

Tyrolerinntak - Spyling av sedimenter

Kjell Inge Langeland Vik

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juli 2013

Hovedveileder: Leif Lia, IVM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk

Forord

Denne rapporten er en avslutning på et 5-årig masterstudium innen Bygg og miljøteknikk ved NTNU. Opprinnelig har jeg gått fordypningsretningen Prosjektering av konstruksjoner, men på grunn av stor interesse for vasskraft har det på slutten av studiet blitt byttet til vassdragsteknikk ved Institutt for vann og miljøteknikk.

Med oppvekst på gård er jeg vant med å bevege meg mye, og ble derfor veldig glad da muligheten åpnet seg for å få en praktisk rettet masteroppgave ved å teste spyling av sedimenter i Statkrafts Tyrolerinntak i Skjomen, Narvik.

Takk til Statkraft som er oppdragsgiver, Magnus Buuer som har bygget modellen som en del av sin masteroppgave vår 2012 og Leif Lia for god veiledning under oppgaven. Jeg vil også takke Samuel Vingerhagen og Geir Tesaker som kom med gode innspill og assisterte med modifisering av modellen.

Innholdsliste

Sammendrag	i
Abstract	iii
Forord	v
Tabelliste	ix
Figurliste.....	xi
Innledning.....	1
1. Introduksjon	3
1.1 – Stasjonselv	3
1.2 Modellteori	5
1.3 Sedimenter	6
2. Testoppsett og testrutiner	7
2.1 De ulike spyleløsningene.....	7
2.1.1 Parallellspyling (alle versjoner)	7
2.1.2 Sidespyling.....	9
2.1.3 Spyling under inntaket	9
2.2 Vassføring.....	11
2.3 Sedimenter	14
2.4 Testrutiner.....	15
3. Resultater.....	18
3.1 De ulike løsningene	18
3.1.1 Parallellspyling	18
3.1.2 Parallellspyling med ledevegg	20
3.1.3 Parallellspyling med ledevegg og strømldekloss	23
3.1.4 Sidespyling.....	25
3.1.5 Spyling under inntaket	28
3.2 Sammenligning	30
3.2.1 Testresultatene	30
3.2.2 Økonomi	33
3.3 Konklusjon	34
Kildeliste	35

Tabelliste

Tabell 1.1: Skaleringsfaktorer/-forhold.....	5
Tabell 2.1: Valgt kornfordeling.....	14
Tabell 2.2: Måling av forskjell i spyletid mellom de to kornfordelingene.	14
Tabell 2.3: Fyllingsgrad og sedimentvolum i basseng.....	15
Tabell 3.1: Spyletid i minutter for parallellspyling.....	18
Tabell 3.2: Sedimentvolum igjen (i prototypskala) og andel av totalt bassengvolum igjen med sedimenter.....	19
Tabell 3.3: Spyletid i minutter ved parallellspyling med ledevegg.....	20
Tabell 3.4: Sedimentvolum igjen (i prototypskala) og andel av totalt bassengvolum igjen med sedimenter.....	21
Tabell 3.5: Spyletid i minutter ved parallellspyling med ledevegg og strømldekloss.....	23
Tabell 3.6: Spyletid i minutter ved sidespyling.....	25
Tabell 3.7: Sedimentvolum igjen (i prototypskala) og andel av totalt bassengvolum igjen med sedimenter.....	25
Tabell 3.8: Spyletid i minutter ved spyling under inntaket.....	28
Tabell 3.9: Sedimentvolum igjen (i prototypskala) og andel av totalt bassengvolum igjen med sedimenter.....	29

Figurliste

Figur 1.1: Fjerning av sedimenter fra inntaket. Bredder spyleluke ca. 1 m. [Paulsen & Grane, 2009].....	3
Figur 1.2: Sedimenter inne i inntaket [Buuer, 2012].....	4
Figur 1.3: Sedimentene dekker vinterinntaket, som man så vidt ser venstre øverste hjørne av [Paulsen & Grane, 2009].....	4
Figur 2.1: Parallellspyling. Her med både ledevegg og strømledekloss slik modellen var ved oppstart.....	8
Figur 2.2: Lengdeprofil parallellspyling. Målt langs spylevei (via spyleluke). Spyleluke ved L = 250 cm.....	8
Figur 2.3: Sidespyling	9
Figur 2.4: Spyling under inntaket.....	10
Figur 2.5: Lengdeprofil for spyling under inntak, målt langs spylevei. Inntakskonstruksjon ved L = 230 – 280 cm.....	10
Figur 2.6: Vassføringskurve for Stasjonselv. Vassføringsdata for sommerhalvåret i 1995, 1998, 2003 og 2006 samt gjennomsnitt av disse.....	12
Figur 2.7: Varighetskurve for Stasjonselv.....	13
Figur 2.6: Blokker tilsatt sedimentene ved 4 m ³ /s	16
Figur 3.1: Spyletid i minutter for parallellspyling (prototypeskala)	18
Figur 3.2: Spyleintensitet i prototypeskala. Y-aksen angir antall kubikkmeter sediment spylt per minutt og x-aksen angir tidspunkt i spyleprosessen.....	19
Figur 3.3: Sedimentforhold i inntaket ved slutten av spyling. 4 m ³ /s og 100% fyllingsgrad ..	20
Figur 3.4: Spyletid i minutter ved parallellspyling med ledevegg.	21
Figur 3.5: Spyleintensitet i prototypeskala. Y-aksen angir antall kubikkmeter sediment spylt per minutt og x-aksen angir tidspunkt i spyleprosessen.....	21
Figur 3.6: Sedimentforhold i inntaket ved slutten av spyling. 4 m ³ /s og 100% fyllingsgrad ..	22
Figur 3.7: Spyletid i minutter ved parallellspyling med ledevegg og strømledekloss.	23
Figur 3.8: Sedimentforhold i inntaket ved slutten av spyling. 4 m ³ /s og 100% fyllingsgrad ..	24
Figur 3.9: Spyletid i minutter ved sidespyling	25
Figur 3.10: Spyleintensitet i prototypeskala. Y-aksen angir antall kubikkmeter sediment spylt per minutt og x-aksen angir tidspunkt i spyleprosessen.....	26
Figur 3.11: Sedimentforhold i inntaket ved slutten av spyling. 4 m ³ /s og 100% fyllingsgrad	26
Figur 3.12: Blokker (markert med rødt) som hindrer effektiv spyling.	27
Figur 3.13: Spyletid i minutter for spyling under inntaket. NB: Bare data for 50% og 100% fyllingsgrad.....	28
Figur 3.14: Sedimentforhold i inntaket ved slutten av spyling. 4 m ³ /s og 100% fyllingsgrad	29

Figur 3.15: Spyletid for de forskjellige løsningene ved 4 m ³ /s. Parallell_1 = parallellspyling, Parallell_2 er med ledevegg og Parallell_3 er med ledevegg og strømldekloss.	30
Figur 3.16: Spyletid for de forskjellige løsningene ved 3,5 m ³ /s. Parallell_1 = parallellspyling, Parallell_2 er med ledevegg og Parallell_3 er med ledevegg og strømldekloss.	31
Figur 3.17: Spyletid for de forskjellige løsningene ved 3 m ³ /s. Parallell_1 = parallellspyling, Parallell_2 er med ledevegg og Parallell_3 er med ledevegg og strømldekloss.	31
Figur 3.18: Spyletid for de forskjellige løsningene ved 4 m ³ /s og blokker tilsatt. Parallell_1 = parallellspyling og Parallell_2 er med ledevegg.	32
Figur 3.19: Spyleintensitet	32

Innledning

Mange norske kraftverk er bygget ut med bekkeinntak i tillegg til vanlige kraftverksinntak. Bekkeinntak tar bare inn vann uten å overføre trykkog fungerer derfor ulikt kraftverksinntak.

