

Sandfang i tunneler - Tømming under drift

Bjørnar Hviding Roalkvam

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)

Innlevert: desember 2013

Hovedveileder: Leif Lia, IVM

Medveileder: Jochen Aberle, IVM
Tom Jacobsen, Sedicon AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGÅVE

Kandidat: *BJØRNAR HVIDING ROALKVAM*

Tittel: **SANDFANG I TUNNELAR – TØMMING UNDER DRIFT**

1 BAKGRUNN

I råsprenge vasskrafttunnelar vil det alltid vere ein viss sandtransport. Sand og grus kjem både ifrå erosjon av køyrebane/sole og ifrå inntak inn på tunnelen. Sand og andre lausmassar vil tranporterast med vatnet der det er strømningsforholda er slik, medan massar vil legge seg der tranportkapasiteten ikkje lenger er tilstrekkeleg. Sedimentkonsentrasjonen vil være størst nær bunnen av tunnelen og endel av transporten vil være bunnlast. For å hindre sand/grus i å nå kraftverket, byggast det inn sandfang på ein- eller fleire stader i tunnelsystemet. Dei fleste sandfang er bygd som lange basseng under nivået på solen av tunnelen, medan andre kan vere berre reine utvidingar av tunneltverrsnittet. Slike sandfang vil fyllast opp over tid, avhenging av sedimentmengde og storleik på kammeret.

Det er i liten grad utvikla system for å tømme sandfang. Videre er det er i liten grad studert hvordan tunnelen bidrar til å skape bunntransport og dermed gjøre sjølv små sandfang effektive.. Dersom eit sandfang i ein vasskrafttunnele likevel mø tømmost, må tunnelsystem tappast ned og sandfanget tømmost maskinelt. System for spyling, som på Bondhusbreen (Folgefonn) og Engabreen (Svartisen), vart utvikla på 80-talet og fungerer framleis svært godt. Tømming av sandfang med drift på tunnelen gjennomførast på Khimti-kraftverket i Nepal, men har potensiale til å nyttast også andre stader. Denne oppgåve vil vidareutvikle kunnskapen om hvor effektivt forskjellige sedimentsandfraksjoner fanges opp av tunnelsandfang og om tømming av sandfang frå vasskrafttunnelar under drift.

Grunnleggande studier for sedimenter kan utførast både med berekningar, modellstudier og fullskala testing. I denne masteroppgåva vil hovudvekta ligge på modellforsøk.

2 HOVUDPUNKT I OPPGÅVA

Arbeidet med masteroppgåva vil innehalde følgjande hovudpunkt:

1. Litteraturstudium av funksjon til sandfang, spyling av sedimenter og transport av sedimenter i røyr/kanalar/tunneler.
2. Gjennomgang av prosjektmateriale for liknande prosjekt, t.d. Khimti, Bondhusbreen m.fl.
3. Utforming og projektering av testrigg med tunnel og sandfang med spylearrangement, plasserast i Vassdragslaboratoriet NTNU.
4. Deltaking i bygging av testrigg saman med tekniskar/modellbygger.
5. Undersøke sedimenttransport langs tunnellen, spesielt bunntransport / vertikal fordeling
6. Køyning av forsøk på ulike spylearrangement og optimalisering av løysingane.
7. Beregningsgrunnlag for å vurdere hvilke sedimentfraksjoner som felles ut.
8. Fagleg vurdering av dei ulike løysingane og vidare forslag til geometrisk utforming.
9. Rapportering.

Innhaldet i masteroppgåva vil bli nærmare avgjort av rettleiar på basis av informasjon som kjem fram etter kvart som arbeidet går framover.

3 RETTLEIING, DATA OG INFORMASJON

Formell rettleiar vil vere Leif Lia på NTNU. Medrettleiar vert Professor Jochen Aberle og Dr. Tom Jacobsen i Sedicon AS.

Diskusjon med, og bidrag frå, kollegaer og medarbeidarar med NTNU, SINTEF, NVE, kraftselskap, leverandørar og rådgivarar vert tilrådd. Bidrag som går inn i oppgåva skal alltid refererast til på rett vis.

4 RAPPORTFORMAT, REFERANSAR OG ERKLÆRING

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osb. får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei liste over figurer og tabellar, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i A4 format som pdf i DAIM og trykkast i tre eksemplar som leverast faglærer/institutt.

Samandraget skal ikkje ha meir enn 450 ord og skal være eigna for elektronisk rapportering.

Prosjektoppgåva skal ikkje leverast seinare enn fredag 20. desember 2013.

Trondheim, 2. august 2013



Leif Lia
Professor

FORORD

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på mitt studium ved Bygg- og miljøteknikk på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Arbeidet er utført ved institutt for vann- og miljøteknikk med fordypning innen vannkraft og vassdragsteknikk.


Våren 2013 skrev jeg prosjektoppgave om "Erosjon og sedimenthåndtering ved friskeil strømming – Modellforsøk av Coca Coda Sinclair" (Roalkvam, 2013). Etter endt prosjektoppgave undersøkte jeg muligheten for å fortsette med en masteroppgave innen samme fagfelt. Etter samtaler med professor Leif Lia ved instituttet for vann og miljøteknikk og Tom Jacobsen som er teknisk direktør i Sedicon AS, som begge hadde veiledet meg gjennom prosjektoppgaven, kom vi sammen frem til masteroppgaven.

Studiet generelt har bydd på mange spennende utfordringer, muligheter og store opplevelser. Arbeidet dette siste semesteret med oppgaven har vært lærerikt og utfordrende. Det å få arbeide i laboratoriet har gitt meg stort utbytte.

Ved institutt for vann- og miljøteknikk vil jeg rette en stor takk til Leif Lia som har vært hovedveileder for denne oppgaven og som med stor interesse og engasjement har undervist i vannkraft og vassdragsteknikk som er grunnlaget for oppgaven. Takk til Jochen Aberle som har vært medveileder og til stor hjelp med den teoretiske delen av oppgaven. Takk til Geir Tesaker som har stått for praktisk hjelp i laboratoriet.

Jeg vil også rette en stor takk til Sedicon AS for tilrettelegging av forsøk og lån av nødvendig utstyr. Takk til Statkraft for finansiering til å utføre modellforsøk.

Til slutt vil jeg rette en stor takk til Tom Jacobsen som i tillegg til å være medveileder, har bidratt med stort engasjement, bistått ved modellforsøkene og kommet med veiledning gjennom hele oppgaven.


Bjørnar Hviding Roalkvam
Trondheim, 20. desember 2013

ABSTRACT

Sediment Transport will always take place in a blasted hydropower tunnel. Road left behind after construction provides basis for erosion and sediments can be transported through the intake. To prevent sediments from entering the power plant sand traps are being built at one or several locations in the tunnel. The purpose of the sand trap is to collect all sediments above a given grain size. As of today there is few developed flushing arrangement for the flushing of sand traps.

In Norway today there are at least two glacier intakes with sand traps that have an installed system for flushing. The system is designed to flush sand captured through a hatch and tunnel. Khimti HPP in Nepal and Cuyamel HPP in Honduras have installed a system for emptying the sand trap during operation of the power plant. The system is provided by Sedicon AS and has the potential to be used in other locations as well. The system consists of a Sedicon Sluicer and Sedicon unit.

This paper has studied the concentration of sediments in the flushing discharge of the Sedicon Sluicer. Sediment transport through a tunnel is studied. The main focus has been directed towards the development of the vertical concentration distribution and bed load. The study is based on a physical model and a literature study.

A model consisting of a horizontal tunnel with a sand trap is constructed in the laboratory at NTNU, named Vassdraglaboratoriet. A simple Sluicer is tested and a Sedicon unit with two connected Sluicers. The vertical distribution of the concentration is studied in five cross sections along the tunnel. Through the work whit this report and the experiments, interesting questions about stable grain size in the tunnel and the capacity of the tunnel have occurred. The questions have been answered through simple experiments.

The Sluicers open top in relation to the direction of flow in the tunnel effected the concentration of sediments in the flushing discharge. Without any modifications the highest concentration of sediments in the water used to flush was found when the Sluicers open top was placed in the same direction as the direction of flow in the tunnel. A capacity of 480 g/l was obtained in the model for a single Sluicer. The Sedicon unit with two Sluicers achieved a concentration of 160 g/l. With the Sluicers open top directed toward the direction of flow in the tunnel an average flushing effect of 50 g/l was noted in the model. To investigate if the Sluicers open top was the cause of the reduced sediment concentration, tests were conducted where the top of the Sluicer was sealed off. It was then achieved significantly higher flushing concentration. The Sedicon unit increased the flushing concentration up to 350 g/l. The single Sluicer achieved a concentration of 160 g/l.

It was found similarities between Rouse's theoretical concentration distribution and the concentration distribution in the model. Rouse may not be used to exactly determine the vertical concentration distribution in a cross section, but may be used as a guideline. It was found that bed load can be forced by exceeding the tunnels capacity.

An experiment was conducted to test Lysne's formula for stable grain size in a tunnel. This is a rewriting of formulas for sediment transport in open channel flow, multiplied by a factor found through model tests. It was found correspondence between stable grain size in the model and the calculated stable grain size. This may indicate that the same procedure may also be implemented on a general basis for the equations developed for the transport of sediments by open channel flow.

SAMMENDRAG

Sedimenttransport vil alltid finne sted i en råsprengt vannkrafttunnel. Etterlatt kjørebane gir grunnlag for erosjon og sedimenter kan bli transportert med vannet gjennom inntaket. For å forhindre sedimenter i å nå kraftverket bygges det et eller flere sandfang i tunnelen. Sandfangene har som hensikt å samle opp alle sedimenter over en bestemt størrelse. Etter hvert som sandfanget fylles med sedimenter vil det være behov for å tømme sandfanget. Det er i liten grad utviklet spylearrangement for å spyle sandfang.

I Norge i dag finnes det blant annet to breinntak med tilhørende sandfang med et eget spylesystem. Systemet er utviklet for å spyle sandfanget gjennom en spyleluke og tunnel. Khimti HPP i Nepal og Cuyamel HPP i Honduras har installert et system for tømming av sandfanget under drift. Dette systemet er levert av Sedicon AS og har potensial til også å bli benyttet andre steder. Systemet består av spalterør og en Sedicon enhet.

Denne oppgaven har vurdert spyleeffekten til spalterøret og hvilke faktorer som er avgjørende for en høy spyleeffekt. Sedimenttransporten gjennom en vannfylt tunnel er studert, hvor fokus har vært rettet mot utviklingen av den vertikale konsentrasjonsfordelingen og bunnlast. Et litteraturstudie og fysisk modellforsøk danner grunnlag for arbeidet.

En testrigg bestående av en horisontal tilløpstunnel med sandfang er bygget i Vassdraglaboratoriet ved NTNU. Et enkelt spalterør er testet samt en Sedicon enhet med to tilkoblede spalterør. Den vertikale konsentrasjonsfordelingen er studert i fem tverrsnitt langs tunnelen. Gjennom arbeidet med oppgaven og forsøkene har det dukket opp interessante spørsmål om stabil steinstørrelse i tunnel og kapasitet. Spørsmålene har blitt besvart gjennom enkle forsøk.

Forsøkene har vist at de to testede spylearrangementene oppførte seg i stor grad likt. Faktoren som gir størst utslag for spyleeffekten er plasseringen av spalterøret i sandfanget. Nærmere bestemt er det spalterørets åpne topp i forhold til strømningsretningen i tunnelen. Uten noen modifikasjoner gav spylearrangementet klart høyest spyleeffekt når spalterørets åpne topp var plassert i samme retning som strømningsretningen i tunnelen. En spyleeffekt på 480 g/l ble oppnådd i modell for et enkelt spalterør. Sedicon enheten med to spalterør oppnådde en spyleeffekt på 160 g/l. Med spalterørets åpne topp rettet mot strømningsretningen i tunnelen ble en gjennomsnittlig spyleeffekt på 50 g/l målt i modell. For å finne ut om spalterørets åpne topp var årsaken til den reduserte spyleeffekten er det gjennomført forsøk der toppen av spalterøret er forseglet. Det ble da oppnådd en betraktelig høyere spyleeffekt. Sedicon enheten fikk økt spyleeffekt opp til 350 g/l. Det enkle spalterøret oppnådde en spyleeffekt på 160 g/l.

Det ble funnet likheter mellom Rouse's teoretiske vertikale konsentrasjonsfordeling og konsentrasjonsfordelingen i modell. Om Rouse ikke kan brukes for å eksakt bestemme den vertikale konsentrasjonsfordelingen i et fylt tverrsnitt, vil Rouse gi en god antydning til hva som kan forventes. Det ble funnet at bunntransport kan fremprovoseres ved å overstige tunnelens transportkapasitet.

Et forsøk ble utført for å teste Lysne's formel for stabil steinstørrelse. Lysne's formel er en omskriving av formler for sedimenttransport ved friskeilstrømning multiplisert med en faktor funnet gjennom modellforsøk. Det ble funnet samsvar mellom stabil steinstørrelse i modell og beregnet stabil steinstørrelse. Dette indikerer at også samme metode kan gjennomføres på en generell basis for formelverk utviklet for sedimenttransport ved friskeil strømning.

INNHOLDSFORTEGNELSE

Forord.....	I
Abstract.....	III
Sammendrag.....	V
Symbolliste.....	9
1 Innledning.....	1
2 Eksisterende Spylearrangement.....	3
2.1 Sedicon Spalterør.....	3
2.2 Spyling.....	5
3 Teorigrunnlag.....	9
3.1 Strømning i fylte tverrsnitt.....	9
3.2 Erosjon, Massetransport og Sedimentering.....	15
3.3 Laboratorieteknikk.....	26
3.4 Spalterør.....	31
4 Metodikk.....	33
4.1 Fysisk modell.....	33
4.2 Kalibrering av modell.....	39
4.3 Forsøksstrategi.....	41
4.4 Begrensninger og feilkilder.....	42
5 Modellforsøk.....	45
5.1 Vertikal fordeling og bunnlast.....	45
5.2 Sandfang og spyling.....	47
5.3 Stabil steinstørrelse.....	51
6 Resultater.....	53
6.1 Vertikal fordeling og bunnlast.....	53
6.2 Spyling av sandfang.....	55
6.3 Andre resultater.....	57
7 Diskusjon.....	61
7.1 Vertikal fordeling.....	61
7.2 Tømming av sandfang.....	64
7.3 Annet.....	66
8 Konklusjon.....	71
Bibliografi.....	73
Figurer.....	75
Tabeller.....	77
Vedlegg.....	79

SYMBOLLISTE

A = Areal [m²]
B = Bredde [m]
C = Konsentrasjon
C' = Lysne's koeffisient, 115 – 140
C_a = Konsentrasjon ved et kjent punkt a
C_D = Dragkoeffisient [-]
C_L = Løftekoeffisient [-]
C_v = Sedimentkonsentrasjon per volum
D = Partikkelens diameter [mm]
f = Friksjonskoeffisient [-]
F_D = Dragkraften [N]
F_e = Elastisk kompresjon [-]
F_F = Friksjonskraft mot bunn [-]
F_g = Gravitasjonskreftene [-]
F_i = Treghtetskreftene [-]
F_L = Løftekraften [-]
F_m = Krefter modell [m/s]
F_p = Krefter prototype [m/s]
F_p = Trykkreftene [N]
F_r = Krefter forholds faktor [-]
F_t = Overflate spenning [-]
F_v = Viskøse skjærkrefter [-]
H = Høyde [m]
h = Listetykkelse [mm]
h_f = Falltap [mVs]
I = Helning
i = Helningen til energilinjens for rent vann
i_m = Helningen til energilinjens for vann med sedimenter
k = Von Karman's konstant, 0,4
K' = Proporsjonalitets konstant, K' = 176
K_s = Falltap gjennom spalten
L = Lengde [m]
L_m = Mål modell [m]
L_p = Mål prototype [m]
L_r = Geometrisk forholds faktor [-]
M = Mannings tall
n = 1/M
p = Trykk
P = Våt periferi [m]
Q = Vannføring [m³/s]
Q_s = Konsentrasjon per volum, sedimenter
R = A/P = hydraulisk radius [m]
R = Hydraulisk radius [m]
V = Vannhastighet [m/s]
V_m = Hastighet modell [m/s]
V_p = Hastighet prototype [m/s]
V_r = Hastighet forholds faktor [-]
w = Partikkelens fallhastighet [m/s]
W = Steinens neddykkede vekt [N]
y = Høyde fra bunn [m]

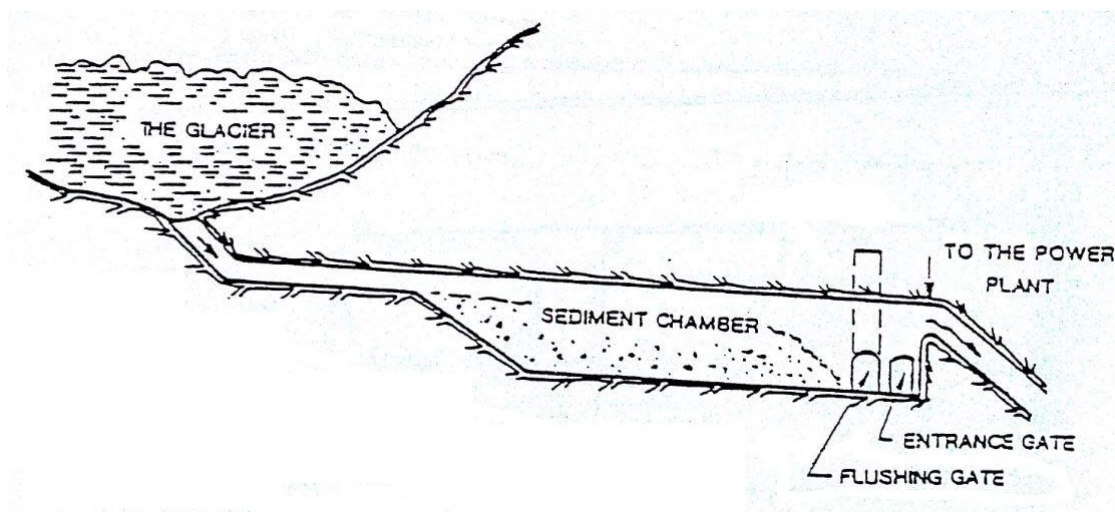
z = Avstand fra nullpunkt til bunn av rør/tunnel [m]
 γ = Vannets tyngdetetthet [N/m^2]
 γ_s = Spesifikk vekt sand [N/m^3]
 γ_s = Steinens tyngdetetthet [N/m^2]
 γ_v = Spesifikk vekt vann [N/m^3]
 Δt = Endring i tid [s]
 Δy = Endring i dybde [m]
 ε = Absolutt ruhet [mm]
 ε/D = Relativ ruhet [-]
 θ = Skråningshelling [grader]
 ν = Vannets viskositet [m^2/s]
 ρ = Vannets tetthet [kg/m^3]
 ρ_s = Steinens tetthet [kg/m^3]
 τ = Skjærspenning mot bunn [N/m^2]
 φ = Friksjonsvinkel [grader]
 φ = Massens rasvinkel [grader]
* = Skjærhastighet [-]

1 INNLEDNING

I store deler av verden er sedimentproblematikk et sentralt tema ved vannkraftutbygging og produksjon. I Norge er ikke dette en vanlig problemstilling, men ved blant annet breinntak er sedimenthåndtering nødvendig også i Norge.

I råsprenge vannkrafttunneler vil det alltid være en viss sedimenttransport. Erosjon av kjørebane og sedimenter gjennom inntaket vil føre til en transport av sand og grus gjennom tunnelen. Mengden og fraksjonene av sedimenter er stedsbestemt og avhengig av den lokale geologien. I noen verdensdeler er sedimentkonsentrasjonen høy og da spesielt ved flom og under regntid. For å hindre sedimentene å komme til kraftverket bygges det ett eller flere sandfang i tunnelen. Store andeler av sedimentene vil gå som bunnlast og felles ut i sandfanget.

Sandfanget må tømmes etter hvert som det fylles med sedimenter. Det er i liten grad utviklet system for å tømme sandfang. Om sandfanget må tømmes maskinelt, er dette tidkrevende og kostbart. Vannkrafttunnelen må tømmes for vann og mannskap må stå for den maskinelle tømmingen. Norge har i dag blant annet to sandfang med et utviklet system for spyling, ved Bondhusbreen og Engabreen. Dette er et system som har fungert bra og spylar sandfanget ved friskeilstrømning gjennom en spyleluke og spyletunnel. Figur 1.1 viser et typisk Norsk system med tilløpstunnel og sandfang. Skissen er i dette tilfellet fra Bondhusbreen.



FIGUR 1.1 TYPISK NORSK TILLØPSTUNNEL MED SANDFANG (GUTTORMSEN, 2006)

Spyling av sandfang under drift gjennomføres ved Khimti hydropower plant (HPP) i Nepal og Cuyamel HPP i Honduras. Anleggene bruker teknologi levert av Sedicon AS. Sedicon har et spylearrangement bestående av spalterør som kan installeres i nye eller eksisterende sandfang. Denne teknologien har potensial til også å bli benyttet andre steder.

Det er i liten grad studert om en tunnel bidrar til å skape bunntransport. Sedimenttransporten gjennom tunnelen vil være en avgjørende faktor for hva som felles ut i et sandfang. Er det tilfelle at tunnelen bidrar til å danne bunntransport vil dermed små sandfang som kan tømmes under drift være effektive.

Sedimenttransporten langs tunnel og frem mot sandfanget skal studeres. Tømmingen av sandfang under drift og faktorer som påvirker spyleeffekten til spylearrangementet skal studeres. Spylearrangement er levert av Sedicon AS. De overnevnte skal studeres gjennom et litteraturstudie og et fysisk modellforsøk med hovedvekt på modellforsøk.

Prosjektmateriale fra eksisterende spylearrangement skal gjennomgås sammen med relevant teori som ligger til grunn for modellforsøket. Utforming, prosjektering og bygging av en testrigg med tunnel, sandfang og spylearrangement plassert i Vassdragslaboratoriet ved NTNU. Kjøring av forsøk med ulike utforminger og plassering av spylearrangement for optimalisering skal gjennomføres. Samt studere sedimenttransporten langs tunnelen ved ulike senario. Spesielt med fokus på buntransport og utvikling av den vertikale sedimentkonsentrasjonen.

2 EKSISTERENDE SPYLEARRANGEMENT

I dette kapitlet er prosjektmaterialet for eksisterende spylearrangement i Norge og utlandet presentert.

2.1 SEDICON SPALTERØR

Sedicon har et arrangement med spalterør som tillater tømning av sandfang under drift, uten at det forstyrrer vanntilførselen. Spalterøret ble oppfunnet av Tom Jacobsen og testet for første gang i 1993 ved Vassdragslaboratoriet NTNU (Jacobsen, 1997). Spalterøret er et rør med hull på undersiden som installeres i sandfanget. Arrangementet benytter høydeforskjellen fra sandfanget til utløpet for å tømme sandfanget. Sedimentene som ligger i og ved åpningene i spalterøret blir revet med vannet som strømmer gjennom røret. Høydeforskjellen mellom spalterøret og utløpet er drivkraften som får vannet til å strømme gjennom røret. Arrangementet har ikke behov for strømtilførsel og har heller ikke noen bevegelige deler. Dette kan benyttes i både trykksatt sandfang og sandfang med frispelstrømning (Sedicon, 2013). Spalterør har blitt benyttet under forsøk i denne oppgaven og vil bli beskrevet nærmere i kapittel 3.4.

Spalterør er installert og brukt ved Khimti hydropower plant (HPP) i Nepal og ved Cuyamel HPP i Honduras.

2.1.1 KHIMTI HPP

Khimti HPP er et elvekraftverk med en installert effekt på 60 MW. Khimti HPP er plassert i elven Khimti Kholā, sideelven til Tamakoshi, 80 km vest fra Katmandu i Nepal. Elvekraftverket utnytter et fall på 680 meter og har en tilløpstunnel som er 7 km lang med et tverrsnitt på 11 m² (Jacobsen, 2011). Kjørebanelen til tunnelen ble lagt igjen etter bygging. Kjørebanelen sammen med resten av tunnelen er med på å danne grunnlag for erosjon. Som et resultat har sedimenter på opp til 50 mm blitt transportert gjennom tunnelen. Sedimenter vil også passere sandfangene ved inntaket. I enden av tilløpstunnelen er det bygget et sandfang på 130 m³ med to installerte spalterør, rørene er vist i figur 2.1. Spalterørene går gjennom skilleveggen og ut adgangstunnelen hvor de så blir avvannet i et basseng.



FIGUR 2.1 SPLATERØR I KHIMTI HPP (SEDICON, 2013)

Spalterørene blir brukt på en ukentlig basis under regntiden og det er estimert at omtrent 500 m³ med sedimenter har blitt fjernet hvert år de siste 10 årene. Massene som har blitt fjernet varierer mye i størrelse, fra fin sand til grus på 50 mm. Etter at kjørebanelen i tilløpstunnelen hadde oppnådd et naturlig dekklag, var 50 % av sedimentene spylt fra sandfanget finere enn 0,2 mm (Jacobsen, 2011).

Systemets kapasitet er målt til 3000 m³ per time. I snitt trengs 5 m³ med vann for å fjerne 1 m³ med sedimenter. Hvert spalterør har en spylekapasitet på opptil 1 m³/s. Den gjennomsnittlige sedimentkonsentrasjonen er målt til 11 % av volumet, hvor den maksimale konsentrasjonen målt er 20,5 % av volumet.

2.1.2 CUYAMEL HPP

Cuyamel HPP er et elvekraftverk med installert effekt på 7 MW som ligger nordøst i republikken Honduras, og er plassert i elven Frio. Cuyamel HPP har en 14 meter høy dam, et lite inntaks reservoar og en 525 meter lang tilløpstunnel. I starten av tilløpstunnelen er det et 53 meter langt og 4,5 meter bredt sandfang, se figur 2.2.



FIGUR 2.2 CUYAMEL HPP SANFANG (SEDICON, 2013)

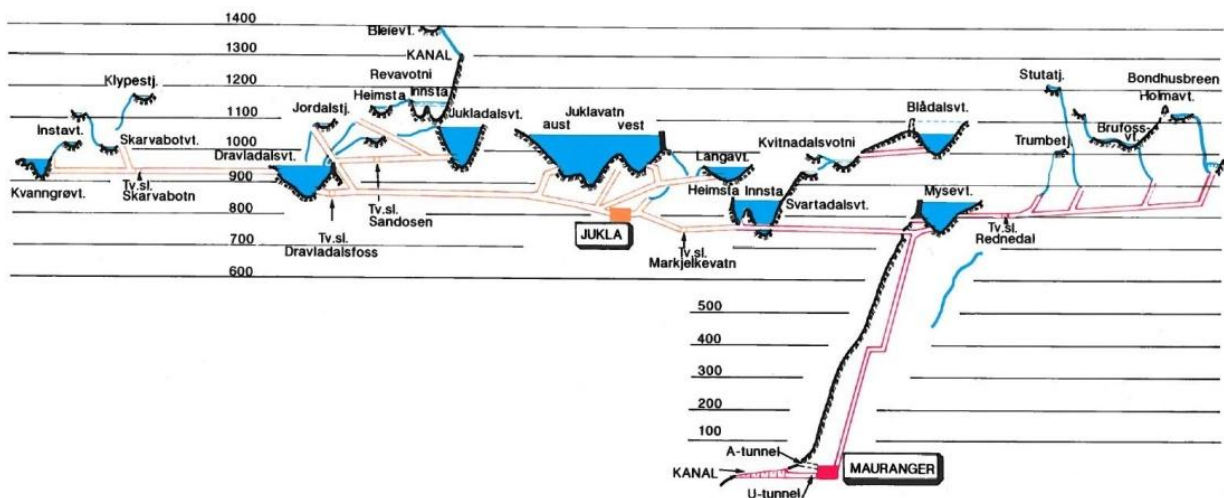
Dette sandfanget er det eneste arrangementet for å håndtere sedimenter ved Cuyamel HPP. Konvensjonell spyling av sandfanget ville ført til at tunnelen måtte tømmes for vann og deretter fylles forsiktig for å forhindre luftbobler i tunnelen. Det har blitt installert to spalterør i sandfanget som tillater spyling av sedimenter uten å stoppe produksjonen eller tømme tunnelen for vann. Spalterørene blir brukt flere ganger under hver regntid og noen få ganger under den tørre årstiden. Spylingen tar omtrent 15 minutter å gjennomføre.

2.2 SPYLING

I Norge i dag er det blant annet to breinntak som har et eget system for å håndtere sedimentene som føres med vannet.

2.2.1 BONDHUSBREEN – MAURANGER KRAFTVERK

Bondhusbreen er en arm av Folgefonna som strekker seg nordover ned gjennom Bondhusdalen som munner ut ved Sundal ved Maurangerfjorden. Mauranger kraftverk i Kvinnherad kommune utnytter blant annet smeltevannet fra Bondhusbreen gjennom et breinntak. Figur 2.3 viser Folgefonnas kraftverkssystem og hvilke vann Mauranger kraftverkt utnytter. Se vedlegg I for komplett kart over Folgefonnas reguleringsfelt.



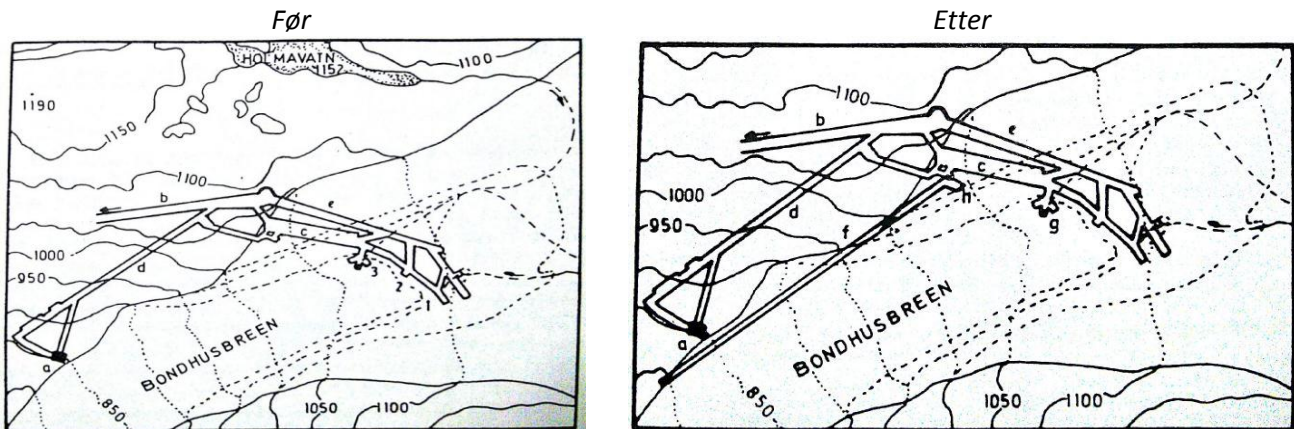
FIGUR 2.3 KRAFTSYSTEM FOLGEFONNA (LOKNA, 2005)

Mauranger kraftverk har en installert effekt på 250 MW med en årlig produksjon på 1150 GWh. Smeltevannet fra Bondhusbreen bidrar med en årlig produksjon på 112,4 GWh alene. Mye tid og ressurser har gått med for å kunne utnytte smeltevannet. Det var i hovedsak to store utfordringer knyttet til smeltevannet fra Bondhusbreen. Den første var å finne vannet og den andre var den store mengden sedimenter breisen og brevannet transporterte med seg hvert år. Det ble bestemt at utfordringen med sedimenter skulle løses ved hjelp av et modellforsøk hos, den gangs, Norsk Hydroteknisk Laboratorium (NHL). Den første modellen ble bygget ut fra en eksisterende modell hos NHL med tilsvarende geometri. Dette var for å spare tid og penger for prosjektet. Målinger foretatt av NVE viste at 2500 – 4000 m³ med løsmasser ble transportert av breen årlig. For å forhindre løsmassene å komme inn i overføringsystemet ned til kraftverket måtte inntaket ha et eget sedimenthåndteringsarrangement. Det ble konstruert et sedimentkammer som rommet 5000 m³ etter anbefalinger fra NHL. Sedimentkammeret har samlet fra 2000 m³ til 4000 m³ med sedimenter hvert år. Blant sedimentene har det vært store steiner på opp til 5 m³. Steinene har da blitt sprengt før de blir transportert ut. Prøver indikerer at 40 % av sedimentene sedimentkammeret fanger er mindre enn 2 mm, 40 % er mellom 2- og 6 mm og resterende er stein mellom 200- og 1000 mm.

De første forsøkene hos NHL konkluderte med at manuell tømning var beste løsning. Om spyling skulle gjennomføres måtte det gjøres nye forsøk for å finne en løsning. På grunn av usikkerheten til hvor langt tid det ville ta å spyle sedimentkammeret og fare for tilstopping av tunnelen mellom kammeret og inntaket. Sedimentkammeret ble derfor bygget med utgangspunkt i maskinell tømning

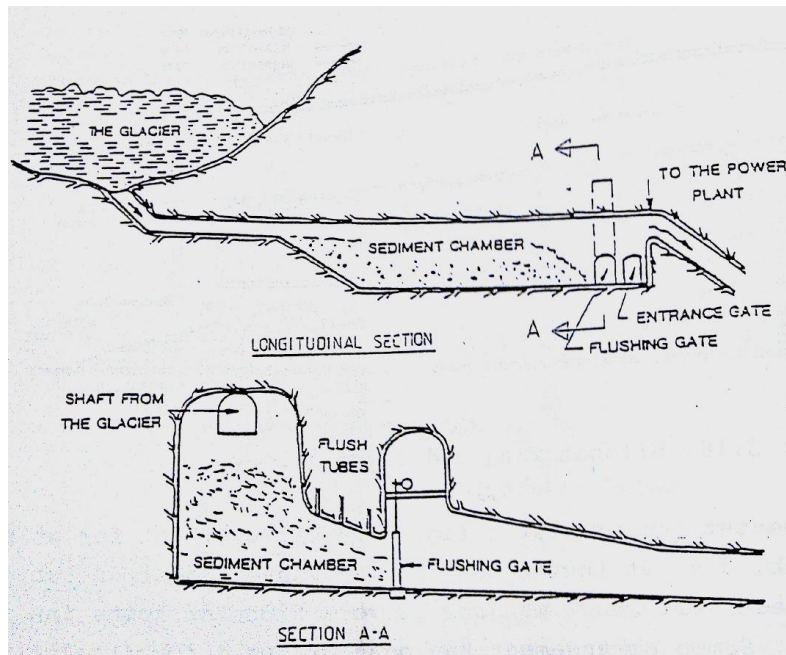
hver vinter når middelvannføringen er lavest. Tømming skulle skje med maskiner satt igjen etter drivingen av tunnelen og sedimentene skulle tømmes ut på breen. Dette arbeidet var kostbart siden personell måtte flys inn med helikopter og været måtte tillate flyving i tilfelle det skulle forekomme noen ulykker under arbeidet. I tillegg begynte maskinene å bli gamle og i dårlig stand.

