker til 125 l/s	
15:52	Øker til 150 l/s	
15:54	Øker til 175 l/s	
15:56	Øker til 200 l/s	
16:00	Øker til 210 l/s	
16:02	Saltmåling med 10 Hz	
16:03	Øker til 220 l/s	
16:06	Saltmåling med 10 Hz Starter ventetid på 30 min	
16:25	Observerte en stein som ble tatt like ved den gule steinen ved 600 mm nedstrøms knekken, bilder.	

	Steinen ble suget opp, la seg på plastringen og ble så tatt av strømmen	
	Det står dårlig til med kobberstripen 200 på vinduet	
16:37	Stopp Agilent	
16:38	Hastighetsmåling med 100 Hz Agilent på igjen med 10 Hz	
	Batteriet i videokameraet gikk tom. Usikker om filmen er hel.	
16:42	Vann av	
	3 steiner ligger i renna	
	Oppmåling av steiner Fiksing av kamera og bytting av batteri. Tar bilder, kamera på	
17:09	Vann på igjen Øker til 50 l/s (målet er 240 l/s)	
17:12	Øker til ca. 100 l/s	
17:14	Øker til ca. 125 l/s	
17:16	Øker til ca. 150 l/s	
17:18	Øker til ca. 175 l/s	
17:20	Øker til ca. 200 l/s	
17:22	Øker til ca. 220 l/s	
17:24	Øker til ca. 230 l/s	
	Stein som vinglet ved knekken ble nå stabilisert med en som la seg inn til den steinen	
17:26	Saltmåling med 10 Hz	
17:28	Øker til 240 l/s	
17:30	Saltmåling med 10 Hz Starter ventetid på 30 min	
17:35	Stein, 2 steiner oppstrøms gul stein 1000 mm vingler	
17:39	Ca 5. stein fra vinduet ved 200 nedstrøms knekken begynte å riste	
17:44	Begge steiner ser ut som om de har stabilisert seg igjen	
17:45	To steiner nedstrøms gul steinen i krona rister litt i lag	
17:48	To steiner til på samme sted har beveget seg	
17:50	En stein ved knekken i krona ble suget opp og dratt ut	
17:53	Enda en stein fra knekken forsvant	
17:55	Salmåling med 10 Hz	
18:00	Agilent stopp Saltmåling med 100 Hz Agilent på igjen med 10 Hz Dårligere signal fordi noen av kopperstripene er skadet Bilderunde	
18:05	Vann av Stopper pumpene Åpner bypass 6 steiner ligger i renna	
18:07	Kamera stopp og bilde	
	Bilderunde Knekken er tydelig svekket og det ser ut som om det nå bare er et spørsmål av tid, til hele ryker. Plastringen ser ut som å ha bøyer flere steder.	
18:12	Agilent stopp	
18:15	Innmåling av steiner	
18:24	Rydding Lagret bilde fra speilrefleks kamera på harddisk	



	Lagret videoer og bilder fra kamera på harddisk	
--	---	--

08.04.2015 – dag 3 av 3

8:15	Kopierte alle filer fra ekstern harddisk også over til ekstern harddisk på kontoret til PHH	
8:45	Laserscanner virker som å virke når jeg kjører den fra gamle PC Målte en stripe ved y=533	
9:00	Gjøre alt klart til forsøk Innmåling av steiner Etc.	
9:44	Pumper på Bypass lukket Agilent på med 10 Hz	
9:47	Kamera på	
9:48	Vann på Setter på ca. 50 l/s (målet er 260 l/s), det ble ca. 60 l/s	
9:54	Øker til ca. 100 l/s	
9:56	Øker til ca. 125 l/s	
9:58	Øker til ca. 150 l/s	
10:00	Øker til ca. 175 l/s	
	Observerte ikke ennå noen steiner som rister	
10:02	Øker til 200 l/s	
	Noen steiner begynner å riste	
10:04	Øker til 225 l/s	
	2 steiner flyttet litt på seg ved knekken	
	2 steiner gikk i knekken (de to som stakk ut)	
10:07	Ca. øverste halvmeter forskyvet seg litt mot nedstrøms	
10:08	Global brudd	
	Skrur av vannet	
	Hele er vasket bort, bitte litt igjen i toppen	
10:09	Skrur av kamera Bilderunde Pumpene av Åpner bypass Agilent stopp	

## A.4 Innmåling av markørsteiner

MS1800			
q	X	Y	Z
0	1813	496	177
7	1807	495	177
12	1807	497	178
50	1806	496	177
100	1810	496	179
120	1802	496	174
140	1812	496	181
160	1809	497	178
160	1809	496	175
180	1811	496	180
200	1812	496	181
220	1812	496	181
240	1811	497	180
240	1813	498	178

MS1400			
q	X	Y	Z
0	1403	501	185
7	1398	501	186
12	1398	501	186
50	1400	503	186
100	1409	503	192
120	1405	501	188
140	1414	502	194
160	1415	500	196
160	1414	500	189
180	1420	498	198
200	1424	498	199
220	1426	499	201
240	1430	498	202
240	1432	499	201

MS1000			
q	X	Y	X
0	1009	514	184
7	1008	515	183
12	1008	515	183
50	1010	514	184
100	1023	514	193
120	1022	514	190
140	1032	514	197
160	1035	513	197
160	1036	514	192
180	1044	512	201
200	1050	512	200
220	1054	511	204
240	1062	512	202
240	1064	512	201

MS600			
q	X	Y	Z
0	618	495	179
7	614	495	177
12	613	495	179
50	618	496	180
100	642	495	191
120	643	496	191
140	655	495	195
160	660	497	195
160	661	496	192
180	671	497	194
200	678	497	195
220	683	498	196
240	697	498	193
240	699	498	194

MS200			
q	X	Y	X
0	224	499	207
7	220	497	206
12	219	498	206
50	227	499	208
100	258	499	214
120	264	499	215
140	277	500	218
160	285	500	220
160	284	500	219
180	303	499	225
200	315	498	228
220	327	495	227
240	347	496	230
240	349	495	228

MS0			
q	X	Y	Z
0	-12	520	166
7	-15	520	164
12	-15	520	164
50	-7	520	166
100	20	523	176
120	25	523	175
140	36	523	179
160	45	525	179
160	45	526	179
180	58	522	178
200	67	519	178
220	79	518	179
240	97	513	175
240	98	513	175

-200			
q	X	Y	Z
0	-107	518	162
7	-111	520	160
12	-111	520	160
50	-110	520	160
100	-98	521	156
120	-100	521	155
140	-93	523	148
160	-92	522	153
160	-92	521	153
180	-86	524	149
200	-83	525	148
220	-80	527	137
240	-63	530	134
240	-61	530	133

## A.5 Bilder av forsøk 1

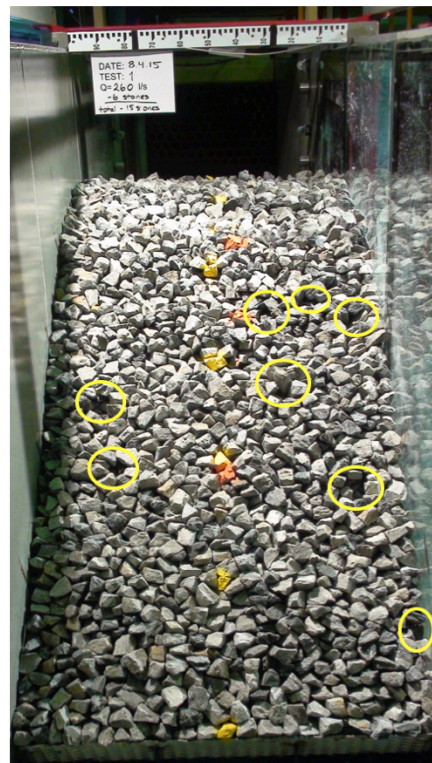
### Bilder normalt på plastringen



Figur A. 4 – Plastring før belastning



Figur A. 5 – Plastring etter belastning etter belastning med  $q=100 \text{ l/s/m}$



Figur A. 6 – Plastring etter belastning med  $q=240 \text{ l/s/m}$

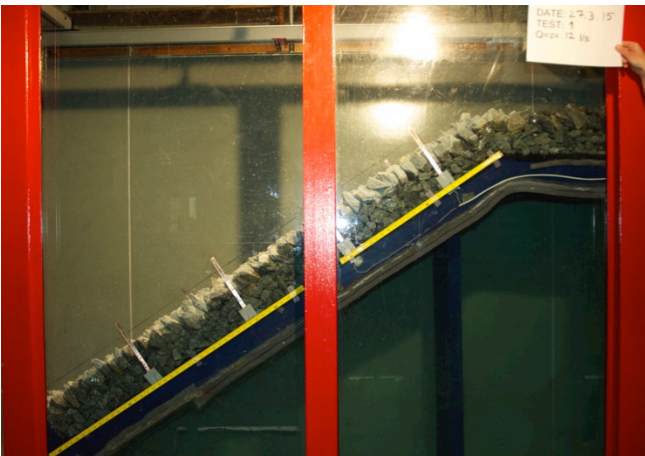
## Bilder fra siden



Figur A. 7 – Plastring før belastning



Figur A. 8 – Strømmingen gjennom filterlaget,  $q=7$  l/s/m



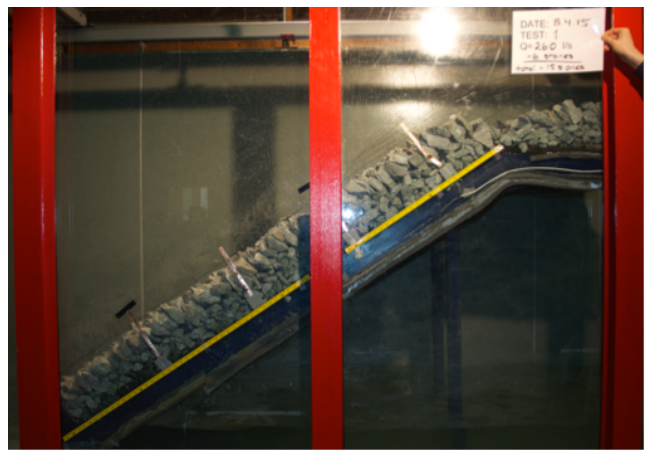
Figur A. 9 – Strømning gjennom filter- og plastringslaget,  $q=12$  l/s/m



Figur A. 10 – Etter belastning med  $q=100$  l/s/m. Tre steiner har blitt revet ut av plastringen



Figur A. 11 – Etter belastning med  $q=200$  l/s/m.



Figur A. 12 – Siste bilde før globalt brudd tatt 08.04.15. Belastet med 240 l/s/m. Totalt 15 steiner har blitt revet ut av plastringen

## Krone og knekkpunkt



*Figur A. 13 – Krone og knekkpunkt for plastringen utsettes for belastning*



*Figur A. 14 – Strømning gjennom filterlaget med  $q=7$  l/s/m*



*Figur A. 15 – Plastring med strømning gjennom filter- og plastringslag,  $q=12$  l/s/m*



*Figur A. 16 – Etter belastning med  $q=100$  l/s/m*



*Figur A. 17 – Krone og knekkpunkt etter  $q=200$  l/s/m*



*Figur A. 18 – Krone og knekkpunkt etter  $q=240$  l/s/m*

## Hull



*Figur A. 19 – Lokasjon av første stein som forsvinner ut av plastringen*

## B. VEDLEGG – FORSØK 2

### B.1 Beskrivelse av forsøk

Forsøk 2 ble i likhet med forsøk 1 gjennomført gjennom tre dager i perioden 14.04.15-16.04.15. Plastringen ble bygget av JJ og ble plastret med 10 centimeter tykt filterlag og et plastringslag. I dette forsøket ble filter komprimert i større grad enn de resterende forsøkene. Plastringssteinene i skråningen ble lagt med steinhelning  $\alpha=60^\circ$  før helningen ble økt til  $\alpha=90^\circ$  når man rundet knekkpunktet og kom over i krona.

Forsøket ble startet klokken 9:21 den 14.04.15 med vannføring på 50 l/s/m. I dette forsøket ble hver vannstand holdt i 1 time før man slo av vannet og gjorde målinger og tok bilder. Etter dette ble enhetsvannføringen økt med 50 l/s/m per steg til man nådde 200 l/s/m. Videre derifra ble det økt med trinn på 20 l/s/m. Klokken 14:43 ble det oppdaget en lekkasje langs den ene siden av modellen, omtrent ved  $x=2400$  mm som vist i figur B.1 Lekkasjen lot seg tette relativt godt, men det ble konstatert at modellen måtte tettes ytterligere før neste forsøk.



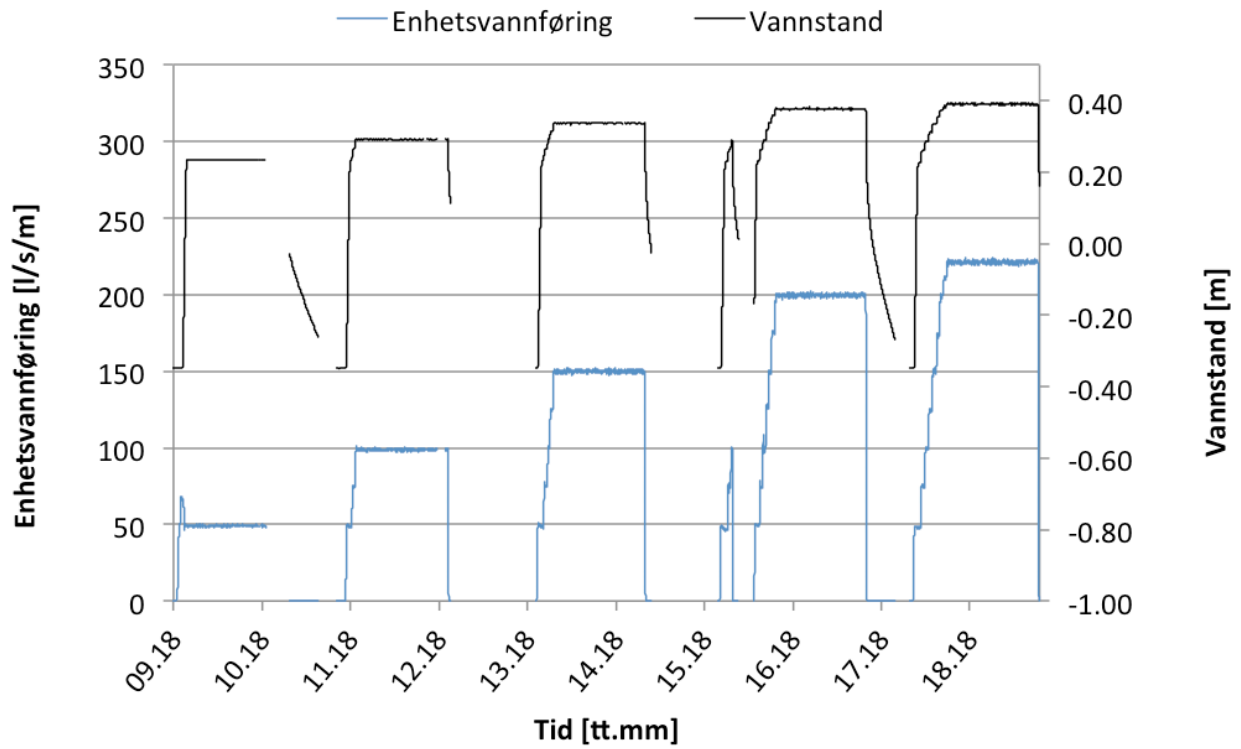
Figur B. 1 – Lekkasje nedstrøms plastringen

Første stein røk klokken 15:38 under oppkjøring til  $q=200$  l/s/m. Det var to steiner som ble revet ut samtidig og det skjedde like etter at man hadde økt vannføringen til  $q=100$  l/s/m. Steinene var lokalisert omtrent midt i skråningen ( $x=900$ ,  $y=580$ ). Den siste vannføringen som ble kjørt for man stoppet forsøket var  $q=220$  l/s/m. Totalt hadde 5 steiner blir revet ut av plastringen.

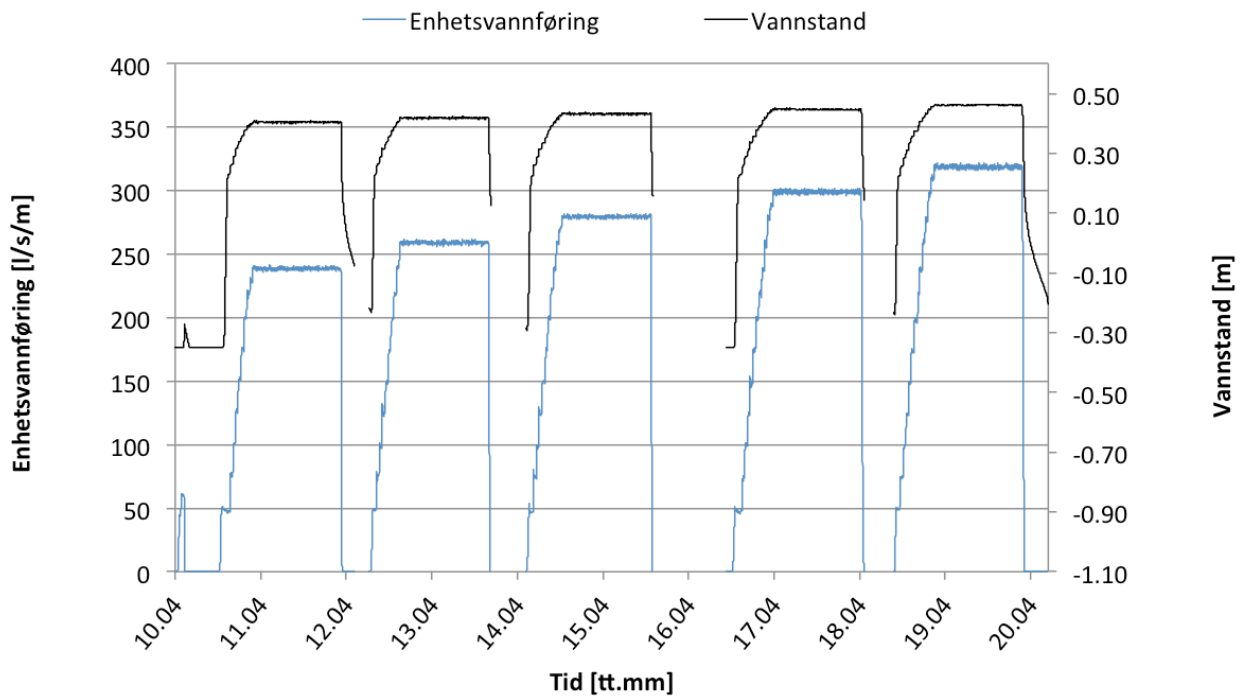
Forsøket ble fortsatt neste dag. Første vannføring var 240 l/s/m, og i løpet av timen plastringen ble belastet med denne vannføringen, forsvant det en stein. Dagen ble avsluttet med en times belastning på 320 l/s/m. Totalt manglet det nå 12 steiner i plastringen.

Forsøket ble fortstatt og fullført den 16.04.15. Etter en times belastning på 340 l/s/m hadde ytterligere 7 steiner blitt revet ut av plastringen, og det var tydelig at den nærmet seg globalt brudd. Man kunne også se en tydelig glippe i overkant av knekkpunktet. På grunn av denne glippa hadde flere av steinene i krona veltet og sto ikke lenger med  $\alpha=90^\circ$ . Globalt brudd inntraff 8 minutter etter at man hadde økt til  $q=360$  l/s/m. Bruddet startet ved at steiner i knekkpunktet ble plukket ut for resten av skråningen ble skrellet av fra toppen og ned. Store deler av krona ble også skylt vekk.