Inntakstypen Tyrolerinntak kom til Norge på 1950-tallet fra Tyrol i Østerrike. Inntakstypen er utstyrt med overfallsrister slik at løsmasser og drivgods skal skli av ristene og føres forbi inntaket. Inntaket vil samle sedimenter i inntaket til det blir fullt, og etter det føres massene over ristene. Inntakstypen fungerer generelt svært godt under typiske norske forhold med lite sedimenter, men den er i liten grad tilpasset forhold med mye løsmasser i vannet. Rensking av sedimenter er i dag i hovedsak basert på mekanisk fjerning fra inntaket, for eksempel med gravemaskin.

Stein og andre sedimenter som kommer til Tyrolerinntak skaper driftsproblem på tre forskjellige måter:

- Oppfylling av basseng og reduksjon av dempingsvolum
- Masser føres inn på tunnelsystemet
- Stein og grove masser kan skade selve inntakskonstruksjonen

Forskningsarbeidet etter 1980-tallet har i hovedsak fokusert på inntak for småkraftverk, presentert i blant annet Inntakshåndboka fra NVE. Det finnes derfor svært få nye løsninger som direkte kan benyttes til å håndtere sediment i Tyrolerinntak.

I 2011 startet et arbeid i Vassdragslaboratoriet på NTNU med å undersøke ulike løsninger for spyling. Forskningsarbeidet tok utgangspunkt i inntaket Stasjonselv i Skjomen (Narvik, Nordland).

Denne rapporten viderefører gjennom testing av ulike spyleløsninger og generaliserte resultat arbeidet som er gjort i Vassdragslaboratoriet. Det er først og fremst fokusert på å teste de ulike spyleløsningene med varierende fyllingsgrader og vassføringer for å se på hvordan løsningene fungerer i forhold til hverandre. Hver enkelt løsning er ikke fintestet og optimalisert, eventuelle endringer blir foreslått som videre arbeider. Rapporten baserer på testing av Stasjonselvmodellen bygget av Magnus Buuer våsemesteret 2012 [Buuer, 2012]. Det ble gjort enkelte forsøk i forbindelse med bygging av modellen for å finne dimensjoner på spyleluker og spylekanal, og disse resultatene benyttes videre for å få en grundigere test av de ulike løsningene.

Rapporten er i hovedsak bygget opp i tre deler:

1. Introduksjon Stasjonselv og modellteori
2. Beskrivelse av forsøkene, deriblant testrutiner og oppsett
3. Resultater og konklusjon

1. Introduksjon

1.1 – Stasjonselv

Stasjonselv bekkeinntak ligger under Skjomen kraftverksystem i Narvik kommune, Nordland. Inntaket ligger på kote $\approx 650\text{m}$, ovenfor tregrensen. Nedbørsfeltet har en breprosent på 26, noe som fører til stor sedimenttransport til inntaket. I tillegg kommer det en stor del større sedimenter (stein og til og med blokk, se figur 1.1). Sedimenttransporten er så stor at inntaket må tømmes årlig. For å tømme inntaket benyttes det i dag gravemaskin for å flytte sedimentene fra bassenget til nedstrøms inntaket, en prosess som tar ca. en uke [Buuer, 2012].

Sedimenttransporten er så stor at inntaksbassenget fylles opp og sedimenter går over inntaksterskel og ned i inntaket (figur 1.2). Den store sedimenttransporten fører også til at vinterinntaket dekkes med sedimenter (figur 1.3), noe som i verste tilfelle fører til at vann vinterstid går over inntaksterskel, fryser til på rist og fører til vanntap.



Figur 1.1: Fjerning av sedimenter fra inntaket. Brede spyleluke ca. 1 m. [Paulsen & Grane, 2009]



Figur 1.2: Sedimenter inne i inntaket [Buuer, 2012]



Figur 1.3: Sedimentene dekker vinterinntaket, som man så vidt ser venstre øverste hjørne av [Paulsen & Grane, 2009]

1.2 Modellteori

For modellering innen hydraulikk har man i korte trekk fire alternativ:

1. Webers modellov: Benyttes når overflatespenninger er en dominerende kraft.
2. Eulers modellov: Benyttes når trykk er den dominerende kraften.
3. Reynolds modellov: Sammenheng mellom strømming og Reynoldstallet.
4. Froudes modellov: Den klart vanligste innen modellering av hydrauliske problemer. Baserer seg på gravitasjon og treghetskrefter.

I modellering av spylig av sedimenter i et Tyrolerinntak vil man ikke ha nevneverdige overflatespenninger eller trykk, og man vil også ha turbulent strømming. Derfor faller de tre første alternativene bort, og man sitter igjen med Froudes modellov [Glover et al, 2003].

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (1.1)$$

Siden Froudes tall må være likt i modell og prototyp, samt at gravitasjonen i modell og prototyp er lik, reduseres ligning 1.1 til ligning 1.2. L_r er forholdet mellom lengde i modell og lengde i prototyp, altså målestokk.

$$V_r = \sqrt{L_r} \quad (1.2)$$

Basert på ulike krav som hensyn til skalaeffekter, plassbegrensning, begrensning i vanntilførsel og økonomiske rammer ble det for Stasjonselvmodellen valgt en målestokk på 1/15 [Buuer, 2012]. Dette fører til skaleringsfaktorer som vist i tabell 1.1.

Parameter	Formel	Forhold gitt ved L_r	$L_r = 1/15$
Lengde	L	L_r	1/15
Hastighet	$V = L/T$	$V_r = L_r^{1/2}$	1/3,87
Tid	$T = L/V$	$T_r = L_r^{1/2}$	1/3,87
Vassføring	$Q = AV = L^2V$	$Q_r = L_r^{5/2}$	1/871
Volum	$Vol = L^3$	$Vol = L^3$	1/3375

Tabell 1.1: Skaleringsfaktorer/-forhold

Ved bestemmelse av målestokk må det tas hensyn til at man ikke velger en så liten målestokk at skalaeffekter oppstår. Når Froudes modellov benyttes er det i hovedsak overflatespenninger i veldig grunt eller ikke-turbulent vann som kan bli et problem. I vår modell vil det alltid være turbulent strømning så man vil ikke få problemer med overflatespenninger [Glover et al, 2003].