I 1980 ble det satt i gang nye forsøk for å finne en løsning som gjorde det mulig å spyle sedimentkammeret. Målet var å konstruere et arrangement som på kortest mulig tid med minst mulig vann kunne spyle sedimentkammeret tomt. En modell i skala 1:20 ble bygget i Trondheim og resulterte i en konklusjon om at 2 spylinger på 2 timer per år med en vannføring på 4 m³/s ville sørge for at sedimentkammeret ble tømt for 70 – 80 % av sedimentene. I 1982 ble det igangsatt bygging av spylearrangementet som stod ferdigstilt i 1983. En 300 m lang spyletunnel med et tverrsnitt på 12 m² og en helning på 1/10 ble resultatet. Figur 2.4 viser inntaket under Folgefonna før og etter bygging av spyletunnelen. Tunnelen ble drevet med kontursprengning som var ment å gjøres spesielt nøye for å oppnå minst mulig friksjon i tunnelen.



FIGUR 2.4 UTFORMING AV TUNNELSYSTEM FØR OG ETTER SPYLING (LOKNA, 2005)

For å ha en sikring mot proppdannelse og for å kunne hjelpe spylingen i gang når sedimentkammeret er så fullt at spyleluken er tildekket ble det installert spylørør over luka. Det er installert 3 rør med en diameter på 150 mm (6") med et trykk på ca. 18 meter vannsøyle (mVS), der vannet ble tatt fra øverste del av sedimentkammeret. Rørene er vist i figur 2.5.



FIGUR 2.5 SEDIMENTKAMMER BONDHUSBREEN (GUTTORMSEN, 2006)

Den første spylingen som ble gjennomført var en stor suksess. Det ble spylt med en vannføring på 4 m³/s og sedimentkammeret inneholdt omtrent 4000 m³ med sedimenter. På 1,5 timer hadde spylingen tømt 90-95 % av kammeret. Dette tilsvarer en spyleeffekt på 460 g/l. Spylearrangementet har fungert fram til den dag i dag.

2.2.2 ENGABREEN – SVARTISEN KRAFTVERK

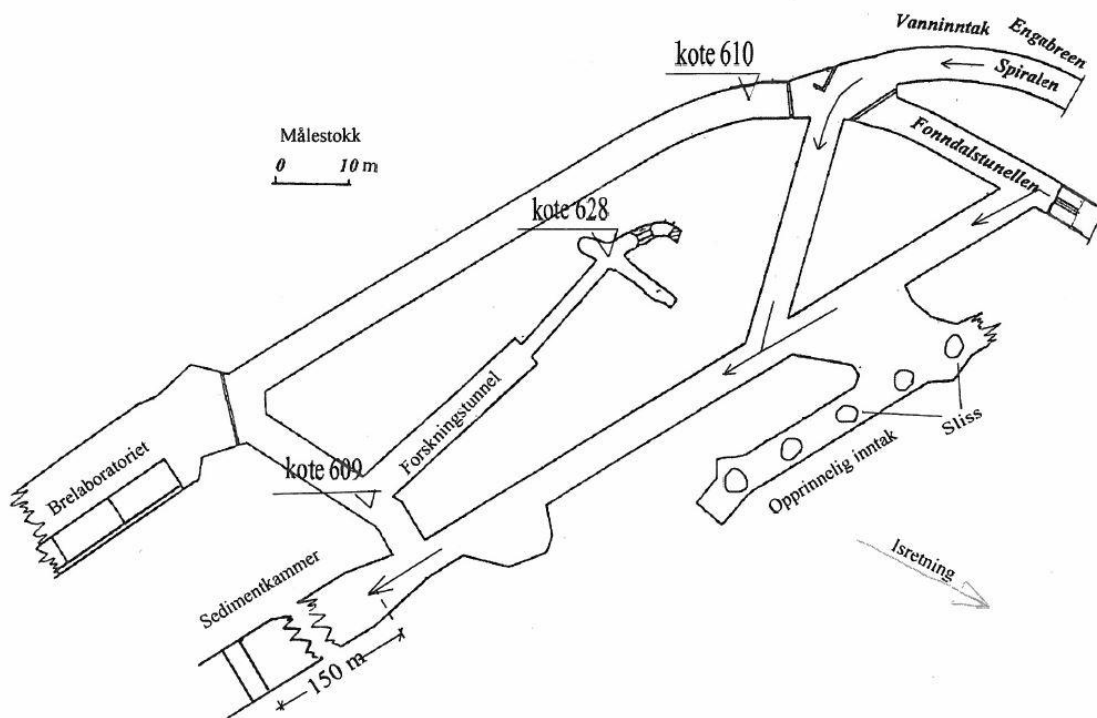
Engabreen er en nordvestlig utløper fra Svartisen, Engabreen strekker seg nesten ned til Engabrevannet (NVE, 2009). Svartisen kraftverk i Meløy har en installert effekt på 350 MW med en årlig produksjon på 2200 GWh, og utnytter blant annet smeltevannet fra Engabreen, se figur 2.6. I vedlegg J er det komplett kart over Svartisen reguleringsfelt.



FIGUR 2.6 SVARTISEN KRAFTVERK, UTKLIPP FRA KART (STATKRAFT, 2009)

De samme utfordringene var knyttet til smeltevannet fra Engabreen som ved Bondhusbreen, det var vanskelig å finne vannet og brevannet førte med seg store mengder sedimenter.

Samtidig som utbyggingen på Svartisen startet opp på slutten av 1980-tallet gjorde NHL et forprosjekt for Statskraftverkene og Svartisutbyggingen, der temaene sedimenttransport og kuldeproblematikk i inntak og tunneler ble mest behandlet i rapporten. NHL konkluderte med i sin rapport at det på Svartisen, som på Folgefonna, burde bygges sedimenteringskammer i nærheten av det store inntaket under breen. Spyling var den mest rasjonelle metoden å tømme kammeret for sedimenter. Sedimentkammeret som ble bygget ved inntaket under Engabreen ble basert på samme prinsipp som sedimentkammeret under Bondhusbreen, se figur 2.7. Det ble ikke utført nye forsøk ved NHL. Den eneste forskjellen mellom Engabreen og Bondhusbreen er at spylingen av sedimenter skjer med strømrereningen ved Engabreen, der dette skjer normalt på strømrereningen ved Bondhusbreen. Grunnen til dette er at sedimentkammeret på Bondhusbreen ble i utgangspunktet bygget for manuell tømning og ikke spyling. Ved spyling av sedimenter er det logisk at det er mest gunstig å spyle i strømrerening. Sedimentkammeret på Engabreen er 10 m bredt og 150 m langt med et fall 1:20 ned til spylelukene og spyletunnelen. Totalt rommer kammeret 7000 m³ med sedimenter.



FIGUR 2.7 INNTAK OG SEDIMENTKAMMER UNDER ENGABREEN (LOKNA, 2005)

Spyletunnelen på Engabreen ble, som på Bondhusbreen, planlagt utført med en spesielt jevn kontur for å skape minst mulig friksjon. Den ble utført med et fall på 1:15 som er noe slakere enn spyletunnelen ved Bondhusbreen.

3 TEORIGRUNNLAG

Dette kapitlet tar for seg den eksisterende kunnskapen som ligger til grunn for modellforsøket og beregningene. Teorien for strømning i fylte tverrsnitt, massetransport, laboratorieteknikk, sandfang og spalterør skal gjennomgås.

3.1 STRØMNING I FYLTE TVERRSNITT

3.1.1 KONTINUITETSPRINSIPPET

For alle strømninger kan vannføringen i et snitt av et fullt tverrsnitt uttrykkes ved kontinuitetsprinsippet.

$$Q = V * A \quad (3-1)$$

Hvor:

Q = Vannføring [m^3/s]

V = Gjennomsnittshastighet [m/s]

A = Tverrsnittsareal normalt på vannføringen [m^2]

Kontinuitetsprinsippet sier at samme vannmengde som strømmer inn i et område må enten strømme ut igjen eller lagres inni området (NVE, 2010). På en horisontal vannflate med forskjellig vannføring (Q_{inn} og Q_{ut}) og et fast areal vil dybden endres i løpet av et tidsrom.

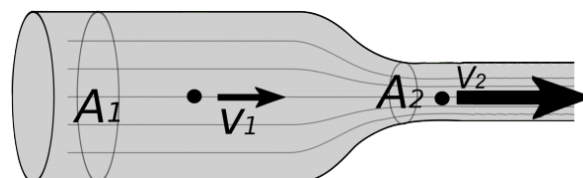
$$(Q_{inn} - Q_{ut}) * \Delta t = A * \Delta y \quad (3-2)$$

Hvor:

Δt = Endring i tid [s]

Δy = Endring i dybde [m]

I et fylt tverrsnitt kan ikke dybden endres uten at tverrsnittsarealet endres. Vann betraktes som inkompressibelt og en endring av arealet vil gi en endring av hastigheten, dette er gitt av ligning 3-2. Figur 3.1 illustrerer dette prinsippet.



FIGUR 3.1 KONTINUITETSPRINSIPPET

3.1.2 FRIKSJON

Alle overflater har en ruhet som skaper friksjon. Når vann strømmer gjennom et fylt tverrsnitt møter det motstand fra veggene som det kreves energi for å overvinne. Dette energitapet fører til at det oppstår et trykkfall/falltap gjennom tverrsnittet, kalt friksjonstap. Hvor stort falltapet blir, er avhengig av hastigheten til vannet, veggens ruhet og tverrsnittets geometri. Ruheten til veggene i råsprenge tunneler er vanskelig å bestemme på grunn av at dette er erfaringstall som bare med sikkerhet kan fastslås ved å måle falltapet (Falltapskomiteèn, 1985).

Falltapet i et fylt tverrsnitt kan blant annet bestemmes ved Mannings- eller Darcy-Weisbachs formel.

3.1.3 MANNINGS FORMEL

Mannings formel er den mest vanlige å benytte i Norge for å beregne falltap i råsprengte tunneler. Mannings formel uttrykker falltapet:

$$h_f = \frac{LV^2}{M^2 R^{4/3}} \quad (3-3)$$

Hvor:

- h_f = Falltap [mVs]
- L = Tunnellengde [m]
- V = Vannhastighet [m/s]
- M = Mannings tall [$m^{1/3}/s$]
- R = Hydraulisk radius [m]

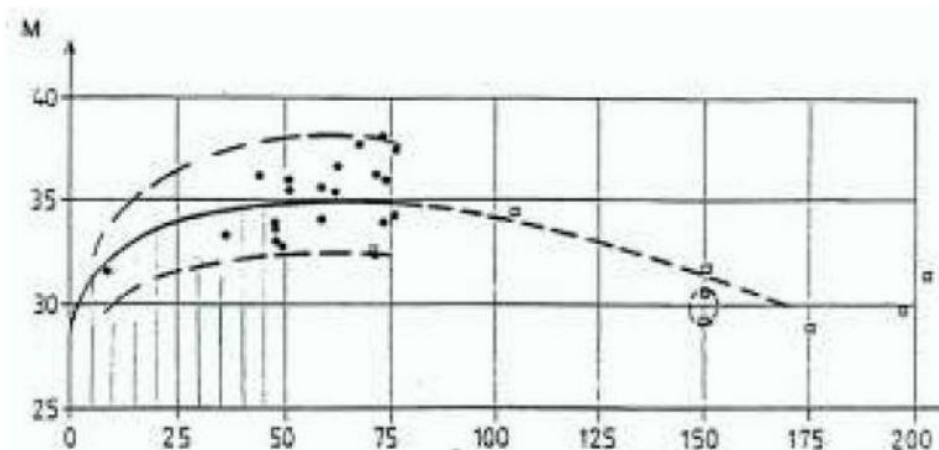
For konvensjonelt drevet tunneler kan den hydrauliske radiusen uttrykkes:

$$R = \frac{A}{P} \approx 0,265\sqrt{A} \quad (3-4)$$

Hvor:

- A = Tunnelens areal [m^2]
- P = Våt periferi [m]

En rekke feltmålinger fra råsprengte tunneler er gjort for å danne et grunnlag som kan bestemme ruhetsfaktoren. Ruhetsfaktoren viser seg å variere, dette er på grunn av forskjeller i fjellkvalitet, strøk- og fallretning og drivemetode. Det har vist seg at nyere tunneler har en større ruhet enn eldre tunneler. På grunn av større og tyngre utstyr med større hullavstand og lengre salver. Figur 3.2 viser sammenhengen mellom målte friksjonskoeffisienter uttrykt som Mannings tall, M , og midlere areal av tunnelverrsnittet. Målingene er gjennomført fra 1950-1970 (Falltapskomiteèn, 1985).



FIGUR 3.2 KORRELASJON MELLOM MÅLTE MANNINGS TALL M OG MIDLERE AREAL A , 1950-1970 (FALLTAPSKOMITEÈN, 1985)

3.1.4 DARCY – WEISSBACHS FORMEL

Darcy-Weissbachs formel er en mer generell formel og anvendes ofte for falltap gjennom rør.

$$h_f = f \frac{LV^2}{4R2g} \quad (3-5)$$

Hvor:

f = Friksjonskoeffisient [-]

Verdien av friksjonskoeffisienten, f , bestemmes av Moodys diagram vist i figur 3.13. Det er Reynolds tall og absolutt ruhet som er med på å bestemme verdien av friksjonskoeffisienten. Swamee og Jain uttrykker friksjonsfaktoren ved hjelp av Colebrook-White's formel.

$$f = \frac{0,25}{\left(\log\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)\right)^2} \quad (3-6)$$

Hvor:

ε = Absolutt ruhet [mm]

Det er viktig å merke seg at formelen har et gyldighetsområde for Reynolds tall og relativ ruhet.

$$\begin{aligned} 4 * 10^3 < Re < 1 * 10^8 \\ 1 * 10^{-5} < \frac{\varepsilon}{D} < 2 * 10^{-2} \end{aligned}$$

Hvor

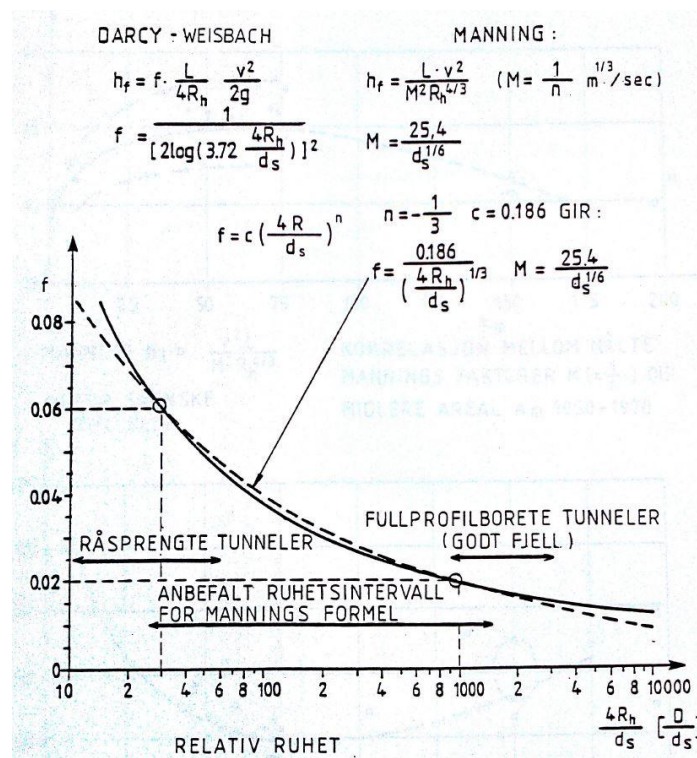
ε/D = Relativ ruhet [-]

3.1.5 SAMMENLIGNING AV DARCY-WEISBACH'S- OG MANNINGS FORMEL

Mannings- og Darcy-Weisbach's formel avviker noe fra hverandre, først og fremst ved at eksponenten for hydraulisk radius er forskjellig. Dette er det imidlertid tatt hensyn til ved at Mannings tall er dimensjonsavhengig og avhenger av den absolutte ruhet. Darcy-Weisbach's friksjonskoeffisient er dimensjonsløs og avhengig av den relative ruheten (Falltapskomiteèn, 1985). Forskjellen mellom formlene ligger altså ikke i eksponenten for hydraulisk radius, men i tilnærmelsen gjort ved at den relative ruheten er trukket inn på en forenklet måte. Denne tilnærmelsen ville, antatt at Darcy-Weisbach formel stemmer, føre til at for store og glatte tunneler får litt for høyt Mannings tall, anslagsvis mindre enn en Manningsenhet. For små tunneler med høy ruhet vil Mannings tall bli 1-2 Manningsenheter for lave. Dette er vist i figur 3.3.

Formel 3-3 og 3-5 faller godt sammen i et område. Sammenhengen mellom f og M uttrykkes som følger.

$$f = \frac{8g}{M^2 R^{1/3}} \quad (3-7)$$



FIGUR 3.3 SAMMENLIGNING AV MANNINGS OG DARCY-WEISBACH'S FORMLER (FALLTAPSKOMITEÉN, 1985)

3.1.6 ENERGI- OG TRYKKLINJE

En energilinje forteller hvor mye energi det er i vannet i et lukket tverrsnitt. Energien oppgis i en energihøyde. Denne energihøyden er definert ved Bernoulli's ligning. Når energilinjen tegnes blir både energitap og tilført energi til systemet tatt med.

$$E = z + \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} \quad (3-8)$$

Hvor:

z = Avstanden fra nullpunkt til bunn av rør/tunnel [m]

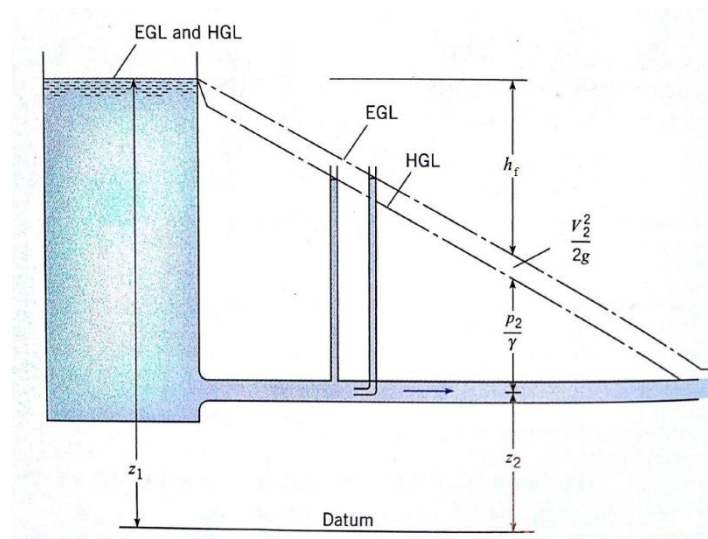
p = Trykk ved bunn [N/m^2]

En trykklinje er en linje som viser hvor vannet ville stått dersom et trykkrør hadde blitt plassert i det fylte tverrsnittet. Avstanden mellom trykklinjen og det fylte tverrsnittet kan regnes ut ved å konvertere trykket til en trykkehøyde.

$$h = \frac{p}{\rho g} \quad (3-9)$$

Figur 3.4 illustrerer et eksempel med en energi- og trykklinje der energilinjen er forkortet med EGL og trykklinjen er forkortet med HGL. Den vertikale avstanden mellom de to linjene er størrelsen på hastighetsenergien uttrykt som mVS .

$$h = \frac{V^2}{2g} \quad (3-10)$$



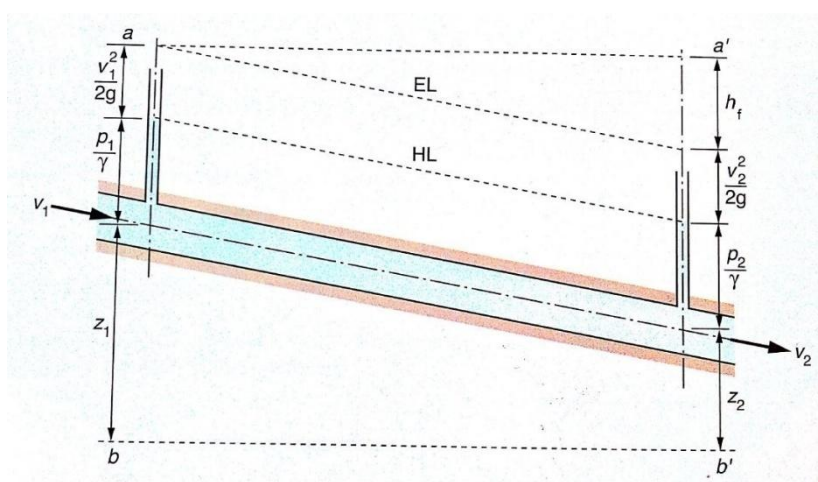
FIGUR 3.4 ENERGI- OG TRYKKLINJE (CROWE, ET AL., 2005)

En energilinje vil alltid synke på grunn av falltap, det eneste unntaket er om man tilfører mer energi for eksempel gjennom en pumpe. Energilinjen vil da få et hopp opp fra nedstrøms pumpen til oppstrøms pumpen. Energilinjens helning i et system vil være avhengig av falltapedet gjennom det fylte tverrsnittet. Falltapedet er en direkte konsekvens av ruheten.

3.1.7 ENERGIBALANSE – BERNOULLIS

Betraktes energibalansen over et system ser man på summen av energiformene i to ulike tverrsnitt langs samme strømningslinje i et system. Loven om energibevaring sier at energi ikke kan gå tapt bare endre tilstand (Ødegaard, 2013). De energiformene som er aktuelle for et fylt tverrsnitt er:

- bevegelsesenergi
- trykenerg
- stillingsenergi (høyden vannet ligger på)
- falltap (varme)



FIGUR 3.5 ENERGIFORMER I ULIKE TVERRSNITT (ØDEGAARD, 2013)

I figur 3.5 er energi- og trykklinjen vist for et fylt tverrsnitt. På høyre side har energilinjen sunket med h_f . Dette er friksjonstapet som har gått over i varmeenergi. Summen av alle energiformene er like i hvert tverrsnitt. Med å se på snitt a-b og a'-b' og setter opp energiformene fåman følgende.

$$\frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f \quad (3-11)$$

Fra ligning 3-11 kjennes Bernoullis ligning igjen.

3.1.8 STRØMNINGSSITUASJONER

Forholdet mellom viskositeten og treghetskreftene bestemmer om strømmingen er *turbulent* eller *laminær*. Strømmingen er laminær om de viskøse kreftene er så store i forhold til treghetskreftene at de spiller en vesentlig rolle ved å bestemme strømningsbildet. Ved laminær strømning beveger vannpartiklene seg i glatte baner og parallelle sjikt som ikke blandes. I turbulent strømning er de viskøse kreftene svake i forhold til treghetskreftene. Ved turbulent strømning beveger vannpartiklene seg i uregelmessige baner omkring hovedretningen. Osborne Reynolds var den første som uttrykte dette forholdet og satte grenseverdier. Overgangen mellom laminære- og turbulente strømminger er gitt av Reynolds tall:

$$Re = \frac{v * L}{\nu} \quad (3-12)$$

Hvor:

- ν = Vannets viskositet [m^2/s]
- L = Lengde, for eksempel dybde [m]
- v = Hastighet [m/s]

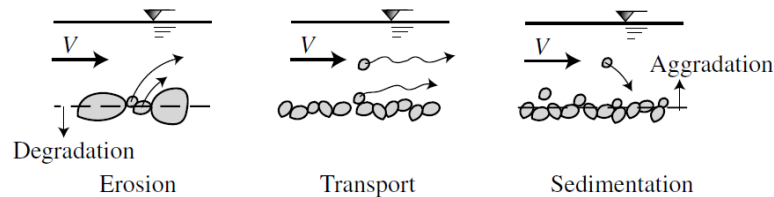
Osborne Reynolds studerte strømning i glatte rør. Gjennom forsøk fant Reynolds ut at vannet oppstrøms røret og vibrasjoner i røret er en viktig faktor for å skille mellom laminær og turbulent strømning. Om vannet oppstrøms røret er i bevegelse eller det er vibrasjoner i røret påvirkes strømmingen. Med en økende vannhastighet og vannet oppstrøms i bevegelse går skille mellom laminær og turbulent strømning med et Reynolds tall på 2100. Om vannet oppstrøms er helt stille og røret ikke har noen vibrasjoner kan et høyere Reynolds tall oppnås for laminær strømning, men bare en liten forstyrrelse vil gjøre strømmingen turbulent. Ved overgang fra høy vannhastighet til lav vannhastighet går skille mellom laminær og turbulent strømning ved et Reynolds tall på 2000.

Forsøkene til Reynolds viser at under nøye kontrollerte forhold kan laminær strømning oppnås i rør med et mye høyere Reynolds tall enn 2000, men den minste forstyrrelse vil gjøre strømmingen turbulent. På grunn av at de fleste praktiske forhold vil inneholde noen vibrasjoner eller små forstyrrelser defineres laminær strømning ved et lavere Reynolds tall enn 2000. Turbulent strømning defineres ved et høyere Reynoldstall enn 3000. Når Reynolds tallet ligger mellom 2000 og 3000 er strømmingen svært utforutsigbar og kan veksle mellom laminær og turbulent (Crowe, et al., 2005).

3.2 EROSJON, MASSETRANSPORT OG SEDIMENTERING

Erosjon, massetransport og sedimentering er bevegelsen av faste partikler i vann. Dette er naturlige prosesser som pågår kontinuerlig i alle vassdrag og tunneler med sedimenter. Figur 3.6 illustrerer de tre prosessene. I dag er erosjon, massetransport og sedimentering med på å skape utfordringer knyttet til blant annet vannkraftutbygging og produksjon.

Dette del kapitlet presenterer den grunnleggende teorien bak erosjon, massetransport og sedimentering i sandfang.



FIGUR 3.6 EROSJON, TRANSPORT OG SEDIMENTERING (JULIEN, 2010)

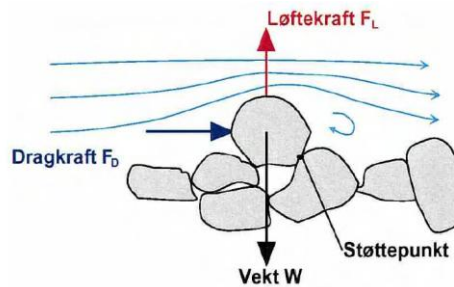
3.2.1 EROSJON

Erosjon innebærer at en partikkel river seg løs og føres fra et sted til et annet på grunn av vannets påvirkning (NVE, 2010). Erosjon oppstår når det fjernes mer partikler enn det tilføres. Vannets evne til å flytte eller erodere sedimenter kan deles i transportkapasitet og transportkompetanse. Transportkompetanse er vannets evne til å flytte en enkel partikkel og henger sammen med vannets hastighet. Transportkapasitet er vannets evne til å frakte mengder med sedimenter og henger sammen med vannets hastighet og vannføring. Erosjon kan kategoriseres i løps erosjon, side erosjon og lokal erosjon. Løps erosjon er den erosjonen som skjer i strømrretningen. Dette forekommer ved store flater eller lange strekninger der det tilføres mindre sedimenter enn det fjernes, for eksempel nedstrøms dammer som holder igjen sedimenttilførselen. Vannets transportkapasitet og transportkompetanse blir da økt nedstrøms dammen. Side erosjon er den erosjonen som skjer vinkelrett på strømrretningen, ofte i sideskråninger. Lokal erosjon oppstår ved spesielle strømningsforhold. Dette kan være knytte til for eksempel terskler, pilarer eller endret kanal geometri. For tunneler med kontinuerlig lik geometri er det løps erosjon som er aktuelt.

3.2.2 KREFTER

For at erosjon skal kunne oppstå må kreftene fra vannet være store nok til at sedimentene enten veltes, skyves eller løftes. De drivende kreftene er større enn de stabiliserende kreftene. De stabiliserende kreftene er egenvekten, friksjonen mot bunn og bindinger mellom partiklene. Bindinger kan være kohesive krefter, kilevirkning mellom sedimentene, laminære sjikt eller kjemiske bindinger (NVE, 2010). Vannet gir sedimentene oppdrift og påfører dragkraft og løftekraft. Dette kalles de drivende kreftene.

Figur 3.7 illustrerer kreftene som virker på en partikkel. Turbulens rundt partikkelen vil føre til hyppig veksling mellom både drag- og løftekrefter.



FIGUR 3.7 KREFTER SOM VIRKER PÅ EN PARTIKKEL PÅ BUNN (TESAKER & JENSSEN, 2009)

Dragkraften virker parallelt og i samme retning som strømretningen. Dragkraften er vannets trykk og sug som virker på den delen av steinen som stikker opp over resten av bunnen. Dragkraften er uttrykt ved:

$$F_D = C_D * A * \rho * \frac{v^2}{2} \quad (3-13)$$

Hvor:

- F_D = Dragkraften [N]
- C_D = Dragkoeffisient [-]
- A = Eksponert areal [m^2]
- ρ = Vannets tetthet [kg/m^3]
- v = Hastighet foran steinen [m/s]

Løftekraften virker på tvers av strømretningen. Løftekraften dannes på grunn av lokale hastighetsvariasjoner over steinen som fører til trykkforskjeller. Det vil da dannes et undertrykk/løft over steinen. Løftekraften uttrykkes ved:

$$F_L = C_L * A * \rho * \frac{v^2}{2} \quad (3-14)$$

Hvor:

- F_L = Løftekraften [N]
- C_L = Løftekoeffisient [-]
- A = Eksponert areal [m^2]
- ρ = Vannets tetthet [kg/m^3]
- v = Hastighet foran steinen [m/s]

Det eksponerte arealet er ikke det samme for drag og løftekraft. For dragkraft er det arealet normalt på strømretningen og for løftekraft er det arealet av steinens toppflate. Dette kan sees ut fra figur 3.7. Det er den uforstyrrede hastigheten som skal brukes i beregninger for både drag og løftekraft. Det vil si hastigheten rett oppstrøms steinen som ikke er påvirket av steinen (Tesaker & Jenssen, 2009). En oversikt over drag og løftekoeffisienter kan finnes i "S.F. Hoerner: Fluid-Dynamic Drag (1965)" (NVE, 2010).

En skrånende bunn gjør at like steiner eroderes lettere enn ved en horisontal bunn. Dette kan hensyntas ved å benytte en korreksjonsfaktor K (NVE, 2010). Steinstørrelsen i en skråning må multipliseres med K for å se om den er stabil. K uttrykkes som:

$$K = \sqrt{1 - \frac{\sin \theta^2}{\sin \varphi^2}} \quad (3-15)$$

Hvor:

θ = Skråningshelling [grader]

φ = Massens rasvinkel [grader]

Størrelsen av de stabiliserende kreftene avhenger av steinstørrelsen, densitet og form (Tesaker & Jenssen, 2009). En kantet stein vil være mer stabil enn en rundt stein. Stabiliteten er også avhengig av steinens plassering. En bratt skråning vil føre til at steinen er mer ustabil enn ved en plan bunn. Glatt underlag fører også til mindre stabilitet. Steiner som er plassert mellom andre steiner får støtte fra steinene rundt og vil være mer stabile, se "støttepunkt" figur 3.7.

De stabiliserende kreftene på en enkel partikkel kan uttrykkes ved følgende formler (Tesaker & Jenssen, 2009):

$$W = g(\rho_s - \rho)LBH \quad (3-16)$$

Hvor:

W = Steinens neddykkede vekt [N]

ρ_s = Steinens tetthet [kg/m^3]

L = Lengde [m]

B = Bredde [m]

H = Høyde [m]

$$F_F = (W - F_L) \tan \varphi \quad (3-17)$$

Hvor:

F_F = Friksjonskraft mot bunn [N]

φ = Friksjonsvinkel [grader]

Friksjonsvinkelen avhenger av hvilke type underlag steinen ligger på og hvilke steintype. Stabiliteten av en enkel steinblokk regnes da ut fra glidning og velting. Om steinblokken motstår begge deler er den stabil. Det stabiliserende momentet mot velting regnes om blokkens nedstrøms tå.

3.2.3 SKJÆRSPENNING

I praksis er det ikke mulig å bestemme om erosjon forekommer ved å regne på hver enkelt partikkel. Strømnings- og bunnforhold er ikke jevne og alle partikler er av forskjellig størrelse og form. Derfor brukes strømmens skjærspenning til å bestemme forholdene langs bunnen. Skjærspenningen uttrykkes (NVE, 2010):

$$\tau_0 = g\rho_v R I \quad (3-18)$$

Hvor:

R = Hydraulisk radius [m]

I = Helning [-]

Ved skjærspenning kan løfte- og dragkraften uttrykkes:

$$F_D = \tau_0 d^2 k_1 \quad (3-19)$$

$$F_L = \tau_0 d^2 k_2 \quad (3-20)$$

Hvor:

d = Kornets diameter [m]

k_1, k_2 = Konstant bestemt av kornets form [-]

Shields diagram tar utgangspunkt i kritisk skjærspenning for å finne grensen for bevegelse av bunnpartiklene. Shields undersøkte sammenhengen mellom korndiameter, skjærspenning og viskositet. Resultatet ble Shields diagram. Shields diagram gir forholdet mellom Shields tall for kritisk bunntilstand og Reynolds tall i grenselaget. På bakgrunn av dette er diagrammet generelt gyldig for alle sedimenter og væsker. Shields tall er uttrykt som (Tesaker & Jenssen, 2009):

$$C_s = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)D} = \frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho)D} \quad (3-21)$$

Hvor:

τ = Skjærspenning mot bunn [N/m^2]

γ_s = Steinens tyngdetetthet [N/m^2]

γ = Vannets tyngdetetthet [N/m^2]

D = Partikkelens diameter [m]

Reynolds tall i grenselaget uttrykkes:

$$Re^* = \frac{u_* * d}{\nu} = \frac{\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} * d}{\nu} \quad (3-22)$$

Hvor:

u_* = Skjærhastighet [-]

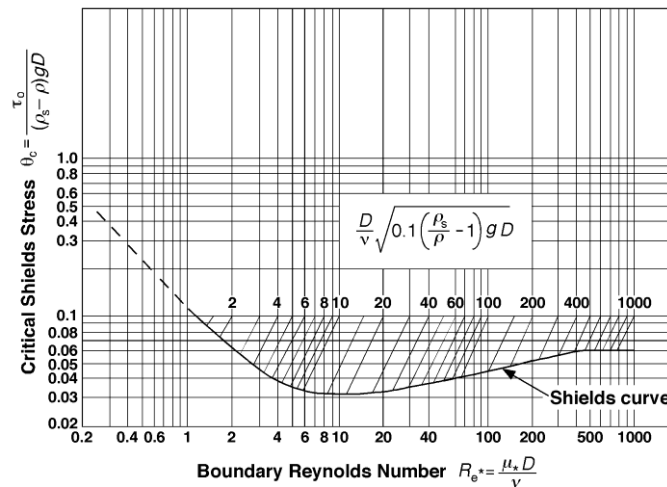
Figur 3.8 viser Shields diagram. Kritisk skjærspenning angir den skjærspenningen langs bunnen som må til for å sette bunnpartiklene i bevegelse. Den kritiske skjærspenningen uttrykkes ved hjelp av Shields tall:

$$\tau_c = C_s g(\rho_s - \rho)D \quad (3-23)$$

Kombinerer den kritiske skjærspenningen med skjærhastigheten blir uttrykket for kritisk skjærhastighet:

$$v_*^k = \sqrt{C_s \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho_s} gD} \quad (3-24)$$

Når den kritiske skjærhastigheten blir overskredet starter bevegelse av bunnpartikler.