## B.2 Forsøkskjøring

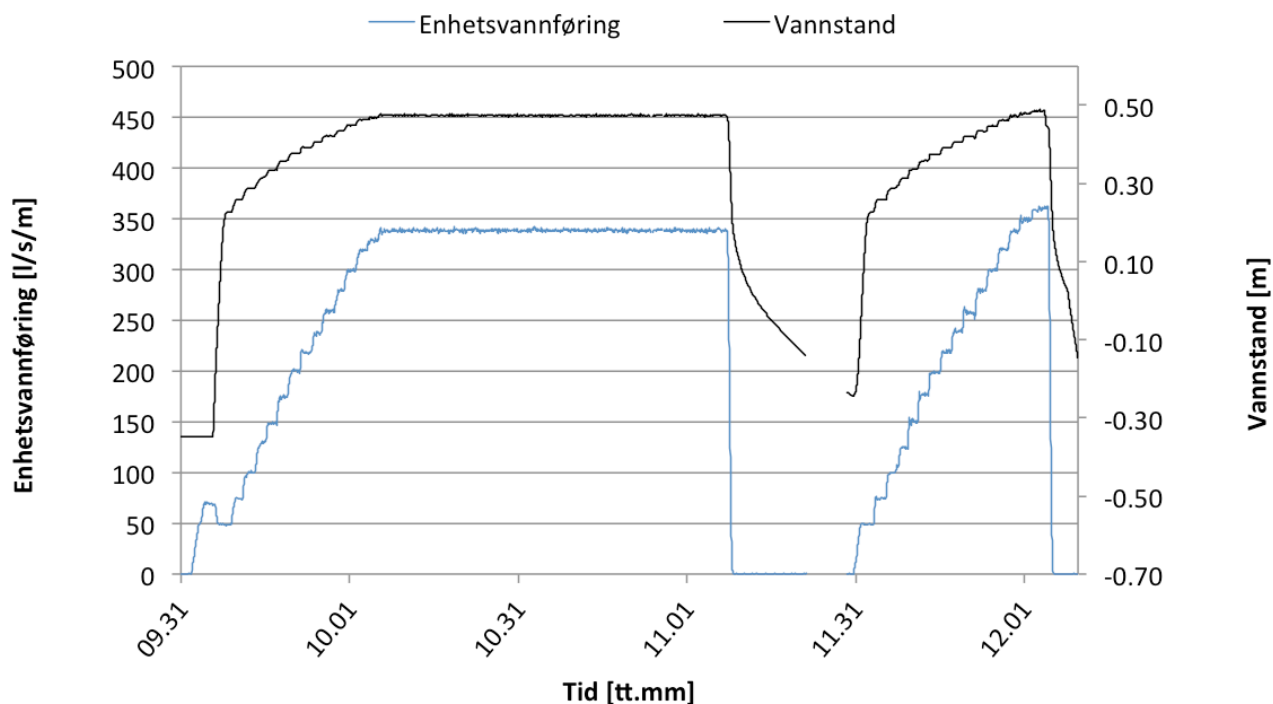


Figur B. 2 – Forsøningskjøring 14.04.15



Figur B. 3 – Forsøkskjøring 15.04.15





Figur B. 4 – Forsøkskjøring 16.04.15

### B.3 Forsøkslogg 2

Forsøk nr.2 - logg

**Forsøksdager:** 14.04, 15.04, 16.04

**Deltagere:** Eirik Helgetun Pettersen, Jens Jakobsen, Priska Helene Hiller

**14.04.2015 – dag 1 av 3**

Tid	Logg	Filer
8:15	Byttet batteri på Disto laseren	
8:17	Åpnet Agilent og lastet config file (samme som sist men oppdatert navn)	150414_riprap2.xml
8:20	Innmåling av steiner	
8:38	Laserscann ved y=540mm	150413_Scan_Riprap_Middle_Stripe
	Kontrollerer mobilklokke mot pc-klokka. Avvik på mindre enn 1 sekund.	
9:18	Pumper på	
	Agilent på med 10 Hz	
9:21	Slår på 50 l/s (må fylle opp bak dammen først)	
9:26	Vann begynner å renne gjennom filter	
9:27	Overtopping starter	
9:30	Starter på 1 time med 50 l/s	
10:16	Agilent stopp	
10:17	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l)	
10:18	Agilent på igjen med 10 Hz, går ikke	
	Problemer med å koble opp gjen(?) til Agilent	
10:30	Skrur av vann	
10:36	Agilent ser ut som å virker igjen (tok strømmen på boksen og startet den på nytt) Agilent nå på med 10 Hz	
10:45	Innmåling av steiner	
10:52	Laserscan ved y=540 mm	

	Bilderunde 1 filterstein i renna (ev. fra sida eller noe sånt)	
10:59	Oppdaterer skilt fra 50 til 100 l/s	
	Agilent skrudde seg selv av igjen...	
11:12	Agilent virker igjen. Husk å slå av scanneprogram når det ikke scannes, CPU var ganske opptatt ca. 80%. Uten scanne program under 10%.	
11:13	Video på	
11:15	Vann på igjen 50 l/s (målet er 100 l/s)	
11:20	Øker til 75 l/s	
11:22	Øker til 100 l/s	
11:24	Start på 60 min	
12:08	Agilent stopp	
12:09	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l)	
12:11	Starter Agilent med 10 Hz igjen	
12:12	Tegner vannlinje på glasset (100 l/s)	
12:14	Bilderunde	
12:21	Agilent slutter å fungere	
12:23	Agilent virker igjen	
12:24	Bilde med videokamera	
12:25	Vann av	
12:26	Stopper Agilent	
12:30	Måler inn steiner	
12:47	Laserscann	
12:54	Bytter batteri på videokamera	
13:00	Bilde speilrefleks	
13:22	Pumpe 200 l/s på	
13:24	Starter videokamera	
13:24	Starter Agilent med 10 Hz	
12:25	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 150 l/s)	
13:30	Øker til 75 l/s	
13:32	Øker til 100 l/s	
13:34	Øker til 125 l/s	
13:36	Øker til 150 l/s	
13:38	Start på 60 min	
13:48	Stein ved 670 mm nært glasset rister. Tatt bilde.	
14:22	Stopper Agilent	
14:23	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l)	
14:24	Starter Agilent med 10 Hz igjen	
14:25	Tegner vannlinje på glasset (100 l/s)	
14:26	Bilderunde	
14:38	Vann av	
14:39	Oppdager lekkasje nedstrøms rista mot veggen.	
14:43	Stopper Agilent.	
14:50	Forsøkte å måle lekkasjen. Fylte ei 10-litersbøtte på ca. 7-8 sekunder. Greide å tette det meste ved å stappe liggeunderlaget ned igjen.	
15:13	Innmåling	
15:17	Laserscanning	
15:27	Starter videokamera x2	

15:28	Starter Agilent med 10 Hz	
15:29	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 200 l/s)	
15:35	Øker til 75 l/s	
15:37	Øker til 100 l/s	
15:38	Eirik hører noe som slår mot glasset. Tror det er en stein. Slår av vannet for å sjekke. 2 plastrings steiner har falt ut (fra samme sted). Dette er stein nr.61 og en uten nummer.	
15:42	Stoppet agilent og video.	
15:45	Koordinatene til hullet der begge steinene forsvant fra: x:1047 y:412	
15:48	Tar bilder med speilreflekskamera	
15:51	Starter video	
15:52	Starter Agilent med 10 Hz	
15:52	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 200 l/s)	
15:56	Øker til 75 l/s	
15:58	Øker til 100 l/s	
16:00	Øker til 125 l/s	
16:02	Øker til 150 l/s	
16:04	Øker til 175 l/s	
16:06	Øker til 200 l/s	
16:08	Starter 60 minutter	
16:11	Eirik ser en stein som forsvinner. Litt til venstre for midten sett fra nedstrøms side. Ser hull og tar bilde av sannsynlig posisjon for steinen ved krona helt inn mot veggen.	
16:50	Agilent stopp	
16:51	Saltmåling med 100 Hz	
16:53	Agilent på igjen med 10 Hz	
17:00	Tegnet vannlinje på glasset	
17:01	Bilderunde	
17:08	Vann av	
	3 steiner i renna	
	Måler inn steiner	
17:28	Agilent stopp	
17:38	Agilent på med 10 Hz	
17:39	Starter videokamera	
17:41	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 220 l/s)	
17:46	Øker til 75 l/s	
17:48	Øker til 100 l/s	
17:50	Øker til 125 l/s	
17:53	Øker til 150 l/s	
17:56	Øker til 175 l/s	
17:58	Øker til 200 l/s	
18:00	Øker til 210 l/s	
18:03	Øker til 220 l/s	
18:05	Starter 60 minutter	
18:49	Slår av Agilent	
18:50	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l vann)	
18:51	Starter Agilent med 10 Hz igjen.	
19:01	Bilderunde	

19:05	Slår av vann	
19:06	Slår av Agilent	
19:06	Slår av video.	
19:20	Måler inn steiner	
19:23	Laserscanning	
19:49	Lagrer og overfører alle data til ekstern harddisk	

### 15.04.2015 – dag 2 av 3

9:10	Innmåling av steiner. Disto satt litt løs på traversen. Eirik festet den nå bedre med tape.	
9:30	Laserscann Noen ganger ser det ut som traversen stopper bittelitt ved knekken. Sørg neste gang godt med og sjekk filene.	
10:04	Pumper på, Bypass stengt Kamera klar	
10:04	Agilent på med 10 Hz	
10:05	Vann på ca. 50 l/s (målet er 240 l/s)	
10:11	Lekkasje ved foten, vegg Vann stopp. Vannet stoppet før overtopping	
	Fikset med rist plate og metalltråd	
10:35	Agilent av Agilent på igjen slik at vi får ny fil	
10:35	Vann på ca. 50 l/s	
10:42	Øker til 75 l/s	
10:44	Øker til 100 l/s	
10:46	Øker til 125 l/s	
10:48	Øker til 150 l/s	
10:50	Øker til 175 l/s	
10:52	Øker til 200 l/s	
10:54	Øker til 220 l/s	
10:56	Øker til 230 l/s	
	Flere steiner rister litt	
10:58	Øker til 240 l/s	
11:00	Starter på 1 time belastning	
11:44	Agilent stopp	
11:45	Saltmåling med 100 Hz	
	Vannlinje tegnet på	
11:47	Agilent på igjen med 10 Hz	
12:00	Vann av	
12:09	Målte inn steiner, etter 240l/s	
12:11	Laserscanning. Stoppet ikke i knekkpunktet	
	1 stein la i renna og ble plukket opp	
	Bilderunde	
12:20	Agilent på med 10 Hz	
	Kamera på	
12:21	Vann på, ca. 50 l/s (målet er 260 l/s)	
12:25	Øker til ca. 75 l/s	
12:27	Øker til ca. 100 l/s	
12:29	Øker til ca. 125 l/s	
12:31	Øker til ca. 150 l/s	
12:33	Øker til ca. 175 l/s	

12:35	Øker til ca. 200 l/s	
12:37	Øker til ca. 220 l/s	
12:39	Øker til ca. 240 l/s	
12:41	Øker til 260 l/s	
12:43	Starter på 60 min	
12:49	Agilent stopp	
	Saltmåling med 100 Hz allerede nå i tilfellet plastringen ikke tåler 1 time med 260 l/s	
12:51	Agilent på igjen med 10 Hz	
13:09	Justerer offset på agilent saltmåling	
13:27	Saltmåling med 100 Hz	
13:29	Starter Agilent med 10 Hz igjen	
13:36	Tegner vannlinje	
13:37	Bilderunde	
13:43	Vann av	
13:45	Stopper Agilent	
14:46	Stopper videokamera	
13:47	Måler inn plastringssteinene etter 260l/s	
14:00	Laserscanning. Stopper ikke ved knekkpunktet	
14:09	Starter videokamera	
14:10	Starter Agilent	
14:11	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 280 l/s)	
14:15	Øker til ca. 75 l/s	
14:17	Øker til ca.100 l/s	
14:19	Øker til ca. 125 l/s	
14:21	Øker til ca. 150 l/s	
14:23	Øker til ca. 175 l/s	
14:25	Øker til ca. 200 l/s	
14:27	Øker til ca. 220 l/s	
14:29	Øker til ca. 240 l/s	
14:31	Øker til ca. 260 l/s	
14:33	Øker til ca. 270 l/s	
14:35	Øker til ca. 280 l/s	
14:37	Starter 60 minutter	
15:17	Stopper Agilent	
15:18	Saltmåling med 100 Hz	
15.19	Starter Agilent med 10 Hz igjen	
15:28	Tegner vannlinje	
15:30	Bilderunde	
15:37	Vann av	
15:39	Stopper Agilent	
15:41	Stopper videokamera	
15:46	Målte inn datapunkter til steinene etter 1 time med 280l/s	
16:00	Henter ut data fra det lille kameraet	
16:05	Finner og henter ut to steiner fra renna	
16:10	Bilderunde	
16:30	Starter Agilent	
16:31	Starter videokamera	
16:34	Vann på igjen, 50 l/s på blått system(målet er 300 l/s)	
16:41	Øker til ca. 75 l/s, 50 l/s på blått, 25 l/s på rødt	

16:43	Øker til ca.100 l/s, 50 l/s på blått, 50 l/s på rødt	
16:45	Øker til ca. 125 l/s, 50 l/s på blått, 75 l/s på rødt	
16:47	Øker til ca. 150 l/s, 50 l/s på blått, 100 l/s på rødt	
16:49	Øker til ca. 175 l/s, 50 l/s på blått, 125 l/s på rødt	
16:51	Øker til ca. 200 l/s, 50 l/s på blått, 150 l/s på rødt	
16:53	Øker til ca. 220 l/s, 50 l/s på blått, 170 l/s på rødt	
16:55	Øker til ca. 240 l/s, 50 l/s på blått, 190 l/s på rødt	
16:57	Øker til ca. 260 l/s, 50 l/s på blått, 210 l/s på rødt	
16:59	Øker til ca. 280 l/s, 50 l/s på blått, 230 l/s på rødt	
17:01	Øker til ca. 290 l/s, 50 l/s på blått, 240 l/s på rødt	
17:03	Øker til ca. 300 l/s, 50 l/s på blått, 250 l/s på rødt	
17:05	Starter på 60 minutter	
17:15	Joe og Priska hører en lyd. Kan være en stein som forsvinner	
17:19	Priska hørte noe men er veldig usikker om det var stein	
17:24	Saltmåling ved 10 Hz	
17:52	Agilent stopp	
17:52	Saltmåling med 100 Hz	
17:54	Agilent på igjen med 10 Hz	
	Tegne inn vannlinje	
18:05	Vann av	
18:07	Stopper Agilent	
18:07	Stopper videokamera	
18:10	Innmåling av steiner	
18:19	Laserscann	
	2 steiner var i renna (en var 180)	
	Bilderunde	
18:27	Agilent på	
	Video på	
18:29	Vann på 50 l/s (målet er 320 l/s)	
18:32	Øker til ca. 75 l/s, 75 l/s på blått	
18:34	Øker til ca.100 l/s, 100 l/s på blått	
18:36	Øker til ca. 125 l/s, 100 l/s på blått, 25 l/s på rødt	
18:38	Øker til ca. 150 l/s, 100 l/s på blått, 50 l/s på rødt	
18:40	Øker til ca. 175 l/s, 100 l/s på blått, 75 l/s på rødt	
18:42	Øker til ca. 200 l/s, 100 l/s på blått, 100 l/s på rødt	
18:44	Øker til ca. 220 l/s, 100 l/s på blått, 120 l/s på rødt	
18:46	Øker til ca. 240 l/s, 100 l/s på blått, 140 l/s på rødt	
18:48	Øker til ca. 260 l/s, 100 l/s på blått, 160 l/s på rødt	
18:50	Øker til ca. 280 l/s, 100 l/s på blått, 180 l/s på rødt	
18:52	Øker til ca. 300 l/s, 100 l/s på blått, 200 l/s på rødt	
	Flere steiner begynner å bevege seg i krona	
18:54	Øker til ca. 310 l/s, 100 l/s på blått, 210 l/s på rødt	
18:56	Øker til ca. 320 l/s, 100 l/s på blått, 220 l/s på rødt	
18:58	Starter 60 minutter	
19:44	Agilent av	
19:44	Saltmåling med 100 Hz	
19:47	Agilent på med 10 Hz igjen	
19:47	Tegner vannlinje på glasset	
19:48	Bilderunde	
	Øverste steinen (i krona) som måles inn har mistet	

	kontakt med de nedstrøms liggende steinene. Forskyvingen fra selve markørsteinen er derfor ikke direkte representativ for steinene i dette området.	
19:54	Eirik ser en stein som forsvinner. Slår i glasset helt nedenfor rista(1800)	
19:58	Vann av	
20:00	Pumper av Video stopp	
20:10	Innmåling av steiner	
20:15	Agilent stopp	
	Åpnet bypass	
20:20	Laserscann	
	Kopierte video fra lille kamera Kopierer video og bilder fra store kamera	
	To steiner la i renna (en ser ut som å være fra ca. 1400 ved gulstein 1400 og et ved ca 600 ved veggen)	Bilder
20:29	Bilderunde	
	Kopiert data fra speilrefleks Kopiert data fra agilent og laser	

### 16.04.2015 – dag 3 av 3

9:00	Gjøre ting klar til forsøk	
	Innmåling av steiner	
9:14	Laserscann	
	Gjøre kamera klar Bypass stengt	
	Agilent med ny config fil som også har med blå Q-system	150416_riprap2_withBlueQ.xml
9:26	Bilderunde (skiltene er allerede tilpasset til 340 l/s)	
	Når man ser litt nedenfra på plastringen er det enklere å se hull. Eirik tar også bilder fra i renna. Plastringen ser nå litt mer medtatt ut og har større forskyvinger ved knekkpunktet.	
9:29	Pumper på (begge røde og lille blå)	
9:31	Agilent på Dato sjekk på kamera og video på	
9:32	Vann på øker til ca. 50 l/s på blått (målet er 340 l/s) Fylte boksen bak modellen med litt over 50 l/s, men reduserte før overtopping startet til ca. 50 l/s	
9:38	Overtopping starter	
9:40	Øker til ca. 75 l/s, 75 l/s på blått	
9:42	Øker til ca.100 l/s, 100 l/s på blått	
9:44	Øker til ca. 125 l/s, 100 l/s på blått, 25 l/s på rødt	
9:46	Øker til ca. 150 l/s, 100 l/s på blått, 50 l/s på rødt	
9:48	Øker til ca. 175 l/s, 100 l/s på blått, 75 l/s på rødt	
9:50	Øker til ca. 200 l/s, 100 l/s på blått, 100 l/s på rødt	
9:52	Øker til ca. 220 l/s, 100 l/s på blått, 120 l/s på rødt	
9:54	Øker til ca. 240 l/s, 100 l/s på blått, 140 l/s på rødt	
9:56	Øker til ca. 260 l/s, 100 l/s på blått, 160 l/s på rødt	
9:58	Øker til ca. 280 l/s, 100 l/s på blått, 180 l/s på rødt	
10:00	Øker til ca. 300 l/s, 100 l/s på blått, 200 l/s på rødt	
10:02	Øker til ca. 320 l/s, 100 l/s på blått, 220 l/s på rødt	

10:03	Flere steiner rister	
10:04	Øker til ca. 330 l/s, 100 l/s på blått, 230 l/s på rødt	
10:06	Øker til ca. 340 l/s, 100 l/s på blått, 240 l/s på rødt	
10:08	Starter 60 minutters belastning med 340 l/s	
10:10	Bilderunde	
10:18	Eirik ser fem steiner som ligger i renna. Vi så ikke når de forsvant fra plastringen.	
10:26	Priska ser en stein forsvinne. Tror det gikk fra knekkpunktet inne ved glasset.	
10:43	Priska teller 7 steiner i renna (men litt vanskelig å se)	
10:53	Justerer offset på Agilent forsterker for saltmåling	
10:54	Agilent stopp	
10:55	Saltmåling med 100 Hz	
	Tegne inn vannlinge ved 340 l/s	
10:56	Eirik hørte en lyd ved renna (usikker hva det var)	
10:57	Agilent på igjen med 10 Hz	
10:08	Vann av	
10:12	Video stoppet	
10:12	Innmåling av steiner	
11:20	Laserscann	
11:22	Agilent stopp	
	7 steiner var i renna (83 og 219 blant dem)	
	Bilderunde	
11:29	Agilent start	
11:30	Video på	
11:30	Vann på øker til ca. 50 l/s på blått (målet er 360 l/s)	
11:33	Overtopping starter	
11:34	Øker til ca. 75 l/s, 75 l/s på blått	
11:36	Øker til ca. 100 l/s, 100 l/s på blått	
11:38	Øker til ca. 125 l/s, 100 l/s på blått, 25 l/s på rødt	
11:40	Øker til ca. 150 l/s, 100 l/s på blått, 50 l/s på rødt	
11:42	Øker til ca. 175 l/s, 100 l/s på blått, 75 l/s på rødt	
11:44	Øker til ca. 200 l/s, 100 l/s på blått, 100 l/s på rødt	
11:46	Øker til ca. 220 l/s, 100 l/s på blått, 120 l/s på rødt	
11:48	Øker til ca. 240 l/s, 100 l/s på blått, 140 l/s på rødt	
11:50	Øker til ca. 260 l/s, 100 l/s på blått, 160 l/s på rødt	
11:52	Øker til ca. 280 l/s, 100 l/s på blått, 180 l/s på rødt	
11:54	Øker til ca. 300 l/s, 100 l/s på blått, 200 l/s på rødt	
11:56	Øker til ca. 320 l/s, 100 l/s på blått, 220 l/s på rødt	
11:58	Øker til ca. 340 l/s, 100 l/s på blått, 240 l/s på rødt	
12:00	Øker til ca. 350 l/s, 100 l/s på blått, 250 l/s på rødt	
12:0	Øker til ca. 360 l/s, 100 l/s på blått, 260 l/s på rødt	
12:10	Agilent og video stopp Store video var av da Eirik ville stoppe det... men det lyste rød under bruddet Lille kameraet måtte han stoppe manuelt	
	Saltmåler var dårlig loddet, derfor dårlig signal. Usikkerhet i data	
	Det store kameraet stoppet igjen, og kan derfor ikke brukes i videre forsøk	



## B.4 Innmåling av markørsteiner

Referanse i bunn			
q	X	Y	Z
0	2167	466	-14
50	2169	465	-12
100	2169	465	-12
150	2168	465	-11
200	2169	465	-11
220	2169	465	-11
220	2170	466	-12
240	2172	466	-10
260	2172	466	-9
280	2172	466	-9
300	2172	466	-9
320	2176	466	-6
320	2175	465	-9
340	2177	466	-6

MS1800			
q	X	Y	Z
0	1772	465	153
50	1773	465	157
100	1773	464	158
150	1773	464	158
200	1775	464	159
220	1775	465	159
220	1776	465	157
240	1778	465	160
260	1777	465	161
280	1778	465	162
300	1778	465	163
320	1783	465	166
320	1782	465	161
340	1784	465	168

MS1400			
q	X	Y	Z
0	1362	491	187
50	1364	490	192
100	1365	490	194
150	1367	491	192
200	1370	490	196
220	1373	491	196
220	1374	490	195
240	1378	491	201
260	1380	492	201
280	1381	492	205
300	1385	493	205
320	1390	495	209
320	1389	494	206
340	1394	497	214

MS1000			
q	X	Y	Z
0	1016	477	186
50	1021	474	193
100	1023	474	195
150	1025	475	195
200	1030	475	199
220	1032	476	201
220	1033	477	196
240	1038	477	204
260	1040	479	205
280	1042	479	207
300	1046	481	211
320	1049	480	213
320	1051	481	209
340	1056	481	217

MS600			
q	X	Y	Z
0	638	487	177
50	641	487	181
100	646	486	183
150	652	486	185
200	660	484	189
220	665	486	191
220	667	485	190
240	674	484	196
260	679	484	199
280	683	484	199
300	689	481	202
320	695	484	205
320	695	483	204
340	708	485	209

MS200			
q	X	Y	Z
0	256	474	169
50	258	474	171
100	264	477	175
150	274	477	178
200	281	480	180
220	288	479	180
220	289	479	181
240	301	481	184
260	306	481	184
280	314	481	185
300	321	481	184
320	329	482	186
320	331	481	183
340	345	484	186

MS0			
q	X	Y	Z
0	-65	487	162
50	-60	486	164
100	-54	488	165
150	-43	488	169
200	-32	488	172
220	-26	488	175
220	-24	489	174
240	-11	491	180
260	-1	491	185
280	6	490	188
300	15	492	190
320	23	493	192
320	23	492	192
340	41	493	197

MS-200			
q	X	Y	Z
0	-204	495	165
50	-203	495	165
100	-201	495	164
150	-200	493	165
200	-199	493	163
220	-198	494	165
220	-198	493	164
240	-197	495	163
260	-195	493	164
280	-194	493	163
300	-194	494	163
320	-191	495	163
320	-191	494	163
340	-187	494	162

## B.5 Bilder av forsøk 2

### Bilder normalt på plastringen



Figur B. 5 – Før belastning



Figur B. 6 – Etter  $q=100$  l/s/m.



