

Plastring av elvebunn med sterk strøm

Ragnhild Sørliæ Meaas

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Jochen Aberle, IVM

Medveileder: Priska Helene Hiller, IVM
Dr Aslak Løvoll, Norconsult AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGAVE

Student: Ragnhild Sørliæ Meaas

1. Tittel: Riprap design in Steep rivers

1 BACKGROUND

The increasing demand for energy in both industrial and developing countries and the increasing environmental awareness of the human society require the development of sustainable and renewable energy resources. A world-wide important renewable energy resource which is predominantly developed in mountainous areas is hydropower. However, the development of hydropower in geologically young areas such as the Andes and the Himalaya results in new challenges for hydraulic engineers as the corresponding morphology and flow conditions in steep streams are complex, sediment transport may be large during flood events, and the interplay between flow and sediment transport may result in the failure of hydropower structures due to erosion processes. It is therefore of importance to further develop technical solutions and criteria for the dimensioning of erosion protection measures such as riprap that can be used to protect streambeds against scouring in steep streams and/or in areas which are characterised by large hydrodynamic forces.

Although the design of riprap has been in the focus of research for a long time, there exist still many open questions with regard to its adequate design. In fact, there exist many different approaches for the design of riprap which result in significantly different required stone sizes for one and the same design discharge. One of the reasons for this variability is related to the inadequate description of the riprap which is, in most existing approaches, only described by a characteristic grain size assuming angular-shaped riprap material. Thus, these approaches do

not take into account the effect of the packing density as well as the shape of the riprap stones. Considering this aspect is of importance as high-quality, angular-shaped riprap materials are not conveniently available or economically feasible at all construction sites and few criteria are available to design riprap using non-angular shaped rock for erosion protection and/or stabilization applications.

2 TASKS

The objective of the present MSc-thesis is to identify and discuss the challenges which are associated with riprap design in areas with large hydrodynamic forces and in areas where supercritical flow prevails. Special attention should be given to the importance of riprap characteristics such as porosity, stone orientation, and stone shape.

In order to fulfil the objectives, the MSc-thesis should cover the following issues:

1. Literature review on the hydraulics of flow over riprap, the description of riprap characteristics, approaches for the dimensioning of riprap, and failure mechanisms focusing on erosion protection in steep streams or reaches with supercritical flow conditions
2. Discussion of the most important parameters governing riprap stability and identification of appropriate methods to parameterize their influence on riprap stability
3. Design of experiments to investigate the influence of the stone shape, orientation, and packing density (porosity) on riprap stability for different hydraulic conditions (steep riprap and riprap downstream of a gate)
4. Execution of experiments in a hydraulic flume in the NTNU-hydraulic laboratory
5. Comparison of the experimental data with existing stability approaches
6. Discussion of the results

Discussions with the supervisors will be used to refine details of the experimental setup and the experimental procedure. Dependent on availability, additional novel instrumentation may be provided to determine the stability of the riprap and the flow forces acting on individual riprap stones.

3 SUPERVISION AND DATA

Professor Jochen Aberle from NTNU will be main-supervisor of the project work. Co-supervisor will be Dr. Aslak Løvoll from Norconsult. Discussions and input from colleagues and other researchers at NTNU, NVE, SINTEF, etc. is recommended. Significant inputs from others shall, however, be referenced in an adequate manner.

The research and engineering work carried out by the candidate in connection with this thesis shall remain within an educational context.

Other contact persons available: Priska Hiller and Geir Tesaker, NTNU;

4 REPORT FORMAT AND REFERANCE STATEMENT

The MSc-thesis shall be typed by a word processor and figures, tables, photos etc. shall be of good report quality. The report shall include a summary of not more than 450 words that is suitable for electronic reporting, a table of content, lists of figures and tables, a list of literature and other relevant references and a signed statement where the candidate states that the presented work is his own and that significant outside input is identified and referred. The report shall have a professional structure, assuming professional senior engineers (not in teaching or research) as the main target group. The thesis should be submitted in pdf-form in DAIM and in the form of three hardcopies that should be sent to the supervisor/department via the printing shop. The thesis should not be delivered later than Tuesday, June 10, 2014.

Trondheim, 13. januar 2014

Jochen Aberle

Professor

Forord

Denne masteroppgaven med navn ”Plastring av elvebunn med sterk strøm” er utarbeidet av Ragnhild Sørлие Meaas våren 2014. Oppgaven er fortsettelsen på prosjektoppgaven med samme navn og utgjør det avsluttende arbeidet på Bygg- og miljøteknikkstudiet ved NTNU. Med denne oppgaven er en uforglemmelig studietid i Trondheim over.

Oppgaven har bestått av et litteraturstudium og laboratoriearbeid. Selv om laboratoriearbeidet har bydd på utfordringer og vært tidkrevende har det også vært gøy å være i labben i tillegg til at jeg har fått praktisk erfaring og god innsikt i tema plastrig. Det gode samholdet og arbeidsmiljøet på Verkstedloftet har bidratt til å holde motet oppe selv når lyset i tunnelen har vært langt unna.

Jeg vil takke Professor Jochen Aberle for inspirerende og god veiledning gjennom hele semesteret og for å ha delt sin brede kunnskap om plastring med meg. Videre vil jeg rette en stor takk til Priska Helene Hiller som har vært medveileder og en god diskusjonspartner som har vært til stor hjelp når jeg har stått fast i arbeidet. Jeg vil også takke Geir Tesaker for hjelp til smått og stort i forbindelse med arbeidet i labben.

Til sist vil jeg takke mine foreldre for korrekturlesning av oppgaven og andre gode innspill.

Ragnhild Sørлие Meaas



Trondheim 9.6.2014

Sammendrag

Utbygging av vannkraft i områder der geologien er ung, som i Andesfjellene og Himalaya, kan være utfordrende ettersom erosjonsprosesser kan føre til at konstruksjoner bryter sammen. Dette kan spesielt være et problem der overkritisk strømming er dominerende slik som i bratte elver og nedstrøms flomluker. Plastring er erosjonssikring det har blitt forsket mye på, men hvor det fremdeles gjenstår mange spørsmål.

I denne oppgaven har det blitt utført modellforsøk i en renne for å undersøke effekten av steinens form i plastring utsatt for overkritisk strømming. Plastringen legges på et horisontalt underlag, men en luke oppstrøms plastringen sørger for at overkritisk strømming kan oppnås. Steinformer som har blitt benyttet er kule, kube, cubipod, rundet og kantet stein i to størrelser. Det har også blitt gjort forsøk i en treboks for å måle egenskaper ved plastring som porøsitet, friksjonsvinkel og innlåsningvinkel med den hensikt å finne ut hvordan disse parameterne påvirker stabiliteten til plastringene.

Etablerte beregningsmetoder for dimensjonering av nødvendig steinstørrelse er empiriske og varierer i kompleksitet og bruksområde. Formlene tar liten hensyn til steinens form og innlåsningen som oppstår i en plastring. I tillegg gir metodene stor variasjon i tillatt hastighet. Analytiske formler benyttes svært lite fordi det er utfordrende å bestemme drag- og løftekoeffisientene som inngår i formlene. Formlene gir likevel nyttig informasjon om plastring, som for eksempel at steinens form har betydning for stabiliteten i tillegg til at riktig orientering av steinen kan føre til at den blir mindre utsatt for drag- og løftekrefter.

Modellforsøkene viste at egenskaper som var viktig for å oppnå god stabilitet var høy tetthet og høy innlåsningvinkel samt i noen grad høy friksjonsvinkel. Det var ikke mulig å påvise at lav porøsitet ga bedre stabilitet enn høy porøsitet. I modellforsøket ble det også studert hvordan plastringene oppførte seg ved brudd. Plastring med kube og cubipod hadde et progressivt bruddforløp, mens kantet og rundet stein hadde et klassisk bruddforløp.

Det ble funnet at kantet stein var mer gunstig enn rundet stein for å oppnå høye innlåsning- og friksjonsvinkler. Erfaring fra utleggelse av stein ga inntrykk av at innlåsningvinkelen ikke er et riktig mål på den innlåsningen som faktisk oppstår i en plastring. Forskjellen i kritisk hastighet mellom kantet og rundet stein ble observert til å være mindre enn i en rauset sikring. Grunnen antas å være at rundet stein kan oppnå høyere innlåsningvinkel i en plastring enn de kan i en rauset sikring.

Sammenligning av kritisk hastighet fra modellforsøkene med etablerte beregningsmetoder viste at hastigheten oppnådd i modellen var høyere enn det de etablerte beregningsmetodene tillot for samme steinstørrelse. Dette sannsynligvis fordi de etablerte beregningsmetodene ikke tar hensyn til innlåsning mellom stein. Denne forskjellen var spesielt høy for helninger over 40 %. Det mangler altså gode metoder for dimensjonering av nødvendig steinstørrelse i bratte elver.

Abstract

Development of hydropower in areas where the geology is young, such as in the Andes and the Himalaya can be challenging, as erosion processes can cause structures to fail. Areas that are particularly exposed are steep rivers and downstream floodgates, where supercritical flow is dominant. Riprap is erosion protection method that has been researched for a long time. However, there are still many open questions regarding the design.

In this thesis, model tests have been carried out in a flume to examine the effect of the stone shape in ripraps subjected to supercritical flow. The ripraps has been placed on a horizontal surface, while a gate upstream the riprap, ensures that supercritical flow is achieved. Stone shapes that have been used are sphere, cube, cubipod, rounded and angular stone in two sizes. Parameters like porosity, friction angle and interlocking angle was measured with the intention to find out how these parameters influenced the stability of the riprap.

Stone sizing relationships are empirical and vary in complexity and boundary conditions. These formulas give little attention to the stone shape and interlocking that occurs in a riprap. In addition, the formulas give a significant variation in permitted velocity over the riprap before failure. Analytical formulas exists, but are very little used because it is challenging to determine the drag- and lift coefficient included in the formulas. However, they provide useful information about riprap design. For instance they state that the stone shape is of importance to the stability of the riprap. In addition it is possible to understand that the correct orientation of the stone can cause it to become less prone to drag and lift forces.

The experiments showed that high density and interlocking angel and to some extent high friction angle were important to achieve good stability. Furthermore they showed that in some cases low porosity does not yield better stability than high porosity. During the model tests it was also studied how the riprap behaved when failure occurred. Riprap with cube and cubipod had a progressive failure development, while the angular and rounded stones had a classic failure mechanism.

It was also found that angular stones gave higher interlocking angles and friction angles than rounded stone. Experience from building the riprap gave the impression that interlocking angle might not give the correct value of the interlocking that actually occurs in a riprap. The difference in critical velocity between angular and rounded stones was observed to be less than in a dumped riprap. Probably because rounded stones can achieve higher interlocking in a riprap than what is possible in a dumped riprap.

Comparison of critical velocity from model tests with stone sizing relationships showed that the velocity achieved in the model were higher than the stone sizing relationships predicted for the same stone size. This might be because the stone sizing relationships do not take into account the interlocking between the stones. This difference was particularly high for the slopes over 40 %. The study therefore concludes that established stone sizing relationships cannot accurately predict a reliable stone size in steep rivers.

Innholdsfortegnelse

1. Innledning	2
2. Teori.....	4
2.1 Sikring med dekklag av stein.....	4
2.2 Strømningsforhold og erosjon	6
2.3 Analytisk beregningsmetode	8
2.3.1 Kraftlikevekt av enkeltstein	8
2.3.2 Stabilitet og bruddforløp av plastring.....	13
2.4 Etablerte beregningsmetoder	15
2.4.1 Raset sikring	15
2.4.2 Plastring.....	20
2.5 Parametere i en plastring	22
2.5.1 Steinens størrelse.....	22
2.5.2 Steinens vekt og tetthet	23
2.5.3 Steinens form.....	23
2.5.4 Steinens orientering.....	28
2.5.5 Porøsitet.....	29
2.5.6 Innlåsning og pakningsgrad	30
2.5.7 Korngradering	30
2.5.8 Friksjon.....	31
3. Metode	32
3.1 Forsøk A	32
3.1.1 Oppsett	33
3.1.2 Måleinstrumenter	36
3.1.3 Utførelse av plastringen	37
3.1.4 Registrering av brudd	38
3.2 Forsøk B	40
3.2.1 Oppsett	40
3.2.2 Måleinstrumenter og kalibrering	42
3.3 Utvelgelse av stein.....	44
4. Resultater	48
4.1 Forsøk A	48
4.1.1 Beskrivelse av bruddforløp	50
4.1.2 Stabilitetstall.....	55

4.1.3	Neddykket tetthet	56
4.1.4	Porøsitet.....	57
4.1.5	Tid	59
4.2	Forsøk B	60
5.	Diskusjon	64
5.1	Cubipod	64
5.2	Effekten av steinens form	66
5.3	Innlåsning	69
5.4	Friksjon.....	69
5.5	Porøsitet.....	71
5.6	Kritisk vannhastighet	73
5.6.1	Sammenligning med etablerte beregningsmetoder	73
5.6.2	Sammenligning med analytisk beregningsmetode	75
5.6.3	Sammenligning med hastighet over plastring	77
5.7	Variasjon i forsøk A	78
5.8	Usikkerheter og feilkilder	79
6.	Konklusjon og videre arbeid	82
7.	Litteraturliste.....	84
8.	Vedlegg	86

Figurliste

Figur 2-1 Plastring (t.v) og rauset sikring (t.h) (Lysne, 1965) referert i (Jenssen & Tesaker 2009).....	5
Figur 2-2 Shields diagram (Fergus et al. 2010).....	8
Figur 2-3 Krefter som virker på en stein i en elv	9
Figur 2-4 Dragkoeffisienter for ulike former (Fergus et al. 2010).....	11
Figur 2-5 Mulig bruddmekanismer for et plastringsdekke (Siebel 2007)	14
Figur 2-6 Tolags plastring (Lia et al. 2013)	21
Figur 2-7 Tetthet til bergarter (Jenssen & Tesaker 2009)	23
Figur 2-8 Steinens tre lengde akser (Bogfjellmo 2013)	24
Figur 2-9 Blokklighet (<i>The Rock manual: the use of rock in hydraulic engineering</i> 2007) referert i (Jenssen & Tesaker 2009)	25
Figur 2-10 Visuell vurdering av steinformer.....	27
Figur 2-11 Definisjon av steinens orientering (Lia et al. 2013)	28
Figur 2-12 Horisontal og vertikal orientering (Lia et al. 2013)	28
Figur 2-13 Definisjon friksjonsvinkel	31
Figur 3-1 Modelloppsett forsøk A, d-renna (Falkenberg 2013).....	33
Figur 3-2 Detaljer, luke	35
Figur 3-3 Eksempel på forsøk. Grå, små $Q=151,7$ l/s ved brudd.....	36
Figur 3-4 Registrering av vanddybde og vannføring ($h=8,5$ cm, grå små).....	39
Figur 3-5 Registrering av friksjonsvinkel	40
Figur 3-6 Oppsett, måling av porøsitet.....	41
Figur 3-7 Registrering av innlåsningsvinkel	41
Figur 3-8 Treboksen (rutene på papiret er i cm)	42
Figur 3-9 Kalibrering av forsøk B, Nullinje.....	43
Figur 3-10 Steinformer som benyttes i forsøk	44
Figur 3-11 Måling av steinens størrelse	45
Figur 3-12 Kornfordelingsdiagram	45
Figur 4-1 Forsøk grå, store ved brudd $v_{krit}=4,56$ m/s	50
Figur 4-2 Stein på vei opp fra sin posisjon.....	51
Figur 4-3 Plastring før forsøk (tv.) og etter (t.h) brudd, $v_{krit}=2,9$ m/s.....	51
Figur 4-4 Plastring etter brudd $v_{krit}=0,46$ m/s.....	52
Figur 4-5 Plastring etter brudd, $v_{krit}=2,0$ m/s.....	53
Figur 4-6 Utvikling av brudd (5 sek fra bilde 1 til 3) Brudd ved $v_{krit}=4,0$ m/s	54
Figur 4-7 Stabilitetstall oppnådd i d-renna.....	55
Figur 4-8 Neddykket tetthet mot gjennomsnittelig vannføring og kritisk vannhastighet ved brudd.....	56
Figur 4-9 Porøsitet ved formel 3-8 og stabilitetstall	58
Figur 4-10 Stabilitetstall og innlåsningsvinkel.....	60
Figur 4-11 Stabilitetstall og friksjonsvinkel.....	61
Figur 4-12 Total porøsitet, plastring i boks.....	62
Figur 5-1 Korrelasjonsdiagram	64
Figur 5-2 Forskjell mellom målt vannføring og vannføring gjennom luke	65

Figur 5-3 tv. Forsøk (17) avsluttet ved brudd. th. Forsøk (18) avsluttet etter 24 % økning i vannføring etter brudd.....	68
Figur 5-4 Friksjon mellom steiner.....	70
Figur 5-5 Kontaktflater for ulike steinformer.....	71
Figur 5-6 Kritisk hastighet ved forsøk mot hastigheter fra etablerte beregningsmetoder.....	74
Figur 5-7 Kritisk hastighet og hastighet over plastring.....	77
Figur 5-8 Variasjon i stabilitetstall (største verdi, gjennomsnitt og minste verdi).....	78
Figur 5-9 Avslutning av plastring for rundet stein.....	79

Tabell liste

Tabell 2-1 Formler for kritisk hastighet.....	12
Tabell 2-2 Beregningsmetoder, beskrivelse.....	16
Tabell 2-3 Beregningsmetoder, formler.....	18
Tabell 2-4 Formfaktorkrav (Falkenberg 2013).....	25
Tabell 2-5 Zingg's klassifisering av steinform (Dumitriu et al. 2011).....	26
Tabell 3-1 Dimensjonløse parametere.....	32
Tabell 3-2 Dimensjoner d-renna.....	34
Tabell 3-3 Måleutstyr forsøk A.....	36
Tabell 3-4 Beregnede verdier fra forsøk.....	39
Tabell 3-5 Måleinstrumenter forsøk B.....	42
Tabell 3-6 Egenskaper til steinformene.....	46
Tabell 4-1 Oversikt over utførte forsøk i d-renna.....	48
Tabell 4-2 Oversikt over målte verdier ved brudd.....	49
Tabell 4-3 Oversikt over beregnede verdier ved brudd.....	49
Tabell 4-4 Porøsitet forsøk A, beregnet ved formel 3-8.....	57
Tabell 4-5 Tid utførelse av plastring, d-renna.....	59
Tabell 4-6 Reduksjon i tid (min).....	59
Tabell 4-7 Innlåsningsvinkel.....	60
Tabell 4-8 Friksjonsvinkel.....	61
Tabell 5-1 Total porøsitet A og B (%) og årsak.....	72
Tabell 5-2 Input sammenligning.....	73
Tabell 5-3 Tillatt helning og definisjon av brudd for beregningsmetoder.....	74
Tabell 5-4 Hastigheter (m/s).....	76
Tabell 5-5 Sammenligning kube og kule.....	76

Symbolliste

Store latinske bokstaver

Symbol	Enhet	Forklaring
A	m^2	Flateareal (generell)
V	m^3	Volum (generell)
V_s	m^3	Volum stein
V_{tot}	m^3	Total volum
W_s	kg	Vekt av stein
W_w	kg	Vekt av vann
C_s	-	Shields tall
I	-	Helning energilinje
F_d	N	Dragkraft
F_l	N	Løftekraft
C_d	-	Dragkoeffisient
C_l	-	Løftekoeffisient
R	%	Rundhetsgrad
SG	-	Spesifikk tyngdetetthet stein
LT	-	Lengde- tykkelsesforhold
BLc	-	Blokklighet
N	stk	Antall stein
C_u	-	Graderingstall
F_f	N	Friksjonskraft
S	-	Bunnhelning
Y_m	m	Middels vanddybde
Q	m^3/s	Lukekapasitet
C	-	Lukekoeffisient
M	$m^{1/3}/s$	Manningstall
R_y	m	Hydraulisk radius
B	m	Bredde (generell)
L	m	Lengde (generell)
H	m	Høyde (generell)
T	m	Lengden på aksene til steinen normalt bunnen
D_{50}	m	Median steindiameter
C_i	-	Calleiux rundhetsgrad
K	-	Krumbeins faktor for rundhet
Fl_1	-	Flathetsfaktor 1
Fl_2	-	Flathetsfaktor 2
St	-	Stabilitetstall
F_{krit}	-	Froude tall, kritisk
F_p	-	Froude tall, over plastring
$W_{stein\ i\ vann}$	kg	Vekt av stien når den er neddykket i vann

Små latinske bokstaver

y	m	Vanddybde
t	m	Tykkelsen av plastring
h_f	m	Friksjonstap
r	m	Radius
q	m^2/s	Enhetsvannføring
v	m/s	Vannhastighet
d_x	m	x % av steinmassen kan gå gjennom en $d \times d$ mm åpning.
d	m	Diameter (generell)
g	$(9,81) m/s^2$	Tyngdeakselerasjon
k_1	-	Konstant bestemt av kornform
k_2	-	Konstant bestemt av kornform
n	-	Porøsitet
a	m	a-akse (steinens lengste akse)
b	m	b-akse (steinens midlere akse)
c	m	c-akse (steinens minste akse)
s	-	Stigningstall
h	m	Lukeåpning
b	m	Bredde på forsøksrenne (d-renna)
v_{krit}	m/s	Kritisk vannhastighet
v_p	m/s	Vannhastighet over plastring
y_1	m	Vannstand oppstrøms luke
y_2	m	Vannstand nedstrøms luke

Greske bokstaver

β	-	Faktor for luftinnblanding
Δy	Avhenger	Endring i y-retning
Δx	Avhenger	Endring i x-retning
ρ_w	$(1000) kg/m^3$	Tetthet vann
ρ_s	kg/m^3	Tetthet stein
γ_s	kN/m^3	Tyngdetetthet stein
γ_w	kN/m^3	Tyngdetetthet vann
φ	grader	Friksjonsvinkel
τ_0	N/m^2	Skjærspenning
$\dot{\eta}$	stk/m^2	Pakningsgrad
θ_m	m	Gjennomsnittelig ruhet
α	grader	Skråningshelning

1. Innledning

Større behov for energi i verden og en økende bevissthet rundt miljø krever at mer fornybare og bærekraftige energikilder tas i bruk. Vannkraft er en slik energikilde som i hovedsak utvikles i fjellområder. Utbygging av vannkraft i fjellområder der geologien er ung, slik som i Andesfjellene og Himalaya, kan være utfordrende ettersom erosjonsprosesser kan føre til at konstruksjoner bryter sammen. Dette er spesielt et problem der overkritisk strømming er dominerende, slik som i bratte elver og nedstrøms flomluker.

Plastring er erosjonsbeskyttelse der stein legges ut en etter en i et ordnet mønster og kan benyttes for sikring av blant annet bro Pilarer, landkar, diker, moloer og kulverter. I tillegg kan plastring beskytte mot erosjon nedstrøms demninger og i elver. Prinsippene for dimensjonering av plastring ved en molo vil ikke nødvendigvis kunne benyttes i en bratt elv fordi responsen fra vannpåkjenningen er ulik. I en bratt elv strømmer vannet raskt over steinene, mens ved en molo skyller vannet frem og tilbake. Derfor er det nødvendig med forskjellige kriterier for dimensjonering av plastring av elvebunn.

Det er allerede forsket mye på erosjonsbeskyttelse av elvebunn, men flertallet av dimensjoneringsmetodene gjelder for rauset sikring. Rauset sikring vil si at steiner dumpes i elva, og de får derfor en tilfeldig plassering. Det er en vanlig oppfatning at en plastring tåler mer enn en rauset sikring. Det er derfor ønskelig å få et større grunnlag for dimensjonering av plastring. Grunnen til at det mangler gode metoder for dimensjonering av plastring er at den er mangelfull beskrevet. Generelt er den beskrevet med karakteristisk steinstørrelse og antatt kantet steinform. Steiner med kantet form er ikke alltid tilgjengelig ved byggeplass og kan være dyre. Det er derfor ønskelig å kunne benytte andre steinforme, som for eksempel naturlig elvestein.

Formålet med denne oppgaven er å finne effekten av steinens form i plastring i bratte elver og andre steder der overkritisk strømming er dominerende. For å finne svar på problemstillingen, har det først blitt utført et litteraturstudium for å få en oversikt over tidligere beregningsmetoder, egenskaper til en plastring, bruddmekanismer og strømningsforhold over en plastring. Deretter har det blitt utført modellforsøk for å teste hvordan plastringer bygget med forskjellige steinforme oppfører seg når de blir utsatt for overkritisk strømming. Modellen som benyttes er en renne uten helning. Grunnen til at denne benyttes selv om formålet er å undersøke bratte elver, er at spørsmålet om effekten av steinens form ble aktuelt etter en masteroppgave der dette oppsettet ble benyttet. Det har også blitt undersøkt hvordan parametere som innlåsning, friksjon og porøsitet til de aktuelle steinformene påvirket stabiliteten til plastringen. Resultater fra modellforsøk sammenlignes til slutt med eksisterende beregningsgrunnlag.

2. Teori

I dette kapitlet defineres først plastring og rauset sikring. Deretter gis det en kort beskrivelse av strømningsforhold og erosjon i en bratt elv. Videre presenteres en analytisk tilnærming for å bestemme nødvendig steinstørrelse mot bevegelse samt etablerte beregningsmetoder. Til slutt i kapitlet gis det en oversikt over hvilke parametere som beskriver en plastring.

Dette kapitlet er bygget på alle kapitlene i (Meaas 2013). Noe av ordlyden vil til tider kunne komme til å være helt lik, men innholdet er videreutviklet og annet innhold er også inkludert.

2.1 Sikring med dekklag av stein

Et dekklag av stein er den vanligste fremgangsmåten for å beskytte mot erosjon i en elv. I denne oppgaven skilles det mellom plastring og rauset sikring. Plastring er hovedfokus i oppgaven, men rauset sikring er relevant fordi det er forsket mer på denne typen sikring. Figur 2-1 viser både en plastring og en rauset sikring.

Med plastring menes det at stein legges i et mønster i bunnen og sidene i en elv. Det er altså ikke tilfeldig hvordan steinene blir plassert. Steinene legges ut en etter en og det er viktig med god kontakt mellom steinene og liten åpning i fugene. Dette kan gjøres ved plassering i forband. Fordelen med en ordnet plastring er at man kan utnytte at steinene støtter hverandre. Det blir en låsekraft mellom steinene. Det er stor usikkerhet til hvor mye en ordnet plastring faktisk tåler. Det er for eksempel uvisst hvordan man skal ta hensyn til låsekraften under dimensjonering. Likevel er plastring mye brukt og den vanlige oppfatningen er at den er mer stabil enn rauset plastring (Jenssen & Tesaker 2009). Forskning gjort på Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet, NTNU, viser at erfaringen til personen som utfører plastringen har noe å si for stabiliteten til plastringen. Dette er imidlertid ikke kvantifisert enda. En erfaren plastrer er blant annet viktig for effektiviteten og kvaliteten til en plastring (Lia et al. 2013).

Med rauset sikring menes ett eller flere lag med dumpet steinmasse. Massen kan enten være ensgradert eller samfengt. Ettersom massen blir dumpet ut i elva, får steinene en tilfeldig plassering (Jenssen & Tesaker 2009). Dette gjør at man ikke får den samme låseeffekten mellom steinene som for en ordnet plastring selv om låsing likevel kan forekomme. Fordelen med en rauset sikring er at steiner kan dumpes i strømmende vann noe som ikke er mulig for en plastring. I tillegg vil det være mulig å utføre reparasjoner av sikringen dersom den består av flere lag og det kun er det øverste laget som er ødelagt (Falkenberg 2013). Rauset sikring vil være billigere og mindre tidkrevende å bygge enn en plastring.



Figur 2-1 Plastring (t.v) og raset sikring (t.h) (Lysne, 1965) referert i (Jenssen & Tesaker 2009)

For både plastring og raset sikring må det vurderes om det er behov for et filter mellom sikring og underlag. Med filter menes et overgangsmateriale mellom sikring og underlag. Hensikten med filteret er at finstoff fra underlaget ikke vaskes ut gjennom sikringen. Det skilles mellom filter av løsmasse (grus) og filter av et syntetisk materiale (geotekstil). Filteret må oppfylle krav om stabilitet mot indre erosjon, hindre utvasking av partikler fra underlaget og være tilstrekkelig permeabelt slik at det ikke bygger seg opp vanntrykk bak filteret (Fergus et al. 2010).

Hvis både filter og plastring består av relativt ensgraderte masser, kan formel 2-1 og 2-2 benyttes til å finne nødvendig steinstørrelse på filtermateriale. Det finnes imidlertid mer detaljerte krav for hvordan filteret skal utføres beskrevet i Jenssen og Tesaker (2009), men dette er ikke fokus i denne oppgaven.

Terzaghi et al. (1996) anbefaler følgende filterkriterium:

$$\frac{d_{15}}{d_{85}} < 4 \quad (2-1)$$

d_{15} = steinstørrelse (m) 15 % av steinmassen kan gå gjennom en $d \times d$ mm åpning

d_{85} = steinstørrelse (m) 85 % av steinmassen kan gå gjennom en $d \times d$ mm åpning

Mens Jenssen og Tesaker (2009) anbefaler følgende filterkriterium:

$$\frac{d_{15}}{d_{85}} < 5 \quad (2-2)$$

2.2 Strømningsforhold og erosjon

Årsaken til at det er nødvendig med en plastring, er at erosjon forekommer på steder der dette ikke er ønskelig. Erosjon er en naturlig prosess og oppstår når flere partikler fjernes fra et område enn det som avsettes (Fergus et al. 2010). Ved en brå forandring av strømningsverrsnittet eller bunnforhold, oppstår lokal erosjon. Dette skjer typisk ved plassering av hydrauliske konstruksjoner i en elv, i yttersvinger, i innsnevring, eller nedstrøms et erosjonsbeskyttet område. Forandringen av for eksempel strømningsverrsnittet fører til endring i hastighet og ujevn fordeling av skjærspenninger. Plassering av dam i en elv er et typisk eksempel der uønsket erosjon kan forekomme. Nedstrøms dammen kan det oppstå erosjonsproblemer når vann skal føres tilbake til sitt naturlige elveleie ved flom.

Vannstrømmen ut fra for eksempel flomluker kan være overkritisk, og lenger nede i elva kan vannhastigheten være større enn bunnen har opplevd tidligere slik at de naturlige erosjonsprosessene kan forsterkes.

Strømning i bratte elver er kjennetegnet ved at den er turbulent. Hastigheten på vannet kan være høy og vanddybden lav, avhengig av hvor mye vann som er tilstede. Dette kan føre til høye Froude tall som i så fall betyr at strømmingen er overkritisk. Strømmen i bratte elver brytes og kan inneholde store luftmengder. Luftinnblanding gjør at vanddybden varierer og er vanskelig å måle. Hvis steinmassen har høy porøsitet, kan dette føre til at en del av vannet blir ført nedover mellom steinene i et såkalt grenseflatelag. Det kan være luft i vannstrømmen, vann mellom stein og muligens luft og vann mellom stein. Mengden av luftinnblanding blir påvirket av overflatebølgeaktivitet, turbulens og overflatespenning (Peirson & Cameron 2006).

Når vann strømmer i en kanal eller elv, utvikler det seg en kraft som virker i samme retning som strømmen på bunnen. Denne kraften er draget av vann på det våte arealet normalt strømningsretningen og kalles skjærkraften eller dragkraften (Chow 1959). Denne kraften resulterer i en skjærspenning. Skjærspenning som virker på en væske, vil resultere i en bevegelse av væsken uansett hvor liten denne spenningen er (White 2011). I vassdragsteknisk sammenheng brukes skjærspenningen, formel 2-3, som et mål på belastningen vannstrømmen utøver på bunnen. Skjærspenningen i et snitt må balansere vekten av vannet i snittet (Fergus et al. 2010)

$$\tau_0 = g\rho_w y I$$

2-3

τ_0 = skjærspenning (kN/m²)

g = tyngdeakselerasjon (9,81 m/s²)

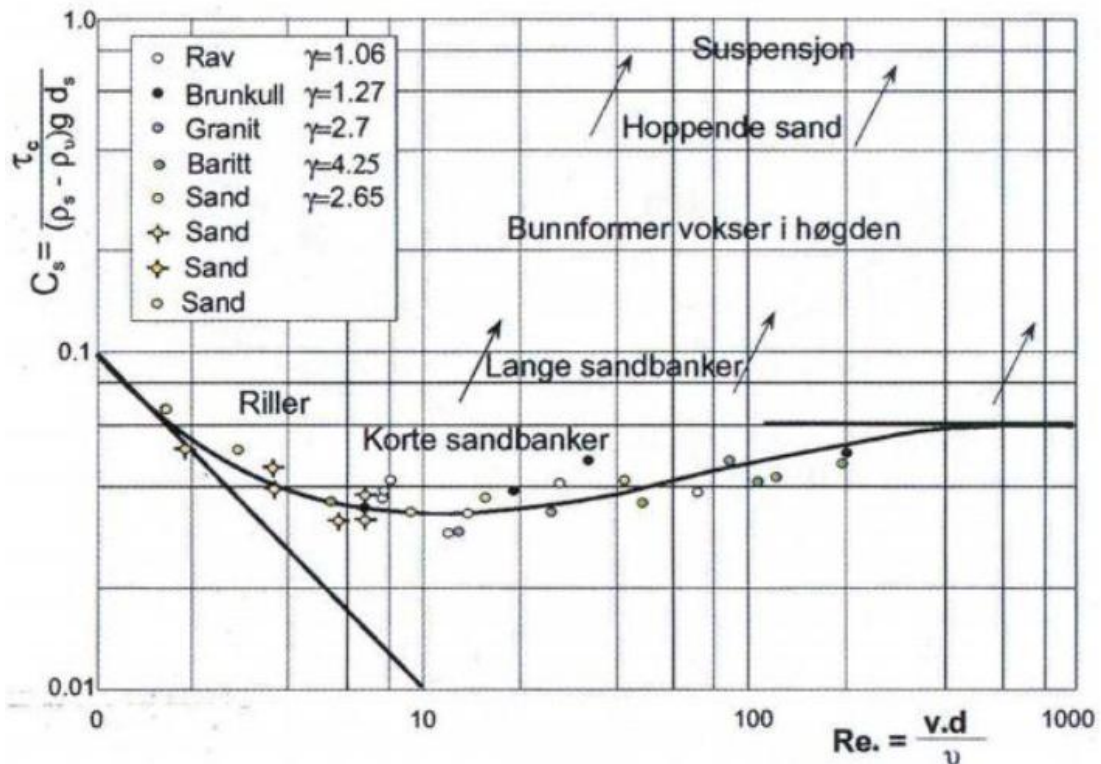
ρ_w = tetthet vann (1000 kg/m³)

y = vanndybde (m)

I = energilinjens helning (-)

Elvas kompetanse er vannets evne til å flytte en enkel partikkel av en gitt størrelse. Kompetansen avhenger av vannets hastighet slik at i bratte elver vil vannet kunne flytte store partikler. Elvas kapasitet er vannets evne til å flytte en gitt mengde partikler. Kapasiteten avhenger av vannføringen til elva som vil si hastighet og vannmengde. Derfor fører stor hastighet og vannmengde til at vannet kan frakte en stor mengde partikler. Bratte elver har høy kompetanse og muligens høy kapasitet (Fergus et al. 2010).

Hjulstrømsdiagrammet og Shields diagram er ikke gyldige for bratte elver på grunn av høy turbulens, men diagrammene gir likevel nyttig informasjon. Hjulstrømsdiagrammet, som er gyldig for vanndybder opp til en meter, forteller at høy vannhastighet fører til erosjon av store partikler. Shields diagram, figur 2-2, er bygget på forsøk med ensgraderte masser og er generelt gyldig for alle typer sedimenter og væsker. Diagrammet viser at transporten av stein øker når skjærspenningen øker. En gjennomsnittelig verdi for skjærspenningen for et helt bunnprofil er ofte ganske enkel å beregne, men hvordan skjærspenningen er fordelt på bunn og sider kan være vanskeligere å finne ut (Fergus et al. 2010). Shields diagram gir forholdet mellom Shields tall, dimensjonløs skjærspenning, og Reynolds tall og sier at større skjærspenning øker partikkeltransporten. Under grafen i figur 2-2 er partikler stabile, mens over transporteres de.



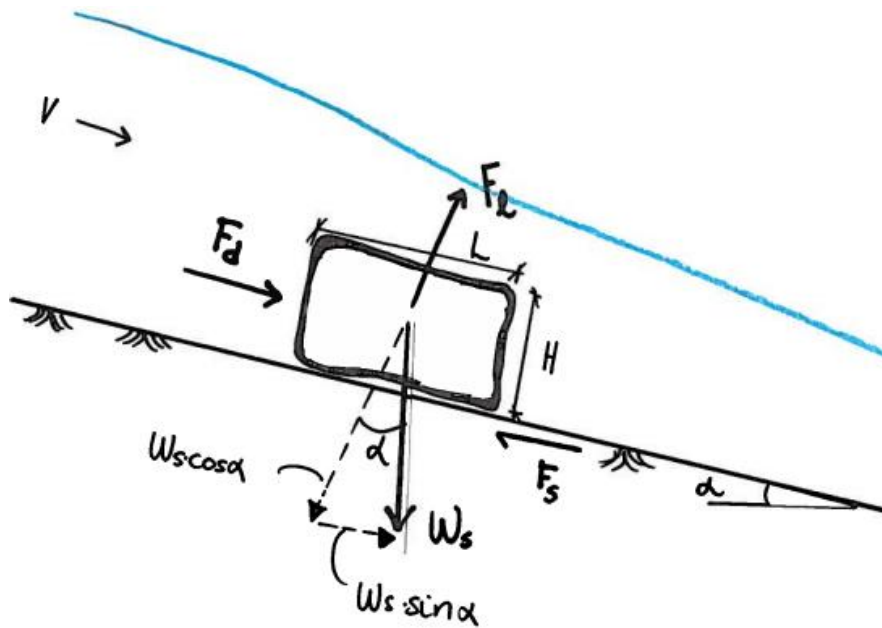
Figur 2-2 Shields diagram (Fergus et al. 2010)

2.3 Analytisk beregningsmetode

Dette kapitlet tar for seg en analytisk metode for å beregne stabiliteten til steiner i en elv. Det blir først sett på likevekt av en enkelt stein for deretter å gå videre inn på stabilitet av en plastring. Analytiske metoder er lite brukt i dimensjonering av nødvendig steinstørrelse fordi det er utfordrende å bestemme løfte – og dragkoeffisient. Likevel kan metoden bidra med nyttig informasjon om hvilke parametere som kan ha størst betydning med hensyn på stabilitet av stein, og er derfor tatt med.

2.3.1 Kraftlikevekt av enkeltstein

Det er kreftene fra vannet som river løs steiner fra bunnen. Figur 2-3 viser kreftene som virker på en enkelt stein som står i en skråning med strømmende vann. Kreftene som virker på steinen er dragkraft, løftekraft, friksjonskraft og neddykket tyngde av stein. Når de drivende kreftene blir større enn de stabiliserende kreftene, vil steinen bevege seg.



Figur 2-3 Krefter som virker på en stein i en elv

Dragkraft og løftekraft er i følge Fergus et al. (2010) gitt av:

$$F_d = C_d A \rho_w \frac{v^2}{2} \quad (2-4)$$

$$F_l = C_l A \rho_w \frac{v^2}{2} \quad (2-5)$$

F_d , F_l = drag, løfte- kraft (kN)

C_d = dragkoeffisient (-)

C_l = løftekoeffisient (-)

A = projisert areal normalt strømrretningen (F_d) / parallelt steinen (F_l) (m^2)

v= vannhastighet foran steinen (m/s)

Friksjonskraft er i følge Fergus et al. (2010) gitt av:

$$F_s = (W_s \cos \alpha - F_l) \tan \varphi \quad (2-6)$$

F_s = friksjonskraft (kN)
 W_s = vekt av stein (kg)
 α = skråningshelning (grader)
 φ = friksjonsvinkel (grader)

Friksjonsvinkelen angitt i formelen er ikke vanlig glidende friksjon fra geoteknisk sammenheng, $\tan \phi$ representerer motstanden mot en enhver form for bevegelse; glidende, rullende eller "hoppende" (Fergus et al. 2010). Når løftekraften blir stor, avtar friksjonskraften og dermed motstanden mot bevegelse av partikkelen.