Kapasiteten til inntaksbassenget er anslått til 400m^3 , eller tilnærmet 118 liter i modellmålestokk [Buuer, 2012]

1.3 Sedimenter

Ved skalering av sedimenter må ligning 1.3 tilfredstilles [Glover et al, 2003]. Tyngdetettheten til stein og vann i modell er lik, og ligning 1.3 reduseres derfor til ligning 1.4. Sedimentstørrelsen (diameter) skaleres derfor likt som lengden.

$$D_r = \frac{L_r}{(\rho_s - \rho_w)_r} \quad (1.3)$$

$$D_r = L_r \quad (1.4)$$

2. Testoppsett og testrutiner

2.1 De ulike spyleløsningene

Det ble i alt testet for 5 forskjellige spyleløsninger:

1. Parallellspyling (figur 2.1)
2. Parallellspyling med ledevegg (figur 2.1)
3. Parallellspyling med ledevegg og strømledekloss (figur 2.1)
4. Sidespyling / spyling normalt på vasstrømretning (figur 2.3)
5. Spyling under inntaket (figur 2.4)

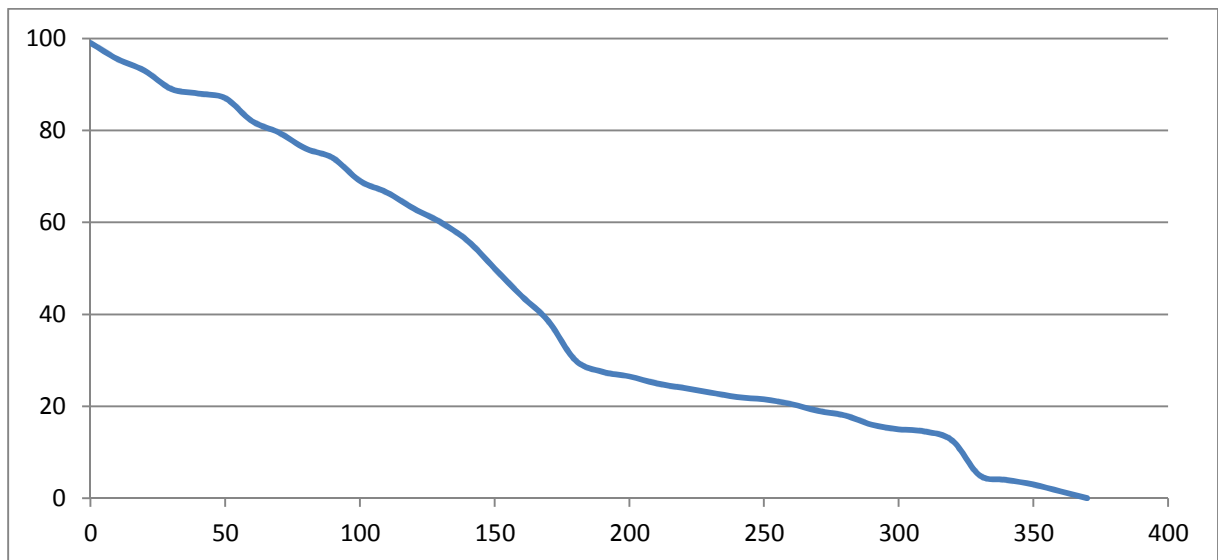
2.1.1 Parallellspyling (alle versjoner)

Parallellspyling ble utført gjennom et lukearrangement til høyre for selve inntaket, sett fra nedstrøms side. Spyleluken som ble benyttet var 18 cm bred og 15 cm høy (prototyp: 2,7 m * 2,25 m). Lukedimensjonene er basert på forsøk gjort av Magnus Buuer der han kom frem til at gitt lukedimensjon fungerte bra [Buuer, 2012].

I et forsøk på å optimalisere spyleløsningen ble det utført forsøk med ledevegg i bassenget, samt forsøk med ledevegg og strømledekloss. Ledevæggen ble plassert i området der det ellers ville vært et dødområde med spyling mens strømledeklossen ble plassert ved innløpet til bassenget for å prøve å rette vannstrømmen inn mot dette dødområdet. Strømledeklossen som den er i denne modellen vil sannsynligvis ikke være aktuell å lage i et inntak i det virkelige liv da den må tåle ekstremt store påkjenninger av stein og is og vil være vanskelig å få robust nok. Den er derfor bare tatt med for å teste prinsippet med å kontrollere strømningsretningen inn i magasinet. For å få en slik løsning robust nok vil det for eksempel måtte benyttes store mengder jernbanesviller støpt inn i betongen eller sprenges ut i fjell.



Figur 2.1: Parallellspyling. Her med både ledevegg og strømledekloss slik modellen var ved oppstart.



Figur 2.2: Lengdeprofil parallellspyling. Målt langs spylevei (via spyleluke). Spyleluke ved $L = 250$ cm.

2.1.2 Sidespyling

Ved sidespyling ble det montert en spyleluke direkte ut til høyre i bassenget, sett fra inntaket og mot bassenget. For å få likest mulig forhold mellom løsningene ble det benyttet samme lukedimensjoner her som for parallellspyling: 18 cm bred og 15 cm høy (prototyp: 2,7 m * 2,25 m).



Figur 2.3: Sidespyling

2.1.3 Spyling under inntaket

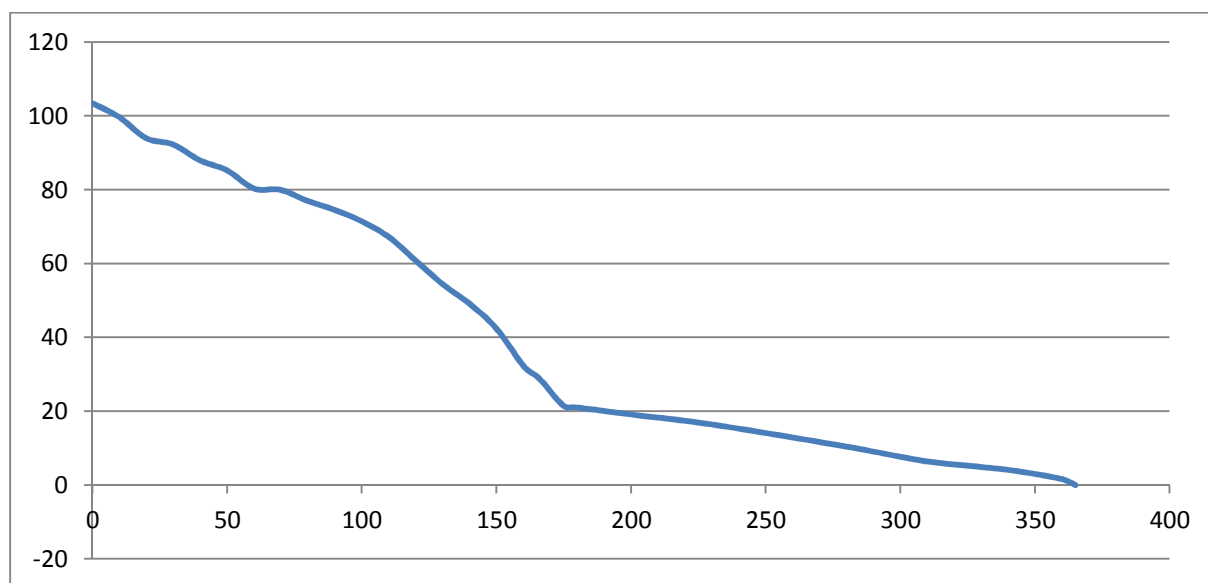
Spyling under inntaket ble testet ved at det i underkant av oppstrøms inntaksvegg ble laget en luke på 18 cm bredde og 14 cm høyde (prototyp: 2,7 m * 2,1 m). Luken var plassert i slutten av en spylekanal som går på langs i bassenget.

På grunn av tidsmangel var det ikke tid til store modifikasjoner av modellen, og det ble i hovedsak benyttet eksisterende løsninger som dukket opp da det ble satt i gang med graving i bassenget. Dette resulterte i at luken for denne spyleordningen ble en cm lavere enn for de andre løsningene. I tillegg har spylekanalen sannsynligvis en lite ideell form i at den er rektangulært formet og danner “hyller” på hver side i bassenget som sedimentene kan ligge

på. Man vil derfor ikke få spylt like mye sedimenter som om sidene skrået ned mot spylekanalen med en helning større enn rasvinkelen til sedimentene.