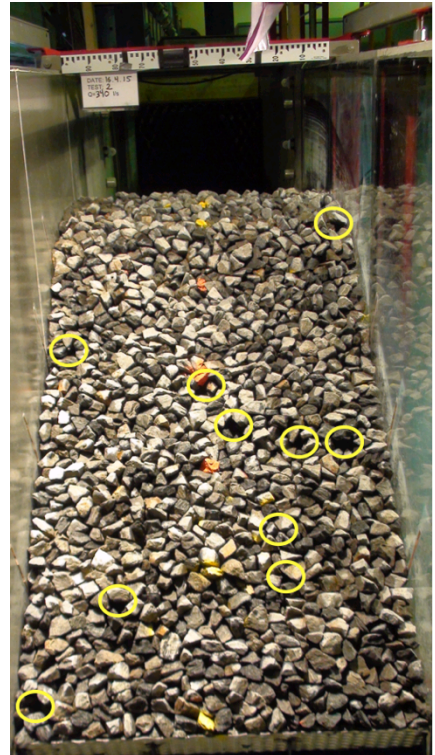
Figur B. 7 – Etter  $q=240$  l/s/m



Figur B. 8 – Etter  $q=300$  l/s/m

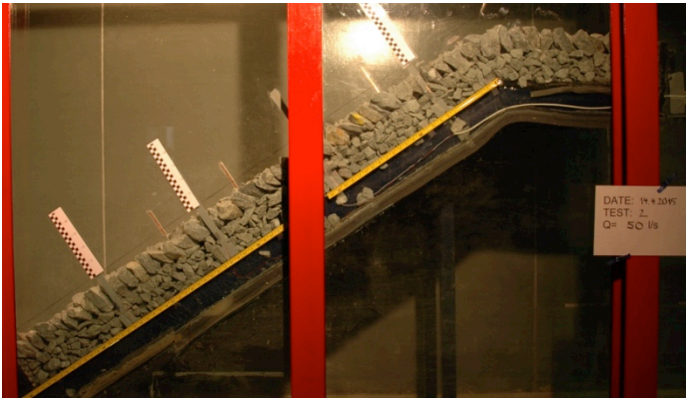


Figur B. 9 – Etter  $q=320$  l/s/m

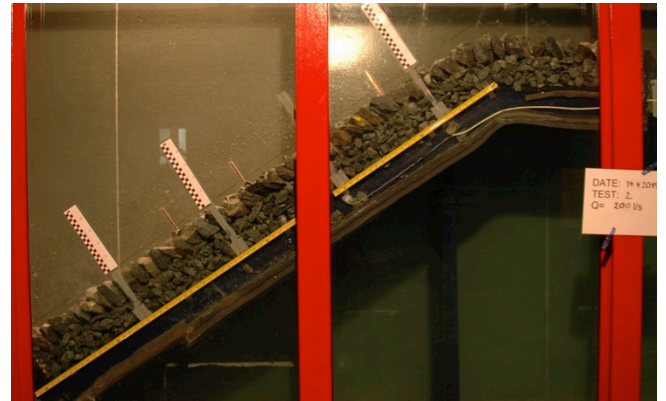


Figur B. 10 – Etter  $q=340$  l/s/m

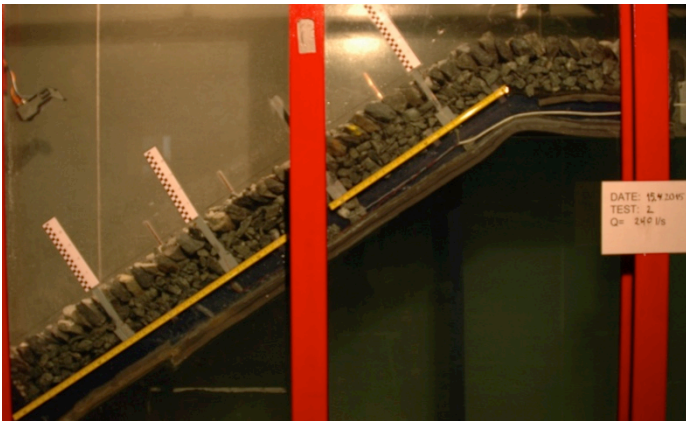
Bilder fra siden



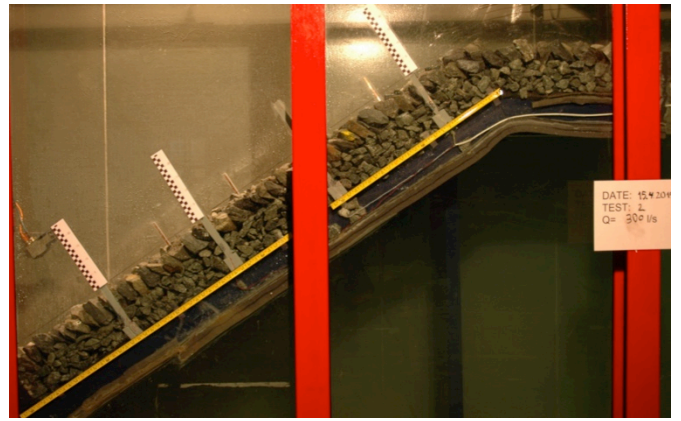
Figur B. 11 – Før belastning



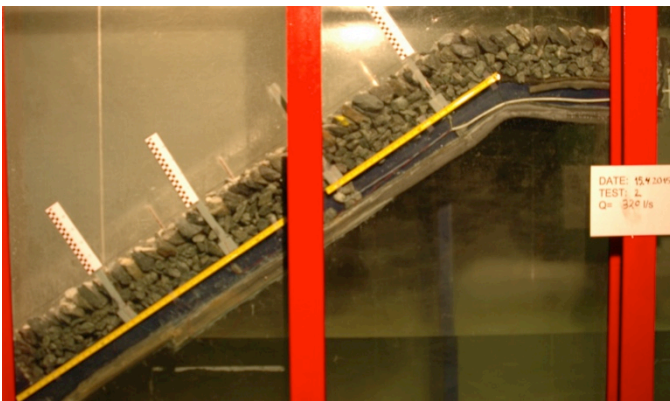
Figur B. 12 – Etter  $q=100$  l/s/m



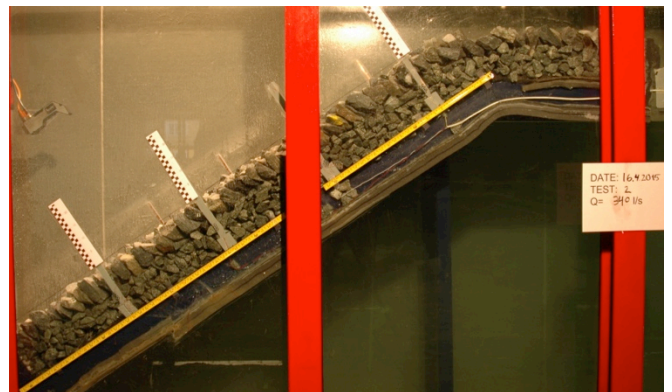
Figur B. 13 - Etter  $q=240$  l/s/m



Figur B. 14 - Etter  $q=300$  l/s/m



Figur B. 15 - Etter  $q=320$  l/s/m



Figur B. 16 - Etter  $q=340$  l/s/m

## Krone og knekkpunkt



*Figur B. 17 – Før belastning*



*Figur B. 18 - Etter  $q=100$  l/s/m*



*Figur B. 19 - Etter  $q=240$  l/s/m*



*Figur B. 20 - Etter  $q=300$  l/s/m*



*Figur B. 21 - Etter  $q=320$  l/s/m*



*Figur B. 22 - Etter  $q=340$  l/s/m*

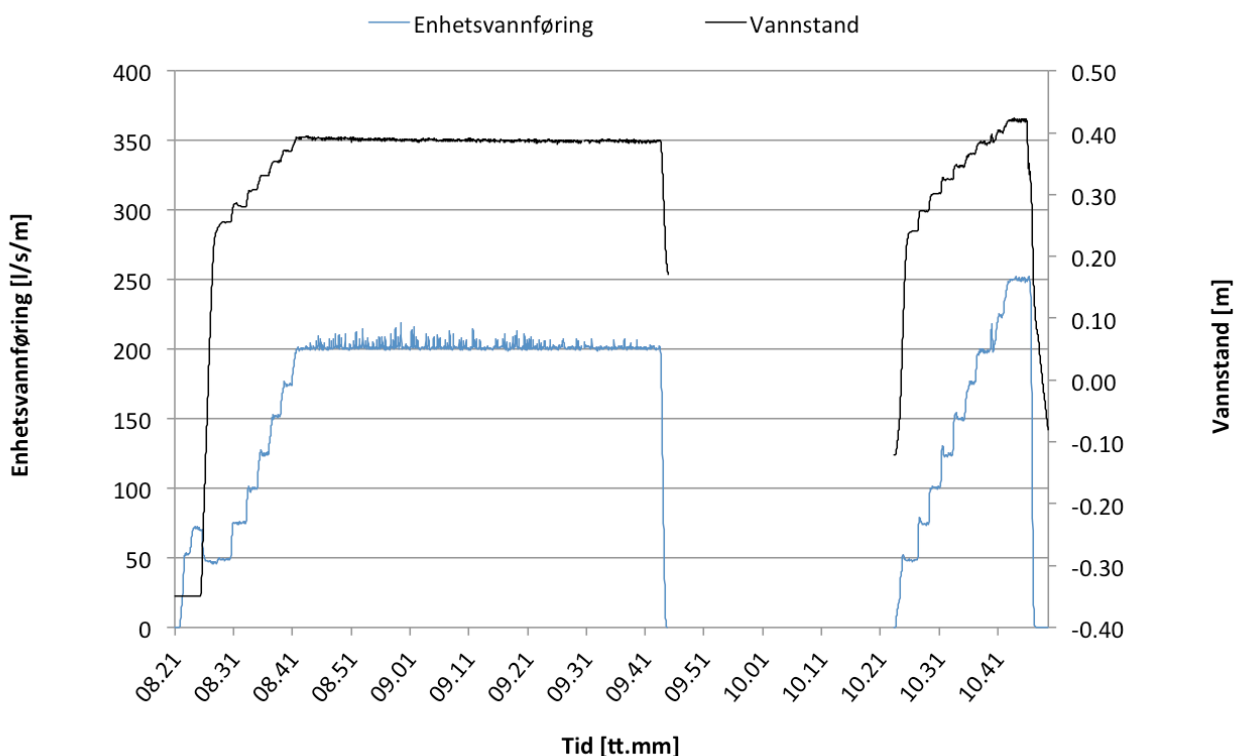
## C. VEDLEGG – FORSØK 3

### C.1 Beskrivelse av forsøk

Plastringen for forsøk 3 ble bygget 17.04.15 og 20.04.15 av JJ, og det tok omtrent 6-7 timer å fullføre byggingen. Plastringen ble i likhet med forsøk 2 og 3 bygget med 100 mm tykt filterlagt og et plastringslag. Filterlaget ble komprimert så lite som mulig. Plastringslaget ble lagt på samme måte som i de to første forsøkene med steinhelning  $\alpha=60^\circ$  i skråningen og  $90^\circ$  i krona. Det ble registrert noe avvik på steinhelningen i krona da det er vanskelig å få steinene til å stå med  $90^\circ$ . Totalt ble det benyttet ca. 55 steiner ekstra i forhold til forsøk 1. Før forsøket ble satt i gang ble skjotene mellom veggene som modelldammen tettet med Sikaflex tettemasse for å sikre at man ikke fikk problemer med lekkasjer.

Forsøket ble utført den 21.04.15, og vannet ble skrudd på klokken 08.21. I dette forsøket var  $q=200$  l/s/m den første vannføringen plastringen ble belastet med i 60 minutter. Vannføringen ble gradvis økt slik at man fikk en jevnt stigning frem til man nådde den ønskede vannføringen. Klokken 08.31 ble det observert en kost i renna, som hadde blitt liggende igjen i renna like oppstrøms for dammen. Kosten kom i kontakt med plastringen, men bli fisket opp raskt, og man regner ikke med at den påvirket testen i noen grad. Allerede 2 minutter etter at man har nådd en  $q=200$  l/s/m, observeres det at man har fått en glippe i knekkpunktet og at kronesteinenes lengste akse nå har inntatt en mer horisontal orientering. Etter 60 minutters belastning hadde ingen steiner forsvunnet ut av plastringen. En filterstein ble observert i renna, men det er usikkert om den stammer fra plastringen eller om det ble liggende igjen etter byggingen. Klokken 10.24 slås vannet på igjen, og vannføringen økes rolig til man når  $q=250$  l/s/m kl. 10.42. Globalt brudd inntreffer klokken 10.47. Første stein forsvinner ut av plastringen i forbindelse med det globale bruddet. Video og observasjoner indikerer at bruddet startet i overgangen mellom krone og skråning, der man tidligere observerte en glippe.

### C.2 Forsøkskjøring



Figur C. 1 – Forsøkskjøring 21.04.15

### C.3 Forsøkslogg 3

Forsøk nr.3 - logg

Forsøksdag: 21.04.2015

**Deltagere:** Eirik Helgetun Pettersen, Jens Jakobsen, Priska Helene Hiller

Tid	Logg	Filer
	EHP og PHH starter	
7:35	Byttet batteri på Disto laseren	
8:00	Lukket bypass	
8:18	Åpnet Agilent og lastet config file OBS det var strømbrudd på ultrasonic og den ble slått på ca. 8:10. Den bør stå litt på for oppvarming (ca. 30 min), men forskjellen er liten. Vi trenger litt tid for å kjøre opp vannføringen og setter i gang.	150421_riprap3.xml
7:40	Innmåling av steiner	
7:55	Laserscann ved y=540mm	150413_Scan_Riprap_Middle_Stripe
Ok	Kontrollerer mobilklokke mot pc-klokka. Avvik på mindre enn 1 sekund. Kontroll av klokke på alle kamera	
Ok	Skrive på infoplakater	
Ok	Lys på	
Ok	Plassere videokamera	
Ok	Bilderunde. Starter videokamera	
8:15	Pumper på	
8:21	Agilent på med 10 Hz	
8:21	Slår på 50 l/s (200 l/s er målet) Var ca. 70 l/s for å fylle opp, reduserte til 50 l/s før overtopping startet	
	Lekkasjen er nå mye mindre enn før som følge av ekstra tetting langs sidene.	
8:27	Overtopping starter	
8:31	Øker til 75 l/s	
8:32	Fisket opp en langkost som var gjenglemt i renna. Ser ut som om den ikke påvirket testen. Ev. litt oppstrøms vannstand. Den var gjenglemt oppstrøms riggen.	
8:33	Øker til 100 l/s	
8:35	Øker til 125 l/s	
8:37	Øker til 150 l/s	
8:39	Øker til 175 l/s	
	Noen steiner rister	
8:41	Øker til 200 l/s	
8:42	PHH så hvordan ca. 5 steiner beveget seg bitte litt ned over noen mm like ved vinduet 300-500 mm nedstrøms knekkpunkt. En stein ved ca. 500 mm nedstrøms knekkpunktet.	
8:43	Start på 60 minutter	
8:45	Glipen like oppstrøms knekkpunktet har allerede åpnet seg noe. En stein i knekkpunktet ristet litt	

8:49	Vi kan observere hvordan glipen åpner seg mer ved knekkpunktet. Flere steiner som forskyvet seg noe mot nedstrøms.	
	Ganske stort hull (plass til ca. 1-2 steiner) ca. 200 mm fra vinduet like oppstrøms knekkpunktet. Usikker om det har forsvunnet noen stein derfra.	bilde
8:54	Renna lekker fortsatt litt bak skrivebordet under trappa	
9:08	Priska går, Jens kommer og tar over	
9:29	Saltmåling med 10 Hz på grunn av misforståelse	
9:30	Agilent stopp	
9:31	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l vann)	
9:32	Agilent på igjen med 10 Hz	
9:34	Tegnet vannlinje på glasset	
9:35	Bilderunde	
9:44	Vann av	
9:45	Stopper video	
9:45	Stopper Agilent	
9:49	Antall steiner i renna:0 plastringssteiner, 1 filterstein	
9:50	Måler inn steiner	
10:11	Laserscanning	
10.15	Bilderunde	
10:23	Agilent på med 10 Hz	
10:24	Starter videokamera	
10:24	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 250 l/s)	
10:27	Øker til 75 l/s	
10:29	Øker til 100 l/s	
10:31	Øker til 125 l/s	
10:33	Øker til 150 l/s	
10:35	Øker til 175 l/s	
10:37	Øker til 200 l/s	
10:40	Øker til 225 l/s	
10:42	Øker til 250 l/s	
10:44	Start på 60 minutter	
10:47	Brudd	
10:48	Vann av	
	Kamera av	
	Agilent av	
10:51	Bilderunde	
	Åpner bypass	
11:33	Lagrer alle data til ekstern harddisk	