Neddykket vekt er gitt av:

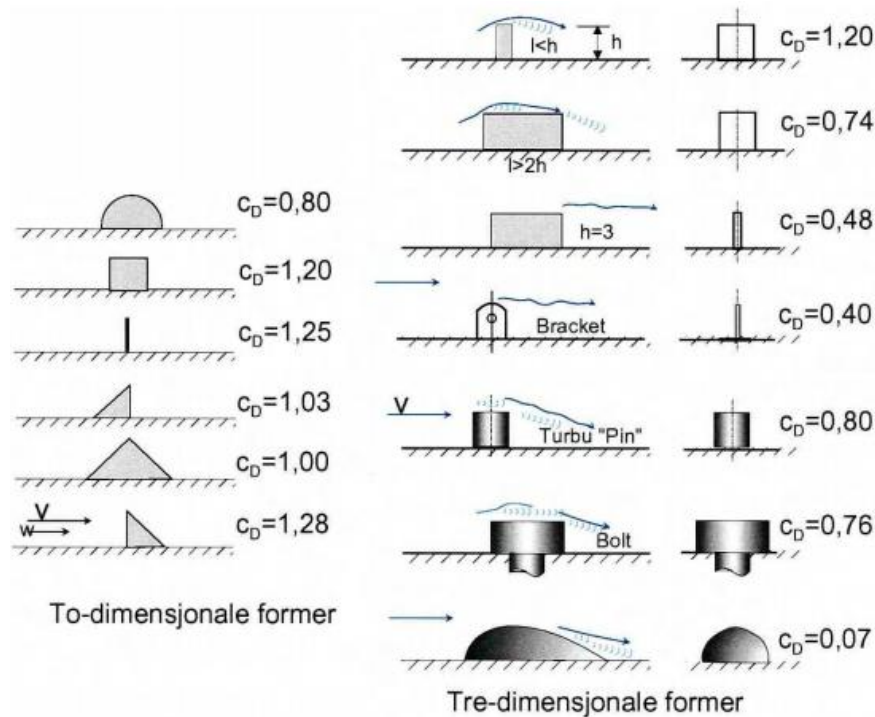
$$W_s = V_s(\gamma_s - \gamma_w) \quad (2-7)$$

V_s = volum av stein (m^3)
 γ_w = tyngdetetthet vann ($10 \text{ kN}/m^3$)
 γ_s = tyngdetetthet stein (kN)

Vektkomponenten må dekomponeres når steinen står i en skråning slik som vist på figur 2-3. Vektkomponenten parallelt med helningen vil destabilisere steinen. Dette fører også til at friksjonskraften blir mindre.

Dragkraften tilsvarer vannets trykk og sug parallelt med bunnen på den delen av partikkelen/steinen som stikker opp. Løftekraften oppstår på grunn av lokale hastighetsvariasjoner over partikkelen som gir ulikt vanntrykk på over- og undersiden av steinen. På oversiden er hastigheten større enn på undersiden, trykket på oversiden er da mindre enn under steinen. Jo større hastighetsforskjell jo større trykkforskjell, noe som fører til økt løftekraft og mindre stabil stein fordi motstanden mot bevegelse, friksjonskraft mellom underlag og stein, avtar. Det er imidlertid verdt å merke seg at disse kreftene varierer og svinger med høy frekvens på grunn av vannets turbulens (Amundsen 2012).

Dragkoeffisienten er avhengig av steinens form, se figur 2-4. Løftkoeffisienten avhenger også av partikkelens form i tillegg til sirkulasjonen rundt partikkelen, men det finnes færre opplysninger om denne. For en blokk med skarpe hjørner (rettvinklet prisme) antas det at $C_l = 0,9$ (Jenssen & Tesaker 2009).



Figur 2-4 Dragkoeffisienter for ulike former (Fergus et al. 2010)

Formel 2-5 og 2-6 viser at de drivende kreftene er proporsjonale med kvadratet av vannets hastighet. I bratte elver der hastigheten er høy, vil dragkraften og løftkraften derfor være store. Skråkomponenten av vekten øker også med økende helning slik at den stabiliserende kraften som skyldes steinens vekt blir mindre i bratte elver.

Steinpartikkelen er stabil dersom den oppfyller krav mot glidning, løfting og velting. Dersom man ser på steinen i figur 2-3 kan formlene over benyttes til å komme frem til uttrykk for kritisk hastighet ved glidning, velting og løfting vist i tabell 2-1. Utledning av formlene er presentert i vedlegg A. En kule vil ikke kunne ligge stille i en elv med helning uten å bli støttet av noe. Formler for hastighet ved løfting, velting og glidning for en kule er derfor utledet når kulen ligger på en horisontal flate og er presentert i vedlegg A.

Tabell 2-1 Formler for kritisk hastighet

	Krav	Kritisk hastighet
Glidning	$F_d > F_f$	$v_{gli} = \sqrt{\frac{2L(\gamma_s - \gamma_w)(\cos\alpha \tan\varphi - \sin\alpha)}{\rho_w(C_d + C_l \frac{L}{H} \tan\varphi)}}$
Løfting	$F_l > W_{normal}$	$v_{løft} = \sqrt{\frac{2(\gamma_s - \gamma_w)H\cos\alpha}{\rho_w C_l}}$
Velting	$M_d > M_s$	$v_{velt} = \sqrt{2(\gamma_s - \gamma_w) \frac{L\cos\alpha - H\sin\alpha}{(C_d \frac{L}{H} + C_l \frac{H}{L})\rho_w}}$

Av formelverket kommer det frem at vekten av steinen og friksjonen mot underlaget er viktige stabiliserende krefter. En stein er utsatt for bevegelse dersom den har lav tetthet. I tillegg har formen til steinen noe å si for stabiliteten. Dersom arealet normalt strømrretning, er stort eller areal parallelt strømrretningen er stort vil bevegelse oppstå dersom vannhastigheten er stor nok. Steiner som skal motstå bevegelse fra krefter i vannet bør dermed være så tunge som mulige og ha en gunstig form. Gunstig steinform er former som gir lite utsatt areal for drag og løft. Dette problemet kan reduseres ved å orientere steinen slik at minst mulig areal blir utsatt for drag og løft. For steiner med likt areal overalt som kuber og kuler er imidlertid ikke dette mulig. En stein i en bratt skråning vil være mindre stabil enn stein plassert på horisontal bunn. Hvis bunnen er glatt blir stabiliteten lavere på grunn av mindre friksjon mot underlaget.

2.3.2 Stabilitet og bruddforløp av plastring

I en plastring ligger steiner inntil hverandre og gir støtte til hverandre. Det oppstår en låsekraft mellom steinene. Formlene i kapitel 2.2.2 tar ikke hensyn til denne låsekraften. Stabiliteten og tillatt vannføringen over en plastring vil derfor ikke kunne analyseres på samme måte som for en enkelt stein. I tillegg er strømmingen og bunnen ujevn og steinene som regel ulike i form og størrelse (Fergus et al. 2010). Strømmens skjærspenning brukes derfor istedenfor som et mål for stabiliteten til en plastring. Dragkraft og løftekraft blir med denne betraktningen angitt med formel 2-8 og 2-9.

$$F_d = \tau_0 d^2 k_1 \quad (2-8)$$

$$F_l = \tau_0 d^2 k_2 \quad (2-9)$$

k_1 = konstant bestemt av kornform (-)

k_2 = konstant bestemt av kornform (-)

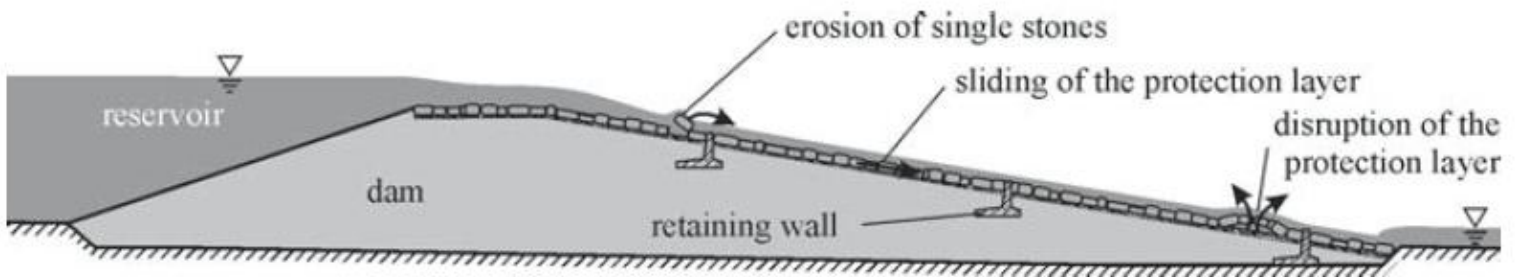
Shields tall, formel 2-10, oppstår hvis formelene over i tillegg til tyngde og friksjonskraft kombineres og ordnes slik at alle konstantene og $\tan\phi$ inngår i en konstant. Shields tall sier at steinen vil være stabil hvis diameter og tetthet er stor nok i forhold til skjærspenningen fra vannet. Disse formelene benyttes ikke fordi det ikke er mulig å kvantifisere k_1 og k_2 . Det blir ikke gått nærmere inn på hvordan skjærspenning blir beregnet ettersom formelene likevel ikke kan benyttes.

$$C_s = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w)d} \quad (2-10)$$

C_s = Shields tall (-)

Figur 2-5 viser forskjellige brudd som kan oppstå i en plastring. Når en plastring blir utsatt for strømmende vann, kan enkelte steiner i plastringen begynne å bevege seg. Dette kan føre til at kontaktmønsteret endrer seg og en enkelt stein vil i verste fall miste kontakten med nabosteinerne. Steinen vil da være utsatt for bevegelse dersom vannføringen blir stor nok (Falkenberg 2013). Ved erosjon av en enkelt stein blir det et hull i sikringen og luftvirvler i området der steinen lå vil oppstå. Dette fører til høyere hydrauliske laster på nabosteinerne til steinen som ble erodert. I noen tilfeller viser det seg at selv om en stein blir erodert, vil resten av sikringen forbli stabil, men det er likevel ikke mulig å forutsi dette på forhånd (Siebel 2007). Dersom vannføringen og vannhastigheten blir stor nok, kan løftekraften på plastringen bli så stor at friksjonskraften kan bli mindre enn dragkraften noe som fører til at hele

plastringsdekket vil skli nedover skråningen (Siebel 2007). Dette er imidlertid et problem som kan unngås ved å sette inn støtter langs plastringen som vist på figur 2-5. Forstyrrelser av plastringslaget kan bare oppstå i en plastring og ikke i en rauset sikring. Problemet oppstår dersom høye dragkrefter kombineres med høye løftekrefter rett oppstrøms en støtte. Forstyrrelsen påvirker to eller flere steiner avhengig av geometriske verdier (Siebel 2007).



Figur 2-5 Mulig bruddmekanismer for et plastringsdekke (Siebel 2007)

Definisjonen av brudd i en plastring kan variere, og avhenger av den risikoen man er villig til å ta. Noen ganger blir brudd definert som når en enkelt stein blir tatt med av strømmen og finner seg en ny plass i sikringen. Andre ganger defineres brudd som når deler av plastringen blir revet med av strømmen og det underliggende laget blir eksponert. Videre i denne oppgaven vil det med brudd menes den situasjonen at en enkelt stein blir tatt med av strømmen og forsvinner ut av plastringsområdet.

2.4 Etablerte beregningsmetoder

Ettersom det er utfordrende å beregne stabiliteten av en plastring med analytiske formeler, har en rekke empiriske metoder blitt utviklet gjennom mange år med forskning. I dette kapitlet presenteres modellforsøk og feltstudier hvor en har funnet uttrykk for å dimensjonere nødvendig steinstørrelse i en sikring med bratt helning. En del av forsøkene baserer seg på overtopping av fyllingsdammer, men forholdene ligner det man ser i bratte elver. Det skiller mellom forsøk gjort med rauset plastring og ordnet plastring. Det er et større beregningsgrunnlag for rauset sikring enn for plastring, som det generelt er lite informasjon om.

2.4.1 Rauset sikring

Bakgrunnen for de ulike beregningsmetodene er beskrevet i tabell 2-2, mens tilhørende formler er presentert i tabell 2-3. Det finnes flere uttrykk for dimensjonering, men det er valgt kun å ta med de uttrykkene som er relevante for problemstillingen i oppgaven.

Uttrykkene varierer i kompleksitet, nøyaktighet og bruksområder og gir begrensninger i tillatt helning, spesifikk tyngdetetthet og steinform. Noe av grunnen for variasjonen i nøyaktighet kan være at de er avhengig av antall observasjoner gjort, testoppsett og spesielt hvordan brudd har blitt definert. Dette fører til at usikkerheten rundt de forskjellige metodene er stor og at tillatt spesifikk vannføring varierer avhengig av hvilket uttrykk som benyttes (Thornton et al. 2013) (Abt et al. 2013). Thornton et al. (2013) sammenlignet verdier fra forsøk med teoretiske verdier og fant at Khan og Ahmad (2011) var mest nøyaktig i bestemmelsen av stabil steinstørrelse.

Generelt er stabil diameter gitt som en funksjon av bunnhelning og enhetsvannføring. I tillegg er de fleste formlene funnet ved å teste sikring med kantet eller knust stein, selv om noen forsøk også har blitt gjort med rundet stein. Det tas lite hensyn til steinens form i de ulike beregningsmetodene. Ullmann og Abt (2000) og Abt et al. (2008) er de eneste som har utviklet uttrykk tillatt for runde stein. Den førstnevnte er den eneste hvor rundhetsgrad er en parameter i uttrykket. Beskrivelsen av steinene begrenser seg til kantet, rund, knust og lignende. Verdier som blokkighet, lengde – tykkelsesforhold eller andre formfaktorer presentert i kapittel 2.5.3 nevnes ikke.

Tabell 2-2 Beregningsmetoder, beskrivelse

Forfatter	Beskrivelse av forutsetninger og resultater
Robinson (1993)	Formlene forutsetter at det benyttes sprengt, kubisk stein med spesifikk tetthet $s=2,6 (\rho_s/\rho)$. Vannføringen som tillates, gir sikringen en ujevn overflate og betydelige deformasjoner. Erosjonsveilederen anbefaler å benytte uttrykkene utviklet her ved dimensjonering av rauset sikring i bratte elver.(Jenssen & Tesaker 2009).
Robinson (1998)	Utførte 32 modellforsøk og fullskalaforsøk av erosjonssikring i en renne for å bedre kunne forutse stabiliteten til en sikring. Brudd ble definert som den strømningsstilstanden som eksponerte det underliggende materialet. Det ble observert at sikringen ble mer stabil når steinstørrelsen økte eller helningen var slakere. Det var i hovedsak kantet knust kalkstein som ble brukt i forsøkene. Steinlaget hadde en tykkelse på $2D_{50}$. Graderingen på steinmassen var noe mer ensgradert enn velgradert. Graderingstallet lå mellom 1,25 og 1,73. Spesifikk tyngdetetthet varierte fra 2,54 til 2,82, mens helningen varierte mellom 2 og 40 % (Robinson et al. 1998).
Abt&Johnsen (1991)	Utførte 21 tester i en nær fullskala renne med både kantet og rund stein og utviklet et uttrykk som gjelder for kantet stein. Gjennomsnittelig steinstørrelse for testpartikler var 25,4-152mm og helning på renne varierte mellom 1-20 %. Begynnende steinbevegelse inntraff når vannføringen var 74 % av det den var da plastringen gikk til fullt brudd. Runde stein måtte være 40 % større enn kantet stein for ikke å gå til brudd ved samme enhetsvannføring (Abt & Johnson 1991)
Ullmann (2000)	Utførte 12 modellforsøk av plastring med runde stein for overtopping av fyllingsdam. Helningen varierte mellom 20-30 %. Graderingstallet lå mellom 1,21 og 1,33. Rundhet på stein var mellom 76 til 95 %. Det ble vist at når rundheten avtok, tålte sikringen en høyere vannføring før brudd. Rundenhetsgrad ble funnet ved en visuell inspeksjon av steinen og er et mål på slitasje av kantene (Russell 1939). Eneste metode hvor rundhetsgrad er en parameter. Vannføringen ble økt til steinene begynte å bevege seg (Ullmann & Abt 2000).
Abt, Ullmann & Gallegos (2008)	Sammenlignet til sammen 26 tester gjort i 1991 (Abt and Johnsen), 2000 (Ullmann) og 2001 (Gallegos) av overtopping av fyllingsdam med rund stein for å finne en sammenheng for stabil steinstørrelse. Helningen var på 10-40 % med gjennomsnittelig steinstørrelse på 24-104 mm. Vannføringen ble økt til det underliggende lag ble eksponert. (Thornton et al. 2013)
Khan&Ahmad (2011)	Khan&Ahmad samlet 53 tester av plastring med kantet stein. Helningen varierte fra 1 til 40 %. Tanken var at det eksisterende dimensjoneringsgrunnlaget for stabilitet av en plastring ikke var nøyaktig nok. Brudd ble definert som når det underliggende materialet ble eksponert Eneste metode som avhenger av tykkelsen til plastringslaget. De 53 testene var hentet fra Abt&Johnsen (1991) og Robinson (1998) (Khan & Ahmad 2011).
Siebel (2007)	Forsøk ble gjort i forbindelse med overtopping av små fyllingsdammer. Det ble testet uordnet plastring med regulære (kubiske) steiner. Forsøkene ble gjort i en 7,6m lang renne. Helningen varierte mellom 1:26 og 1:3. På bunnen av renna ble det lagt et tynt lag av betong med små steinpartikler stikkende ut for at plastringslaget ikke skulle gli på underlaget. Brudd ble definert som når en stein begynte å bevege seg.(Siebel 2007)
Olivier (1967)	Så på overtopping og gjennomstrømming av fyllingsdam og utviklet et uttrykk som er gyldig for knust eller grov stein. Helningen varierte mellom 8-45 %. Han observerte begynnende bevegelse av stein og full kollaps av plastringen (Abt & Johnson 1991).

(Thornton et al. 2013)	Utførte regresjonsanalyse av 102 observasjoner for overtopping av fyllingsdammer fra 10 forskjellige forsøk/undersøkelser for å komme frem til et forbedret empirisk uttrykk. Tillatt helning mellom 1 og 40 %. Fordelen med denne likningen er utvidet bruksområde slik at behovet for å ekstrapolere tidligere uttrykk reduseres. Uttrykket gjelder i hovedsak for kantet stein med en spesifikk tyngdetetthet mellom 2,29 og 2,82. Ved spesielle tilfeller anbefales det å benytte et uttrykk som gjelder for det aktuelle tilfellet (Thornton et al. 2013).
(Stephenson 1979)	Så på overtopping av fyllingsdammer og utviklet et uttrykk som gjelder for knust stein og som inkluderer porøsitet. Brudd ble definert som begynnende bevegelse av stein. Plastringen går til fullt brudd når enhetsvannføringen øker med 120 % for grus og 108 % for knust stein (Abt & Johnson 1991). Gjelder for helning mellom 8-20 %
Knauss (1979)	Utviklet et uttrykk fra arbeidet til Hartung&Scheuerlein som er gyldig for knust, kantet stein med en spesifikk tyngdetetthet på ca. 2,7. Tillatt helning er på 20-67 %. Fant ut at luftinnblanding økte den kritiske hastigheten for når en sikringen ville forbli stabil (Khan & Ahmad 2011)
Hartung& Scheuerlein (1970)	Presenterte et sett med likninger for vannføring over sikringsdekke av kantet stein i elver med bratt helning som også tok hensyn til luftinnblanding. Utgangspunktet var teorien om steiner dumpet i vann utviklet av Isbash (1936). Det ble anbefalt at formlene kunne benyttes med helninger mellom 20 til 67 % (Khan & Ahmad 2011).

Tabell 2-3 Beregningsmetoder, formler

Kilde	Formel	Steinform
Robinson (1993)	$D_{50} = 0,5S^{0,32}q^{0,53} \quad 1:10 < S < 1:2,5$ $D_{50} = 1,5S^{0,79}q^{0,53} \quad S < 1:10$	Sprengt kubisk (kantet)
Robinson (1998)	$D_{50} = \left[\frac{qS^{0,58}}{8,07E - 6} \right]^{1/1,89} \times 10^{-3} \quad 0,1 < S < 0,40$ $D_{50} = \left[\frac{qS^{1,5}}{9,76E - 7} \right]^{1/1,89} \times 10^{-3} \quad S < 0,10$	Knust Kalkstein (kantet)
Abt& Johnsen (1991)	$D_{50} = 0,5074 \times S^{0,43}q_{design}^{0,56}$ $q_{design} = 1,35q$	Kantet
Ullman, Gallegos,& Abt (2008)	$D_{50} = 0,9782C_u^{0,70}S^{0,70}q^{0,68}$	Runde
Khan& Ahmad (2011)	$D_{50} = 0,66t^{0,58}S^{0,22}C_u^{-0,45}q^{0,22}$	Kantet
Ullmann (2000)	$D_{50} = \frac{10^{-3} \times 6,48S^{0,43}q^{0,56} (1,12R + 0,39)}{C_u^{0,25}}$	Rundet
Siebel (2007)	$D_{50} = 1,71S^{0,68}q^{2/3} \left(\frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \right)^{1/3}$	Kantet
Olivier (1967)	$D_{50} = \frac{q \times S^{7/6}}{0,423} \times \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right)^{5/3}$	Knust/grov (ikke SI-enheter)
(Thornton et al. 2013)	$D_{50} = 0,57S^{0,2}C_u^{-0,28}q^{0,21}t^{0,62} \left[\frac{1,16}{(SG - 1)^{0,3}} \right]$	Kantet (ikke SI-enheter)

**(Stephenson
1979)**

$$D_{50} = \left[\frac{q(\tan\alpha)^{7/6}n^{1/6}}{Cg^{1/2}[(1-n)(SG-1)\cos\alpha(\tan\varphi - \tan\alpha)]^{5/3}} \right]^{2/3}$$

**C= 0,27,
knust
granitt
C=0,22,
grus**

Knauss (1979)

$$D_{50} = \left[\frac{q}{\sqrt{g}(1,9 + 0,8C_u - 3\sin\alpha)} \right]^{2/3}$$

**Kantet,
knust**

**Hartung &
Scheuerlein
(1970)**

$$q_{max} = TY_m v$$

Kantet

$$v = 1,2 \left[\frac{2g(\gamma_s - \gamma_w)}{\beta \times \gamma_w} \right]^{1/2} \times (d_s \cos\alpha)^{1/2}$$

$$\beta = 1 - 1,3\sin\alpha + 0,08 \frac{Y_m}{\theta_m}$$

D_{50} = median steindiameter (m)

q = enhetsvannføring (m^2/s)

S = bunnhelning (-)

C_u = graderingstall (-)

t = tykkelse på lag (m)

R = rundhetsgrad (%)

SG = spesifikk tyngdetetthet stein (-)

n = porøsitet (-)

β = faktor for luftinnblanding (-)

θ_m = Gjennomsnittelig ruhet (m)

Y_m = middels vanddybde (m)

2.4.2 Plastring

Ifølge Jenssen og Tesaker (2009) mangler det gode metoder for å bestemme stabil steinstørrelse for en ordnet plastring. Man vet lite om hvordan en ordnet plastring skal beskrives, og det er få beregningsmetoder tilgjengelig.

Jenssen og Tesaker (2009) beskriver forsøk gjort av plastring på vassdrags- og havnelaboratoriet på NTNU av Lysne (1965). Forsøkene viste at blokker med liten eksponert flate i forhold til volum var mer stabile enn blokker med stort eksponert areal, som vil si stein med lengste akse normalt på strømrretningen. Dette stemmer i prinsippet godt med formlene presentert i kapitel 2.3.1 Men det var vanskelig å gi noen retningslinjer for dimensjonering fordi det var for stor spredning i resultatene. Formel 2-11 og 2-12 brukes for å få en indikasjon på hvor stor tykkelse steinen burde ha og tilsvarer lengden på aksen til steinen normalt på bunnen.

$$T = 0,75 \frac{q^{\frac{2}{3}}}{4} \quad \text{for } S = 1:6 \quad (2-11)$$

$$T = 0,75 \frac{q^{\frac{2}{3}}}{10} \quad \text{for } S = 1:10 \quad (2-12)$$

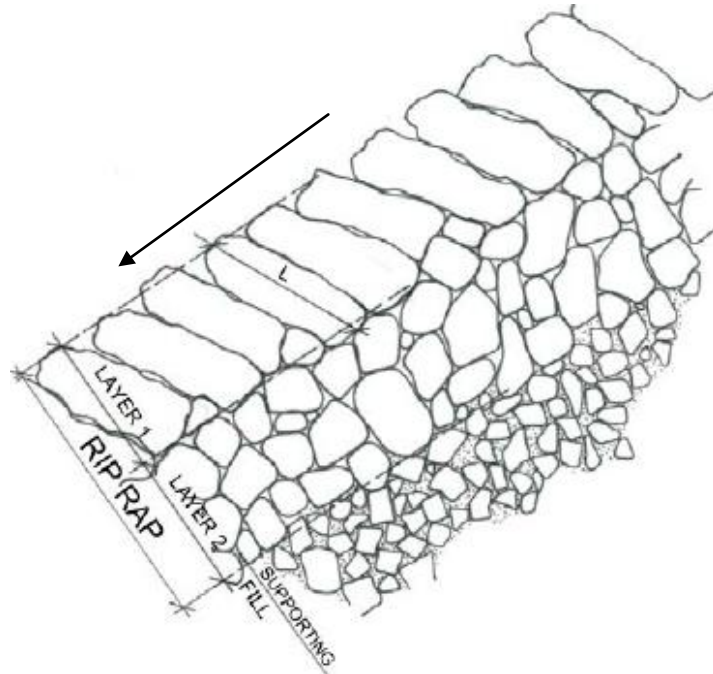
T= lengden på aksen til steinen normalt på bunnen (m)

For at formlene skal være gyldige, må for begge tilfellene $A_{\text{eksp}} < 2t^2$ være oppfylt. A_{eks} er areal av stein som er eksponert mot vann.

Nyere forskning på NTNU viser at ordnet plastring kan gi betydelig bedre sikkerhet enn rauset plastring, og retningslinjer for ordnet plastring på nedstrøms skråning av fyllingsdammer har blitt utviklet. Det anbefaltes da å bruke noe mer avlang stein enn det som har blitt anbefalt tidligere (Lia et al. 2013).

- Lengste akse (a-akse) til steinen skal bli plassert mot dammen.
- Lengste akse (a-akse) til steinen skal bli plassert normalt på damaksen.
- Steinene skal bli plassert i forband slik at det ikke er noen horisontale eller vertikale skjøter i plastringen.
- Alle steinene skal bli plassert i et låsemønster der hver stein er i kontakt med andre steiner på alle sider.

- Bruk middels avlange steiner som ikke er for tynne i noen retninger (plater) for å sikre at steinene blir innebygd i plastringen. Disse ødelegges ikke når de plasseres ut og er robuste mot slitasje i levetiden til sikringen.
- To lags plastring anbefales, se figur 2-6.



Figur 2-6 Tolags plastring (Lia et al. 2013)

2.5 Parametere i en plastring

I dette kapitlet blir parametere som beskriver egenskapene til en plastring presentert. Det er lagt stor vekt på beskrivelse av steinens form.

2.5.1 Steinens størrelse

Steinens størrelse er den størrelse steinen i plastringen må ha for at den skal være stabil. Det er flere måter å beregne steinens størrelse på og den blir som oftest angitt med en karakteristisk diameter.

D_x angir steinstørrelse hvor x tilsvarer vekt delen av mengden som passerer gjennom en kvadratisk åpning med sidekant lik siktestørrelsen. Hvis $D_{70}=600\text{mm}$, betyr det at 70 % av steinmassen i vekt kan gå gjennom en 600×600 mm åpning.

Formel 2-13 har blitt brukt som mål på steinstørrelse i tidligere masteroppgaver og prosjektoppgaver på NTNU og tilsvarer ekvivalent blokkdiameter (Bogfjellmo 2013).

$$d = (a \times b \times c)^{\frac{1}{3}} \quad (2-13)$$

a = a-akse (steinens lengste akse) (m)

b = b-akse (steinens midterste akse) (m)

c = c-akse (steinens korteste akse) (m)

Steinens vekt kan også regnes om til karakteristisk kulediameter, som vil si diameteren på en kule som veier like mye som steinen og er gitt av formel 2-13.

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \times W_s}{\pi \times \rho_s}} \quad (2-14)$$

Videre i denne oppgaven blir formel 2-14 benyttet til å beregne steinens størrelse.

2.5.2 Steinens vekt og tetthet

Som det kom frem i kapitel 2.3.1, er steinens tyngde viktig for stabiliteten til en stein i en elv. Et mål som da er viktig er tettheten til steinen gitt av formel 2-14. Den ligger som regel i området 2400 til 2800 kg/m³ for naturlige steiner, men kan også gå utover dette. Figur 2-7 angir tettheten til noen bergarter som egner seg godt i en plastring.

En måte å bestemme tettheten til en stein på, er å veie steinen i luft for deretter å finne ut hvor stort volum steinen fortrenger i vann. Volumet av fortrengt vann kan finnes ved å veie steinen i vann.

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_s}{W_{stein\ i\ vann}} \times \rho_w \quad (2-15)$$

$W_{stein\ i\ vann}$ = vekt av stein når den er neddykket i vann (kg)

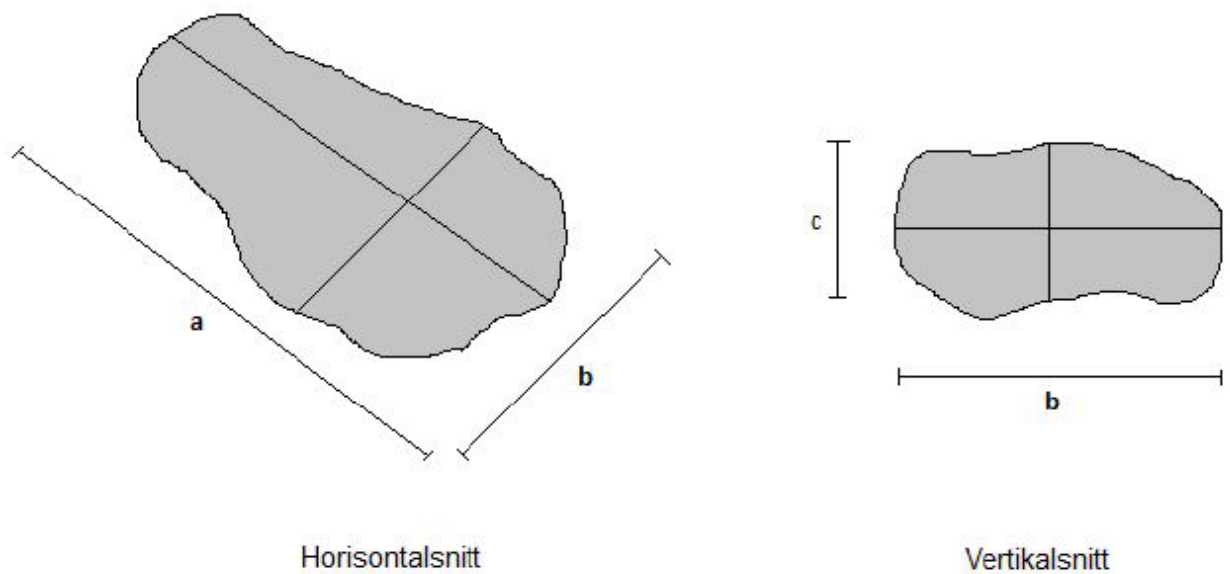
Bergart	Tetthet (kg/m ³)
Gabbro og amfibolitt	3150
Anorhositt og klorittskifer	3000
Grønnstein	2850
Glimmerskifer og dolomitt	2800
Kalkstein og syenitt	2750
Trondhemitt	2700
Granitt og kvartsitt	2650

Figur 2-7 Tetthet til bergarter (Jenssen & Tesaker 2009)

2.5.3 Steinens form

I kapitel 2.4 kom det frem at de etablerte beregningsmetodene ikke tar særlig hensyn til formen på steinen, mens i kapitel 2.3.1 viste den analytiske tilnærmingen at formen har noe å si for stabiliteten. Steinens form bestemmer blant annet hvordan steinen kan plasseres sammen med andre steiner og dermed har den sannsynligvis noe å si for hvor tett og bra innlåsningen blir i plastringen.

Steinens form beskrives med tre hovedakser, figur 2-8. Hovedaksene står vinkelrett på hverandre. a-aksen er lengst, b-aksen er midlere akse og c-aksen er kortest. De tre aksene kan kombineres til formfaktorer og på den måten beskrive steinens form. Videre følger noen formfaktorer og formfaktorkrav.



Figur 2-8 Steinens tre lengde akser (Bogfjellmo 2013)

Lengde- tykkelsesforholdet, formel 2-16, er forholdet mellom steinens lengste akse dividert på den minste avstanden mellom to parallelle linjer steinen kan passere gjennom. Avlang stein vil få et høyt lengde- tykkelsesforhold.

$$LT = \frac{a}{c} \quad (2-16)$$

LT = Lengde - tykkelsesforhold (-)

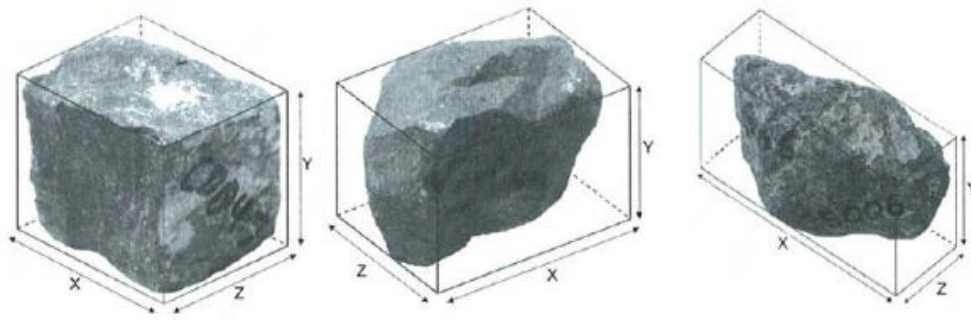
Blokkelighet, formel 2-17, er volum av stein delt på volumet av den minste rettvinklede boksen en stein får plass oppi.

$$BLc = \left(\frac{W}{\rho_s} \frac{1}{LBH} \right) \times 100 \quad (2-17)$$

BLc = Blokkelighet (-)

L, B, H = boksens sidekanter (m)

Figur 2-9 viser blokkelighet. Den til venstre har størst grad av blokkelighet, mens den til høyre har minst grad av blokkelighet. Høy blokkelighet vil si at steinen er rektangulær og kompakt. Den vil derfor få god kontakt og innlåsning med nabosteinene (Jenssen & Tesaker 2009).



Figur 2-9 Blokkighet (*The Rock manual: the use of rock in hydraulic engineering 2007*) referert i (Jenssen & Tesaker 2009)

Formel 2-18 og 2-19 er mål på hvor flat steinen er.

$$Fl\ 1 = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (2-18)$$

$$Fl\ 2 = \frac{a + b}{2c} \quad (2-19)$$

Fl 1 = flathetsforhold 1 (-)

Fl 2 = flathetsforhold 2 (-)

Formfaktorkravene i tabell 2-4 har blitt benyttet ved tidligere plastringforsøk ved NTNU for å oppnå middels avlang stein. Benyttes stein som oppfyller disse kravene, unngås for avlange steiner og steiner med skifrig form (Falkenberg 2013).

Tabell 2-4 Formfaktorkrav (Falkenberg 2013)

Krav 1	Krav 2	Krav 3	Krav 4
$\frac{1}{3} < \frac{b}{a} < \frac{2}{3}$	$\frac{a}{c} < 3$	$\frac{b}{c} < \frac{3}{2}$	$0,75d < c < 1,25d$

Cailleux rundhetsgrad, formel 2-20, er et mål på grad av rundhet. Dess lavere verdi dess mer kantet er steinen. For en perfekt kule er indeksen lik 1000 (Dumitriu et al. 2011)

$$C_i = \frac{2r}{a} \times 1000 \quad (2-20)$$

C_i = Cailleux rundhetsgrad (-)

r = radiusen til den skarpeste vinkelen på steinen (m)

Krumbeins faktor for rundet, formel 2-21, er også et mål på rundhet. K er en verdi mellom 0 og 1 der 1 indikerer en perfekt kule slik at jo lavere verdi for K dess mer kantet er steinen (Mills 1978).

$$K = \frac{\sqrt[3]{bc}}{\sqrt{a^2}} \quad (2-21)$$

K = Krumbeins faktor for rundet (-)

Zingg's klassifisering av steinform er gjengitt i tabell 2-5.










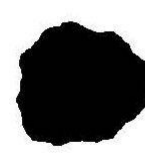


Tabell 2-5 Zingg's klassifisering av steinform (Dumitriu et al. 2011)

Form	b/a	c/b
Sfære	>0,67	>0,67
Plate	>0,67	<0,67
Stang	<0,67	>0,67
Kniv	<0,67	<0,67

Utenom formfaktorer brukes gjerne en visuell vurdering med uttrykk som kantet, rund, kube og lignende når steinens form skal beskrives, se figur 2-10. Med kantet stein menes stein som har klart definerte hjørner. Fordelen med kantet stein er at de har større overflateareal, høyere låsekraft og høyere steinmasse enn runde stein. Stabiliteten ved bruk av kantet stein blir derfor større enn ved bruk av runde stein (Abt et al. 2008) (Ullmann & Abt 2000). Ulempen er at de ikke finnes naturlig i vassdrag og det derfor kan være vanskelig og kostbart å få tak i disse dersom steinbrudd ligger langt unna byggeplass.

Runde stein vil si steiner som har en mer potetlignende form. Disse har blitt utsatt for slitasje etter å ha blitt transportert med elva i lang tid. Fordelen med runde steiner er at de kan være lettere tilgjengelige og dermed billigere. For at en sikring med runde stein skal tåle like mye som en sikring med kantet stein må steinstørrelsen være betydelig større. Det har blitt vist at rundet stein må være 40 % større enn kantet stein for å være stabil mot samme enhetsvannføring (Ullmann & Abt 2000) (Khan & Ahmad 2011).

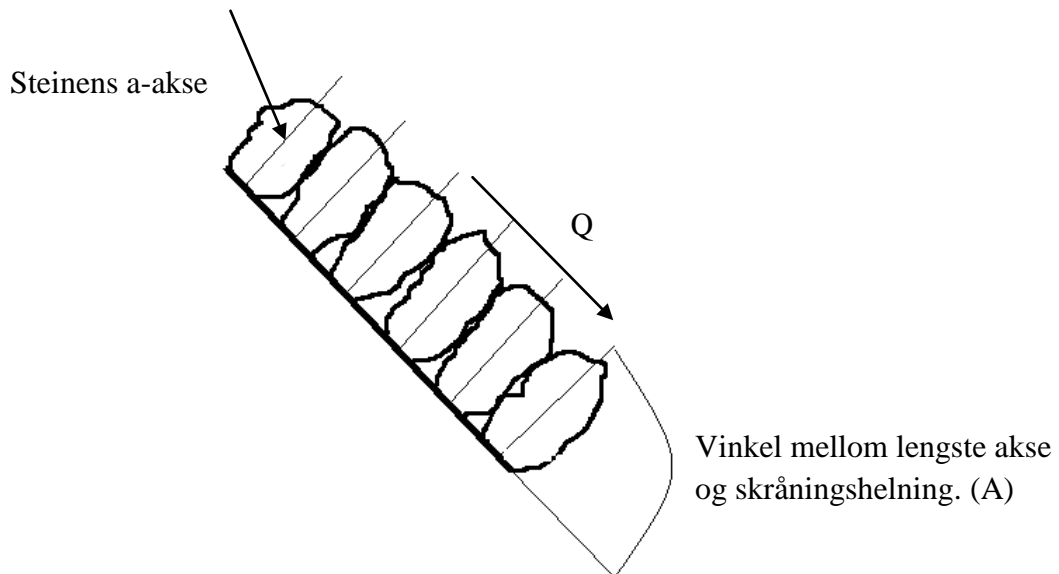
Steinforme som ikke egner seg så godt i en plastring, er skifrige bergarter, fordi de er mindre motstandsdyktige mot slitasje og frostsprengning. Denne typen stein knuses også lettere ved transport og utlegging. Flakig stein er heller ikke bra for stabiliteten fordi den får lite kontakt med steiner rundt og blir lettere skadet enn annen stein. Helleformet stein er likeledes dårlig egnet dersom den legges på flatsiden, men helleformet stein som legges vertikalt slik at steinens korteste eller mellomkorteste akse peker opp, kan benyttes.

	Well Rounded	Rounded	Sub-Rounded	Sub-Angular	Angular	Very Angular
Low Sphericity	 1	 2	 3	 4	 5	 6
High Sphericity	 7	 8	 9	 10	 11	 12

Figur 2-10 Visuell vurdering av steinforme
<http://www.obsidianlab.com/terminology.html>, 19.5.2014)

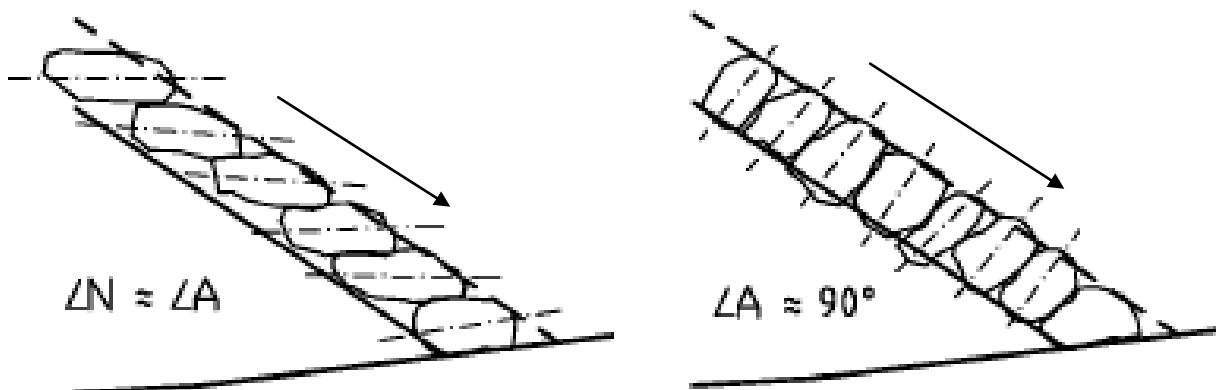
2.5.4 Steinens orientering

Med steinens orientering menes her vinkelen mellom a-aksen til steinen og bunnhelning, se figur 2-11, mens figur 2-12 viser horisontal og vertikal orientering.