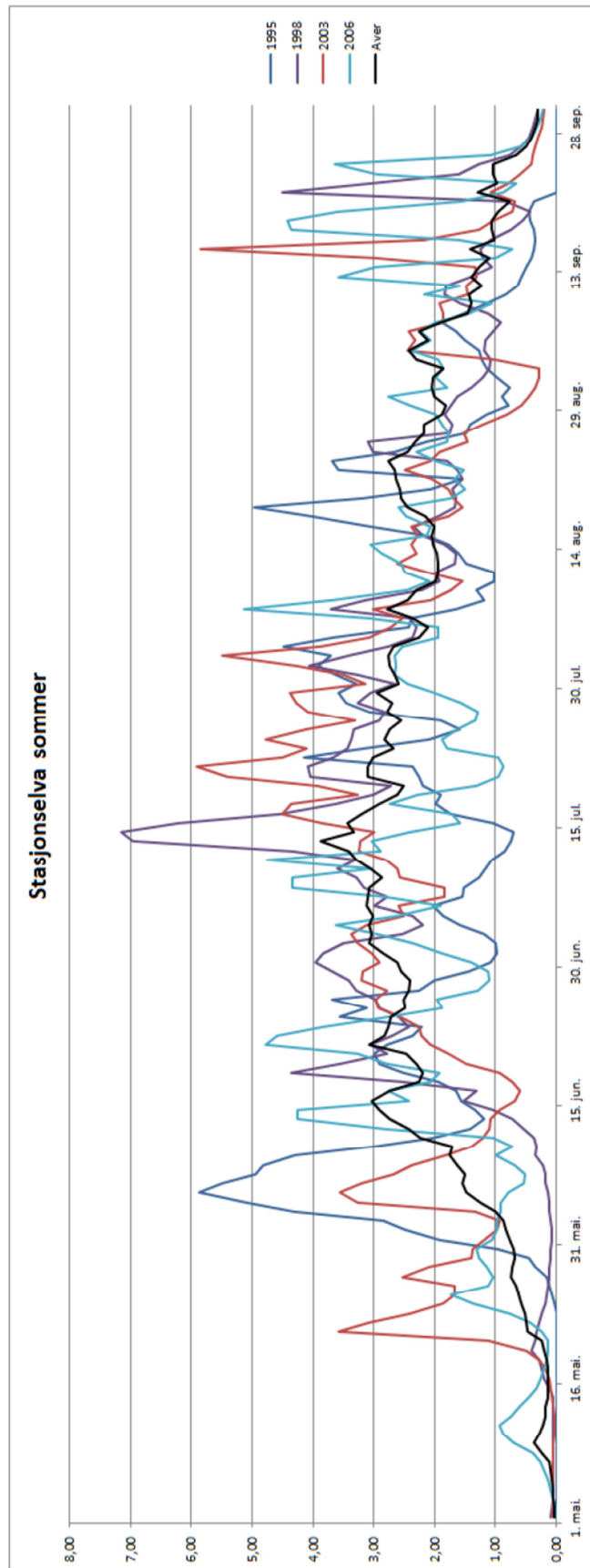
Figur 2.4: Spyling under inntaket.



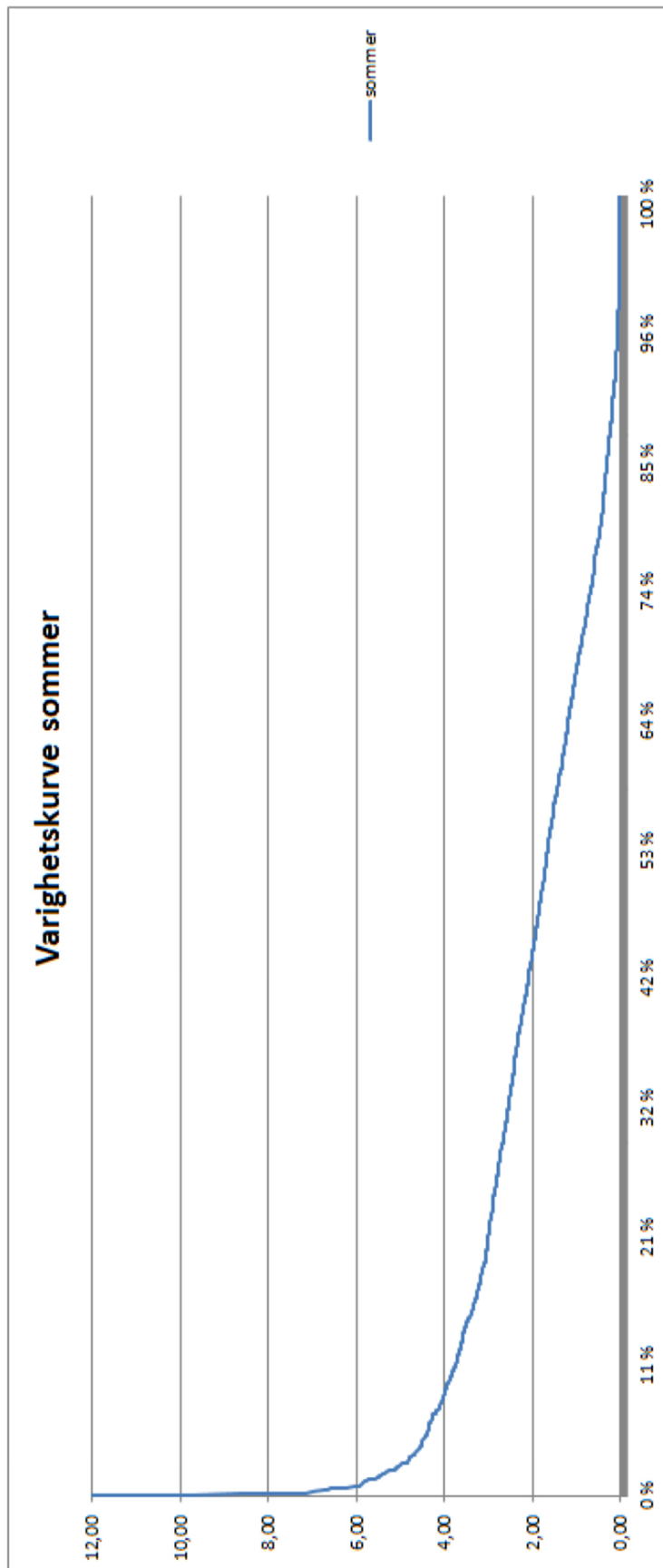
Figur 2.5: Lengdeprofil for spyling under inntak, målt langs spylevei. Inntakskonstruksjon ved $L = 230 - 280$ cm.

2.2 Vassføring

For å bestemme aktuelle vassføringer ble kurvene i figur 2.6 og figur 2.7 lagt til grunn. Fra varighetskurven i figur 2.7 ser vi at vassføringen er på $4\text{m}^3/\text{s}$ eller mer ca. 8% av tiden, $3,5\text{m}^3/\text{s}$ eller mer ca 13% av tiden og $3\text{m}^3/\text{s}$ eller mer ca.20 % av tiden. $4\text{m}^3/\text{s}$ er valgt som en øvre grense da vassføringer over dette oppstår såpass sjelden at det blir vanskelig å forutsi når man kan spyle. De to laveste vassføringene er valgt for å se hvordan løsningene fungerer ved lavere vassføringer som oppstår oftere slik at man blir mindre avhengig av været og om det eventuelt er forskjeller i effektivitet og vannmengde brukt til spyling.