## C.4 Innmåling av markørsteiner

MS1800			
q	X	Y	z
0	1791	457	147
200	1795	456	154

MS600			
q	X	Y	Z
0	627	468	159
200	677	468	178

MS-200			
q	X	Y	Z
0	-195	511	176
200	-185	511	169

MS1400			
q	X	Y	z
0	1414	443	177
200	1426	445	191

MS200			
q	X	Y	z
0	227	518	178
200	295	519	192

Referansepunkt			
q	X	Y	Z
0	2165	469	-16
200	2167	469	-12

MS1000			
q	X	Y	Z
0	1030	495	179
200	1058	483	210

MS0			
q	X	Y	Z
0	-103	511	153
200	-38	523	171

## C.5 Bilder av forsøk 3

Bilder normalt på plastringen



Figur C. 2 – Før belastning

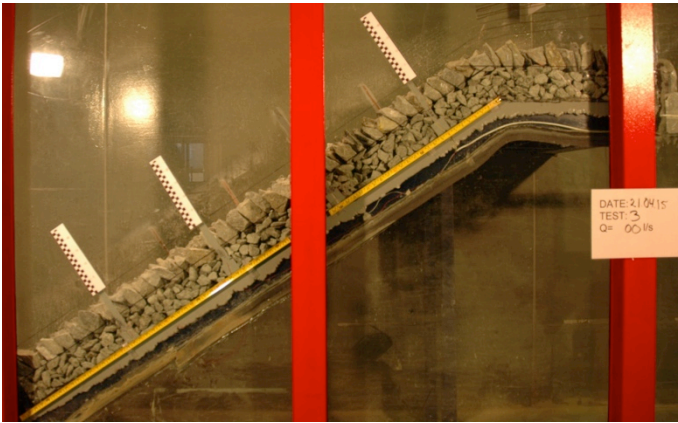


Figur C. 3 – Under  $q=200$  l/s/m

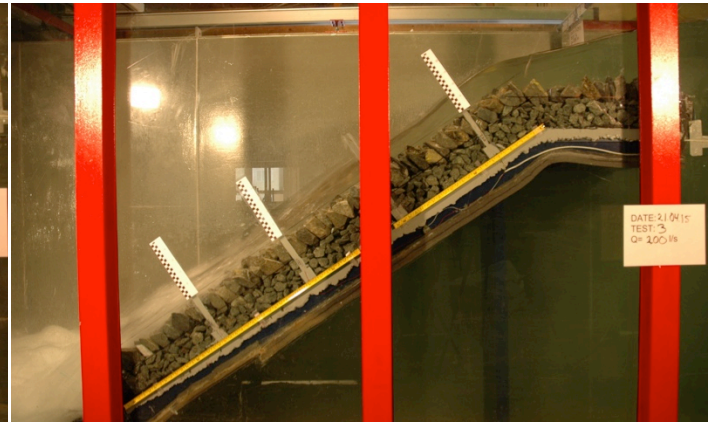


Figur C. 4 - Etter  $q=200$  l/s/m -

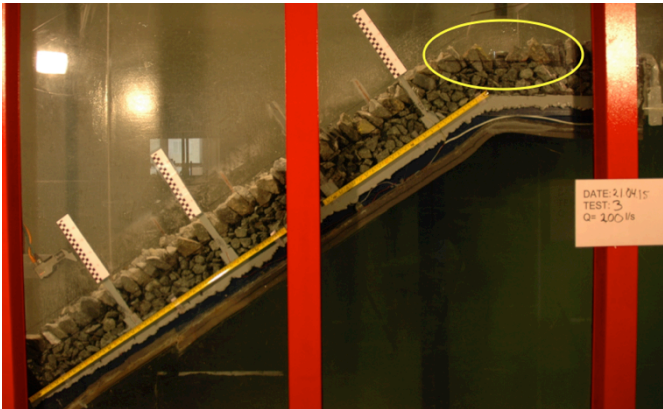
Bilder fra siden



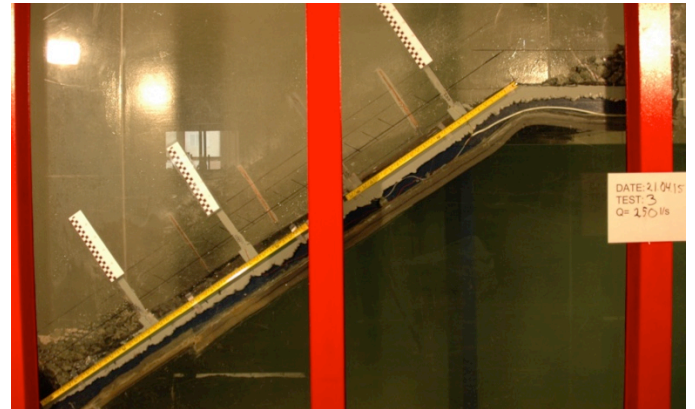
Figur C. 5 – Før belastning



Figur C. 6 – Under  $q=200$  l/s/m



Figur C. 7 - Etter  $q=200$  l/s/m



Figur C. 8 – Etter globalt brudd

## Krone og knekkpunkt



*Figur C. 9 – Før belastning*



*Figur C. 10 – Under  $q=200$  l/s/m*



*Figur C. 11 - Etter  $q=200$  l/s/m*

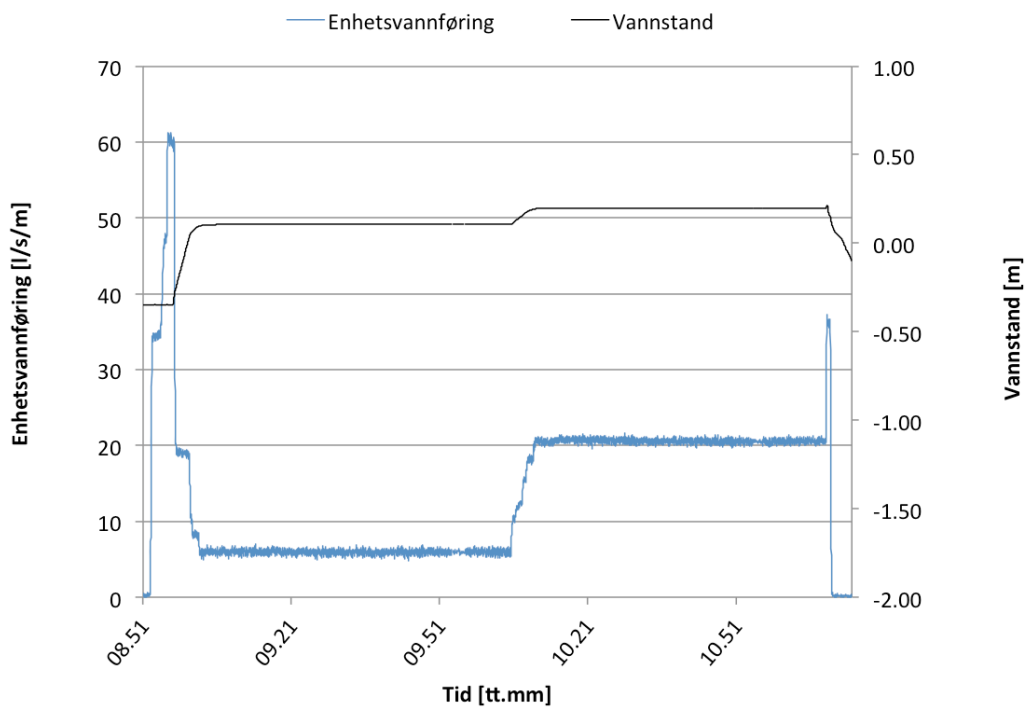
## D. VEDLEGG – FORSØK 4

### D.1 Beskrivelse av forsøk

Forsøk 4 ble utført med rauset steinfylling som skråningsvern, og ble bygget av PHH 23.04.15. I likhet med de andre forsøkene ble det lagt et 100 mm tykt filterlag. Totalt ble det brukt omkring 3 timer. Steinene i den rausede fyllingen ble plassert mer eller mindre en og en på grunn av den store helningen på skråningen. Plastringssteinene ble først lagt i ett lag slik at man dekket overflaten, før de resterende steinene ble plassert i et andre lag. Det ble brukt like mange plastringssteiner for i forsøk 3, ca. 55 steiner mer enn forsøk 1. Steinene ble forsøkt lagt tilfeldig slik at man ikke tenker på orientering. Siden rauset steinfylling er et fleksibelt skråningsvern med rom for forskyvninger og omplussing av enkelte steiner ble det ikke foretatt innmåling av referansesteiner i dette forsøket.

Forsøket ble startet klokken 08.55 den 24.04.15. I likhet med forsøk 1 ble dammen først belastet slik at det bare rant vann gjennom filteret. Med vannstrøm gjennom filteret behøvde man en enhetsvannføring på  $q=6$  l/s/m. Dette samsvarte godt med forsøk 1 der man behøvde  $q=7$  l/s/m. Deretter ble vannføring økt slik at man hadde strøm gjennom filterlaget og den rausede steinfyllingen med  $q=20$  l/s/m. Etter å belastet i 60 minutter på hver av disse vannføringene ble vannføringen økt til  $q=40$  l/s/m. Under øking til 40 l/s/m inntraff globalt brudd. Ved å studere vannføringskurvene og vannstandskurvene i figur D.1 ble bruddvannføring satt til 37 l/s/m. Ingen steiner ble revet ut av plastringen før globalt brudd. Det var vanskelig å konstatere hvordan bruddet skjedde, men den mistenkes at bruddet var et resultat av utglidning gjennom filtermaterialet.

### D.2 Forsøkskjøring



Figur D. 1 – Forsøkskjøring 24.04.15

### D.3 Forsøkslogg 4

Forsøk nr.4 – logg

Forsøksdag: 24.04.2015

**Deltagere:** Eirik Helgetun Pettersen, Jens Jakobsen, Priska Helene Hiller, Wiebke Zander

Riprap 4 er rauset steinsikring, altså ikke plastring. Forøket brukes for å sammenligne med plastring og med litteratur. Referansesteiner blir ikke merket og innmålt fordi rauset steinsikring er en fleksibel erosionssikring og det skal være rom for forskyvinger og omplussing av noen steiner. Smartstones blir med i forsøket.

Tid	Logg	Filer
x	Byttet batteri på Disto laseren, den bruker vi ikke i dag	
ok	Lukket bypass	
ok	Åpnet Agilent og lastet config file	150424_riprap4.xml
x	Innmåling av steiner (faller bort for denne testen)	
8:20	Laserscann ved y=540mm	150413_Scan_Riprap_Middle_Stripe
8:40	Kontrollerer mobilklokke mot pc-klokka. Avvik på 2 sekunder.	
8:37	Kontrollert videoklokke	
8:30	Kontrollerer speilreflekskameraklokke og ta bilde av PC klokke	
ok	Kontrollerer videoklokke på video 2 og ta bilde av PC klokke. Sjekk at den monteres vannrett, hvis den skal ta bilde fra horisontal posisjon.	
ja	Skrive på infoplakater	
ok	Lys på	
ok	Plassere videokamera	
8:40	Byttet batteri på Smartstone 71 og 61 (66 hadde ok spenning)	
8:45	Plasserer Smartstones i rauset steinsikringen: 66 ved 200 mm, 71 ved 600 mm, 61 ved 1000 mm	
8:45	Bilderunde. Starter videokamera	
8:50	Pumper på	
8:51	Agilent på med 10 Hz	
8:55	Vann på slik at vann bare renner gjennom filteret (var tidligere ca. 7 l/s) Q=6 l/s	
9:03	Start på 60 min	
9:26	Henrik kjører også forsøk. Han bruker ca. 50-70 l/s	
9:50	Justerer offset på Agilent	
9:53	Agilent stopp	
9:54	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l)	
9:56	Agilent på igjen med 10 Hz	
10:03	Tegnet vannlinje på glasset	
10:00	Bilderunde	
10:05	Vannføringen økes til like før overtopping (det var tidligere ca. 15 l/s med plastring) Q=20 l/s	
10:11	Start på 60 min	
10:39	Henrik er ferdig med forsøket sitt og vi disponerer pumpe.	
10:54	Agilent stopp	
10:55	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g salt i ca. 0.4 l vann)	
10:56	Agilent på igjen med 10 Hz	
11:00	Lastet ned video fra lille kamera og slettet minne.	

ok	Tegnet vannlinje på glasset	
Ok	Bilderunde	
11:10	Øker vannføringen til 40 l/s (40 l/s er målet)	
	Brudd	
11:14	Agilent stopp	
	Kopierte bilder fra 3 kamera til harddisk Kopierte agilent filer	
	All data kopieres til ekstern harddisk	
	Batterier settes til lading	
	Ekstra kopi til EHPs harddisk og PHHs stor harddisk	

## D.4 Bilder av forsøk 4

### Bilder normalt på plastringen



*Figur D. 2 – Før belasting*

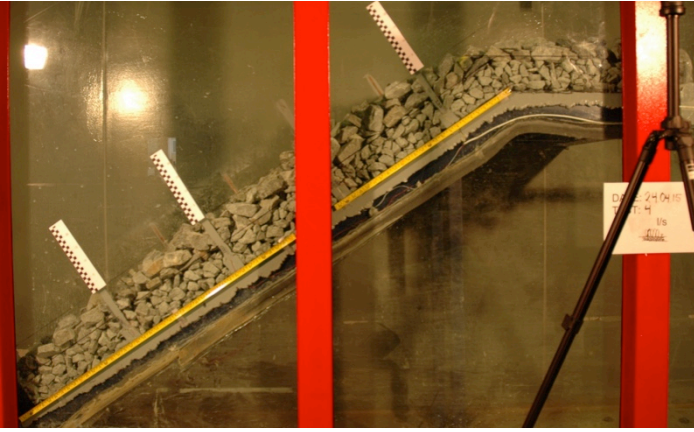


*Figur D. 3 – Under  $q=6$  l/s/m . Vann strømmer gjennom filterlaget*

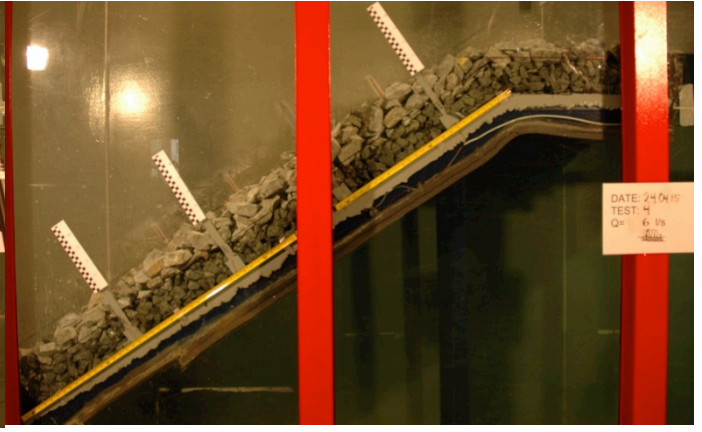


*Figur D. 4 – Under  $q=20$  l/s/m*

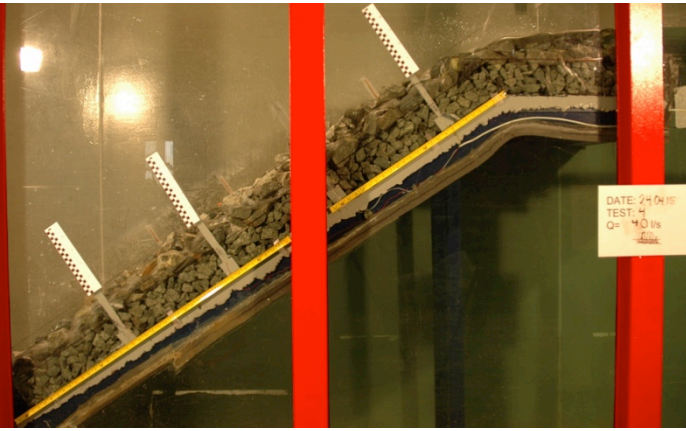
## Bilder fra siden



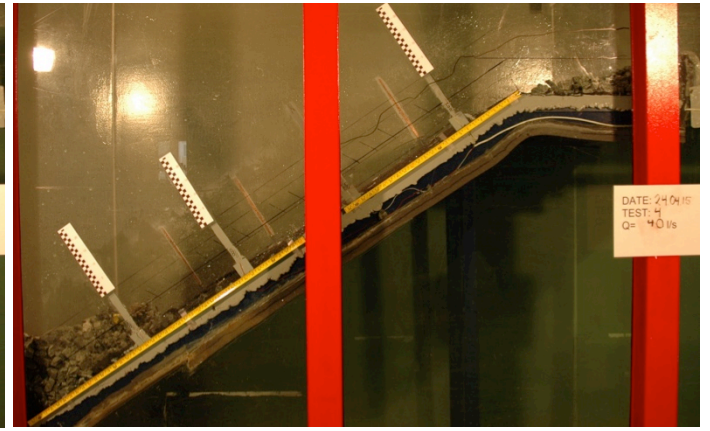
*Figur D. 5 – Før belastning*



*Figur D. 6 – Under  $q=6$  l/s/m . Vann gjennom filterlaget*



*Figur D. 7 – Under  $q=20$  l/s/m: Vann gjennom filter- og lag med raset steinfylling*



*Figur D. 8 – Etter globalt brudd ved  $q=37$  l/s/m*

## Krone og knekkpunkt



*Figur D. 9 – Før belastning*



*Figur D. 10 – Ved  $q=6$  l/s/m*



*Figur D. 11 – Ved  $q=20$  l/s/m*



*Figur D. 12 – Etter globalt brudd ved  $q=37$  l/s/m*



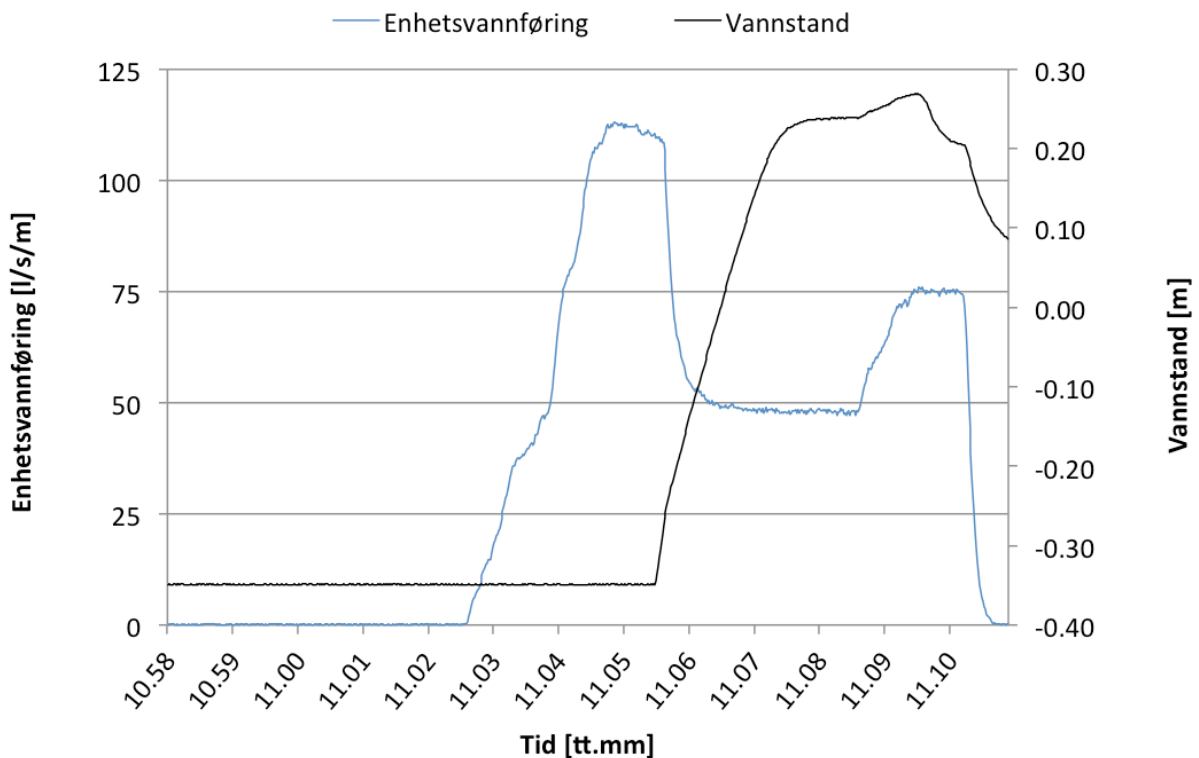
# E. VEDLEGG – FORSØK 5

## E.1 Beskrivelse av forsøk 5

Plastringen for forsøk 5 ble bygget 24.04.15 av EHP, og det tok omtrent 7 timer å fullføre byggingen. I likhet med de tidligere forsøkene ble det lagt et 100 mm tykt filterlag under plastringslaget. Filterlaget ble komprimert så lite som mulig og jevnet ute ved hjelp av rive og forsiktig håndmakt. Plastringslaget i forsøk 5 ble lagt bevisst slik at man prøvde å unngå forband mellom steinene. Det ble gjort ved å legge steinene i tydelige rader og kolonner der steinen over ble lagt direkte på steinen under uten at den dannet en bro mellom to steiner fra rader under. Steinene i skråningen ble lagt med steinhelning  $\alpha=60^\circ$  mens kronesteinene ble forsøkt lagt med  $\alpha=90^\circ$ . Vinkelen i krona viste seg å avvike litt da. Totalt ble det benyttet 65 steiner færre enn i forsøk 1, og det var tydelig at det var større hulrom mellom steinene i dette forsøket enn i de foregående forsøkene, der man hadde lagt steinene i forband.

Forsøket ble startet kl. 11.02 26.04.15. Toppen i vannføringskurven ned  $q=110$  l/s/m er ikke vannføring plastringen overtoppes med, men oppfylling av bassenget bak dammen. Overtopping av dammen startet klokken 11.06 med 50 l/s/m. Første vannføring som skulle belastes i en time var  $q=100$  l/s/m. Under oppkjøring til ønsket vannføring gikk plastringen til globalt brudd ved  $q\approx 75$  l/s/m. Video av bruddet ga ikke noe entydig svar på hvordan bruddet startet, men video av overgangen mellom krone og skråning viser at de øverste steinene i krona beveger seg i x-retning like før bruddet inntreffer. Video normalt på plastringens overflate viser den samme indikasjonen. Det er allikevel ikke mulig å konstatere om det er selve plastringslaget som sklir av seg selv eller om det er utglidning i filterlaget som initierer bruddet.

## E.2 Forsøkskjøring



Figur E. 1 – Forsøkskjøring 26.04.15

### E.3 Forsøkslogg 5

Forsøk nr.5 – logg

Forsøksdag: 26.04.2015

**Deltagere:** Eirik Helgetun Pettersen, Jens Jakobsen

Riprap 5 er plastret steinsikring, men det er forsøkt å legge plastring slik at man unngår effekten av forband. Dette er gjort ved at man legger steinene i faste rader. Forøket brukes for å se på effekten av forband i plastringen. Referansesteiner blir merket og innmålt for å se på forskyvinger og omplassering av noen steiner. Smartstones blir med i forsøket.