Figur 2-11 Definisjon av steinens orientering (Lia et al. 2013)

Orienteringen til steinen har en klar innvirkning på stabiliteten til plastringen ved overtopping og av fyllingsdammer. For større verdier av vinkelen dess bedre stabilitet. Uordnet orientering (ingen spesiell orientering) tåler minst, mens vertikal orientering tåler mest (Lia et al. 2013). Dette kan også underbygges ved å se på de analytiske formlene i kapittel 2.3.1. Dersom a-aksen hadde ligget parallelt med helningen ville steinen glidd. Jo mer a-aksen vinkles opp dess mindre areal blir utsatt for løftekraften. I tillegg blir velting og glidning av plastringsdekke unngått dersom det fundamenteres godt nok i bunnen. Ved en lang elv kan det være nødvendig å fundamentere (støtte) med jevne mellomrom/seksjonsvis slik at en plastring kan forbli stabil selv om en stein i en seksjon ryker. Vertikal orientering kan være vanskelig å oppnå i virkeligheten og spesielt i bratte elver blant annet på grunn av større krav til god fundamentering.



Figur 2-12 Horisontal og vertikal orientering (Lia et al. 2013)

2.5.5 Porøsitet

Porøsitet, formel 2-22, er et mål på andelen hulrom i et materiale og varierer mellom 0 og 1. Når porøsiteten er over 0,5 er porevolumet større enn volum av materialet. Med porøsitet menes det i denne oppgaven porøsiteten til et plastringsdekke.

$$n = \frac{V_{porer}}{V_{tot}} \quad (2-22)$$

V_{porer} = porevolum (m^3)

V_{tot} = totalvolum (m^3)

Porøsiteten til et plastringsdekke er viktig for stabiliteten til plastringen (Pardo et al. 2013) (Aberle 2007). Det antas at et steindekke med lav porøsitet gir bedre stabilitet enn et steindekke med høy porøsitet, men veldig få uttrykk for dimensjonering av nødvendig steinstørrelse tar med porøsiteten som en parameter. Vanligvis blir porøsitet sett på som en konstant (Pardo et al. 2013).

Forsøk utført av ettlags plastring kantet stein viste at porøsiteten økte med dybde innover i plastringen. De fleste steinene er størst midt på slik at porøsiteten er stor i bunn og topp av et plastringsdekke. Porøsiteten er derfor minst omtrent midt på hvor volumet av steinen er størst. Mot bunnen øker porøsiteten igjen mot 1 helt til den ugjennomtrengelige bunnen hvor porøsiteten er 0 (Aberle 2007).

Resultater fra modellforsøk kan gi feil bilde av egenskapene til plastringen fordi det er lettere å kontrollere utleggingen av stein i modell enn på byggplass. Dette er fordi utlegging av en plastring i en modell skjer i liten skala hvor det er lettere å ha oversikt over plastringen og utleggingen skjer for hånd i tørre omgivelser. På byggeplass derimot, gir utstyr og miljøforhold begrensninger i utførelsen i tillegg til at det kan være dårlig sikt og utlegging av stein kan måtte skje under vann (Pardo et al. 2013).

2.5.6 Innlåsning og pakningsgrad

Pakningsgrad, formel 2-23, er et mål på hvor mange stein som får plass innenfor en gitt arealenhet og er et mål på forbruket av stein. Parameteren er assosiert med porøsitet og antall steinlag i sikringen (Pardo et al. 2013). Dess flere steiner innenfor et gitt areal dess høyere pakningsgrad. Det er ikke nødvendigvis selve pakningsgraden som er av interesse, men de parametrene som følger ved pakningsgrad. Det er blant annet forventet at med økt pakningsgrad vil innlåsningen øke, noe som igjen vil gi en sterkere plastring (Falkenberg 2013).

$$\dot{\eta} = \frac{N}{A} \quad (2-23)$$

$\dot{\eta}$ = pakningsgrad (stk/m²)

N = antall stein (stk)

A = plastringsareal (m²)

I denne oppgaven blir innlåsningvinkelen et mål på innlåsningskraften. Hvordan innlåsningvinkel blir målt, blir forklart i kapittel 3.2.1.

2.5.7 Korngradering

Korngraderingen eller kornfordelingen av steinmassen i en sikring viser fordelingen av steinstørrelsene i sikringen. De ulike fraksjonene blir veid og fordelingen blir tegnet opp i en summasjonskurve. En bratt kurve tilsvarer liten gradering, mens slak kurve viser stor gradering. Dersom det er en steinstørrelse som ikke er representert i sikringen, vises dette på kurven som en rett linje. I Norge er det vanlig å beskrive graderingen ved formel 2-24 (Jenssen & Tesaker 2009).

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2-24)$$

$C_u < 5$, ensgradert

$5 < C_u < 15$, middels gradert

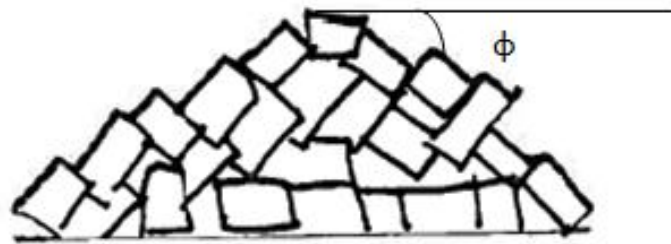
$C_u > 15$, velgradert

Fordelen med å bruke en velgradert masse er at behovet for filter blir mindre. I tillegg antas det at låsekraften mellom partiklene blir høyere ved bruk av velgradert masse.

Vannhastigheten i grenselaget til en ensgradert plastring er høyere enn i en velgradert plastring, noe som kan føre til lavere stabilitet (Khan & Ahmad 2011).

2.5.8 Friksjon

Friksjon er det som motvirker den relative bevegelsen mellom to legemer som er i kontakt med hverandre. Friksjonsvinkelen blir vanligvis brukt som et mål på friksjonen i granulære masser. Når en stor mengde av for eksempel grus blir tømt på en horisontal flate blir en kjegleformet haug dannet. Friksjonsvinkelen tilsvarer da vinkelen mellom den horisontale flaten og haugen, se figur 2-13. Friksjonsvinkelen er avhengig av kornform og øker med kornstørrelse og kantethet (Tarbuck & Lutgens 2006).



Figur 2-13 Definisjon friksjonsvinkel

3. Metode

Dette kapitlet beskriver forskningsmetoden som er benyttet for å vurdere problemstillingen i oppgaven. De etablerte beregningsmetodene beskrevet i kapittel 2.4 gir stor variasjon i tillatt enhetsvannføring for bratte helninger og tar liten hensyn til steinens form. De fleste metodene er gyldige for kantet og knust stein. Analytisk formler beskrevet i kapittel 2.3 er utfordrende å bruke fordi det er vanskelig å finne drag – og løftekraft. Det utføres derfor modellforsøk for å undersøke hvordan steinens form innvirker på stabiliteten til en plastring. Det har blitt valgt å dele forsøkene inn i forsøk A og forsøk B.

3.1 Forsøk A

Hensikten med forsøk A er å finne ut mer om hvordan plastring med ulike steinformer oppfører seg under påkjønning av overkritisk strømning. Forsøket utføres i d-renna på Norsk hydroteknisk laboratorium ved NTNU. Etter masteroppgaven ”Erosjonssikring av elvebunn nedstrøms dammer fundamentert på løsmasser” (Falkenberg 2013) ble det ønsket å se mer på hvordan stabiliteten til en plastring varierte med steinform. Oppsettet i d-renna var da tilpasset et spesielt prosjekt. Samme oppsett, renne uten helning, benyttes under dette forsøket selv om det ønskes å se på forhold i bratt elv. Effekten av steinens form vil komme frem uavhengig av helningen på renna. Det må imidlertid presiseres at resultatene derfor ikke kan benyttes direkte i dimensjonering.

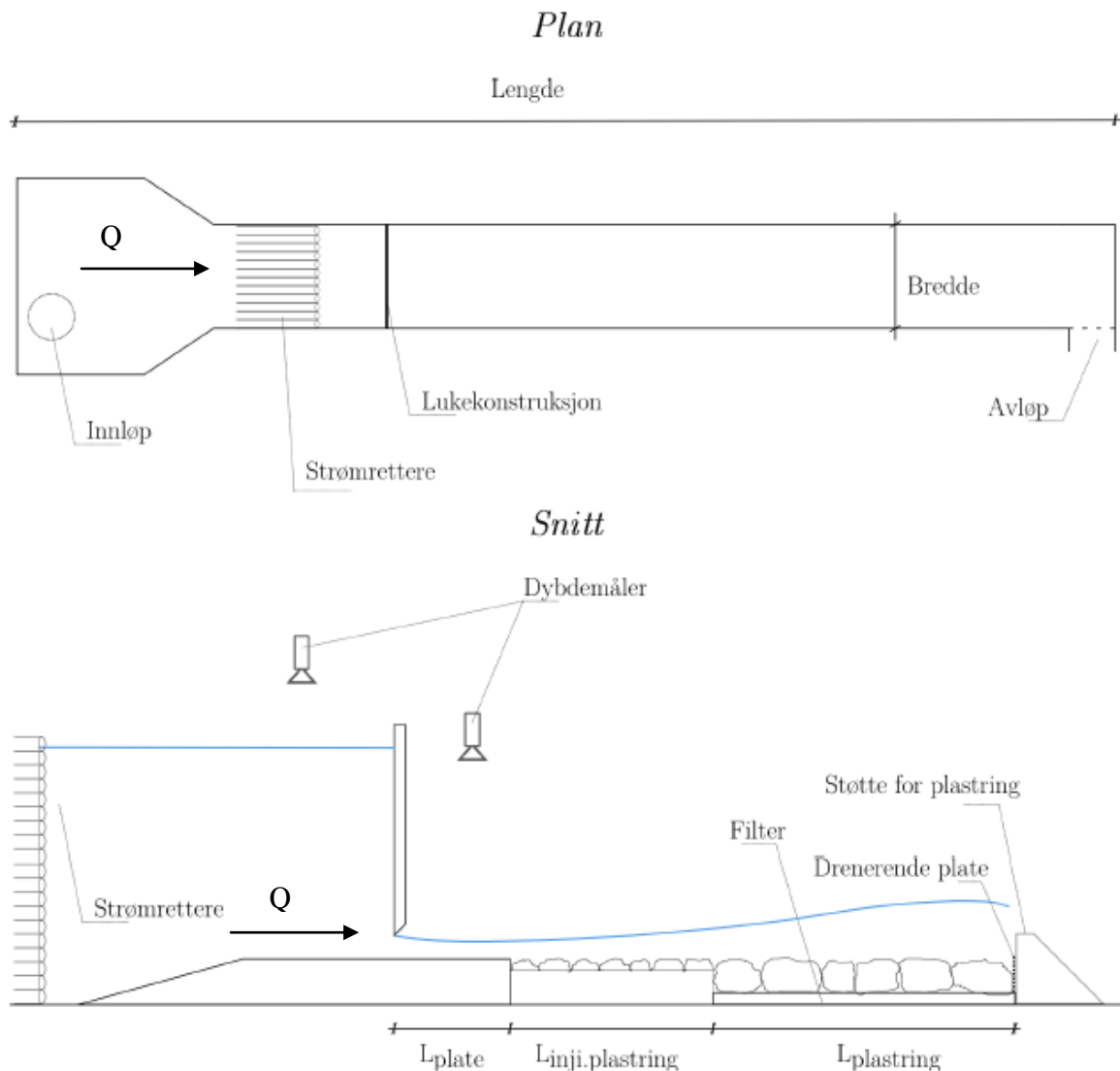
Modellen som benyttes i forsøk A, er en fysisk modell og kategoriseres som en prosessmodell ettersom det her ønskes å se på oppførselen til et system. Nærmere bestemt oppførselen til en plastring bygget av ulike steinformer. Modellen følger Froudes modellov fordi strømningen er hydraulisk turbulent og Reynolds modellov kan dermed neglisjeres. Dimensjonløs analyse er en bra måte å presentere data fra forsøk på (White 2011). Dimensjonløse parametere som benyttes i denne oppgaven er gjengitt i tabell 3-1.

Tabell 3-1 Dimensjonløse parametere

Dimensjonløs parameter	Formel	Forklaring
Tetthet	$\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$	
Dybde	$\frac{h}{d}$	h = lukeåpning (m)
Stabilitetstall	$St = \frac{\rho v^2}{(\rho_s - \rho)gd}$	

3.1.1 Oppsett

Figur 3-1 viser plan og snittegning av modellen, d-renna. En luke oppstrøms plastringen sørger for at hastigheten på vannet kan styres slik at overkritisk strømming kan oppnås. Luka justeres med en manuell sveiv i stål. Manuelle ventiler regulerer vanntilførselen inn i renna. Strømningsavrettere oppstrøms luka gjør at vannet kan strømme rolig frem mot luka. Merk at injisert plastring ikke benyttes i dette forsøket, fordi det er effekten av steinenes form som undersøkes og det kan ikke være injisert plastring med kantet stein foran for eksempel en plastring med golfballer. Målesensorer oppstrøms og nedstrøms luka registrerer vanddybde.



Figur 3-1 Modeloppsett forsøk A, d-renna (Falkenberg 2013)

Dimensjonene til d-renna er gjengitt i tabell 3-2.

Tabell 3-2 Dimensjoner d-renna

	Verdi	Enhet
Lengde	25	m
Bredde	1	m
Høyde	2	m
Plastringsareal	1,47	m ²
Maksimal vannføring	600	l/s
Helning	0	grader

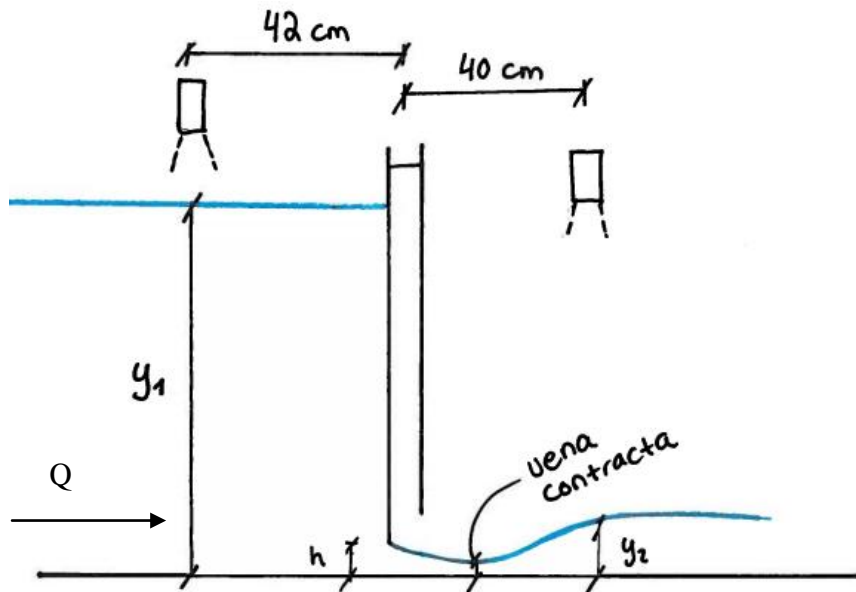
For noen tilfeller vil plastringsarealet være mindre enn angitt i tabell 3-2. Dette på grunn av at det ikke er nok steiner til å dekke hele arealet. Det plastres da i full bredde, mens lengden reduseres. For disse forsøkene må det undersøkes om formel 3-1 tilfredstilles slik at det kan antas at uniform strømning har utviklet seg.

$$\frac{L_p}{y_p} > 10 \quad (3-1)$$

L_p = lengde av plastring (m)

y_p = vanndybde over plastring (m)

Figur 3-2 viser et mer detaljert snitt av luka. Vena contracta tilsvarer det punktet der strømlinjene er parallelle med bunnen. Her er vanndybden på sitt laveste. Avstanden fra vena contracta til luka er omtrent en lukeåpning (Chow 1959). Som det kommer frem av figuren, ligger vena contracta i dette tilfelle mellom luka og nedstrøms målesensor. Det har ikke latt seg gjøre å måle vanndybden i vena contracta fordi det ikke er glass foran dette punktet, slik som foran plastringen. Målsensoren kan heller ikke plasseres nærmere luka, fordi da kommer strålen fra sensoren inn i lukeveggen. Dermed blir vanndybde ved vena contracta satt lik y_2 , selv om y_2 er noe høyere enn den faktiske vanndybden i vena contracta. I vedlegg B er flere detaljer knyttet til luka presentert.



Figur 3-2 Detaljer, luke

Kapasiteten gjennom luke er gitt av formel 3-2. Formelen er utledet ved en energibetraktning mellom oppstrøms nivå og vena contracta (Chow 1959).

$$Q = Chb\sqrt{2gy_1} \quad (3-2)$$

Q = lukekapasitet (m^3/s)

C = lukekoeffisient (-)

h = lukeåpning (m)

b = bredde (m)

y_1 = oppstrøms vanndybde (m)

Lukekoeffisienten, C , representerer kapasiteten i forhold til full kapasitet og er derfor en konstant mellom 0 og 1. Koeffisienten er avhengig av vannføring, lukegeometri og lukeåpning. Lukekoeffisienten for en luke med rett underkant, slik som er tilfelle i modellen, kan bli beregnet ved formel 3-3 (White 2011).

$$C = \frac{0,61}{\sqrt{1 + 0,61 \frac{h}{y_1}}} \quad (3-3)$$

Figur 3-3 viser eksempel på et forsøk gjort i d-renna. Plastringen blir overvåket manuelt og med videokamera under hele forsøket.



Figur 3-3 Eksempel på forsøk. Grå, små $Q=151,7$ l/s ved brudd

3.1.2 Måleinstrumenter

Tabell 3-3 gir en oversikt over utstyret som har blitt brukt i forsøket.

Tabell 3-3 Måleutstyr forsøk A

Enhet	Måleinstrument	Usikkerhet
Vannføring	Simens sitrans 7M Magflo MAG5000	0,5 %
Vandybde	Microsonic mic+ 340/IU/TC	1 %
Lukeåpning	Tommestokk/meterstav	
Brudd	Sony, handycam 120GB, 10,2 megapixels	

Vandybden over plastringen leses manuelt av fra gjennomsnittelige a-akse. Videokamera benyttes som et hjelpemiddel til å observere når og hva som skjer ved brudd.

Ultralydsensorene måler avstanden fra sensoren og ned til vannoverflaten, mens dataprogrammet Agilent Measurement Manager 2.2 gjør denne avstanden om til henholdsvis y_1 og y_2 . Programmet lager også et excelark fra hvert forsøk med y_1 , y_2 og vannføringsmålinger for hvert sekund så lenge forsøket varer.

3.1.3 Utførelse av plastringen

Det skal strebes etter å utføre plastringen slik det gjøres på byggeplass. Steinene plukkes tilfeldig ut en etter en fra en haug, men det blir gjort en rask vurdering på om steinen egner seg i den neste posisjonen. Den aller første steinen blir lagt i øverste venstre hjørnet av plastringen. En rekke fylles med stein om gangen. Steinene plasseres med a-aksen normalt på underlaget. Dette fordi det er den orienteringen som er mulig å få til med alle de ulike steinformene slik at det er mulig å sammenligne resultatene fra ulike forsøk etterpå. Den tyngste delen av steinen blir lagt mot underlaget. Det er ønskelig å unngå utstikkende stein. Generelt skal prinsippene fra kapittel 2-1 oppfylles. Plastringen blir lagt på et underlag av grus. Filterkravet fra kapittel 2-1 skal oppfylles. Hensikten med filteret i dette forsøket er først og fremst at steinene lettere skal forbli stabile under utlegging. I nedstrøms ende av plastringen er det en drenerende stålplate, både i forsøk der det plastres i full lengde og der det ikke gjøres det. Ettersom alle forsøkene skal utføres med overkritisk strømming, vil ikke denne stålplaten påvirke plastringen. Generelt er det viktig at forholdene mellom hvert forsøk er like slik at resultatene kan sammenlignes med hverandre.

Prinsippene for plastring som er forklart her, skal bidra til å gi den tettete pakningen som er mulig å oppnå for de aktuelle steinformene. Porøsitet av plastringen blir et mål på hvor tett steinene ligger. Porøsitet er generelt gitt av formel 3-4. Dersom definisjonene i formel 3-5 til 3-7 benyttes, kan det vises at porøsitet for et plastringsdekke kan beregnes som formel 3-8. Denne porøsiteten blir fra nå av kalt porøsitet A. Der formen til steinen er kjent, som for kube og golfball, kan volum av stein i tillegg beregnes eksakt. Dette blir fra nå av kalt teoretisk porøsitet.

$$n = \frac{V_p}{V_{tot}} = \frac{V_{tot} - V_s}{V_{tot}} \quad (3-4)$$

$$V_{tot} = Aa \quad (3-5)$$

$$V_s = \frac{W_s}{\rho_s} \quad (3-6)$$

$$\dot{\eta} = \frac{N}{A} \quad (3-7)$$

$$n = \frac{Aa - N \frac{W_s}{\rho_s}}{Aa} = 1 - \dot{\eta} \frac{W_s}{a\rho_s} \quad (3-8)$$

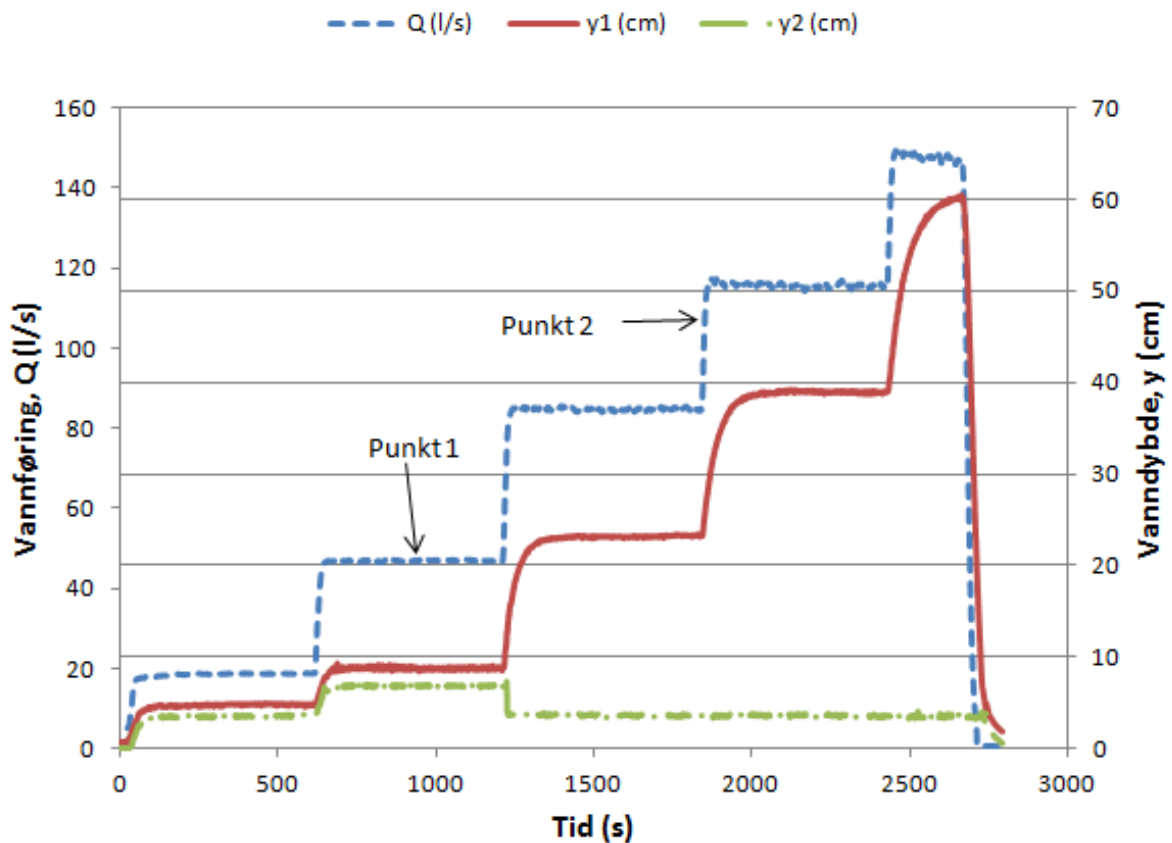
3.1.4 Registrering av brudd

Brudd i dette forsøket defineres som når en enkelt stein flyttes fra sin posisjon og føres med vannstrømmen bort fra plastringensarealet. Det er også av interesse å se når hele eller deler av plastringen blir revet med og eksponerer filteret under. Dette tilsvarer globalt brudd.

Lukeåpningen justeres slik at overkritisk strømning oppnås og kan variere fra forsøk til forsøk. Figur 3-4 viser hvordan vannføring og vanndybde oppstrøms og nedstrøms luke utvikler seg i et forsøk. Blå graf viser vannføring, rød graf viser vannstand oppstrøms luke og grønn graf viser vannstand nedstrøms luke. Vannføringen øker trinnvis, mens det tar noe tid for vannstanden bak luka for å bli konstant. Vanndybden nedstrøms luke øker på samme måte som vanndybden oppstrøms helt til lukestrømning inntreffer. Deretter blir vanndybden tilnærmet konstant etter luka. Målingene som er vist i figur 3-4 brukes til å beregne verdier som kan si noe om strømningsforholdet i modellen og stabiliteten til plastringen ved brudd. Tabell 3-4 gjengir disse verdiene. Diagrammer tilsvarende figur 3-4 for alle forsøkene er presentert i vedlegg C.

Vannføringen økes med 10 minutters mellomrom helt til brudd inntreffer. Brudd blir registrert manuelt ved en visuell inspeksjon av plastringen. Videokamera blir brukt som et hjelpemiddel til å finne bruddtidspunktet. I forsøk der det oppstår mye luftinnblanding, vil det være vanskelig å se hele plastringsdekket. Registrering av brudd kan dermed bli vanskelig. Det er da mulig å følge med på om det kommer steiner lenger ned i renna. Da vet man hvilket intervall brudd skjer i. Lyd av stein som fraktes med vannet kan også være en pekepinn på brudd. Hvor mye vannføringen øker med hvert 10. minutt, varierer mellom forsøkene og avhenger av steinenes størrelse og forventede stabilitet. Generelt vil vannføringsøkningen være mellom 20 l/s og 40 l/s, mens for golfballer som forventer å ha en lav bruddvannføring vil vannføringsøkningen være mye mindre. For å unngå å hoppe over riktig bruddvannføring vil vannføringsøkningene bli mindre når det observeres at brudd nærmere seg.

Tidspunktet for brudd blir målt i sekunder etter at forsøket startet. Når brudd inntreffer ved stabil vannføring, punkt 1 på figur 3-4, blir bruddvannføring beregnet som et gjennomsnitt av målingene fra dette intervallet. Grunnen til at det må beregnes et gjennomsnitt, er at vannføringsmålingene varierer noe innad i intervallet selv om dette ikke kommer tydelig frem på figur 3-4. Dersom brudd inntreffer under en økning i vannføring, punkt 2 på figur 3-4, blir bruddvannføringen beregnet til å være gjennomsnittet mellom to stabile vannføringer.



Figur 3-4 Registrering av vanddybde og vannføring ($h=8,5\text{cm}$, grå små)

Tabell 3-4 Beregnede verdier fra forsøk

Verdi	Formel
Kritisk vannhastighet (m/s)	$v_{krit} = \frac{Ch\sqrt{2gy_1}}{y_2}$
Stabilitetstall (-)	$St = \frac{\rho v_{krit}^2}{(\rho_s - \rho)gd}$
Froude tall (-)	$F_{krit} = \frac{v_{krit}}{\sqrt{gy_{krit}}}$
	$y_{krit} = \frac{Q}{b \times v_{krit}}$

3.2 Forsøk B

Hensikten med forsøk B er å kvantifisere egenskaper som friksjonsvinkel, porøsitet og innlåsningvinkel til ulike steinforme. Det påstås at en plastring er bedre jo lavere porøsitet og høyere innlåsningvinkel plastringen har. Ulike orienteringer av stein i plastring har ikke blitt undersøkt i forsøk, fordi det er kun en 90 graders orientering av a-aksen til steinen mot underlaget som lar seg gjøre for alle steinforme. Tilgjengelig tid har heller ikke tillatt flere forsøk.

3.2.1 Oppsett

Friksjonsvinkel

Figur 3-5 viser at friksjonsvinkelen finnes ved å snu en bøtte med stein langsomt på hodet slik at steinene blir liggende i en haug. Det er viktig at steinen ikke blir hellt ut, men at bøtten settes på hodet og dras sakte opp. Haugen blir oftest ganske ujevn og derfor måles vinkel med vinkelmåler rundt hele haugen og et gjennomsnitt blir funnet.



Figur 3-5 Registrering av friksjonsvinkel

Porøsitet

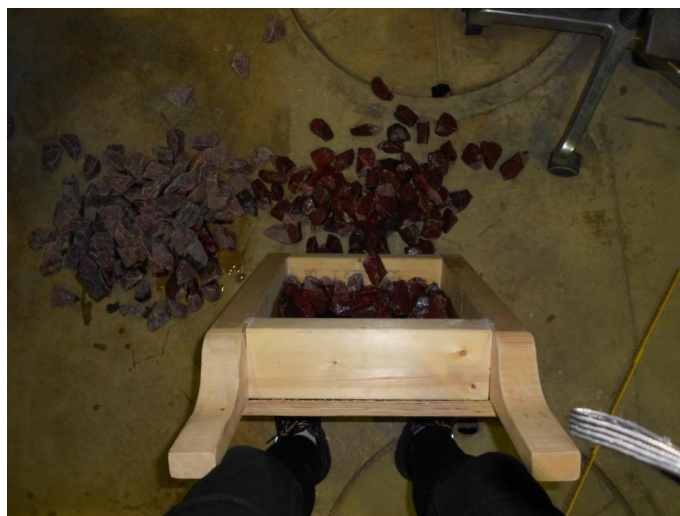
Figur 3-6 viser oppsettet når porøsitet skal måles. Plastringen lages mens boksen står på vekta og prinsippene for utførelse er de samme som i forsøk A foruten at plastringen legges på et filter. Dette fordi vann vil gjemme seg i filteret slik at porøsiteten som måles ikke blir riktig. Deretter tilsettes vann gradvis ved hjelp av litermål før vanddybde og vekt leses av. Det tilsettes vann helt til alle steinene er dekket av vann. Volumet av vann som tilsettes blir brukt til å finne porøsiteten.



Figur 3-6 Oppsett, måling av porøsitet

Innlåsningsvinkel

Vannet blir fjernet ved hevertprinsippet og boksen blir løftet forsiktig ned på gulvet. Innlåsningsvinkel blir funnet ved langsomt å heve den ene siden av boksen til en stein løsner og detter ut av plastringen, figur 3-7. Vinkelen boksen da har i forhold til gulvet måles da med vinkelmåler.



Figur 3-7 Registrering av innlåsningsvinkel

3.2.2 Måleinstrumenter og kalibrering

Tabell 3-5 gir en oversikt over utstyret som har blitt brukt i forsøk B.

Tabell 3-5 Måleinstrumenter forsøk B

Enhet	Måleinstrument	Usikkerhet
Vekt	OHAUS Ranger™ 3000 modell R31P30	1g
Vanddybde	Mitutoyo Absolute Digimatic Heightgauge	0,01mm
Akser (stein)	Tentools Digital Caliper 0-150mm	0,02mm
Tetthet	Litermål (1,5l)	10 ml
Innlåsingsvinkel	Protractor, GitHub (mobil app)	
Porøsitet	Boks av tre, (B*H*L) = 0,3*0,09*0,035 m ³	

Figur 3-8 viser treboksen



Figur 3-8 Treboksen (rutene på papiret er i cm)

Figur 3-9 viser kalibrering av forsøksoppsett for porøsitet. Den er laget fra fylling av vann i boksen. Grafen i figuren blir fra nå av kalt nullinja. Nullinja viser hvordan vanddybde øker etter hvert som vann tilføres boksen. Det at den er lineær betyr at veggene i boksen er vertikale, fordi en teoretisk vannstandsøkning ville vært lineær. Det har blitt tatt hensyn til at vekten synker når vann tilføres. Nullinja kan benyttes til å finne den målte porøsiteten i boksen. Porøsiteten kan beregnes ved formel 3-9. Utledningen av denne formelen er vist i vedlegg D.

$$n = \frac{W_w}{y \times \frac{W_{w0}}{y_0}} = \frac{W_w}{y} \times s \quad (3-9)$$

$$s = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_0}{W_{w0}} = 0,0096 \quad (3-10)$$

s = stigningstall (-)

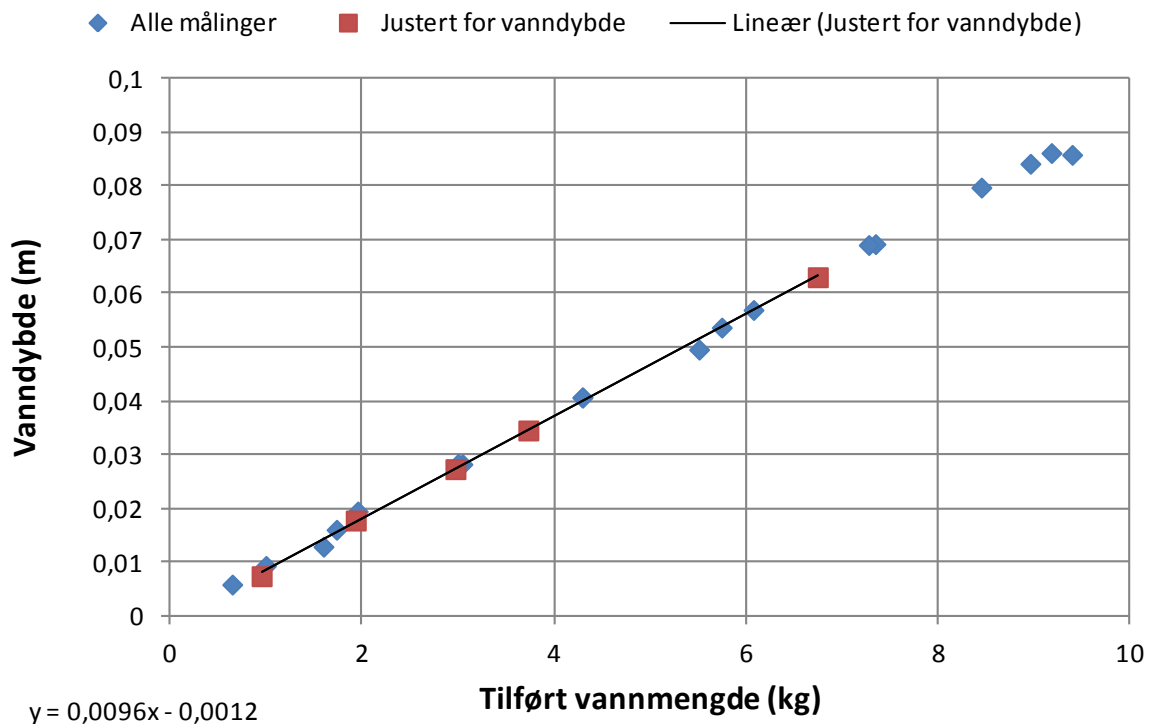
W_w = vekt av vann (kg)

W_{w0} = vekt av vann når boksen kun er fylt med vann (kg)

y_0 = dybde av vann når boksen kun er fylt med vann (m)

Δy = endring i y (m)

Δx = endring i x (kg)



Figur 3-9 Kalibrering av forsøk B, Nullinje

3.3 Utvelgelse av stein

Figur 3-10 viser en oversikt over de ulike steinformene som benyttes. Hver steinform har fått et navn som de heretter vil bli angitt med. Alle steinutvalgene benyttes i både forsøk A og B.

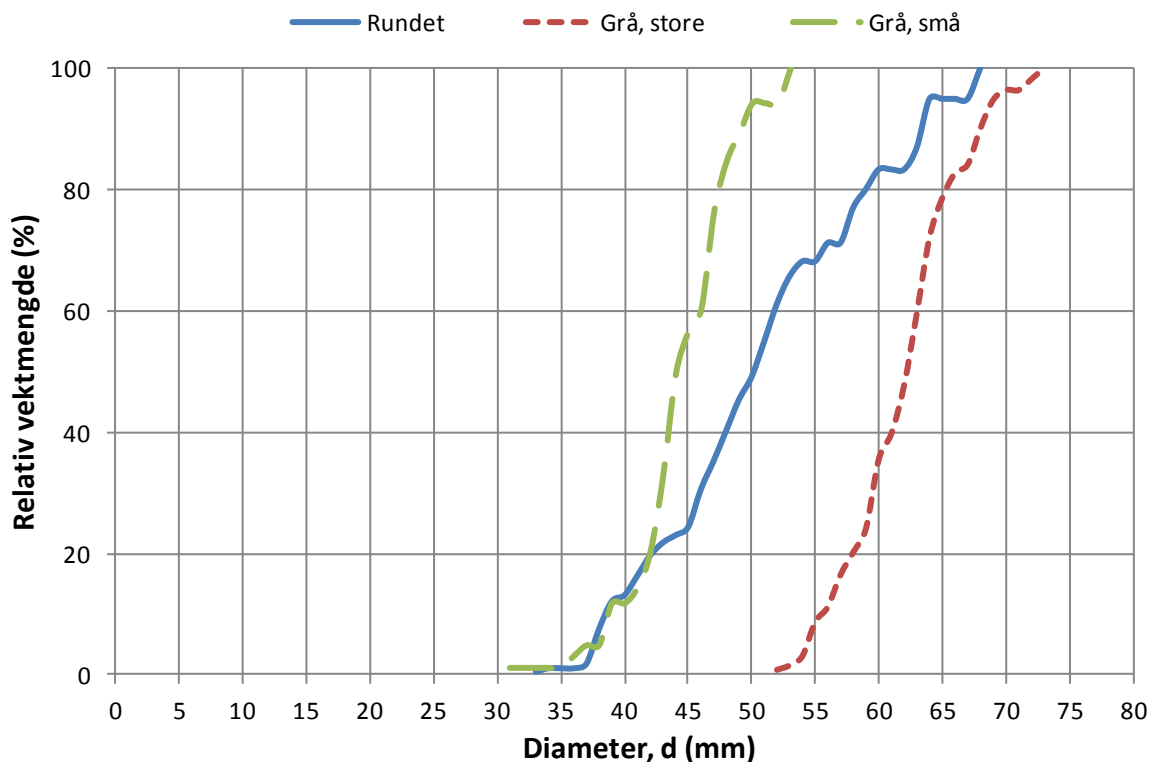


Figur 3-10 Steinformer som benyttes i forsøk

Det har blitt gjort 30 kontrollmålinger for grå, små og store, mens det for rundet stein har blitt målt 60 stein. For golfball, kuber og cubipods har det kun blitt målt fem stein ettersom disse utvalgene åpenbart er ensgraderte. Steinenes a-, b- og c-akser måles som vist på figur 3-11. Tetthet ble målt ved metoden beskrevet i kapittel 2.5.2. Grå, store og grå, små har blitt benyttet i tidligere forsøk ved NTNU. Gjennomsnittlig diameter og tetthet fra kontrollmålingene stemmer godt overens med det som har blitt funnet tidligere, men verdier fra kontrollmålingene benyttes videre. Figur 3-12 viser kornfordelingskurver for rundet og grå, små og store. De tre utvalgene er ensgraderte. Det er valgt å ta med resultatene fra kontrollmåling i metode kapitlet fordi steinene er en del av utgangspunktet for forsøket.



Figur 3-11 Måling av steinens størrelse



Figur 3-12 Kornfordelingsdiagram

Tabell 3-6 gjengir verdier for gjennomsnittelige parametere som de forskjellige steinutvalgene har. Parameterne er tidligere beskrevet i kapittel 2.5. Zinggs viser prosent av antall stein i utvalget som karakteriseres som sfæriske (kule). På denne måten vil kube og cubipod være 100 % sfæriske. Derfor er det nødvendig med en visuell vurdering for å bestemme form i tillegg. Diameter for alle steinformene beregnes ved formel for ekvivalent kulediameter, formel 2-14. Merk at forskjellen mellom diameteren til de ulike steinformene er relativt liten, mens variasjonen i tetthet er noe større. Kube, cubipods og golfball blir fra nå av omtalt som likeformet stein. En fellesbetegnelse på grå, små, grå, store og rundet vil fra nå av være kantet og rundet stein. Utvalget med kuber og cubipod er laget av to forskjellige betongblandinger. Golfballene er laget av plast. Kantet og rundet stien er naturlige bergarter.