FIGUR 3.8 SHIELDS DIAGRAM (SCHWIMMER, 2012)

Det er viktig å bemerke at for et fylt tverrsnitt er det skjærspenningen på bunn som er gjeldene, og det er denne som må brukes for beregning med Shields diagram. Skjærspenningen kan være større langs veggene eller i taket om det er en større ruhet der enn på bunn. Lysne tok utgangspunkt i blant annet Shields formel for frispel strømming for å finne om dette kunne brukes til å finne et uttrykk for stabil steinstørrelse i tunnel.

På 60-tallet ble det utført forsøk for stabil steinstørrelse i tunnel ved vassdrags- og havnelaboratoriet i Trondheim. Det fantes på den tiden kunnskap og formelverk for erosjon ved frispelstrømming. Det ble antatt at dette også kunne brukes for tunneler med noen modifikasjoner. For å komme frem til en formel for en horisontal tunnel ble det tatt utgangspunkt i Shields-, Meyer-Peter- og "U.S. Bureau of reclamation" formel. Formlene er så å si identiske og uttrykker stabil steinstørrelse ved skjærkraften, se formel 3-21 som kan omskrives til et uttrykk for steinens diameter.

$$D = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_v)C} \quad (3-25)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} \gamma_s &= \text{Spesifikk vekt sand [N/m}^3\text{]} \\ \gamma_v &= \text{Spesifikk vekt vann [N/m}^3\text{]} \end{aligned}$$

Hastigheten kan uttrykkes ved hjelp av Mannings formel.

$$V = MR^{2/3}S^{1/2} \quad (3-26)$$

Med litt omskriving kan energilinjas helning uttrykkes ved Mannings formel.

$$S = \frac{V^2}{M^2 R^{4/3}} \quad (3-27)$$

Hvor:

$$S = \text{Energilinjas helning [\%]}$$

For tunneler med konvensjonelt tverrsnitt kan den hydrauliske radiusen uttrykkes som nevnt tidligere.

$$R = KA^{1/2} \quad (3-28)$$

Hvor:

K = konstant, 0,265

Uttrykket for skjærspenning på bunn er forklart tidligere, se formel 3-18. For å kunne bruke denne skjærspenningen må korrekt hydraulisk radius brukes. Ved å kombinere formlene 3-25, 3-27, 3-28 og 3-18 ender man opp med uttrykket.

$$D = \frac{\gamma_v}{\gamma_s - \gamma_v} \frac{n^2 V^2}{CK^{1/3}A^{1/6}} \quad (3-29)$$

Hvor:

$n = 1/M$ [s/m^{1/3}]

For å forenkle formelen ytterligere er det sett nærmere på forholdet mellom n^2/C og K. C varierer med Reynolds tall som er avhengig av skjærhastigheten som igjen er et uttrykk avhengig av skjærkraften. n varierer med hastigheten, som også skjærkraften gjør. C og n øker i samsvar med R. Det er derfor antatt at forholdet n^2/CK er tilnærmet konstant. Man ender opp med et uttrykk for stabil steinstørrelse i tunnel.

$$D = \frac{\gamma_v}{(\gamma_s - \gamma_v)} \frac{V^2}{C'A^{1/6}} \quad (3-30)$$

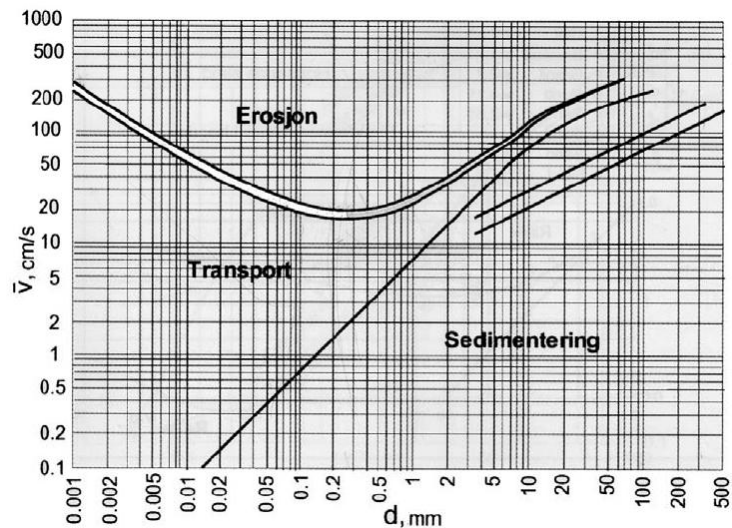
Hvor:

C' = Koeffisient mellom 115 – 140

Konstant C' er bestemt gjennom et fysisk modellforsøk (Lysne, 1969).

3.2.4 HASTIGHET

Antatt at Lysne's formel for stabil steinstørrelse stemmer er vannhastigheten en avgjørende faktor for stabil steinstørrelse. Hjulstrøms diagram fra 1935 tar utgangspunkt i gjennomsnittshastigheten for å bestemme grensen for bevegelse av partikler. Diagrammet er utviklet ved forsøk av ensgradert sand ved konstant dybde. Diagrammet gir en bra oversikt over hvordan hastighet og partikkelstørrelse bestemmer om vedvarende erosjon, konstant sedimenttransport eller sedimentering kan forventes. Figur 3.9 viser Hjulstrøms diagram.



FIGUR 3.9 HJULSTRØMS DIAGRAM (NVE, 2010)

Til venstre i Hjulstrøms diagram hvor partiklene er små, dannes det laminære sjikt og kohesive krefter virker mellom partiklene. Partiklene danner leire. Det kreves mer krefter for at erosjon skal forekomme på grunn av kreftene mellom partiklene. Partikler som allerede er i bevegelse vil kunne fortsette å bevege seg selv om farten synker i dette området helt ned til den nederste linjen.

3.2.5 MASSETRANSPORT

Teorien presentert i dette del kapitlet er utarbeidet for bruk i rør. Det er antatt at den kan på en generell basis brukes for fylte tverrsnitt.

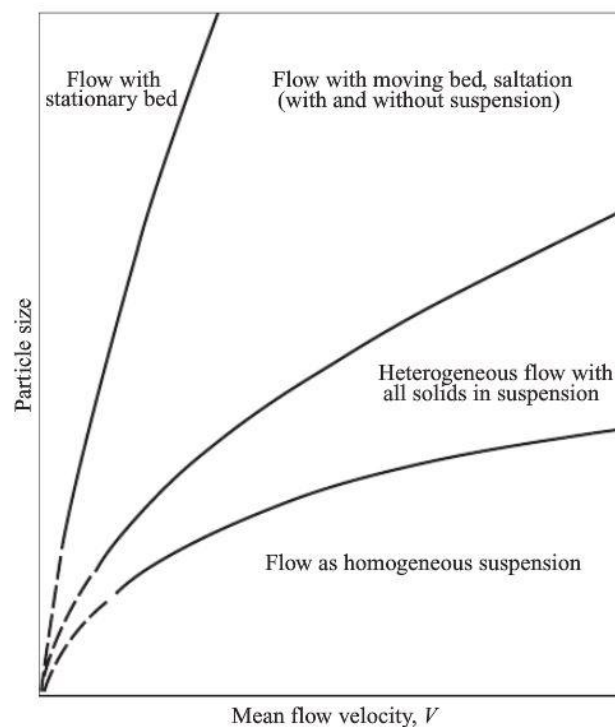
Sedimenttransport foregår uavhengig av erosjon og det skilles mellom bunntransport, suspensjonstransport og oppløst transport. Bunntransport er de sedimentene som glir og hopper langs bunnen. Suspensjonstransport er når sedimentene holder seg svevende i vannmassene. Grensen mellom bunn- og suspensjonstransport er ikke helt klar, men partikler med større skjærhastighet enn synkehastighet hører til suspendert transport (NVE, 2010). Oppløst transport er også svevende i vannmassene, men dette er veldig små helt oppløste partikler.

Ved bunntlast er transportkapasiteten relativt liten. Den er da tilnærmet proporsjonal med differansen mellom skjærspenning og kritisk skjærspenning ($\tau_0 - \tau_c$). Transportkapasiteten øker ved suspendert last (NVE, 2010). Å måle bunntlasten er vanskelig på grunn av måleinstrumenter på bunn vil påvirke bevegelsene av sedimenter og strømmingen.

Ved sedimenttransport i fylte tverrsnitt skilles det mellom fire forskjellige strømnings situasjoner. Strømnings situasjonene er (Vanoni, 1977):

- *Homogenstrømning*
 - Partiklene som transporteres er så små at fallhastigheten er neglisjerbar i forhold til vannhastigheten. Derfor er den vertikale sediment konsentrasjonen tilnærmet homogen.
- *Heterogenstrømning*
 - Alle partikler som transporteres er i suspensjon, men den vertikale sediment konsentrasjonen er ikke uniform.
- *Strømning med bunnlast*
 - Det regime hvor man har transport av sedimenter langs bunn. Det kan også være sedimenter i suspensjon i denne situasjonen.
- *Strømning med stasjonær bunn*
 - Ingen sedimenter i suspensjon og en stasjonær bunn.

Figur 3.10 illustrerer de fire strømningssituasjonene med hensyn på vannets hastighet og partikkelstørrelse. Ved dimensjonering av en tunnel er det falltapet (energitapet), sedimentkonsentrasjon som skal transporteres igjennom og slitasje som må betraktes. Siden hvert strømningstilfelle er forskjellig er det å kunne forutse hvilke strømningssituasjon som kommer til å opptre essensielt for å kunne estimere falltap og transportkapasitet. Generelt øker falltapet med økende sedimentkonsentrasjon (Vanoni, 1977).



FIGUR 3.10 STRØMNINGSSITASJONER (VANONI, 1977)

Sedimentkonsentrasjonen kan bestemmes for homogen strømning med følgende formel.

$$\frac{i_m - i}{C_v i} = s - 1 \quad (3-31)$$

$$C_v = \frac{s}{1 + s} \quad (3-32)$$

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (3-33)$$

Hvor:

i_m = Helningen til energilinjen for væske med sedimenter [%]

i = Helningen til energilinjen for rent vann [%]

C_v = Sedimentkonsentrasjon per volum [-]

Q_s = Konsentrasjon per volum, sedimenter [-]

3.2.6 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING

For å skille mellom homogen- og heterogen strømning er fallhastigheten til partikkelen og skjærhastigheten avgjørende. Partikler i suspensjon vil falle ned på grunn av gravitasjonskraften, men kan holdes i suspensjon av turbulensen. Turbulens veksler hyppig mellom kraft opp og ned, hvor kraften i hver retning er like stor. For å kompensere for gravitasjonskraften må kraften fra turbulens oppover bære flere partikler enn kraften nedover. I et stabilt strømningsbilde med suspensjon må derfor konsentrasjonen av partikler minke oppover i tverrsnittet. Mindre partikler har lavere fallhastighet og den vertikale fordelingen er mer uniform. Større turbulensintensitet fører til mer uniform fordeling (Lysne, et al., 2003).

Hunter Rouse laget en teoretisk fordeling for den vertikale fordelingen av sedimenter.

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{d - y}{y} * \frac{a}{d - a} \right)^z \quad (3-34)$$

$$z = \frac{w}{kU_*} \quad (3-35)$$

Hvor:

C = Konsentrasjon ved høyde y [-]

C_a = Referansekonsentrasjon ved punkt a [-]

y = Høyde fra bunn [m]

a = Høyde fra bunn, $0,05d$ [m]

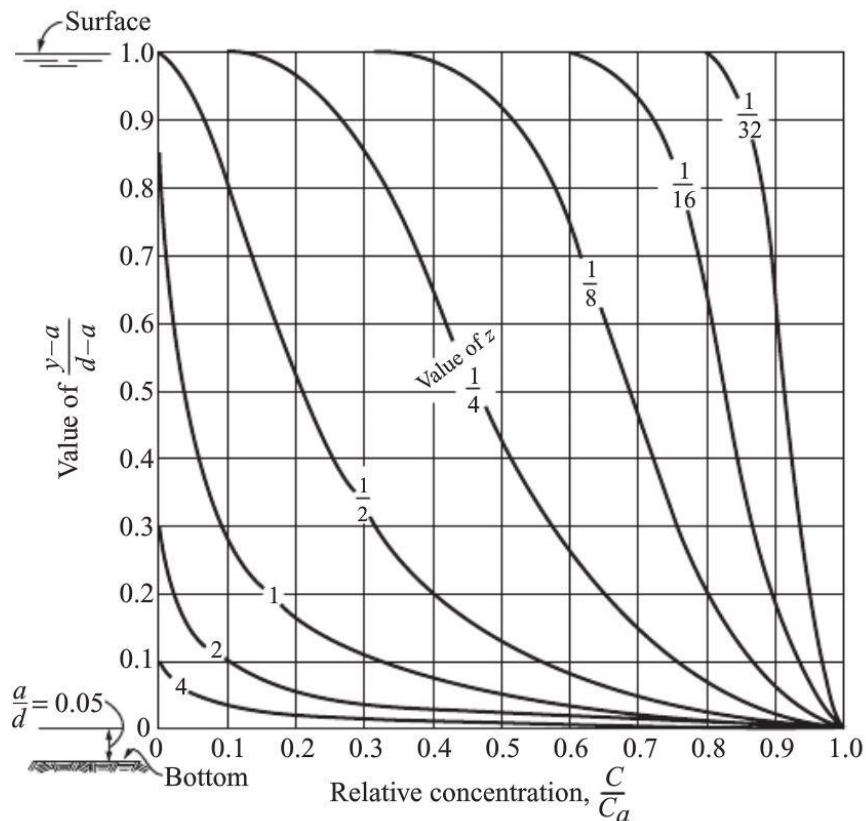
d = Vanndybde [m]

w = Partikkelens fallhastighet [m/s]

k = Von Karman's konstant, $0,4$ [-]

U_* = Skjærhastighet [-]

Siden ligningen krever at konsentrasjonene C_a er kjent kan ikke ligningen løses generelt. Rouse laget et diagram som viser konsentrasjon for ulike verdier av z , figur 3.11. For lave verdier av z nærmer konsentrasjonen seg uniform over hele tverrsnittet, og for store verdier av z er konsentrasjonen null ved overflaten og høy langs bunn.



FIGUR 3.11 HUNTER ROUSE FORDELING AV SUSPENDERT KONSENTRASJON (VANONI, 1977)

Det er viktig å merke seg at Rouse's formel er utviklet for todimensjonal frispelstrømning, men det er antatt at formelen kan anvendes for rørstrømning selv om dette ikke er bekreftet gjennom forsøk (Vanoni, 1977).

3.2.7 KAPASITET

Heterogen strømning er normalt situasjonene som gir størst mengde sedimenttransport per energienhet brukt, dette vil si gir minst falltapp gjennom et fylt tverrsnitt. Durand bidro i stor grad til å forstå sedimenttransport i rør. Han gjennomførte 310 forsøk med kornstørrelse mellom 0,2 mm til 25 mm, volumkonsentrasjon mellom 2 % til 23 % i rør med diameter fra 38 mm til 710 mm. Durand kom frem til at konsentrasjonen kan uttrykkes som følger.

$$\frac{i_m - i}{i C_v} = K' \left(\frac{\sqrt{gD}}{V} \right)^3 \left(\frac{1}{\sqrt{C_D}} \right)^{1,5} \quad (3-36)$$

Hvor:

K' = Proporsjonalitets konstant, $K' = 176$

C_D = Dragkoeffisient for partiklene [-]

For å uttrykke konsentrasjon som "parts per million" (PPM) brukes formelen.

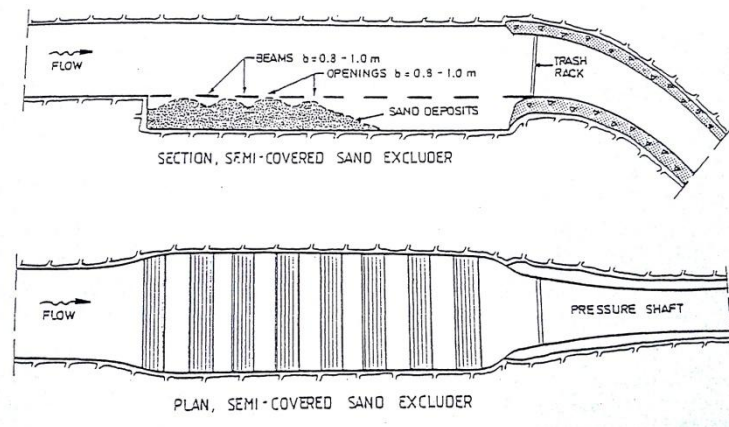
$$ppm = 1000000 * 2,65 * C_v \quad (3-37)$$

3.2.8 SEDIMENTERING

Der vannets evne til å transportere sedimenter som allerede er i transport avtar vil det sedimenteres. Transportkompetansen eller transportkapasiteten vil avta, med andre ord vannets hastighet synker eller vannføringen minker. Dette kan skje der helningen endre seg, hvor vann i bevegelse møter stillestående vann eller det er tverrsnittsendringer. De største sedimentene vil sedimentere først mens de fine vil sedimentere senere og de aller minste sedimenters ikke før det er helt stillestående vann. Dette vil føre til en naturlig sortering av sedimentene.

3.2.9 SANDFANG

Sandfang i kraftverkstunneler er normalt konstruert i enden av tilløpstunnelen, rett før trykksjakta, for å samle opp sedimenter som blir transportert gjennom tilløpstunnelen. Prinsippet som ligger til grunn for et sandfang er at hastigheten reduseres i forhold til hastigheten i tunnelen på grunn av en økning i tverrsnittet. På grunn av endring i hastigheten vil sedimenter som transporteres gjennom tunnelen ligge stabilt i sandfanget (Eggen, 1973). figur 3.12 viser en skisse av et typisk sandfang.



FIGUR 3.12 SANDFANG (GUTTORMSEN, 2006)

I Norge er det vanlig at råsprenge tunneler vil ha et lag med knust fjell på sålen etter anleggsperioden. Det kan også komme sand inn i tunnelen gjennom inntakene, spesielt utsatt er bekkeinntak (Guttormsen, 2006).

Et sandfang utformet som vist i figur 3.12 vil fange opp alle sedimenter som går som bunntransport uten en utvidelse av tverrsnittet over ristene. Ønsker man å fange opp sedimentene som er i suspensjon må tverrsnittet utvides, en utvidelse på 30 – 50 % av tverrsnittet er vanlig (Guttormsen, 2006). Undersøkelser i senere tid har vist at en enda større utvidelse og reduksjon i hastigheten kan være ønskelig om det er fare for slitasje på turbinen.

Ved hjelp av modellforsøk og inspeksjon av eksisterende sandfang har det blitt fastslått at sedimenteringseffekten ofte er dårlig på grunn av strømningsforholdene (Eggen, 1973). De dårlige strømningsforholdene kan skyldes flere årsaker presentert i tabell 3-1.

Strømningsforhold	Årsak
Skjevt hastighetsprofil, hastighetskonsentrasjon i enkelte deler av sandfanget.	Sandfanget plasseres i eller like nedstrøms en kurve i tunnelen. Dette fører til hastighetsøkning langs yterkurven.
Separasjon av vannstrøm fra tak og vegger, med refleksjoner og urolige, pulserende strømninger.	For brå overgang mellom tunnelprofil og utvidet tverrsnitt over sandfanget. Vannstrømmen klarer ikke å følge profilet.
Virveldannelser og økt turbulensnivå.	Sandfanget plasseres i eller nær tunnelkryss. Ofte kommer adkomsttunnelen inn i sandfanget. Tunnelkryss forårsaker virveldannelser og økt turbulensnivå.

TABELL 3-1 STØMNINGSFORHOLD I SANDFANG

For å oppnå ønsket sedimentering bør det tilstrebes et mest mulig rettlinjert og rolig strømningsbilde gjennom sandfanget. Sandfanget bør plasseres 100 – 200 m nedstrøms for tunnelkryss og kurver slik at strømningsforholdene rekker å utjevne seg før de når sandfanget. Tverrsnittutvidelsen bør begrenses til en overgangsvinkel på 8 grader i taket og 4 grader for hver vegg. Overgangen til lagringsplassen under tunnelsålen kan imidlertid gjøres bratt.

For å øke effektiviteten av sandfang som ikke har fungert tilfredsstillende har strømlerende elementer blitt installert for å bedre strømnings- og sedimenteringsforhold. I hovedsak har det vært horisontale sviller i skillet mellom det effektive strømningsstverrsnittet og sedimenteringssonen. Ved hjelp av svillene oppnås det å skille hovedstrømmen fra sedimenteringssonen slik at urolige strømningsforhold ikke påvirker lagringsplassen for sedimenter. Ved varierende vannføring er svillene med og hjelper at små sedimenter som blir avsatt med lav vannføring ikke spyles ut ved økende vannføring (Eggen, 1973). I figur 3.12 er svillene tegnet inn.

Skillet av hovedstrømmen og sedimenteringssonen som er forårsaket av svillene kan senke kravet til utvidelse av tverrsnittet på grunn av den reduserte virkningen av strømningskraften på sedimenteringen, dette vil si en mindre medrivningskraft.

Sandfang kan tømmes manuelt eller ved spyling. Manuell tømming krever stans av anlegget og at mannskap kjører inn med utstyr for å grave ut sedimentene. Skal sandfanget spyles gjennom luker må dette gjøres med frispeilstrømning. Om frispeilstrømning ikke oppnås under spyling endres bare hastigheten rundt luka og ikke i hele sandfanget. Dette fører til at kun området rundt luka vil bli spylt og man får bare tømt en liten del av sandfanget.

3.3 LABORATORIETEKNIKK

En fysisk modell er en miniatyrisk reproduksjon av et virkelig system. Fysiske modeller er verktøy for å finne teknisk og økonomisk optimaliserte løsninger. Undersøkelser utført på fysiske modeller er basert på en teori om likhet mellom prototype og modell. Denne teorien gir grunnlag for beregninger av modellens parametere (Novak, et al., 2010). For at resultatene fra modellen skal være overensstemmende med virkeligheten må de viktigste fysiske størrelsene i natur og modell oppfylle modellovene. Det er tre likheter som må oppfylles.

3.3.1 GEOMETRISK LIKHET

Geometrisk likhet er oppfylt når alle geometriske forhold er like mellom prototype og modell. Er alle lengder like ved et forholdstall vil også alle vinkler være like. Denne likheten gjelder kun likhet i form og ikke i bevegelse. Geometrisk likhet uttrykkes:

$$L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (3-38)$$

Hvor:

L_r = Geometrisk forholds faktor [-]

L_m = Mål modell [m]

L_p = Mål prototype [m]

3.3.2 KINEMATISK LIKHET

Kinematisk likhet er oppfylt når bevegelsen av vannpartiklene er lik i prototype og modell. Dette er oppnådd når forholdet mellom alle vektorer sine bevegelser er like. Dette kan gjenkjennes ved like strømningslinjer i prototype og modell til en hver tid. Forholdet mellom hastighet i et punkt i modellen og prototypen må vær likt og kan uttrykkes:

$$V_r = \frac{V_m}{V_p} = \frac{V_{1,m}}{V_{1,p}} = \frac{V_{2,m}}{V_{2,p}} \quad (3-39)$$

Hvor:

V_r = Hastighet forholds faktor [-]

V_p = Hastighet prototype [m/s]

V_m = Hastighet modell [m/s]

3.3.3 DYNAMISK LIKHET

Dynamisk likhet er oppfylt når forholdet mellom alle vertikale og horisontale krefter er like i modell og prototype. Dette er den viktigste likheten å oppfylle. Dynamisk likhet sørger for et konstant likt forhold mellom alle masser og krefter i prototype og modell. Dynamisk likhet uttrykkes:

$$F_r = \frac{F_m}{F_p} \quad (3-40)$$

Hvor:

F_r = Krefter forholds faktor [-]

F_p = Krefter prototype [m/s]

F_m = Krefter modell [m/s]

Fluid mekanikk involverer seks krefter: Treghet, trykk, gravitasjon, viskøse skjær, overflate spenninger og elastisk kompresjon (Reclamation, 1980). Sammenhengen mellom de seks kreftene er uttrykt ved Newtons andre lov.

$$\sum F_i = M * a = F_p * F_g * F_v * F_t * F_e \quad (3-41)$$

Hvor:

F_i = Treghetskreftene

F_p = Trykkreftene

F_g = Gravitasjonskreftene

F_v = Viskøse skjærkrefter

F_t = Overflate spenning

F_e = Elastisk kompresjon

For at dynamisk likhet skal vær oppfylt:

$$\frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} = \frac{(F_p + F_g + F_v + F_t + F_e)_m}{(F_p + F_g + F_v + F_t + F_e)_p} \quad (3-42)$$

Ved perfekt dynamisk likhet vil følgende være oppnådd:

$$\frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} = \frac{(F_p)_m}{(F_p)_p} = \frac{(F_g)_m}{(F_g)_p} = \frac{(F_v)_m}{(F_v)_p} = \frac{(F_t)_m}{(F_t)_p} = \frac{(F_e)_m}{(F_e)_p} \quad (3-43)$$

Å oppnå perfekt dynamisk likhet, som i formel 3-43, er ikke mulig med noen væsker som er kjent i dag. Det er derfor viktig ved planleggingen av et modellforsøk å finne hvilke krefter som er viktig for forsøket og hvilke som kan neglisjeres.

3.3.4 FROUDE SKALERING

Dimensjonsløse parametere for alle de fem dominerende kreftene relatert til treghetskraften kan bli beregnet. For en modell der gravitasjonskraften er viktig, for eksempel ved gravitasjonsdrevne strømning, kan følgende utledes.

$$\left(\frac{F_i}{F_g}\right)_m = \left(\frac{F_i}{F_g}\right)_p \rightarrow \left(\frac{\rho V^2 L^2}{\rho g L^3}\right)_m = \left(\frac{\rho V^2 L^2}{\rho g L^3}\right)_p \rightarrow \frac{V_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1 \quad (3-44)$$

Utledningen fra formel 3-44 viser Froude tallet og kalles Froude skalering. Denne skaleringsfaktoren brukes i modeller hvor treghet og gravitasjonskrefter er dominerende. Dette er for eksempel ved frispeilstrømning i kanaler. Ved Froude skalering kan skaleringsfaktoren for areal, fart, tid og vannføring uttrykkes.

$$\text{Lengde} \quad L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (3-45)$$

$$\text{Areal} \quad A_r = \frac{A_m}{A_p} = \frac{L_m^2}{L_p^2} = L_r^2 \quad (3-46)$$

$$\text{Fart} \quad V_r = \sqrt{L_r} \quad (3-47)$$

$$\text{Tid} \quad t_r = \frac{t_m}{t_p} = \frac{L_m V_p}{V_m L_p} = \frac{L_r}{V_r} = \frac{L_r}{\sqrt{L_r}} = \sqrt{L_r} \quad (3-48)$$

$$\text{Vannføring} \quad r = \frac{m}{p} = \frac{V_m A_m}{V_p A_p} = V_r A_r = \sqrt{L_r} L_r^2 = L_r^{2,5} \quad (3-49)$$

3.3.5 REYNOLDS SKALERING

Når forholdet mellom treghetskreftene og de viskøse skjærkreftene er viktig, kan følgende utledes.

$$\frac{F_i}{F_v} = \frac{\rho V^2 L^2}{\mu V L} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu} = Re \quad (3-50)$$

Hvor:

μ = Viskositet

ν = Kinematisk viskositet = μ/ρ

Utledningen fra formel 3-50 viser Reynolds tallet og kalles Reynold skalering. Reynolds modellov sier at Reynolds tallet må ha samme verdi i prototype og modell. Reynolds modellov brukes når viskøse krefter er dominerende, som ofte er tilfelle ved strømming i lukkede tverrsnitt hvor viskøse skjærkrefter gjør seg gjeldene. Ved Reynold skalering kan skaleringsfaktoren for areal, fart, tid og vannføring uttrykkes:

$$\text{Lengde} \quad L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (3-51)$$

$$\text{Areal} \quad A_r = \frac{A_m}{A_p} = \frac{L_m^2}{L_p^2} = L_r^2 \quad (3-52)$$

$$\text{Fart} \quad V_r = \frac{v_r}{L_r} \rightarrow \frac{1}{L_r} \quad (3-53)$$

(samme væske i modell og prototype)

$$\text{Tid} \quad t_r = \frac{t_m}{t_p} = \frac{L_m V_p}{V_m L_p} = \frac{L_r}{V_r} = L_r^2 \quad (3-54)$$

$$\text{Vannføring} \quad r = \frac{m}{p} = \frac{V_m A_m}{V_p A_p} = V_r A_r = \frac{1}{L_r} L_r^2 = L_r \quad (3-55)$$

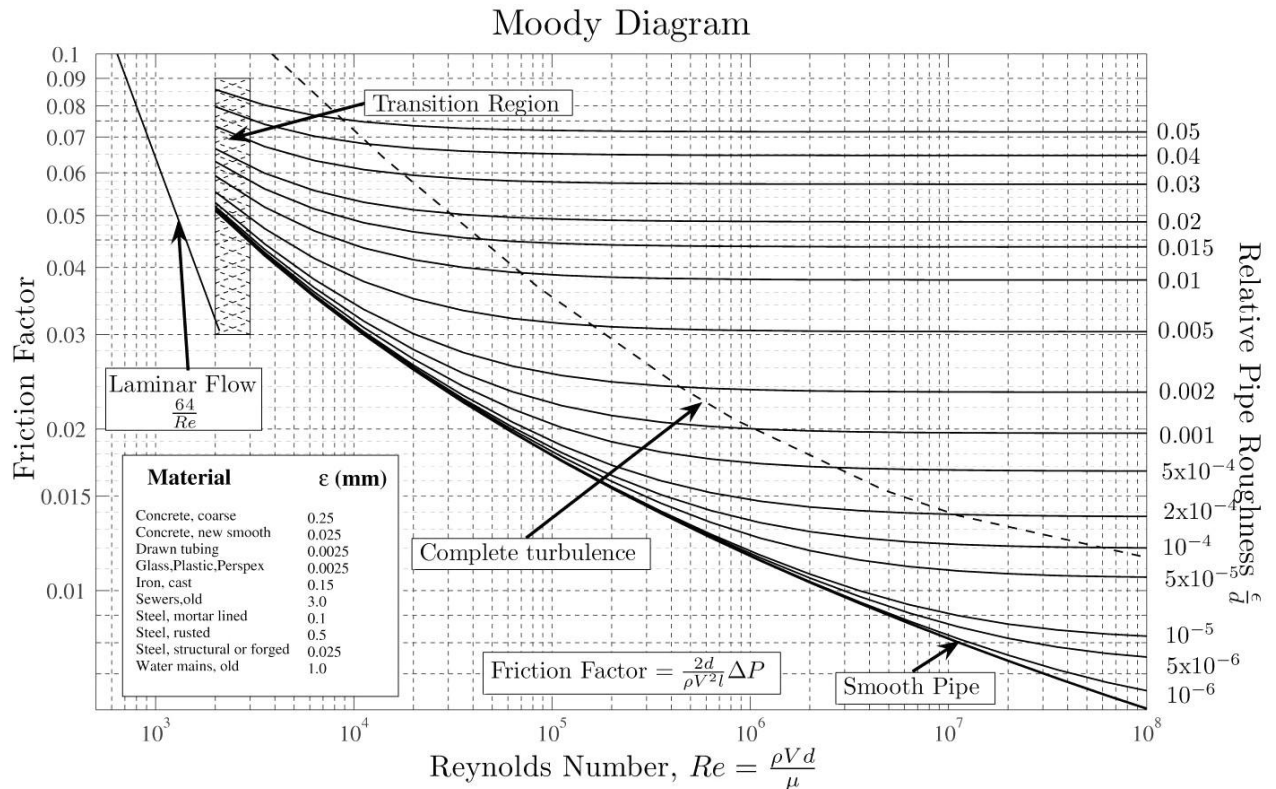
3.3.6 BRUK AV MODELLOVER

Hvis man krever at både Froude og Reynolds modellov skal være oppfylt i modell kan følgende utledes.

$$V_r = V_r \rightarrow \frac{v_r}{L_r} = \sqrt{L_r} \rightarrow v_r = L_r^{3/2} \quad (3-56)$$

Formel 3-56 viser at væsken vil bestemme det geometriske forholdet eller omvendt. Å finne en væske som vil gi det riktige skalaforholdet er vanskelig, tilnærmet umulig. På grunn av praktiske og økonomiske årsaker benyttes ofte vann også i modellen. Den kinematiske viskositeten blir da lik for modell og prototype og formel 3-56 viser at skaleringsfaktoren blir lik 1 ($L_r = 1$), altså modellen må være i full størrelse. I praksis er ikke dette mulig og den dynamiske likheten må oppfylles på en annen måte.

Forholdet mellom friksjonskoeffisienten, f , og Reynoldstallet, Re , er vist i Moody's diagram, figur 3.13. Diagrammet indikerer at en endring i Re endrer ikke friksjonskoeffisienten så lenge det er fullt utviklet turbulens. Dette vil si at det er tilstrekkelig at verdien av Re både for modell og prototype plasserer strømmingen i samme regime for fullt utviklet turbulens (American Society of Civil Engineers, 1983), altså høyre for den stiplede linjen i Moody's diagram.



FIGUR 3.13 MOODY'S DIAGRAM (CROWE, ET AL., 2005)

Ved fullt utviklet turbulens er tyngdekraften avgjørende og det er Froudes modellov som gjelder, dette er ofte tilfellet i modellforsøk.

3.3.7 RUHET

For å skape ønsket ruhet i en modell som er laget av glatt plast kan gummilister anvendes. Birkeland utviklet i 2008 en ny formel for beregning av listeavstand og listetykkelse for og oppnå ønsket ruhet (Birkeland, 2008). Formelen ble utviklet med en tre meter lang prøverigg med et konvensjonelt tunnelverrsnitt. Trykkforskjellen ble målt med to trykkuttak med 1,2 meters mellomrom, vannføring ble variert for forskjellige målinger. Prøveriggen var utformet slik at den gikk full for alle vannføringer.

Det ble tatt utgangspunkt i at den totale ruheten bestod av to deler.

$$f = f_{glatt} + f_{ru} \quad (3-57)$$

Hvor:

f = Friksjonskoeffisient [-]

f_{glatt} = Friksjonskoeffisient glatt tunnel (= 0,2) [-]

f_{ru} = Friksjonskoeffisient gummilister [-]

Formelen for f_{ru} ble antatt av å være et polynom avhengig av listeavstand, listetykkelse og listelengde. Alle variablene gjøres dimensjonsløse ved å dele på $4 \cdot \text{hydraulisk radius}$.

$$f_{ru} = \alpha \left(\frac{L}{4R_h} \right)^{k1} \left(\frac{h}{4R_h} \right)^{k2} \left(\frac{l}{4R_h} \right)^{k3} \quad (3-58)$$

Hvor:

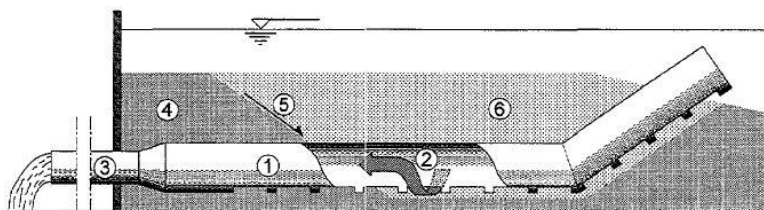
- α = Konstant [-]
- L = Listeavstand [m]
- h = Listetykkelse [m]
- l = Listelengde [m]

Forsøk med 3, 5, 7 og 9 mm tykke lister med varierende avstand mellom 100 - 400 mm ble gjort. Resultatene fra forsøkene ble satt opp i et ligningssett. Ligningene ble løst ved hjelp av "solver"-funksjonen i Microsoft Excel som beregnet parametrene som gav den minste verdien for kvadratet av avviket mellom beregnet og målt verdi. Den empiriske formelen ble dermed (Birkeland, 2008).

$$f_{ru} = 8,43 \left(\frac{L}{4R_h} \right)^{-0,796} \left(\frac{h}{4R_h} \right)^{1,655} \left(\frac{l}{4R_h} \right)^1 \quad (3-59)$$

3.4 SPALTERØR

Sedicon har et spylearrangement med spalterør som tillater tømning av sandfang under drift uten at det forstyrrer vanntilførselen. Spalterøret ble oppfunnet av Tom Jacobsen og testet for første gang i 1993 i Vassdragslaboratoriet ved NTNU. Spalterøret er et rør med spalter på undersiden som installeres i sandfanget. Høydeforskjellen mellom magasinet og utløpet til røret brukes som drivkraft. Figur 3.14 viser en prinsippskisse av et spalterør. Arrangementet har ikke behov for strømtilførsel og har heller ikke noen bevegende deler. Det kan benyttes i både trykksatte sandfang og sandfang med frispeilstrømning.