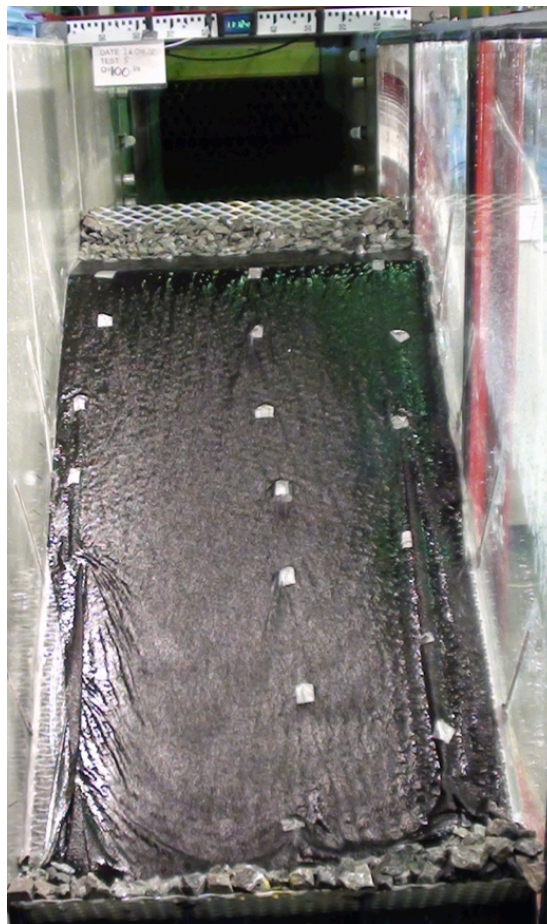
Tid	Logg	Filer
Ok	Byttet batteri på Disto laseren	
Ok	Lukket bypass	
10:17	Åpnet Agilent og lastet config file	150426_riprap5.xml
10:40	Innmåling av steiner	150426_Coordinates_Marked_Stones.xlsx
10:49	Laserscann ved y=540mm. Stopper litt ved knekkpunktet(mindre enn 1 sekund)	150413_Scan_Riprap_Middle_Stripe
Ok	Kontrollerer mobilklokke mot pc-klokka. Avvik på 5 sekund.	
Ok	Kontrollert videoklokke	
Ok	Kontrollerer speilreflekskameraklokke og ta bilde av PC klokke. Avvik på 5 sekunder	
Ok	Kontrollerer videoklokke på video 2 og ta bilde av PC klokke. Sjekk at den monteres vannrett, hvis den skal ta bilde fra horisontal posisjon. Avvik på 3 sekunder	
Ok	Skrive på infoplakater	
Ok	Lys på	
Ok	Plassere videokamera	
Ok	Batteri ok på smartstones	
	Plasserer Smartstones i rauset steinsikringen: 66 ved 200 mm, 71 ved 600 mm, 61 ved 1000 mm	
10:51	Pumper på	
10:58	Agilent på med 10 Hz	
10:59	Bilderunde. Starter videokamera	
11:02	Vann på, 50 l/s (målet er 100 l/s)	
11:09	Øker til 75 l/s	
11:10	Brudd ved ca. 75 l/s	
11:11	Stopper Agilent	
11:12	Stopper kamera	
11:45	Overfører og lagrer alle data	
	All data kopieres til ekstern harddisk	
	Batterier settes til lading	
	Ekstra kopi til EHPs harddisk og PHHs stor harddisk	

## E.4 Bilder av forsøk 5

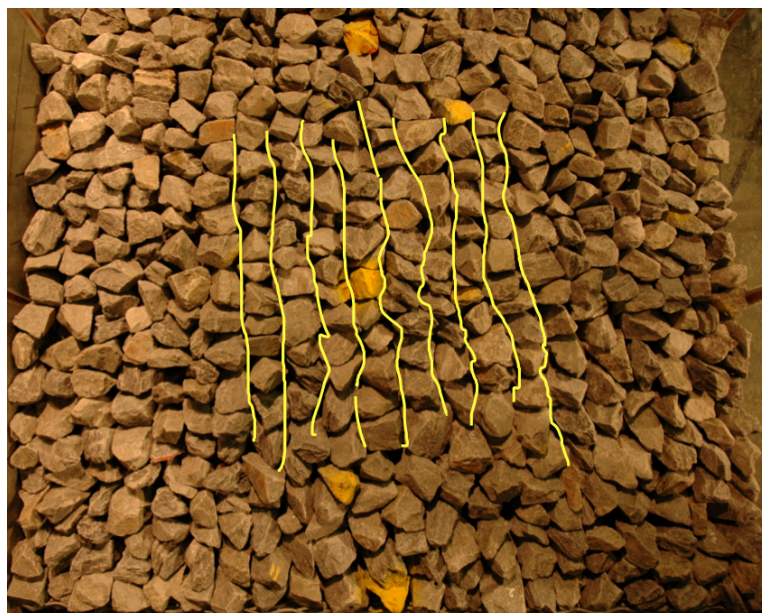
### Bilder normalt på plastringen



*Figur E. 2 – Før belastning*

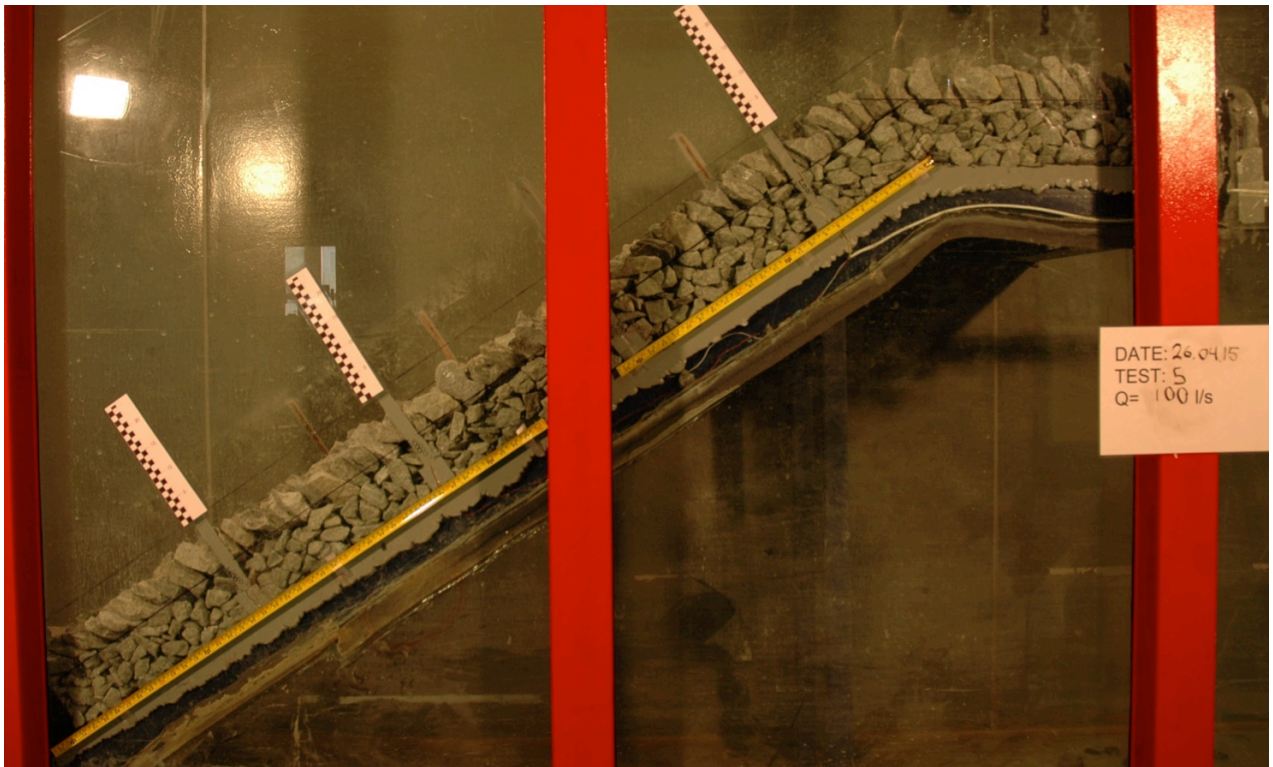


*Figur E. 3 – Etter globalt brudd ved  $q=75$  l/s/m*

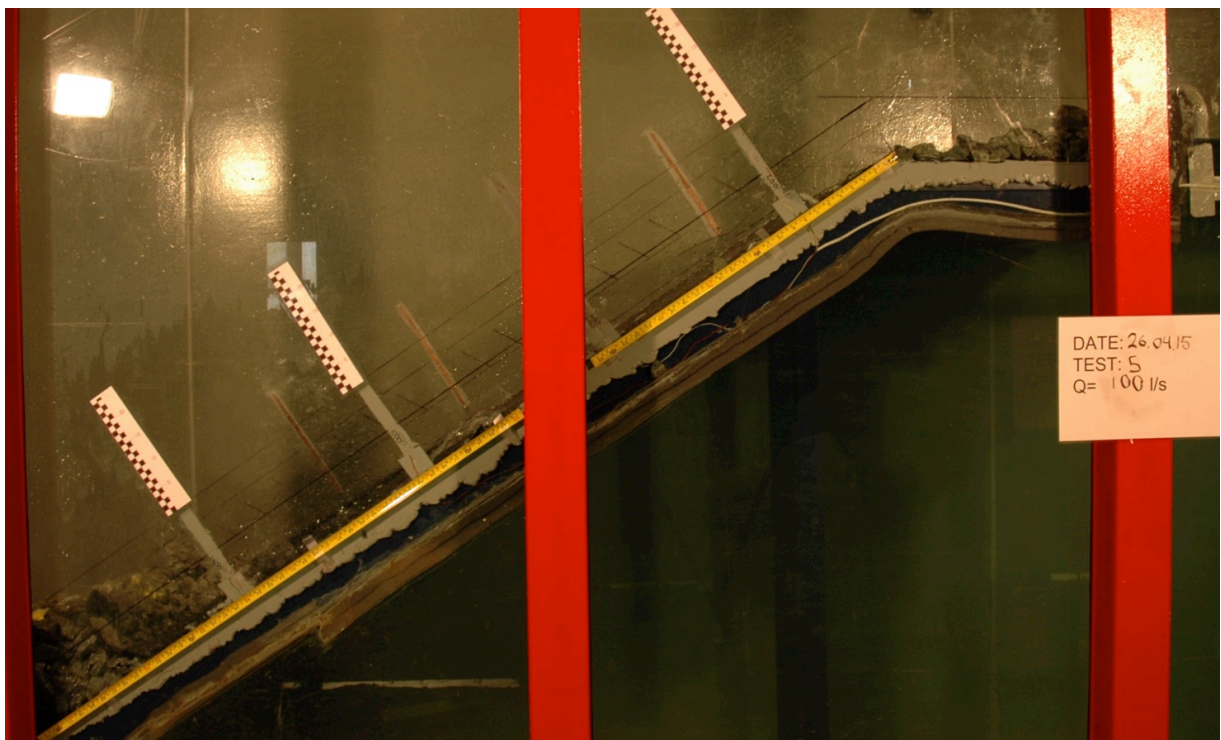


*Figur E. 4 – Plastring lagt uten forband. Rette sprekesett markert med gult.*

Bilder fra siden



Figur E. 5 – Før belastning



Figur E. 6 – Etter globalt brudd ved  $q=75 \text{ l/s/m}$

## Krone og knekkpunkt



*Figur E. 7 – Krone for belastning*



*Figur E. 8 - Etter globalt brudd ved  $q=75$  l/s/m*

## F. VEDLEGG – FORSØK 6

### F.1 Beskrivelse av forsøk 6

Plastringen for forsøk 6 ble bygget den 27.04.15 av EHP, og det tok omtrent 9 timer å fullføre byggingen. I likhet med de tidlige forsøkene ble det lagt et 100 mm tykt filterlag under plastringslaget. Filterlaget ble lagt jevnt ved hjelp av rive og forsiktig håndmakt slik at komprimeringen ble så liten som mulig. Plastringslaget ble utført på samme måte som i forsøk 1,2 og 3, plastring med forband. Steinene i skråningen ble lagt med en steinhelning  $\alpha$  tilnærmet  $60^\circ$  og i krona med  $\alpha \approx 90^\circ$ . Forsøk 6 var det forsøket der flest steiner ble benyttet i plastringen. Totalt ble det lagt 75 ekstra steiner sammenlignet med forsøk 1.

Forsøk 6 ble gjennomført gjennom seks dager (28.-30.05.15, 06.05.15, 08.05.15 og 12.05.15). Forsøket ble startet med kjøring av vann klokken 10.02. Første vannføring det ble belastet med i 60 minutter var  $q=100$  l/s/m. Neste steg var  $q=200$  l/s/m, og to steiner som hadde forsvunnet ut ble observert klokken 12.14, 18 minutter etter at vannføringen hadde stabilisert seg på  $q=200$  l/s/m. Vannføringen ble derfor skrudd av, og steinenes plassering ble lokalisert. Ved å studere videoopptak kom man frem til at første stein ( $x=600$ ,  $y=660$ ) ble revet ut klokken 11.53 ved en enhetsvannføring  $q=174$  l/s/m. Den andre steinen ( $x=800$ ,  $y=810$ ) ble revet ut klokken 11.57 ved  $q=198-200$  l/s/m. Deretter ble vannet skrudd på igjen, og man kjørte videre på  $q=200$  l/s/m i ytterlige 42 minutter. Videre ble vannføringen økt med steg på 50 l/s/m for hver time med belastning. Ved slutten av dagen hadde man nådd  $q=400$  l/s/m, noe som viste seg å være den maksimale vannføringen man kunne kjøre med uten av det overtoppet bassenget oppstrøms dammen. Totalt hadde 6 steiner blitt revet ut av plastringen.

Forsøket ble fortsatt 29.04.15. Vannføring ble først kjørt gradvis opp til 400 l/s/m, men ble etter hvert redusert til 350 l/s/m for å unngå at det skvulpet over rennas vegger. Etter belastning med vann fra klokken 10.38-15.57 hadde ytterlige 9 steiner forsvunnet ut av plastringen.

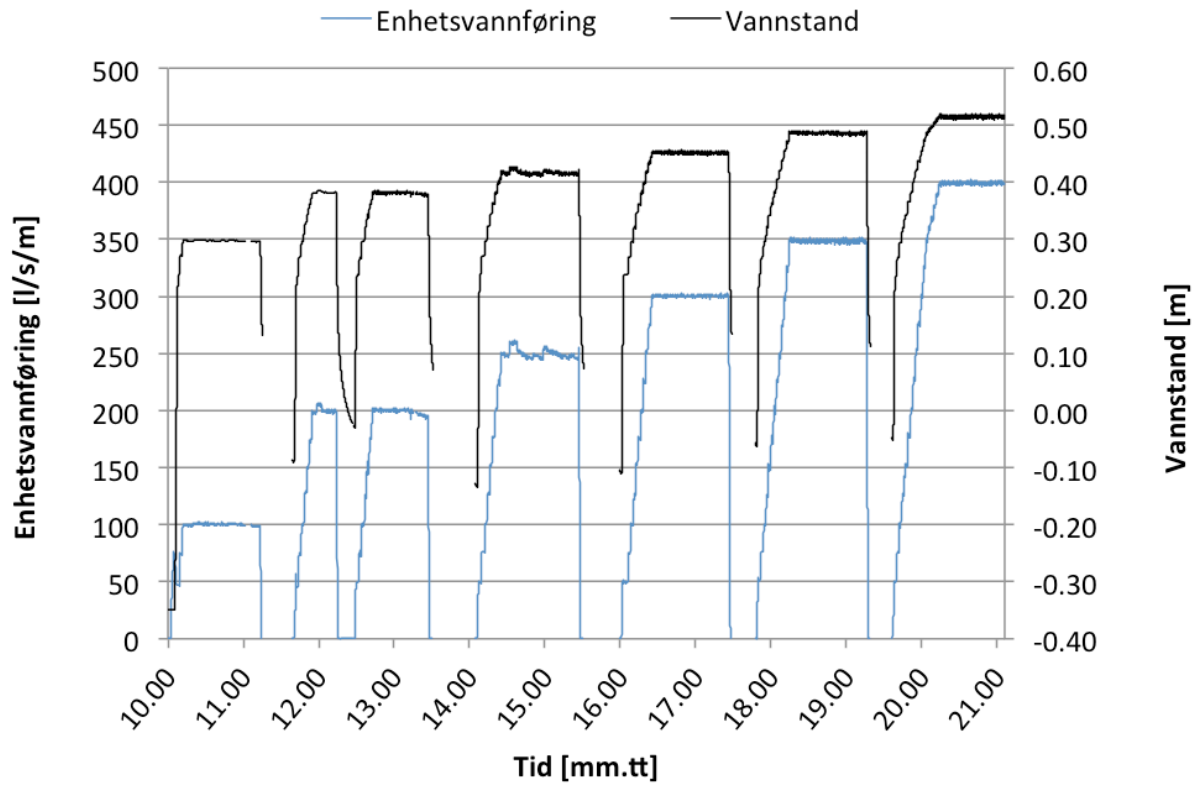
Den 30.04.15 ble plastringen belastet med  $q=350$  l/s/m fra 9.56 til 14.40. 1 stein forsvant ut av plastringen.

Den 06.05.15 ble plastringen belastet med  $q=350$  l/s/m. Vannføringen ble ikke økt trinnvis slik som tidligere, og man forsøkte å skru opp til  $q=350$  l/s/m så fort som mulig. Tre steiner forsvant ut av plastringen før man skrudde av vannet.

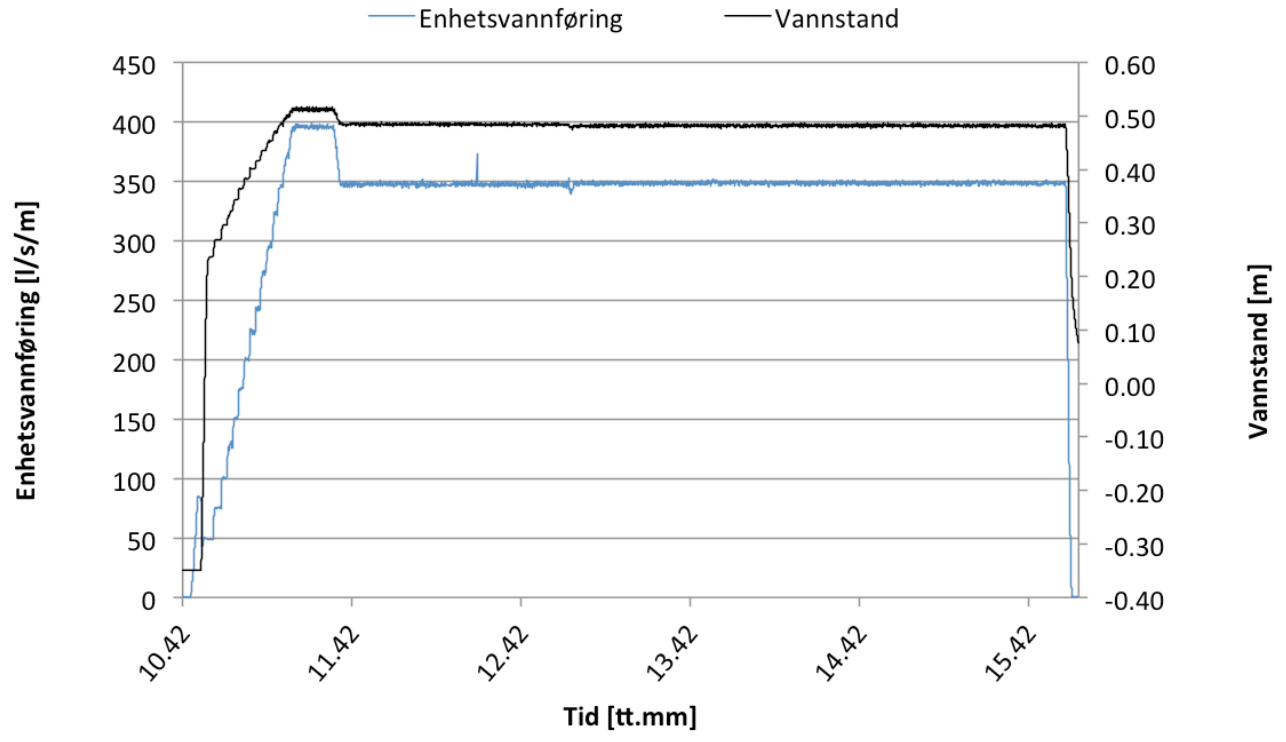
Den 08.05.15 ble plastringen belastet med  $q=350$  l/s/m. Vannføring var på 50 l/s/m frem til overtopping, og deretter ble den øket direkte til  $q=350$  l/s/m. Vannet ble deretter skrudd av igjen. Deretter ble dammen belastet med  $q=400$  l/s/m med trinnvis økning med steg på 50 l/s/m. Hver vannføring ble kjørt i 10 minutter før man økte igjen. Vannføringen ble økt så fort som mulig, slik at  $q=400$  l/s/m i det man fikk overtopping. Totalt forsvant 4 steiner ut av renna.

Forsøket ble fullført med globalt brudd den 12.05.15. Vannføringen ble økt direkte til  $q=350$  l/s/m uten trinnvis økning klokken 10.01. Vannføringen ble økt videre til 400 l/s/m klokken 10.19. Når man skrudde av vannet klokken 11.30 hadde ytterlige 12 steiner blitt revet ut av plastringen. Vannet ble deretter skrudd på igjen klokken 12.12 med  $q=350$  l/s/m. Vannføringen ble øket på samme måte som tidligere på dagen, og etter 10 minutter ble det øket til  $q=400$  l/s/m. Globalt brudd inntraff klokken 12.37 med en bruddvannføring på  $q=400$  l/s/m. Bruddet startet i knekkpunktet mellom skråning og krone.