Tabell 3-6 Egenskaper til steinformene

Form	Diameter mm	Tetthet kg/m³	Blc -	LT -	K -	Zinggs % sfærisk	Fl₂ -	Cu -
Golfball	43	1125	52	1,0	1	100	1	1
Grå, små	44	2985	9	3,0	0,61	0	2,43	1,21
Kube	40	2439	101	1,0	1,00	100	1	1
Cubipod	39	2050	35	1,1	0,95	100	1	1
Rundet	47	2757	16	2,1	0,71	38	1,75	1,41
Grå, store	62	3039	11	2,4	0,63	6,8	1,93	1,12

4. Resultater

I dette kapitlet blir resultater og observasjoner fra forsøk A og B presentert. Resultater fra hvert enkelt forsøk er gjengitt i vedlegg C og D for henholdsvis forsøk A og B.

4.1 Forsøk A

Totalt ble det gjort 21 forsøk i d-renna og tabell 4-1 gir en oversikt over disse. Forsøk 3 og 4 er ikke tatt med ettersom et dropp mellom renne og plastring gjorde at det var nødvendig med noen justeringer. Nummer henviser til rekkefølgen forsøkene ble gjort i, nummer 21 var det siste forsøket som ble gjort. Der ikke annet er angitt, er steiner blitt lagt i forband. Videre gir tabell 4-2 en oversikt over målte verdier ved brudd for hvert forsøk, mens tabell 4-3 gir en oversikt over beregnede verdier ved brudd for hvert forsøk.

Tabell 4-1 Oversikt over utførte forsøk i d-renna

Nr	Form	d mm	L _p m	h m	Antall stk
1	Grå, stor	62	1,47	0,085	583
2	Grå, stor	62	1,47	0,09	606
21	Grå, stor	62	1,47	0,085	567
5	Golfball	43	1,47	0,035	903
6	Golfball	43	1,47	0,035	908
7	Golfball	43	1,47	0,035	908
19	Golfball	43	1,47	0,03	897
8	Rundet	47	1	0,085	771
9	Rundet	47	1	0,085	775
10	Rundet	47	1	0,035	775
11	Kube*	32	0,84	0,085	752
12	Kube	32	0,84	0,085	752
13	Kube	32	0,84	0,085	743
14	Kube*	32	0,84	0,085	743
15	Cubipod	39	0,84	0,06	550
16	Cubipod	39	0,81	0,03	539
20	Cubipod	39	0,85	0,045	669
17	Grå, små	44	1,47	0,075	1203
18	Grå, små	44	1,47	0,03	1215

*Steinene i forsøk 11 og 14 ble ikke lagt i forband

Tabell 4-2 Oversikt over målte verdier ved brudd

Nr	Form	Q _{brudd} (l/s)	y ₁ (m)	y ₂ (m)	y _p (m)
1	Grå, stor	196	0,76	0,042	mangler
2	Grå, stor	248	1,11	0,044	0,140
21	Grå, stor	202	0,84	0,044	0,100
5	Golfball	12,7	0,05	0,029	0,040
6	Golfball	12,6	0,05	0,031	0,050
7	Golfball	11,8	0,04	0,022	0,045
19	Golfball	14,7	0,04	0,025	0,051
8	Rundet	135	0,42	0,045	0,110
9	Rundet	146	0,47	0,042	0,100
10	Rundet	91	0,74	0,045	0,075
11	Kube	136	0,36	0,046	0,055
12	Kube	129	0,39	0,043	0,062
13	Kube	115	0,33	0,042	0,062
14	Kube	122	0,22	0,043	0,055
15	Cubipod	121	0,50	0,026	0,067
16	Cubipod	97	0,56	0,016	0,055
20	Cubipod	102	0,49	0,020	0,050
17	Grå, små	148	0,55	0,036	0,100
18	Grå, små	152	0,70	0,034	0,095

Tabell 4-3 Oversikt over beregnede verdier ved brudd

Nr	Form	C	v krit	vp	St	Fp	F krit	Q _{luke}
		-	m/s	m/s	-	-	-	l/s
1	Grå, stor	0,57	4,5		16,0		7,0	187
2	Grå, stor	0,58	5,6	1,8	24,9	1,5	8,5	244
21	Grå, stor	0,57	4,6	2,0	16,7	2,0	7,0	198
5	Golfball	0,42	0,5	0,3	4,2	0,5	0,9	13,8
6	Golfball	0,42	0,5	0,3	4,1	0,4	0,8	14,3
7	Golfball	0,38	0,5	0,3	5,0	0,4	1,1	11,3
19	Golfball	0,42	0,5	0,3	4,1	0,4	0,9	11,6
8	Rundet	0,54	2,9	1,2	10,4	1,2	4,3	132
9	Rundet	0,55	3,4	1,5	14,0	1,5	5,2	141
10	Rundet	0,59	1,8	1,2	3,8	1,4	2,7	79
11	Kube	0,53	2,6	2,5	12,1	3,4	3,9	120
12	Kube	0,54	2,9	2,1	15,4	2,7	4,5	127
13	Kube	0,53	2,7	1,9	12,9	2,4	4,2	113
14	Kube	0,49	2,0	2,2	7,1	3,0	3,1	86
15	Cubipod	0,57	3,9	1,8	38,7	2,2	7,8	104
16	Cubipod	0,59	3,7	1,8	33,5	2,4	9,3	59
20	Cubipod	0,58	4,0	2,0	40,1	2,9	9,1	80
17	Grå, små	0,56	3,9	1,5	17,3	1,5	6,5	139
18	Grå, små	0,59	1,9	1,6	4,4	1,7	3,4	66

4.1.1 Beskrivelse av bruddforløp

Under følger en beskrivelse av hvordan steinene oppførte seg under forsøkene og hvordan bruddforløpet utartet seg.

Grå, store og små

I starten av forsøkene var strømmingen rolig, det var god sikt og enkelt å lese av vandybde over plastring. Etterhvert som vannføringen økte, ble det mer luftinnblanding i form av luftbobler i strømmen, se figur 4-1. Strømmen ble hvit og det var ikke mulig å se hele plastringsdekket. Vandybden over plastringslaget var da svært ujevn og vanskelig å måle. Steiner kunne begynne å vibrere tidlig i forsøket for så å stoppe opp igjen. Det var ikke nødvendigvis den steinen som begynte å vibrere først som gikk til brudd. Noen steiner skiftet orientering men beholdt fortsatt sin opprinnelige plass. Før brudd kunne det observeres at stein kilte seg ut av sin plass for så å legge seg på tvers oppå plastringen. Der kunne den gjerne bli liggende en stund før den ble revet med av strømmen. Noen ganger krevdes det en økning i vannføring før steinen ble revet med. Ved brudd oppsto det luftvirvler der steinen hadde ligget, se pil på figur 4-1. Det mest kritiske området var i starten av plastringen. Måten grå, stor og små oppførte seg ved brudd blir fra nå av omtalt som klassisk bruddforløp.



Figur 4-1 Forsøk grå, store ved brudd $v_{krit} = 4,56 \text{ m/s}$

Rundet

Forsøket utartet seg på samme måte som forklart for grå, men med den viktige forskjellen at det var noe mindre luftinnblanding. Utstikkende steiner så ut til å være mest ustabile. Figur 4-2 viser en stein som er på vei ut av sin posisjon, mens figur 4-3 viser en plastring med rundet stein før og etter brudd. Her kommer det tydelig frem at steiner har forandret orientering og lagt seg på tvers oppå andre steinene, se piler. I tillegg observeres det at det er de store steinene som flytter seg fra sin posisjon. Det ble gjort tre forsøk med rundet stein, ett av forsøkene gikk til globalt brudd kort tid etter brudd, mens de to andre ble stoppet ved brudd.



Figur 4-2 Stein på vei opp fra sin posisjon



Figur 4-3 Plastring før forsøk (tv.) og etter (t.h) brudd, $v_{krit} = 2,9$ m/s

Golfballer

Idet vannet begynte å strømme over golfballene tok det kort tid før ballene begynte å gynte. Noen golfballer lettet litt fra underlaget. Det var ingen luftinnblanding. Før brudd inntraff så det ut som golfballer ble løftet ut av sin posisjon for så å legge seg oppå plastringen. Der kunne de bli liggende helt til vannføringen ble så stor at en ball trillet over plastringen og forsvant ned renna og brudd inntraff. Brudd inntraff som regel i starten av plastringen. Figur 4-4 viser situasjonen etter at brudd hadde inntruffet og det vises at flere og flere baller legger seg oppå plastringen før de trillet over plastringen. I dette forsøket ble globalt brudd vurdert til å ha inntruffet 5 min etter brudd.



Figur 4-4 Plastring etter brudd $v_{krit}=0,46$ m/s

Kube

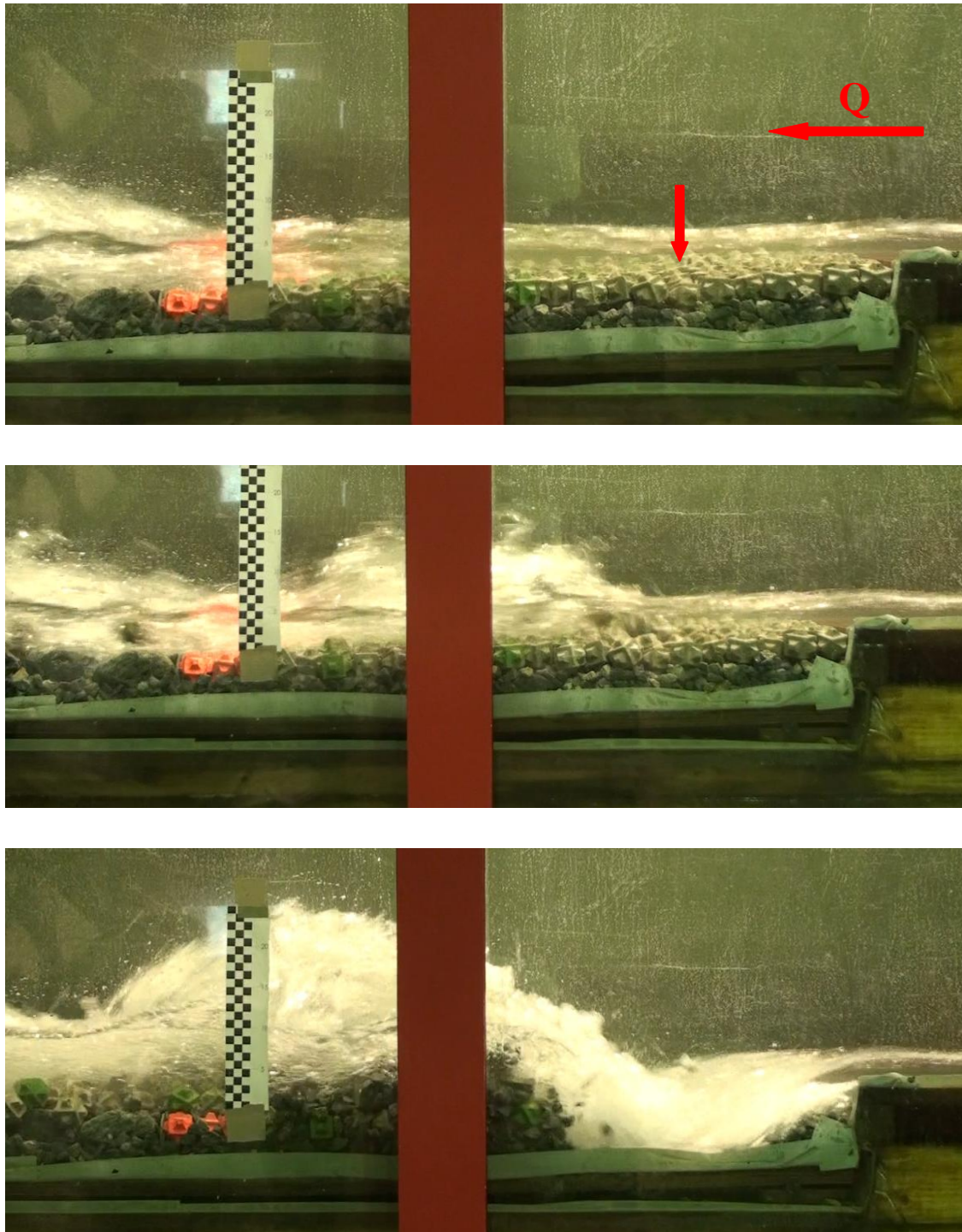
Det var lite luftinnblanding under forsøket. Det var lett å overvåke hele plastringssdekket. Eneste forvarsel om brudd var at den steinen som gikk til brudd først kilte seg litt ut fra de andre kubene, slik at den sto høyere. Nesten umiddelbart etter at den første steinen gikk til brudd inntraff globalt brudd ved at store flak med stein løsnet. Det så ut som om steinene hang fast i hverandre i det de gikk til brudd, slik at flak løsnet. Figur 4-5 viser en plastring med kuber etter brudd. Tre av forsøkene med kuber fikk progressivt brudd, mens det i det ene forsøket skjedde brudd i overgangen til rista som utgjør enden på plastringen og forsøket ble stoppet.



Figur 4-5 Plastring etter brudd, $v_{krit} = 2,0$ m/s

Cubipod

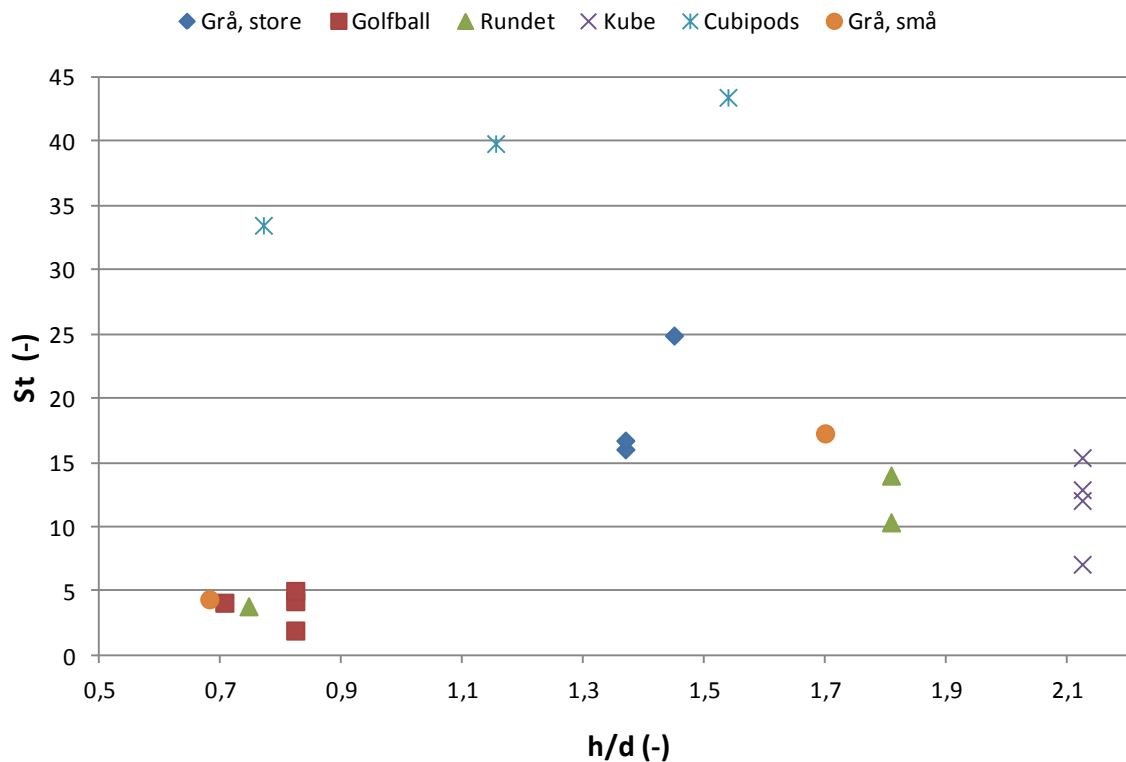
Det var noe luftinnblanding under forsøk med cubipod. Det var ingen forvarsel om brudd og det var flak som gikk til brudd, altså cubipod hang sammen i hverandre i det de gikk til brudd. Ved å studere video som ble tatt av forsøket, viste det seg at området der brudd inntraff hevet seg litt før det gikk til brudd, men dette var ikke mulig å observere manuelt. Figur 4-6 viser utviklingen av brudd. Hele sekvensen fra helt stille til fullstendig medrivelse tok (figur 4-6) 5 sekunder. Bruddet var progressivt.



Figur 4-6 Utvikling av brudd (5 sek fra bilde 1 til 3) Brudd ved $v_{krit}=4,0$ m/s

4.1.2 Stabilitetstall

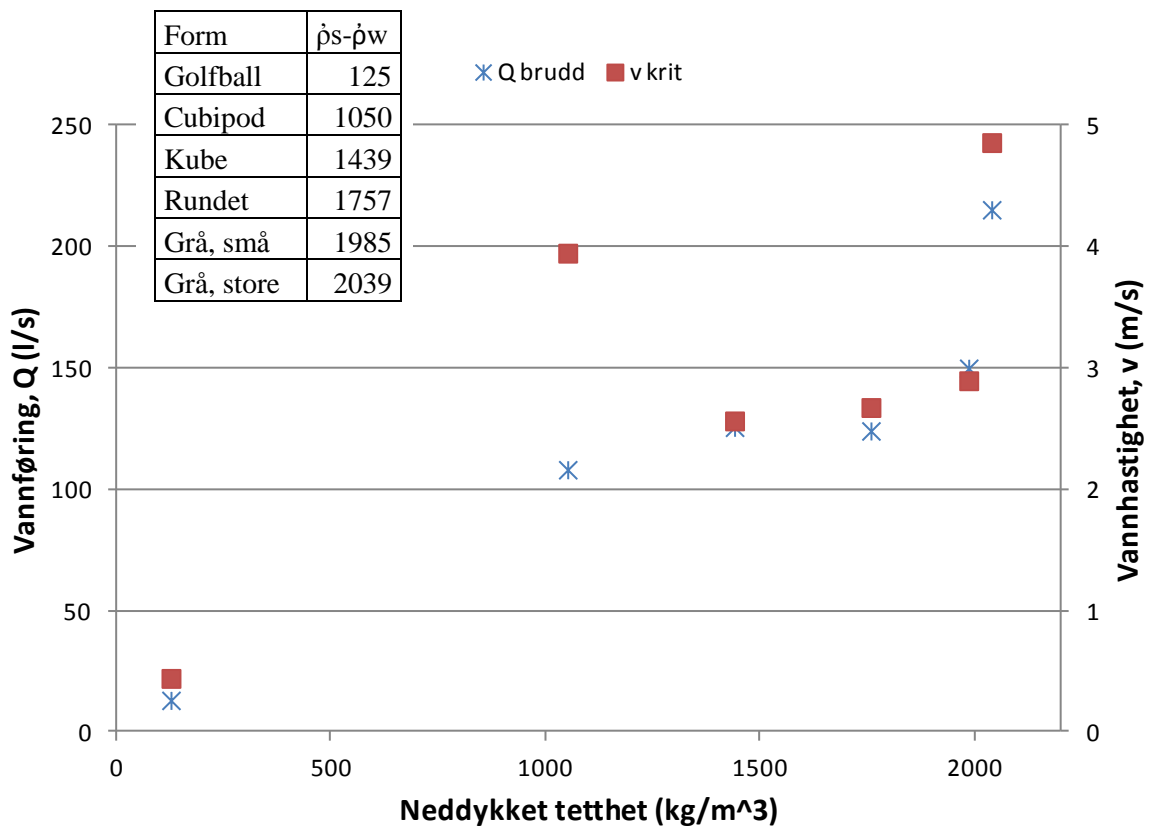
Stabilitetstallet, i tabell 3-4, er et mål på stabiliteten til plastringen. Figur 4-7 viser oppnådde stabilitetstall i d-renna. De ulike steinformene grupperer seg noe og det kommer frem at forsøk med cubipod, grå, store og til dels kube har høye stabilitetstall. Det ser ut til at rundet og grå, små har stor variasjon i stabilitetstall. I tillegg er det mulig å få et inntrykk av variasjonen i lukeåpning for forsøkene. Det ser ut til at grå, små, rundet og cubipod har en stor variasjon i lukeåpning i forsøkene.



Figur 4-7 Stabilitetstall oppnådd i d-renna

4.1.3 Neddykket tetthet

Figur 4-8 viser neddykket tetthet til de ulike steinformene og gjennomsnittelig vannføring og kritisk vannhastighet ved brudd. Det kommer tydelig frem at tillatt vannføring og kritisk vannhastighet øker med økende neddykket tetthet. Kritisk vannhastighet for cubipod skiller seg ut noe som blir nærmere omtalt i kapittel 5.1. En ser også at grå, små har vesentlig lavere kritisk hastighet enn grå, stor selv om tettheten nesten er den samme. Rundet har nesten samme kritisk hastighet som kuber til tross for vesentlig større tetthet.



Figur 4-8 Neddykket tetthet mot gjennomsnittelig vannføring og kritisk vannhastighet ved brudd

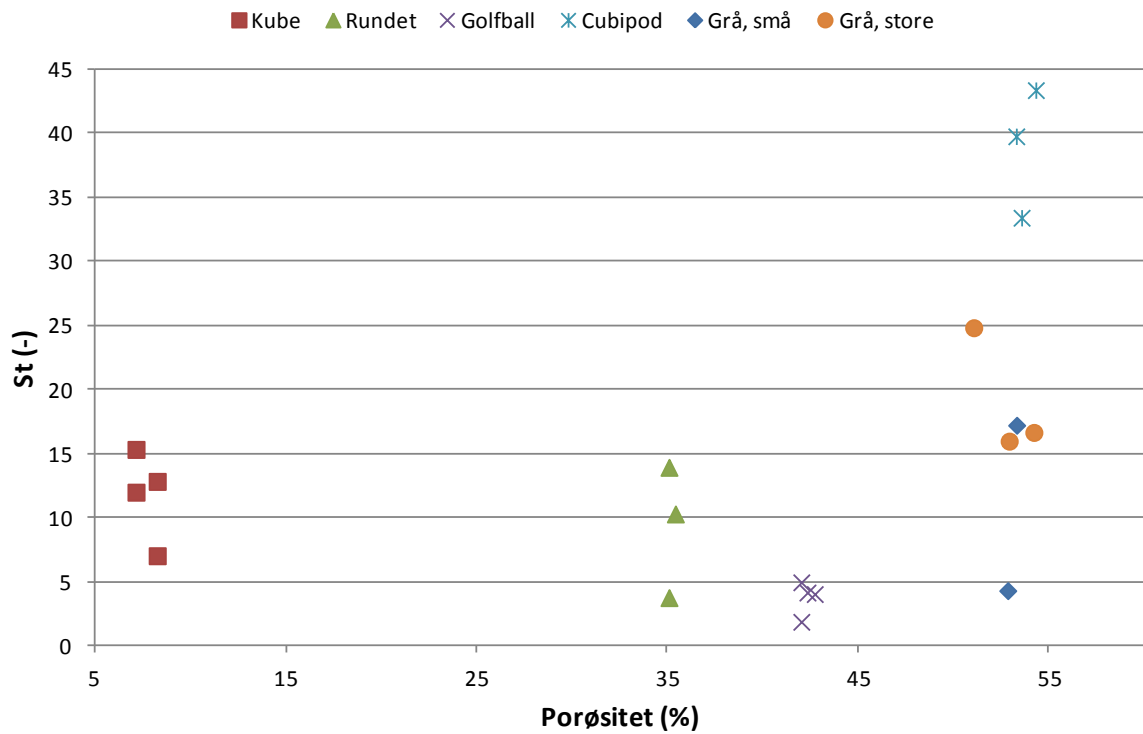
4.1.4 Porøsitet

Tabell 4-4 viser porøsitet for plastring i d-renna. Porøsiteten varierer ikke mye mellom forsøk gjort med samme steinform. Generelt ser det ut til at jo flere steiner som er i plastringen jo lavere blir porøsiteten, men det finnes tilfeller der dette ikke gjelder. For eksempel har forsøk 16 færre steiner enn forsøk 15, men høyere porøsitet. Der teoretisk porøsitet har blitt beregnet, avviker denne lite fra porøsitet beregnet ved formel 3-8.

Tabell 4-4 Porøsitet forsøk A, beregnet ved formel 3-8

Nr	Form	Antall stk	Porøsitet A %	Teoretisk n %
1	Grå, stor	583	53	
2	Grå, stor	606	51	
21	Grå, stor	567	54	
5	Golfball	903	42	42
6	Golfball	908	42	41
7	Golfball	908	42	41
19	Golfball	897	43	
8	Rundet	771	35	
9	Rundet	775	35	
10	Rundet	775	35	
11	Kube	752	7	8
12	Kube	752	7	8
13	Kube	743	8	9
14	Kube	743	8	9
15	Cubipod	550	54	
16	Cubipod	539	53	
20	Cubipod	569	53	
17	Grå, små	1203	53	
18	Grå, små	1215	52	

Figur 4-9 viser porøsiteten til plastringen i d-renna i forhold til stabilitetstallet ved brudd. Plastring med kuber gir lavest porøsitet, men ikke størst stabilitet. Plastring med cubipod har høy porøsitet og stabilitet, mens plastring med golfballer har høy porøsitet og lav tillatt stabilitet. Det er ikke mulig å se noen konkret trend mellom stabilitetstall av plastring og porøsitet.



Figur 4-9 Porøsitet ved formel 3-8 og stabilitetstall

4.1.5 Tid

Tabell 4-5 gir en oversikt over tiden som ble brukt til å lage plastringen i d-renna med hver steinform i rekkefølge fra kortest til lengst tid. Merk at det er gjennomsnittsverdier for alle forsøk som er angitt i tabellen. Det kommer frem at det tar kortest tid å plastre med golfballer, mens det tar lengst tid å plastre med grå, store. Generelt tar det kortere tid å plastre med steiner som er likeformet fremfor kantet og rundet stein.

Tabell 4-5 Tid utførelse av plastring, d-renna

Steinform	Antall stein stk	Tid/stein s/stk
Golfball	615	3,3
Kube	748	3,4
Cubipod	829	4,9
Grå, liten	1209	5,7
Rundet, stor	774	6,2
Grå, stor	585	9,6

Tabell 4-6 viser at det tar kortere tid å lage en plastring når personen har gjort det flere ganger. Reduksjon er forskjellen i tid mellom første gang man utførte en plastring av steinformen og siste gang man utførte en plastring av den samme steinformen. Det er imidlertid ikke mulig å påvise at plastringen tåler mer for hver gang eller at porøsiteten avtar. Det eneste som kommer frem er at effektiviteten i utlegging av plastring øker, og at den gir samme stabilitet og porøsitet av plastringslaget.

Tabell 4-6 Reduksjon i tid (min)

Steinform	Reduksjon
Golfball	4
Kube	-1
Cubipod	9
Grå, små	10
Grå, store	4

4.2 Forsøk B

Det har blitt utført forsøk med alle steinformene, men porøsitet for steinformen grå, store mangler. Det ble utført porøsitets- og innlåsningforsøk både med og uten filter, men det ble vurdert at forsøk uten filter ga mest realistisk mål på porøsiteten. Det var heller ingen nevneverdig forskjell på innlåsningvinkel med og uten filter.

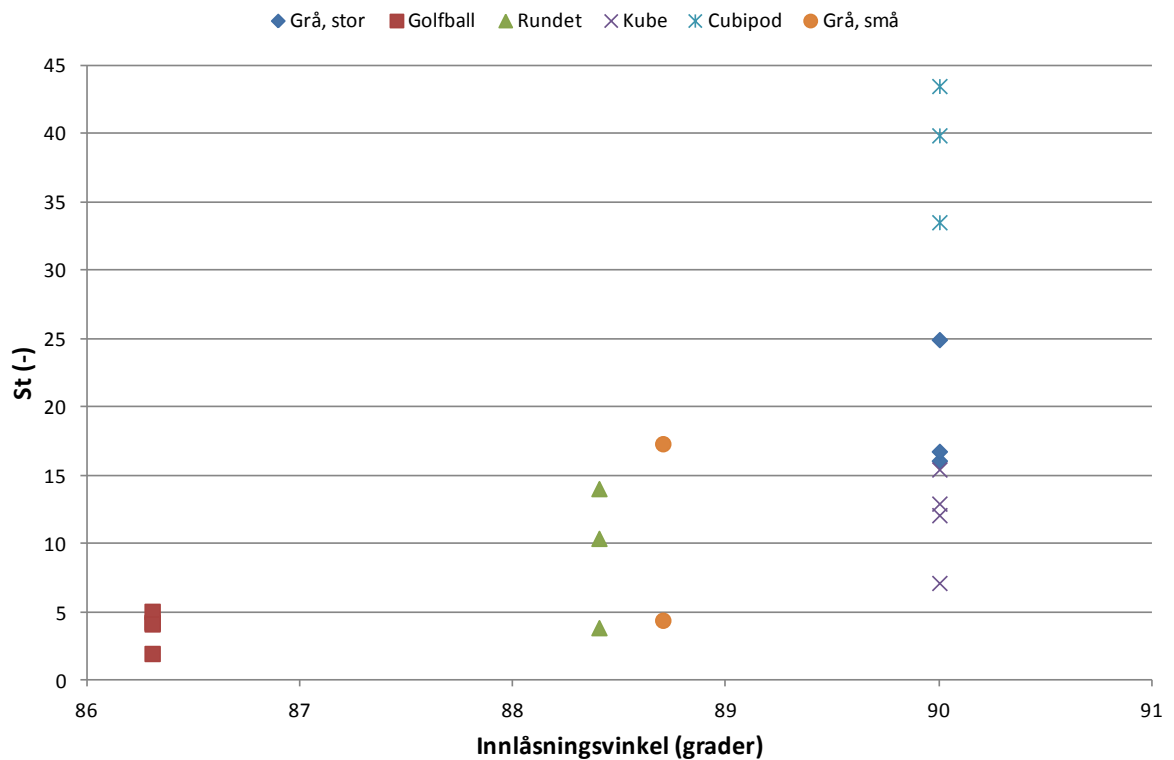
Innlåsningvinkel

Tabell 4-7 viser innlåsningvinkelen plastringslaget med forskjellig steinform hadde. Det er liten forskjell i innlåsningvinkel for de ulike steinformene.

Tabell 4-7 Innlåsningvinkel

Steinform	Grader
Golfball	87
Kube	90
Cubipod	90
Grå, små	89
Rundet	88
Grå, store	90

Figur 4-10 viser innlåsning i sammenheng med stabilitetstallet. Det ser ut til at stabiliteten av plastringen øker når innlåsningvinkelen øker.



Figur 4-10 Stabilitetstall og innlåsningvinkel

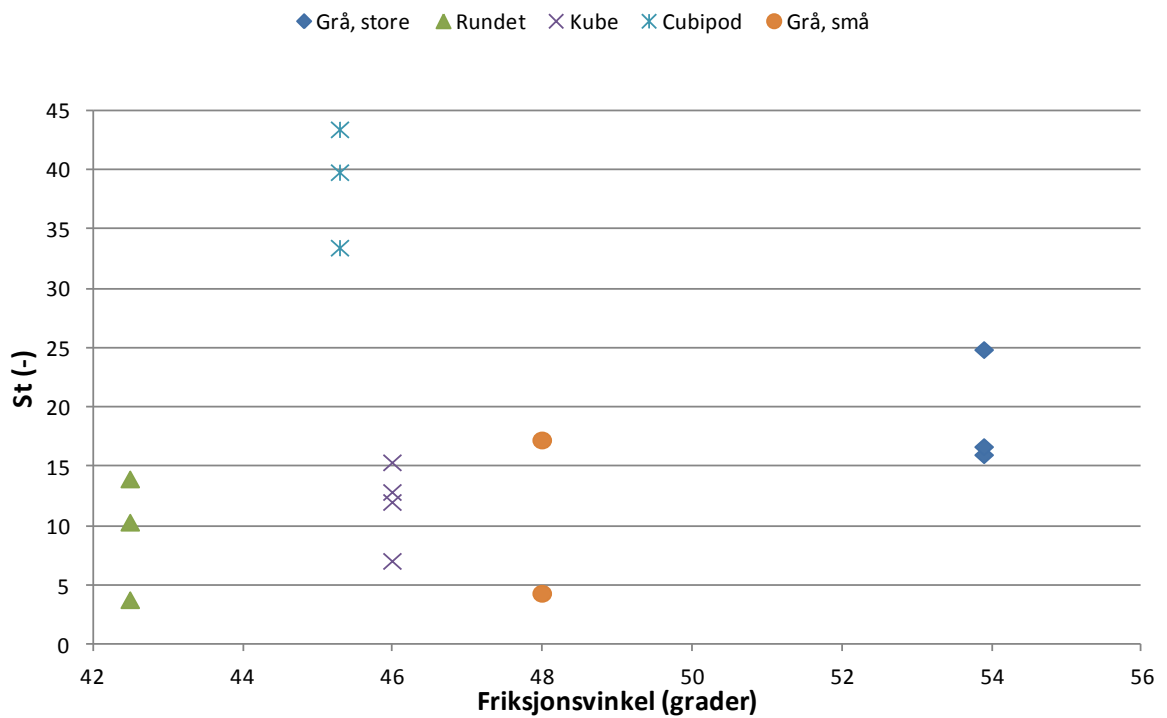
Friksjonsvinkel

Tabell 4-8 angir friksjonsvinkelen til de ulike steinformene. Golfballene skiller seg ut med en friksjonsvinkel på 0 grader, mens grå, store har størst friksjonsvinkel.

Tabell 4-8 Friksjonsvinkel

Steinform	Grader
Golfball	0
Kube	46
Cubipod	45
Grå, små	48
Rundet	43
Grå, store	54

Figur 4-11 viser friksjonsvinkel i sammenheng med stabilitetstall. Golfballer er ikke med for å gi et bedre bilde av de andre steinformene ettersom friksjonsvinkelen er 0°. Det ser ut til at det er en svak trend hvor høyere friksjonsvinkel gir bedre stabilitet. Cubipod skiller seg ut ved å ha en av de laveste friksjonsvinklene og høyest stabilitetstall.

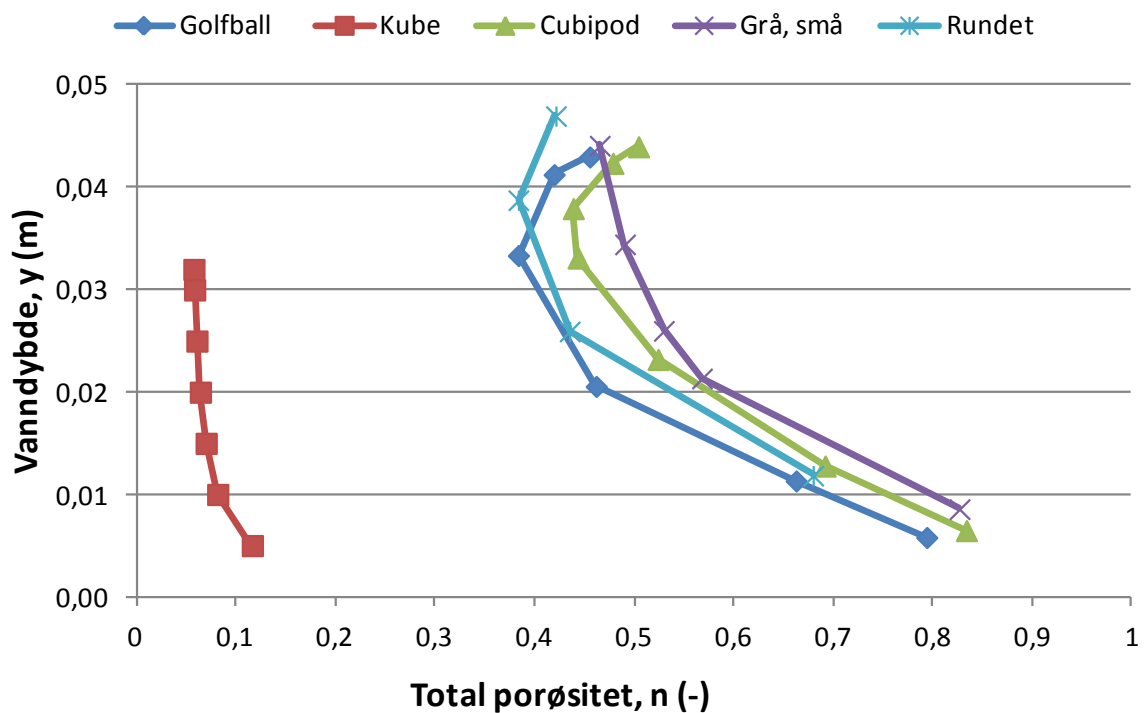


Figur 4-11 Stabilitetstall og friksjonsvinkel

Porøsitet

Figur 4-12 viser den totale porøsiteten ved en gitt dybde for de ulike steinformene. Utledning og forklaring på hvordan porøsiteten har blitt beregnet, er beskrevet i vedlegg D. Videre blir denne porøsiteten kalt porøsitet B. Dybden er satt til gjennomsnittelig diameter. For plastring med kuber har porøsitet blitt målt til sidekanten til kuben og ikke gjennomsnittelig diameter.

Av figur 4-12 kommer det frem at porøsiteten er størst nær bunnen av boksen. Porøsiteten avtar helt mot midten av steindiameteren for så å øke mot toppen av plastringen igjen. Det siste punktet er total porøsitet for hele plastringen. Plastring med kube har nesten konstant porøsitet gjennom hele dybden. Plastring med kuber gir desidert lavest total porøsitet, mens plastring med cubipod har høyest total porøsitet.



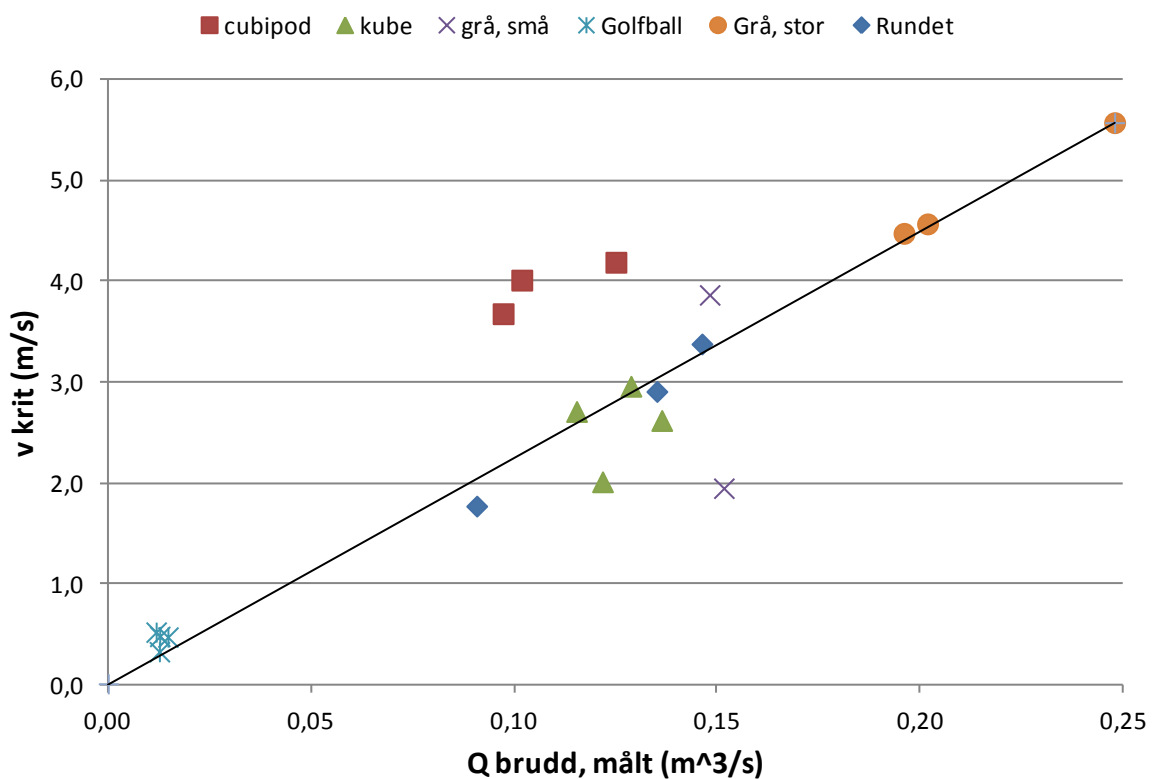
Figur 4-12 Total porøsitet, plastring i boks

5. Diskusjon

5.1 Cubipod

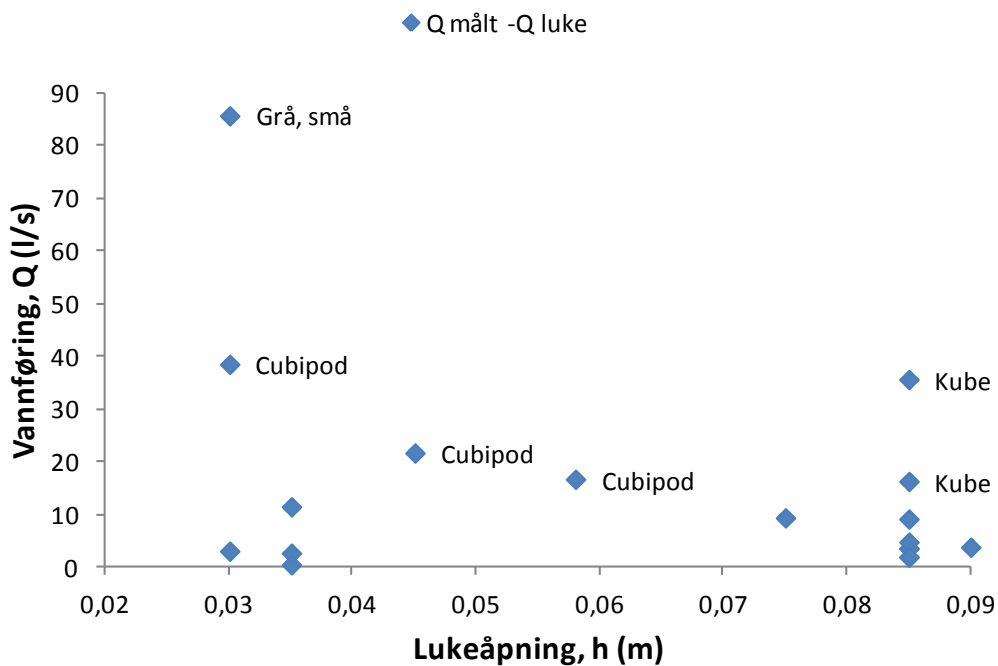
Figur 4-8 viste at det kunne være noe merkelig med målingene for cubipod fordi den gjennomsnittlige kritiske vannhastigheten ikke fulgte samme trend som de andre steinformene. De tre forsøkene med cubipod stemmer godt overens med hverandre slik at sannsynligheten for at for eksempel feil lukeåpning har blitt notert er og dermed verdiene i seg selv er gale, er lav. Årsaken kan dermed være forskjell i grensebetingelser utført for disse forsøkene.