Figur 2.6: Vassføringskurve for Stasjonselv. Vassføringsdata for sommerhalvåret i 1995, 1998, 2003 og 2006 samt gjennomsnitt av disse.



Figur 2.7: Varighetskurve for Stasjonselv

2.3 Sedimenter

Ved valg av sedimenter dukket det opp flere problemstillinger:

1. Ikke-eksisterende kornfordelingsmålinger fra bassenget ved Stasjonselvinntaket
2. Unngå kohesjon i sedimentene
3. Unngå at sedimenter havner i pumpesystemet i Vassdragslaboratoriet
4. Tilgjengelighet

På grunn av plassmangel og begrenset med tid var det ikke mulighet til å bygge sedimenteringsbasseng etter inntaket i modellen for å fange opp fine sedimenter. I samråd med veileder ble det derfor bestemt at det ikke skulle brukes sedimenter med diameter mindre enn 4 mm for å skåne pumpesystemet i Vassdragslaboratoriet. Det har derfor blitt testet for spyling for grove sedimenter (tabell 1.2), noe som vil føre til konservative resultater. For å kontrollere at man får konservative resultater med en såpass grov fordeling ble det foretatt en testserie av valgt kornfordeling sammen med en kornfordeling med innskudd av sand og finere grus med diameter ned til 1 mm. Ideelt sett skulle det vært kontrollert med enda finere sedimenter, men dette ville medført store sedimentmengder i pumpesystemet og var derfor ikke mulig.

Kornstørrelse modell	Kornstørrelse prototyp	Hovedkornfordeling	Kontrollkornfordeling
1-4 mm	15-60 mm	0	29 %
4-8 mm	60-120 mm	40 %	29 %
8-16 mm	120-240 mm	40 %	29 %
16-32 mm	240-480 mm	20 %	14 %

Tabell 2.1: Valgt kornfordeling.

Kontrollmålingene ble foretatt 6 ganger med hovedkornfordeling og 5 ganger med kontrollkornfordelingen. Målingene ble gjort med parallellspyling med ledevegg (figur 2.1) siden det var i denne tilstanden modellen var ved oppstart prosjekt, og bassenget ble fylt ca. 75% fullt (89 liter sedimenter i modellen) og ikke 100% fullt for å unngå at de finere sedimentene forsvant i inntaket. Resultatene av målingene kan ses i tabell 2.2.

Testnr	Hovedkornfordeling	Kontrollkornfordeling
1	2min 40s	2min 15s
2	2min 40s	2min 25s
3	2min 30s	2min 25s
4	2min 30s	2min 25s
5	2min 45s	2min 35s
6	2min 50s	
Gjennomsnitt	2min 39s	2min 25s
Standardavvik	7,3s	6,3s

Tabell 2.2: Måling av forskjell i spyletid mellom de to kornfordelingene.

Fra resultatene i tabell 2.2 går det frem at differansen er på 14 sekunder, eller om lag to standardavvik. Man kan derfor med god nok sikkerhet konkludere med at det er konservativt å gå videre med den groveste kornfordelingen.

En del av de større sedimentene består av stein og blokk (se figur 1.1) med irregulær form (ikke typisk elvestein), og for å ta høyde for dette ble en del av de grovere sedimentene tatt fra maskinknust masse.

2.4 Testrutiner

For å få mest mulig like forhold ble alle forsøkene gjort ved å momentant åpne spyleluken 100%. Dette fører til at man vil få en bedre spyleeffekt i starten siden man unngår spyling ved delvis åpen spyleluke, men siden man her i hovedsak skal undersøke hvordan spyleløsningene fungerer samt forskjellen mellom de, og ikke optimaliserte løsninger for hvert spylingsalternativ, vil dette gi resultater som er korrekte nok..

Slutt spyling er satt til når vannet har laget seg en kanal i bassenget som er fri for sedimenter i bunnen. Det vil fortsatt være en viss spyling etter dette, men spyleintensiteten vil være veldig lav da det bare er sedimenter fra ytterkant av vannet som dras med enkeltvis. I en driftsituasjon er det tenkt at dette kan være en naturlig stopp for spyling for å ikke bruke mye vann på å spyle relativt små mengder med sedimenter.

For å få et innblikk i hvordan spyleeffekten varierer i forhold til fyllingsgrad ble det gjort forsøk med volumene vist i tabell 2.3. I tillegg ble det for parallellspyling med ledevegg og strømldekloss testet med 37,5%, 67% og 87,5% fyllingsgrad. De ekstra testene ble gjort da det i påvente av modelldata fra Magnus Buuer var tid til overs. Dataene var nødvendige da det ved oppstart av testing ble opplyst om at det hadde blitt gjort endringer på modellen slik at den ikke lenger var korrekt i forhold til prototyp, men det viste seg å ikke stemme og de ekstra testene er derfor tatt med under resultater.

Fyllingsgrad	25%	50%	75%	100%
Volum modell	29 l	59 l	89 l	118 l
Volum prototyp	100 m ³	200 m ³	300 m ³	400 m ³

Tabell 2.3: Fyllingsgrad og sedimentvolum i basseng

Sedimentene ble forsiktig tilsatt i overkant av modellen og ført inn i bassenget ved hjelp av vannet i elva ved en vassføring på ca 8 l/s (ca. 7 m³/s). Grunnen til den høye vassføringen er å simulere en flom da det er under flom det kommer mest sedimenter.

Vassføringene det er testet for er, som nevnt i avsnitt 2.2, $4 \text{ m}^3/\text{s}$, $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ og $3 \text{ m}^3/\text{s}$. I tillegg er det testet ved å tilsette 4 store blokker ved $4 \text{ m}^3/\text{s}$ for å se hvordan dette påvirker spylingen. Blokkene ble tilsatt jevnt gjennom fylling av sedimtene, ved 0%, 33%, 66% og 100% av tilsatt mengde.



Figur 2.6: Blokker tilsatt sedimentene ved $4 \text{ m}^3/\text{s}$

Det ble gjennomført tester for spyleintensitet for hver spyleløsning. Dette ble gjort ved å åpne og lukke spyleluke momentant i intervall på 31 sekunder (2 minutt i prototypeskala) og måle sedimentvolumet spylt. Målt sedimentvolum ble så justert til prototypeskala og delt på to minutter for å finne et anslag for spylt sedimentvolum per minutt. Spyleintensiteten blir så

Testmetodikken vil sannsynligvis gi en litt høyere spyleintensitet enn man egentlig opplever da man vil få ekstra god spyling ved starten av hvert spyleintervall (i det vannet slippes ut drar det med seg litt ekstra sedimenter), men for sammenligning mellom de ulike løsningene vil det være tilstrekkelig nøyaktighet.

Det ble forsøkt å tappe ned bassenget før starten av spyleintervallene, men dette ble ikke vellykket da man begynner å spyle sedimentene inne i bassenget straks vannspeilet er lavere enn sedimentene. For å løse dette kunne man montert en ventil i tilførselsystemet som momentant kunne stoppet og startet tilførselen av vann, eller man kunne utstyrt modellen med et sedimentmålesystem etter inntaket som registrerte sedimentmassen/-volumet fortløpende, men dette lot seg ikke gjøre med den tiden som var til disposisjon.