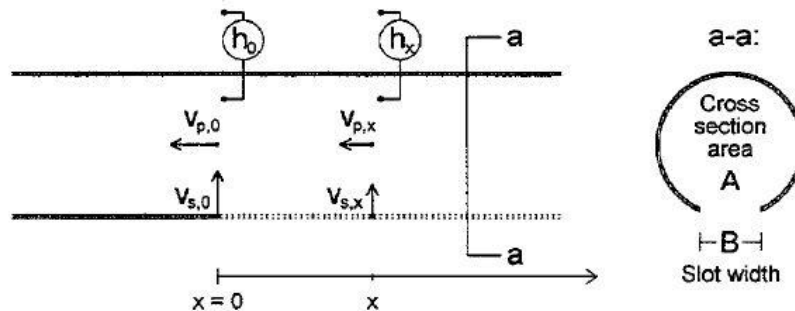
- 1: Slotted Pipe
- 2: Suction point where a water and sediment mixture is drawn into slotted pipe
- 3: Outlet pipe
- 4: Sediment
- 5: Sediment sliding down to suction area
- 6: Removed sediment

FIGUR 3.14 PRINSIPPSKISSE SPALTERØR (JACOBSEN, 1997)

Sedimenter vil deponere og legge seg på toppen og rundt spalterøret. Siden spaltene er på undersiden av spalterøret vil ikke sedimentene legge seg inni røret og tette for vannet som da kan strømme fritt gjennom røret. Når kranen for utløpsrøret åpnes vil spylingen av sedimenter starte. Vann blir dratt gjennom spaltene og river med seg sedimenter som ligger rundt spalteåpningen. Etter

hvert som sedimentene blir spylt bort flyttes sugepunktet nedover spalterøret helt til alle sedimenter rundt røret er fjernet (Jacobsen, 1997).

Figur 3.15 viser en spalteåpning i et rør der hastigheten gjennom spalten og i røret er vist ved forskjellige posisjoner x.



FIGUR 3.15 STRØMNING GJENNOM UENDELIG LANG SPALTEÅPNING (JACOBSEN, 1997)

Hastigheten gjennom spalten ved posisjon x kan uttrykkes ved høyden som er tilgjengelig og falltapet gjennom spalteåpningen.

$$V_{s,x} = \sqrt{\frac{2gh_x}{(1 + K_s)}} \quad (3-60)$$

Hvor:

K_s = Falltap gjennom spalten [-]

$$K_s = \frac{2gh_x}{V_{s,x}^2} - 1 \quad (3-61)$$

Trykkhøyden i røret ved ulike posisjoner for x er en funksjon av vannhastigheten i røret og falltapet gjennom spalteåpningen. Hastighetsfordelingen gjennom spalten og i røret kan uttrykkes.

$$V_{s,x} = V_{p,x} = V_{p,0} e^{\left(\frac{-Bx}{A}\right)} \quad (3-62)$$

Trykkforskjellen kan uttrykkes.

$$h_{s,x} = h_{s,0} e^{\left(\frac{-2Bx}{A}\right)} \quad (3-63)$$

Kapasiteten til spalterøret er da avhengig av vannhastigheten og rørets areal, siden det er dette som er avgjørende for transportkapasiteten til et rør. Kapasitetsformler for rør er presentert i kapittel 3.2.6.

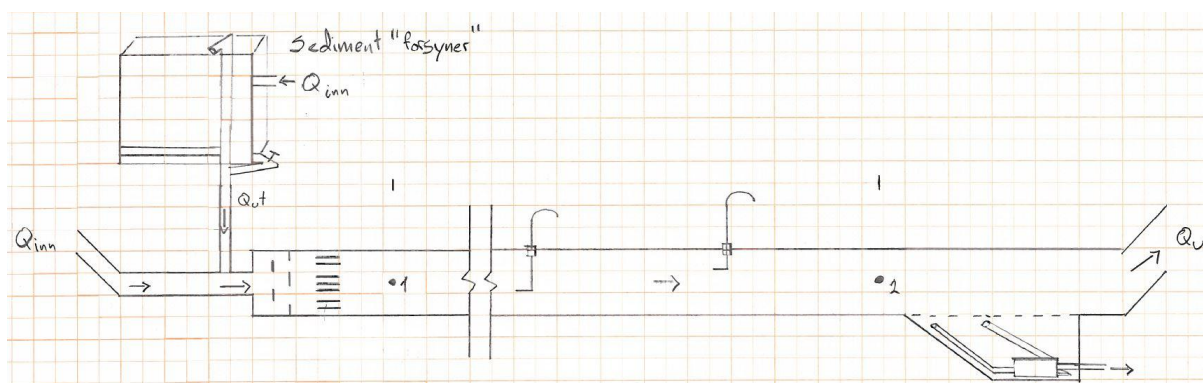
4 METODIKK

For å studere spyleeffekten til spalterør og sedimenttransport i en horisontal tilløpstunnel, er en fysisk modell tatt i bruk.

4.1 FYSISK MODELL

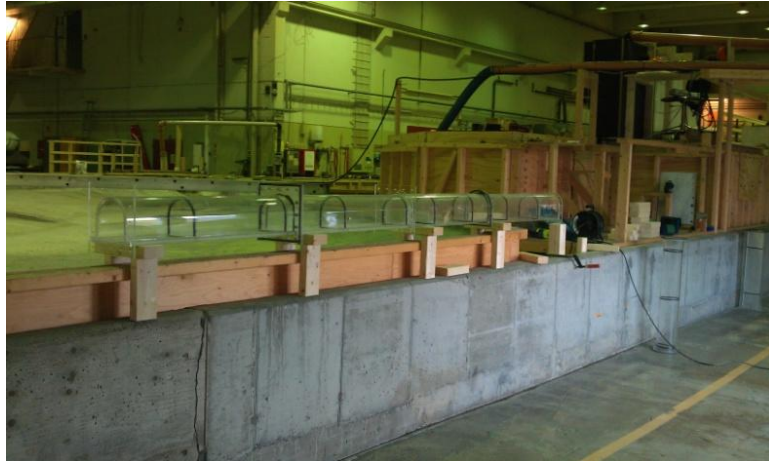
Modellen er bygget i Vassdragslaboratoriet ved NTNU. Arbeidet har bestått av flere store og små oppgaver.

At modellen gjenspeiler et reelt tilfelle, en prototype, er svært viktig. Derfor er planleggingen av modellen av stor betydning. Planleggingen ble gjort i samarbeid med veiledere med lang erfaring innen modellbygging, slik at viktige komponenter og utforminger ble satt sammen og ivaretatt. En av utfordringene var og ikke få for stort trykk gjennom modellen. Siden modellen er tilkoblet laboratoriets vannforsyning, som er store basseng plassert i etasjen over laboratoriet, var det viktig at ikke hele trykkhøyden gikk til modellen. Endelig skissering av modellen ble gjort i samarbeid med Tom Jacobsen.



FIGUR 4.1 FYSISK MODELL

Figur 4.1 viser en oversiktsskisse av modellen. Tunnelseksjonene brukt er seksjoner fra modell Svartvannsdammen. Forsøkene ved Svartvannsdammen var ferdige og tunnelseksjonene brukt i modellen var godt egnet for gjenbruk. De aktuelle tunnelseksjonene måtte demonteres fra Svartvannsdammen. Enkelte av tunnelseksjonene krevde noen modifikasjoner for å passe sammen i en rett horisontal tunnel. Bygging av modellen ble gjort i samarbeid med Geir Tesaker. Byggingen viste seg å være tidkrevende når det var mange seksjoner som skulle settes sammen og hver enkelt seksjon krevde støtte. Seksjonene får en betydelig vekt når modellen fylles med vann og sedimenter. Det er tilstrebet at modellen er så rett og horisontal som mulig.

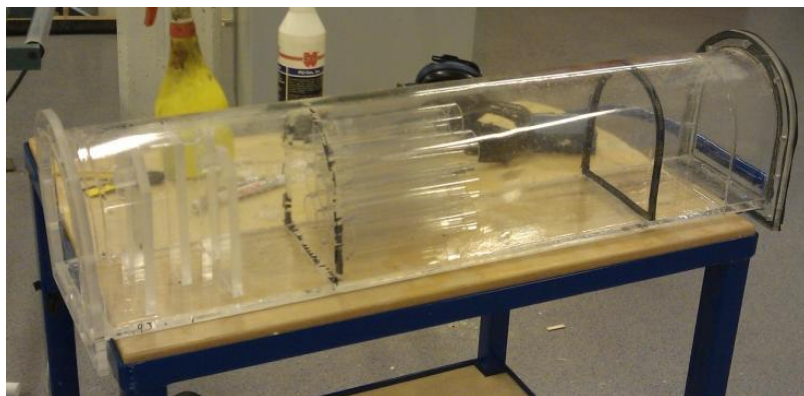


FIGUR 4.2 BYGGING AV TUNNEL

Nye deler som ikke var tilgjengelige er bygget. Sandfanget er bygget med sviller i tunnelbunnen uten en utvidelse av tunneltverrsnittet. Utløpet er hevet slik at tunnelen går full for alle vannføringer. Utløpet ender i et lite sedimenteringsbasseng der kun overflate vannet blir tappet slik at mest mulig sedimenter skal samles opp.

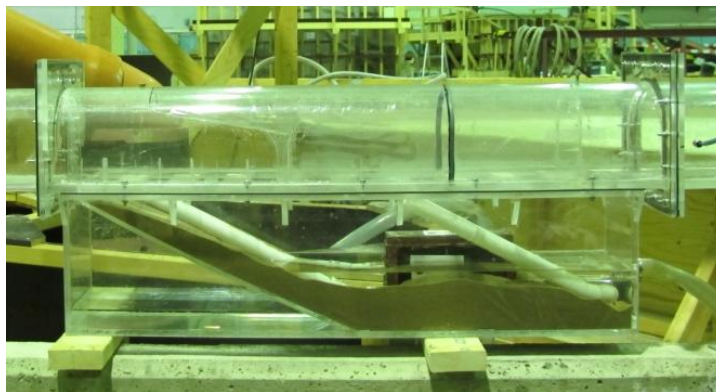
Oppbygning

Den første tunnelseksjonen består av spalter satt på tvers av tverrsnittet. Spaltene virker som diffusere for å blande sedimentene og vannet. Etter diffuserene er tverrsnittet fylt med rør for å likerette strømmen. Tunnelseksjonen er vist i figur 4.3. Grunnen til at denne løsning er valgt er for å kunne studere sedimenttransporten gjennom tunnelen. Ved å blande vann og sedimenter godt i innløpet av tunnelen er innløpsforholdene kjent. Det kan da studeres om den vertikale konsentrasjonsfordelingen går mot en likevektssituasjon. Seksjonen er en meter lang.



FIGUR 4.3 FØRSTE TUNNELSEKSJON

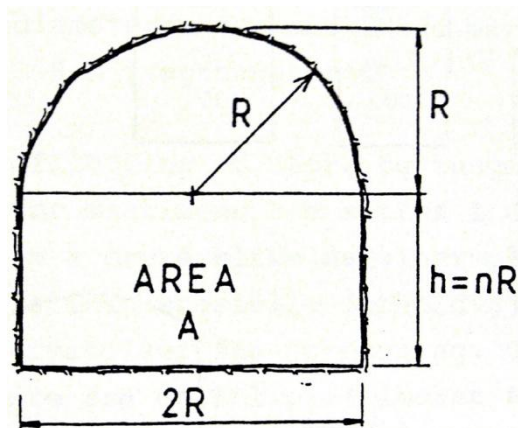
Den siste tunnelseksjonen er det skjært ut sviller i bunn av og montert sandfang under. Denne seksjonen er 1,1 meter lang og er vist i figur 4.4.



FIGUR 4.4 SANDFANG

Geometri

Tunnelen er totalt 10,5 meter lang. Tunnelverrsnittet er utformet med konvensjonelt tverrsnitt som vist i figur 4.5. Optimal hydraulisk form for et konvensjonelt tverrsnitt er når $n=1$, altså $R=h$ (Guttormsen, 2006).



$$\begin{aligned}
 &= 8,5 \text{ cm} \\
 h &= 1 * = 8,5 \text{ cm} \\
 A &= 258 \text{ cm}^2 \\
 P &= 60 \text{ cm} \\
 \text{Hydraulisk radius, } R &= 4,3 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

FIGUR 4.5 TUNNELVERRSNITT (GUTTORMSEN, 2006)

Modellen er en prinsippmodell som ikke er bygget etter en bestemt prototype. Størrelsen av tunnelverrsnittene var også fastsatt siden tunnelseksjonene ble tatt fra Svartvannsdammen modellen. I et tilfelle hvor man har en prinsippmodell kan skaleringen bestemmes fritt. Antar man en skala på $1/40$, $L_r=1/40$, er størrelse av en prototype vist i tabell 4-1.

	Modell	Prototype
Lengde [m]	10,5	420
Areal [m ²]	0,025	40
Lengde sandfang [m]	1,1	44

TABELL 4-1 SKALERING

Tabell 4-1 viser at med en skala der $L_r = 1/40$ oppnås en realistiske størrelser for det som kunne ha vært en prototype.

Vannføring og hastighet

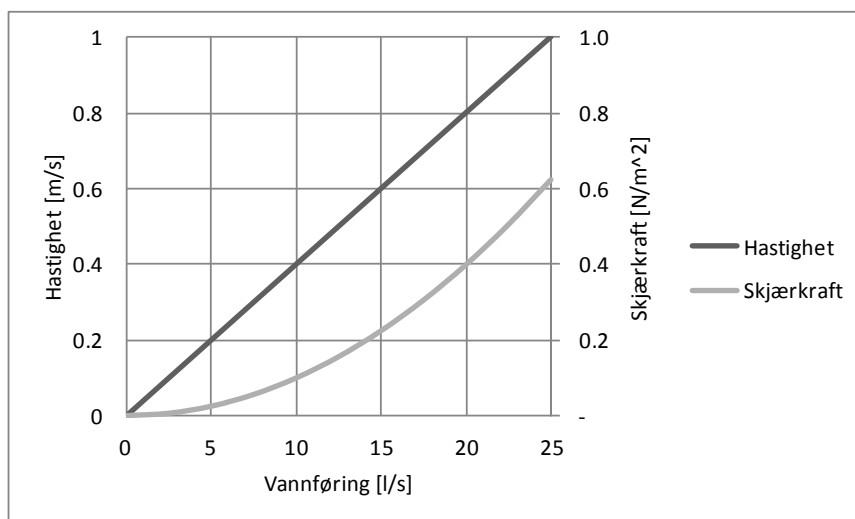
Modellen er koblet til laboratoriets hovedvannforsyning. Modellen har på den måten tilgang på rikelig med vann. Vannføringen justeres gjennom en ventil. Over ventilen er det montert en

vannføringsmåler som angir vannføringen i l/s. Med vannføringsmåleren er det lett å holde kontroll på vannføringen gjennom modellforsøkene. For dette forsøket er det viktig å vite så nøyaktig vannføring gjennom modellen som mulig. Vannføringsmåleren er vist i figur 4.6. Den oppgir vannføringen med to desimaler med en feilmargen på 0,5 % (Siemens, 2005). Dette er ansett som akseptabelt for å holde god kontroll på hastigheten gjennom tunnelen.



FIGUR 4.6 VANNFØRINGSMÅLER, TYPE MAG 5000 (SIEMENS, 2005)

Fra kontinuitetsprinsippet er det kjent at det er vannføringen som bestemmer hastigheten ved et konstant tverrsnitt. Hastigheten er en av de viktigste faktorene for sedimenttransport. Hastigheten bestemmer turbulensintensiteten og skjærkraften. Figur 4.7 viser hvordan hastigheten og skjærkraften varierer med vannføringen gjennom tunnelen.



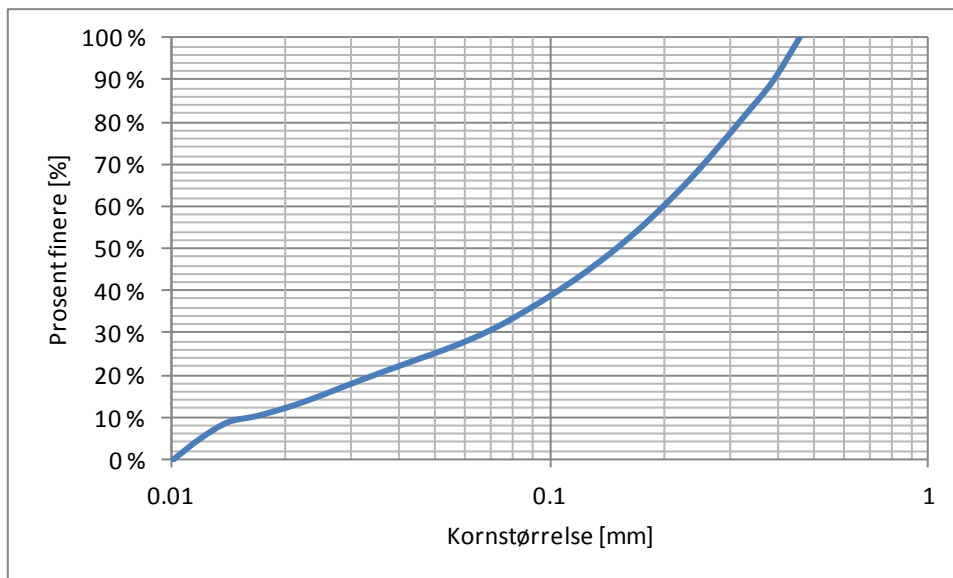
FIGUR 4.7 VANNFØRING MOT HASTIGHET OG SKJÆRKRAFT

Sedimenter

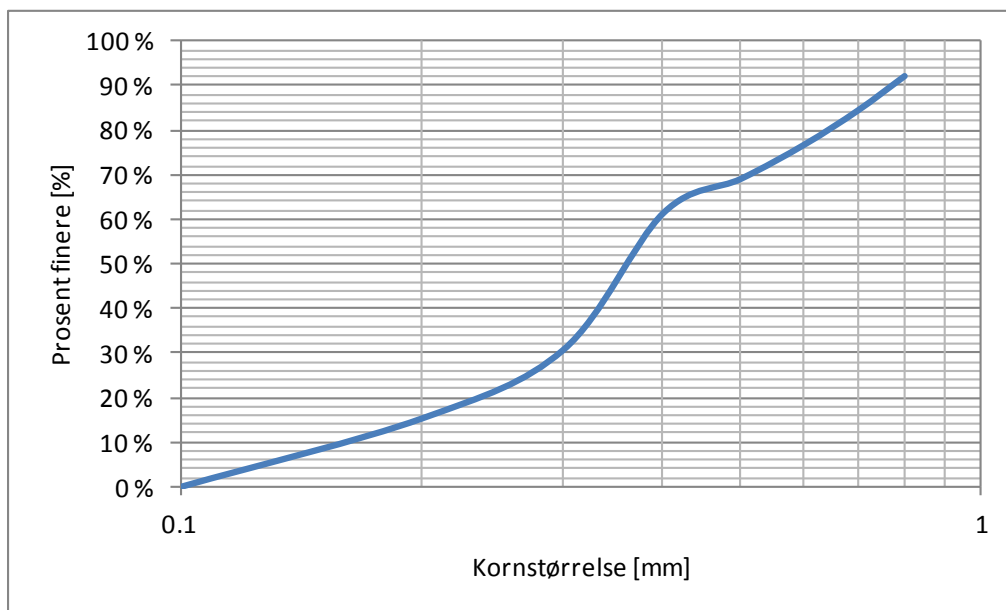
Sedimentene som er brukt er vasket akvariesand. Sanden er valgt på grunn av tilgjengelighet, kan skaffes i varierende størrelser og sammensetninger. Sanden er også vasket som gjør at den er "ren"

og relativt ensgradert. Dette gjør det enkelt å sette sammen kornfordelinger og er svært tidsbesparende, framfor å sikte egen sand.

Det er brukt to kornfordelinger ved forsøkene. Kornfordeling 1, vist i figur 4.8, består av fine sedimenter og er relativt ensgradert. Kornfordeling 2, vist i figur 4.9, består av grovere sedimenter.



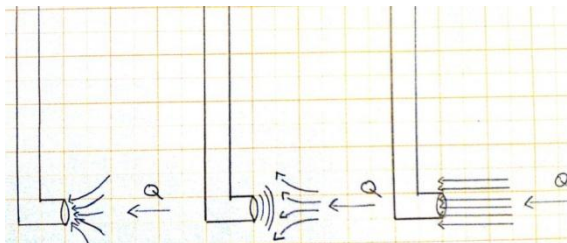
FIGUR 4.8 KORNFORDELING 1



FIGUR 4.9 KORNFORDELING 2

Hver andre meter er det satt inn rør for å ta sedimentprøver i en bestemt høyde i tverrsnittet. Røret kan trekkes opp og ned gjennom hele tverrsnittets høyde. Prøvene skal analyseres for å studere den vertikale konsentrasjonsfordelingen fra innløpet fram mot sandfanget. Prøver tas ved ulike høyder i tunneltverrsnittet og derfor er det viktig at det er kun vann fra høyden prøven tas i som kommer med i prøven. For å oppnå dette er hastigheten i prøverøret beregnet slik at det er samme hastighet i tunnelen og prøverøret. På denne måten unngår man at prøverøret suger vann ved en for høy

hastighet i prøverøret eller skaper en blokkade foran røret ved en for lav hastighet. Figur 4.10 illustrerer dette. Hastigheten i røret blir kontrollert med en ventil som regulerer vannmengden ut av røret og dermed hastigheten. Prøvene er tatt i fem forskjellige tverrsnitt med to meters mellomrom. I hvert tverrsnitt er det tatt prøver i fire forskjellige høyder.



FIGUR 4.10 PRØVERØR

Sedimentprøvene er analysert med en "Laser Diffraction particle size analyzer" (heretter LISST). Dette er en enhet som måler flere parametere i en sedimentprøve. Blant annet måler den:

- Volumkonsentrasjon av partikler
- Gjennomsnittlig partikkel størrelse
 - Standardavvik
- D_{10} , D_{16} , D_{50} , D_{60} , D_{84} , D_{90}
- Total konsentrasjon

Dette betyr at mye data blir gjort lett tilgjengelig.

Spalterør

Spylearrangementet brukt i modellforsøket for tømning av sandfanget er levert av Sedicon AS. To typer spylearrangement er brukt under forsøkene. Et enkelt spalterør kun med bender er testet. Et mer avansert spylearrangement som består av to spalterør med bender som er tilpasset sandfanget samt en vannfordeler som kalles Sedicon enhet. Innholdet i Sedicon enheten er patenterbart og holdes av den grunn hemmelig. Figur 4.11 viser spalterør og Sedicon enhet som er tilpasset og plassert i sandfanget under bygging av modellen. Det er viktig at spalterørene ikke har en for bratt helning slik at sedimenter ikke raser inn gjennom spaltene på undersiden av spalterøret. Om spalterørene installeres for bratte er det fare for at sedimenter vil rase inn gjennom spaltene i røret i perioder der arrangementet ikke spyle. Dette kan føre til at rørene tettes, som igjen vil sette arrangementet ut av drift. Det er sedimentenes rasvinkel når de er dykket under vann som bestemmer hvor bratt rørene kan legges.

De geometriske dimensjonene av spylearrangementet er fastsatt av Sedicon AS når de leverte arrangementet. Sett i skala med resten av modellen vil dette være overdimensjonert. Det er vurdert til at man får testet spylearrangementet funksjonalitet selv om det er overdimensjonert i forhold til resten av modellen.

Første spylearrangement testet var et enkelt spalterør med bend, spalterøret og plasseringen er vist i figur 5.4. Etter dette er spylearrangementet med to spalterør koblet til en Sedicon enhet testet, vist i figur 4.11. Begge utformingene ble testet med forskjellige plasseringer i sandfanget. Om sandfangets utforming hadde noe innvirkning på spylearrangementet var interessant.



FIGUR 4.11 SPALTERØR OG SEDICON ENEHET TILPASSET SANDFANGET

Spalterørene brukt i modellforsøket er PE-rør med en diameter på 32 mm. Spaltene er boret på undersiden og er 20 mm lange og 10 mm brede.

4.2 KALIBRERING AV MODELL

For å bestemme og validere alle parametere til modellen for beregninger i ettertid må modellen kalibreres. For å sørge for en vikelignær reproduksjon av alle parametere er også kalibreringen nødvendig.

4.2.1 RUHET OG SKJÆRKRAFT

En annen viktigste faktorene å ha god kontroll på ved dette forsøket er modellens ruhet. Ruheten er med på å bestemme nivået av turbulens og skjærkraften som igjen påvirker sediment transporten.

Tunnelseksjonene fra Svartvannsdammen hadde allerede en skalert ruhet som en råsprengt tunnel. Siden modellen er geometrisk likeddannet med en prototype, må energilinja i modellen ha samme helning som i prototype. Energilinjens skalerte helning kan uttrykkes (Lysne, 1969):

$$S = \frac{n^2 V^2}{4/3} \quad (4-1)$$

$$S_p = S_m \rightarrow \left(\frac{n^2 V^2}{4/3} \right)_p = \left(\frac{n^2 V^2}{4/3} \right)_m \quad (4-2)$$

$$\frac{n_m^2}{n_p^2} = \frac{V_p^2}{V_m^2} \frac{m}{p} = L_r^{1/3} \quad (4-3)$$

$$\frac{n_m}{n_p} = L_r^{1/6} \quad (4-4)$$

Med dette kan man skalere ruheten til en råsprengt tunnel. Siden tunnelverrsnittene som er brukt i modellen allerede har en skalert ruhet måtte denne fastsettes. Dette ble gjort med en differanse trykk transmitter, vist i figur 4.12. Den måler trykkforskjellen mellom to punkt i mVs, med andre ord falltapet.



FIGUR 4.12 DIFFERANSE TRYKK TRANSMITTER

For å finne friksjonen er modellen kjørt med rent vann uten noe tilførsel av sedimenter siden dette ville ha påvirket målingene ved å gi et større falltap på grunn av økt friksjon. Det er gjort målinger med to forskjellige vannføringer, som igjen gir to forskjellige hastigheter. Tabell 4-2 viser resultatene fra forsøket.

Vannføring, Q [l/s]	Hastighet, V [m/s]	Trykkforskjell [mVS]
12,5	0,5	0,031
25,0	1	0,124

TABELL 4-2 RESULTATER

Fra resultatene har ruheten i modellen blitt kalkulert. Ruheten er kalkulert ved hjelp av standard falltapsformler, formel 4-5 og 4-6, kjent fra kapittel 3.1.

$$h_f = \frac{L}{M^2} * \frac{V^2}{4/3} \quad (4-5)$$

$$h_f = f * \frac{L}{4R} * \frac{V^2}{2g} \quad (4-6)$$

Formel 4-5 uttrykker ruheten i modell gjennom manningstall M. Formel 4-6 uttrykker ruheten gjennom en friksjonskoeffisient f. Avstanden mellom målepunktene er 8,4 m, tabell 4-3 viser den beregnede ruheten for modellen.

Trykkforskjell [mVS]	Manningstall, M	Friksjonskoeffisient, f
0,031	68	0,048
0,124	68	0,048

TABELL 4-3 RUHET MODELL

Friksjonskoeffisienten kan omregnes til ruhet uttrykket i mm ved formel 4-7, der k_s er ruhet i mm.

$$(Swamee-Jain eq.) \quad f = \frac{1,325}{\left(\ln\left(\frac{k_s}{3,7D} * \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)\right)^2} \quad (4-7)$$

Løser man ligningen blir K_s lik 3,2 mm.

Ruheten funnet gjennom falltapsmålinger kan regnes om til ruhet i modell gjennom en lik energilinje, formel (4-4), der $n=1/m$. Ved en skala på 1/40 til prototype blir Mannings tall lik 37 for en fullskala tunnel. Et Mannings tall lik 37 er realistisk for en råsprengt tunnel og det ble derfor ikke sett noe grunn til å korrigere ruheten. Ser man på den absolutte ruheten, k_s , og skaleres denne opp geometrisk med samme skala, 1/40. 128 mm blir absolutt ruhet for en fullskala tunnel som er realistisk for en råsprengt tunnel.

Modellen er laget av glatt plast som ruheten må legges til, dette gjøres ved hjelp av gummilister. Som beskrevet i kapittel 3.3 utviklet Birkeland en metode for å gjøre dette. Det er denne metoden som er brukt i tunneltverrsnittene.

Listeavstand [m]	0,568
Listetykkelse [m]	0,005
f_{ru}	0,034
f_{glatt}	0,02
f	0,054

TABELL 4-4 SKALERT RUHET I MODELL

Tabell 4-4 angir parameteren for plassering og tykkelse av gummilister etter Birkeland.

4.3 FORSØKSSTRATEGI

For å finne spyleeffekten til de to spylearrangementene og sedimenttransporten gjennom tunnelen ble følgende strategi lagt til grunn.

4.3.1 SPYLING AV SANDFANG

For å finne hvilke faktorer som påvirker spyleeffekten til spylearrangementet skal ulike plasseringer av arrangementet testes samt ulik utforming av sandfanget. Spylearrangementet skal testes med kontinuerlig sedimenttilførsel og vannføring slik at effekten av plasseringen og utformingen kan studeres. Ved test av spyling av sandfanget skal alle sedimenter tilføres i start av tunnelen for så å bli transportert gjennom tunnelen og deponere i sandfanget. For å skape en naturlig tilføring av sedimenter til sandfanget gjøres dette. En naturlig fylling rundt spylearrangementet oppnås, dette gir et realistisk bilde av kapasiteten til arrangementet.

Tunnelen skal testes med ulike vannføringer og kornfordelinger for å studere spyleeffekten ved ulike tilfeller.

Spyleeffekten skal måles i konsentrasjonen av sedimenter i spylevannet. Vannføring og hastighet gjennom spalterøret skal måles sammen med spyleeffekten. Med kjent hastighet og tverrsnitt av utløpsrøret kan maksimal kapasitet gjennom røret beregnes.

Prøver fra spylevannet skal tas ved start av spyling, midt i og ved slutt. Prøvene skal bli veid før sedimentene fra prøvene skal tørkes i tørkeskap og veies på nytt for å finne konsentrasjonen.

4.3.2 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING

For å skape et bilde av hva som kan forventes skal den vertikale konsentrasjonsfordelingen beregnes ved hjelp av Vanoni's formel 3-35. Siden det ikke er en kjent referansekonsentrasjon, benyttes figur 6.1 til å finne den forventede konsentrasjonsfordelingen.

Den vertikale konsentrasjonsfordelingen skal studeres ved ulike vannføringer og kornfordelinger. Prøver skal tas i fem ulike tverrsnitt langs tunnelens lengdeakse i fire høyder i tunneltverrsnittet. For å sørge for en nøyaktig prøve er hastigheten i prøverøret beregnet til samme hastighet som i tunnelen. Det kreves derfor at hver prøve tas med nøyaktighet for å fylle et bestemt volum på en bestemt tid for å oppnå lik hastighet. Prøvene skal så analyseres ved LISST.

4.3.3 ANDRE MÅLINGER

Om det lar seg gjøre skal andre relevante data måles og samles inn. Dette er da ment som supplerende informasjon som kan støtte opp under resultatene for spyleeffekt eller konsentrasjonsfordeling.

4.4 BEGRENSNINGER OG FEILKILDER

Ved fysiske modellforsøk generelt vil det eksistere flere mulige feilkilder. I følge Heller (Heller, 2011) kan det oppstå betydelige forskjeller mellom oppskalerte modellverdier og prototype på grunn av modell-, skala- og/eller måleeffekter. Modelleffekter oppstår ved feil gjengivelse av prototype sin geometri, strømning, bølgedannelse teknikk eller væskens egenskaper. Skalaeffekter oppstår når ikke alle relevante kraftforhold holdes konstant mellom modell og prototype. Måleeffekter inkluderer ulike måleteknikker brukt for datainnsamling i modell og prototype. Hvorvidt og i hvilke grad de nevnte effektene har påvirket resultatene er vanskelig å si. Det er likevel sannsynlig at de i større eller mindre grad har påvirket resultatene.

Siden forsøket ikke har en bestemt prototype er målte verdier og observasjoner de viktigste resultatene. Måling av forskjellige verdier i modellforsøket som er utført er faktorer som er vurdert til å kunne ha størst innvirkninger på resultatet.

Måleutstyr

Nøyaktighet i måleutstyret brukt under forsøkene er avgjørende for et presist resultat. Vannføringsmåleren brukes for å bestemme gjennomsnittshastigheten gjennom tunnelen. Feil informasjon fra vannføringsmåleren vil gi feil inntrykk av hastigheten som er bestemmende for beregnet strømningssituasjon og skjærkraft. Det er avgjørende for et korrekt inntrykk av målinger og resultat fra forsøkene med korrekt vannføring.

Trykkdifferanse transmitteren brukt for å finne falltapet gjennom tunnelen kreves å være presis. Det er målingene som er brukt til å beregne ruheten i modell, som igjen er brukt i senere beregninger for å finne et gjeldende formelverk. Om denne måleren skulle ha et stort avvik vil dette gi feil ruhet i modellen og dermed feil beregnet skjærspenning samt feil beregnet kapasitet og strømningssituasjon. LISSTen brukt for å analysere sedimentprøvene har noen begrensninger. Største fraksjon den kan måle i en prøve er 0,5 mm. For å kunne utføre en så korrekt måling som mulig er det anbefalt at transparensen av prøven ligger mellom 30 – 90 %. En transparens utenfor dette

området vil kunne gi avvik i analysen. I modellen er vaskede sedimenter anvendt, dette gjør det vanskelig å få opp transparensen i prøvene siden alle de fineste partiklene er vasket ut og sedimentene anvendt faller raskt til bunn. Dette gir rom for noe avvik ved analyse av sedimentprøvene. LISSTen er installert med blander som skal sørge for å holde alle sedimenter i suspensjon, men det er usikkert hvor godt denne fungerer med større sedimentmengder som rask faller til bunn.