Figur 5-1 viser hvordan målte verdier for vannføringer stemmer overens med beregnet kritisk hastighet. En ser at spesielt forsøk med cubipod avviker fra linja for god korrelasjon. Det ser ut til at sammenhengen mellom vannhastighet og vannføring er annerledes for cubipod enn de andre steinformene.



Figur 5-1 Korrelasjonsdiagram

Når vann pumpes inn i modellen må et basseng bak luka fylles opp før vann kan strømme nedover renna. Vannføringen som måles av sensorene er derfor ikke lik som vannføringen gjennom luka. Figur 5-2 viser forskjellen mellom målt vannføring inn i modellen og vannføring gjennom luka beregnet med formel 3-2. Dersom de to figurene 5-1 og 5-2 sees i sammenheng kan det virke som at forsøk hvor forskjellen i vannføringene er stor er også korrelasjonen dårlig. Dette gjelder til dels for kube, grå, små, men da spesielt for cubipod. Det er en svak trend at denne forskjellen er stor ved små lukeåpninger. Forsøk med golfballer er gjort med liten lukeåpning, men forskjellen her er liten fordi lukestrømning så vidt inntraff.



Figur 5-2 Forskjell mellom målt vannføring og vannføring gjennom luka

Forskjellen mellom de to vannføringene er også avhengige av hvordan vann dybde før og etter luka utvikler seg. Ved små lukeåpninger blir vann dybden oppstrøms luka høy, mens vann dybden nedstrøms blir lav. I tabell 4-2 kan en se, dersom en ser bort fra forsøkene med golfballer, at forsøkene 15,16 og 20 med cubipod er de eneste hvor y_2 er tilnærmet lik 2 cm mens for de andre forsøkene er y_2 tilnærmet lik 4,5 cm. Tilsvarende ser en i tabell 4-1 at lukeåpning er nesten dobbelt så stor for de andre forsøkene som for cubipod.

Derfor virker det rimelig at forsøk med cubipod korrelerer dårlig fordi forsøkene har gjennomgått ulike grensebetingelser. Det er derfor grunn til å tro at cubipod tåler høy kritisk vannhastighet selv om tettheten er en av de laveste. En bør imidlertid generelt være forsiktig når man sammenligner forsøk gjort med forskjellig grensebetingelser.

5.2 Effekten av steinens form

Fra resultatene kommer det frem at ulike steinforme har forskjellig respons når de blir utsatt for strømmende vann. For å kunne si noe om hvordan steinens form påvirker stabiliteten til en plastring må parametere som porøsitet, innlåsningvinkel, friksjonsvinkel og andre forhold sees i sammenheng.

Stabilitet

Avgjørende for god stabilitet ser ut til å være høy neddykket tetthet av stein, høy innlåsningvinkel og i noen grad høy friksjonsvinkel. Det at høy neddykket tetthet er viktig stemmer godt overens med de analytiske formlene i kapittel 2.3.1. De nevnte faktorene viste en tydelig trend på at jo høyere verdi jo høyere var kritisk hastighet, men med unntak av cubipod som hadde høyere stabilitetstall enn grå, stor selv om tettheten og friksjonsvinkelen var blant de laveste. Årsaken til dette kan være at innlåsningen i plastringen med cubipod har vært høyere enn innlåsningvinkelen tilsier og at innlåsning er svært avgjørende for stabiliteten. Foruten cubipod fulgte de andre steinformene trenden, hvor grå, stor hadde best stabilitet og golfball lavest stabilitet. Dessuten ga grå, stor vesentlig bedre stabilitet enn grå, små selv om neddykket tetthet bare var litt større. Det tyder på at størrelsen på steinen også har stor betydning ved at stor stein gir bedre stabilitet.

I kapittel 2.5.5 ble det nevnt at lav porøsitet sannsynligvis er mest gunstig for å oppnå bra stabilitet. Derfor var det uventet at en steinform med så høy porøsitet, som cubipod hadde, var steinformen med høyest stabilitetstall. Plastring med kube hadde desidert lavest porøsitet, likevel var stabilitetstallet omtrent som for de andre steinformene. Men det var også steinforme med høy porøsitet som hadde dårlig stabilitet, slik at det heller ikke er mulig å si at høy porøsitet gir bra stabilitet. For et plastringsdekke med så lav porøsitet som kube hadde, vil store trykkforskjeller mellom over og undersiden av steinene kunne oppstå slik at plastringen vil være svært utsatt for store løftekrefter noe som kan være årsaken til at plastring med kube ikke hadde høyest kritisk vannhastighet.

Utlekking av plastring

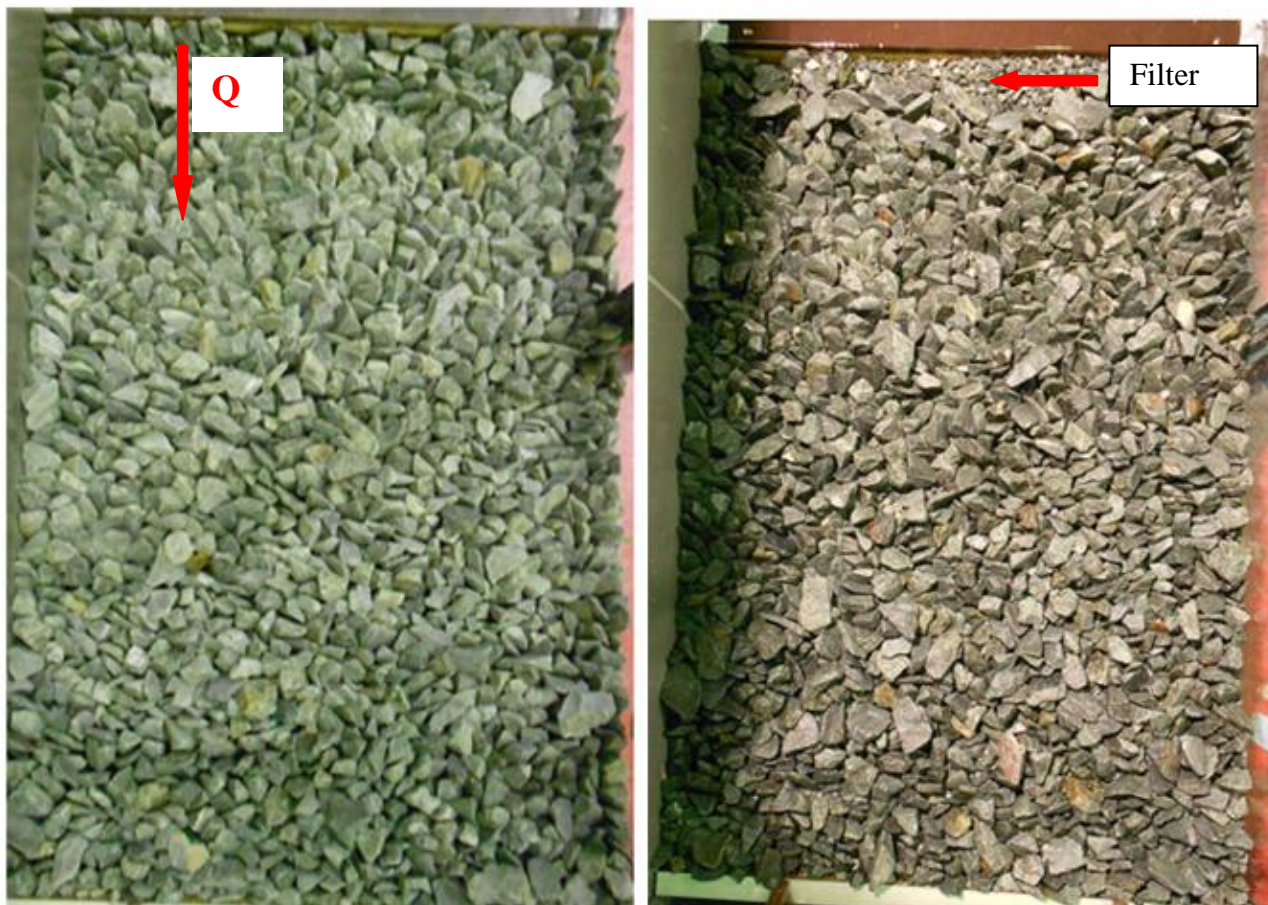
Utlekking av plastring med likeformet stein tok kortere tid per stein enn grå og rundet stein. Grunnen til dette antas å være at lav variasjon i steinform og steinstørrelse gjør at det er enkelt å finne den tetteste posisjon steinene kan ha. Det tok dobbelt så lang tid per stein å plassere rundet stein, som har størst variasjon i steinstørrelse, enn golfballer som det er raskest å plastre med. Det var ingen trend mellom hvor effektiv utførelsen av plastringen var i forhold til hvor stabil plastringen var.

Bruddforløp

Felles for kube og cubipod, som hadde et progressivt bruddforløp, er en innlåsningvinkel på 90° , friksjonsvinkel på 45° og det at steinene er likeformet. Ettersom friksjonsvinkelen verken er høyest eller lavest i forhold til de andre steinformene er sannsynligvis likeformet stein og høy innlåsning faktorer som kan føre til et progressivt bruddforløp. Likeformet stein kan bidra til progressivt brudd fordi det vil være enkelt å unngå utstikkende stein, slik at plastringen virker mer som en enhet. Høy innlåsning fører også til at steinene henger mer fast i hverandre.

Kantet og rundet stein varierte i form og størrelse innad i utvalgene. Dette kan være noe av årsaken til at plastring med disse steinformene oppførte seg annerledes ved brudd enn cubipod og kube. Under forsøk ble det observert at selv om brudd inntraff, ble steinene rundt stående igjen og det var vanskelig å få plastring til å gå til globalt brudd med den trykkehøyden som var tilgjengelig i modellen. For grå, store og grå, små ble vannføringen i gjennomsnitt økt med 20 % utover bruddvannføring uten at plastringen gikk til globalt brudd. Ved denne vannføringen hadde flere steiner blitt revet med av strømmen, men plastringen i sin helhet var inntakt. Figur 5-1 viser plastring med grå, små etter brudd for forsøk 17 og 18. Det var da flere steiner som la seg oppå plastringen og filter kom til syne når vannføringen økte utover bruddvannføringen. Det var et forsøk med rundet stein som gikk til globalt brudd kort tid etter at brudd inntraff, men det har ikke latt seg gjøre å finne årsaken til at dette har skjedd.

Plastring med golfballer hadde verken et progressivt bruddforløp eller bruddforløp som kantet og rundet stein. Det som skilte golfball ut fra de andre steinformene var en friksjonsvinkel på 0° og veldig lav neddykket tetthet. Plastring med golfballer hadde i tillegg den lavest innlåsningvinkelen. Lav tetthet er sannsynligvis hovedårsaken til lav kritisk hastighet. Det virket som at når først en ball ble flyttet vekk fra sin posisjon, ble ikke ballene rundt holdt igjen fordi støtten forsvant. Mellom brudd og globalt brudd skilte kun noen minutter.



Figur 5-3 tv. Forsøk (17) avsluttet ved brudd. th. Forsøk (18) avsluttet etter 24 % økning i vannføring etter brudd.

Sammenligning kantet og rundet stein

Som nevnt i kapittel 2.5.3, har tidligere modellforsøk vist at rauset sikring med rundet stein trenger omtrent 40 % større diameter enn kantet stein for å være stabil. I forsøk A var kritisk hastighet for rundet stein i gjennomsnitt er 6,9 % lavere enn for grå, små selv om diameteren til de to steinformene er tilnærmet lik. Noe av årsaken til at grå, små har tilnærmet like ”dårlig” stabilitet som rundet kan være at utvalget hadde et høyt lengde- tykkelsesforhold i tillegg til høy flathetsfaktor og lav blokkighet. Det er altså relativt vanskelig å oppnå høy tetthet og god innlåsning for disse steinene siden de har en ugunstig form. En annen årsak er at i en plastring oppstår det innlåsning mellom stein for både rundet og kantet stein, mens i en rauset sikring vil innlåsningen sannsynligvis være høyere for kantet stein. I dette forsøket hadde plastring med grå, små en innlåsning på 89°, mens plastring med rundet hadde en innlåsning på 88°. Grå, store har en kritisk hastighet som er 2,2 m/s eller 44 % høyere enn rundet. Men grå, store har en diameter som er 15mm større enn rundet noe som er en så stor forskjell at sammenligningen ikke blir realistisk.

5.3 Innlåsing

Årsaken til at innlåsningsvinkel varierte lite fra steinform til steinform, kan være måten forsøket er utført på. Figur 4-10 viste at liten variasjon i innlåsningsvinkel kan gi stor variasjon i stabilitetstall. I tillegg var det tre steinforme med samme innlåsningsvinkel, men forskjellig stabilitetstall, noe som tyder på at også andre parametere har betydning for stabiliteten. En annen årsak kan være at innlåsing som faktisk oppstår i en plastring, er annerledes enn det som kommer frem av innlåsningsvinkelen.

Kube, cubipod og grå, store hadde alle en innlåsningsvinkel på 90° . Felles for disse steinformene er at de er kantete. Årsaken til at grå, store hadde høyere innlåsningsvinkel enn grå, små kan være en mindre gradering innad i utvalget. Samt at steinene er større og har høyere tetthet. Plastring med golfballer og rundet stein hadde de to laveste innlåsningsvinklene, dermed forsterkes påstanden om at kantet stein gir bedre innlåsningsvinkel.

Under utleggelsen av plastring i d-renna ga cubipod en opplevelse av god innlåsing mellom steinene. Det virket som steinene hang fast i hverandre. Grunnen til at spesielt cubipod gir denne opplevelsen i forhold til kube og grå, store som hadde samme innlåsningsvinkel, kan være den spesielle formen cubipod har. Utstikkerne kan hukes i hverandre slik at god innlåsing oppnås. Dette forsterker antakelsen om at innlåsing som oppstår i en plastring er annerledes enn det bildet innlåsningsvinkelen gir.

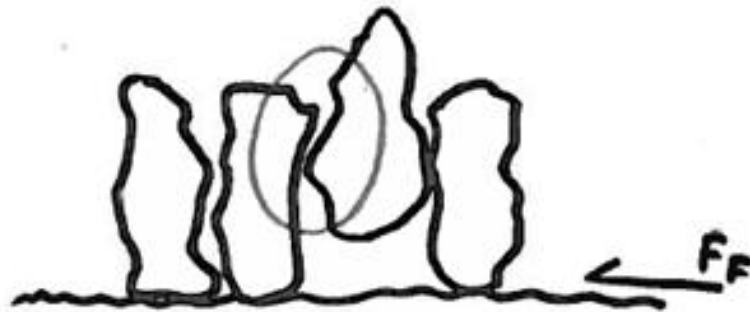
Utlegging i forband ga også en følelse av bedre innlåsing enn ikke utlegging i forband. Det virket som steinene i plastringen oppførte seg mer samlet når de lå i forband. Plastring i forband med golfball ga en innlåsningsvinkel på $87,2^\circ$ mot $86,3^\circ$ mot plastring uten forband. Denne forskjellen virker liten i seg selv, men med tanke på at alle steinformene hadde innlåsningsvinkler mellom 85° og 90° var økningen relativt stor. Det har ikke blitt gjort forsøk med golfballer uten forband i d-renna slik at hvor mye økningen påvirket stabiliteten er uvisst. For kubene var det to forsøk med forband og to uten i d-renna, det var en svak økning i stabilitet i forsøkene med forband.

5.4 Friksjon

Golfball hadde en friksjonsvinkel på 0° , mens rundet hadde den laveste friksjonsvinkelen av de resterende steinformene. Dette kan tyde på at friksjonsvinkel er høyere for kantet stein. Rundet stein har sannsynligvis mindre friksjonsvinkel enn kantet stein fordi de er nedslitte i kantene og har derfor mindre ruhet. Kube og cubipod hadde mindre friksjonsvinkel enn kantet stein noe som kan tyde på at likeformet kantet stein har lavere friksjonsvinkel enn "vanlig" kantet stein. Årsaken kan være at "vanlig" kantet stein kan henge igjen på hverandre flere steder enn likeformet kantet stein. I dette forsøket hadde cubipod og kube lavere tetthet enn grå noe som kan ha bidratt til en lavere friksjonsvinkel. Det at kantet stein og høy tetthet gir større friksjonsvinkel stemmer bra med teorien i kapittel 2.5.8.

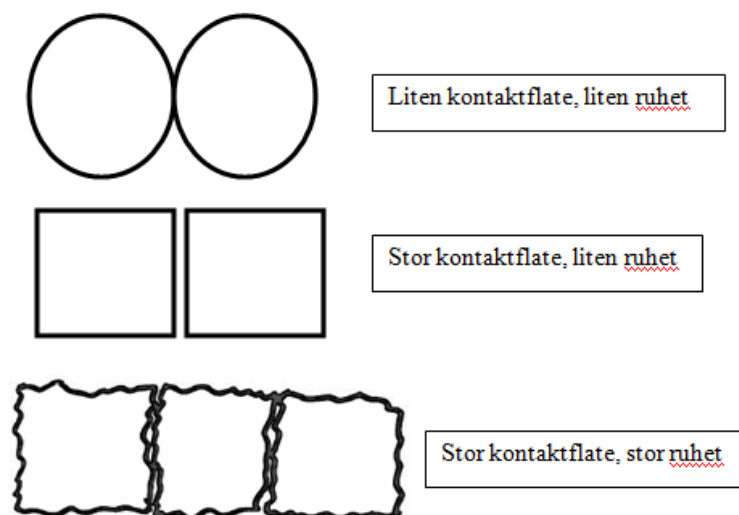
Friksjonsvinklene som er målt i forsøket, er relativt høye i forhold til det som er vanlig for granulært materiale, som er rundt 38° til 40° (Tarbuck & Lutgens 2006). Noe av årsaken til dette kan være at haugen der friksjonsvinkelen ble målt, var ganske liten, slik at målingene ble svært unøyaktige.

Høy løftekraft vil redusere friksjonskraften som er tegnet inn på figur 5-2. Når det ikke er mer friksjonskraft igjen, vil steinen begynne å løfte seg. Denne løftingen vil bli motvirket av at det er en bevegelse mellom stein, se ring på figur 5-2. Eksempelen viser hvordan kantet stein lirket seg ut av posisjon før brudd i d-renna. Samme prinsipp gjaldt for golfball og kube, men prosessen var annerledes for hver av steinformene sannsynligvis fordi kontaktarealet mellom steinene er annerledes, se figur 5-3. Golfballer har svært lite kontaktareal slik at når vannføringen ble høy nok, og friksjonen ikke lenger kunne holde tilbake prosessen spratt, ballen ut av posisjon. Kuber har stort kontaktareal slik at kubene sakte beveget seg oppover og det krevdes en mye høyere hastighet. Idet kubene kom høyt nok oppsto progressivt brudd.



Figur 5-4 Friksjon mellom steiner

Jo tettere steinene blir plassert, jo større blir kontaktarealet mellom steinene for kantet. Høyere kontaktareal vil gjøre det vanskeligere for en stein å bevege seg oppover, ut av posisjon. Motstanden mot bevegelse er friksjon slik at friksjonen øker når kontaktarealet mellom steinene øker. Denne friksjonen mellom steinene avhenger også av ruheten til steinene. Med tanke på dette har eller kan friksjon muligens ha større innvirkning enn det som kommer frem i resultatene, men det er vanskelig å kvantifisere denne friksjonen ettersom det er vanskelig å måle kontaktarealet for kantet, rundet og cubipods. I tillegg til å bestemme om ønsket kontaktareal er oppnådd.



Figur 5-5 Kontaktflater for ulike steinforme

5.5 Porøsitet

Porøsiteten til plastring med ulik steinform har blitt funnet på to måter, porøsitet A (d-renna) og porøsitet B (boksen). Porøsitet A tar hensyn til antall stein, a-akse, tetthet, bunnareal og vekt, dette er en formel. Porøsitet B derimot beregnes på grunnlag av tilført vannmengde og tilhørende vanddybde i boksen, dette er målt porøsitet. Resultatene er gitt i tabell 5-1 hvor det kommer frem at de to måtene gir ulike verdier for porøsitet. Det at det er to måter å finne porøsitet på er i seg selv en årsak til at det har blitt forskjellig resultater, men i tillegg kan det være andre årsaker som forsterker forskjellene. I tabell 5-1 blir årsaker som kan virke inn på hver av steinformene nevnt og det har videre blitt gitt en kort forklaring på hva som menes med disse årsakene.

Forskjellen mellom de to måtene å bestemme porøsitet på er likevel ikke stor nok til at et bilde på porøsiteten til ulike steinforme ikke kommer frem. I tillegg stemmer teoretisk porøsitet godt overens med porøsitet A og B der dette har blitt beregnet. Resultatene for porøsitet kan derfor anses for å være pålitelige.

Det må også nevnes at porøsiteten innover i plastringen i boksen figur 4-12, har en utvikling som passer godt overens med forsøk beskrevet i kapittel 2.5.5.

Tabell 5-1 Total porøsitet A og B (%) og årsak

Form	A	B	Høyest	Årsak
Golfball	42,2	45,5	B	Større grenseflater Unøyaktigheter
Rundet	35,1	42,1	B	Filter i d-renna, ikke i boksen Større grenseflater Unøyaktigheter
Kube	7,6	5,7	A	Filter i d-renna Forband i A ikke i B Unøyaktigheter
Cubipods	53,7	50,4	A	Porøsitet B beregnet til a-akse og ikke diameter pga. spesiell utforming av cubipod Filter i d-renna (ujevnt) Unøyaktigheter
Grå, små	53	46,5	A	Filter i d-renna, ikke i boksen Unøyaktigheter

Filter

Plastringen ligger på et filter av grus i porøsitet A, men ikke i porøsitet B. Grunnen til at filter ikke ble brukt i boksen, selv om det bidrar til lettere utlegging av stein, var at vann "gjemte" seg i filteret. Tilført vannmengde ble registrert, mens vanndybde ikke endret seg før den steg over filteret noe som gjorde at porøsiteten ble urealistisk høy. For kantet og rundet stein er det vanskelig å få steiner til å stå støtt i ønsket orientering uten filter. Filter kan dermed bidra til en større porøsitet i d-renna enn i boksen. For likeformet stein kan filteret i d-renna dermed føre til et ujevnt underlag som kan bidra til mer hulrom mellom steinene og dermed høyere porøsitet enn i boksen.

Forband

Utlegging i forband er antatt å gi en tettere pakning og dermed lavere porøsitet enn utlegging uten at steinene ligger i forband.

Grenseflater

Boksen har et mindre plastringsareal enn i d-renna slik at en større andel av steinene i porøsitet B treffer vegger. Dette kan være ugunstig ettersom det sannsynligvis blir mer hulrom mellom stein som treffer vegg enn det blir mellom stein som grenser mot andre stein.

Unøyaktigheter

Usikkerheter rundt forsøket blir nærmere omtalt i kapittel 5.7. Det er likevel verdt å merke seg at for porøsitet A er antall stein en viktig faktor når porøsitet blir beregnet, slik at en feiltelling fører til uriktig verdi av resultatet. I tillegg kan det være mulig at det har blitt brukt mer håndmakt ved utlegging av plastring i boksen enn i d-renna.

5.6 Kritisk vannhastighet

Kritisk hastighet fra forsøk A blir i dette kapitelet sammenlignet med etablerte beregningsmetoder fra kapittel 2.4.1, analytiske formler for hastighet fra kapittel 2.3.1 og hastighet over plastring.

5.6.1 Sammenligning med etablerte beregningsmetoder

Kritisk hastighet sammenlignes kun med de metodene fra tabell 2-3 som anses for å være mest relevant i forhold til forsøkene om er utført. Etersom plastring på horisontalt underlag sammenlignes med formler som inkluderer helning, blir helningen antatt å kunne beregnes som energilinja fra vanddybde oppstrøms luke til starten av plastringen, formel 5-1. Verdier for Manningstall og helning for de ulike steinformene er gjengitt i tabell 5-2. Manningstall har blitt hentet fra Fergus et al. (2010).

$$S = \frac{h_f}{L} = \frac{v_{krit}^2}{M^2 R_y^{4/3}} \quad (5-1)$$

h_f = friksjonstap (m)

R_y = hydraulisk radius (m)

M = manningstall ($m^{1/3}/s$)

Tabell 5-2 Input sammenligning

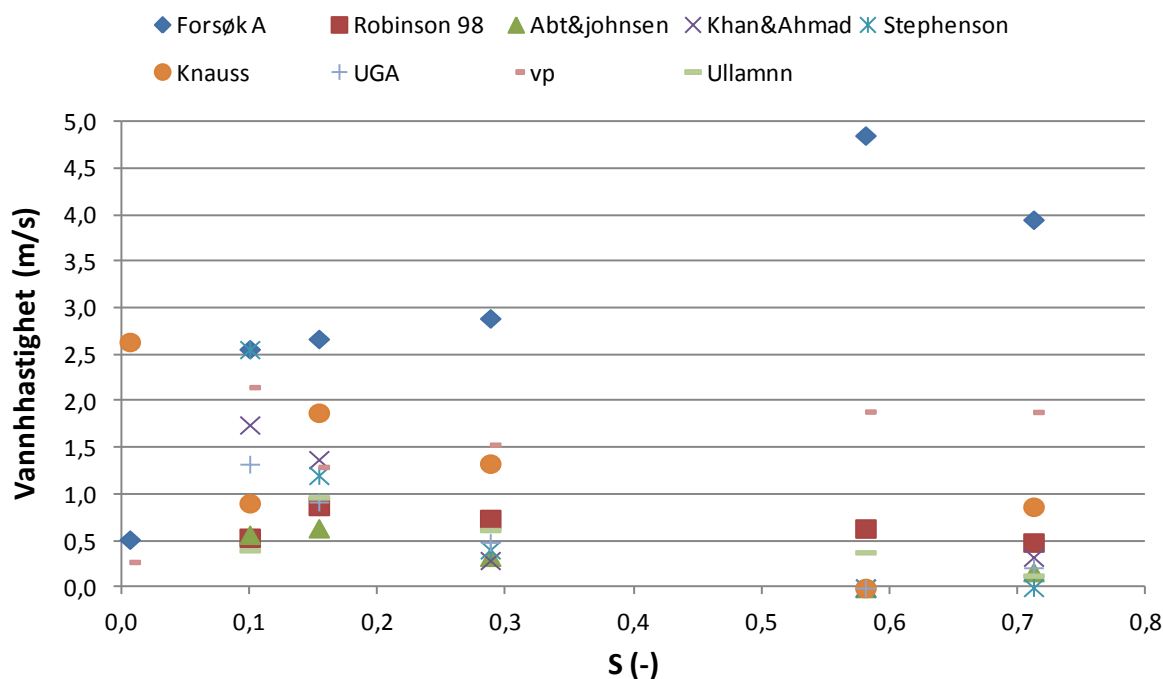
Form	S (-)	M ($m^{1/3}/s$)
Golfball	0,06	80
Grå, små	0,29	55
Grå, store	0,58	55
Cubipod	0,71	65
Rundet	0,15	60
Kube	0,10	70

I tabell 5-3 er det angitt tillatte helninger for de aktuelle beregningsmetodene og hvordan brudd har blitt definert. De fleste metodene gjelder for helninger opp til 40 %.

Tabell 5-3 Tillatt helning og definisjon av brudd for beregningsmetoder

Forfatter	Smin %	Smax %	Brudd
Robinson(1998)	1	40	Underliggende materiale eksponert
Abt&Johnsen (1991)	1	20	Begynnende steinbevegelse
Ullmann Gallegos&Abt (UGA) (2008)	10	40	Underliggende materiale eksponert
Khan&Ahmad (2011)	1	40	Underliggende materiale eksponert
Stephenson (1979)	8	20	Begynnende steinbevegelse
Knauss (1979)	20	67	Ikke kjent
Ullmann (2000)	20	30	Begynnende steinbevegelse

Figur 5-4 viser beregnet hastighet fra etablerte beregningsmetoder og kritisk hastighet fra forsøk A. Punktene i figuren er gjennomsnittsverdier fra målinger fra forsøk med samme steinform. Det ser ut til at kritisk hastighet fra forsøk A generelt er større enn tillatt hastigheter beregnet ved de etablerte beregningsmetodene i tabell 5-3. Forskjellene er spesielt store der helningen er stor, i dette tilfellet over 40 %. Her mangler det altså gode metoder for dimensjonering. Legg merke til at UGA gir mindre tillatt hastighet enn forsøk A (kritisk hastighet) og hastighet over plastring for rundet stein, selv om denne metoden er utviklet for rundet stein. Hastighet over selve plastringen (vp) er også plottet inn for orientering, men denne verdien er veldig unøyaktig ettersom vanddybden er avlest manuelt og vanddybde varierte mye. Det er derfor best å sammenligne beregningsmetodene med kritisk hastighet. Ullmann som er avhengig av rundhetsgrad gir spesielt lav tillatt vannhastighet.



Figur 5-6 Kritisk hastighet ved forsøk mot hastigheter fra etablerte beregningsmetoder

De etablerte beregningsmetodene er utviklet for rauset sikring og ikke plastring, metodene tar derfor ikke høyde for innlåsningen mellom steiner som oppstår i en plastring. Dette kan være noe av årsaken til at kritisk hastighet fra forsøkene generelt er større. Det må imidlertid nevnes at det er flere svakheter ved denne sammenligningen og disse oppgis videre:

- Helning i d-renna har blitt beregnet på en forenklet måte. Det er for eksempel ikke tatt hensyn til energitap gjennom luka. I tillegg er noen av helningene oppnådd i forsøkene utenfor tillatt helning til de ulike beregningsmetodene. For eksempel golfball hvor helning var på 0,8 %, som er utenfor alle gyldighetsområdene. Det var kun Knauss som ga realistiske verdier for hastighet for golfballer, men denne metoden gjelder egentlig for helninger fra 20 % og oppover. Slik at man må være kritisk når metoder benyttes utenfor gyldighetsområdet.
- Ekvivalent kulediameter har blitt brukt istedenfor median steindiameter. En bedre tilnærming enn ekvivalent kulediameter kunne vært å bruke b-aksen til steinene.
- I noen tilfeller har andre egenskaper enn helning, som er utenfor gyldighetsområdet til beregningsmetodene blitt brukt som for eksempel høyere eller mindre spesifikk tyngdetetthet eller graderingstall.
- Manningstall har blitt antatt uten særlig grunnlag.
- Brudd defineres forskjellig fra forsøk A og forskjellig fra metode til metode. Der brudd defineres som begynnende steinbevegelse er forskjellen som kommer frem av figur 5-4 større enn det den virkelige er. Der brudd defineres som når underliggende materiale eksponeres er forskjellen som kommer frem av figur 5-4 mindre enn det den egentlig er.

Selv om det er mange usikkerheter rundt denne sammenligningen, kommer det frem at det mangler gode metoder for dimensjonering av nødvendig steinstørrelse i en plastring i bratte elver. I tillegg til at bruk av metoder utenfor gyldighetsområdene kan gi urealistiske verdier og verdier som ikke er til å stole på.

5.6.2 Sammenligning med analytisk beregningsmetode

En analytisk beregning av hastighet har blitt gjort for kube og golfball ettersom disse steinformene har et kjent volum. Formlene fra vedlegg A er benyttet. Drag- og løftekoeffisienter har blitt antatt med utgangspunkt i kapittel 2.3.1, selv om en egentlig ikke har noen forutsetning for å kunne anta løftekoeffisient. Sammenligningen er derfor kun gjort for å få en anelse om hvordan kritisk hastighet er i forhold til de analytiske formlene. Formler for enkelt stein benyttes siden det ikke er mulig å benytte formlene som gjelder for hele bunnprofilen da k_1 og k_2 er ukjente parametere.

Tabell 5-4 viser kritisk hastighet, hastighet over plastringen og beregnet hastighet ved løfting, velting og glidning. Verdier for tetthet og steinstørrelse fra forsøk A har blitt benyttet. Det kommer frem at hastigheter fra de analytiske formlene er lavere enn hastighet oppnådd i forsøk A. Noe av årsaken er at hastighetene beregnet ved de analytiske formlene gjelder for enkeltstein og det blir derfor ikke tatt hensyn til innlåsningen som oppstår i en plastring.

Hastigheten er lik null for glidning og velting av kule fordi en kule som ligger på et horisontalt underlag vil ikke kunne motstå bevegelse når den blir utsatt for dragkraft. Friksjonskraften er lik null fordi friksjonsvinkelen er null for golfball.

Tabell 5-4 Hastigheter (m/s)

Hastighet	Kube	Kule
v løft	1,00	0,39
v glid	0,66	0
v velt	0,66	0
v crit	2,56	0,52
v p	2,16	0,28

*(C_d kube= 1,2 C_d kule =0,07 C_1 kube=kule=0,9)

Det har også blitt gjort en beregning hvor det blir sett på en kube med like store sidekanter som diameteren til en kule. I tillegg antas det at kuben og kule har samme tetthet og helning. Verdier som er brukt er gjengitt i tabell 5-5. Det er kun valgt å se på hastighet ved løfting fordi det under forsøk så ut som kuber og golfballer løftet seg ved brudd. Beregningene viser at det kreves en større hastighet for å løfte en kube enn en kule. Kule har et større projisert areal enn kuben og det virker derfor fornuftig at det kreves høyere hastighet for å løfte kubene. I forsøk A krevdes også større vannhastighet for at plastring med kuber skulle gå til brudd enn plastring med golfball, selv om det også er andre årsaker til dette.

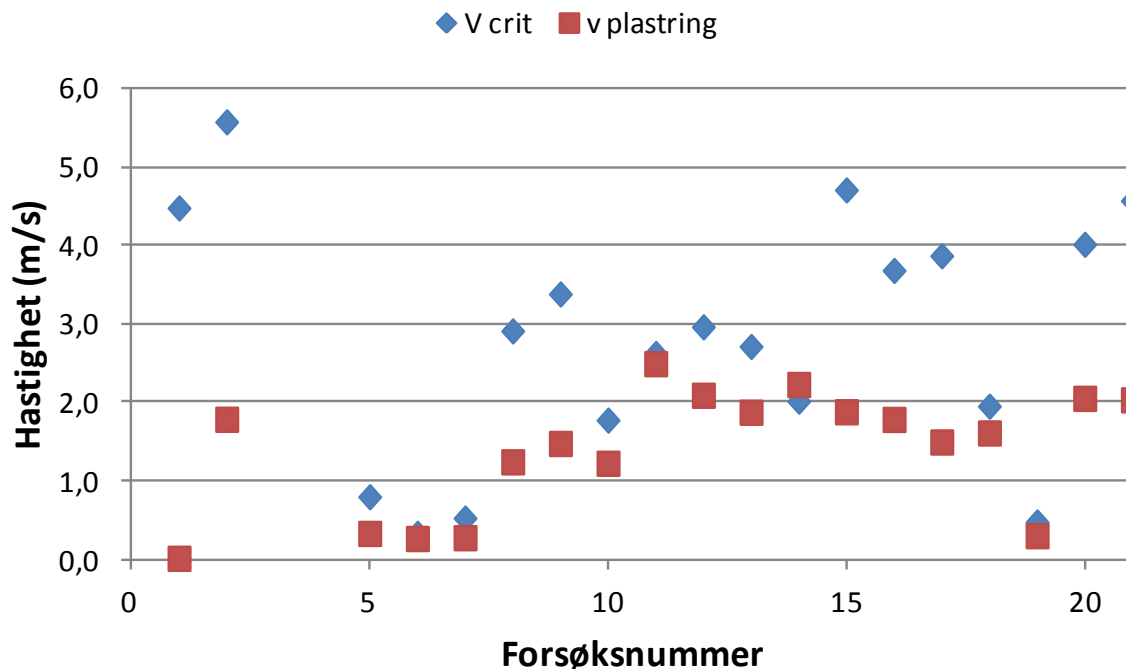
Tabell 5-5 Sammenligning kube og kule

	Verdi	Enhet
Tetthet stein	2439	kg/m ³
Sidekant/diameter	32	mm
Helning	0	rad
C_1 kube	0,9	-
C_1 kule	0,9	-
Tetthet vann	1000	kg/m ³
v løft kube	1,00	m/s
v løft golfball	0,82	m/s

5.6.3 Sammenligning med hastighet over plastring

Figur 5-5 viser hastighet over plastringen, rød prikker, og kritisk hastighet fra forsøk A, blå prikker. Generelt er hastigheten over plastringen lavere enn kritisk hastighet. Forskjellen øker med luftinnblanding. Forsøk 5, 6, 7 og 19 er forsøk med golfballer, forsøk hvor det ikke var luftinnblanding. Her ligger blå prikk nesten oppå rød prikk. Forsøk 2 er forsøk med grå, store, forsøk hvor det var mest luftinnblanding, her ligger blå prikk langt over rød prikk. For forsøk 1 mangler vann dybde over plastringsdekket og vannhastighet er derfor lik null. Froude tall følger samme trenden som figur 5-5.

Det ble forsøkt å finne hastigheten over plastringen ved å slippe trebiter i renna for så å se på video og måle tid og strekning trebiten var på plastringen slik at hastighet over plastringsdekke kunne beregnes. Dette virket ikke helt som håpet ettersom det var vanskelig å se trebitene på videoen.