3. Resultater

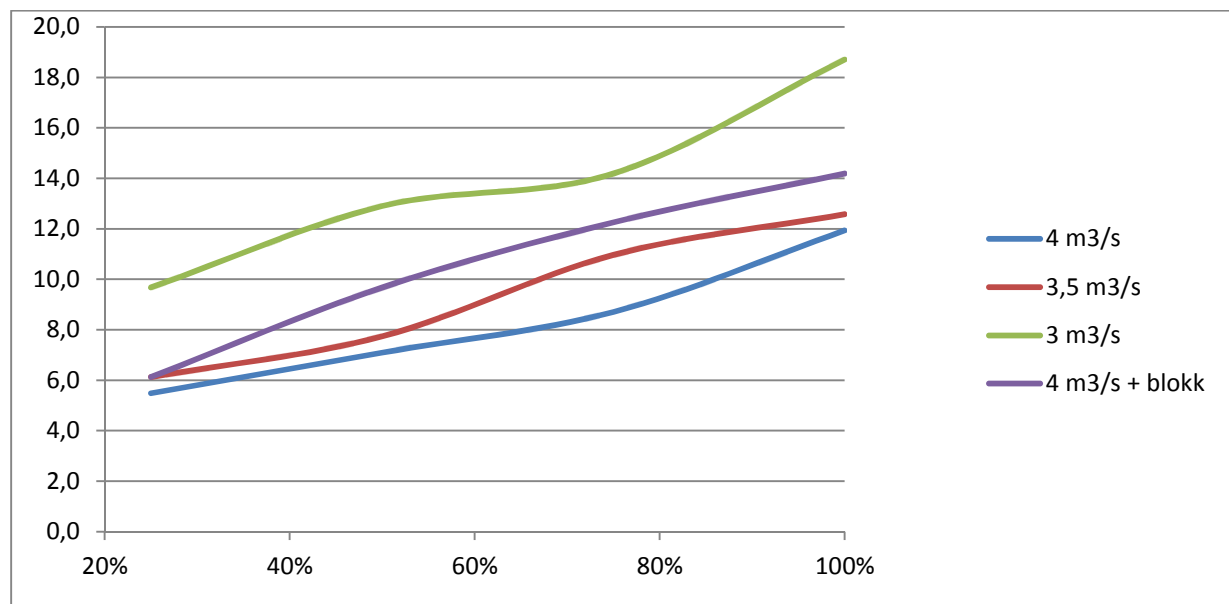
3.1 De ulike løsningene

3.1.1 Parallellspyling

I figur 3.1 ser man at det ikke er stor forskjell på spyling med $4 \text{ m}^3/\text{s}$ og $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Det er et lite hopp opp i spyletid til $3 \text{ m}^3/\text{s}$, men selve spylingen fungerer fortsatt uten problemer. Man ser også at tilsetning av blokker reduserer spyleeffektiviteten, men ikke mer enn at spyleløsningen fortsatt fungerer bra.

	4,59 l/s = 4 m ³ /s		4,02 l/s = 3,5 m ³ /s		3,45 l/s = 3 m ³ /s		4,59 l/s = 4 m ³ /s med 4 blokker	
Fyllingsgrad	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp
100%	3,1	11,9	3,3	12,6	4,8	18,7	3,7	14,2
75%	2,3	8,7	2,8	11,0	3,7	14,2	3,2	12,3
50%	1,8	7,1	2,0	7,7	3,3	12,9	2,5	9,7
25%	1,4	5,5	1,6	6,1	2,5	9,7	1,6	6,1

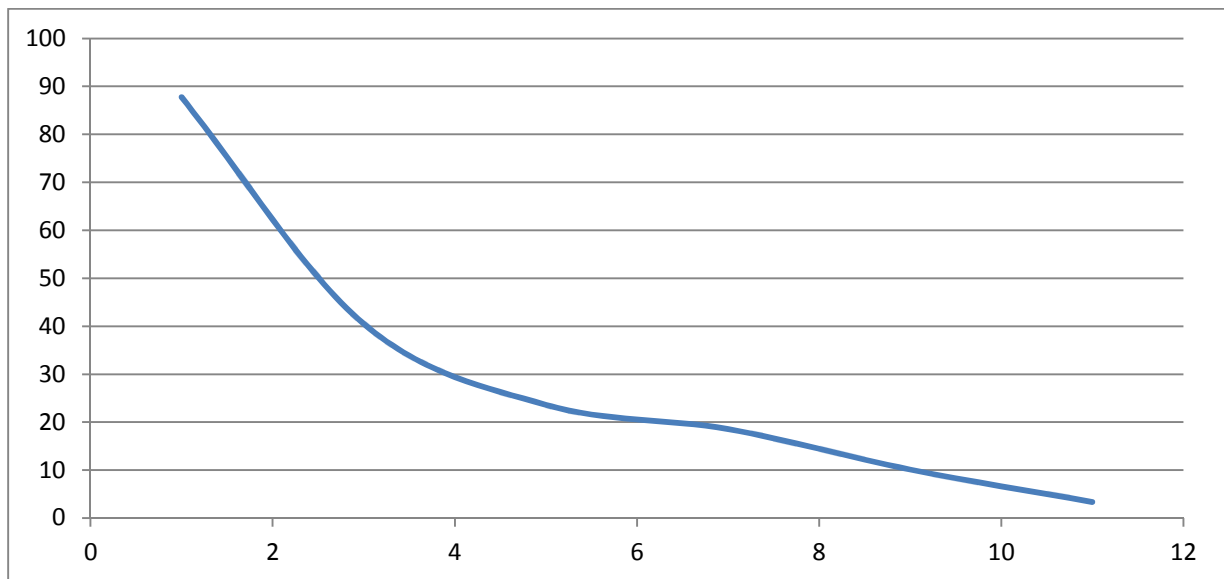
Tabell 3.1: Spyletid i minutter for parallellspyling



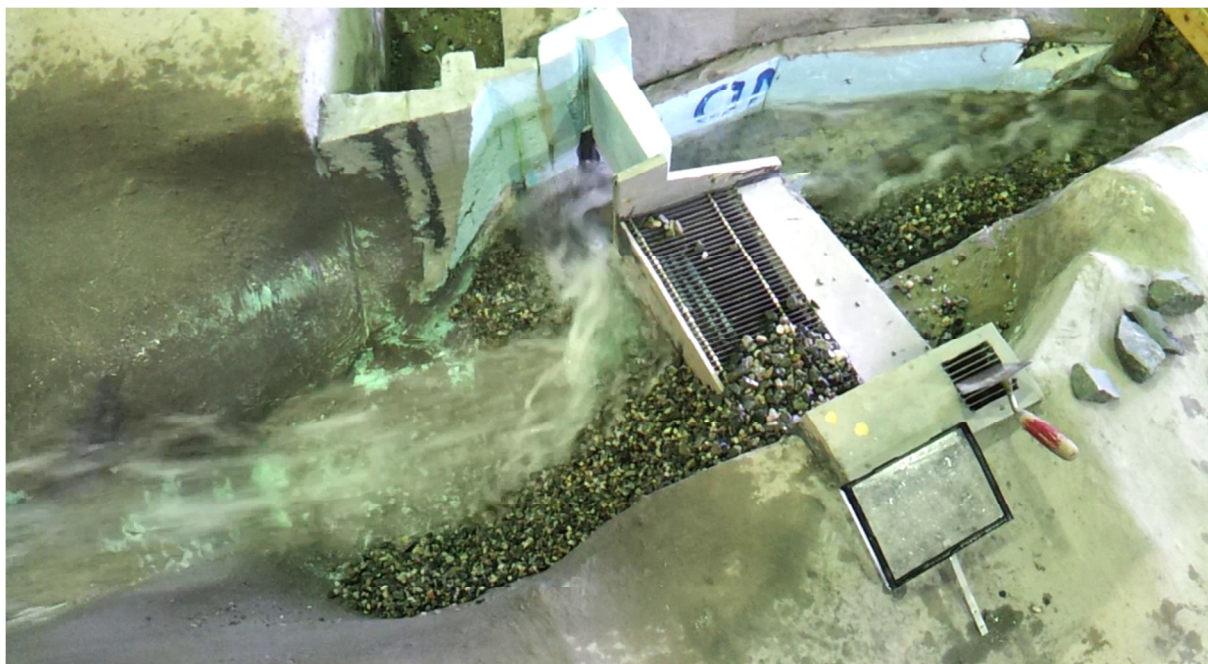
Figur 3.1: Spyletid i minutter for parallellspyling (prototypeskala)