Flere menneskelige feil og unøyaktigheter kan føre til misvisende resultater. Dette kan oppstå ved tidtaking eller oppveiling av masser der avlesningsfeil kan bli gjort. Funksjonsfeil med vekten som er brukt for oppmåling av sedimenter eller tidtakeren som er brukt under selve forsøkene kan ha gitt feil verdier og her er det også rom for menneskelige avlesningsfeil.

Ruhet

Ruheten i modell er representert ved gummilister som er limt inn med en beregnet avstand for å få lik helning på energilinja i modell som prototype. Det vil si at ruheten er representert over en lengde og ikke i et punkt. I ett snitt i modellen mellom listene er ikke ruheten skalert siden tunnelen består av glatt plast. Ruheten er dermed skalert med stedvis høy ruhet istedenfor en jevn ruhet hele veien. Det er vanskelig å kunne si noe om påvirkning på resultatene på grunn av dette, men mest sannsynlig vil dette ha hatt en påvirkning.

5 MODELLFORSØK

Hensikten med dette kapittelet er å beskrive hvordan modellen og de forskjellige introduserte sedimentene oppførte seg under forsøkene, og hvilke faktorer som påvirket spyling av sandfanget. Det er observasjonene som er gjort visuelt og som ikke gir noe tallfestet resultat som er presentert i dette kapittelet.

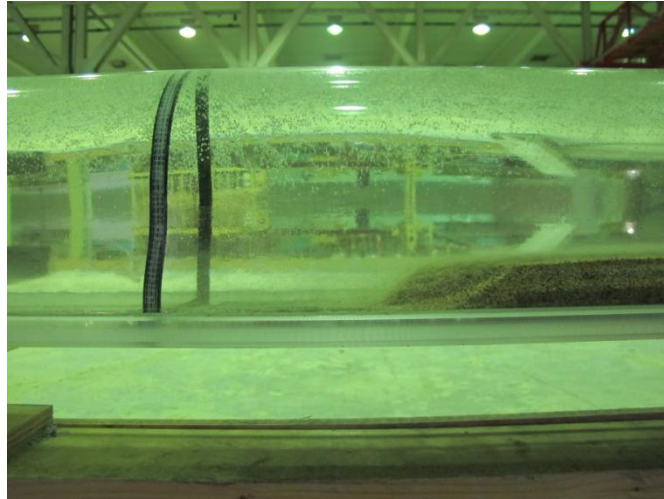
5.1 VERTIKAL FORDELING OG BUNNLAST

Ved tilføring av kornfordeling 2, som er velgradert, dannet det seg raskt dyner langs bunn av tunnelen. Ved lav vannhastighet dannet dynene seg tilnærmet momentant. Med en høyere vannhastighet tok det noe lenger tid selv om dannelse av dyner inntraff raskt. Høyere vannhastighet førte til at dynen beveget seg raskere gjennom tunnelen enn ved lav vannhastighet. Ved dannelse av dyner gikk svært lite av sedimentene som suspendert last. Figur 5.1 viser et bilde av hvordan sedimentene legger seg som dyner og blir transportert gjennom tunnelen. Den gjenkjennbare dråpeformen av dynene ses igjen på bildet.



FIGUR 5.1 SEDIMENTER BEVEGER SEG SOM DYNER GJENNOM TUNNEL

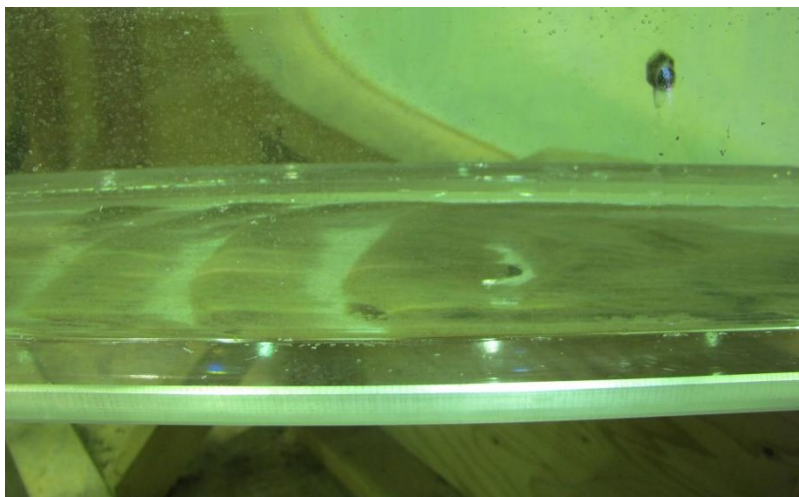
Å ta prøver av den vertikale fordelingen er vanskelig når sedimentene beveger seg som dyner gjennom tunnelen. Dette er på grunn av at de vertikale prøvene som tas i forskjellige høyder ikke kan tas ved samme punkt i forhold til dynen siden denne beveger seg. Det vil da si at prøvene blir tatt i forskjellige punkt i forhold til dynen og dynefronten. Figur 5.2 viser fronten til en dyne som beveger seg gjennom tunnelen.



FIGUR 5.2 DYNEFRONT

Ensgraderte masser med fine sedimenter gikk i suspensjon gjennom tunnelen ved en høy vannhastighet. Om vannhastigheten ble senket dannet massene dyner langs bunn, men ikke av samme sort som de velgraderte massene. Langs bunn av tunnelen ble det dannet et tynt lag som man på nært hold kan se er små dyner, vist i figur 5.3. Ved fine ensgraderte massene var det vannhastigheten som var avgjørende for om dyner ble dannet eller ikke. Hvilke transportmekanisme sedimentene ble transportert gjennom tunnelen på, hvor stor andel av sedimentene som gikk som suspendert last og hvor stor andel som gikk som bunnlast varierte med vannhastigheten.

Hastigheten sedimenter ble tilført tunnelen hadde innvirkning på hvordan sedimenttransporten oppførte seg. Høy vannhastighet og fine ensgraderte sedimenter kombinert med rask tilføring skapte opphoping av sedimenter. Opphoping ble dannet tidlig i tunnelen og det meste av sedimentene gikk som suspenderte masser lenger nedstrøms i tunnelen.



FIGUR 5.3 DYNER MED FIN ENSGRADERET MASSER

Sandfanget med sviller som er installert for å skille sedimenteringssonene og det effektive strømningsstverrsnittet viste seg å fungere bra. Så å si alt som gikk som bunnlast ble fanget opp av sandfanget ved å falle mellom svillene. Strømningsforholdene i sandfanget var rolige og det var lite omrøring av sedimenter. Dette betyr at sandfanget og svillene fungerte bra for bunnlast. Sedimenter

som gikk i suspensjon gjennom tunnelen ble derimot ikke felt ut like godt. Tunnelseksjonene over sandfanget har ikke noe utvidelse av tverrsnittet og dermed er det ikke store endringer i strømningsbilde over sandfanget som har installert sviller.

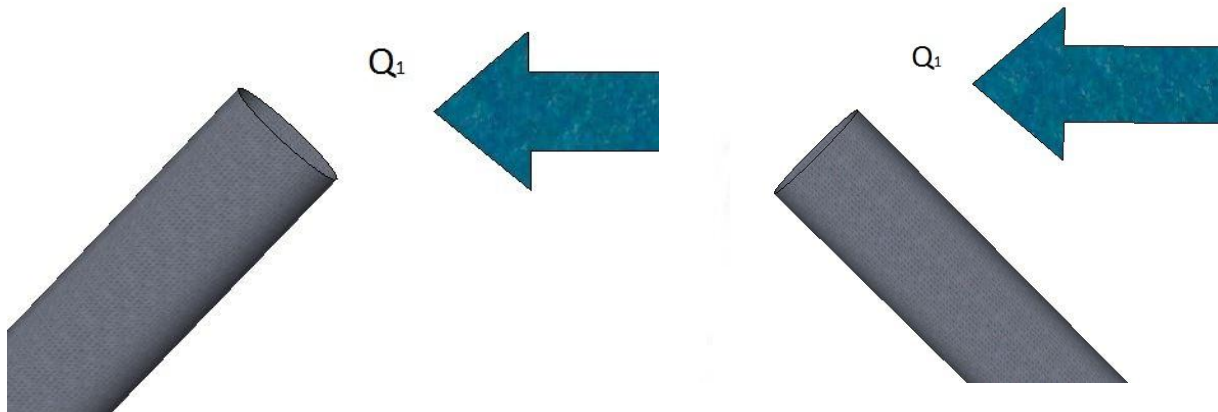
5.2 SANDFANG OG SPYLING

Enkelt spalterør med bend ble først testet, spalterøret er vist i figur 5.4. Utformingen av sandfanget og plassering av spalterøret hadde innvirkning på konsentrasjonen av sedimenter i spylevannet ved tømming av sandfanget.



FIGUR 5.4 ENKELT SPALTERØR MED BEND

Den mest utslagsgivende faktoren er plassering av spalterøret i forhold til retningen av strømmen i tunnelen. Om spalterørets åpne topp var plassert i motsatt retning av strømmen i tunnelen var konsentrasjonen av sedimenter i spylevannet lavere enn om spalterøret var plassert i samme retning som strømmen i tunnelen. Figur 5.5 illustrer dette, der Q_1 er retningen av strømmen til vannet i tunnelen.



Situasjon 1: Spalterørets åpne topp plassert i motsatt retning av strømmen i tunnelen.

Situasjon 2: Spalterørets åpne topp plassert i samme retning som strømmen i tunnelen.

FIGUR 5.5 STRØMNINGSRETNING TOPP AV SPALTERØR

Situasjon 2 i figur 5.5 gav høyest konsentrasjon av sedimenter ved tømning av sandfang. Det var lett å se ved at vannet som kom ut av utløpet til spalterøret var mer som en "tykk grøt". Andelen av sedimenter ses fort når alle sedimenter synker raskt til bunn i bøtta hvor prøvene er tatt. Det indikerer at arrangementets kapasitet blir maksimalt utnyttet når sedimentkonsentrasjonen i avløpsvannet er høy. Hvorfor det var en forskjell på de to presenterte situasjonene, da kornfordelingen og vannhastighet i tunnelen var lik, er et interessant spørsmål. For å finne ut om det var den åpne toppen av spalterøret som var årsaken ble denne forseglet og spalterøret ble plassert i situasjon 1. Forseglingen er vist i figur 5.6.

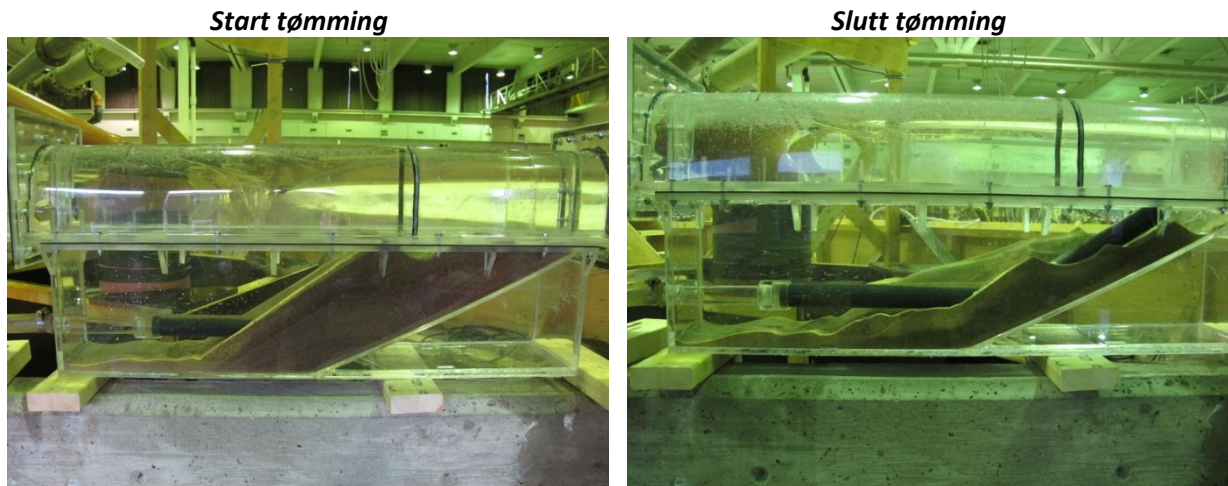


FIGUR 5.6 FORSEGLET TOPP AV SPALTERØR

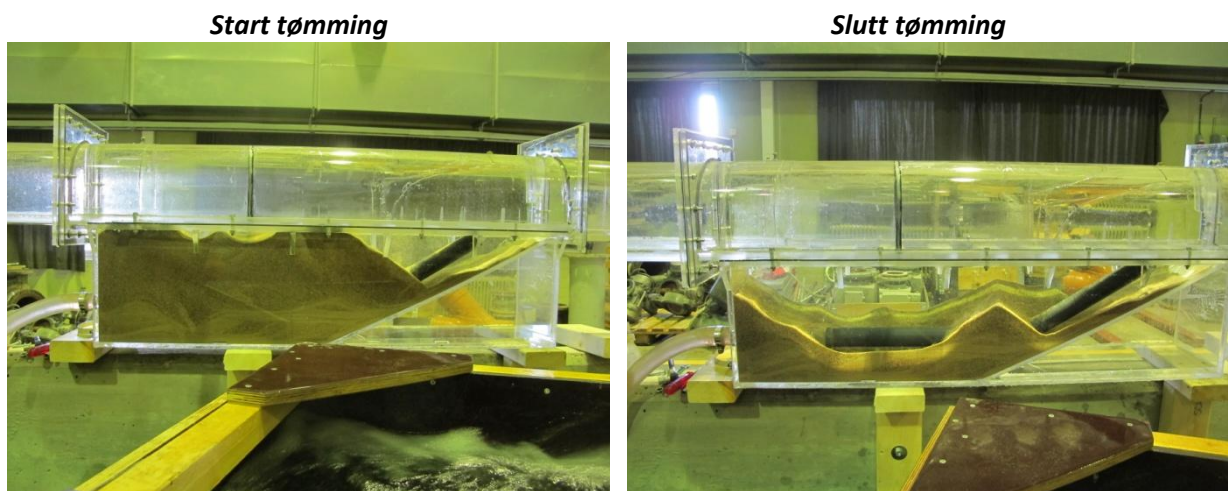
En forseglet topp gav bedre spyleeffekt i situasjon 1 enn ved en åpen topp. Konsentrasjonen av sedimenter i spylevannet økte betraktelig. Det vil derfor være rimelig å anta at mye av grunnen til redusert spyleeffekt ved situasjon 1 er den åpne topp av spalterøret.

Sandfangets utforming hadde innvirkning på hvor stor andel av sandfanget som ble tømt. Dette er avhengig av hva som er beste sugepunkt i spalterøret. Med beste sugepunkt menes det området hvor spalterøret kan dra med seg mest sedimenter. Vannet vil alltid gå minste motstands vei, den letteste veien. Dette er med på å påvirke arrangementet. figur 5.7 og figur 5.8 viser bilder av

sandfanget ved start og slutt av tømning. Arrangementet er plassert som ved situasjon 1 i figur 5.7 og som ved situasjon 2 i figur 5.8. Figurene viser at området rundt bendet av spalterøret ennå er dekket med sedimenter ved slutt av tømning. Spylingen er i alle situasjoner kjørt så lenge at vannet i utløpet fra sandfanget er så å si rent og inneholder ingen eller minimalt med sedimenter. Delen av sandfanget som ennå er fylt med sedimenter ved slutt av tømning er da dødvolum som ikke kan utnyttet. Dødvolum er det volumet i sandfanget man ikke får tømt for sedimenter og dermed ikke brukt aktivt til lagring og spyling av sedimenter. Denne situasjonen intraff ved alle forsøk.

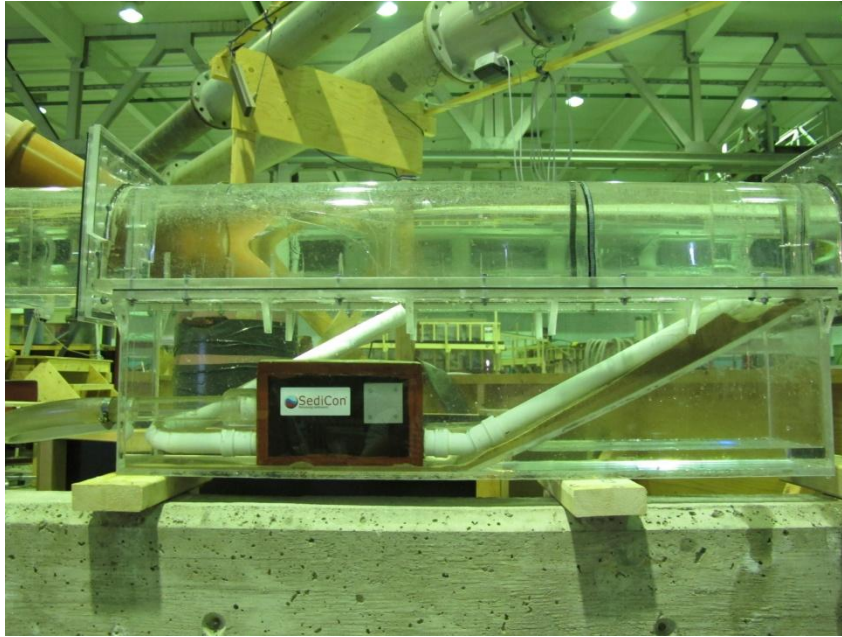


FIGUR 5.7 TØMMING AV SANDFANG



FIGUR 5.8 TØMMING AV SANDFANG

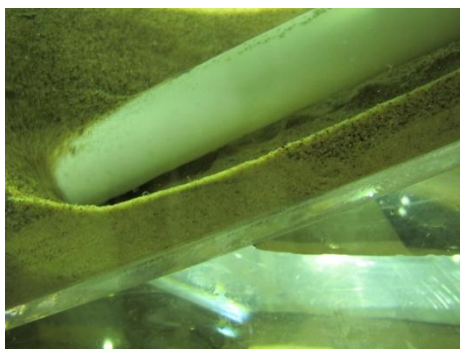
Sedicon enhet med to spalterør med ett utløp er vist i figur 5.9. Som for det enkle spalterøret, hadde også spalterørene sin plassering og sandfangets utforming innvirkning på konsentrasjonen av sedimenter i spylevannet ved bruk av Sedicon enheten.



FIGUR 5.9 TO SPALTERØR OG BOKS

Samme metode som for det enkle spalterøret ble benyttet for å se om den åpne toppen av spalterøret hadde en innvirkning på konsentrasjonen av sedimenter i spylevannet. Ved å forsegle begge spalterør ble det oppnådd høyere konsentrasjon av sedimenter i spylevannet. Sedicon enheten oppførte seg likt som det enkle spalterøret og hadde lavest konsentrasjon av sedimenter når spalterørene var plassert som i situasjon 1 som er beskrevet i figur 5.5.

Figur 5.10 viser sugepunktet på et spalterør. Bildet viser hvordan sedimentene faller ned og rundt spalterøret for så å bli revet med vannet inn gjennom spaltene. Under spalterøret er det små virvler av sedimenter, dette er sedimentene som blir revet med av vannet.

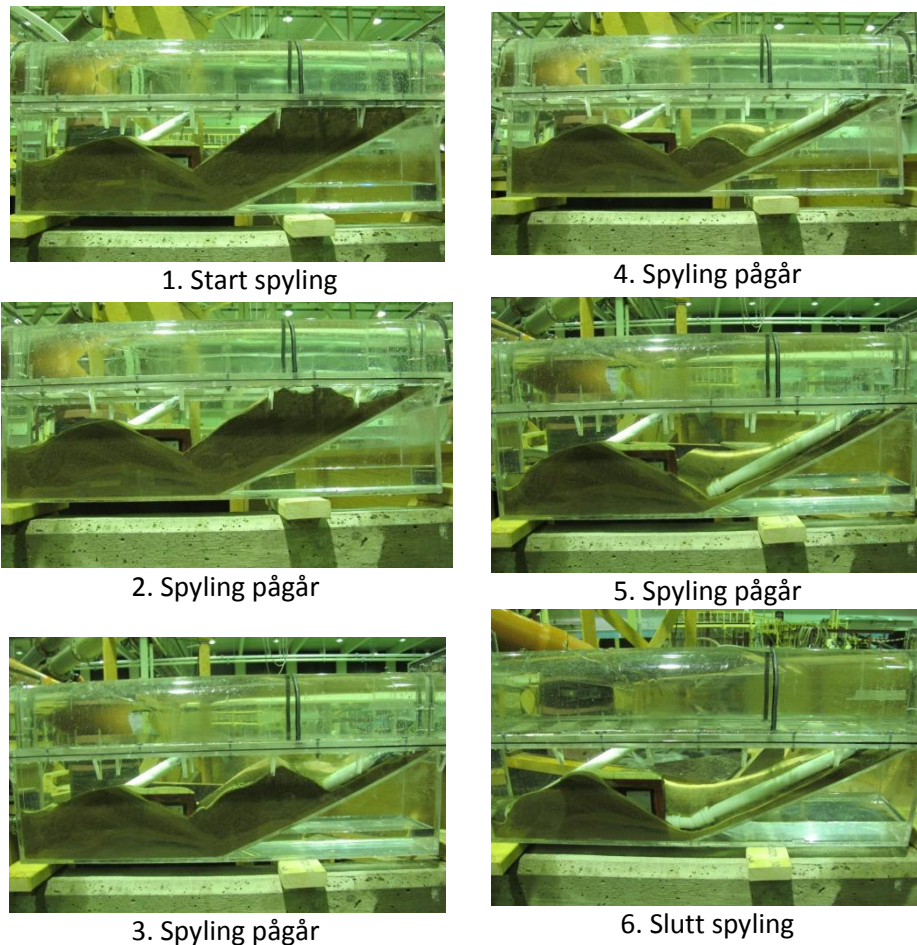


(a) Rett spalterør



(b) Bend i spalterør

FIGUR 5.10 SUGEPUNKT PÅ SPALTERØR



FIGUR 5.11 TIDSFORLØP SPYLING

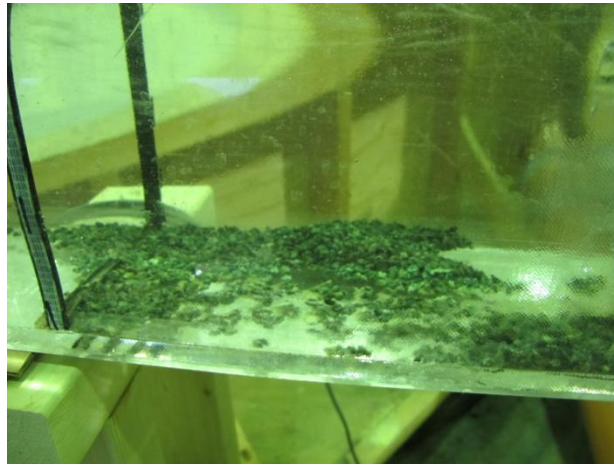
Figur 5.11 viser stegvis forløp ved spyling av sandfanget fra start til slutt. Bildene illustrerer hvordan sedimentene og sugepunktet beveger seg ned langs spalterøret etter hvert som sandfanget tømmes. På siste bilde i figur 5.11 ser man dødvolumet som er i sandfanget med en Sedicon enhet.

5.3 STABIL STEINSTØRRELSE

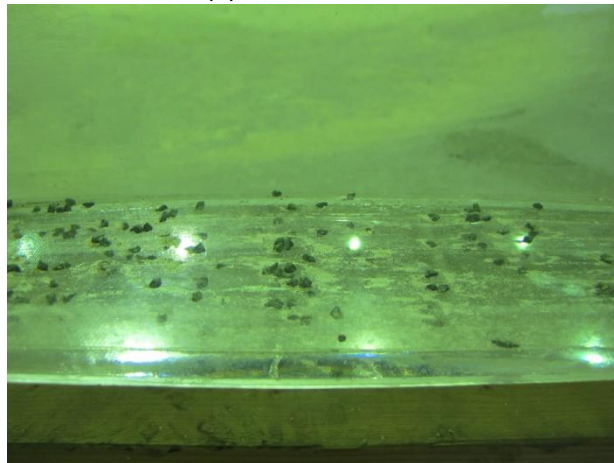
Stabil steinstørrelse er testet i modell med steiner fra 2 mm til 3,9 mm. Steinene er fra siktede masser. Steinene som er brukt ble liggende igjen på sikten med 2 mm kvadratiske åpninger, som var plassert under sikten med 4 mm kvadratiske åpninger. Vannføringen til tunnelen ble satt på først og tunnelen fylt opp med vann før steinene ble tilsatt, slik at steinene ikke ble tilført tunnelen ved frispeilstrømning. Vannhastigheten ved start var lav slik at steinene skulle legge seg langs bunn i tunnelen og være stabile. Gradvis ble hastigheten økt for å se når innledende bevegelse av steinene inntraff.

En innlåsing mellom steinene skjedde da de først ble tilført i tunnelen. Dette er et kjent fenomen som også oppstår ved frispeilstrømning dersom vannhastigheten er for lav og det tilføres en for stor mengde steiner for fort (Roalkvam, 2013). For å finne stabil steinstørrelse for enkeltstein og ikke av en samling av steiner, ble vannhastigheten økt slik at samlingen brøt opp og steinene ble transportert langs bunn av tunnelen. Vannhastigheten ble så redusert igjen slik at steinene ble liggende igjen som enkeltstein langs bunn av tunnelen. På denne måten ble det mulig å teste stabil steinstørrelse av

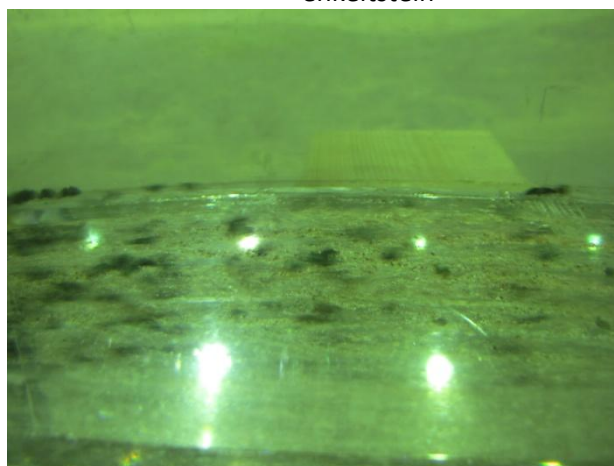
enkeltstein. Figur 5.12 viser hvordan steinene la seg i en haug først for så å bli løst opp og bli lagt som enkeltstein for så og bli testet som enkeltstein.



(a) Sedimenter tilføres



(b) Sedimenter er løst opp og ligger som enkeltstein



(c) Hastigheten øker og steinene transporteres

FIGUR 5.12 STABIL STEINSTØRRELSE I TUNNEL

6 RESULTATER

For å demonstrere tunnelens transport av sedimenter frem mot sandfanget og spylearrangementet sin effektivitet, presenterer dette kapittelet resultater fra det fysiske modellforsøket. Sedimenttransporten frem mot sandfanget er presentert med utviklingen av den vertikale konsentrasjonsfordelingen. Spyleeffekten til de testede spylearrangementene er målt i konsentrasjon av sedimenter i spylevann oppgitt som g/l.

Under forsøkene har det kommet frem spørsmål om andre interessante og målbare resultater. Dette er presentert som tilleggesinformasjon og har ikke vært hovedfokus ved de fysiske modellforsøkene.

6.1 VERTIKAL FORDELING OG BUNNLAST

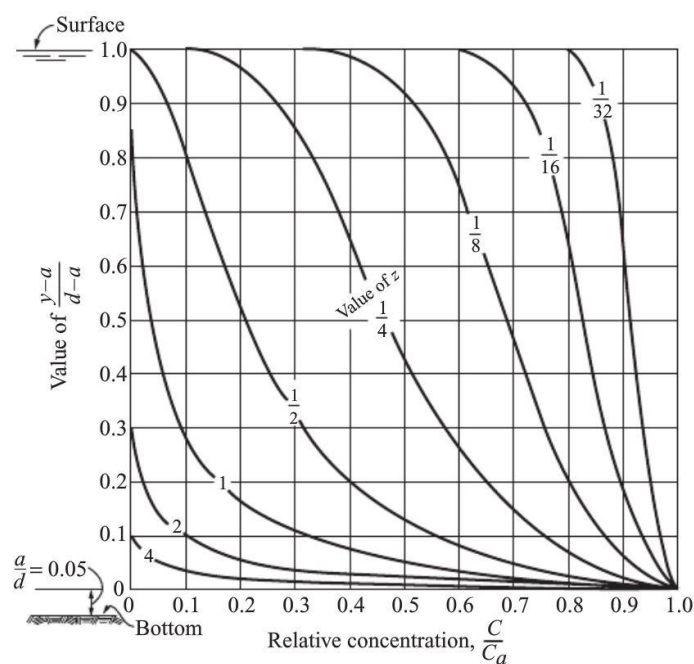
For å skape et bilde av den vertikale konsentrasjonsfordelingen av sedimenter ble den teoretiske fordelingen beregnet først.

6.1.1 BEREGNET

Tabell 6-1 viser parameteren brukt for å beregne den teoretiske konsentrasjonsfordelingen. Rouse nummeret, z , beregnet i siste kolonne i tabell 6-1 brukes til å lese av den teoretiske konsentrasjonsfordelingen i Rouse sitt diagram vist i figur 6.1.

Vannhastighet [m/s]	Partikkel størrelse, d_{50} [mm]	Rouse nummer, z
0,5	0,2	1,28
0,5	0,4	3,2
0,8	0,2	0,8
0,8	0,4	2

TABELL 6-1 TEORETISK KONSENTRASJONSFORDELING



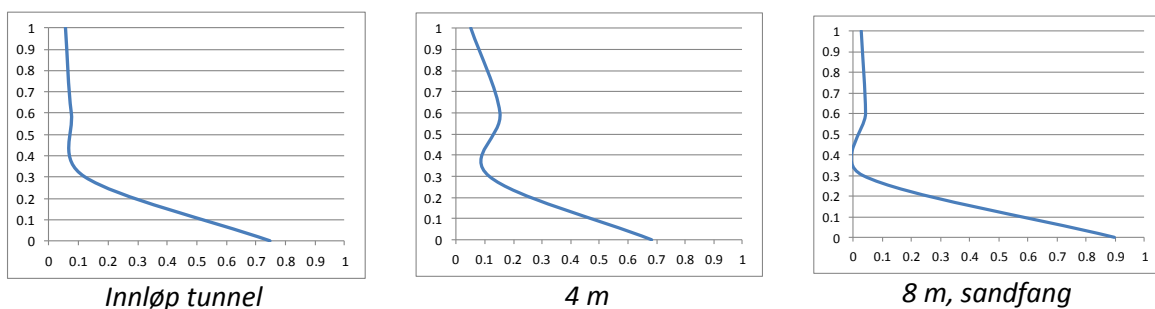
FIGUR 6.1 ROUSE TEORETISK KONSENTRASJONSFORDELING

6.1.2 MODELLFORSØK

Utviklingen av den vertikale konsentrasjonsfordeling av sedimenter i tunnelen er vist i figur 6.2, figur 6.3, figur 6.4 og figur 6.5. Hver figur er markert med innløp og sandfang. Innløp markerer innløpet av tunnelen rett etter sedimentene har blitt blandet gjennom diffusere og strømmen har blitt likerettet igjen. Sandfang markerer siste del av tunnelen før sedimentene kommer til sandfanget. Punktet mellom er markert med lengden fra første målepunkt og er punktet midt på tunnelen. Det er tatt prøver i totalt fem tverrsnitt langs tunnelen. Tre av tverrsnittene er valgt og presentert her, resterende tverrsnitt kan ses i vedlegg B.

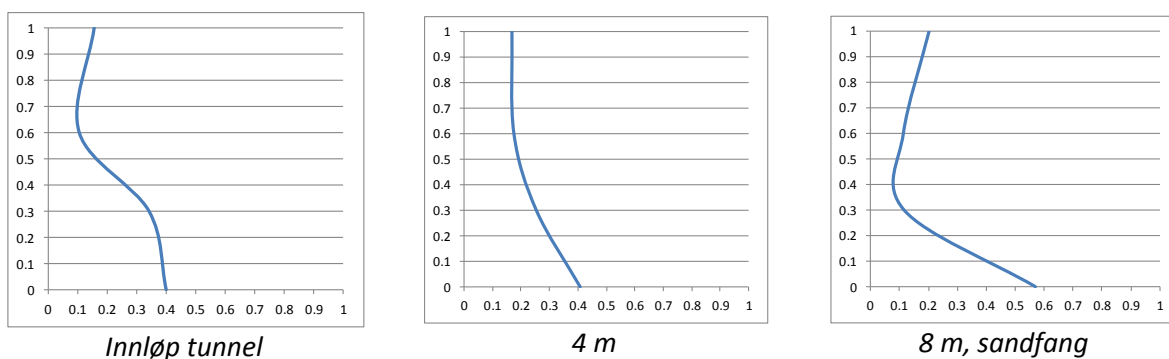
Y-aksen på diagrammene representerer høyden prøven er tatt i fra bunn av tunnelen, der bunn er 0 og øverste punkt er 1. X-aksen viser den relative konsentrasjonen av sedimenter. Vannhastigheten og sediment tilførselen er konstant og uavbrutt så lenge prøvetakingen har foregått i alle tverrsnitt for alle punkt.

Forsøket vist i figur 6.2 er gjennomført med kornfordeling 2 med en konstant vannhastighet på 0,5 m/s. Sedimentene beveget seg som dyner gjennom tunnelen.



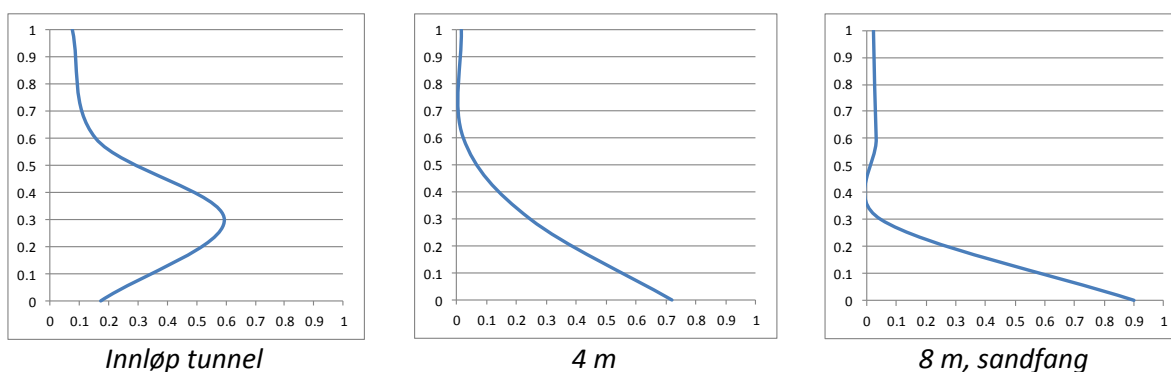
FIGUR 6.2 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING, FORSØK 1

Forsøket vist i figur 6.3 er gjennomført med kornfordeling 2 med en konstant vannhastighet på 0,8 m/s. Sedimentene beveget seg som dyner gjennom tunnelen.