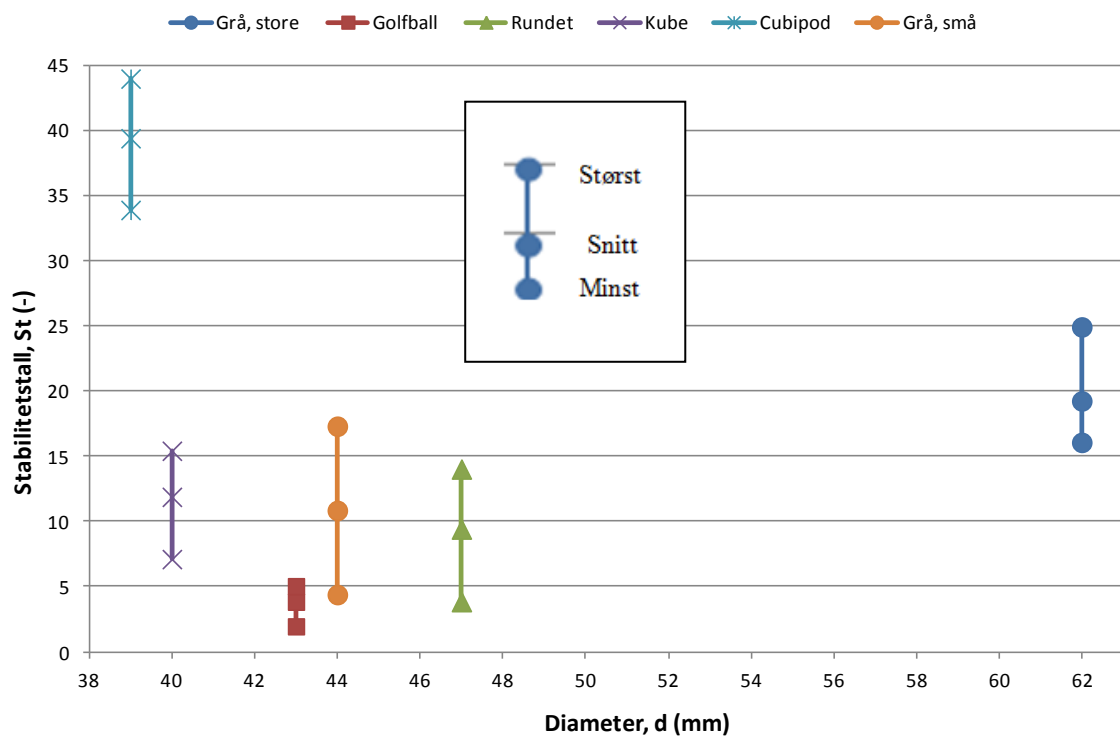


Figur 5-7 Kritisk hastighet og hastighet over plastring

5.7 Variasjon i forsøk A

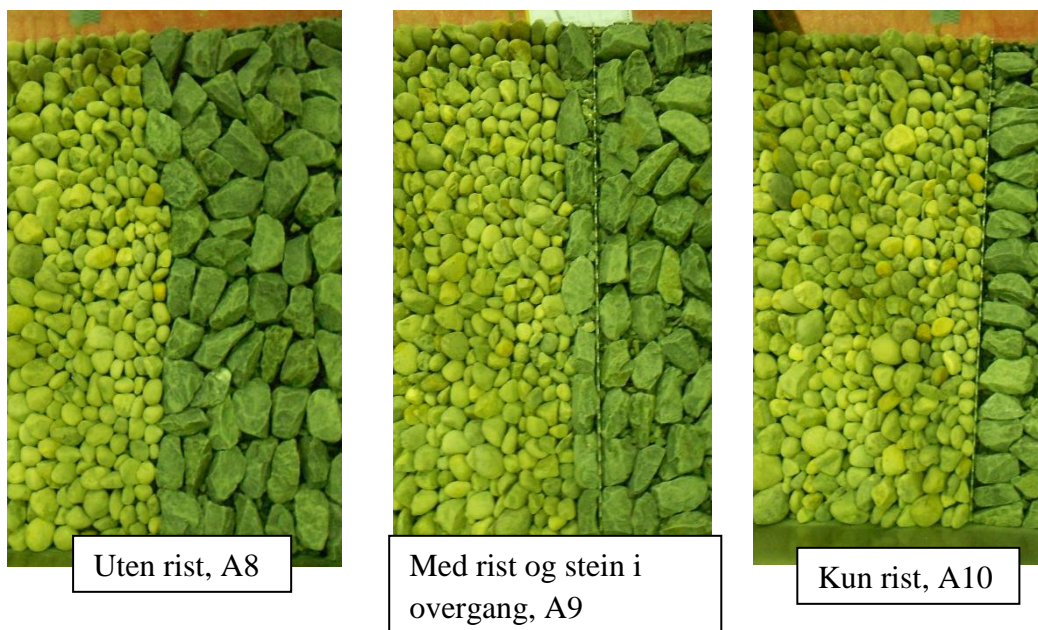
Mellom 2 og 4 forsøk har blitt gjort for hver steinform. Det hadde vært ønskelig å ha et bredere utvalg med data, men det er generelt tidkrevende å gjøre mange forsøk for å oppnå dette innenfor den gitte tidsrammen.

Figur 5-6 gir et mål på variasjonen i stabilitetstall innad i forsøk med samme steinform. Det øverste punktet representerer den største verdien av målingene, det midterste gjennomsnittet og det nederste tilsvarer den minste verdien. Det er størst variasjon for forsøk gjort med grå, små, mens det er minst variasjon for forsøk gjort med golfball. I tillegg er det stor variasjon i forsøk med rundet stein. Årsaker til variasjon kan generelt være ulikt antall stein i plastringen, forskjellig lukeåpning eller unøyaktigheter i utlegging av stein, registrering av brudd og andre feilkilder. Feilkilder blir nærmere omtalt i kapittel 5-7.



Figur 5-8 Variasjon i stabilitetstall (største verdi, gjennomsnitt og minste verdi)

Det ble gjort 2 forsøk med grå, små. Lukeåpningen på disse to forsøkene var henholdsvis 7,5cm og 3cm. Dette har sannsynligvis vært årsaken til den store variasjonen. Rundet stein var den første steinformen hvor ikke hele plastringsarealet ble benyttet. Det ble gjort tre forsøk med rundet stein. Under disse forsøkene varierte avslutningen av plastringen som vist på figur 5-7. Dette kan ha bidratt til den store variasjon i forsøk for rundet stein.



Figur 5-9 Avslutning av plastring for rundet stein

Den største ulempen med forsøkene er sannsynligvis at lukeåpning har blitt variert innad i forsøk med samme steinform. Grunnen var å oppnå mest mulig overkritisk strømning, men resultatet gir en relativt høy variasjon for de forsøkene der dette har blitt gjort. I tillegg er det åpenbart at det hadde vært bedre å utføre forsøkene med de samme betingelsene innad i forsøk med samme steinform for å øke etterprøvbareheten og påliteligheten av forsøkene. Foruten dette kan forsøkene ansees for å være pålitelige.

5.8 Usikkerheter og feilkilder

Det kan stilles spørsmål ved etterprøvbareheten og nøyaktigheten av forsøkene ettersom de i stor grad er utført med manuelle målinger og observasjoner og derfor er svært avhengig av personen som utfører dem. Den største usikkerheten i dette forsøket er knyttet til registrering av brudd og utførelse av plastring. I tillegg er det en ulempe at det ikke er mulig å måle vannndybde ved vena contracta. Det er vanskelig å tallfeste feilkildene som oppstår i forsøk som dette. Men de fleste av usikkerhetene kan reduseres eller unngås ved nøyaktig utførelse.

Utførelse av plastringen

Egenskapene til plastringen er avhengig av hvor flink den personen som utfører plastringen er, selv om det finnes prinsipper for hvordan den skal utføres. Dersom en annen person gjentar forsøk gjort i denne oppgaven er det sannsynlig at egenskapene til plastringen vil være annerledes og dermed kritisk hastighet. Dersom plastringen er unøyaktig utført kan for eksempel orientering avvike fra tenkt orientering. Unøyaktigheter er sannsynlig å ha oppstått og kan i så fall få store innvirkninger på resultatene.

Registrering av brudd

Ettersom registrering av brudd skjer manuelt er det knyttet usikkerheter til bruddtidspunkt og dermed vannføring og vanndybde ved brudd. Dette spesielt i tilfeller der det var mye luftinnblanding som førte til at det ble vanskelig å se hele plastringen. Det er da sannsynlig at steiner har gått til brudd uten å ha blitt registrert. I noen tilfeller kunne det imidlertid høres at en stein gikk til brudd og steinen kunne da observeres liggende lenger nede i renna. I tillegg har videokamera vært et godt hjelpemiddel for å registrere bruddtidspunkt. I de fleste tilfeller er det derfor likevel sannsynlig at riktig bruddtidspunkt har blitt registrert. Luftinnblanding førte også til at vanndybden kunne variere mye innenfor samme tidsintervall slik at usikkerheten rundt beregning av hastighet over plastringen ved brudd for disse forsøkene er stor. For forsøk gjort med likeformet stein var det lite luftinnblanding over plastringsdekke slik at nøyaktigheten av bruddtidspunktet er stor.

Andre usikkerheter

Det kan være usikkerheter knyttet til boksen i forsøk B. Dersom boksen ikke står helt vannrett vil vanndybden og tilført vannmengde være unøyaktig. Dersom utstyret flyttes underveis endres forutsetninger for et godt resultat. Det har blitt tatt hensyn til de feilkildene som det var mulig å ta hensyn til. Brudd skjedde ofte midt i plastringen i boksen.

Menneskelige feil som unøyaktig avlesning, måling, beregning, telling av stein og lignende kan være med på å gi unøyaktige resultater. Det er sannsynlig at slike feil har forekommet og i så fall vil dette kunne ha påvirket resultatene mye.

Det er tidkrevende å gjennomføre målinger av størrelse og tetthet til stein og det er ikke praktisk gjennomførbart å måle alle steinene i hvert utvalg. Det ble målt steiner helt til det antallet da det var like mange steiner over og under gjennomsnittet. Om resultatet hadde blitt annerledes om flere steiner hadde blitt målt er vurdert til å være lite sannsynlig.

Det er knyttet usikkerheter til måleutstyret som har blitt brukt i oppgaven, men unøyaktighetene vil gi lite utslag på resultatene. Men det er verdt å merke seg at målesensorene i d-renna blir mer nøyaktige når vannføringen gjennom systemet er høy. Derfor er usikkerheten rundt målingene for golfballer større enn de andre steinformene ettersom vannføringen her var lav. Vinkelmåleren brukt til å finne friksjonsvinkel og innlåsningvinkel virker mer unøyaktig enn usikkerheten oppgitt i kapittel 3.2.2, fordi det var utfordrende å bruke den.

6. Konklusjon og videre arbeid

Det har blitt gjort modellforsøk av plastring bygget med forskjellige steinforme med den hensikt å finne effekten av steiners form i plastring i bratte elver. Steinformene som har blitt benyttet er cubipod, kube, golfball, grå, små, rundet og grå, stor. Det kan konkluderes med at forskjellige steinforme gir ulik respons når de blir utsatt for overkritisk strømming i en plastring. Parametere som alle var avgjørende for å oppnå god stabilitet var høy neddykket tetthet til stein, høy innlåsningvinkel og til dels høy friksjonsvinkel. Det har ikke vært mulig å påvise at lav porøsitet ga bedre stabilitet enn høy porøsitet ettersom steinformen med høyest porøsitet også hadde best stabilitet.

Det har blitt funnet at kantet stein var mer gunstig enn rundet stein for å oppnå høye innlåsning- og friksjonsvinkler. Etter erfaring fra utleggelse av stein kan det virke som at innlåsningvinkelen ikke er et riktig mål på den innlåsningen som faktisk oppstår i en plastring. Cubipod og grå, stor hadde samme innlåsningvinkel, men ved utleggelse av plastring ga cubipod en opplevelse av større innlåsning enn grå, stor. Stabilitetstallet var i tillegg mye høyere for cubipod enn grå, stor selv om tettheten og friksjonsvinkelen var lavere.

Modellforsøkene i d-renna viste at plastring med kuber og cubipod hadde et progressivt bruddforløp, mens kantet og rundet stein hadde et klassisk bruddforløp. Progressivt brudd oppstår sannsynligvis når steinene er likeformet samtidig som de har høy innlåsning. For grå, små og grå, stor var det vanskelig å få plastringen å gå til globalt brudd med trykkhøyden som var tilgjengelig i modellen. Vannføringen ble økt med 20 % etter bruddvannføringen uten at plastringen gikk til globalt brudd. Fordelen med et klassisk bruddforløp er at det er mulig å oppdage at plastringen har blitt ustabil før hele plastringen blir ødelagt slik at reparasjoner kan bli gjort. Når brudd inntraff i plastring med golfballer mistet golfballene rundt bruddsteinen sin støtte slik at disse også ble tatt med av strømmen vekk fra plastringsdekket kort tid etter.

Tillatt vannhastighet over plastring med grå, små ble beregnet til å være 6,2 % høyere enn over plastring med rundet stein. Forskjellen mellom kantet og rundet stein er altså mindre i en plastring enn i en rauset sikring der forskjellen kunne være opp mot 40 % ifølge teorien. Noe av grunnen antas å være at kantet stein kan oppnå høyere innlåsning i en rauset sikring enn rundet stein, mens i en plastring kan rundet stein oppnå tilnærmet lik innlåsningvinkel som det kantet stein med samme størrelse kan. I dette forsøket hadde rundet stein en innlåsningvinkel som var 1° lavere enn kantet stein av samme størrelse.

Analytiske formler for steinbevegelse sier at steiners form har en påvirkning på stabiliteten og at steinens tyngde er den avgjørende stabiliserende kraften, men formlene er lite benyttet fordi det er utfordrende å bestemme drag- og løftekoeffisienter. Formlene gir også indikasjoner på at vertikal orientering av stein gir best stabilitet fordi arealet utsatt for krefter fra vannet blir da minst mulig. Etablerte beregningsmetoder er empiriske og gjelder i stor grad for rauset

sikring. Metodene gir stor variasjon i tillatt enhetsvannføring og de tar i liten grad hensyn til steinens form og innlåsning som oppstår mellom steiner i en plastring.

Sammenligning av kritisk hastighet ved brudd viser at hastighet oppnådd i forsøk A generelt er høyere enn tillatt hastighet beregnet ved etablerte beregningsmetoder. Denne forskjellen var spesielt stor når helningen var over 40 %. Hovedårsaken til dette er at de etablerte beregningsmetodene gjelder for rauset sikring. Ved bruk av etablerte beregningsmetoder utviklet for rauset sikring til dimensjonering av plastring blir nødvendig steinstørrelse overdimensjonert, noe som kan føre til unødvendige store kostnader, men sikre løsninger. Hastigheter beregnet ved analytiske formler var også mindre enn kritisk hastighet oppnådd i forsøk A, noe som var forventet sidene formlene gjaldt for stabilitet av enkelt stein.

Usikkerhetene til resultatene ser ut til å skyldes utførelse av plastringen og registrering av brudd. Nøyaktigheten av utførelsen av forsøkene er avgjørende for påliteligheten til resultatene. Det var stor variasjon i kritisk hastighet i forsøk A, men dette skyldtes at lukeåpningen ble variert innad i forsøk med samme steinform. I tillegg korrelerte cubipod dårlig med de andre steinformene noe som kunne vært unngått ved å benytte den samme lukeåpningen som resten av forsøkene. Ulempen med modellen var at det ikke var mulig å måle vandybden i vena contracta. I tillegg er det store usikkerheter rundt måling av vandybden over selve plastringen. Spesielt gjaldt dette for de forsøkene der det var mye luftinnblanding. Til tross for disse usikkerhetene har effekten av steinens form kommet frem.

Steinens form kan bestemmes ved hjelp av tre hovedakser som kan settes sammen til formfaktorer og detaljerte krav til steinform kan utvikles. Men det er sannsynligvis tidkrevende og kostbart å gjennomføre målinger av alle stein som skal benyttes i en plastring på en byggeplass for å tilfredsstille slike krav. Derfor burde enkle retningslinjer og prinsipper gjelde ved utvelgelse av stein til en plastring.

Videre vil det først og fremst være nødvendig å utføre modellforsøk med ulike steinforme i en renne med helning og i fullskala forsøk for å få et grunnlag som kan benyttes direkte i dimensjonering. Deretter vil det å utvikle bedre metoder for å registrere brudd og vandybde over plastring være fordelaktig for å øke nøyaktigheten rundt disse målingene. Golfballer burde erstattes av kule med tyngre materiale i tillegg til overflate som ligner mer på naturlige stein for å få et riktigere bilde på denne steinformen. Det er også av interesse å finne ut mer om innlåsningen som faktisk oppstår i en plastring og om innlåsningvinkelen er et riktig mål på den.

7. Litteraturliste

- Aberle, J. (2007). Measurements of armour layer roughness geometry function and porosity *Acta geophyica*, 44 (1): 23-32.
- Abt, S. R. & Johnson, T. L. (1991). Riprap design for overtopping flow. *Journal of hydraulic engineering*, 117 (8): 959-972.
- Abt, S. R., Thornton, C. I., Gallegos, H. A. & Ullmann, C. M. (2008). Round-shaped riprap stabilization in overtopping flow. *Journal of hydraulic engineering*, 134 (8): 1035-1041.
- Abt, S. R., Thornton, C. I., Scholl, B. A. & Bender, T. R. (2013). Evaluation of overtopping riprap design relationships. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49 (4): 923-937.
- Amundsen, J. M. (2012). *Laboratorieforsøk av plastring av nedstrøms skråning på fyllingsdammer*. Masterthesis. Trondheim: Norges teknisk naturvitenskapelige universitet, Institutt for vann og miljøteknikk. 82 s.
- Bogfjellmo, E. (2013). *Nedstrøms skråning av steinfyllingsdammer – Analyse av eksisterende plastringer*. Prosjektoppgave: Norges teknisk naturvitenskapelige universitet, Institutt for vann og miljøteknikk 52 s.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill. 680 s.
- Dumitriu, D., Condorachi, D. & Niculiță, M. (2011). Downstream variation in particle size: a case study of the Trotus river, Eastern Carpathians (Romania) *Annals of the University of Oradea, geography series/Analele Universitatii din Oradea, seria geografie*, 21 (2): 222-232.
- Falkenberg, T. L. (2013). *Erosjonssikring av elvebunn nedstrøms dammer fundamentert på løsmasser* Masterthesis. Trondheim Norges teknisk naturvitenskapelige universitet, Institutt for vann og miljøteknikk 144 s.
- Fergus, T., Hoseth, K. A. & Sæterbø, E. (2010). *Vassdragshåndboka: håndbok i vassdragsteknikk*. Trondheim: Tapir. 428 s.
- Jenssen, I. & Tesaker, E. (2009). Veileder for dimensjonering av erosjonssikring av stein. *Veileder*, 4. Oslo: Norges Vassdrags- og energidirektorat 182 s.
- Khan, D. & Ahmad, Z. (2011). Stabilization of angular-shaped riprap under overtopping flows. *World Academy of Science, Engineering and technology*, 59 (5): 775-779.
- Lia, L., Vartdal, E. A., M.Skoglund & Campos, H. E. (2013). *Rip rap protection of downstream slopes of rock fill dams - a measure to increase safety in an unpredictable*

- future climate*. Trondheim: Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology NTNU. Upublisert manuskript.
- Meaas, R. S. (2013). *Plastring av elvebunn med sterk strøm* Prosjektoppgave. Trondheim: Norges teknisk naturvitenskapelige universitet, Institutt for vann og miljøteknikk. 42 s.
- Mills, H. H. (1978). Some characteristics of glacial sediments on Mount Rainier, Washington. *Journal of sedimentary research*, 48 (4): 1345-1356.
- Pardo, V., Herrera, M. P., Molines, J. & Medina, J. R. (2013). Placement test, porosity and randomness of cube and cubipod armor layers. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*. Tilgjengelig fra: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29WW.1943-5460.0000245> (lest 22.4.2014).
- Peirson, W. L. & Cameron, S. (2006). Design of rock protection to protect erosion by water flows down steep slopes *Journal of hydraulic engineering*, 132 (10): 1110-1113.
- Robinson, K., Rice, C. & Kadavy, K. (1998). Design of rock chutes. *Transactions of the ASAE*, 41 (3): 621-626.
- The Rock manual: the use of rock in hydraulic engineering*. (2007). CIRIA, b. C683. London: CIRIA. 1268 s.
- Russell, R. D. (1939). Effects of transportation on sedimentary particles. I: Trask, P. D. (red.) *Recent marine sediment*, s. 32-47. London: Thomas Murly
- Siebel, R. (2007). Experimental investigations on the stability of riprap layers on overtoppable earthdams. *Environmental fluid mechanics*, 7 (6): 455-467.
- Stephenson, D. (1979). *Rockfill in hydraulic engineering*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publ. 215 s.
- Tarbuck, E. J. & Lutgens, F. K. (2006). *Earth science*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall. 726 s.
- Terzaghi, K., Mesri, G. & Peck, R. B. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. 3. utg. New York: Wiley. 549 s.
- Thornton, C. I., Abt, S. R., Scholl, B. N. & Bender, T. R. (2013). Enhanced stone sizing for overtopping flow. *Journal of hydraulic engineering*, 140 (4): 1-4.
- Ullmann, C. M. & Abt, S. R. (2000). *Stability of rounded riprap in overtopping flow*. Building Partnerships: ASCE Proceedings. 1-9 s.
- White, F. M. (2011). *Fluid mechanics*. 7. utg. New York: McGraw-Hill. 862 s.

8. Vedlegg

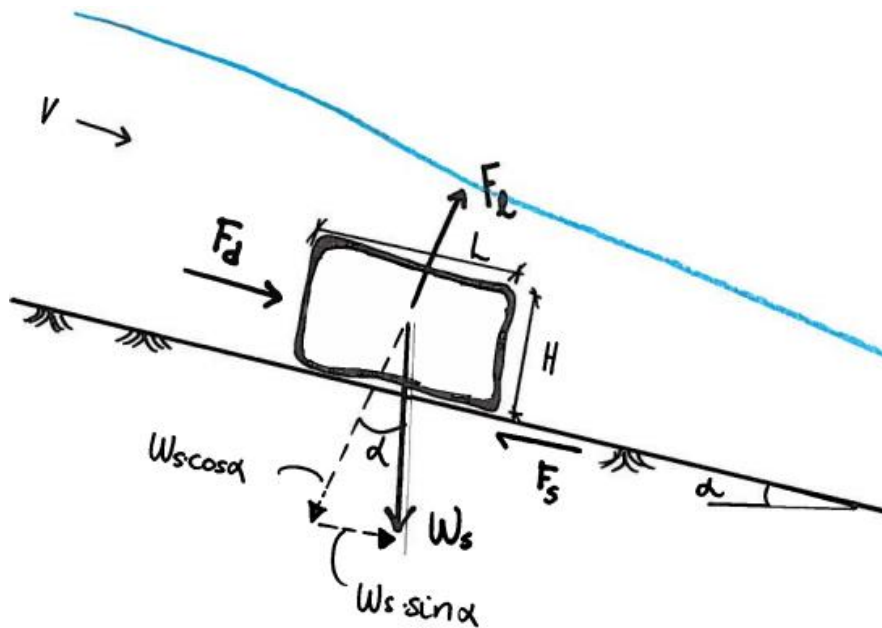
Vedlegg A: Utledning av analytiske formler for kritiske hastigheter	87
Vedlegg C: Lukedetaljer	91
Vedlegg D: Forsøk A	92
Vedlegg E: Forsøk B	131

Vedlegg A

Utledning av analytiske formler for kritisk vannhastighet

Her blir utledning av formeler for kritisk hastighet ved glidning, løfting og velting for kube.

Rettvinklet boks/kube



$$F_d = C_d A \rho_w \frac{V^2}{2}$$

$$F_l = C_l A \rho_w \frac{V^2}{2}$$

$$F_s = (W_s - F_l) \tan \varphi$$

$$W_s = V_s (\gamma_s - \gamma_w) = LBH (\gamma_s - \gamma_w)$$

Summen av krefter parallelt med bunnehelningen gir kritisk hastighet ved glidning

$$F_d + W_s \sin \alpha > F_s$$

$$C_d A \rho_w \frac{V^2}{2} + LBH(\gamma_s - \gamma_w) \sin \alpha = (W_s \cos \alpha - F_l) \tan \varphi$$

$$C_d BH \rho_w \frac{V^2}{2} + LBH(\gamma_s - \gamma_w) \sin \alpha = (LBH(\gamma_s - \gamma_w) \cos \alpha - C_l LB \rho_w \frac{V^2}{2}) \tan \varphi$$

$$\rho_w \frac{v^2}{2} (C_d H + C_l L \tan \varphi) = LH(\gamma_s - \gamma_w) (\cos \alpha \tan \varphi - \sin \alpha)$$

$$v_{glid} = \sqrt{\frac{2L(\gamma_s - \gamma_w)(\cos \alpha \tan \varphi - \sin \alpha)}{\rho_w \left(C_d + C_l \frac{L}{H} \tan \varphi \right)}}$$

Summen av krefter normalt bunnhelningen gir kritisk hastighet ved løfting

$$F_l = W_s \cos \alpha$$

$$C_l LB \rho_w \frac{V^2}{2} = LBH(\gamma_s - \gamma_w) \cos \alpha$$

$$v_{løft} = \sqrt{\frac{2H(\gamma_s - \gamma_w) \cos \alpha}{\rho_w C_l}}$$

Summen av moment om nedstrøms tå av steinen gir kritisk hastighet ved velting

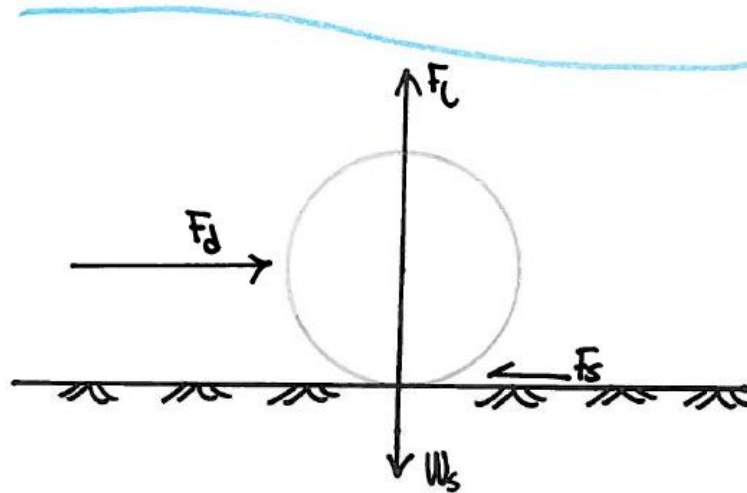
$$F_d \frac{H}{2} + F_l \frac{L}{2} + W_s \sin \alpha \frac{H}{2} = W_s \cos \alpha \frac{L}{2}$$

$$C_d A \rho_w \frac{V^2}{2} H + C_l A \rho_w \frac{V^2}{2} L + LBH(\gamma_s - \gamma_w) \sin \alpha H = LBH(\gamma_s - \gamma_w) \cos \alpha L$$

$$\rho_w \frac{v^2}{2} (C_d H^2 B + C_l L^2 B) = LBH(\gamma_s - \gamma_w) (\cos \alpha L - \sin \alpha H)$$

$$v_{velt} = \sqrt{\frac{2(\gamma_s - \gamma_w)(\cos \alpha L - \sin \alpha H)}{\rho_w \left(C_d \frac{H}{L} + C_l \frac{L}{H} \right)}}$$

Kule



$$A_{løft} = A_{drag} = \pi \frac{d^2}{4}$$

$$W_s = V_{kule}(\gamma_s - \gamma_w) = \frac{4\pi \frac{d^3}{8}}{3}(\gamma_s - \gamma_w) = \frac{\pi d^3}{6}(\gamma_s - \gamma_w)$$

$$F_d = C_d \frac{\pi}{4} d^2 \rho_w \frac{v^2}{2}$$

$$F_l = C_l \frac{\pi}{4} d^2 \rho_w \frac{v^2}{2}$$

Summen av krefter parallelt med helning gir hastighet ved glidning

$$F_d = F_s$$

$$F_d = (W_s - F_l) \tan \varphi$$

$$\frac{\pi}{4} d^2 \rho_w \frac{v^2}{2} (C_d + C_l \tan \varphi) = \frac{\pi d^3}{6} (\gamma_s - \gamma_w) \tan \varphi$$

$$v_{glid} = \sqrt{\frac{4d(\gamma_s - \gamma_w)\tan\varphi}{3\rho_w(C_d + C_l\tan\varphi)}}$$

Summen av krefter normalt helning gir kritisk hastighet ved løfting

$$F_l = W_s$$

$$C_l \frac{\pi}{4} d^2 \rho_w \frac{v^2}{2} = \frac{\pi d^3}{6} (\gamma_s - \gamma_w)$$

$$v_{løft} = \sqrt{\frac{4d(\gamma_s - \gamma_w)}{3\rho_w C_l}}$$

Summen av moment i punktet der kule treffer bakken

Dersom en kule ligger på et horisontalt underlag og er utsatt for en dragkraft må det virke en like stor kraft som dragkraften i motsatt retning av denne for at kule skal kunne ligge i ro.

Vedlegg B

Lukedetaljer

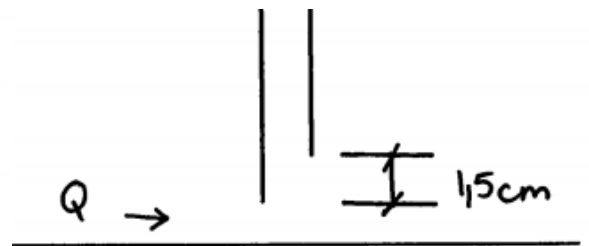
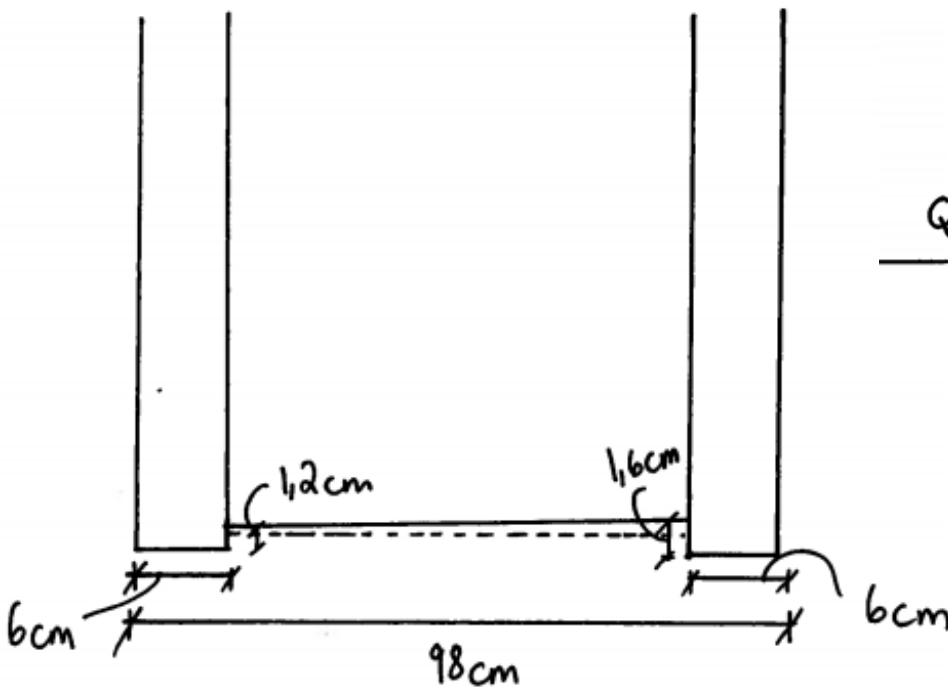
Hensikten med vedlegget er å gi et detaljert bilde av luka i d-renna.



Bilde viser underkanten av luka som er rett.



Bildet viser nedstrøms side av luka.



Dimensjoner sett fra siden (over). Dimensjoner sett fra nedstrøms side (til venstre).

Vedlegg C

Forsøk A

Videre følger en kort beskrivelse av hva som har skjedd ved brudd for de enkelte forsøkene. I tillegg er det vist diagrammer av målinger fra forsøk og bilder av plastring ved brudd, etter brudd og i noen tilfeller under forsøkene. Det er også gjengitt de målte verdiene ved brudd selv om disse også står i selve rapporten.

Definisjon av parametere brukt i vedlegget

Q	vannføring (l/s)
h	lukeåpning (m)
y_1	oppstrøms vanndybde (m)
y_2	nedstrøms vanndybde (m)
y_p	vanndybde over plastring (m)
t	tid (s)
Δ	usikkerhet (standardavvik)
μ_1	gjennomsnittelig verdi, beregnet i et intervall
μ_1	gjennomsnittelig verdi, beregnet mellom to intervaller

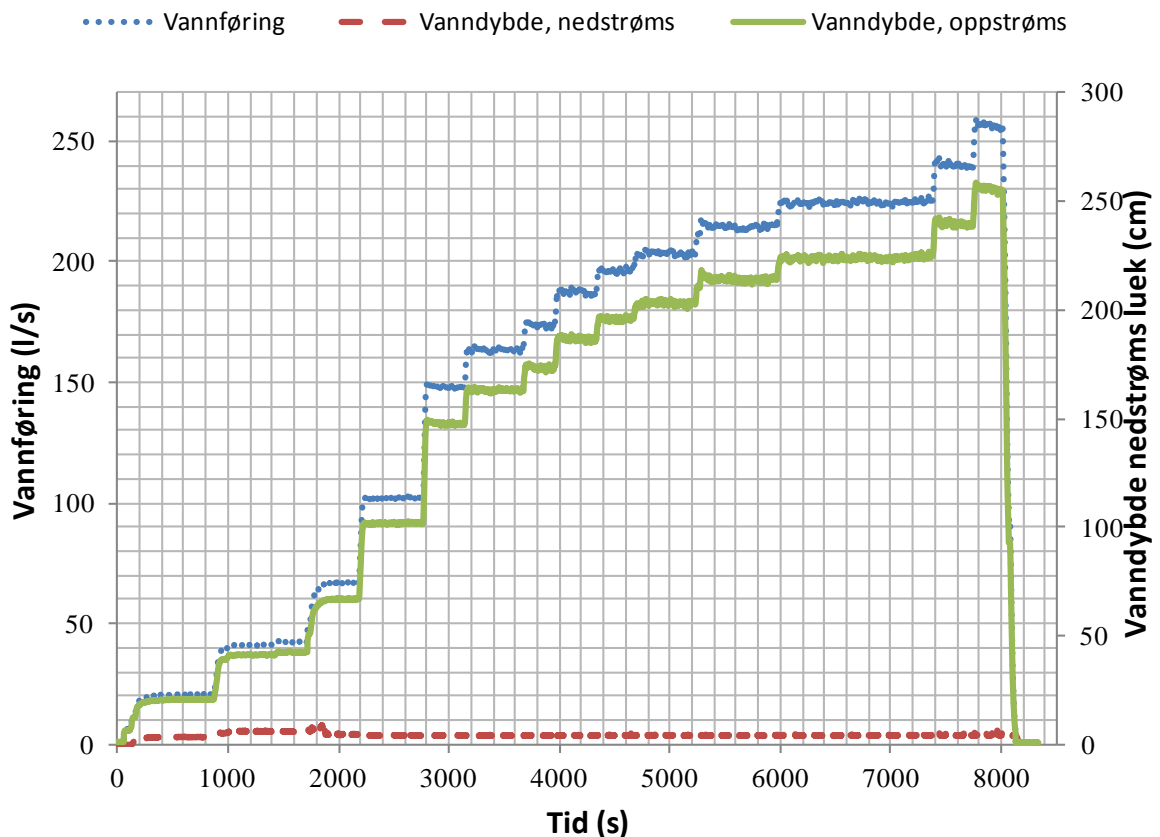
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1,47	0,085	583

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	196	0,76	0,042	mangler	4764
Δ	1	0,01	0	-	-

Brudd inntraff i det 9. intervallet etter ca 79 min, det kunne høres en tydelig lyd og stein ble observert lenger ned i renna. Vannføringen ble økt for å se hva plastringen tålte selv om brudd hadde oppstått. Neste stein røyk i det 12. intervallet. Da var vannføringen ca 214 l/s. Forsøket ble avsluttet da vannføringen var 250 l/s for å kunne dokumentere plastringen etter brudd. Da var mange steiner var ustabile. Totalt løsnet seks steiner, men flere skiftet orientering og la seg på tvers.



Åpen dag i labb gjorde at det ble noen forstyrrelser og det ble ikke alltid 10 minutter mellom vannføringsøkning.



Plastring før og etter forsøk

Det ble observert at det mest kritiske området i plastringen var i starten. Mye vibrasjon førte til at steinene har blitt lagt tettere inntil hverandre i enden av plastringen. Steinene har blitt forskjøvet mot enden. De røde pilene peker på steder hvor steiner har lagt seg på tvers eller forsvunnet.

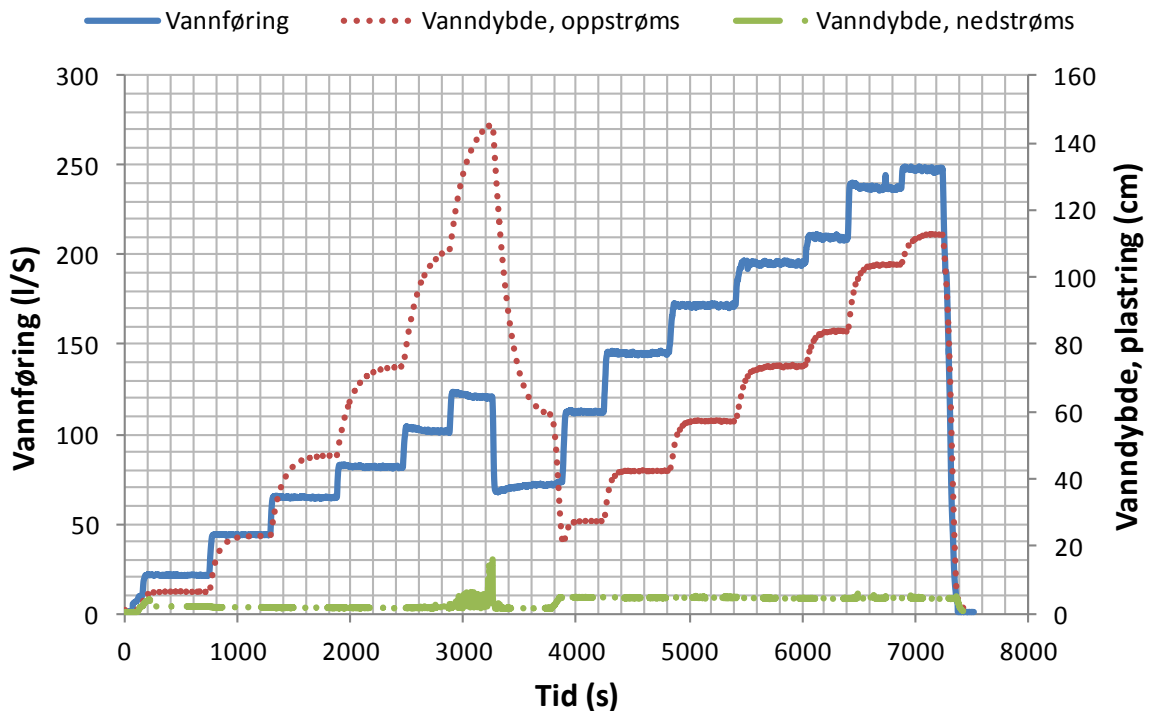
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1,47	3,5 (9)	606

Målte verdier ved brudd

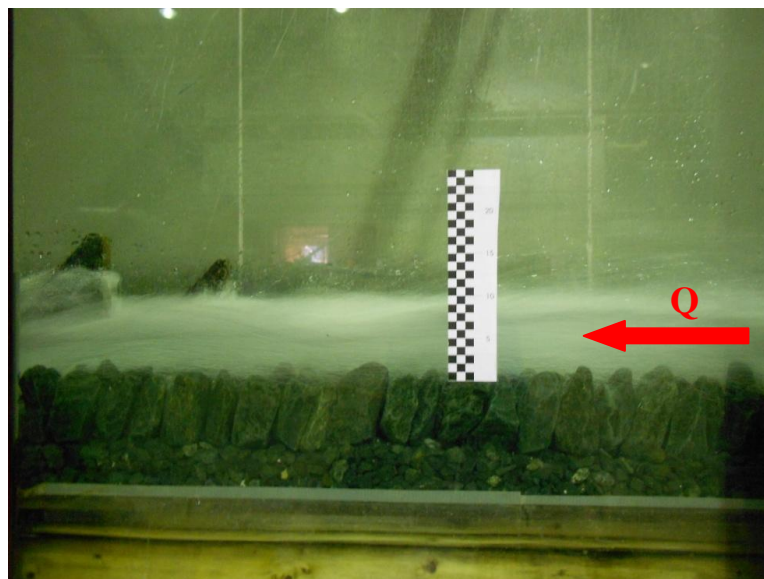
	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	248	1,11	0,044	0,14	7200
Δ	1	0	0,02	-	-

Etter ca 50 min ble luka overtoppet og lukeåpningen måtte justeres. Vannføring ble redusert og luka ble justert til 9 cm. Mye luftinnblanding gjorde at det var vanskelig å se hele plastringensdekket. Kjent bruddtidspunkt i det 14. intervallet ca 120 min. Da hørtes lyd av at en stein ble revet ned renna. Filter ble vasket ut. Forsøk ble avsluttet etter brudd. Brudd skjedde i starten av plastringen.





Plastring før og etter forsøk



Luftinnblanding ved lukeåpningen lik 5 cm.