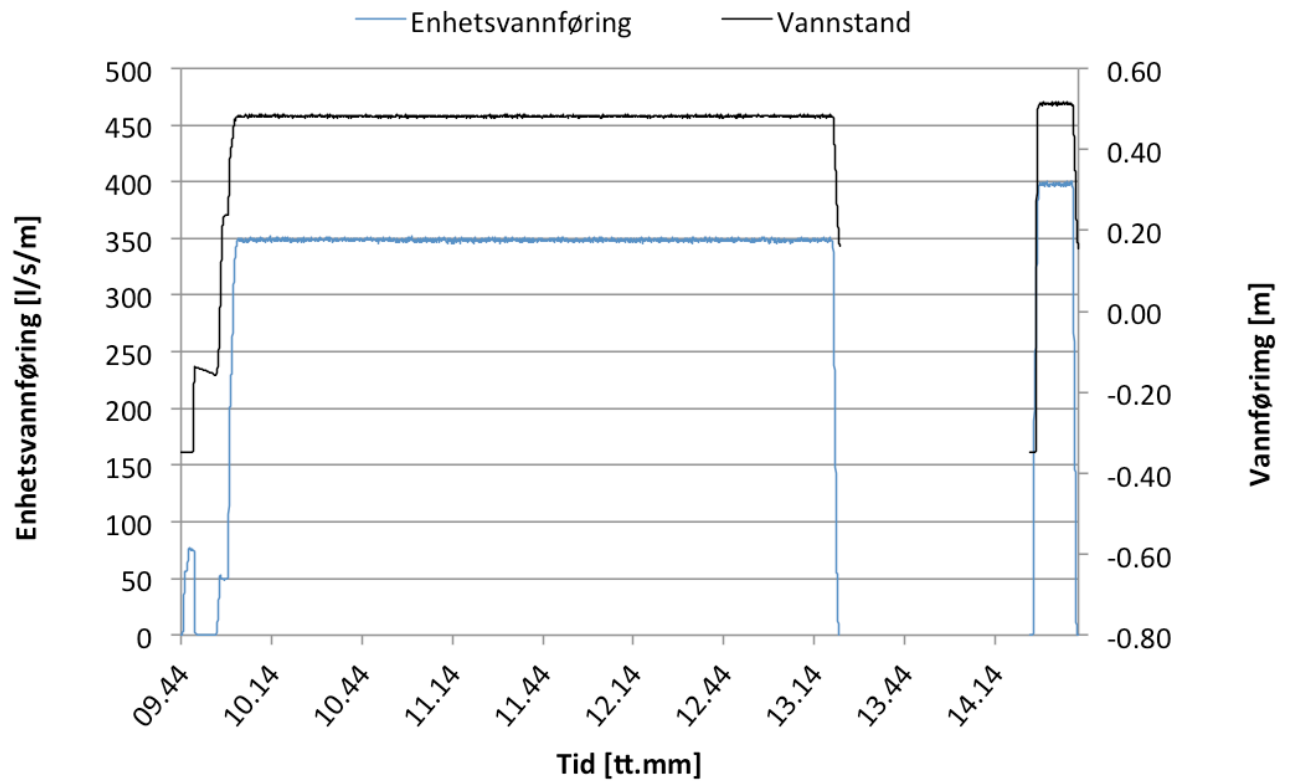
## F.2 Forsøkskjøring



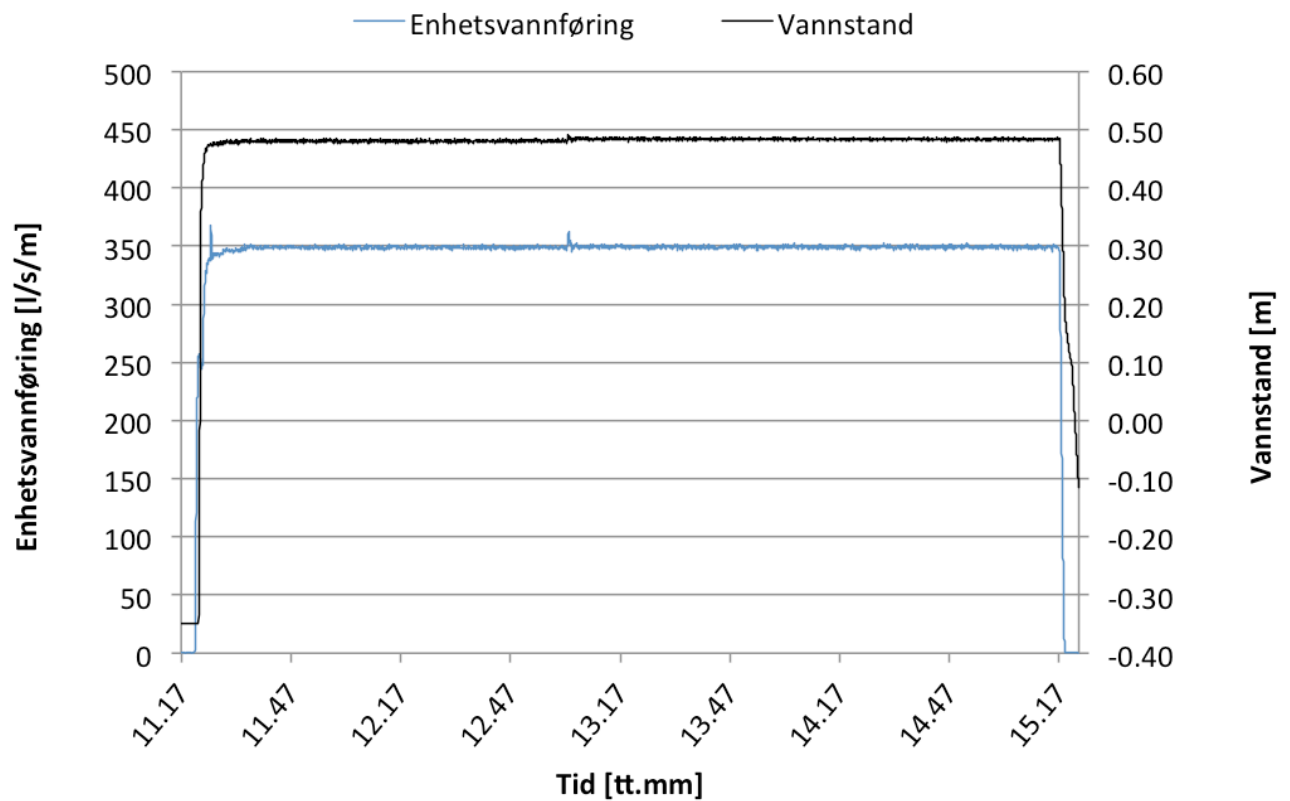
Figur F. 1 – Forsøkskjøring 28.04.15



Figur F. 2 – Forsøkskjøring 29.04.15

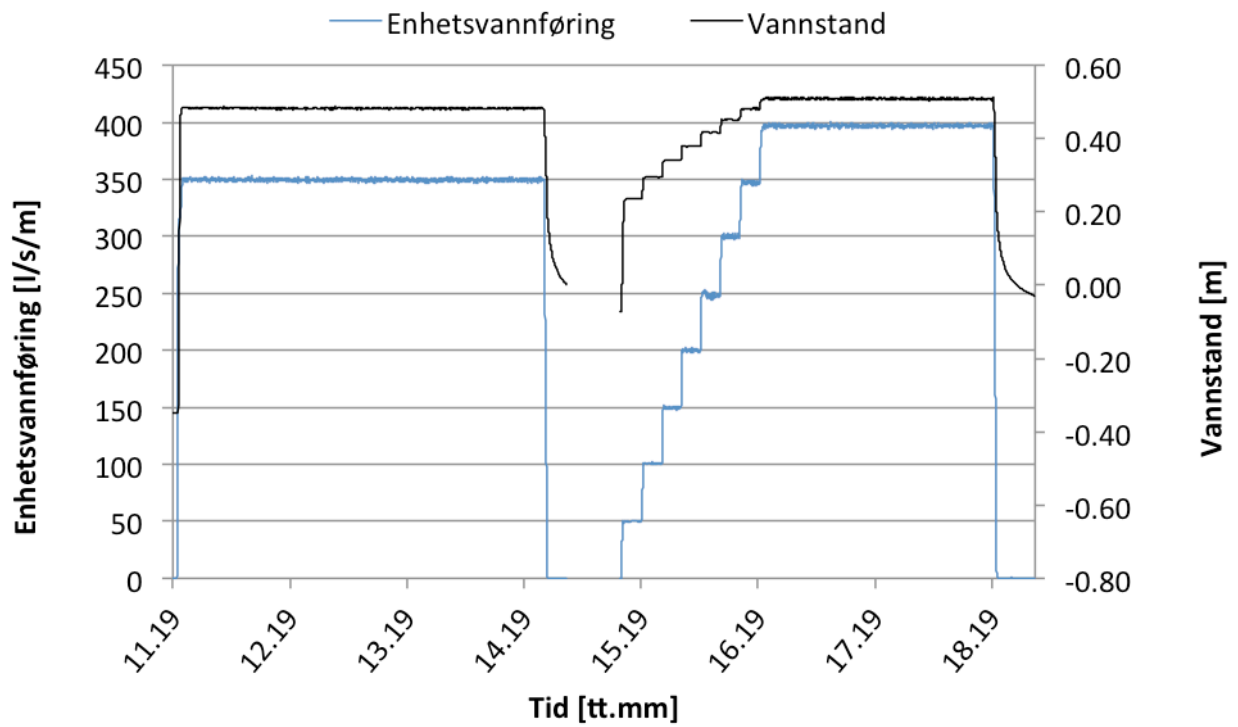


Figur F. 3 – Forsøkskjøring 30.05.15

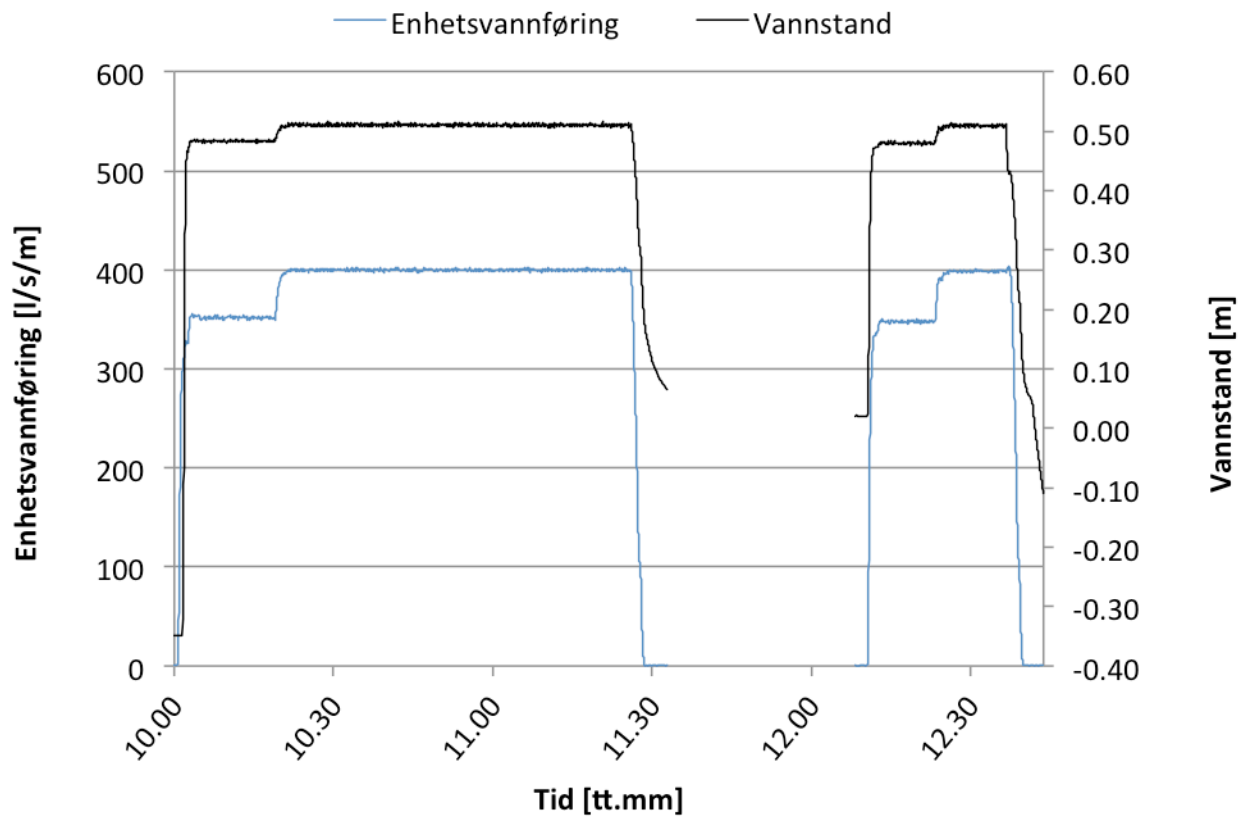


Figur F. 4 – Forsøkskjøring 06.05.15





Figur F. 5 – Forsøkskjøring 08.05.15



Figur F. 6 – Forsøkskjøring 12.05.15

### F.3 Forsøkslogg 6

Forsøk nr.6 – logg

**Forsøksdager:** 28.04, 29.04, 30.04, 06.05, 08.05, 12.05

**Deltagere:** Eirik Helgetun Pettersen, Jens Jakobsen, Priska Helene Hiller, Fredrikke Kjosavik  
28.04.2015 – dag 1 av 6

Tid	Logg	Filer
ok	Byttet batteri på Disto laseren, batteriet er fortsatt ganske full	
ok	Lukket bypass	
Ok	Åpnet Agilent og lastet config file	150428_riprap6.xml
Ok	Innmåling av steiner	
9:40	Laserscann ved y=540mm	150413_Scan_Riprap_Middle_Stripe
Ok	Kontrollerer mobil klokke mot pc-klokka. Avvik på 0,5 sekund.	
Ok	Kontrollert videoklokke	
Ok	Kontrollerer speilrefleks kameraklokke og ta bilde av PC klokke	
Ok	Kontrollerer videoklokke på video 2 og ta bilde av PC klokke. Sjekk at den monteres vannrett, hvis den skal ta bilde fra horisontal posisjon.	
ok	Bilderunde	
Ok	Skrive på infoplakater	
Ok	Lys på	
Ok	Plassere videokamera	
10:00	Bilderunde fra sida. Starter videokamera	
9:54	Pumper på (200 l/s er på) Henrik kjører også forsøk, han bruker ca. 70 l/s)	
10:00	Agilent på med 10 Hz	
10:01	Video på	
10:02	Slår på 50 l/s (100 l/s er målet) litt mer for oppfylling av boksen, reduseres til 50 l/s før vannet begynner å renne gjennom filteret	
10:07	Overtopping starter	
10:09	Øker til 75 l/s	
10:11	Øker til 100 l/s	
10:13	Start på 60 min	
10:58	Agilent stopp	
11:00	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g salt i ca. 0.4 l vann)	
11:02	Agilent på igjen med 10 Hz	
Ok	Tegnet vannlinje på glasset	
11:03	Blue screen på PC med Agilent Restart, vet ikke hva som var årsaken får blue screen. Skjedde for første gang	
11:06	Agilent på igjen med 10 Hz	
11:06	Bilderunde	
11:13	Vann av	
11:15	Stopper video	
11:15	Stopper Agilent	
Ok	Antall steiner i renna:0 plastringssteiner, 0 filterstein	
Ok	Måler inn steiner Referansepunktet er ikke optimalt som skrevet tidligere. En mulig årsak kan være at vi måler inn referanse før test når det	

	ikke er vanntrykk bak modellen.	
Ok	Laserscanning	
Ok	Bilderunde	
11:38	Skrur på 100 l/s pumpe i tillegg (Henrik jobber fortsatt)	
11:39	Agilent på med 10 Hz	
11:39	Starter videokamera	
11:40	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 200 l/s)	
11:44	Øker til 75 l/s	
11:46	Øker til 100 l/s	
11:48	Øker til 125 l/s	
11:50	Øker til 150 l/s	
	Noen steiner begynner å riste	
11:52	Øker til 175 l/s	
	Flere steiner i krona rister litt	
11:54	Øker til 200 l/s	
11:56	Start på en time	
12:14	Eirik ser et par steiner som ligger i renna. Stopper vannet og tar de opp. Prøver å se hvordan de har forsvunnet. 42 minutter igjen før det har gått en time. Ser også en stein som er på tur ut, mye lenger nede og litt lenger mot midten enn de som er forsvunnet.	
12:23	Laserskanning av punktene der steinene var plukka fra. Stein1: x=1126, y=177. Stein2: x=1264, y=327. Steinene har nummer 144 og 244.	
	Bilderunde	
12:27	Stopp/start av Agilent	
12:28	Starter video	
12:29	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 200 l/s)	
	En stein rister (ved toppen/knekkpunktet helt inn mot glasset)	
12:32	Øker til 75 l/s	
12:34	Øker til 100 l/s	
12:36	Øker til 125 l/s	
12:38	Øker til 150 l/s	
12:40	Øker til 175 l/s	
12:42	Øker til 200 l/s	
	Ikke tegn til annen bevegelse/risting i stein.	
12:44	Fortsetter på 1 time. Gjenstår 42 minutter	
12:45	Fredrikke observerte kanskje stein ved ca 1000 bli plukka, den som ble registrert at var på tur ut 12:14. Ellers ikke tegn til bevegelse.	
13:14	Agilent stopp	
13:14	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l) Var ev. ikke bra fordi forsterkeren ikke var justert	
	Justerer offset ved forsterkeren	
13:17	Ny saltmåling med Agilent på 100Hz	
13:20	Agilent på igjen med 10 Hz	
13:25	Tegnet vannlinje på glasset	
13:25	Bilderunde	
13:27	Vann av	
13:28	Stopper video	
13:31	Stopper Agilent	

Ok	Antall steiner i renna:1 plastringssteiner, 1 liten filterstein	
Ok	Laster ned video fra lillevideo	
Ok	Måler inn steiner	
13:45	Laserscanning	
Ok	Bilderunde	
14:05	Agilent på med 10 Hz	
Ok	Starter videokamera	
14:06	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 250 l/s)	
14:10	Øker til 75 l/s	
14:12	Øker til 100 l/s	
14:14	Øker til 125 l/s	
14:16	Øker til 150 l/s	
14:18	Øker til 175 l/s	
14:20	Øker til 200 l/s	
14:22	Øker til 225 l/s	
14:25	Øker til 250 l/s	
14:27	Starter på 1 time	
14:33	Priska observerte stein i renna ved vinduet.	
14:37	Vannføring økte til 260 l/s vi justerer ned til 250 L7s vannføringen er ev. påvirket fordi flere bruker systemet Henrik kjører fortsatt forsøk. Han bruker opp til 35 l/s	
14:50	Vannføringen var nede i 245 l/s, vi justerer opp til 250 l/s.	
14:56	Fredrikke observerte en til stein i renna ved vinduet.	
15:15	Agilent stopp	
15:16	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l)	
15:17	Agilent på igjen med 10 Hz	
15:17	Tegnet vannlinje på glasset	
Ok	Bilderunde	
15:27	Vann av	
ok	Stopper video	
15:30	Henrik er ferdig for dagen	
15:31	Stopper Agilent	
Ok	Antall steiner i renna:2 plastringssteiner, 0 liten filterstein	
Ok	Måler inn steiner	
15:40	Laserscanning	
Ok	Bilderunde	
15:59	Agilent på med 10 Hz	
16:00	Starter videokamera (byttet batteri på store video)	
16:02	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 300 l/s)	
	Det ser litt ut at overtopping starter bittelitt tidligere på viduside. Det er også der det ble dratt ut flest steiner.	
16:06	Øker til 75 l/s	
16:08	Øker til 100 l/s	
16:10	Øker til 125 l/s	
16:12	Øker til 150 l/s	
16:14	Øker til 175 l/s	
16:16	Øker til 200 l/s	
16:18	Øker til 225 l/s	
16:20	Øker til 250 l/s	
16:22	Øker til 275 l/s	
16:24	Øker til 300 l/s	
16:26	Starter på 60 min	

16:29	Stein nært vinduet ved 1500 rister (Fredrikke).	
17:09	En stein like oppstrøms knekken rister	
17:14	Justerte offset ved forsterkeren	
17:14	Agilent stopp	
17:15	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l)	
17:16	Agilent på igjen med 10 Hz	
17:16	Tegnet vannlinje på glasset	
Ok	Bilderunde	
17:26	Vann av	
17:28	Stopper video	
17:28	Stopper Agilent	
Ok	Antall steiner i renna: 0 plastringssteiner, 0 liten filterstein	
Ok	Måler inn steiner	
ok	Lastet ned video fra lillevideo og slettet	
17:40	Startet lille blåe pumpe (100 l/s)	
17:37	Laserscanning	
Ok	Bilderunde	
	Agilent på med 10 Hz	
ok	Skrive på skilt	
17:47	Starter videokamera	
17:49	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 350 l/s); 0 l/s på rødt, 50 l/s på blått	
16:52	Øker til 75 l/s (0 l/s rødt, 75 l/s blått)	
16:54	Øker til 100 l/s (0 l/s rødt, 100 l/s blått)	
17:56	Øker til 125 l/s (25 l/s rødt, 100 l/s blått)	
17:58	Øker til 150 l/s (50 l/s rødt, 100 l/s blått)	
18:00	Øker til 175 l/s (75 l/s rødt, 100 l/s blått)	
18:02	Øker til 200 l/s (100 l/s rødt, 100 l/s blått)	
18:04	Øker til 225 l/s (125 l/s rødt, 100 l/s blått)	
18:06	Øker til 250 l/s (150 l/s rødt, 100 l/s blått)	
18:08	Øker til 275 l/s (175 l/s rødt, 100 l/s blått)	
18:10	Øker til 300 l/s (200 l/s rødt, 100 l/s blått)	
18:12	Øker til 325 l/s (225 l/s rødt, 100 l/s blått)	
18:14	Øker til 350 l/s (250 l/s rødt, 100 l/s blått)	
18:16	Starter på 60 min	
18:52	Priska hørte noe, men er usikker om det var plastringen	
19:03	Stopper Agilent	
19:03	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l)	
19:05	Agilent på igjen med 10 Hz	
19:05	Tegner vannlinje på glasset	
Ok	Bilderunde	
19:16	Vann av	
ok	Stopper video	
19:19	Stopper Agilent	
Ok	Antall steiner i renna:0 plastringssteiner, 0 liten filterstein	
Ok	Måler inn steiner	
Ok	Laserscanning	
Ok	Bilderunde	
19:36	Agilent på med 10 Hz	
Ok	Skrive på skilt	
19:36	Starter videokamera	
19:38	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 400 l/s); 0 l/s på rødt, 50 l/s	

	på blått OBS følg med boksen slik at den ikke overtoppes	
19:40	Øker til 75 l/s (0 l/s rødt, 75 l/s blått)	
19:42	Øker til 100 l/s (0 l/s rødt, 100 l/s blått)	
19:43	Store videokamera var ikke på likevel (rart) vi bytter batteri og starter det på nytt	
19:44	Øker til 125 l/s (25 l/s rødt, 100 l/s blått)	
19:46	Øker til 150 l/s (50 l/s rødt, 100 l/s blått)	
19:49	Øker til 175 l/s (75 l/s rødt, 100 l/s blått)	
19:51	Øker til 200 l/s (100 l/s rødt, 100 l/s blått)	
19:53	Øker til 225 l/s (125 l/s rødt, 100 l/s blått)	
19:54	Noen steiner begynner å riste	
19:55	Øker til 250 l/s (150 l/s rødt, 100 l/s blått)	
19:57	Øker til 275 l/s (175 l/s rødt, 100 l/s blått)	
19:59	Øker til 300 l/s (200 l/s rødt, 100 l/s blått)	
20:01	Øker til 325 l/s (225 l/s rødt, 100 l/s blått)	
20:03	Øker til 350 l/s (250 l/s rødt, 100 l/s blått)	
Ok	OBS følg med boksen	
20:05	Øker til 360 l/s (260 l/s rødt, 100 l/s blått)	
20:07	Øker til 370 l/s (270 l/s rødt, 100 l/s blått)	
20:09	Øker til 380 l/s (280 l/s rødt, 100 l/s blått)	
20:11	Øker til 390 l/s (290 l/s rødt, 100 l/s blått)	
20:13	Øker til 400 l/s (300 l/s rødt, 100 l/s blått)	
ok	OBS følg med boksen! Noe lekkasjer gjennom småhull, tettet eller satt bøtte under.	
20:15	400 l/s, Starter på 60 min	
20:20	Dirring i en filterstein under en plastringsstein som dirrer (den ved ca 1500)	
20:23	Dirring i svart plastringsstein litt lenger oppstrøms og mot vegg for øverste gule målestein	
20:24	Stein i renna	
20:27	Dirring i plastringsstein litt mot vinduet for gul målestein i knekken.	
20:30	Tok opp stigen fordi vannet begynte å dra den med seg	
	Vi tettet boksen litt og lagde hevert for å få vann tilbake i boksen som la i kanten	
20:36	Lysset i hallen gikk, vannføringen er konstant (400l/s). Arbeidslamper lyser fremdeles opp renna.	
20:44	Tre++ stein ved 900 er på tur opp, ingen synlig bevegelse. Bilde.	
20:44	Vannlinje tegnes på glasset	
20:50	Bilderunde (inkl. hjelpekonstruksjoner)	
20:55	Stein i renna	
21:04	Stopper Agilent	
21:05	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l)	
21:06	Agilent på igjen med 10 Hz	
21:10	Diskutere videre prosedyre, iom nådd maks kapasitet for renna, og det er sent på kveld.	
21:16	Tegner vannlinje på glasset som 20:44	
Ok	Bilderunde	
21:18	Vann av	
21:18	Pumper av	