	4,59 l/s = 4 m ³ /s		4,02 l/s = 3,5 m ³ /s		3,45 l/s = 3 m ³ /s		4,59 l/s = 4 m ³ /s med 4 blokker		
Fyllingsgrad	m ³	Andel	m ³	Andel	m ³	Andel	m ³	Andel	Blokker spylt
100%	33,8	8 %	40,5	10 %	47,25	12 %	27,0	7 %	3
75%	23,6	6 %	27,0	7 %	37,13	9 %	23,6	6 %	1
50%	13,5	3 %	15,2	4 %	21,94	5 %	6,8	2 %	2
25%	11,8	3 %	13,5	3 %	13,50	3 %	13,5	3 %	4

Tabell 3.2: Sedimentvolum igjen (i prototypskala) og andel av totalt bassengvolum igjen med sedimenter



Figur 3.2: Spyleintensitet i prototypskala. Y-aksen angir antall kubikkmeter sediment spylt per minutt og x-aksen angir tidspunkt i spyleprosessen.



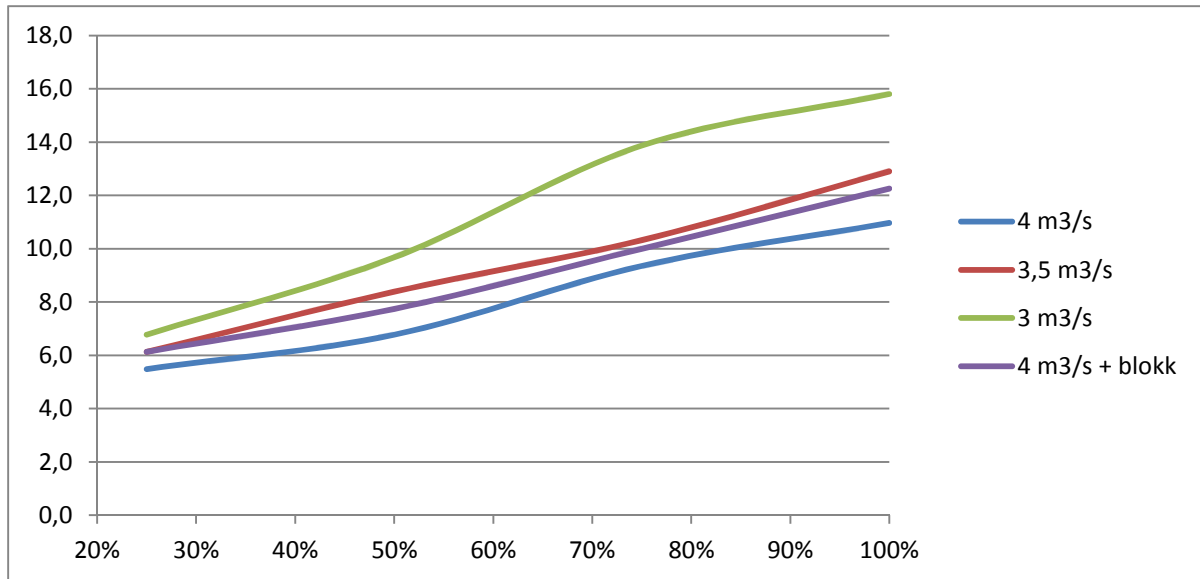
Figur 3.3: Sedimentforhold i inntaket ved slutten av spyling. $4 \text{ m}^3/\text{s}$ og 100% fyllingsgrad

3.1.2 Parallellspyling med ledevegg

Figur 3.4 viser at også denne løsningen fungerer bra med alle vassføringer, men at det, som det også gjorde uten ledevegg, blir et hopp i tid når man går ned til $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Tilsetning av blokker påvirker i liten grad spyletiden i testene utført.

	4,59 l/s = 4 m ³ /s		4,02 l/s = 3,5 m ³ /s		3,45 l/s = 3 m ³ /s		4,59 l/s = 4 m ³ /s med 4 blokker	
Fyllingsgrad	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp
100%	2,8	11,0	3,3	12,9	4,1	15,8	3,2	12,3
75%	2,4	9,4	2,7	10,3	3,6	13,9	2,6	10,0
50%	1,8	6,8	2,2	8,4	2,5	9,7	2,0	7,7
25%	1,4	5,5	1,6	6,1	1,8	6,8	1,6	6,1

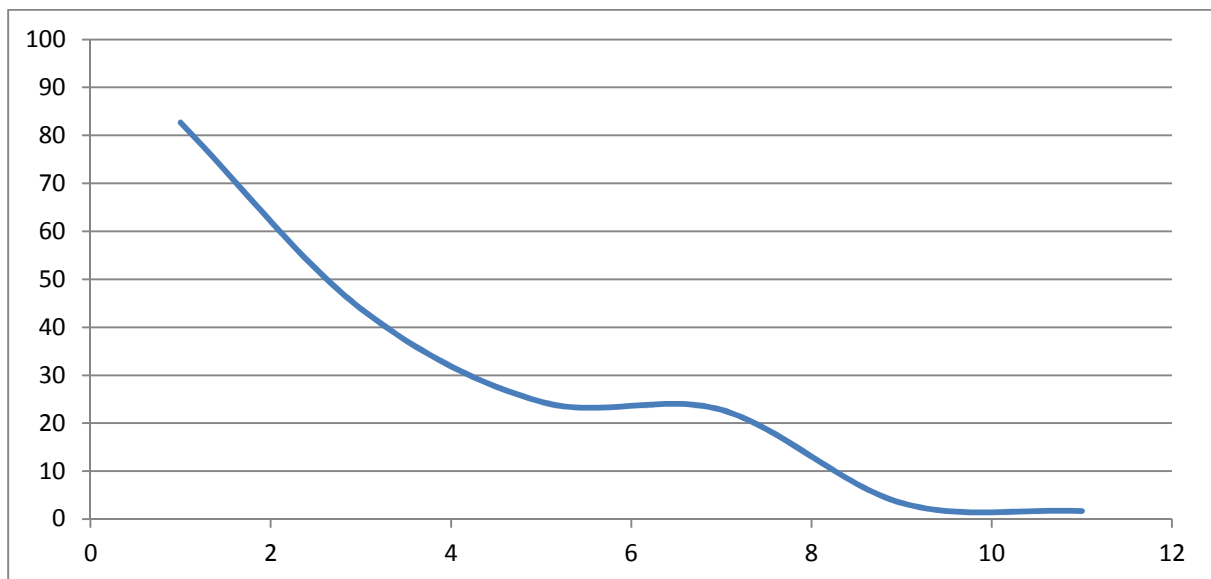
Tabell 3.3: Spyletid i minutter ved parallellspyling med ledevegg