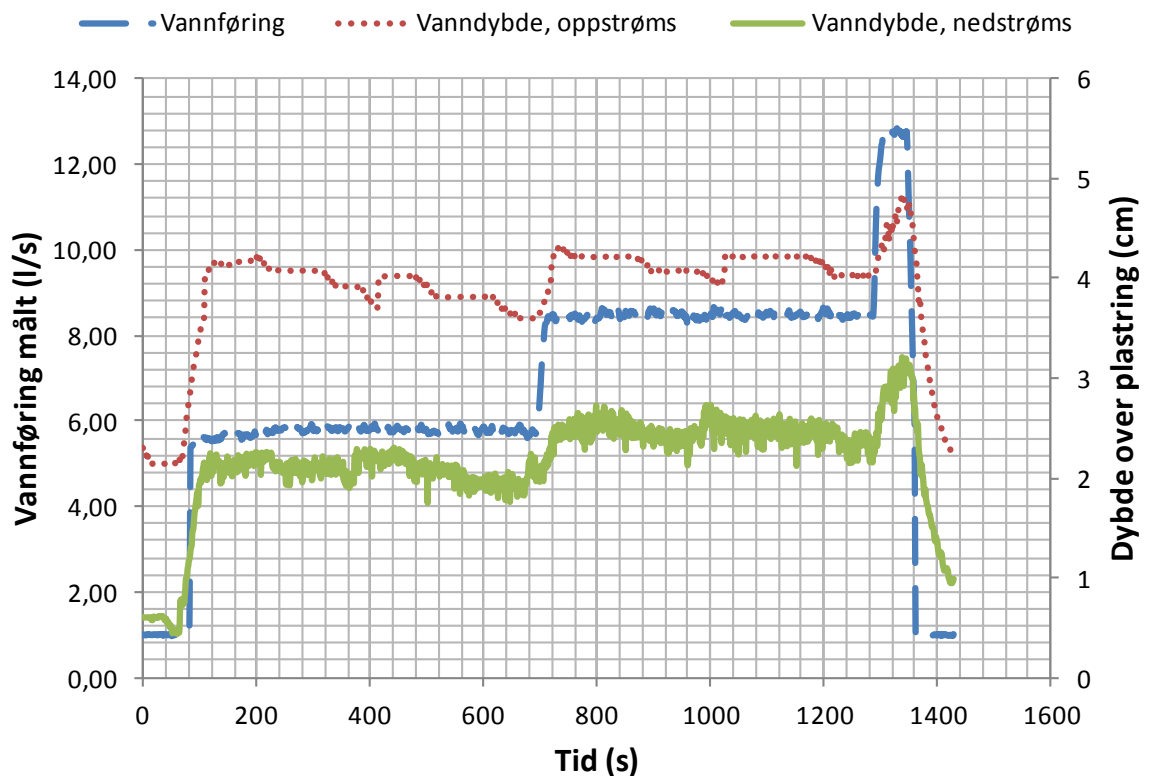
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1,47	0,035	903

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	12,7	0,05	0,029	0,04	1320
Δ	0,17	0,0031	0,0018	-	-

Brudd inntraff kort tid etter den tredje økningen i vannføring. Golfball midt i plastringen gikk til brudd. Etter ytterligere kort tid kunne plastringen sies å ha gått til globalt brudd.





Plastring før og etter forsøk



Overgang mellom renne og plastring

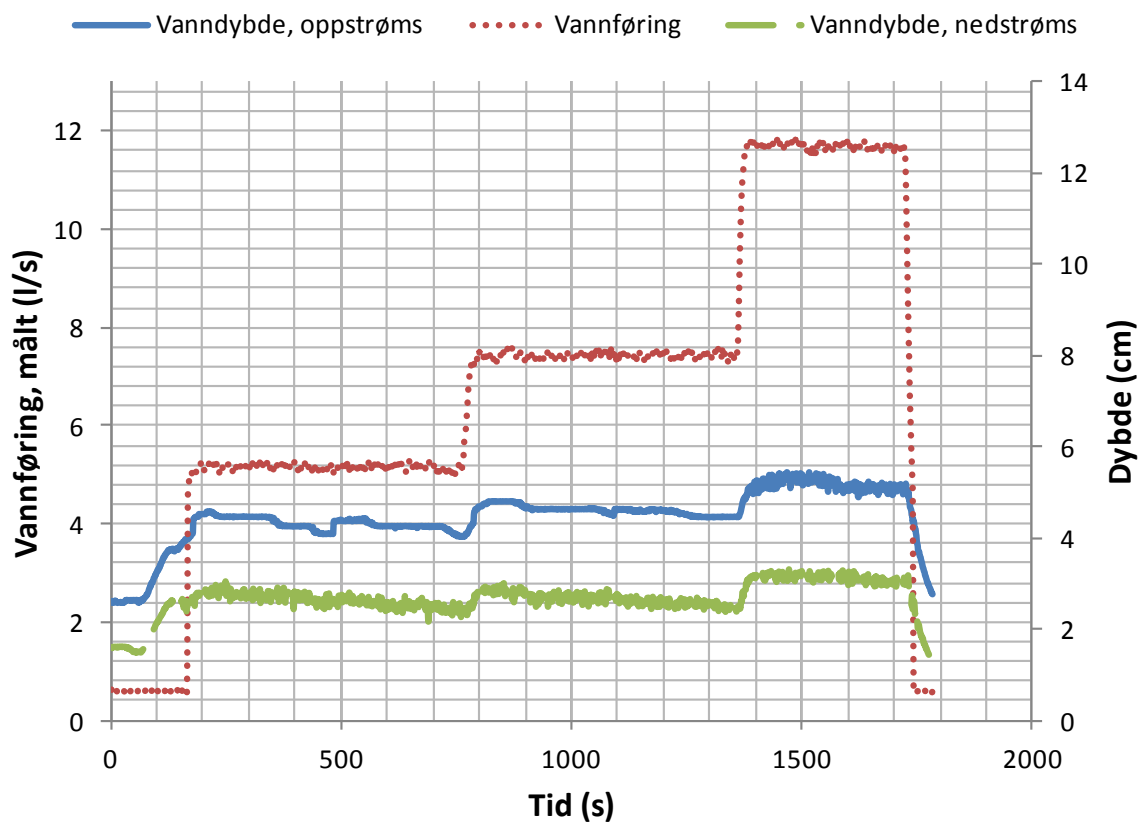
Input

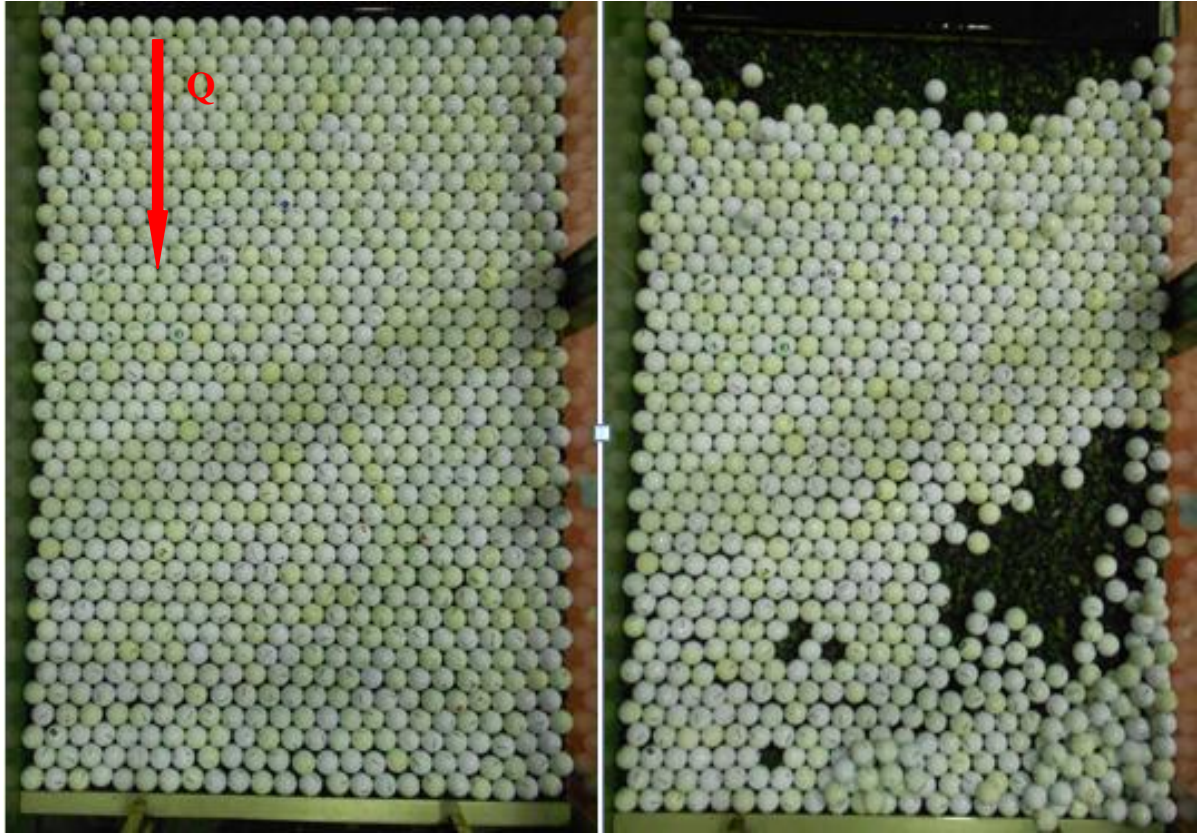
L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1,47	0,035	908

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	12,6	0,048	0,031	0,05	1320
Δ	0,2	0,001	0,001	-	-

Brudd inntraff kort tid etter den tredje vannføringsøkningen. Bruddet startet i øvre del av plastringen. Etter kort tid hadde globalt brudd inntruffet.





Plastring før og etter forsøk

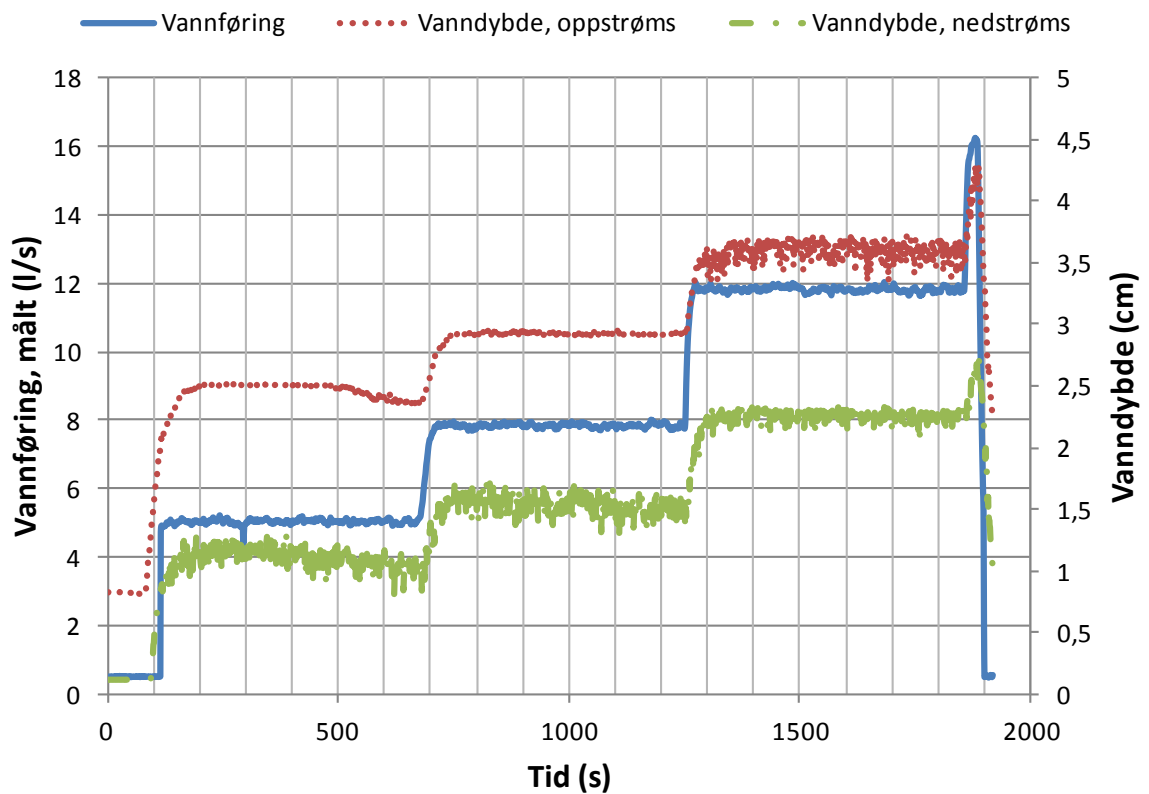
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1,47	0,035	908

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	11,8	0,04	0,02	0,045	1200
Δ	0,1	0,001	0,001	-	-

Brudd inntraff rett etter den tredje vannføringsøkningen, etter ca 20 min. Forsøket ble ikke avsluttet etter første brudd for å se hvor lenge plastringen kunne stå under påkjenning. Etter ca 10 min ved en vannføring på 15,2 l/s gikk plastringen til globalt brudd. Forsøket ble da avsluttet.





Plastring før og etter forsøk

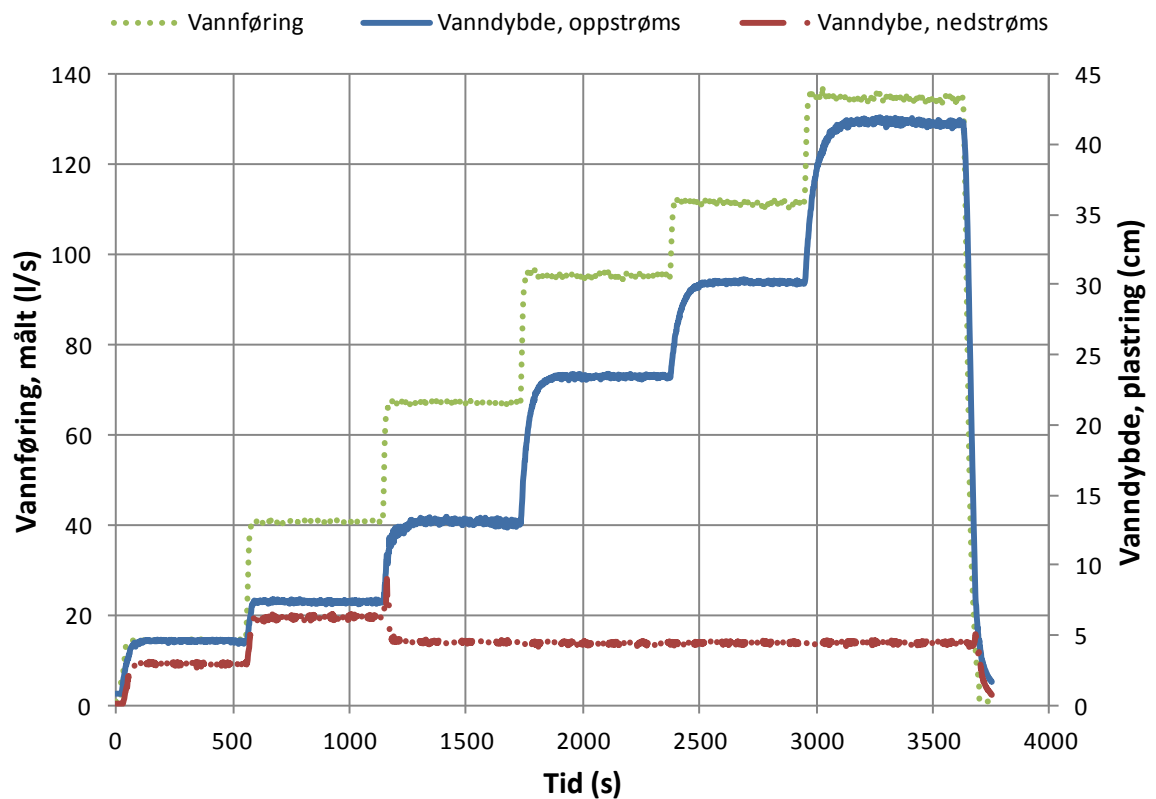
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1	0,085	771

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	135	0,42	0,045	0,11	3600
Δ	0,5	0,001	0,001	-	-

Brudd inntraff etter 60 min, altså i det 6. intervallet. Det var en stor stein som gikk til brudd. Generelt i denne plastringen var det større stein som la seg på tvers og var ustabile.





Plastring før og etter forsøk



Stein på vei ut av sin posisjon

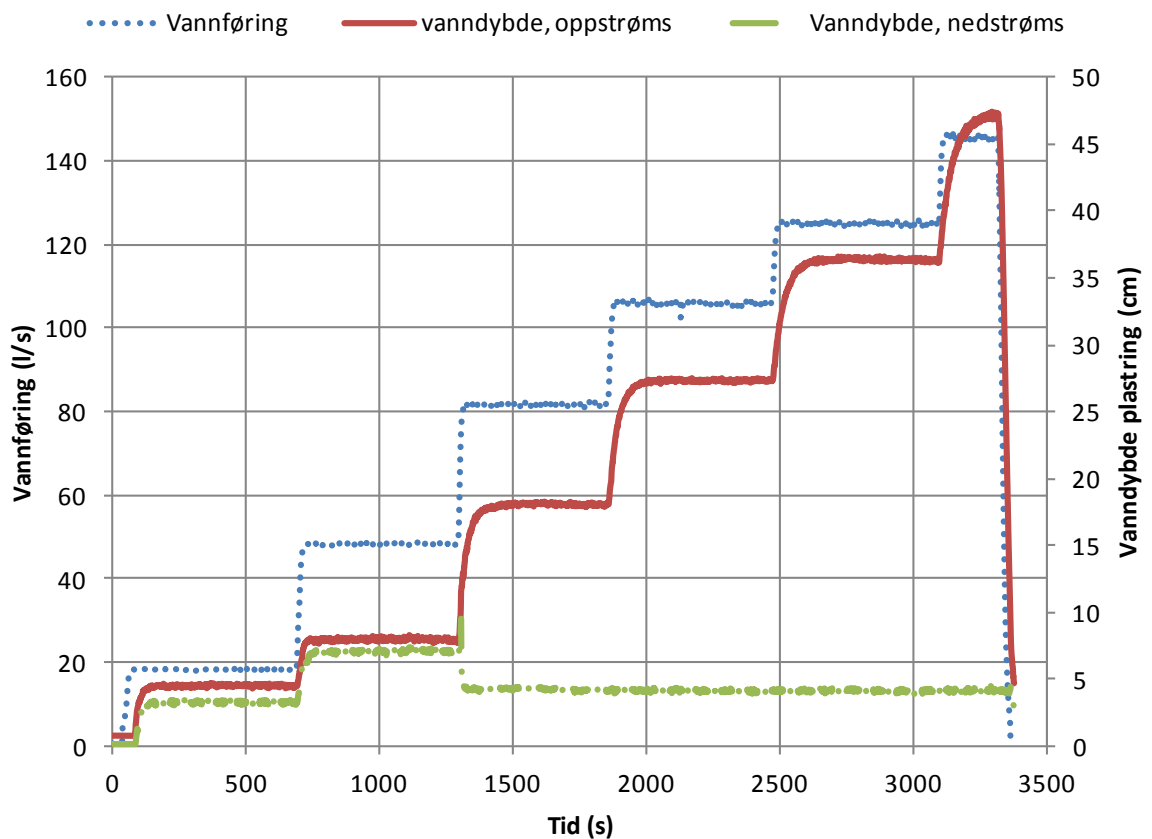
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1	0,085	775

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	146	0,47	0,042	0,10	3240
Δ	0,5	0,018	0,001	-	-

Brudd inntraff etter litt under 60 min, altså i det 6. intervallet Det var en stor stein som gikk til brudd.





Plastring før og etter forsøk

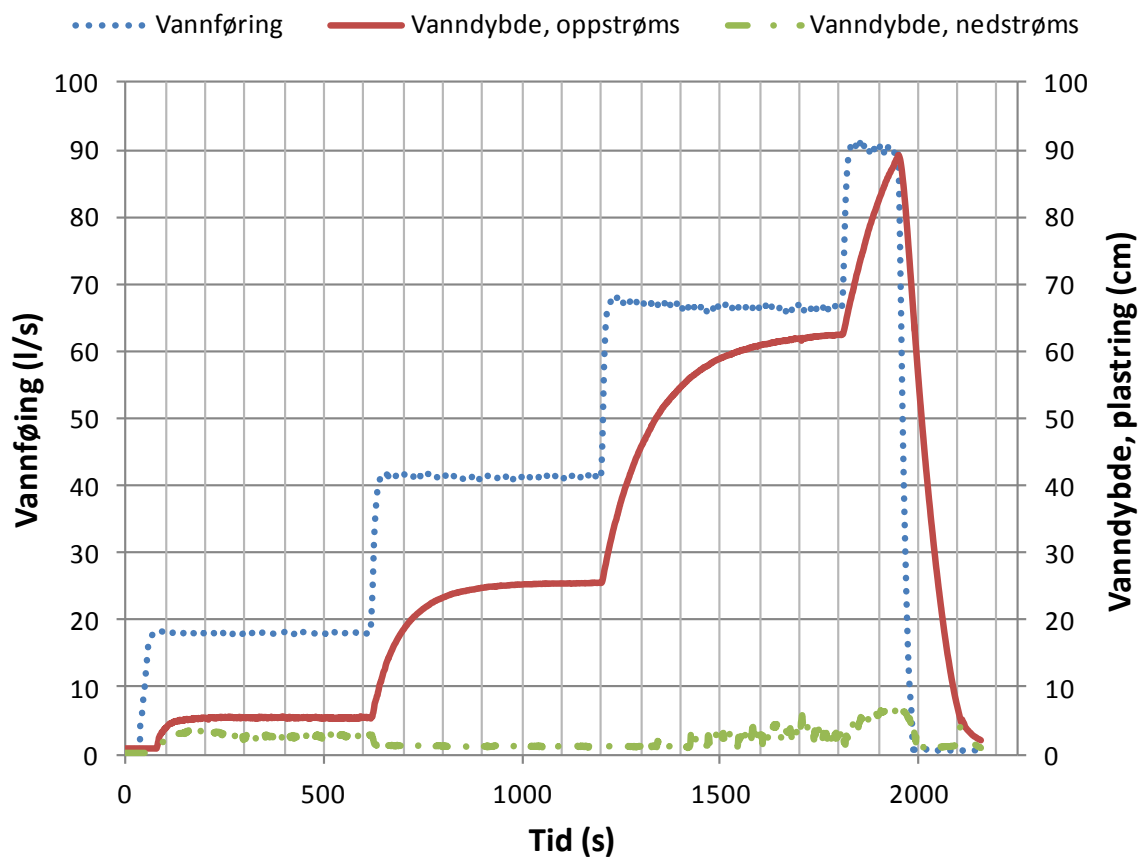
Input

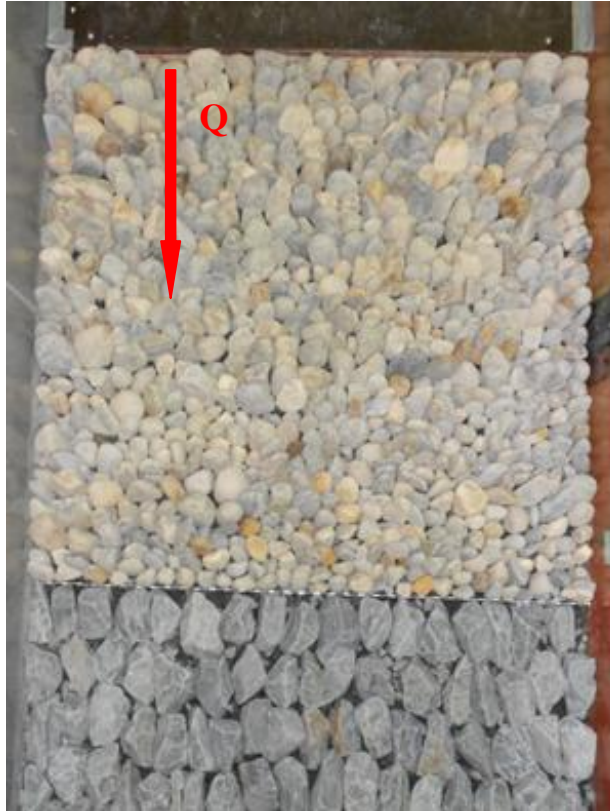
L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1	0,035	775

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	91	0,74	0,045	0,075	1870
Δ	0,39	0,048	0,008	-	-

Brudd inntraff helt i starten av plastringen i det 4. intervallet. Globalt brudd av plastringen inntraff like etter brudd, mens vannet ble skrudd av.





Plastring før og etter forsøk

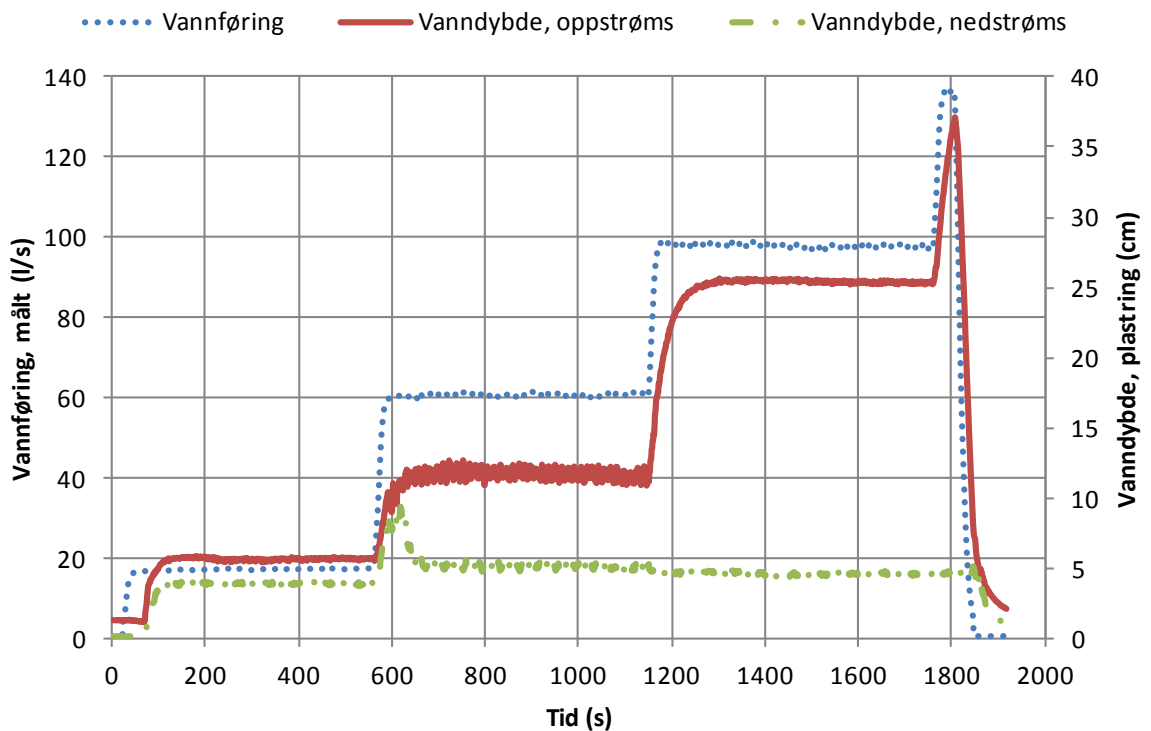
Input

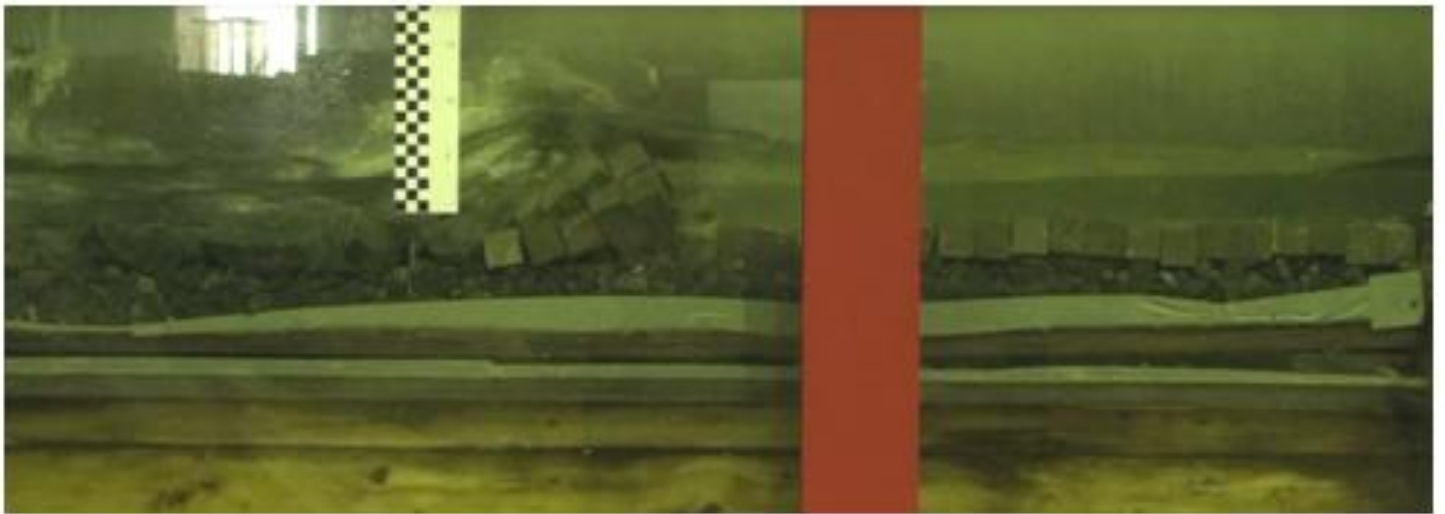
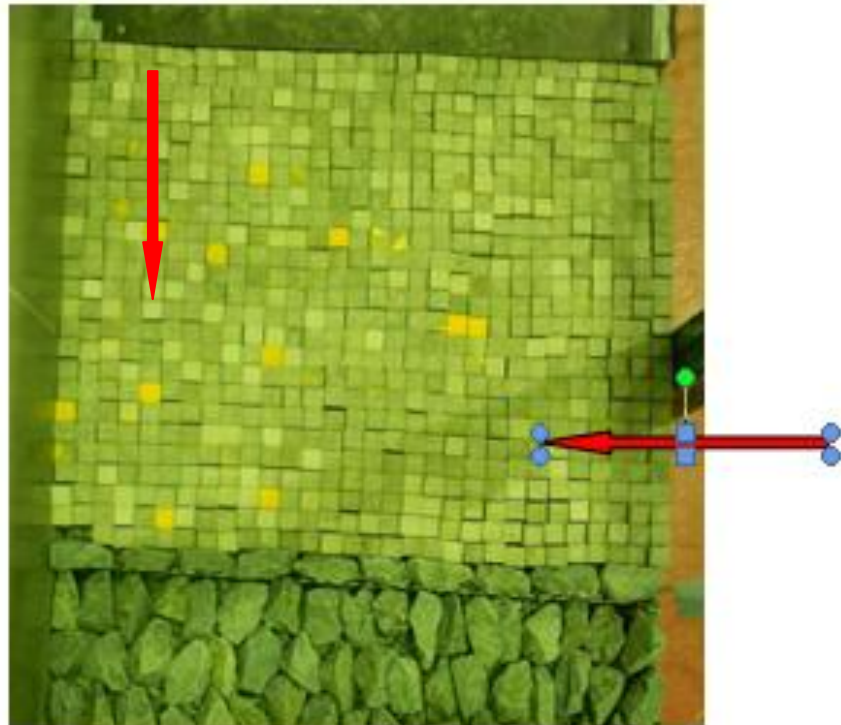
L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
0,84	0,085	752

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	136	0,36	0,046	0,055	1800
Δ	0,9	0,01	0,001	-	-

Brudd inntraff rett etter økning i vannføring i det4. intervallet. Brudd var i nedre del av plastringen, men ikke i nærhet av noen sider. Bilder av plastringen etter brudd mangler. Kubene lå ikke i forband i dette forsøket. Bruddet var progressivt.





Plastring før brudd og selve bruddet
Pilen angir området der brudd inntraff.

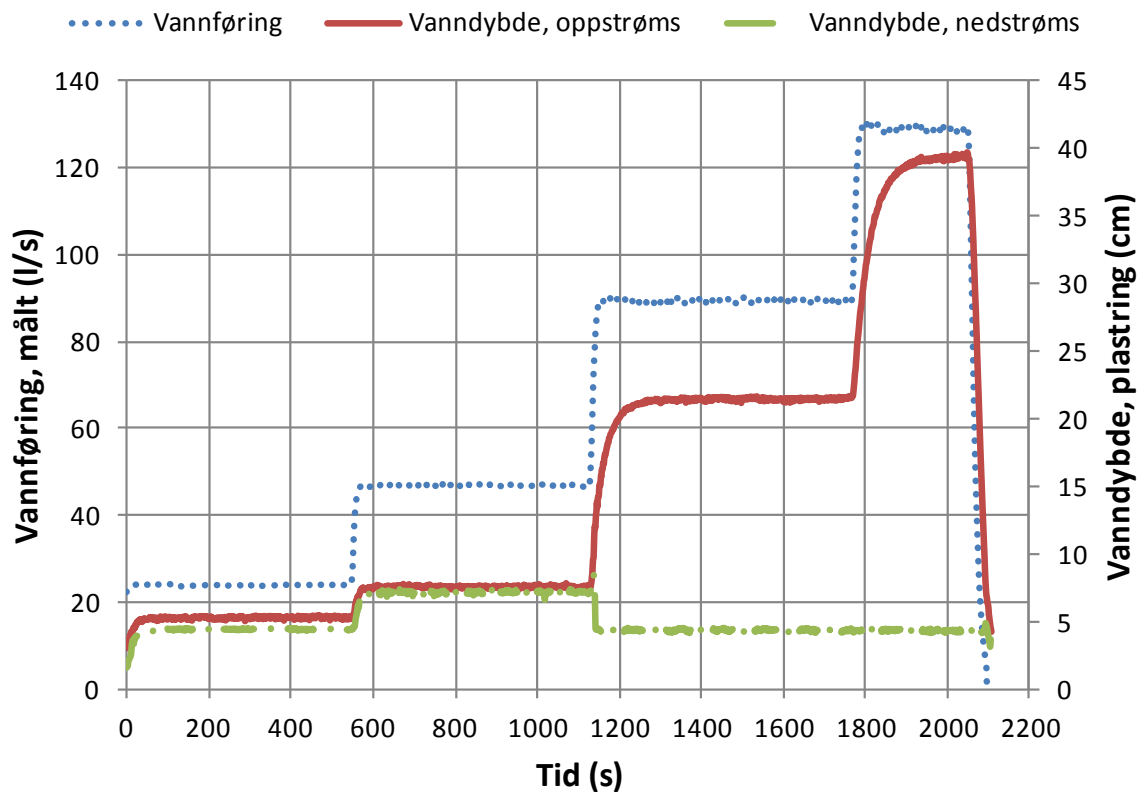
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
0,84	0,085	752

Målte verdier ved brudd

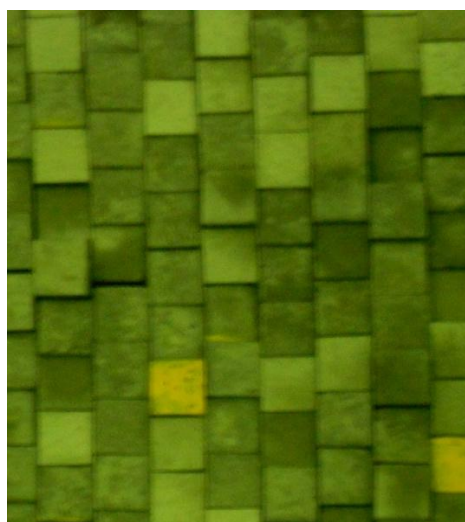
	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_2	129	0,39	0,043	0,062	1920
Δ	0,4	0,005	0,001	-	-

Brudd skjedde i overgangen til de store grå steinene mens vannføringen ble økt. Det skjedde etter omtrent 32 minutter. Kubene lå i forband i dette forsøket.





Plastring før og etter brudd



Kuber i forband

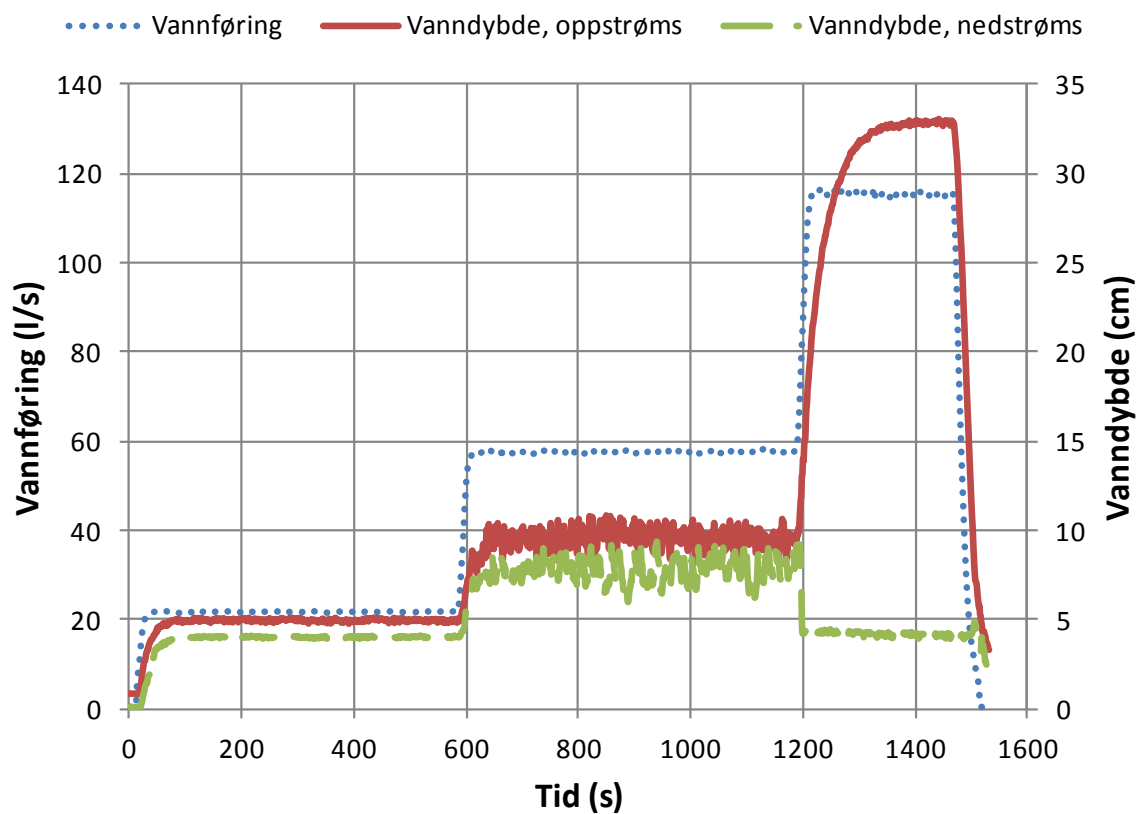
Input

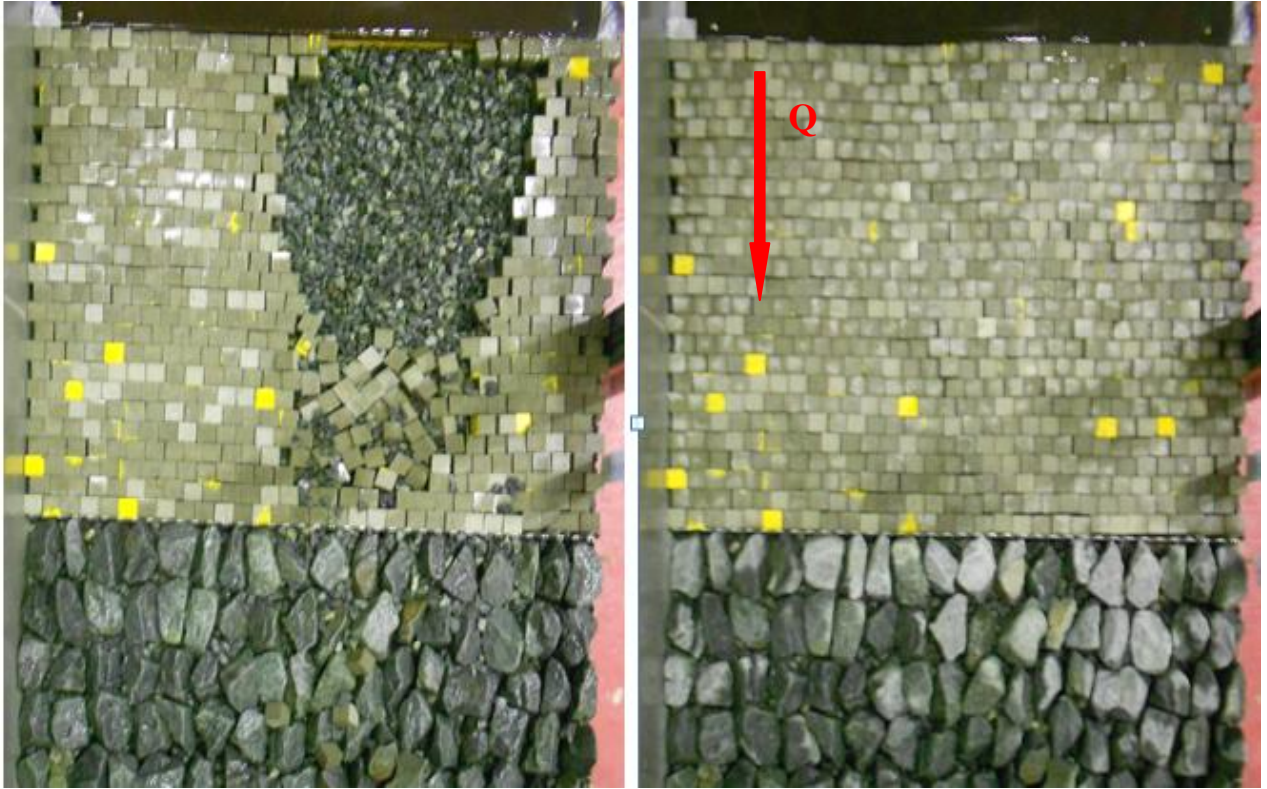
L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
0,84	0,085	743

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	115	0,33	0,042	0,062	1380
Δ	0,46	0,084	0,0035	-	-

Progressivt brudd inntraff etter 23 minutter, altså i det 3. intervallet. Eksakt bruddtidspunkt er kjent. Kubene lå i forband i dette forsøket.