21:20	Bypass åpen	
ok	Stopper video	
21:21	Stopper Agilent	
ok	Antall steiner i renna:2 plastringssteiner, x liten filterstein	
Ok	Måler inn steiner (referansepunkte ble målt, da boksen allerede var ganske tom)	
Ok	Laserscanning	
ok	Bilderunde	
	OBS: Mateo må få videoen sin som ble laget litt før kl. 16	
	All data kopieres til ekstern harddisk	
	Batterier settes til lading	
	Ekstra kopi til EHPs harddisk og PHHs stor harddisk	
	<b>29.04.2015 – dag 2 av 6</b>	
10:38	Skrur på pumper	
Ok	Klokke på video er ok	
Ok	Bilderunde	
Ok	Innmåling av steiner	
Ok	Laserscanning	
Ok	Lukket bypass	
Ok	Oppdatert plakater	
10:42	Starter Agilent med 10 Hz	
10:44	Starter videokamera	
10:46	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 400 l/s); 0 l/s på rødt, 50 l/s på blått OBS følg med boksen slik at den ikke overtoppes	
10:53	Øker til 75 l/s (0 l/s rødt, 75 l/s blått)	
10:55	Øker til 100 l/s (0 l/s rødt, 100 l/s blått)	
10:57	Øker til 125 l/s (25 l/s rødt, 100 l/s blått)	
10:59	Øker til 150 l/s (50 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:01	Øker til 175 l/s (75 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:03	Øker til 200 l/s (100 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:05	Øker til 225 l/s (125 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:07	Øker til 250 l/s (150 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:09	Øker til 275 l/s (175 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:11	Øker til 300 l/s (200 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:13	Øker til 325 l/s (225 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:15	Øker til 350 l/s (250 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:17	Øker til 375 l/s (275 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:19	Øker til 400 l/s (300 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:35	Skrur ned til 350 l/s (250 l/s rødt, 100 l/s blått)	
11:40	Matteo trenger store kameraet, så vi lar han låne det siden det ikke ser ut som plastringen går til brudd med det første. Fortsetter å filme med Jens sin mobiltelefon for sikkerhetsskyld	
12:01	Avbrudd i mobilvideoen. Starter opp igjen.	
12:11	Får tilbake kameraet fra Matteo. Starter store kamera igjen.	
12:14	Ser 5 steiner i renna.	
12:15	Stopper Agilent	
12:15	Saltmåling med Agilent på 100 Hz (ca. 30 g i ca. 0.4 l)	
12:17	Agilent på igjen med 10 Hz	

12:58	Justerer slik at vi nå kjører 50 l/s på blått og 300 l/s på rødt. Ushant bruker også det blå systemet nå.	
15:00	Byttet batteri på store kamera	
15:02	Byttet minnekort på lille kamera	
15:56	Skrur av vann	
15:58	Slår av kamera	
16:00	Stopper Agilent	
Ok	Innmåling av stein	
Ok	Overføring av video	
Ok	Oveføring av laser og agilent-filer	
Ok	Bilderunde	
Ok	Totalt 9 steiner i renna	

30.04.2015 – dag 3 av 6

ok	Klokke på video er Mobilklokke går 5 sec etter Storevideo går 1 sec etter Lillevideo går 2 sec etter	
9:41	Bilderunde	
9:20	Innmåling av steiner Referansepunktet ble målt inn en gang ved tom boks og en gang ve full boks	
9:35	Laserscanning	
9:24	Lukket bypass	
ok	Oppdatert plakater	
9:44	Pumper på; begge rød, og lille blå (Ushanth bruker også blå)	
9:44	Starter Agilent med 10 Hz	
9:46	Fyller boksen, men ser at det ikke blir vann gjennom filter; stopper vanntilførsel	
	Målte inn ref. punktet på nytt med full boks bak modellen	
9:54	Starter videokamera	
9:56	Vann på igjen, 50 l/s (målet er 350 l/s); 0 l/s på rødt, 50 l/s på blått OBS følg med boksen slik at den ikke overtoppes	
9:58	Overtopping starter	
10:00	Øker vannføring til 350 l/s (50 på blått, 300 på rødt)	
10:06	1 stein i renna observert gjennom vinduet	
10:12	En stein i krona vingler litt	
10:17	Steinene ved ca 900 mm har løftet seg mer enn tidligere.	bilde
13:21	Bilderunde	
13:21	Slår av vannet	
Ok	1 stein i renna.	
13:22	Stopper Agilent	
	Stopper videokamera	
13:25	Måler inn steiner	
13:33	Batteri på lasermåler tom	
13:38	Batteri byttet	
13:40	Sjekker at laseren blir	
14:26	Starter Agilent og videokamera	
14:28	Vann på igjen. Bypass ble åpnet etter innmåling slik at vannstanden sank. Vannstanden ble deretter skrudd opp til 400 l/s så fort som mulig. 400 l/s ved overtopping av dammen.	
14:37	Eirik synes han høre noe som slår i glasset. Kan det ha vært	



	en stein?	
14:40	Vann av	
14:42	Agilent og video stoppet	
Ok	Overføring av data	
Ok	1 stein i renna	

06.05.2015 – dag 4 av 6

	<b>PHH kjører forsøket, WZ hjelper ved innmåling av steiner</b>	
Ok	Klokker på video er	
ok	Speilrefleksklokke ok, bilde	
ok	Mobilklokke går 1 sec etter	
ok	Storevideo, bilde	
ok	Lillevideo, bilde	
10:30	Lyset over den halledelen med blå renna er av	
ok	Bilderunde	
10:30	Innmåling av steiner ved tom boks	
10:38	Laserscanning	
11:00	Lukket bypass	
ok	Oppdatert plakater	
11:17	Pumper på; begge rød, og lille blå (Ushanth bruker også blå)	
11:17	Starter Agilent med 10 Hz	
Ok	Starter videokamera	
11:20	Vann på, rett til 350 l/s (målet er å kjøre direkte til 350 l/s over den tørre plastringen); 300 l/s på rødt, 50 l/s på blått	
	OBS følg med boksen slik at den ikke overtoppes	
	Var trøbbel med å få luft ut av bypasset, åpnet den kort for å slippe ut luft	
11:32	Vet ikke når det skjedde, men steinene ved 1000 har sluppet en ned	bilde
	Flere steiner rister, noen ristet sterkere under roppkjøringen	
11:35	Vannføring ferdig justert	
	To steiner ved 700 (stolpen) er nok på vei ut etter hvert	
11:40	Så på når de to steinene gikk. Den ene tok jeg bilde med mobilen. Han slo ut en annen og ble selv stabil	Mobilvideo PHH
11:49	Slettet bilder på speilrefleks til og med 28. april, fordi den var full	
11:51	En stein ligger nå på en måte opp på, altså fortsettelse av beskrivelsen over	
12:50	Plastringen ser fortsatt ok ut. Steinen som ligger opp på er fortsatt der.	
13:00	Justerer pumpene slik at det blir fortsatt 350 l/s totalt men 100 l/s fra blått og 250 l/s fra rødt, slik at Henrik også kan kjøre forsøk. Ushanth er ferdig for dagen.	
13:07	Ferdig med å justere vannføring	
14:40	Store video var ikke lengre på (vet ikke hvorfor, batteri var ikke tom og det var fortsatt memory). Byttet batteri og video er på igjen.	
	Ellers ser ting ok ut (måleutstyr).	
	Det virker som om det mangler noen steiner i krona (ved knekkpunktet), men det kan også være at forskyvingene har blitt så store at det virker slikt.	bilder
15:16	Vann av	
15:21	Kamera av	

15:21	Pumper av, bypass åpen	
15:22	Agilent stopp	
15:50	Innmåling av steiner (Wiebke hjelper)	
16:10	Hentet 3 plastringstein fra renna	
ok	Bilderunde	
16:00	Laserscann	
ok	Overføring av data	

08.05.2015 – dag 5 av 6

	<b>PHH kjører forsøk, JJ hjelper ved innmåling av steiner</b>	
Ok	Klokker på video er	
Ok	Speilrefleksklokke ok, bilde	
Ok	Mobilklokke går 4 sec før	
Ok	Storevideo 2 sec etter, bilde	
Ok	Lillevideo ok, bilde	
11:01	Bilderunde	
11:05	Innmåling av steiner ved tom boks	
11:12	Laserscanning	
11:12	Lukket bypass nesten (litt åpen for å slippe ut luft)	
11:00	Oppdatert plakater	
11:15	Pumper på; begge rød, og lille blå	
11:19	Starter Agilent med 10 Hz	
11:20	Starter videokamera	
11:21	Vann på, rett til 350 l/s (målet er å kjøre direkte til 350 l/s over den tørre plastringen); 250 l/s på rødt, 100 l/s på blått OBS følg med boksen slik at den ikke overtoppes	
11:23	Lukk bypasset helt Flere steiner rister noe	
11:26	Vannføring ferdig justert	
11:30	PHH observerte en liten forskyving (ca. 1 cm) av 3 steiner i krona ca i midten ca. 10 cm oppstrøm s knekkpunkt	
11:48	Oppdaget en stein ved foten helt ved vinduet som ligger ustabil oppå. Usikker om steinen er derfra eller kom fra lengre oppe og bare har lagt seg der.	
12:00	Går fra laben. Geir holder et øye med demningen	
13:30	Tilbake, en stein ligger i renna	
	Steinen ved 1000 ligger nå nesten helt opp på en annen	bilde
13:33	Bilderunde og sjekk av kamera. Alt ok.	
13:45	Går en tur til kontoret, Ushanth kan holde et øye med forsøket	
14:20	Store kamera hadde skrudd seg av da jeg kom tilbake. Det var fortsatt batteri og memory. Kamera på igjen.	
14:29	Vann av	
	Steinen som la opp på ved 1000 forsvant mens jeg stenget av vannet	
14:32	Kamera av Det store kameraet hadde slått seg av selv igjen (batteriet var nå plutselig tomt med det viste fortsatt 120 min med batteri før 10 min siden)	
14:36	Laster ned video fra store og lille kamera	
ok	bilderunde	
14:41	Agilent stopp	
14:50	Innmåling av steiner (Jens hjelper)	

14:56	Laserscann	
ok	Hentet 3 plastringsstein ut av renna (350 og to andre)	
Ok	Oppdater plakater	
15:08	Agilent på	
15:07	Video på	
15:09	Vann på (målet er 400 l/s, men kjører 10 min i 50 l/s skritt); 50 l/s (50 l/s på blått, 0 på rødt)	
15:10	Overtopping starter	
15:15	En stein i krona like oppstrøms knekkpunktet vingler. Ellers er det vanskelig å se noe fordi det er mest hvit vann.	
15:20	Øker til 100 l/s (100 l/s på blått, 0 på rødt), tok bilde med speilrefleks like før økningen	
15:29	Slå på lampe over renna som ble slukket under innmåling av steiner	
15:30	Øker til 150 l/s (100 l/s på blått, 50 på rødt), tok bilde med speilrefleks like før økningen	
15:40	Øker til 200 l/s (100 l/s på blått, 100 på rødt)	
15:43	Ganske løs stein ved 800 (like oppstrøms der det forsvant to steiner tidligere en gang)	bilde
15:47	Observerte en stein i krona som rister som jeg ikke har observert ristende før	
15:50	Øker til 250 l/s (100 l/s på blått, 150 på rødt), tok bilde med speilrefleks like før økningen	
15:51	Steinene som ristet før rister nå enda mer	
15:53	Justerte vannføringen til ca. 150 l/s, den var ca. 153 l/s	
16:00	Øker til 300 l/s (100 l/s på blått, 200 på rødt), tok bilde med speilrefleks like før økningen	
16:03	Steinene som ristet før, rister fortsatt	
16:10	Øker til 350 l/s (100 l/s på blått, 250 på rødt), tok bilde med speilrefleks like før økningen	
16:13	Noen steiner rister litt mer enn før andre mindre	
16:20	Øker til 400 l/s (100 l/s på blått, 300 på rødt), tok bilde med speilrefleks like før økningen OBS følg med boksen	
16:23	Steinene rister fortsatt, tok bilde fra sida med speilrefleks	
16:33	En stein gikk fra krona. Det var ikke en som jeg observerte ristende. En stein som før la i ro i krona begynner å riste litt (bilde)	
16:38	Aktiverte hevert i boksen for å få vann tilbake dit	
16:42	Observerer en stein like nedstrøms knekkpunktet, ca. 2 stein oppstrøms Smartstone 200 som rister (ikke observert ristende før)	
16:56	Steinene rister nå mindre	
17:01	En til stein observert i renna (en var der fra før som ble observert ut 16:33)	
17:17	Steinen ved 800 har stabilisert seg. En stein har lagt seg på bakfra.	
17:40	Det så ut som om en stein beveget seg en del opp og ned, men bare en gang. Usikker om det var lys og skygge eller virkelig bevegelse.	
18:20	Skrur av vannet	
18:22	Pumper av	
ok	Video stopp	

18:35	Innmåling av steiner	
18:41	Agilent stopp	
ok	Laster ned data fra store og lille video	
ok	Bilderunde	
ok	Laster ned data fra speilrefleks	
18:52	Åpnet bypass	
ok	Lastet over laser data og agilent	

12.05.2015 – dag 6 av 6

	<b>PHH kjører forsøket, JJ hjelper ved innmåling av steiner</b>	
ok	Klokker på video er ok Speilrefleksklokke ok, bilde Mobilklokke ok Storevideo 2 sec etter, bilde Lillevideo ok, bilde	
ok	Bilderunde	
9:50	Innmåling av steiner ved tom boks, EHP hjelper med å måle inn	
9:55	Laserscanning	
9:30	Lukket bypass nesten (litt åpen for å slippe ut luft)	
9:31	Oppdatert plakater	
9:58	Pumper på; begge rød, og lille blå	
10:00	Starter Agilent med 10 Hz	
10:00	Starter videokamera	
10:01	Vann på, rett til 350 l/s (målet er å kjøre direkte til 350 l/s over den tørre plastringen); 250 l/s på rødt, 100 l/s på blått OBS følg med boksen slik at den ikke overtoppes	
	Stein ved 1000 forsvant Stein som la ved foten ved vinduet forsvant ved oppkjøring	
10:04	Lukk bypasset helt	
	Tok bilde med speilrefleks ved 1000	bilde
10:09	Vannføring ferdig justert	
10:12	Vannlinjen over krona har forandret seg noe sammenlignet med tidligere. Vannstand oppstrøms er fortsatt ca. likt, men knekken er ikke lengre så tydelig	
10:18	Tilpasset skilt	
10:19	Øker vannføringen til 400 l/s (300 på rødt og 100 på blått)	
10:24	Vannføring ferdig justert	
10:24	Også nå er vannlinjen lavere mot knekkpunktet, det betyr at hastigheten der er høyere enn før.	
10:24	Start på en time	
10:28	Sjekket nå renna og det ligger tre steiner ganske langt nede. De ble sannsynligvis vasket ut under oppkjøringen	
10:41	Nå ble en stein i krona veldig ustabil, den var en gang tidligere ustabil	bilde
10:46	Da gikk steinen, bilde før og etter ovenfra	
	Flere steiner i krona beveger seg (noen har ristet allerede før før)	
10:52	Telte nå 6 steiner i renna	
11:15	Stein gikk ved 800	Bilde etter
	Ser ut som om det også forsvant en stein ved 1000 (den som la oppå)	
11:19	Observerer nå også steiner som rister som ikke har ristet før (ulike steder i plastringen)	

11:20	En stein gikk fra knekkpunktet	
11:21	bilderunde	
11:26	Vann av	
11:30	Video av	
11:33	Agilent stopp	
11:45	Innmåling av steiner (jens hjelper, full boks)	
11:50	Laserscann	
12:00	Hentet 12 plastringssteiner ut av renna	
12:00	Bilderunde	
12:09	Agilent på	
12:10	Video på	
12:12	Vann på (målet er 400 l/s) starter med rett til 350 l/s (100 blått, 250 rødt) justeres opp etter 10 min	
12:14	Vannføring justert ferdig	
12:16	Ser 4 steiner i renna	
12:18	Bilderunde	
12:24	Øker vannføringen til 400 l/s (100 på blått, 300 på rødt)	
12:26	Litt bevegelser i krona	
	Vannføring ferdig justert	
	Neon ekstra bilder	
12:37	Brudd	
12:38	Vann av	
12:40	Video av Åpnet bypass Pumper av	
12:44	Agilent stopp	
14:00	Kopiert over til rød harddisk: Lillevideo, Storevideo, Speilrefleks, Logg og Excelfil Laserdata	

#### F.4 Innmåling av markørsteiner

Referansepunkt			
q	X	Y	Z
0	2166	469	-16
100	2168	469	-12
200	2169	469	-14
250	2168	469	-12
300	2167	468	-12
350	2168	469	-12
400	2167	468	-14
400	2167	469	-16
350	2167	468	-13
350	2167	468	-16
350	2168	471	-12
400	2169	471	-13
400	2168	472	-16
350	2166	471	-14
350	2167	470	-15
350	2170	471	-14
400	2167	472	-12
400	2167	470	-15
350	2168	470	-12

MS1800			
q	X	Y	Z
0	1773	465	158
100	1775	464	163
200	1776	464	163
250	1776	463	163
300	1777	464	164
350	1776	463	164
400	1776	464	163
400	1776	465	160
350	1777	464	163
350	1776	464	160
350	1778	462	164
400	1778	466	164
400	1776	467	160
350	1778	466	160
350	1777	466	159
350	1778	465	164
400	1778	465	164
400	1777	466	161
350	1777	465	163

MS1400			
q	X	Y	Z
0	1365	456	155
100	1370	455	163
200	1373	457	167
250	1375	457	166
300	1375	456	168
350	1377	455	169
400	1376	456	168
400	1376	455	165
350	1378	455	167
350	1378	454	165
350	1380	454	170
400	1380	456	170
400	1378	456	167
350	1380	456	167
350	1381	455	167
350	1383	455	172
400	1384	455	172
400	1383	454	168
350	1385	454	172

MS1000			
q	X	Y	Z
0	988	479	164
100	998	481	176
200	1007	482	179
250	1010	483	179
300	1013	482	181
350	1016	482	181
400	1017	483	179
400	1016	482	175
350	1021	482	178
350	1022	482	176
350	1025	484	182
400	1027	487	181
400	1026	487	174
350	1031	488	175
350	1030	487	176
350	1034	488	181
400	1035	488	182
400	1035	488	174
350	1040	489	184

MS200			
q	X	Y	Z
0	193	536	173
100	207	538	179
200	221	540	184
250	225	540	185
300	231	542	187
350	236	542	189
400	239	542	188
400	239	542	187
350	250	544	189
350	251	543	189
350	257	547	191
400	262	547	191
400	263	548	190
350	270	548	191
350	270	547	191
350	278	547	196
400	281	549	197
400	282	548	196
350	291	548	201

MS-200			
q	X	Y	Z
0	-210	470	161
100	-206	471	160
200	-198	468	158
250	-198	468	157
300	-196	467	159
350	-194	467	157
400	-192	467	157
400	-192	467	157
350	-187	464	155
350	-187	465	156
350	-184	463	153
400	-182	462	153
400	-182	462	152
350	-182	462	153
350	-182	462	153
350	-179	463	150
400	-179	462	150
400	-179	462	151
350	-178	462	151

MS600			
q	X	Y	Z
0	608	505	178
100	619	505	186
200	633	504	190
250	637	505	189
300	641	506	192
350	645	505	191
400	648	505	191
400	647	505	190
350	656	505	192
350	658	505	191
350	663	508	194
400	667	508	195
400	667	507	193
350	675	509	192
350	673	507	193
350	680	509	197
400	681	509	197
400	681	509	195
350	687	511	197

MS0			
q	X	Y	Z
0	-67	463	149
100	-53	465	152
200	-36	464	157
250	-31	465	158
300	-25	466	160
350	-20	466	161
400	-14	467	161
400	-15	467	161
350	-2	467	162
350	-2	468	162
350	4	469	163
400	11	469	164
400	10	469	163
350	20	469	163
350	19	468	163
350	29	469	164
400	31	470	164
400	32	469	164
350	41	467	164

## F.5 Bilder av forsøk 6

### Bilder normalt på plastringen



Figur F. 7 – Før belastning



Figur F. 8 - Etter  $q=200$  l/s/m



Figur F. 9 - Etter  $q=400$  l/s/m



Figur F. 10 – Etter 29.05.15



Figur F. 11 – Etter 30.04.15



Figur F. 12 – Etter 06.05.15



*Figur F. 13 – Etter 18.05.15*



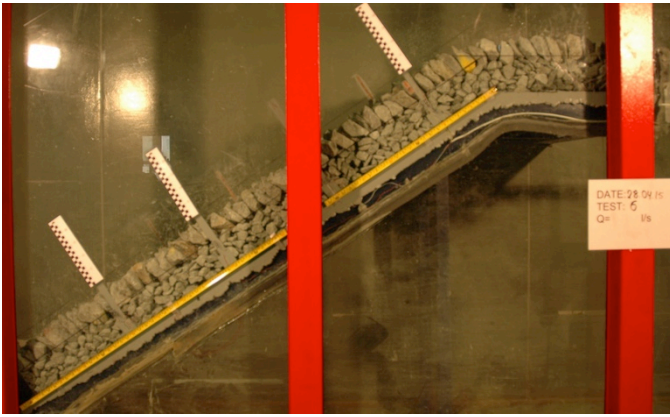
*Figur F. 14 – Siste bilde før brudd  
12.05.15*