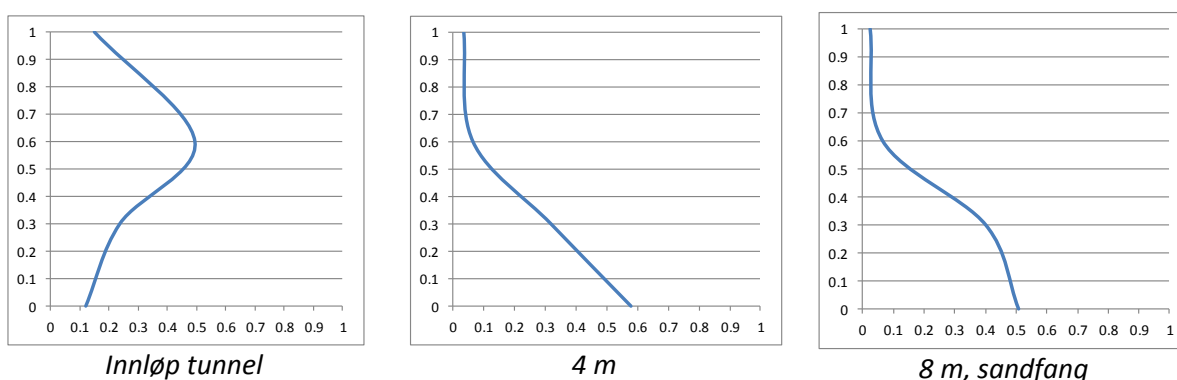
FIGUR 6.3 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING, FORSØK 3

Forsøket vist i figur 6.4 er gjennomført med kornfordeling 1 med en konstant hastighet på 0,5 m/s. Sedimentene beveget seg som små dyner langs bunn av tunnelen.



FIGUR 6.4 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING, FORSØK 5

Forsøket vist i figur 6.5 er gjennomført med kornfordeling 1 med en konstant hastighet på 0,8 m/s. Mye av sedimentene ble transportert som suspendert masse.



FIGUR 6.5 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING, FORSØK 6

6.2 SPYLING AV SANDFANG

Den første Sedicon enheten som ble testet hadde en funksjonsfeil. Rørene installert inni enheten hadde ved en feil blitt fylt med ekspanderende byggeskum. Dette førte til at spyleeffekten var tilnærmet null. Resultatene fra forsøkene er dermed ubrukelige og må ses bort fra.

Den tilgjengelige høyden mellom spalterøret og utløpet til spalterøret er 1,45 meter.

6.2.1 ENKELT SPALTERØR

Enkelt spalterør ble testet med kornfordeling 2 og en vannføring på 12,5 l/s. Sedimentene ble transportert som dyner gjennom tunnelen. Spalterørets åpne topp var plassert mot strømningsretningen i tunnelen, som er forklart som situasjon 1 i figur 5.5. tabell 6-2 viser resultatet.

Prøve Nr.	Q [l/s]	V [m/s]	Konsentrasjon [g/L]	C_v
1	1.82	2.28	20.15	0,02
2	1.66	2.08	2.01	0,002
3	-	-	6.06	0,006
5	1.85	2.31	52.20	0,052

TABELL 6-2 ENKELT SPALTERØR, SITUASJON 1

Spalterøret ble plassert med den åpne toppen i samme retning som strømningsretningen i tunnelen, forklart som situasjon 2. Kornfordeling 2 ble benyttet og en vannføring på 19,75 l/s. Sedimentene ble transportert som dyner gjennom tunnelen. Tabell 6-3 viser resultatet.

Prøve Nr.	Q [l/s]	V [m/s]	Konsentrasjon [g/L]	C _v
1	-	-	475.53	0,48
2	1.38	1.72	241.17	0,24
5	1.55	1.93	80.54	0,08

TABELL 6-3 ENKELT SPALTERØR, SITUASJON 2

Spalterørets åpne topp forseglet og plassert mot strømningsretningen i tunnelen, samme plassering forklart som situasjon 1. Kornfordeling 2 er brukt med en vannføring på 19,75 l/s. Sedimentene ble transportert som dyner gjennom tunnelen. Tabell 6-4 viser resultatet.

Prøve Nr.	Q [l/s]	V [m/s]	Konsentrasjon [g/L]	C _v
1	-	-	109.31	0,11
2	2.07	2.59	158.73	0,16
5	1.72	2.15	89.94	0,09

TABELL 6-4 ENKELT SPALTERØR, FORSEGLET TOPP

6.2.2 SEDICON ENHET

Tømming med lite sedimenter i sandfanget er testet med Sedicon enheten. Spalterørene sin åpne topp var plassert mot strømmretningen i tunnelen, forklart som situasjon 1. Kornfordeling 1 ble brukt med en vannføringen var på 12,5 l/s. Tabell 6-5 gir det målte resultatet.

Prøve Nr.	Q [l/s]	V [m/s]	Konsentrasjon [g/L]	C _v
1	1.29	1.61	12.17	0,01
2	1.53	1.91	7.27	0,007
5	1.41	1.76	27.44	0,03

TABELL 6-5 SEDICON ENHET, SITUASJON 1

Kornfordeling 1 med en vannføring på 20 l/s. Spalterørene sin åpne topp er rettet med strømningsretningen i tunnelen, forklart som situasjon 2. Tabell 6-6 viser det målte resultatet.

Prøve Nr.	Q [l/s]	V [m/s]	Konsentrasjon [g/L]	C _v
1	0.97	1.21	92.83	0,09
2	0.90	1.13	159.25	0,16
5	1.02	1.28	117.97	0,12

TABELL 6-6 SEDICON ENHET, SITUASJON 2

Forsøk presentert i tabell 6-7 til tabell 6-9 er utført alle med samme sedimenter og samme vannhastighet. Kornfordeling 2 er brukt der det er tilsatt noen store sedimenter fra 2-4 mm. Vannføring er på 12,5 l/s. Endringen fra forsøk til forsøk er retningen av spalterørene sin åpne topp. Tabell 6-7 viser det målte resultatet når spalterørene sin åpne topp er rettet med strømningsretningen i tunnelen, forklart som situasjon 2.

Prøve Nr.	Q [l/s]	V [m/s]	Konsentrasjon [g/L]	C _v
1	0.96	1.20	157.52	0,16
2	0.98	1.22	156.91	0,16
5	0.97	1.21	154.33	0,15

TABELL 6-7 SEDICON ENHET, SITUASJON 2

Spalterørene sin åpne topp er rettet mot strømningsretningen i tunnelen, forklart som situasjon 1.

Prøve Nr.	Q [l/s]	V [m/s]	Konsentrasjon [g/L]	C _v
1	1.20	1.50	109.01	0,1
2	1.18	1.48	66.81	0,07
5	1.28	1.60	99.23	0,10

TABELL 6-8 SEDICON ENHET, SITUASJON 1

Spalterørene sin åpne topp er rettet mot strømningsretningen i tunnelen, forklart som situasjon 1, med toppen av spalterørene forseglet.

Prøve Nr.	Q [l/s]	V [m/s]	Konsentrasjon [g/L]	C _v
1	0.97	1.21	347.09	0,35
2	1.12	1.40	250.67	0,25
5	1.20	1.50	132.98	0,13

TABELL 6-9 SEDICON ENHET, FORSEGLET TOPP SPALTERØR

6.3 ANDRE RESULTATER

Kapasitet

I fire av forsøkene ble mengden sedimenter sendt gjennom tunnelen og mengder samlet opp i sandfanget målt. Det er en stor usikkerhet knyttet til de målingene som er gjort på grunn av at modellen ikke har noe eksakt måleutstyr for dette. Dette er mer å regne som supplerende opplysninger.

Beregnet kapasitet

Den beregnede kapasiteten er funnet med Durand's formel. Kornfordeling 1 ble brukt i forsøkene. Tabell 6-10 viser de beregnede resultatene for de testede vannhastighetene.

Vannhastighet [m/s]	Beregnet kapasitet [ppm]
0,5	1032
0,8	4230

TABELL 6-10 DURAND KAPASITETS FORMEL

Modellforsøk

Tabell 6-11 viser alle de målte dataene fra forsøkene. Mengden sedimenter er veid opp før forsøket og tilført gjennom sedimenttilførselen. Tiden for hvor lang tid tunnelen bruker på å transportere alle sedimentene fra innløpet til sandfanget er målt. For å finne mengden av sedimenter i sandfanget er det gjort en volumberegning som er konvertert til en mengde oppgitt i kg.

Ved forsøk 2 og 3 ble sedimenttilførselen begrenset. Derfor er ikke dette å regne som maksimal kapasitet, som er beregnet i tabell 6-10. I forsøk 1 og 4 var ble ikke sediment tilførselen begrenset og dette kan regnes som maksimal kapasitet til tunnelen. Det ble dannet dyner ved forsøk 1.

Forsøk	Vannhastighet [m/s]	Mengde sedimenter [kg]	Tid [min]	Målt kapasitet [ppm]	Fanget av sandfang [kg]
1	0,5	10	37	950	8
2	0,8	14	13	2380	13
3	0,8	15	12	2800	12
4	0,8	10	5	4400	3

TABELL 6-11 MÅLT KAPASITET

Stabil steinstørrelse

Etter som arbeidet med forsøkene gikk fremover ble muligheten sett for å gjøre noen andre enkle målinger. Målingen ble gjort av ren nysgjerrighet.

Beregnet

For å skape et inntrykk av stabil steinstørrelse ble den først beregnet med Lysne's formel 3-30 for stabil steinstørrelse i tunnel. Stabil steinstørrelse er beregnet for modellen, faste parametere brukt i beregningen er gitt i tabell 6-12. Tabell 6-13 viser det beregnete resultatet.

Tverrsnittsareal [m ²]	0,025
C'	130

TABELL 6-12 FASTE PARAMETERE FOR STABIL STEINSTØRRELSE

Vannhastighet [m/s]	Stabil steinstørrelse [mm]
0.2	0.34
0.3	0.78
0.4	1.38
0.5	2.16
0.6	3.10
0.7	4.22

TABELL 6-13 BEREGNET STABIL STEINSTØRRELSE

Modellforsøk

Det ble gjort to forsøk med stabil steinstørrelse. Ved forsøk 1 dannet steinene en klynge. I forsøk 2 hadde steinene blitt spredt ut og lå som enkeltsteiner langs tunnelbunnen. Resultatene fra forsøket er presentert i tabell 6-14 og tabell 6-15.

Forsøk 1:

Vannhastighet [m/s]	Stabilt eller transport
0,3	Stabilt
0,33	Stabilt
0,41	Innledende transport
0,5	Transport

TABELL 6-14 STABIL STEINSTØRRELSE, FORSØK 1

Forsøk 2:

Vannhastighet [m/s]	Stabilt eller transport
0,2	Stabilt
0,37	Innledende transport
0,45	Transport
0,6	Transport

TABELL 6-15 STABIL STEINSTØRRELSE, FORSØK 2

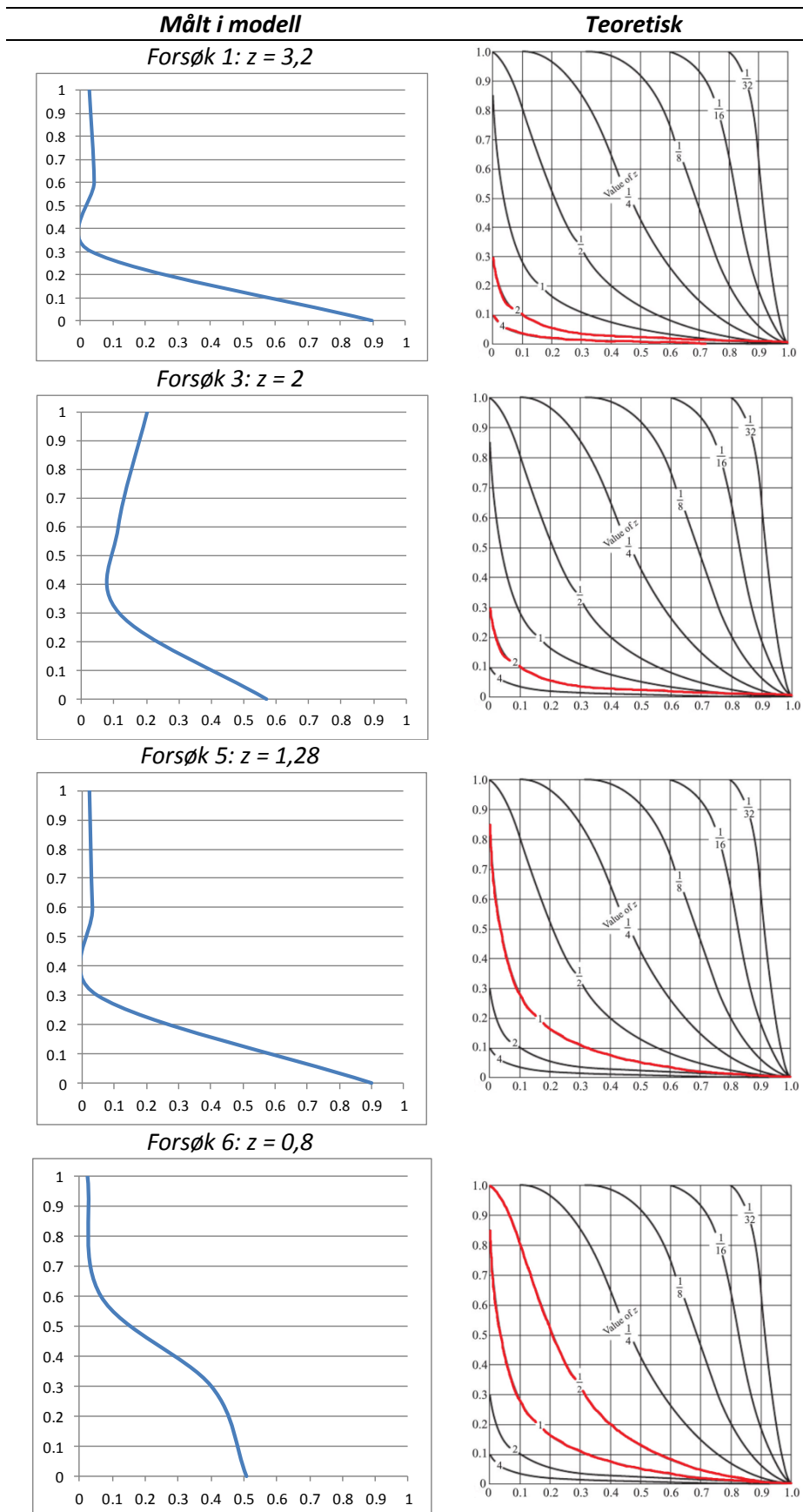
Steinene brukt i forsøket er ikke alle av samme eksakte størrelse. Derfor vil de også bli transportert ved forskjellige vannhastigheter. Tabell 6-14 og tabell 6-15 angir derfor transport av de første steinene som innledende transport og transport er når alle steinene er satt i bevegelse.

7 DISKUSJON

I resultatene er det vist samsvar mellom målte og beregnede verdier. Effektiviteten til spylearrangementet er situasjonsavhengig. Årsaken til dette tas opp til drøfting i dette kapitlet.

7.1 VERTIKAL FORDELING

I figur 7.1 er den beregnede teoretiske vertikale konsentrasjonsfordelingen sammenlignet med den målte fordelingen i modell. Konsentrasjonen målt lengst nedstrøms i tunnelen er sammenlignet. Denne konsentrasjonen er valgt når det er her den vertikale fordelingen er nærmest en likevekt som vil inntreffe etter en tid. Det betyr ikke at den har inntruffet, men det er i det lengst nedstrøms tverrsnittet det er nærmest likevekt i modell. I den teoretiske fordelingen er det antatt likevekt (Vanoni, 1977). Den beregnede z-verdien angir hvilke kurve i Rouse sitt diagram som er den teoretiske fordelingen. Kurvene som z-verdien ligger mellom eller som z-verdien er lik er markert med rødt i figur 7.1.



FIGUR 7.1 SAMMENLIGNING AV TEORETISK OG MÅLT VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING

Fra figur 7.1 er det vist at den teoretiske og målte verdien ikke samsvarer helt, men har noen samsvarende tendenser. Kraftig konsentrasjonsøkning mot bunn av tunnelen for alle de målte kurvene samsvarer med hva den teoretiske konsentrasjonen angir.

Fra figur 6.2 til figur 6.5 i resultater ser man at fordelingen utvikler seg langs hele tunnellengden. Dette betyr at det ikke kan bekreftes at likevektsituasjonen har inntruffet i siste tverrsnitt før sandfanget på bakgrunn av resultatene.

Ved forsøk 1 og 3 ble det observert at sedimentene beveget seg som store dyner gjennom tunnelen. Dette samsvarer bra med en høy konsentrasjon langs bunn som den teoretiske fordelingen angir. Ved forsøk 5 beveget sedimentene seg som små tette dyner langs bunnen med noe mer masse i suspensjon enn ved forsøk 1 og 3. Ved dannelse av dyner som beveger seg langs bunnen i tunnelen er likevekt inntruffet. Det er ikke sannsynlig at det ville vært noe videre utvikling om tunnelen hadde vært lengre. Dette er på grunn av at hastighetsprofilen er fullt utviklet og vil ikke endre seg i en tunnel med et kontinuerlig tverrsnitt. Ulikheten i de vertikale konsentrasjonsprøvene når sedimentene beveger seg som dyner skyldes mest sannsynlig at prøvene er tatt i forskjellige punkt i forhold til dynefronten.

Grunnen til at de målte verdiene ikke samsvarer for hele grafen kan være på grunn av analysen gjort med LISSTen. LISSTen måler partikler fra 2,5 – 500 μm (0,0025 – 0,5 mm), de minste målbare størrelsene er så små at de ville vært vanskelige å se i vannet. Det er mulig at en liten konsentrasjon vil kunne gjøre utslag på grafen. Sanden som er brukt i forsøkene skal være vasket og ren, men gjennom analyse av sanden har det vist seg at den ikke er helt ren, noe som gjør det mulig at den har inneholdt mindre mengder fine partikler. LISSTen kan også ha gjort en feilmåling.

En annen kilde til avviket kan være selve prøvetakingen. En for høy hastighet i prøverøret vil gjøre at det blir sugd inn vann med sedimenter fra et større område som vil kunne føre til en høyere konsentrasjon av sedimenter i prøven. Ved en for lav hastighet vil det dannes en blokkade foran røret som vil kunne føre til mindre sedimenter i prøven.

Forsøk 6 hadde den største andelen av suspendert transport og er grafen som skiller seg mest ut fra de andre grafene. Denne har en bestemt utvikling og det er mer sannsynlig at denne ville hatt en videre utvikling med en lengre tunnel, der mer av massene hadde nærmet seg tunnelens bunn.

Rouse er utviklet på grunnlag av todimensjonal frispelstrømning. Dette er en klar kilde til avvik mellom teoretisk og målt konsentrasjonsfordeling. Rouse angir en høy konsentrasjon langs bunn av tunnelen for alle tilfeller. Dette samsvarer med det som er visuelt observert og at sedimentene beveger seg som dyner gjennom tunnelen. Sedimenter som beveger seg langs bunn av tunnelen som bunnlast vil bli fanget opp av sandfanget. Andelen sedimenter tilført tunnelen fanget av sandfanget er høy og bekrefter dette. Dette støtter opp under Rouse som angir en høy konsentrasjon langs bunn av tunnelen.

Ved forsøk 5 ble sedimentene transportert som dyner gjennom tunnelen. Sedimenttilførselen var ikke begrenset slik at store mengder sedimenter ble tilført tunnelen fort. Kapasiteten til tunnelen blir dermed oversteget og sedimentene blir liggende langs bunn av tunnelen. I forsøket ble det observert at mesteparten av sedimentene ble transportert som bunnlast gjennom hele tunnelen. Om sedimenttilførselen hadde blitt begrenset ville sedimentene beveget seg som suspendert masse

gjennom tunnelen. Dette betyr at sedimentene ikke gikk tilbake til suspendert transport etter at de først hadde blitt lagt langs bunn. Det indikerer at bunntransport kan fremprovoseres i tunneler om sedimenttilførselen kan kontrolleres.

7.2 TØMMING AV SANDFANG

Resultatet fra de to testede spylearrangementene viser relativt lik oppførsel for spylearrangementene. Spyleeffekten, målt i g/l, er avhengig av arrangementets plassering. Den mest avgjørende faktoren viste seg å være plasseringen av spylearrangementet i forhold til retningen av strømmen i tunnelen.

Et enkelt spalterør hadde høyest spyleeffekt når den åpne toppen er rettet med strømningsretningen i tunnelen. Dette er beskrevet som situasjon 2 i kapittel 4.1. Desidert lavest er spyleeffekten når den åpne toppen er rettet mot strømningsretningen i tunnelen. Tabell 7-1 viser den gjennomsnittlige spyleeffekten for hver av de tre situasjonene som er prøvd ut. Klart at best spyleeffekt oppnås ved å rette toppen av spalterøret med strømningsretningen i tunnelen.

<i>Retning av topp spalterør</i>	<i>Spyleeffekt [g/l]</i>
Mot strømningsretningen	20
Mot strømningsretningen m/forseglet topp	120
Med strømningsretningen	266

TABELL 7-1 GJENNOMSNIITTLIG SPYLEEFFEKT ENKELT SPALTERØR

Ved et forsøk er det oppnådd en spylekapasitet på 475 g/l med et enkelt spalterør. Dette er en svært høy volumkonsentrasjon, $C_v = 0,48$ tilsvarende 1 300 000 ppm, tilnærmet lik volumandel av vann og sedimenter. Med en så høy volumkonsentrasjon er det sannsynlig at spalterøret har oppnådd maksimal kapasitet. Ved maksimal kapasitet er det utløpsrørets kapasitet som er den begrensede faktoren for hvor høy konsentrasjon som er mulig og oppnå.

Resultatene viser at spalterøret har best effekt ved starten av spylingen og at den så avtar etter hvert. Grunnen til dette kan være at spalterøret er dekket helt med sedimenter ved starten av spylingen. Etter hvert som sedimenter spyles og sandfanget tømmes blir spalterøret avdekket. Flere spalter blir avdekket for sedimenter og kan suge vann uten sedimenter.

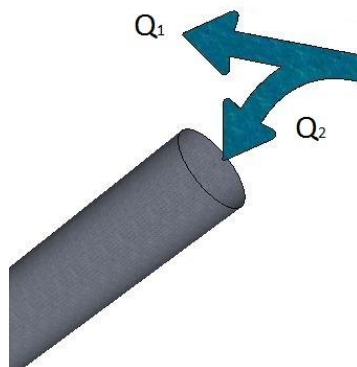
Sedicon enheten oppnådde best spyleeffekt når toppen av begge spalterørene var forseglet. Dårligst effekt ble oppnådd når toppen av spalterørene var rettet mot strømmretningen i tunnelen. Et forsøk med lite sedimenter i sandfanget er utført. Kun et av spalterørene var dekket med sand og det andre spalterøret var fritt. Dette resulterte i den dårligste effekten oppnådd gjennom forsøkene. Tabell 7-2 viser den gjennomsnittlige spyleeffekten for de forskjellige situasjonene.

<i>Retning av topp spalterør</i>	<i>Spyleeffekt [g/l]</i>
Mot strømningsretningen, lite sedimenter i sandfanget	16
Mot strømningsretningen	92
Med strømningsretningen	140
Mot strømningsretningen m/forseglet topp	244

TABELL 7-2 GJENNOMSNIITTLIG SPYLEEFFEKT MED SEDICON ENHET

Fra tabell 7-1 og tabell 7-2 er det klart at arrangementene oppfører seg relativt likt. Spyleeffekten er absolutt lavest når den åpne toppen av spalterøret er rettet mot strømningsretningen i tunnelen. Grunnen til dette kan være at noe av vannet blir ledet ned den åpne enden av spalterøret om det

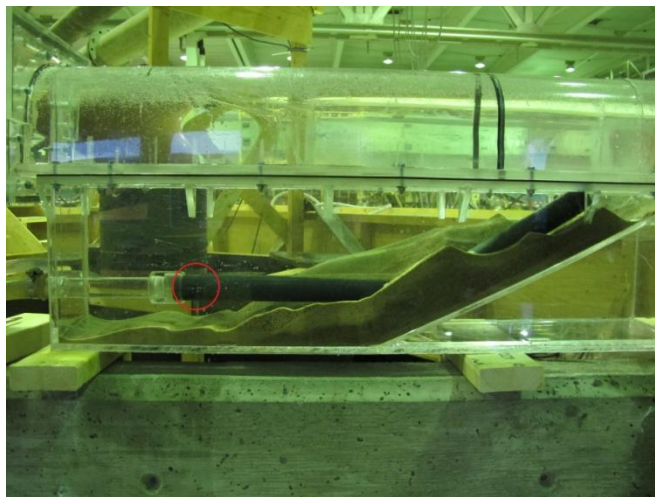
står rettet mot strømningsretningen i tunnelen, dette er illustrert i figur 7.1. Q_1 på figuren viser retningen av strømmen i tunnelen. Q_2 er vannet som strømmer inn gjennom toppen av spalterøret, Q_2 vil være vesentlig mindre enn Q_1 , $Q_2 \ll Q_1$.



FIGUR 7.2 VANN GJENNOM TOPP AV SPALTERØR

Er det tilfelle at noe vann blir ledet ned gjennom den åpne toppen av spalterøret, som vist i figur 7.2, vil dette føre til at vann går denne veien istedenfor å gå gjennom spaltene på undersiden og dra med seg sedimenter. Følgelig vil spyleeffekten bli redusert.

Vannet vil alltid gå minste motstands vei. Dette er trolig grunnen til at spyleeffekten er så lav med lite sedimenter i sandfanget. Vannet vil ta den korteste veien gjennom spylearrangementet og ut. Er ikke dette området dekket av sedimenter blir spyleeffekten lav, dette er vist i figur 7.3. Minste motstands vei er gjennom spaltene i overgangen mellom spalterøret (sort) og utløpet (klart), området markert med rød sirkel i figur 7.3. Dette fører til at deler av spalterøret ennå kan være tildekket av sedimenter lenger oppe og ikke bli spylt ut. Resultatet blir et dødvolum i sandfanget som ikke kan bli utnyttet.



FIGUR 7.3 DØD VOLUM

Punktet på spalterøret som gir vannet minste motstands vei er beste sugepunkt. Så lenge dette området av spalterøret er dekket med sedimenter vil sedimenter tømmes fra sandfanget, for det vil alltid strømme vann her. Dette er bekreftet gjennom observasjoner ved gjennomføring av forsøkene.

Farten gjennom spalterøret og utløpet er beregnet. Tiden, vannmengden og tverrsnittsarealet er kjent under hvert forsøk. Trenden viser at hastigheten gjennom spalte- og utløpsrøret synker med

økt konsentrasjon av sedimenter. En økt konsentrasjon av sedimenter i spylevannet vil gi en større motstand gjennom rørene som resulterer i et større falltap. Ved et stort falltap vil vannhastigheten synke, dette stemmer med teorien for vannhastighet og falltap gjennom rør.

Driftssikkerheten er svært viktig for dette arrangementet. Adkomsten for ettersyn, vedlikehold eller reparasjoner er vanskelig og kostbar. Høy spyleeffekt er oppnådd ved forsegling av spalterørets åpne ende. Forseglingen øker faren for tilstopping av arrangementet med sedimenter. Per dags dato er ikke dette installert i noen anlegg.

Optimalisering

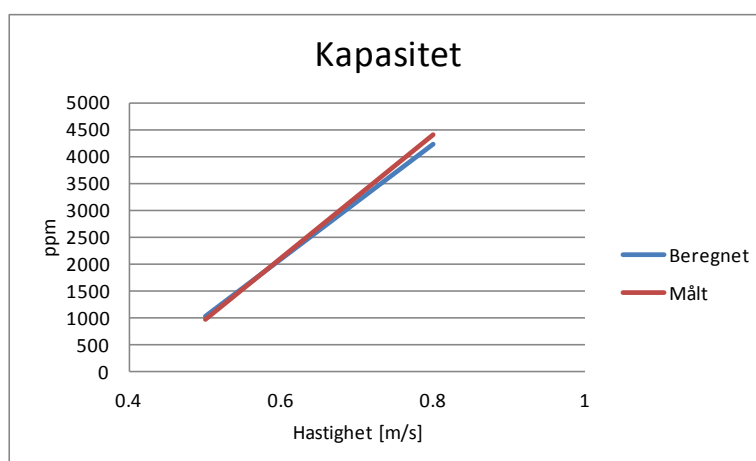
For optimal spyleeffekt med spylearrangement bør sandfangets geometriske utforming utnyttes. Skrå sidevegger ned mot spalterøret muliggjør tømning av tilnærmet hele sandfangets volum. Dette vil redusere død volumet i sandfanget som reduserer behovet for et stort sandfang. Ved et bredt sandfang kan flere spalterør installeres i bredden for å få tømt en større volumandel av sandfanget. Som blant annet gjort på Khimti HPP.

Plassering av spylearrangementet er en avgjørende faktor. Spalterørets beste sugepunkt bør tilstrebes og plasseres der den største andelen av sedimenter legger seg. Spalterørets åpne ende bør være rettet med strømningsretningen i tunnelen for en høy spyleeffekt.

7.3 ANNET

Kapasitet

Den beregnede og målte maksimale kapasiteten samsvarer bra. Durand's formel er brukt for å beregne kapasiteten, formelen er utviklet for fylte rør. Resultatene fra forsøkene antyder at denne formelen kan benyttes for å regne kapasiteten til en tunnel som går vannfylt. Figur 7.4 viser samsvaret mellom resultatene.



FIGUR 7.4 BEREGNET OG MÅLT KAPASITET

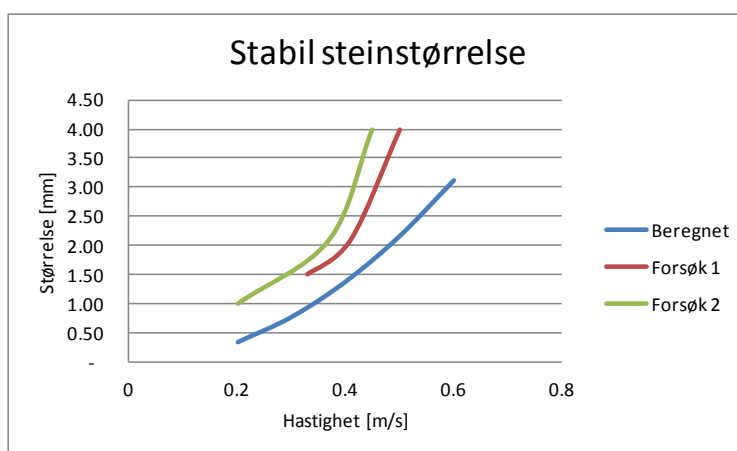
I forsøkene er det brukt ensgradert masse med fine partikler. Under modellforsøkene ble det dannet dyner langs bunn av tunnelen som bekrefter at tunnelens kapasitet er utnyttet maksimalt. Ved en hastighetsøkning og bruk av samme masse ble sedimentene transportert som suspendert last.

Forsøkene er med på å bygge under at bunnlast kan fremprovoseres. Dette vil forekomme når sedimenttilførselen er høyere enn tunnelens kapasitet. I modell beveget da sedimentene seg langs bunn av tunnelen, og store andeler ble fanget av sandfanget.

Resterende forsøk der mengden sedimenter gjennom tunnelen ble målt var tilføringen av sedimenter begrenset. Ventilen som kontrollerer tilføringen av sedimenter ble bare halvveis åpnet og derfor ble ikke maksimal kapasitet oppnådd gjennom tunnelen. Sandfanget fanget fremdeles opp en stor andel av sedimentene som ble tilført tunnelen.

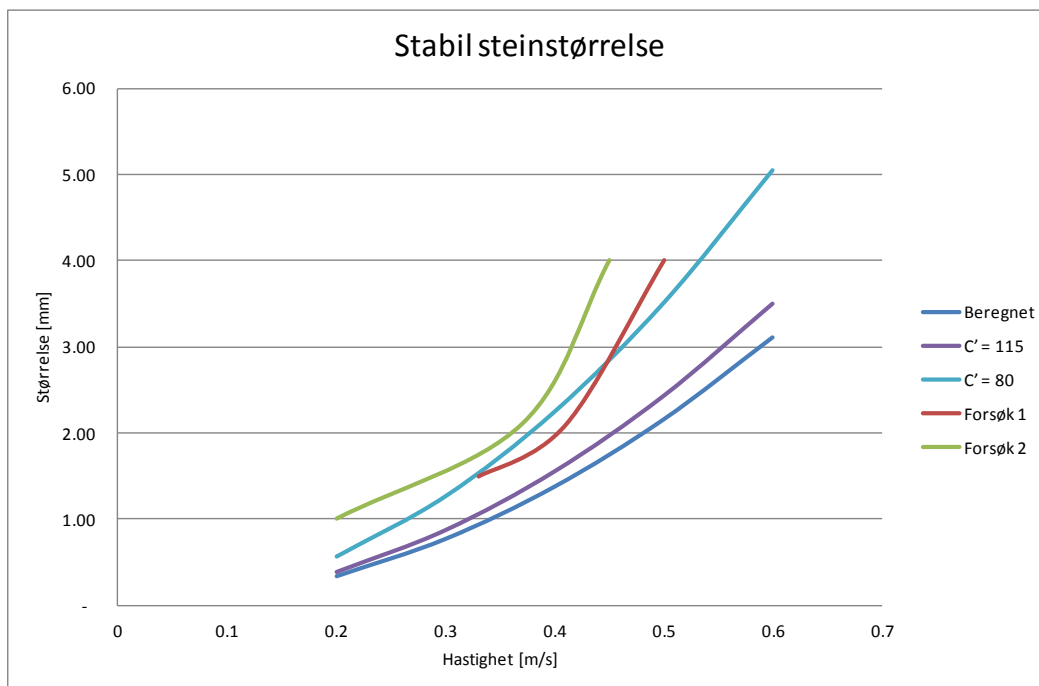
Stabil steinstørrelse

Beregnet stabil steinstørrelse og testet stabil steinstørrelse i modell samsvarer noe. Figur 7.5 sammenligner beregnet stabil steinstørrelse med stabil steinstørrelse i modell. Lysne's formel er mer konservativ enn hva som ble funnet i modellforsøket.



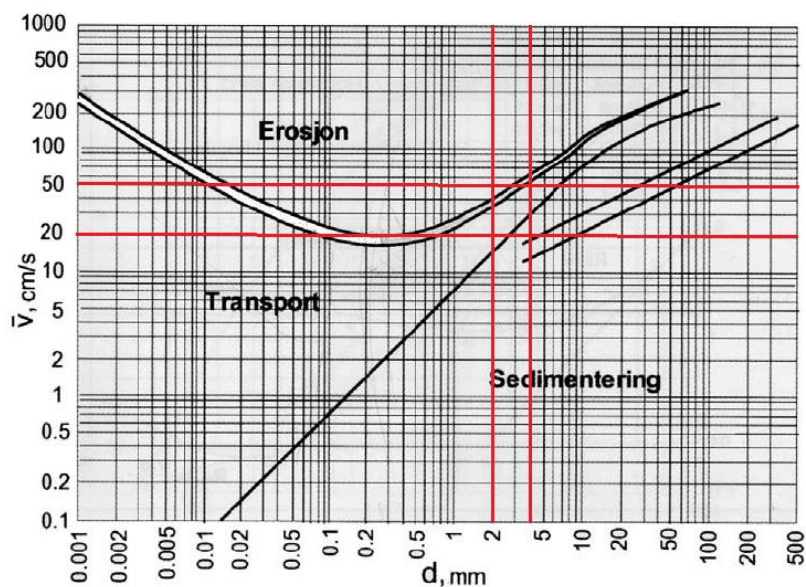
FIGUR 7.5 STABIL STEINSTØRRELSE

Lysne's formel inneholder en konstant C' som varierer fra 115 – 140 (Lysne, 1986). En endring av konstanten C' fører til bedre samsvar mellom beregnet stabil steinstørrelse og testet stabil steinstørrelse. I figur 7.6 er stabil steinstørrelse beregnet med en endret C' -konstant på 115 og 80. En konstant på 80 gir best samsvar med resultatet fra forsøket, men ligger utenfor rekkevidden gitt av Lysne.