Plastring før og etter brudd

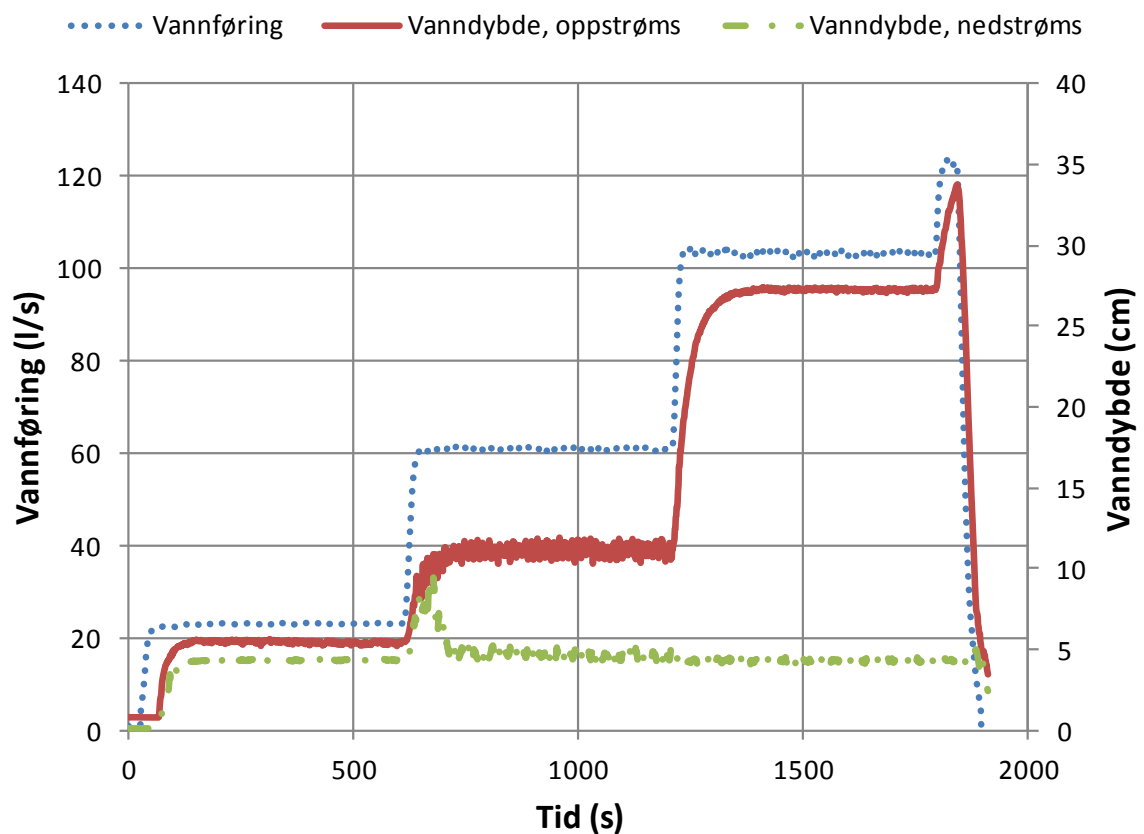
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
0,84	0,085	743

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	122	0,22	0,043	0,055	1830
Δ	1,3	0,015	0,001	-	-

Progressivt brudd inntraff i det 4. intervallet. Kubene lå ikke i forband i dette forsøket.





Plastring før og etter brudd

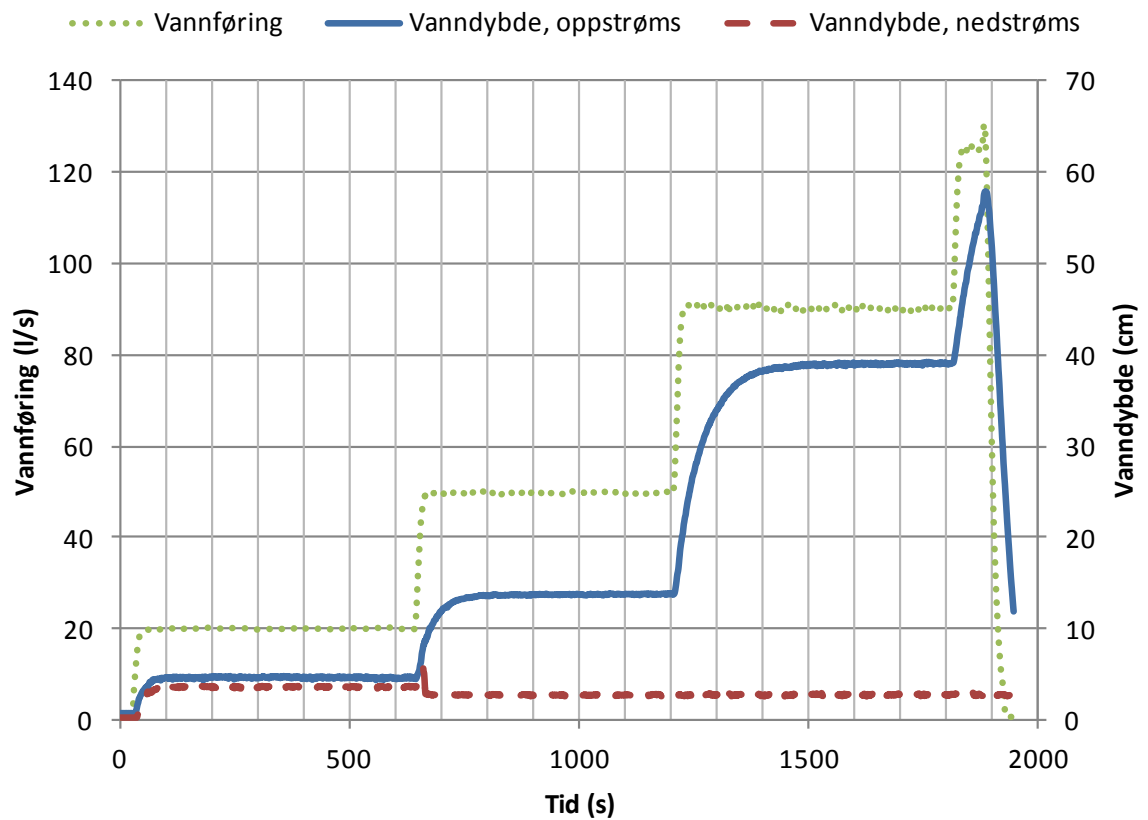
Input

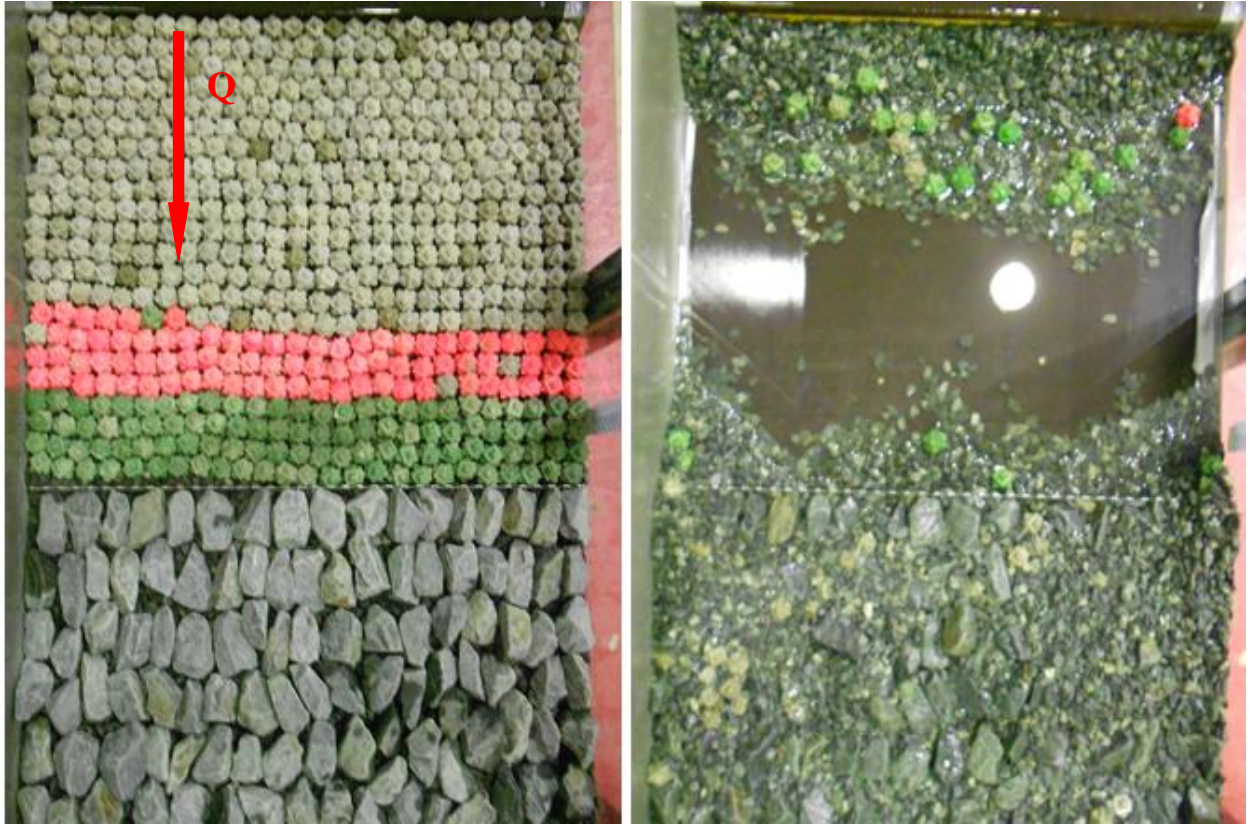
L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
0,84	0,06	550

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_2	121	0,50	0,026	0,067	1870
Δ	9,6	0,14	0,0008	-	-

Progressivt inntraff etter 31 min. Brudd skjedde under en økning i vannføringen.





Plastring før og etter brudd

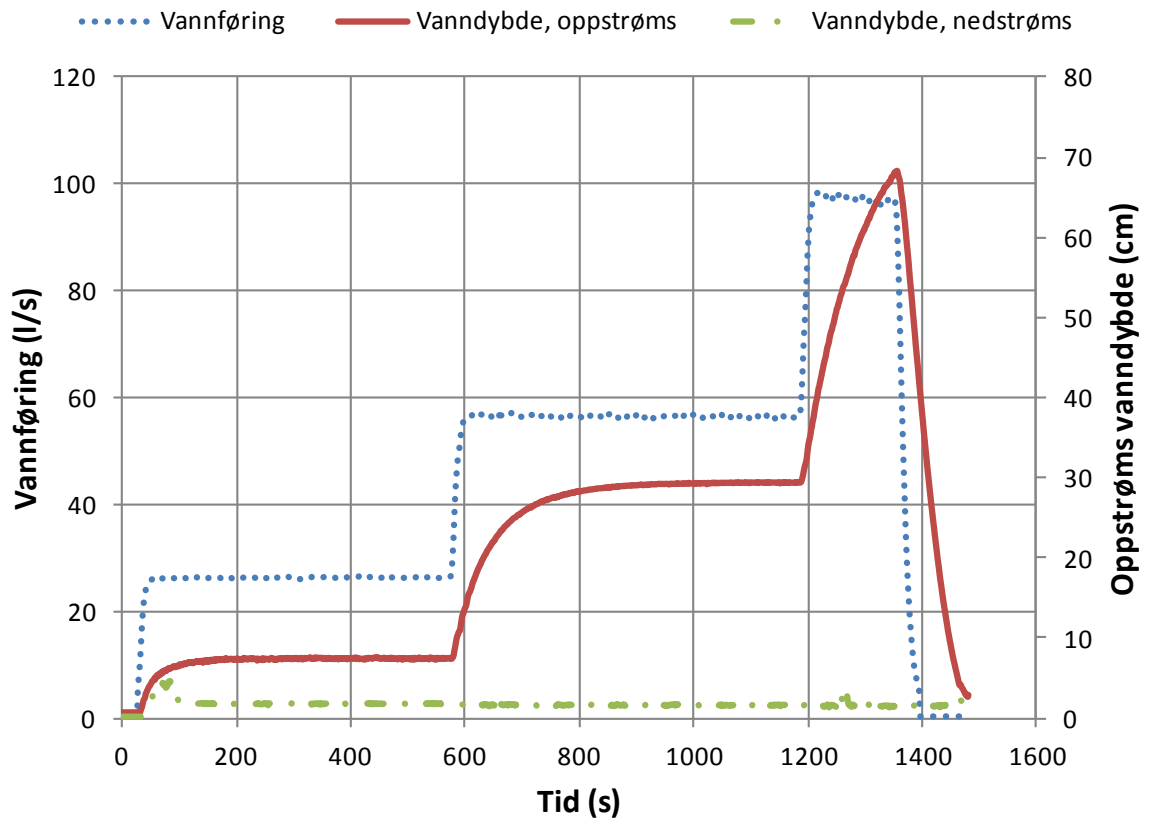
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
0,81	0,03	539

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	97	0,56	0,016	0,055	1256
Δ	0,6	0,09	0,004	-	-

Brudd inntraff etter 21 minutter, altså i det 3. intervallet. Bruddet skjedde i overgangen til plastringen. Forsøket ble avsluttet da





Plastring før og etter brudd



Forsøk rett før brudd inntreffer

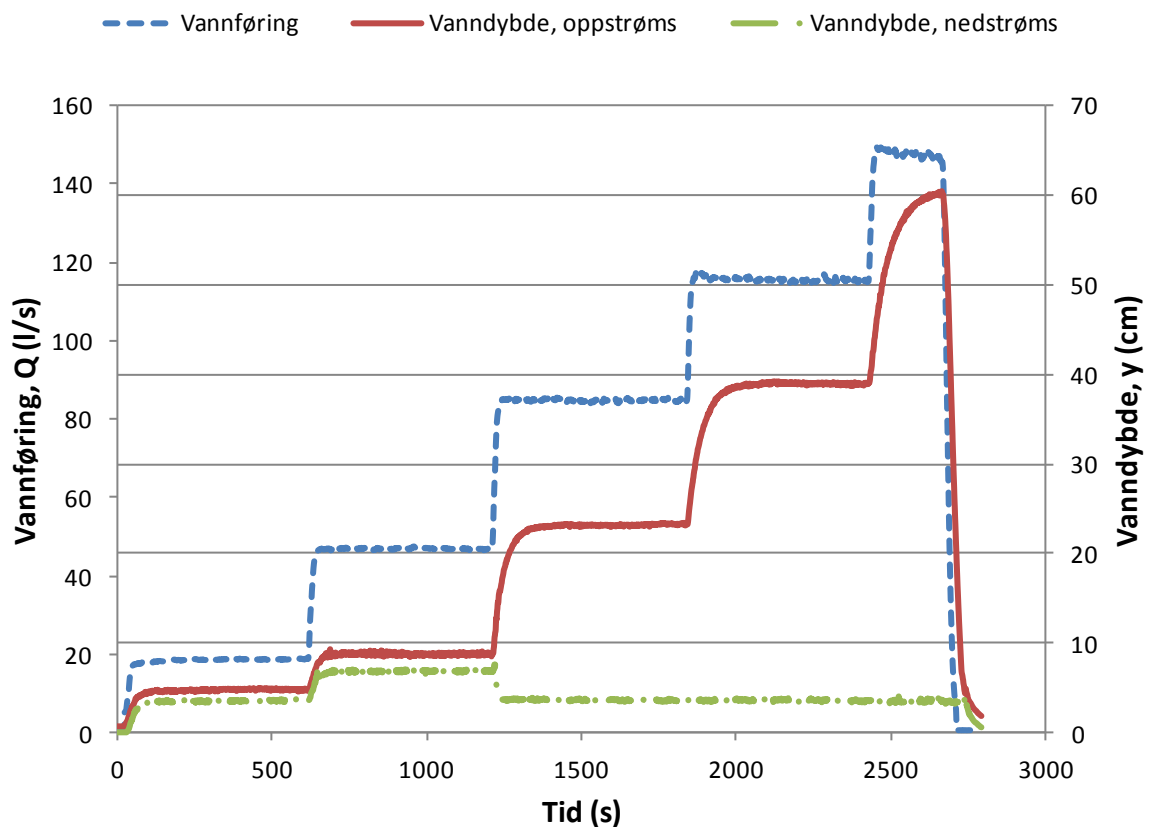
Input

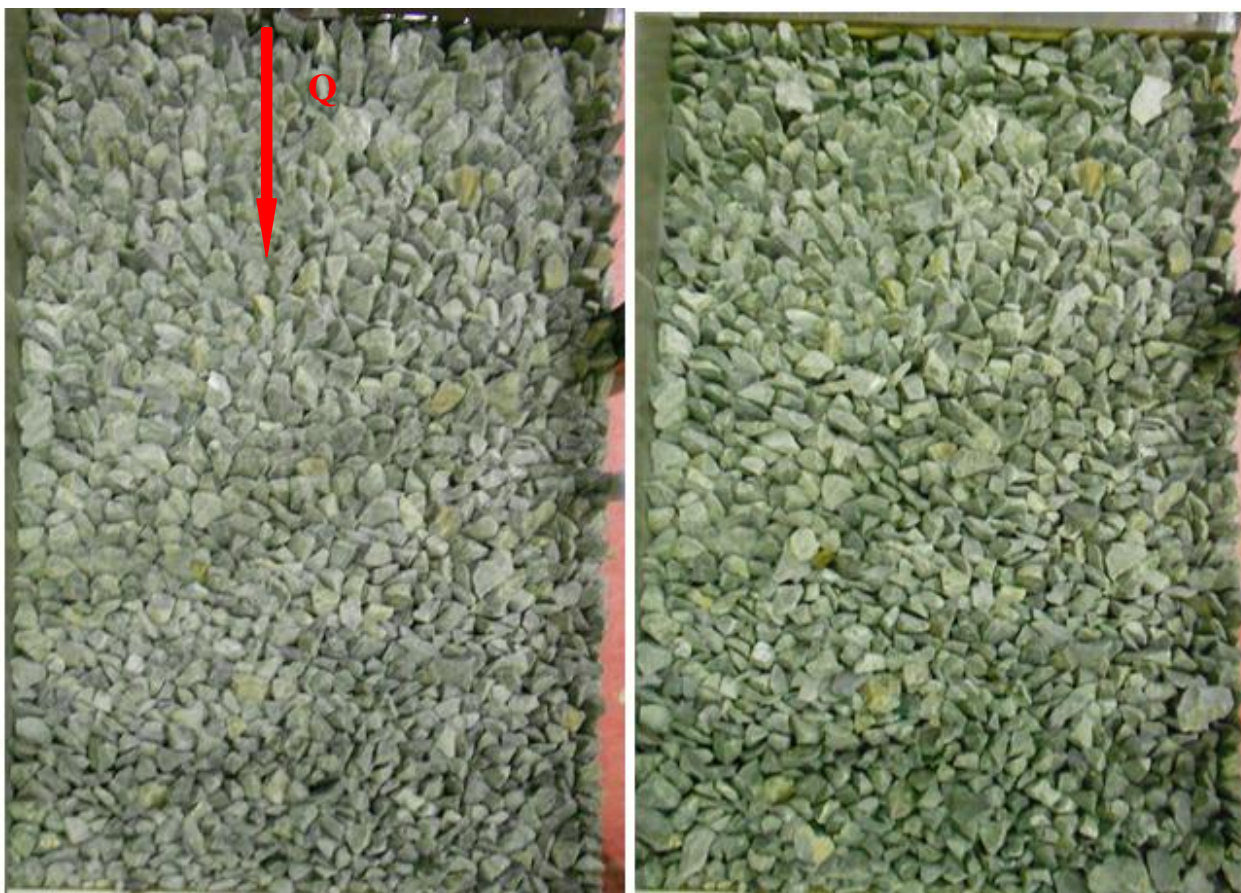
L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1,47	0,075	1203

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	148	0,55	0,036	0,10	2579
Δ	0,6	0,04	0,001	-	-

Brudd inntraff etter 43 minutter som var i det 5. intervallet. Forsøket ble avsluttet etter første brudd for å dokumentere hvordan plastringen ser ut.





Plastring før og etter forsøk



Luftinnblanding ved brudd

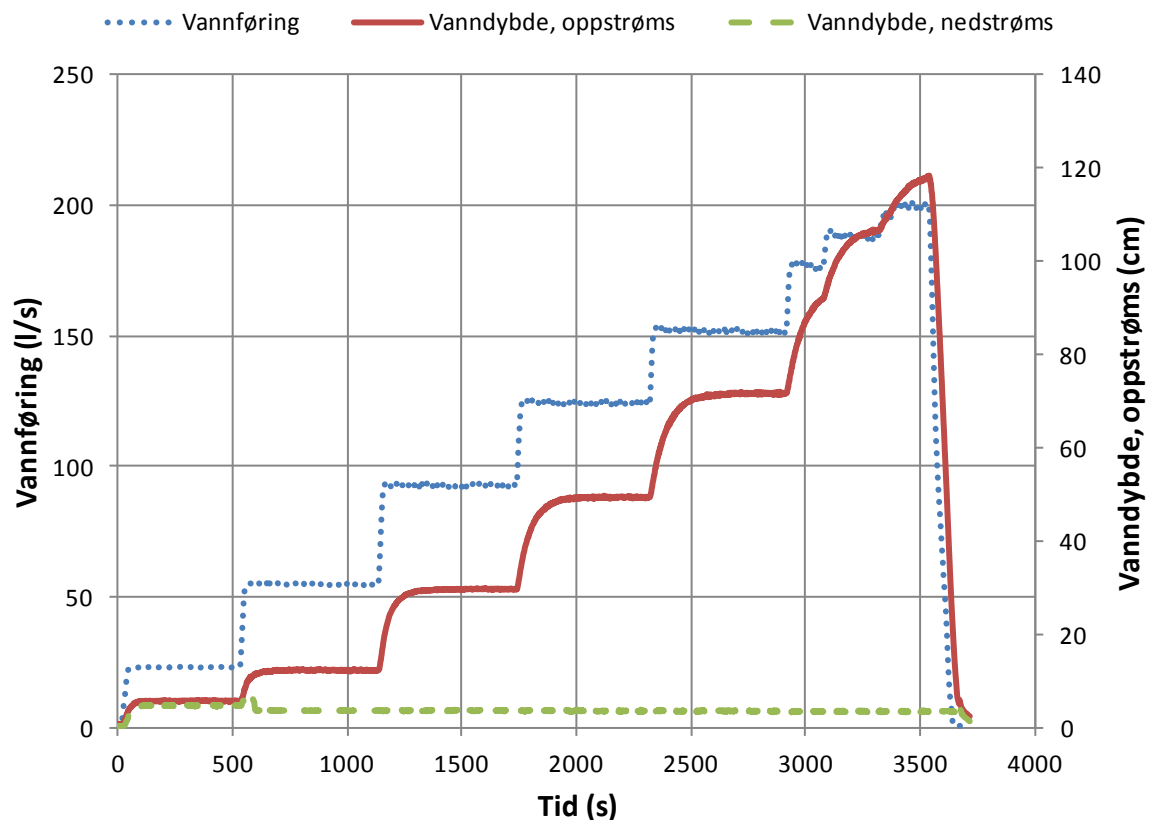
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1,47	0,03	1215

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	152	0,70	0,034	0,095	2400
Δ	0,6	0,038	0,001	-	-

Brudd inntraff etter 40 minutter, altså i det 5. intervallet. 17 minutter etter brudd ble flere steiner revet med vannstrømmen og filtermaterialet kom til syne. Forsøk ble da avsluttet. Vannføringen var 199,7 l/s.





Plastring før og etter forsøk



Luftinnblanding ved brudd

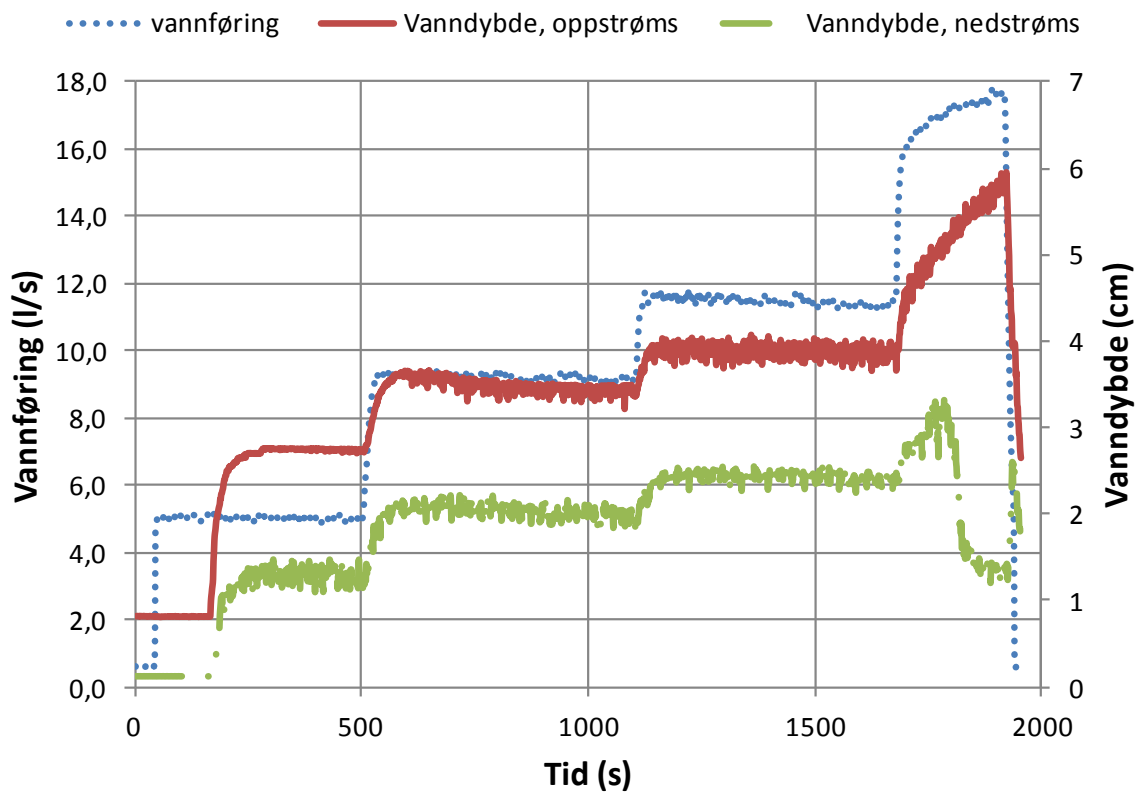
Input

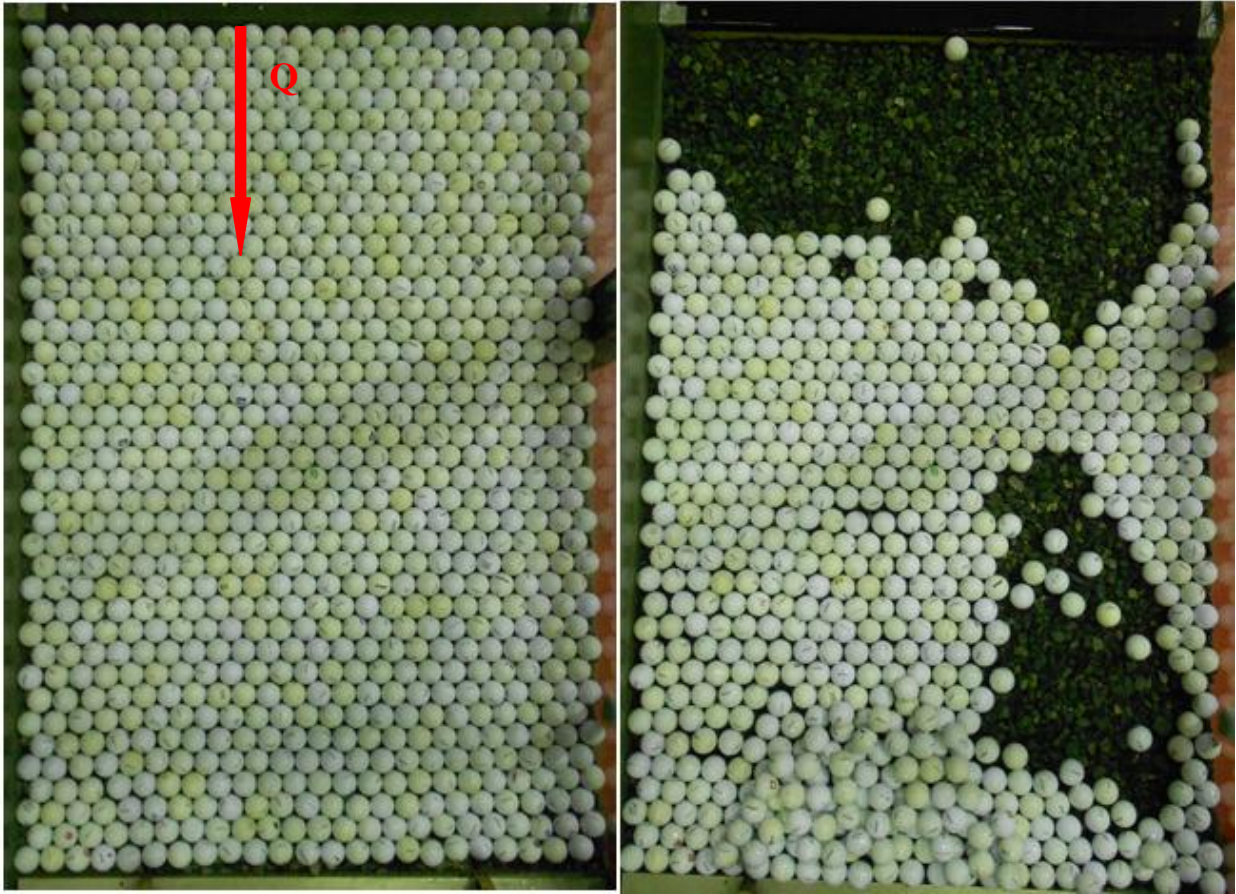
L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1,47	0,03	897

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_2	14,7	0,04	0,025	0,051	1680
Δ	1,6	0,003	0,001	-	-

Brudd inntraff etter 28 min under den siste vannføringsøkningen. Etter ytterligere 2 min ble det vurdert at plastringen hadde gått til globalt brudd.





Plastring før og etter forsøk



Golfballer ruller over plastringen

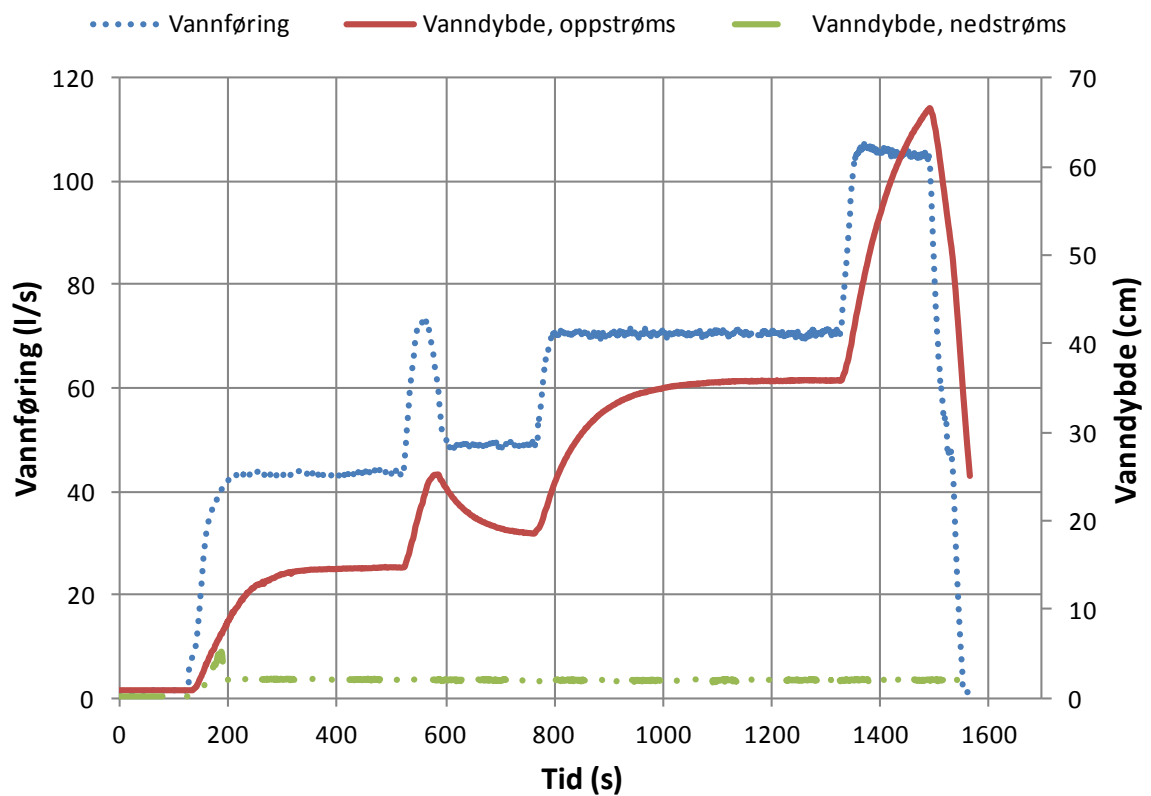
Input

L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
0,85	0,045	669

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_2	102	0,49	0,02	0,05	1320
Δ	8,8	0,07	0,001	-	-

Progressivt brudd inntraff etter omtrent 22 min, mens vannføringen ble økt.





Plastring før og etter forsøk



Forsøk rett før brudd

Input

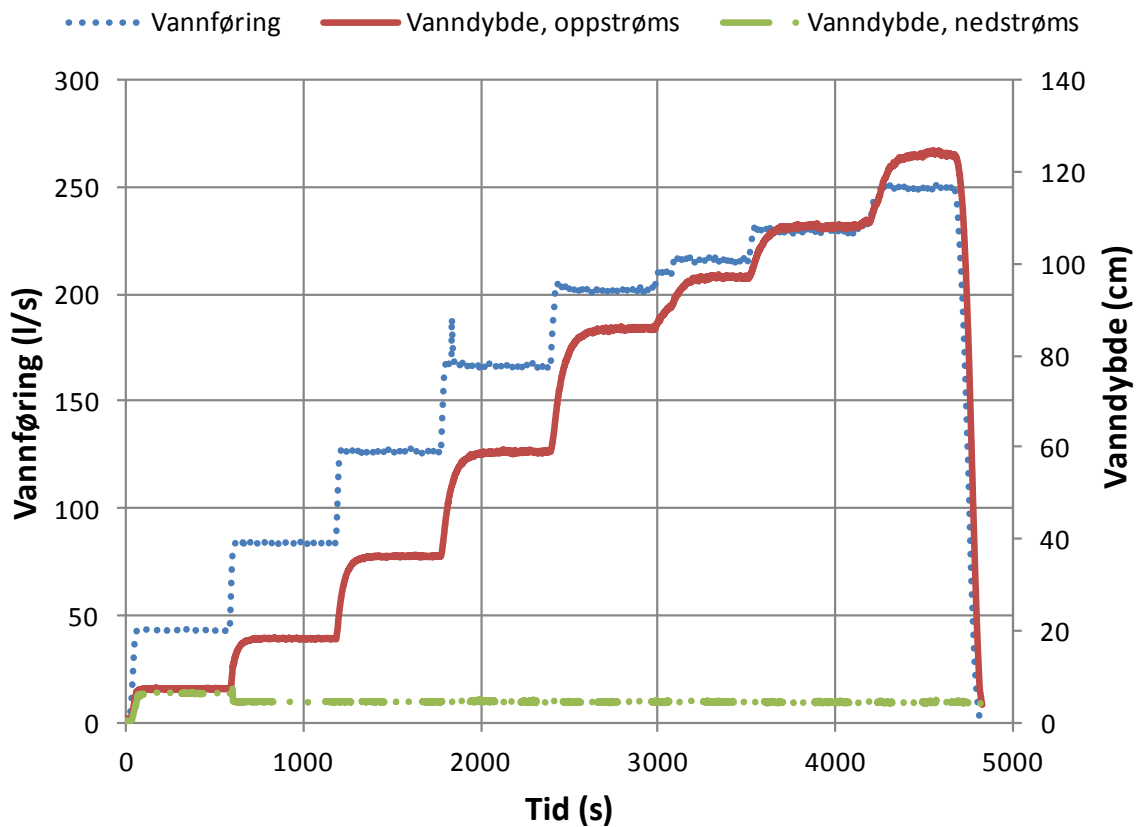
L_p (m)	h (m)	Antall (stk)
1,47	0,085	567

Målte verdier ved brudd

	Q (l/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	y_p (m)	Tid (s)
μ_1	202	0,84	0,044	0,10	2520
Δ	0,8	0,04	0,001	-	-

Brudd inntraff etter 42 min, altså i det 5. intervallet. Etter 4 min ble en stein til revet med vannstrømmen. 31 minutter etter brudd ble flere steiner revet bort fra plastringen.

Forsøket ble da avsluttet. Virker som det er starten av plastringen som er mest kritisk.





Plastring før og etter forsøk

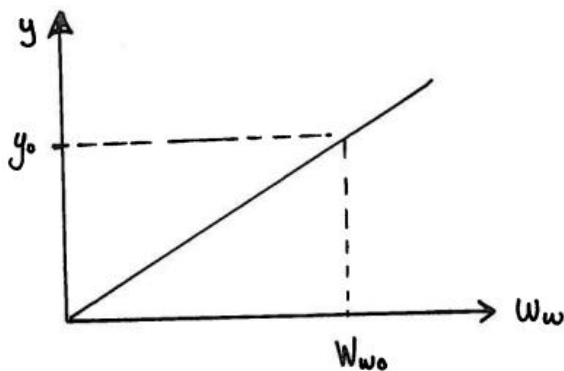


Luftinnblanding ved første brudd

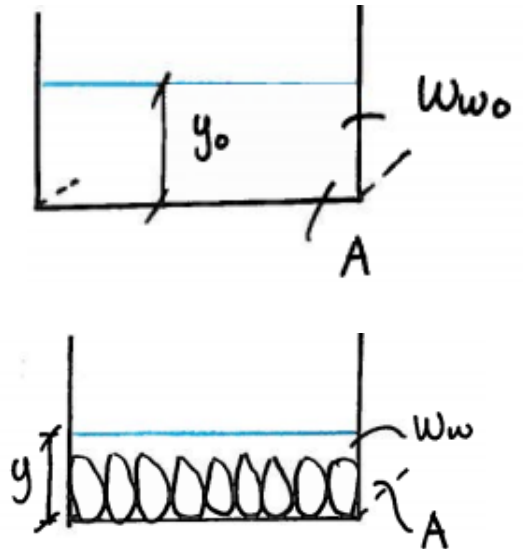
Vedlegg D

Beskrivelse og resultater fra forsøk B

Prinsippet for porøsitet B er at man ser på en boks med kun vann for deretter å se på en boks med vann og stein opp til den samme dybden som når det bare var vann i boksen. Nullinja representerer den situasjonen hvor det bare var vann i boksen.



$$s = \frac{dy}{dx} = \frac{y_0}{W_{w0}} = 0,0096$$



Volum og vekt av vann i boksen med bare vann:

$$V_w = V_{tot} = yA$$

$$W_w = \rho_w yA$$

Volum og vekt av vann i boksen med vann og stein:

$$V_w = yA - V_{stein}$$

$$W_w = \rho_w (yA - V_{stein})$$

Porøsitet er gitt av:

$$n = \frac{V_{tot} - V_{stein}}{V_{tot}}$$

$$n = \frac{yA - V_{stein}}{yA}$$

Vekt av vann gir:

$$yA - V_{stein} = \frac{W_w}{\rho_w}$$

$$n = \frac{W_w}{\rho_w yA}$$

Vekt av vann i boksen når det bare er vann i boksen

$$\rho_w A y_0 = W_{w0} \rightarrow \rho_w A = \frac{W_{w0}}{y_0}$$

Endelig porøsitet

$$n = \frac{W_w}{y \times \frac{W_{w0}}{y_0}} = \frac{W_w}{y} \times s$$

Form

Forklaring

Bildet av plastring

Golfballer Plassering i forband på samme måte som i d-renna.



Kube

Ikke plassering i forband, fordi boksen var uegnet for dette



Cubipod

Plassering på samme måte som i d-renne. Har trukket fra overflødig vannvolum på den ene langsiden



Rundet

Vanskelig å få steinene til å stå uten filter.



Grå, små Vanskelig å få steinene til å stå uten filter



Grå, store Porøsitet ikke beregnet fordi boksen var for liten.