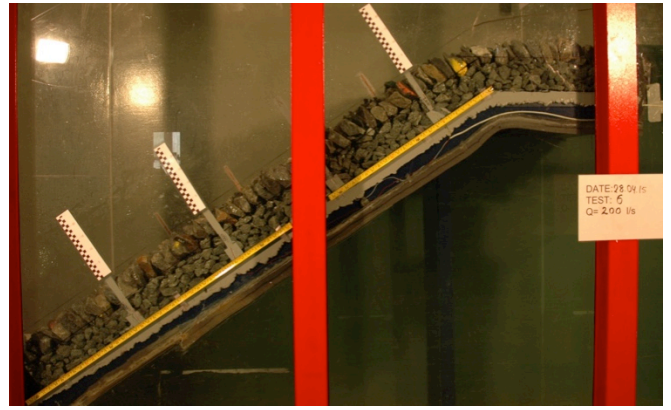
*Figur F. 15 – Etter globalt brudd ved  
 $q=400 \text{ l/s/m}$*



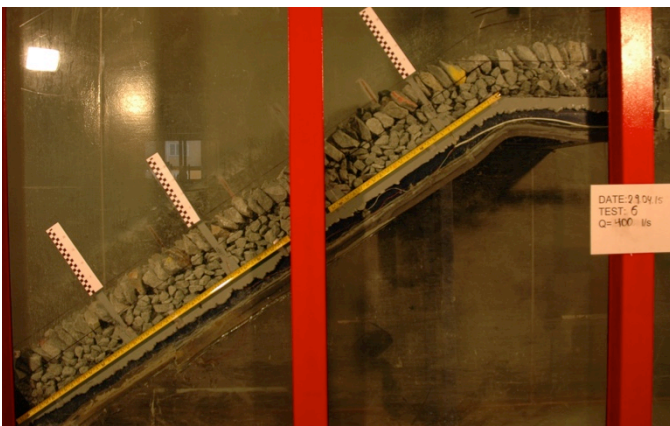
## Bilder fra siden



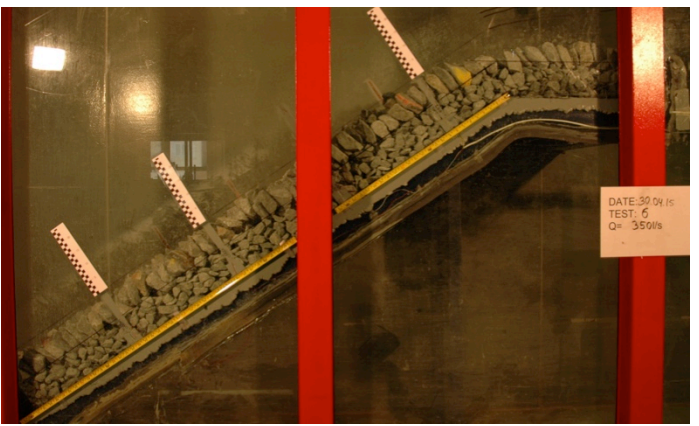
*Figur F. 16 – Før belastning*



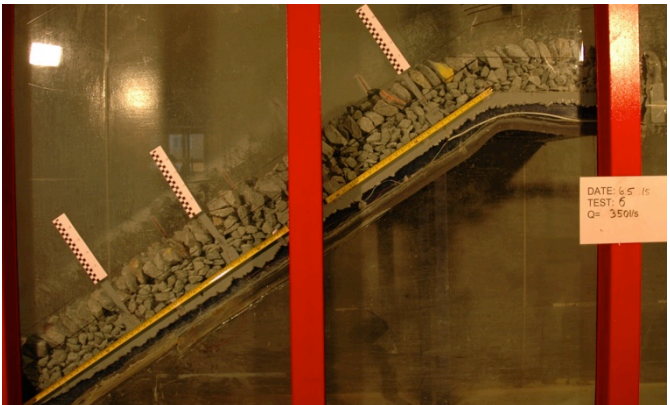
*Figur F. 17 – Etter  $q=200$  l/s/m*



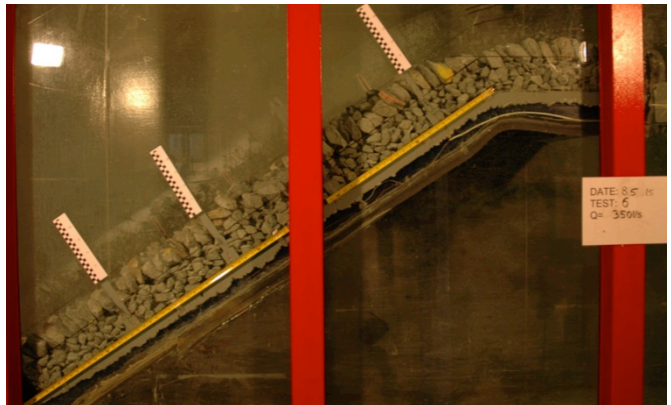
*Figur F. 18 - Etter  $q=400$  l/s/m , 28.04.15*



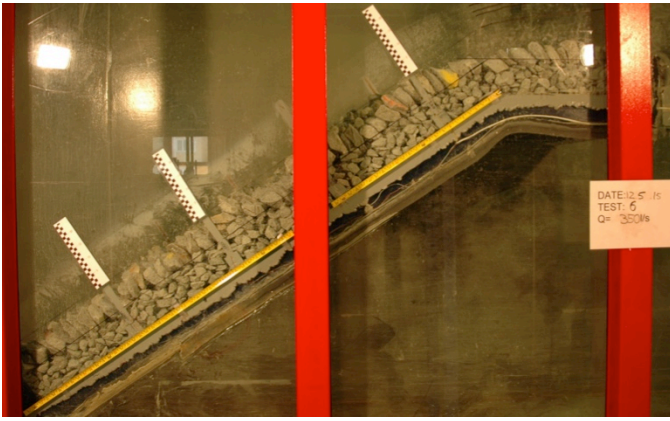
*Figur F. 19 – Etter 29.04.15*



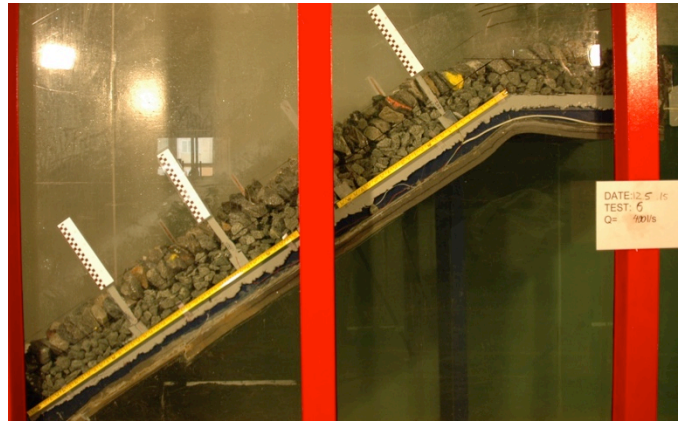
*Figur F. 20 - Etter  $q=30.05.15$*



*Figur F. 21 - Etter  $q=06.05.15$*



Figur F. 22 – Etter 08.05.15



Figur F. 23 – Like for globalt brudd, 12.05.15

## Krone og knekkpunkt



*Figur F. 24 – Før belastning*



*Figur F. 25 - Etter  $q=200 \text{ l/s/m}$*



*Figur F. 26 – Etter  $q=400 \text{ l/s/m}$ , 28.04.15*



*Figur F. 27 – Etter 29.04.15*



*Figur F. 28 – Etter 30.04.15*



*Figur F. 29 – Etter 06.05.15*



*Figur F. 30 – Etter 08.15.15*



*Figur F. 31 – Siste bilde for globalt brudd, 12.05.15*

## G. VEDLEGG - BEREGNINGSMETODER

Følgende inngangsparametere er blitt brukt for utarbeidelse av kurvene for de ulike beregningsmetodene:

*Tabell G. 1 – Inngangsparametere i beregningsmetoder*

Parameter	Verdi
$d_{50}$	57 mm
$d_{min}$	41 mm
S	0,667/66,7%
$\rho_s$	2709 kg/m <sup>3</sup>
t	$1,38 \cdot d_{50}$
$C_u$	1,16
SG	2,709

Tykkelsen t er regnet ut med tanke på at lengste akse a (91 mm) er steinhelning  $\alpha = 60^\circ$

Tykkelse av lag:  $91\text{mm} \cdot \sin(60) = 79\text{mm}$ .  $79\text{mm}/d_{50} = 79/57 = 1,38$

## H. VEDLEGG - STEINDATA

Stein nr.	a mm	b mm	c mm	Vekt g	Volum m3
1	97	60	27	256	0.094
2	90	58	42	298	0.11
3	85	49	49	286	0.104
4	85	50	38	187	0.069
5	93	47	44	235	0.088
6	94	61	41	292	0.108
7	112	57	46	389	0.143
8	100	69	40	263	0.098
9	92	61	30	208	0.077
10	92	50	49	203	0.077
101	94	60	48	271	0.1
102	91	50	32	190	0.069
103	81	66	55	272	0.102
104	86	42	38	123	0.046
105	82	58	33	145	0.054
106	107	51	34	219	0.08
107	95	52	41	249	0.09
108	89	68	26	192	0.071
109	94	56	45	282	0.103
110	84	70	42	259	0.096
201	86	38	37	131	0.049
202	106	59	55	466	0.168
203	81	64	30	191	0.071
204	85	74	46	238	0.09

205	75	48	31	113	0.042
206	99	54	44	177	0.066
207	92	48	43	201	0.073
208	93	54	46	231	0.085
209	95	53	31	238	0.088
210	97	50	46	271	0.101
301	87	38	35	96	0.036
302	84	54	32	195	0.071
303	101	58	39	198	0.073
304	87	47	28	155	0.056
305	84	58	37	229	0.085
306	82	53	31	138	0.052
307	90	37	35	127	0.048
308	99	47	30	159	0.058
309	94	58	40	241	0.087
310	90	59	35	224	0.082
401	93	54	35	166	0.061
402	86	51	34	205	0.076
403	97	55	41	234	0.085
404	85	58	34	155	0.058
405	94	70	41	256	0.094
406	102	63	29	205	0.077
407	90	60	27	159	0.059
408	113	67	37	301	0.11
409	80	52	24	127	0.046
410	93	44	33	153	0.056

Stone nr.	a m	b m	c m	Vekt g
10	92	50	49	203
11	78	45	31	125
12	96	60	44	265
13	95	40	33	271
14	73	44	38	164
15	88	55	34	161
16	96	50	33	205
17	96	51	45	264
18	92	39	34	128
19	95	54	45	271
20	103	63	46	284
21	74	64	49	184
22	98	48	43	244
23	94	66	40	243

24	85	37	36	121
25	96	46	42	203
26	91	35	27	126
27	90	50	43	261
28	81	46	37	164
29	86	45	36	148
30	84	67	46	256
31	83	69	37	297
32	93	54	31	162
33	103	44	41	178
34	88	62	32	228
35	92	54	39	177
36	83	45	28	139
37	78	51	38	146
38	80	40	32	92
39	97	47	33	204
40	81	46	32	119

41	83	49	30	158
42	78	61	33	147
43	80	62	31	162
44	79	60	44	193
45	92	56	47	231
46	87	44	33	164
47	92	58	35	200
48	82	57	28	181
49	89	63	63	380
50	90	41	29	145
51	100	68	33	221
52	83	58	50	177
53	104	47	38	208
54	102	54	29	218
55	94	61	34	183
56	88	50	48	249
57	96	49	33	172

58	85	60	37	231
59	82	52	24	118
60	84	57	35	190
61	93	62	36	203
62	80	63	40	166
63	91	47	31	164
64	94	57	38	196
65	96	58	40	253
66	104	52	46	297
67	113	60	57	321
68	75	48	36	108
69	82	65	53	271
70	97	39	38	239
71	97	57	45	229
72	83	54	33	175
73	90	60	43	242
74	96	62	41	263
75	90	45	45	216
76	104	57	37	179
77	95	46	44	237
78	98	62	62	282
79	95	62	26	149
80	96	50	55	366
81	89	55	37	187
82	99	50	28	172
83	80	58	42	197
84	89	62	46	327
85	87	55	29	209
86	87	54	37	213
87	93	51	36	186
88	80	36	31	181
89	92	48	28	141
90	87	53	52	290
91	82	49	42	217
92	85	59	26	152
93	82	60	55	250
94	98	68	42	254
95	84	47	36	150
96	96	60	27	188
97	82	48	44	176
98	94	65	46	291
99	100	86	37	254
100	97	62	30	149
111	98	47	30	162
112	96	45	36	250
113	88	46	32	170
114	96	49	31	206

115	81	47	43	198
116	94	48	42	242
117	83	59	37	301
118	104	55	38	238
119	95	67	55	390
120	98	66	39	258
121	91	30	30	111
122	95	63	50	275
123	94	60	30	285
124	95	53	38	244
125	104	55	52	237
126	92	43	31	107
127	92	53	44	294
128	82	54	52	203
129	89	55	42	210
130	90	53	39	211
131	98	57	33	192
132	87	58	31	133
133	79	60	43	192
134	100	62	36	203
135	78	65	39	201
136	97	52	42	278
137	97	59	38	178
138	97	42	35	178
139	102	52	31	185
140	94	46	41	226
141	95	68	47	316
142	96	52	47	227
143	99	44	35	226
144	88	47	41	205
145	98	55	53	291
146	84	43	40	139
147	102	43	35	222
148	93	52	36	214
149	83	46	44	172
150	92	53	37	213
151	87	47	38	181
152	96	59	48	318
153	89	45	35	183
154	85	48	45	183
155	88	47	37	173
156	97	46	36	173
157	102	52	34	204
158	100	51	38	190
159	96	44	38	167
160	91	62	38	186
161	109	60	47	352

162	99	60	39	245
163	102	55	48	349
164	83	53	32	159
165	99	45	37	156
166	100	47	45	253
167	92	46	44	159
168	98	54	36	161
169	90	60	47	186
170	96	59	25	192
171	91	54	34	176
172	97	44	37	144
173	95	51	38	157
174	89	62	33	186
175	83	58	40	180
176	87	64	39	258
177	79	66	48	311
178	91	41	35	130
179	96	49	28	120
180	96	50	35	225
181	101	54	38	280
182	88	40	31	151
183	90	46	45	229
184	76	37	35	166
185	85	53	26	157
186	88	62	32	160
187	91	43	31	136
188	97	46	42	215
189	96	53	38	227
190	99	42	38	184
191	89	52	41	207
192	96	38	32	170
193	85	60	47	305
194	96	47	31	150
195	99	58	47	361
196	87	31	30	126
197	76	56	31	135
198	87	44	33	164
199	91	46	45	227
200	97	63	30	155
211	96	58	33	267
212	91	55	45	269
213	97	54	29	186
214	80	60	42	201
215	81	65	25	129
216	99	52	34	207
217	96	61	35	202
218	87	63	42	211

219	82	56	38	182
220	91	55	45	263
221	93	46	45	187
222	94	54	30	146
223	97	55	31	220
224	115	71	45	353
225	89	57	40	300
226	90	38	31	122
227	86	47	27	135
228	85	63	39	220
229	98	45	36	192
230	98	56	51	316
231	91	65	51	261
232	81	40	39	181
233	88	45	31	123
234	82	48	38	194
235	97	58	29	180
236	87	49	41	176
237	99	50	43	209
238	104	59	34	171
239	86	56	39	219
240	89	43	41	170
241	101	50	46	274
242	87	62	29	158
243	81	53	38	187
244	85	49	46	191
245	100	50	44	248
246	99	63	26	198
247	97	45	45	181
248	92	61	44	203
249	71	56	41	207
250	89	70	31	254
251	87	51	40	263
252	90	52	32	151
253	82	54	39	280
254	89	69	50	246
255	88	48	45	164
256	85	46	42	224
257	98	50	29	175
258	101	56	42	274
259	91	52	31	145
260	93	52	31	186
261	88	51	31	204
262	96	54	33	214
263	99	48	47	255
264	96	52	32	197
265	79	50	49	169

266	92	49	30	185
267	86	47	34	179
268	99	49	35	220
269	96	33	31	127
270	86	54	31	190
271	94	52	49	210
272	92	40	33	118
273	86	55	32	179
274	86	57	43	246
275	95	57	29	152
276	76	58	34	243
277	91	57	43	169
278	93	38	38	167
279	96	56	41	297
280	100	49	44	248
281	94	57	38	212
282	91	56	46	296
283	90	54	30	141
284	90	43	41	202
285	86	40	38	158
286	77	45	30	157
287	79	50	40	168
288	83	55	34	162
289	97	59	35	145
290	101	62	50	395
291	96	50	34	176
292	89	42	39	147
293	93	56	45	249
294	86	48	28	194
295	101	57	29	235
296	79	57	26	178
297	105	58	25	151
298	80	53	39	230
299	91	38	32	117
300	93	61	47	283
311	84	41	36	101
312	85	47	44	209
313	88	59	49	346
314	95	32	31	143
315	82	38	39	113
316	102	57	42	275
317	85	33	30	136
318	85	50	22	158
319	84	37	31	149
320	83	44	29	110
321	87	54	39	178
322	85	66	35	231

323	89	57	38	169
324	97	60	35	189
325	97	52	38	315
326	97	58	30	193
327	82	44	33	148
328	99	56	39	199
329	85	59	39	188
330	98	61	44	334
331	99	63	41	303
332	85	58	50	196
333	92	51	37	170
334	94	71	48	242
335	92	62	29	206
336	91	56	31	158
337	85	47	32	141
338	86	51	34	175
339	98	60	53	235
340	97	44	30	167
341	87	74	45	273
342	77	53	45	209
343	98	57	43	264
344	94	48	38	213
345	101	40	35	191
346	94	66	34	191
347	83	42	30	183
348	80	58	50	191
349	102	55	53	258
350	79	50	42	186
351	78	35	33	115
352	83	64	34	158
353	95	53	47	253
354	92	46	33	131
355	91	49	47	239
356	86	50	39	152
357	93	52	32	166
358	105	58	49	250
359	85	45	29	131
360	95	50	28	163
361	90	54	34	197
362	89	56	53	203
363	97	47	33	195
364	90	36	25	68
365	88	63	31	207
366	82	44	32	125
367	85	48	37	143
368	102	46	33	161
369	97	39	32	136



370	89	47	43	223
371	98	46	32	231
372	86	54	48	293
373	88	52	29	146
374	83	58	33	128
375	86	63	35	177
376	98	60	38	291
377	84	55	32	144
378	94	60	42	307
379	98	44	35	171
380	88	49	43	231
381	80	32	26	126
382	100	64	39	287
383	95	49	37	211
384	102	44	28	208
385	95	62	36	234
386	95	40	32	108
387	108	40	38	171
388	98	46	38	143
389	80	58	32	138
390	96	68	63	293
391	94	60	41	270
392	83	54	22	108
393	98	43	39	155
394	101	49	47	185
395	89	35	31	115
396	115	70	30	258
397	91	54	30	156
398	97	59	41	281
399	91	68	34	166
400	102	65	38	253
411	104	64	41	302
412	88	47	45	158
413	82	35	33	149
414	78	61	41	238
415	87	51	33	166
416	92	61	52	359
417	99	59	30	207
418	83	36	31	112
419	82	53	52	267
420	95	54	36	186

421	92	50	33	142
422	76	55	26	122
423	89	55	47	298
424	96	48	28	159
425	83	58	40	184
426	74	59	37	166
427	97	49	35	120
428	87	51	28	155
429	75	61	40	162
430	83	45	39	195
431	85	39	26	94
432	92	58	40	291
433	94	57	30	248
434	103	54	31	163
435	98	50	30	186
436	96	53	40	198
437	106	69	44	330
438	89	50	32	152
439	92	56	37	240
440	88	42	40	153
441	91	60	42	297
442	69	57	27	106
443	98	46	29	152
444	99	64	56	298
445	80	46	38	140
446	87	60	44	236
447	95	49	42	325
448	91	62	39	199
449	96	47	46	236
450	82	50	34	135
451	93	55	28	214
452	97	53	49	232
453	88	49	43	271
454	97	59	34	277
455	105	58	42	360
456	83	46	32	159
457	87	55	31	153
458	99	61	39	280
459	84	43	40	210
460	100	55	36	259
461	99	58	31	219

462	82	45	36	146
463	90	47	33	198
464	82	42	34	175
465	91	61	37	203
466	82	58	33	169
467	93	43	36	184
468	97	59	41	316
469	89	67	32	218
470	86	55	32	172
471	93	34	30	128
472	99	61	40	250
473	83	56	30	128
474	91	52	38	135
475	82	44	25	98
476	101	48	26	154
477	82	48	45	210
478	87	45	36	197
479	99	46	33	166
480	102	37	28	163
481	76	43	40	146
482	91	44	40	161
483	106	54	49	291
484	93	50	36	201
485	86	46	30	136
486	97	54	36	203
487	75	57	40	141
488	96	67	48	222
489	96	55	52	303
490	90	40	39	205
491	84	61	35	256
492	92	41	39	179
493	85	49	43	174
494	89	43	36	148
495	101	48	45	186
496	80	56	31	193
497	95	62	38	43
498	84	60	28	177
499	91	53	33	252
500	87	54	32	149

## I. ELEKTRONISK VEDLEGG

Filnavn	Beskrivelse
150416_Lillevideo.ts	Globalt brudd, forsøk 2. Normalt på overflate
150421_Lillevideo.ts	Globalt brudd, forsøk 3. Normalt på overflate
150421_Storevideo.ts	Globalt brudd, forsøk 3. Krone fra siden
150424_Lillevideo.ts	Globalt brudd, forsøk 4. Normalt på overflate
150424_Storevideo.ts	Globalt brudd, forsøk 4. Krone fra siden
150426_Lillevideo.ts	Globalt brudd, forsøk 5. Normalt på overflate
150426_Storevideo.ts	Globalt brudd, forsøk 5. Krone fra siden
150512_Lillevideo.ts	Globalt brudd, forsøk 6. Normalt på overflate
150512_Storevideo.ts	Globalt brudd, forsøk 6. Fra siden