FIGUR 7.6 KORRIGERT KONSTANT C'

Lysne's formel er utviklet fra empiriske formler som gjelder for friskeilstrømning. Forsøket antyder at empiriske formler utviklet for friskeilstrømning kan videreutvikles og benyttes for sedimenttransport i fylte tverrsnitt.

Sammenlignet med Hjulstøms diagram samsvarer det godt. Med en partikkelstørrelse fra 2 - 4 mm og en hastighet fra 0,2 – 0,5 m/s befinner man seg i området for transport i Hjulstrøms diagram. Figur 7.7 viser dette området i Hjulstrøms diagram. Resultatet indikerer at Hjulstrøms diagram kan brukes for å anslå om det vil forekomme erosjon, transport eller sedimentering i et lukket tverrsnitt.



FIGUR 7.7 HJULSTRØMS DIAGRAM

Ruheten i modell er skapt av gummilister som er limt inn for å skape en helning på energilinjen, som forklart i kapittel 3.3.7. Stabiliteten av steinene er testet mot et glatt underlag når de blir liggende mellom gummi listene. Med en jevn ruhet gjennom tunnelen er det trolig at resultatet ville ha blitt påvirket.

8 KONKLUSJON

Denne rapporten har vurdert spyleeffekten til spalterør og sedimenttransport i en horisontal tunnel på bakgrunn av litteratur, beregninger og et fysisk modellforsøk. Stabil steinstørrelse og kapasitet av en tunnel er vurdert og testet.

De to testede spylearrangementene oppnår en høy spyleeffekt under noen gitte forutsetninger. Om de gitte forutsetningene er oppfylt gir spylearrangementene grunnlag for en effektiv tømning av sandfanget under drift. Den største begrensende faktoren er plassering av spalterørets åpne topp i forhold til strømningsretningen i tunnelen. Gjennom forsøk ble det påvist en betydelig forskjell i spyleeffekt, for begge arrangementene, ved endring av plasseringen til spalterørets åpne topp.

For et enkelt spalterør med rørets åpne topp plassert i samme retning som strømningsretningen i tunnelen ble det oppnådd en gjennomsnittlig spyleeffekt på 260 g/l. I motsetning til en gjennomsnittlig spyleeffekt på 20 g/l med spalterørets topp rettet mot strømningsretningen, er dette en betydelig forskjell. For Sedicon enheten med to tilkoblede spalterør ble det oppnådd en gjennomsnittlig spyleeffekt på 140 g/l med spalterørets åpne topp rettet med strømningsretningen. Med spalterørene sin åpne topp rettet mot strømningsretningen var den gjennomsnittlige spyleeffekten 90 g/l.

Spalterørene er testet med en forsegling av den åpne toppen. Resultatet viste en vesentlig økning av spyleeffekten ved plassering av spalterørets åpne toppen mot strømningsretningen. Det enkle spalterøret oppnådde en gjennomsnittlig spyleeffekt på 120 g/l og Sedicon enheten oppnådde en gjennomsnittlig effekt på 240 g/l.

I et enkelt forsøk ble en spyleeffekt på 475 g/l oppnådd for det enkle spalterøret og 350 g/l for Sedicon enheten. Dette tilsvarer en volumkonsentrasjon på tilsvarende C_v lik 0,48 og C_v lik 0,35. Ved en så høy volumkonsentrasjon der C_v er lik 0,48 er det rimelig å anta at spalterøret spyle med maksimal kapasitet. Det er utløpsrørets kapasitet som er den begrensende faktoren i et slikt tilfelle.

Sandfangets utforming viste seg å ha størst betydning for størrelsen av dødvolumet som ikke kan benyttes aktivt under drift.

Det er dermed vist gjennom et fysisk modellforsøk at et spalterør og en Sedicon enhet effektivt kan benyttes for å tømme et sandfang under drift ved korrekt plassering av spalterørene.

Sedimenttransporten gjennom tunnelen er vurdert ved beregninger og forsøk. Det er vist samsvar mellom Rouse's teoretiske vertikale konsentrasjonsfordeling og konsentrasjonsfordelingen i modell. Rouse kan ikke brukes til å bestemme nøyaktig konsentrasjon for alle dybder i et tverrsnitt, men er godt egnet som en metode for å anslå den vertikale konsentrasjonsfordelingen.

Tunnelens kapasitet beregnet ved Durand's formel og målt kapasitet er funnet til å samsvare godt. Det er derfor rimelig å anta at Durand's formel kan brukes til å anslå kapasiteten til en tunnel. Ved å overstige tunnelens kapasitet ble det vist at sedimenter la seg langs bunnen av tunnelen og beveget seg som bunnlast gjennom tunnelen. Dette antyder at bunntransport kan fremprovoseres i en tunnel med overskridelse av tunnelens kapasitet.

Lysne's formel for stabil steinstørrelse i tunnel er utledet fra formelverk for sedimenttransport ved friskeilstrømning. Det endelige uttrykket er multiplisert med en faktor funnet gjennom et modellforsøk. Gjennom et forsøk ble det funnet samsvar mellom beregnet og testet stabil steinstørrelse. Dette antyder at en lik framgangsmåte også kan brukes for andre empiriske formler for sedimenttransport som er gjeldende for friskeilstrømning.

Anbefaling til videre studier

Det anbefales å innføre videre studier av følgende emner:

- Delvis struping av spalterørets åpne topp
- Flere kornfraksjoner og ulike sandtyper
- Jevn ruhet gjennom tunnelen

Videre forsøk men en delvis struping av toppen til spalterøret for å studere om det er sammenheng mellom åpen, delvis lukket og helt lukket topp. En optimalisering av systemet i forhold til plassering i sandfanget vil da være mulig å gjennomføre. Nærmere studie av faren for tilstopping ved helt lukket topp av spalterøret er anbefalt.

Muligheten for å kunne strupe et av spalterørene koblet til Sedicon enheten bør studeres. Dette kan gjøre spyling av et sandfang som ikke er helt fullt mer effektivt, når kun et spalterør er dekket med sedimenter.

Å teste spalterøret med flere kornfraksjoner og ulike sandtyper anbefales. Det kan være en mulighet at spalterøret vil oppføre seg annerledes med en mer pakket sand eller en annen sammensetning av fraksjoner. En observasjon av ulik spyleeffekt med en annen sandtype eller fraksjon vil være interessante.

For å videre studere sedimenttransport i tunnel vil jevnt skalert ruhet være fordelaktig. Om den punktvis skaleringen av ruhet gir et utsalg kan da bestemmes. En mer realistisk representasjon av vikeligheten vil også være til stede.

BIBLIOGRAFI

American Society of Civil Engineers, 1983. *Hydraulic Modeling – Concepts and practice*, Reston: American Society of Civil Engineers.

Birkeland, R., 2008. *Modellstudie av flomløpet på dam Sysenvatn*, Trondheim: Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet.

Crowe, Elger & Roberson, 2005. *Engineering Fluid Mechanics 8th ed.*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc..

Eggen, A., 1973. *Sandtransport og sandfang i kraftverkstunneler*, Trondheim: Vassdrags- og havnelaboratoriet ved Norges tekniske høgskole - tilsluttet SINTEF.

Falltapskomiteèn, 1985. *Falltap i kraftverkstunneler*, s.l.: Vassdragsregulantenenes forening - Teknisk sektor.

Guttormsen, O., 2006. *Vassdragsteknikk I og II. Kompendium i Vannkraftverk og vassdragsteknikk*. Trondheim: Tapir Akademiske Forlag.

Heller, V., 2011. *Scale effects in physical hydraulic engineering models*, London: Journal of hydraulic research .

Jacobsen, T., 1997. *Sediement problems in reservoirs - control of sediment deposits*, Trondheim: Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet.

Jacobsen, T., 2011. *Khimti - successful sediment handling in the Himalayas*, Trondheim: Sedicon.

Julien, P. Y., 2010. *Erosion and sedimentation 2nd Edition*. Colorado: Cambridge University Press.

Lokna, A., 2005. *Breinntak - Folgefonna og Svartisen*, Trondheim: NTNU.

Lysne, D. K., 1969. *Movement of sand in tunnels*, s.l.: Journal of the hydraulics division proceedings of the american society of civil engineers.

Lysne, D. K., 1986. *Sand in tunnels*, Trondheim: Norges Tekniske Høgskole.

Lysne, D. K., Glover, B., Støle, H. & Tesaker, E., 2003. *Hydraulic Design*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, Department of Hydraulic and Environmental Engineering.

McCully, P., 1996. <http://www.internationalrivers.org/>. [Internett]
Available at: <http://www.internationalrivers.org/sedimentation-problems-with-dams>
[Funnet 7 Juni 2013].

Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A. & Reeve, D. E., 2010. *Hydraulic Modelling - an Introduction*. Abingdon: Spon Press.

NVE, 2009. *Norges vassdrags- og energidirektorat*. [Internett]
Available at: <http://www.nve.no/no/Vann-og-vassdrag/Hydrologi/Bre/Bremalinger/Massebalansemalinger/Engabreen/>
[Funnet 03 11 2013].

NVE, 2010. *Vassdragshåndboka*. Trondheim: Tapir Akademiske Forlag.

Reclamation, U. B. o., 1980. *Hydraulic Laboratory Techniques*. Denver: United states government printing office.

Roalkvam, B. H., 2013. *Erosjon og sedimenttransport ved frispeilstrømning*, Trondheim: Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet.

Schwimmer, R., 2012. *Cutting Edge*. [Internett]
Available at: <http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/sedimentary/activities/14100.html>
[Funnet 8 Juni 2013].

Sedicon, 2013. *Sedicon*. [Internett]
Available at: www.sedicon.no
[Funnet 10 2013].

Siemens, 2005. *Handbook - Sitrans F M Magflo*, s.l.: Siemens.

Statkraft, 2009. *Statkraft*. [Internett]
Available at: http://www.statkraft.no/Images/Svartisen_tcm10-7310.pdf
[Funnet 17 12 2013].

Tesaker, E. & Jenssen, L., 2009. *Veilder for dimensjonering av erosjonssikring av stein*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).

Vanoni, V. A., 1977. *Sedimentation Engineering*. no. 54 red. Nwe York: American society of civil engineering.

Ødegaard, H., 2013. *Vann- og avløpsteknikk*. 2. opplag 2013 red. Trondheim: Norsk Vann.

FIGURER

Figur 1.1 Typisk norsk Tilløpstunnel med sandfang (Guttormsen, 2006)	1
Figur 2.1 Splaterør i Khimti HPP (Sedicon, 2013)	3
Figur 2.2 Cuyamel HPP sanfang (Sedicon, 2013)	4
Figur 2.3 Kraftsystem Folgefonna (Lokna, 2005).....	5
Figur 2.4 utforming av tunnelsystem før og etter spyling (Lokna, 2005).....	6
Figur 2.5 SEDIMENTKAMMER BONDHUSBREEN (GUTTORMSEN, 2006)	7
Figur 2.6 Svartisen kraftverk, utklipp fra kart (Statkraft, 2009)	7
Figur 2.7 Inntak og sedimentkammer under Engabreen (Lokna, 2005).....	8
Figur 3.1 Kontinuitetsprinsippet.....	9
Figur 3.2 Korrelasjon mellom målte mannings tall M og midlere areal A, 1950-1970 (Falltapskomiteèn, 1985).....	10
Figur 3.3 Sammenligning av Mannings og Darcy-Weisbach's formler (Falltapskomiteèn, 1985)	12
Figur 3.4 Energi- og trykklinje (Crowe, et al., 2005)	13
Figur 3.5 Energiformer i ulike tverrsnitt (Ødegaard, 2013)	13
Figur 3.6 Erosjon, transport og sedimentering (Julien, 2010)	15
Figur 3.7 Krefter som virker på en partikkel på bunn (Tesaker & Jenssen, 2009).....	16
Figur 3.8 Shields diagram (Schwimmer, 2012)	19
Figur 3.9 Hjulstrøms diagram (NVE, 2010)	21
Figur 3.10 Strømningsstasjoner (Vanoni, 1977)	22
Figur 3.11 Hunter Rouse fordeling av suspendert konsentrasjon (Vanoni, 1977)	24
Figur 3.12 Sandfang (Guttormsen, 2006)	25
Figur 3.13 Moody's diagram (Crowe, et al., 2005)	30
Figur 3.14 Prinsippskisse spalterør (Jacobsen, 1997).....	31
Figur 3.15 Strømning gjennom uendelig lang spalteåpning (Jacobsen, 1997).....	32
Figur 4.1 Fysisk modell	33
Figur 4.2 Bygging av tunnel	34
Figur 4.3 Første tunnelseksjon	34
Figur 4.4 Sandfang	35
Figur 4.5 Tunneltverrsnitt (Guttormsen, 2006).....	35
Figur 4.6 Vannføringsmåler, type MAG 5000 (Siemens, 2005)	36
Figur 4.7 Vannføring mot hastighet og skjærkraft	36
Figur 4.8 Kornfordeling 1.....	37
Figur 4.9 Kornfordeling 2.....	37
Figur 4.10 Prøverør.....	38
Figur 4.11 Spalterør og Sedicon enehet tilpasset sandfanget.....	39
Figur 4.12 differanse trykk transmitter	40
Figur 5.1 sedimenter beveger seg som dyner gjennom tunnel	45
Figur 5.2 Dynefront	46
Figur 5.3 Dyner med fin ensgraderet masser	46
Figur 5.4 Enkelt spalterør med bend	47
Figur 5.5 Strømningsretning topp av spalterør	48
Figur 5.6 Forseglet topp av spalterør	48
Figur 5.7 Tømming av sandfang	49

Figur 5.8 Tømming av sandfang	49
Figur 5.9 To spalterør og boks	50
Figur 5.10 Sugepunkt på spalterør	50
Figur 5.11 Tidsforløp Spyling	51
Figur 5.12 Stabil steinstørrelse i tunnel.....	52
Figur 6.1 Rouse teoretisk konsentrasjonsfordeling	53
Figur 6.2 Vertikal konsentrasjonsfordeling, forsøk 1.....	54
Figur 6.3 Vertikal konsentrasjonsfordeling, forsøk 3	54
Figur 6.4 Vertikal konsentrasjonsfordeling, forsøk 5	55
Figur 6.5 Vertikal konsentrasjonsfordeling, forsøk 6	55
Figur 7.1 Sammenligning av teoretisk og målt vertikal konsentrasjonsfordeling.....	62
Figur 7.2 Vann gjennom topp av spalterør.....	65
Figur 7.3 død volum.....	65
Figur 7.4 Beregnet og målt kapasitet	66
Figur 7.5 Stabil steinstørrelse	67
Figur 7.6 Korrigert konstant C'	68
Figur 7.7 Hjulstrøms diagram	68

TABELLER

Tabell 3-1 Stømningsforhold i sandfang.....	26
Tabell 4-1 skalering.....	35
Tabell 4-2 Resultater	40
Tabell 4-3 Ruhet modell	40
Tabell 4-4 Skalert ruhet i modell	41
Tabell 6-1 Teoretisk konsentrasjonsfordeling.....	53
Tabell 6-2 Enkelt spalterør, situasjon 1	55
Tabell 6-3 Enkelt spalterør, situasjon 2	56
Tabell 6-4 enkelt spalterør, forseglet topp.....	56
Tabell 6-5 Sedicon enhet, situasjon 1.....	56
Tabell 6-6 Sedicon enhet, situasjon 2.....	56
Tabell 6-7 Sedicon enhet, situasjon 2.....	57
Tabell 6-8 Sedicon enhet, situasjon 1.....	57
Tabell 6-9 Sedicon enhet, forseglet topp spalterør.....	57
Tabell 6-10 Durand kapasitets formel	57
Tabell 6-11 målt kapasitet.....	58
Tabell 6-12 faste parametere for stabil steinstørrelse.....	58
Tabell 6-13 Beregnet stabil steinstørrelse.....	58
Tabell 6-14 Stabil steinstørrelse, forsøk 1	58
Tabell 6-15 Stabil steinstørrelse, forsøk 2	59
Tabell 7-1 Gjennomsnittlig spyleeffekt enkelt spalterør.....	64
Tabell 7-2 Gjennomsnittlig spyleeffekt med Sedicon enhet	64

VEDLEGG

Vedlegg	- 79 -
Vedlegg A	- 80 -
Tegnede skisser av modell	- 80 -
Vedlegg B	- 87 -
Komplett data fra forsøk	- 87 -
Vedlegg C	- 92 -
Fallhastighet for partikler i vann	- 92 -
Vedlegg D	- 93 -
Dragkoeffisient	- 93 -
Vedlegg E	- 94 -
Beregning av Rouse nummer	- 94 -
Vedlegg F	- 95 -
Rushetsberegninger for modell	- 95 -
Vedlegg G	- 96 -
Beregnet stabil steinstørrelse	- 96 -
Vedlegg H	- 97 -
Kapasitetsberegninger	- 97 -
Vedlegg I	- 98 -
Reguleringsfelt Folgefonna	- 98 -
Vedlegg J	- 100 -
Reguleringsfelt Svartisen	- 100 -

VEDLEGG A

TEGNEDE SKISSER AV MODELL

Dette vedlegget inneholder alle de tegnede skissene modellen er bygget etter. Ikke alle skissene er tegnet i skala.

Max 2% → δ innløp.

Max 2% → δ bodens $B \times H \times L = 300 \times 400 \times 500$

OS-1 % Ventil

Overløp

V-overløp

tunnel ca. 1 m over gulv, 3 minste seksjoner først

"Sugepkt"

målepkt. (hver 2.0 m ca.)

L = totalt 11 m

10-20 e/s ventil

rør = plater likeretter for å blande

C-C-100 slabs 50 mm (i d's bunn)

A

utløp sluiser

1:2 (ca.)

utløp sluiser

A

utløp sluiser

< 1.0 m

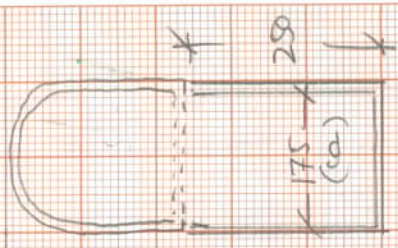
utløp sluiser

A

utløp sluiser

Sediment Sluiser lev. av sedimont

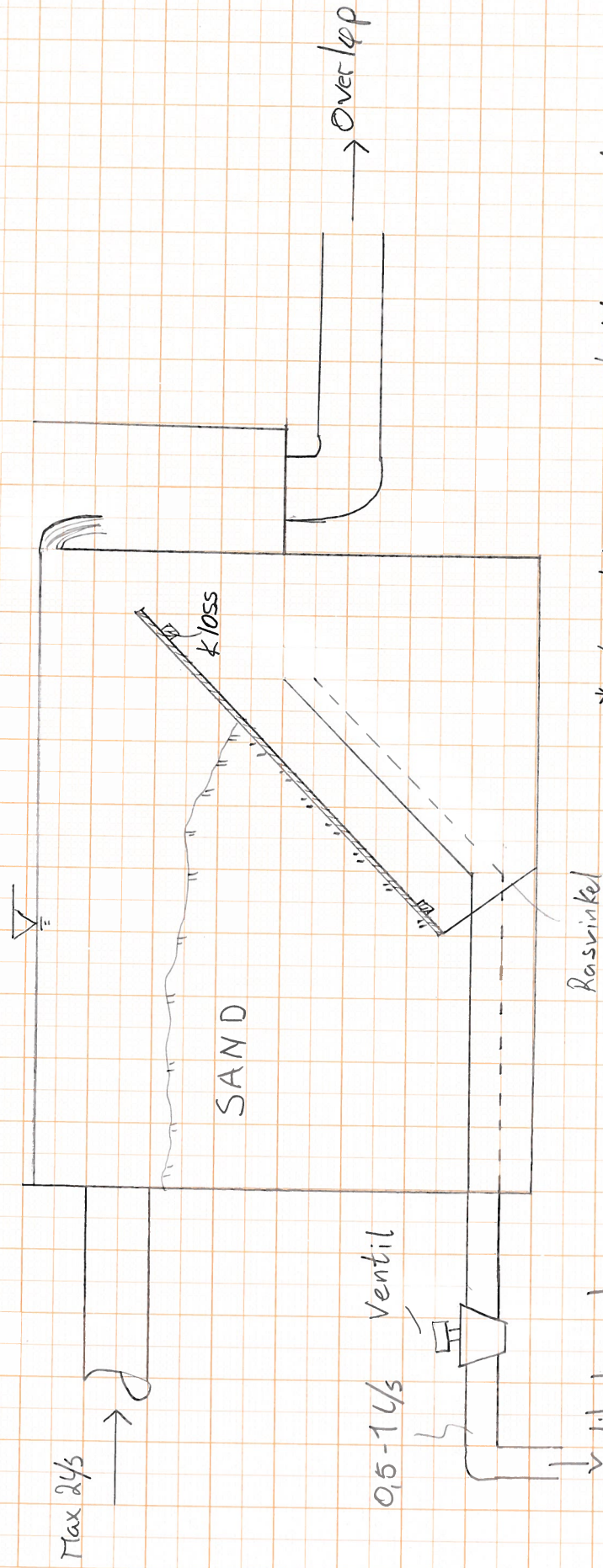
Oppsamling m/ overløp



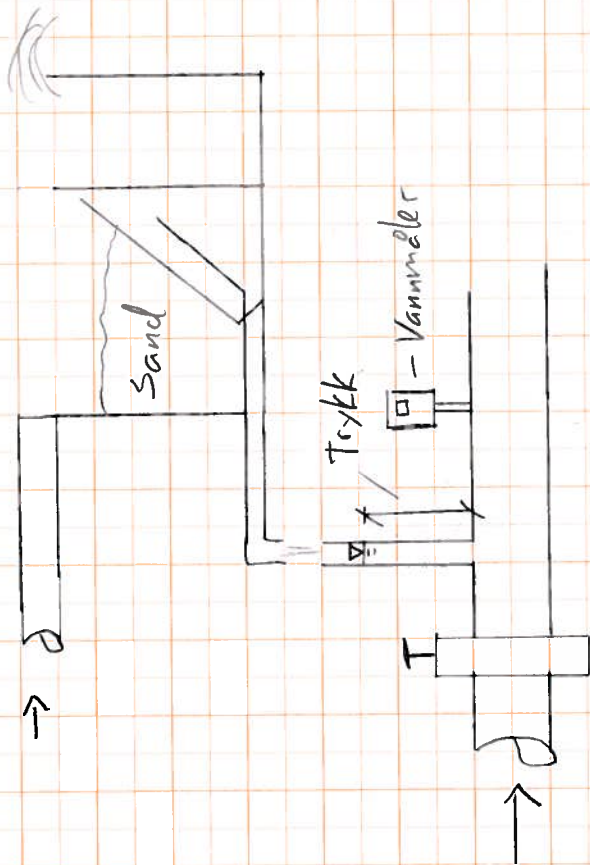
Målestokk 1:10 (modellen)

SAND FORSYNINGSS BOKS

$B \times H \times L = 300 \times 400 \times 500 \text{ mm}$



* treplaten som holder sanden på plass
må kunne fjernes og settes inn.



START AV TUNNEL

Innløp for Sedimenter

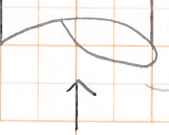


(Vannførings måling?)

PE-rør for å
liketrette strømmen

Prøvetakings rør (hver 2m)

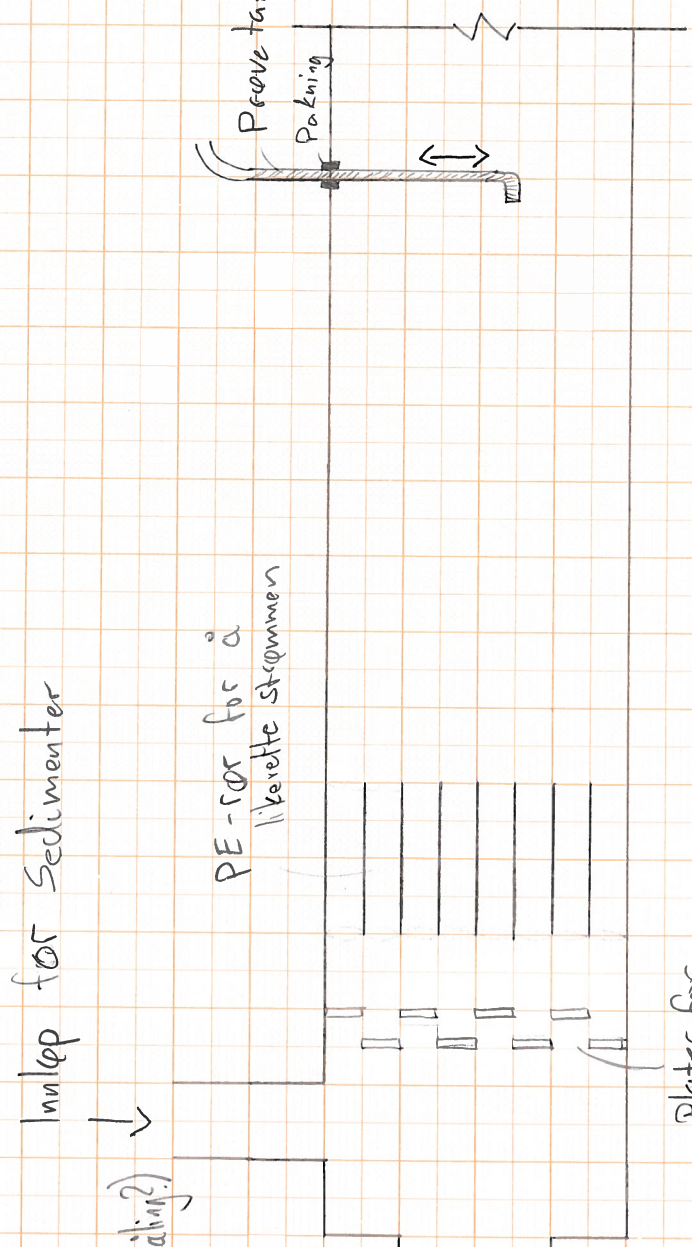
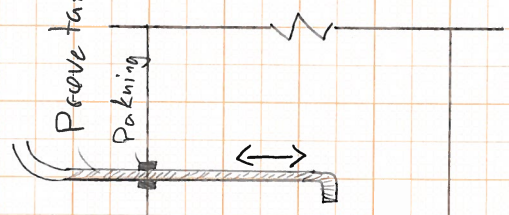
Pakning



Ventil

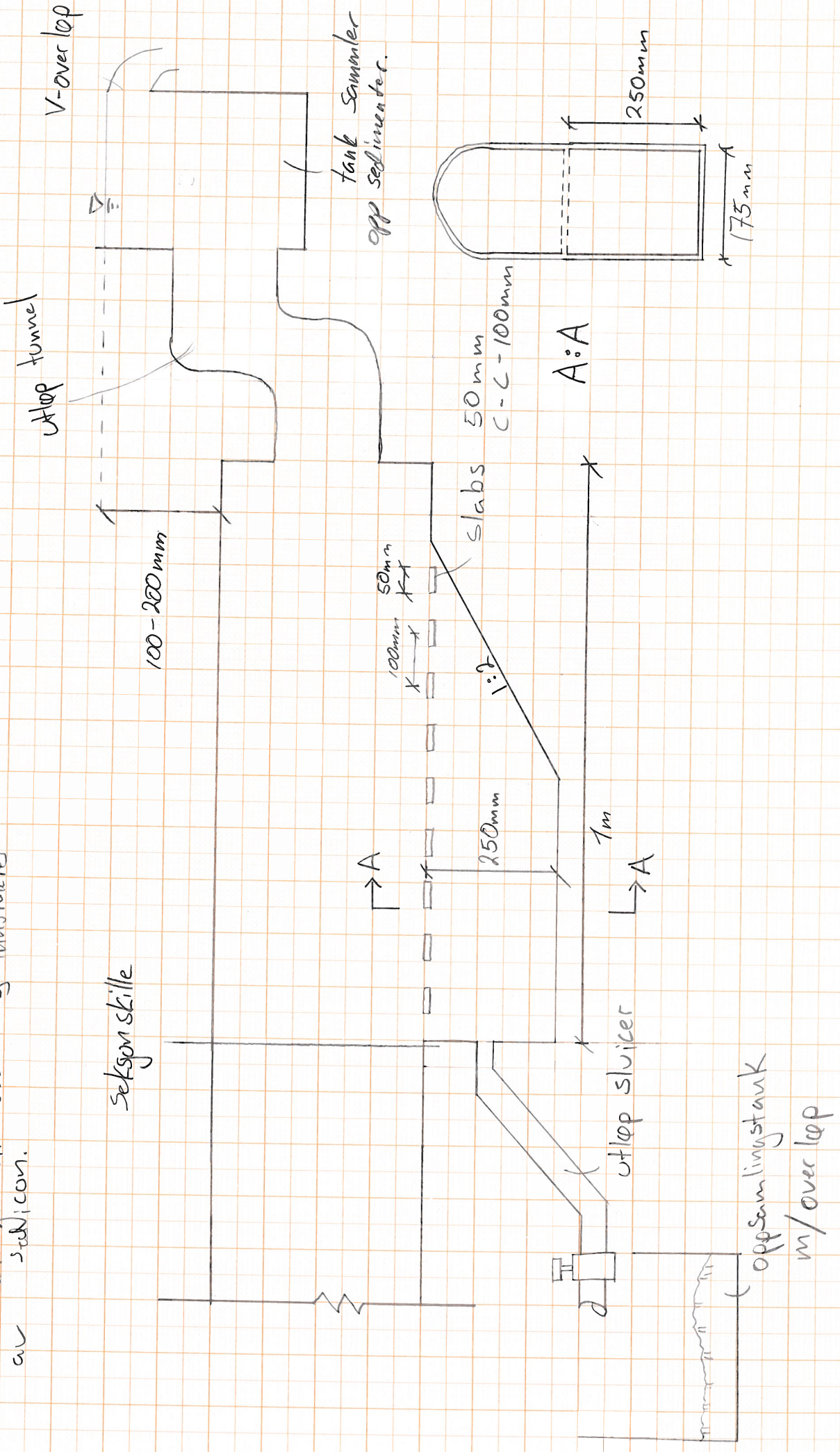
10-30 L/s

Plater for
å blande inn
sedimenter

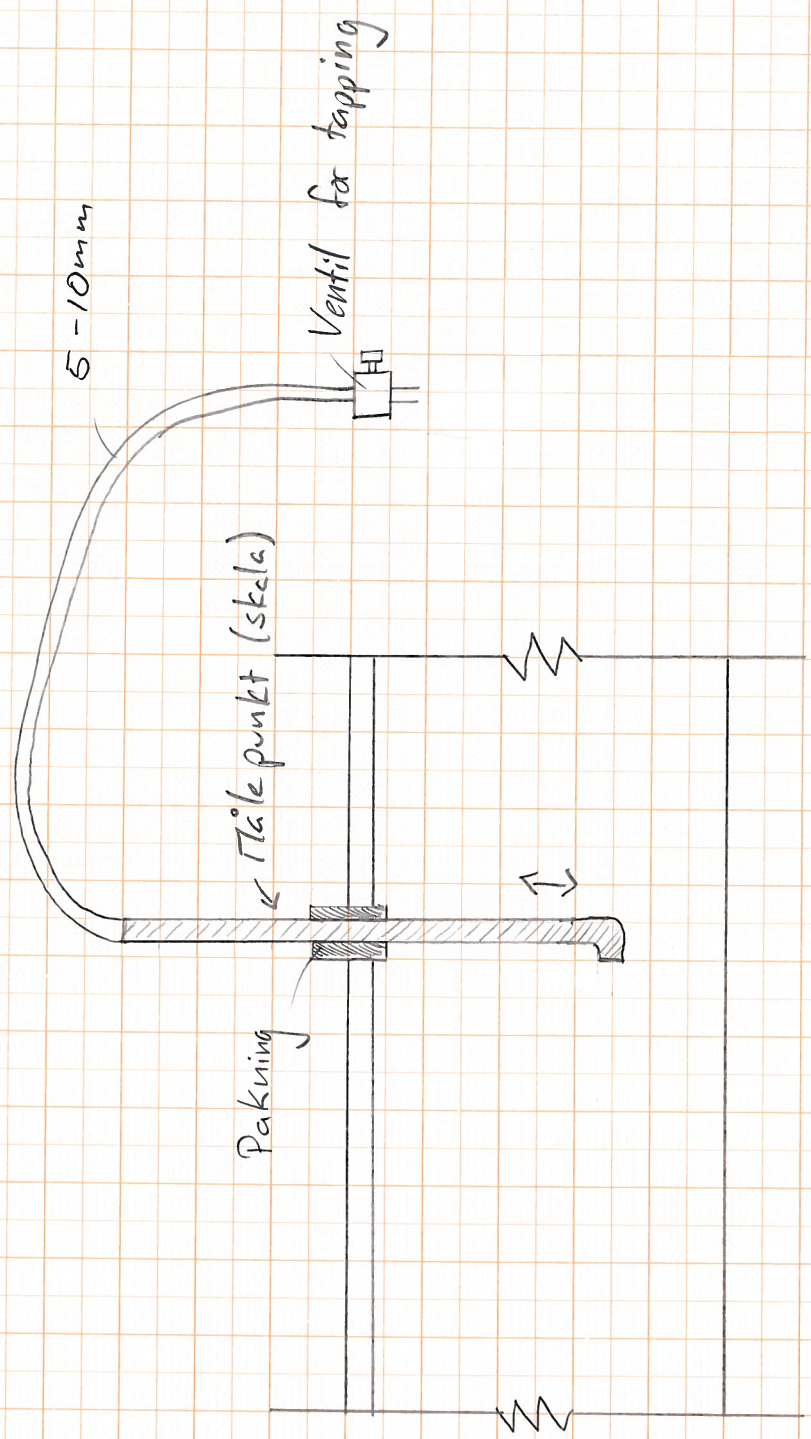


SANDFANG (1 seksjon) + UTLOP TUNNEL

* Sedicon Sluicer blir installert i sandfang. Dette leveres og installeres av Sedicon.



Målepunkt - settes ca. hver 2 m.



VEDLEGG B

KOMPLETT DATA FRA FORSØK

Dette vedlegget inneholder all data som er samlet inn under forsøkene. Ikke all data er presentert i resultat kapitelet. Derfor er en komplett samling vedlagt her.

B.1 SPYLING AV SANDFANG

Her er all data som ble notert og logget under forsøkene ved spyling av sandfang.

Forsøk 2

Prøve Nr.	Total vekt [kg]	Vekt tørr bøtte [kg]	Sedimenter tørr [kg]	Vann [kg]	Konsentrasjon [g/L]
1	15.44	0.76	0.29	14.39	20.15
2	17.23	0.757	0.033	16.44	2.01
3	10.05	0.427	0.058	9.565	6.06
5	16.31	0.768	0.771	14.771	52.20

Prøve Nr.	Tid [s]	Q [l/s]	V [m/s]
1	7.90	1.82	2.28
2	9.90	1.66	2.08
5	8.00	1.85	2.31

Forsøk 3

Prøve Nr.	Total vekt [kg]	Vekt tørr bøtte [kg]	Sedimenter tørr [kg]	Vann [kg]	Konsentrasjon [g/L]
1	19.66	0.76	6.091	12.809	475.53
2	15.45	0.757	2.855	11.838	241.17
5	14.64	0.768	1.034	12.838	80.54

Prøve Nr.	Tid [s]	Q [l/s]	V [m/s]
2	8.60	1.38	1.72
5	8.30	1.55	1.93

Forsøk 4

Prøve Nr.	Total vekt [kg]	Vekt tørr bøtte [kg]	Sedimenter tørr [kg]	Vann [kg]	Konsentrasjon [g/L]
1	12.39	0.76	1.146	10.484	109.31
2	18.27	0.757	2.399	15.114	158.73
5	16.51	0.768	1.299	14.443	89.94

Prøve Nr.	Tid [s]	Q [l/s]	V [m/s]
2	7.3	2.07	2.59

5	8.4	1.72	2.15
---	-----	------	------

Forsøk 5

Prøve Nr.	Total vekt [kg]	Vekt tørr bølge [kg]	Sedimenter tørr [kg]	Vann [kg]	Konsentrasjon [g/L]
1	15.07	0.76	0.172	14.138	12.17
2	15.85	0.757	0.109	14.984	7.27
5	13.35	0.768	0.336	12.246	27.44

Prøve Nr.	Tid [s]	Q [l/s]	V [m/s]
1	11	1.29	1.61
2	9.8	1.53	1.91
5	8.7	1.41	1.76

Forsøk 6

Prøve Nr.	Total vekt [kg]	Vekt tørr bølge [kg]	Sedimenter tørr [kg]	Vann [kg]	Konsentrasjon [g/L]
1	13.98	0.76	1.123	12.097	92.83
2	12.04	0.757	1.55	9.733	159.25
5	11.41	0.768	1.123	9.519	117.97

Prøve Nr.	Tid [s]	Q [l/s]	V [m/s]
1	12.5	0.97	1.21
2	10.8	0.90	1.13
5	9.3	1.02	1.28

Forsøk 9

Prøve Nr.	Total vekt [kg]	Vekt tørr bølge [kg]	Sedimenter tørr [kg]	Vann [kg]	Konsentrasjon [g/L]
1	15.2	0.76	1.965	12.475	157.52
2	16.1	0.757	2.081	13.262	156.91
5	16.7	0.768	2.13	13.802	154.33

Prøve Nr.	Tid [s]	Q [l/s]	V [m/s]
1	13	0.96	1.20
2	13.6	0.98	1.22
5	14.3	0.97	1.21

Forsøk 10

Prøve Nr.	Total vekt [kg]	Vekt tørr bølge [kg]	Sedimenter tørr [kg]	Vann [kg]	Konsentrasjon [g/L]
1	15.4	0.76	1.439	13.201	109.01
2	18.05	0.757	1.083	16.21	66.81

5	16.1	0.768	1.384	13.948	99.23
---	------	-------	-------	--------	--------------

Prøve Nr.	Tid [s]	Q [l/s]	V [m/s]
1	11	1.20	1.50
2	13.7	1.18	1.48
5	10.9	1.28	1.60

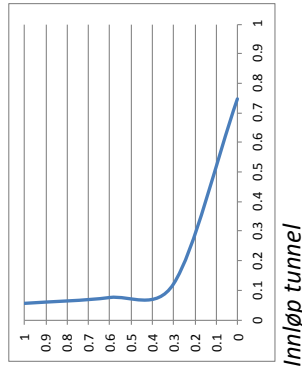
Forsøk 11

Prøve Nr.	Total vekt [kg]	Vekt tørr bøtte [kg]	Sedimenter tørr [kg]	Vann [kg]	Konsentrasjon [g/L]
1	17.67	0.76	4.357	12.553	347.09
2	15.73	0.757	3.001	11.972	250.67
5	16.7	0.768	1.87	14.062	132.98

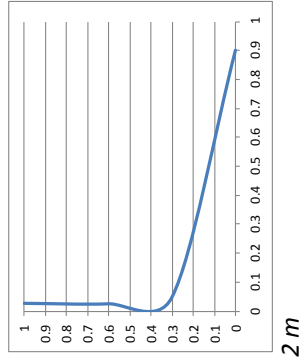
Prøve Nr.	Tid [s]	Q [l/s]	V [m/s]
1	13	0.97	1.21
2	10.7	1.12	1.40
5	11.7	1.20	1.50

B.2 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING

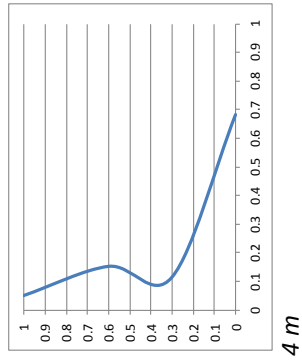
Her er den vertikale konsentrasjonsfordelingen for alle fem tverrsnitt presentert.



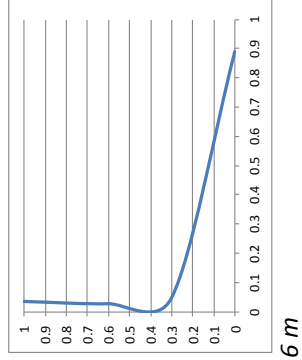
Innløp tunnel



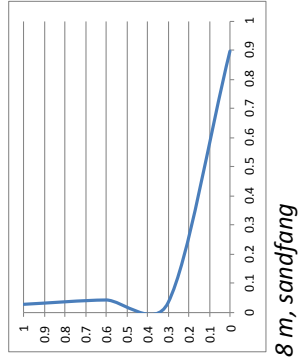
2 m



4 m

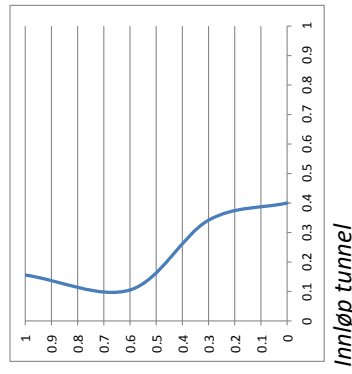


6 m

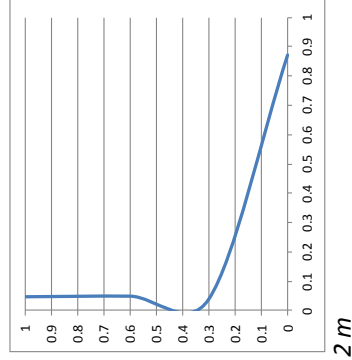


8 m, sandfang

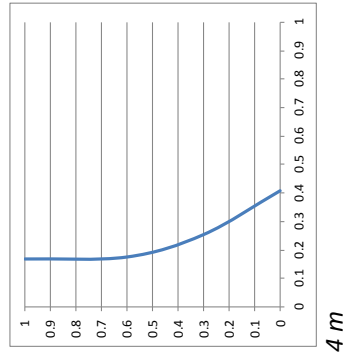
FIGUR 1.2 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING, FORSØK 1



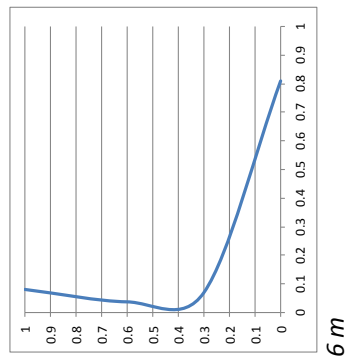
Innløp tunnel



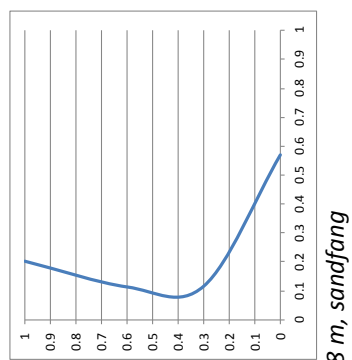
2 m



4 m

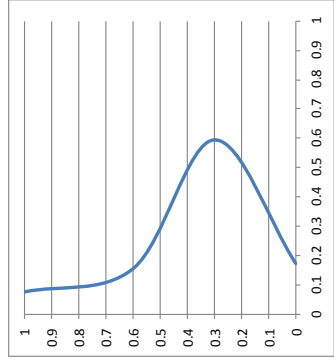


6 m

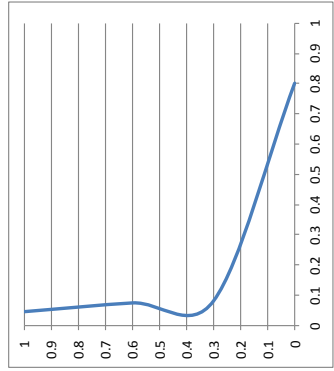


8 m, sandfang

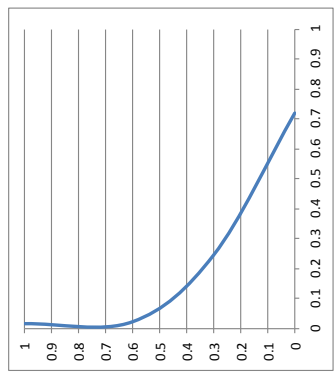
FIGUR 1.3 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING, FORSØK 3



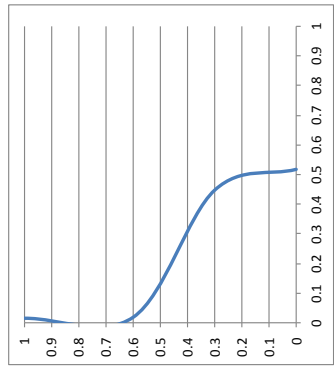
Innløp tunnel



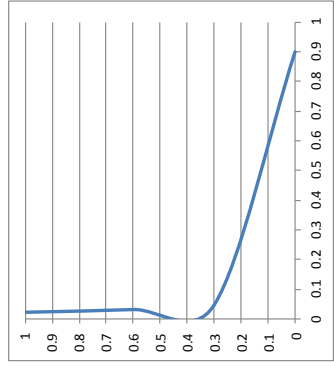
2 m



4 m

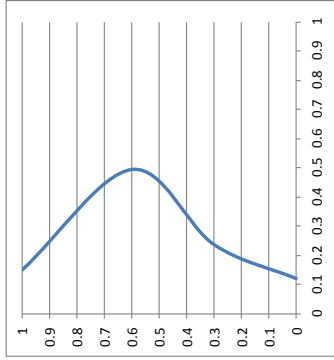


6 m

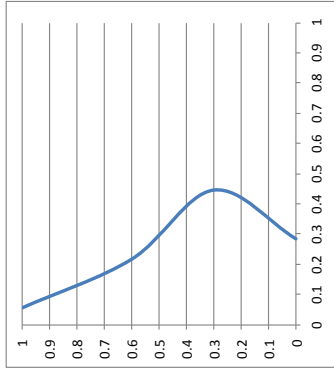


8 m, sandfang

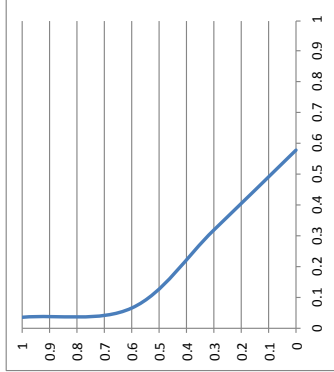
FIGUR 1.4 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING, FORSØK 5



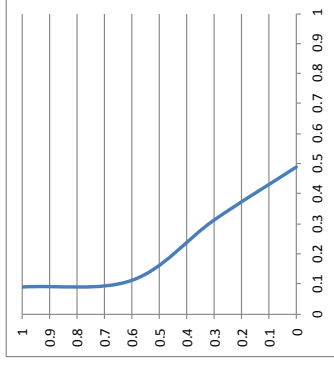
Innløp tunnel



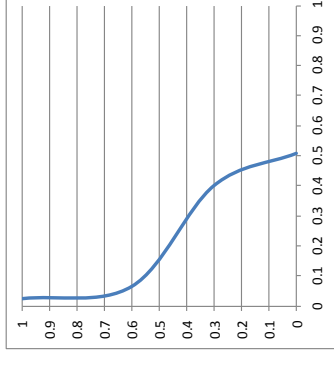
2 m



4 m



6 m



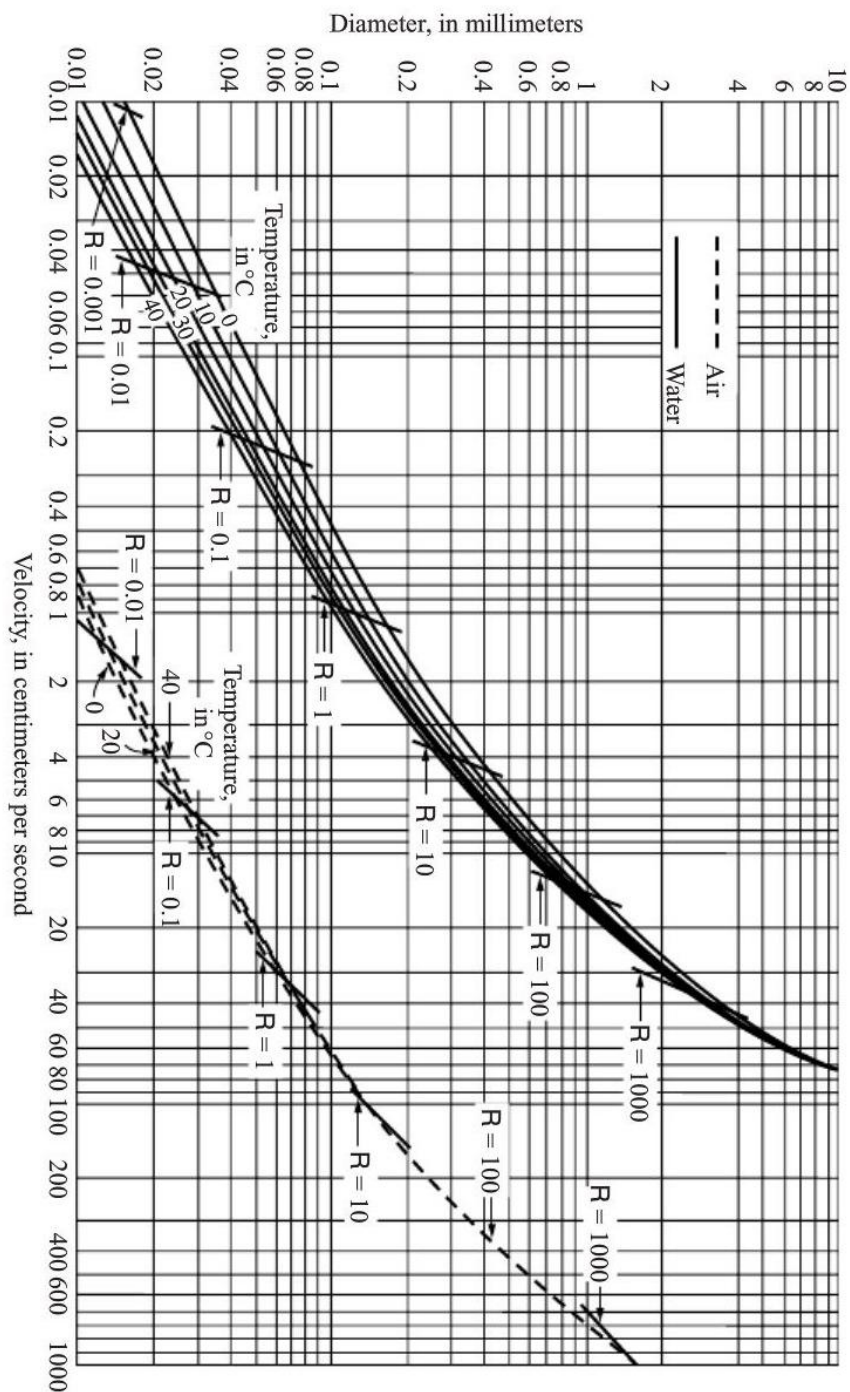
8 m, sandfang

FIGUR 1.5 VERTIKAL KONSENTRASJONSFORDELING, FORSØK 6

VEDLEGG C

FALLHASTIGHET FOR PARTIKLER I VANN

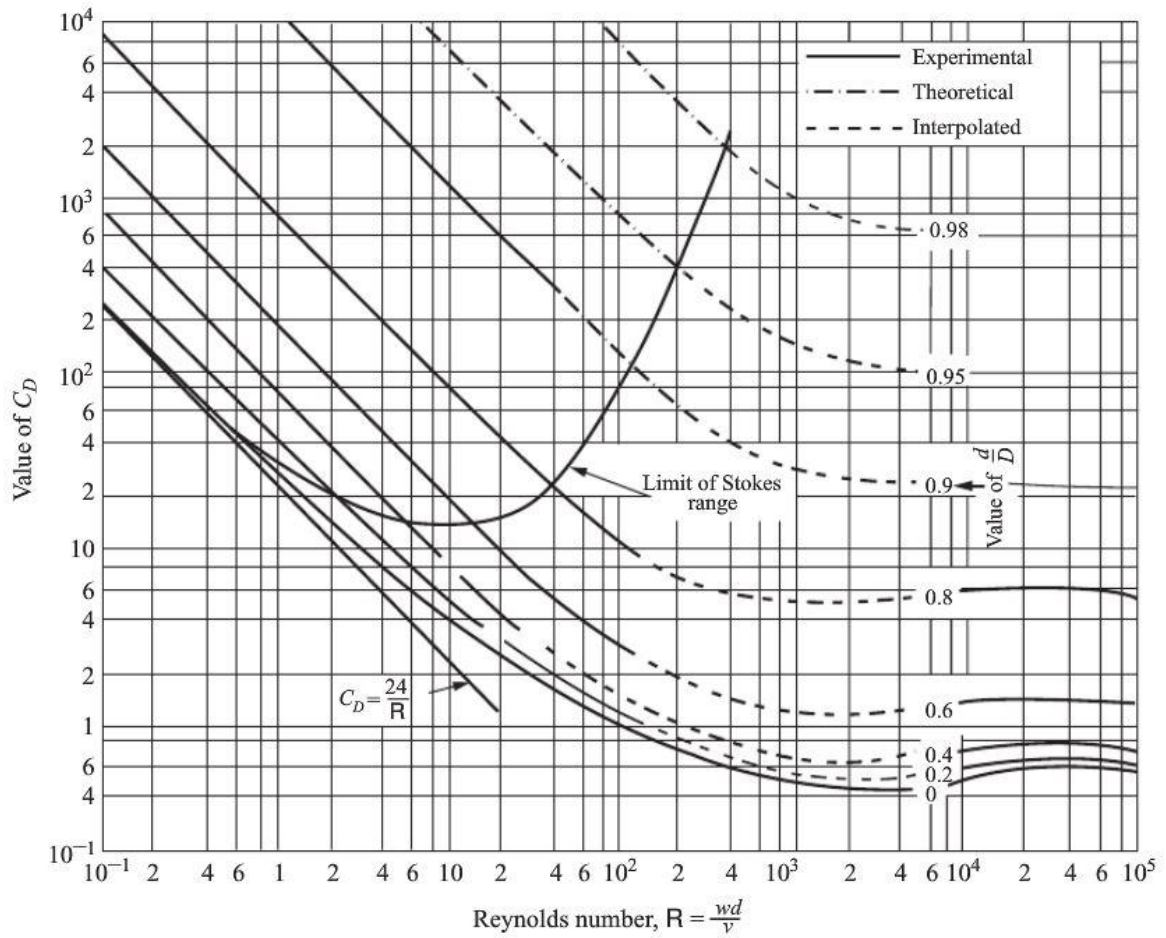
Vedlagt her er diagrammet som er brukt for å bestemme fallhastigheten til partikler av forskjellig størrelse i vann. Diagrammet presenterer fallhastigheten for ulike vanntemperaturer.



VEDLEGG D

DRAGKOEFFISIENT

Vedlagt er diagrammet brukt for å finne dragkoeffisienten til partikler. Dragkoeffisienten er brukt i kapasitets beregninger.



VEDLEGG E

BEREGNING AV ROUSE NUMMER

Vedlagte er et utklipp av Excel arket hvor beregningen av Rouse nummeret er gjort for forskjellige partikkelstørrelse. Parametere som hastighet er endret i regnearket for å finne Rouse nummeret for ulike senario.

Str. [mm]	Fallhastighet [m/s]						
0.1	0.007						
0.2	0.02						
0.3	0.038						
0.4	0.05						
		ρ_{vann}	1000		ρ_{vann}	1000	kg/m ³
		γ_{vann}	9810		γ_{vann}	9810	
		V	0.5	m/s	V	0.5	m/s
		A		m ²	A		m ²
		P		m	P		m
		R=A/p	0.042	m	R=A/p	0.042	m
		M	68		f	0.048	
		n	0.0147				
		τ	1.53		τ	1.50	
		\acute{u}	0.04		\acute{u}	0.04	
		Rouse, 0.1	0.45		Rouse, 0.1	0.45	
		Rouse, 0.2	1.28		Rouse, 0.2	1.29	
		Rouse, 0.3	2.43		Rouse, 0.3	2.45	
		Rouse, 0.4	3.20		Rouse, 0.4	3.23	

VEDLEGG F

RUSHETSBEREGNINGER FOR MODELL

Vedlagt er regnearket hvor ruheten i modell er beregnet.

Innput				Innput			
L	8.4	m		L	8.4	m	
R	0.042	m		R	0.042	m	
V	1	m/s		V	0.5	m/s	
g	9.81	m/s ²		g	9.81	m/s ²	
h _f	0.124	mVS		h _f	0.031	mVS	
M	68.12			M	68.12		
f	0.0487			f	0.0487		
Sjekker falltap med å bruke beregnet friksjon:							
h _f	0.124	OK		h _f	0.031	OK	
Beregner ruhet i mm							
	f		0.04777526				
	Re		76754.386				
	k		0.00319367	3.19367251	Ker målsøkt !		
	D		0.175				
	V		0.5				
	v		0.00000114				

VEDLEGG G

BEREGNET STABIL STEINSTØRRELSE

Vedelaget er regnearket for stabil steinstørrelse.

			Beregnet			
			Stabil steinstørrelse [m]			
γ_v	9810		Vannhastighet [m/s]	$C' = 130$	$C' = 115$	$C' = 80$
γ_s	25996.5		0.1	0.09	0.10	0.14
V	0.5		0.2	0.34	0.39	0.56
C	130		0.3	0.78	0.88	1.26
A	0.025		0.4	1.38	1.56	2.24
			0.5	2.16	2.44	3.50
d	0.00215537	2.16	0.6	3.10	3.51	5.04
			0.7	4.22	4.78	6.86
			0.8	5.52	6.24	8.97
			0.9	6.98	7.89	11.35
			1	8.62	9.75	14.01

VEDLEGG H

KAPASITETSBEREGNINGER

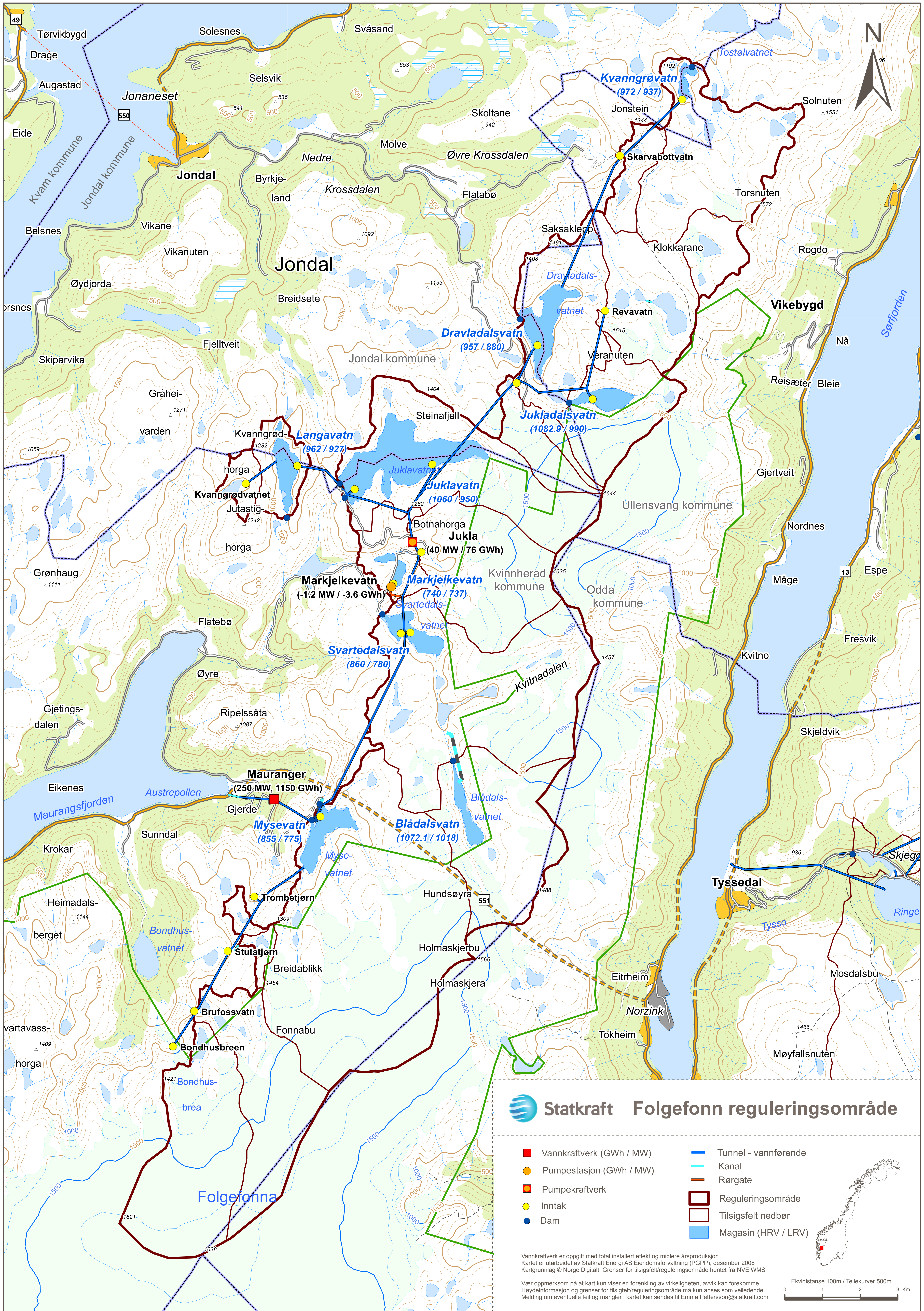
Vedlagt er regnearket hvor kapasitetsberegningen er gjort.

Input rent vann				Input med sedimenter			
L	8.4	m		L	8.4	m	
R	0.042	m		R	0.042	m	
V	0.5	m/s		V	0.8	m/s	
g	9.81	m/s ²		g	9.81	m/s ²	
h_f	0.124	mVS		h_f	0.16	mVS	
M	34.06			M	47.97		
f	0.1946			f	0.0981		
Sjekker falltap med å bruke beregnet friksjon:				Sjekker falltap med å bruke beregnet friksjon:			
h_f	0.124	OK		h_f	0.16	OK	
i	0.014761905	Energihelning rent vann					
i_m	0.019047619	Energihelning med sedimenter					
g	9.81						
K'	176	konstant					
C_d	6.5	Dragkoeffisient for partikkler					
D	0.17	Diameter					
C_v	0.00038975	1 032.84	ppm				

VEDLEGG I

REGULERINGSFELT FOLGEFONNA

Kartet viser grense for konsesjoner, nedbørsfelt, kraftverk, reguleringsmagasiner, dammer, vannveier og vannmerke.



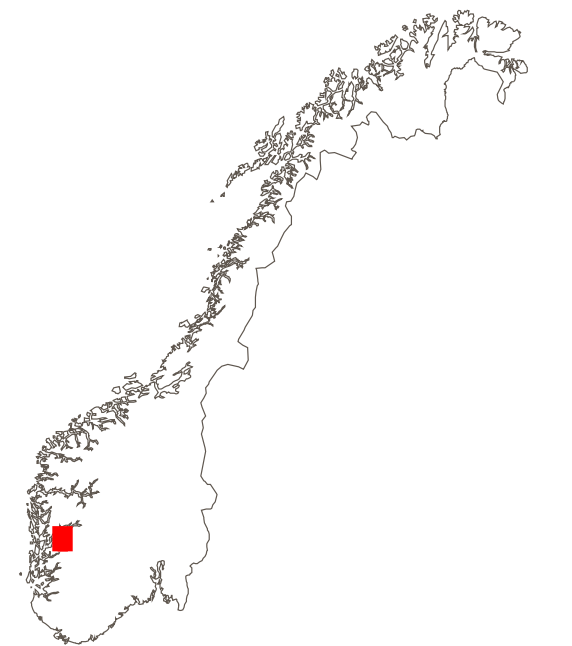
Statkraft Folgefonn reguleringsområde

- Vannkraftverk (GWh / MW)
- Pumpestasjon (GWh / MW)
- Pumpekraftverk
- Inntak
- Dam
- Tunnel - vannførende
- Kanal
- Rørgate
- Reguleringsområde
- Tilsigfelt nedbør
- Magasin (HRV / LRV)

Vannkraftverk er oppgitt med total installert effekt og midlere årsproduksjon
 Kartet er utarbeidet av Statkraft Energi AS Eiendomsforvaltning (PGPP), desember 2008
 Kartgrunnlag © Norge Digitalt. Grenser for tilsigfelt/reguleringsområde hentet fra NVE WMS

Vær oppmerksom på at kart kun viser en forenkling av virkeligheten, avik kan forekomme
 Høydeinformasjon og grenser for tilsigfelt/reguleringsområde må kun anses som veiledende
 Melding om eventuelle feil og mangler i kartet kan sendes til Emma.Pettersson@statkraft.com

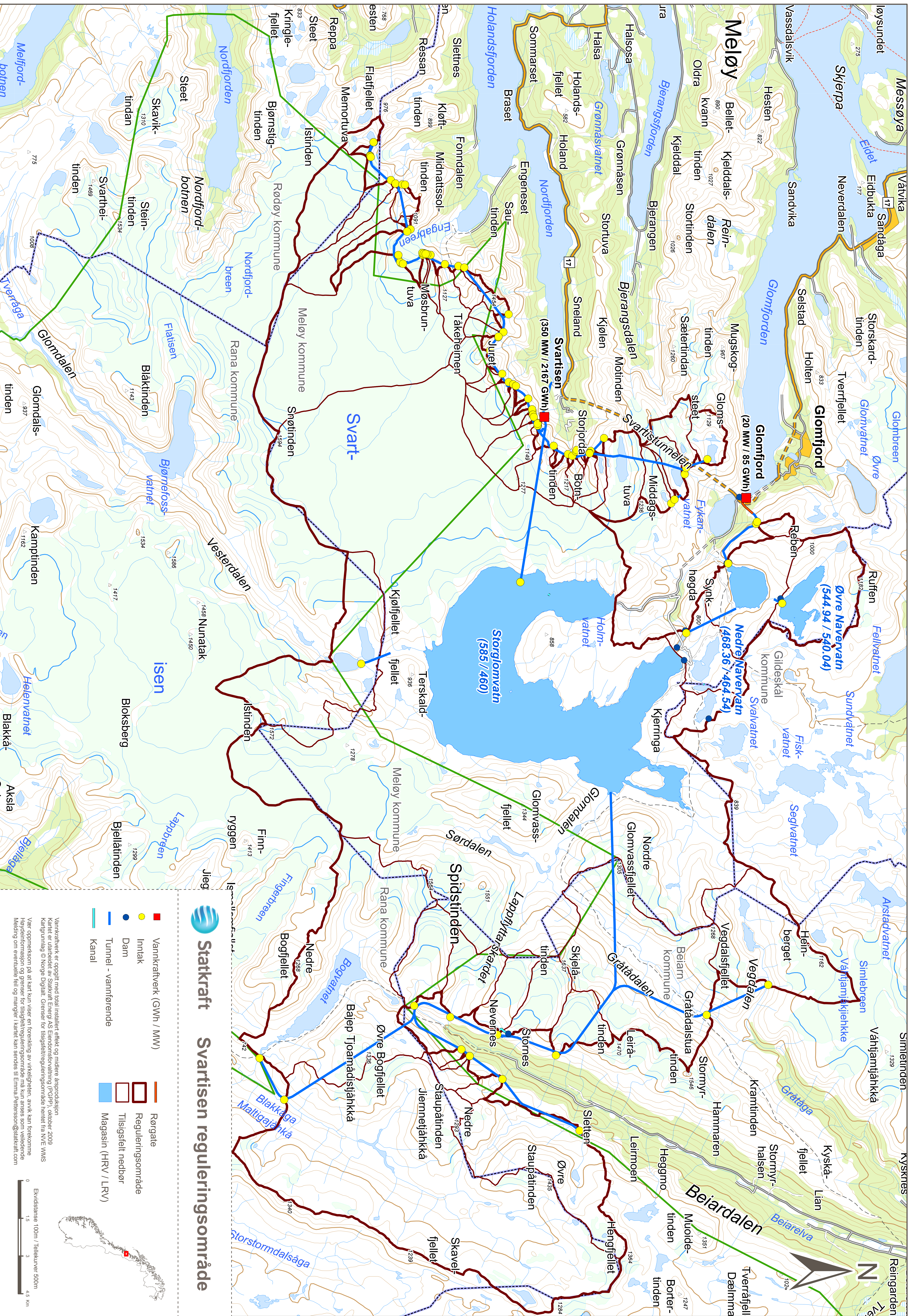
Ekvidistanse 100m / Tellekurver 500m
 0 1 2 3 Km



VEDLEGG J

REGULERINGSFELT SVARTISEN

Kartet viser grense for konsesjoner, nedbørsfelt, kraftverk, reguleringsmagasiner, dammer, vannveier og vannmerke.



Statkraft Svartisen reguleringsområde

- Vannkraftverk (GWh / MW)
- Inntak
- Dam
- Tunnel - vannførende
- Kanal
- Rørgate
- Reguleringsområde
- Tilsigsfelt nedbør
- Magasin (HRV / LRV)

Vannkraftverk er oppgitt med total installert effekt og midlere årsproduksjon. Kartet er utarbeidet av Statkraft Energi AS Eierdomsforvaltning (PSPF), oktober 2009. Kartgrunnlag © Norge Digitalt. Grenser for tilsigsfeltreguleringsområde hentet fra NVE WMS. Vær oppmerksom på at kart kun viser en forenkling av virkeligheten, avvik kan forekomme. Høydeinformasjon og grenser for tilsigsfeltreguleringsområde må kun anses som veiledende. Melding om eventuelle feil og mangler i kartet kan sendes til Emma.Petersson@statkraft.com