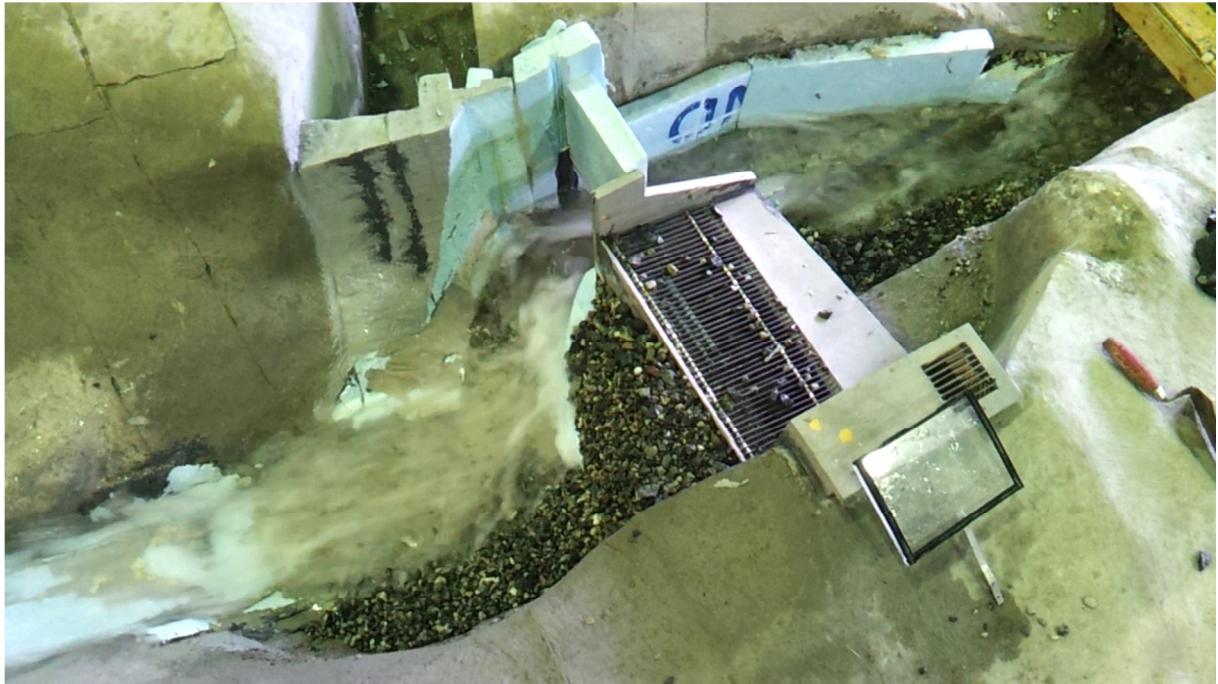
Figur 3.4: Spyletid i minutter ved parallellspyling med ledevegg.

Fyllingsgrad	4,59 l/s = 4 m3/s		4,02 l/s = 3,5 m3/s		3,45 l/s = 3 m3/s		4,59 l/s = 4 m3/s med 4 blokker		
	m3	Andel	m3	Andel	m3	Andel	m3	Andel	Blokker spylt
100%	47	12 %	41	10 %	47	12 %	42	11 %	2
75%	39	10 %	37	9 %	41	10 %	30	8 %	4
50%	12	3 %	12	3 %	19	5 %	12	3 %	3
25%	7	2 %	7	2 %	10	3 %	7	2 %	1

Tabell 3.4: Sedimentvolum igjen (i prototypskala) og andel av totalt bassengvolum igjen med sedimenter



Figur 3.5: Spyleintensitet i prototypskala. Y-aksen angir antall kubikkmeter sediment spylt per minutt og x-aksen angir tidspunkt i spyleprosessen.



Figur 3.6: Sedimentforhold i inntaket ved slutten av spyling. $4 \text{ m}^3/\text{s}$ og 100% fyllingsgrad

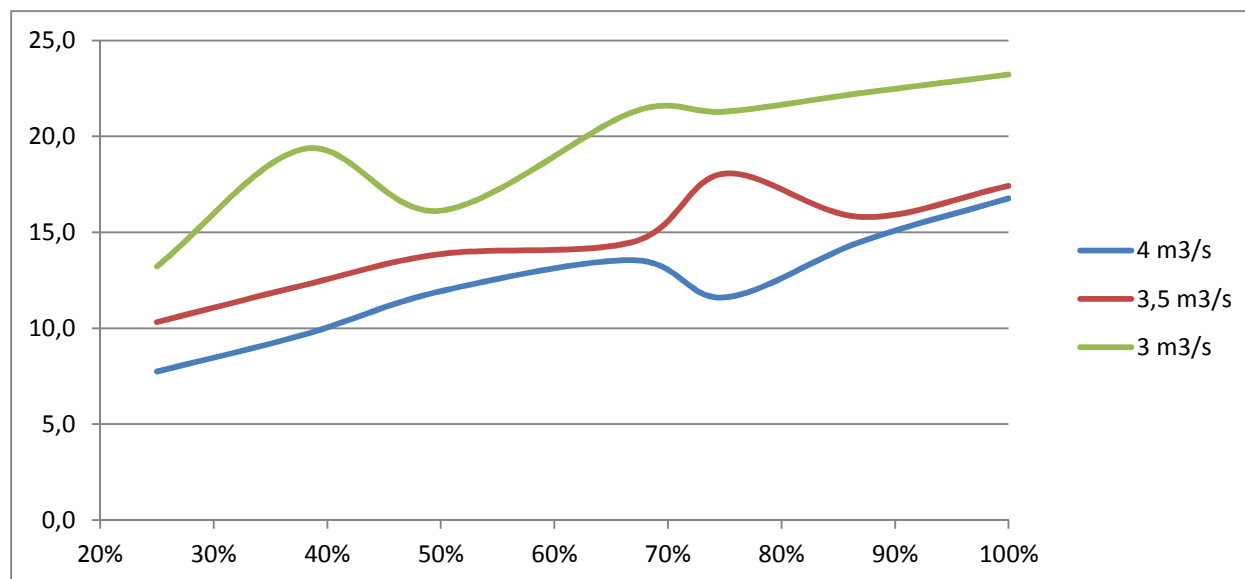
3.1.3 Parallellspyling med ledevegg og strømledekloss

Denne løsningen ble testet for å se hvordan den fungerer i prinsippet. Strømledekloss fungerer slik at vannet blir delt i to for at den ene delen skal få spyle ut i siden der sedimentene vanligvis blir liggende. Tabell 3.5 og figur 3.7 viser at denne løsningen gir en solid økning i spyletid (35%, 26% og 47% økning ved henholdsvis 4 m³/s, 3,5 m³/s og 3 m³/s i forhold til spyling med ledevegg uten strømledekloss), ledeklossen virker nesten som en energidreper, men til gjengjeld får man spylt alt av tilgjengelige sedimenter (figur 3.8).

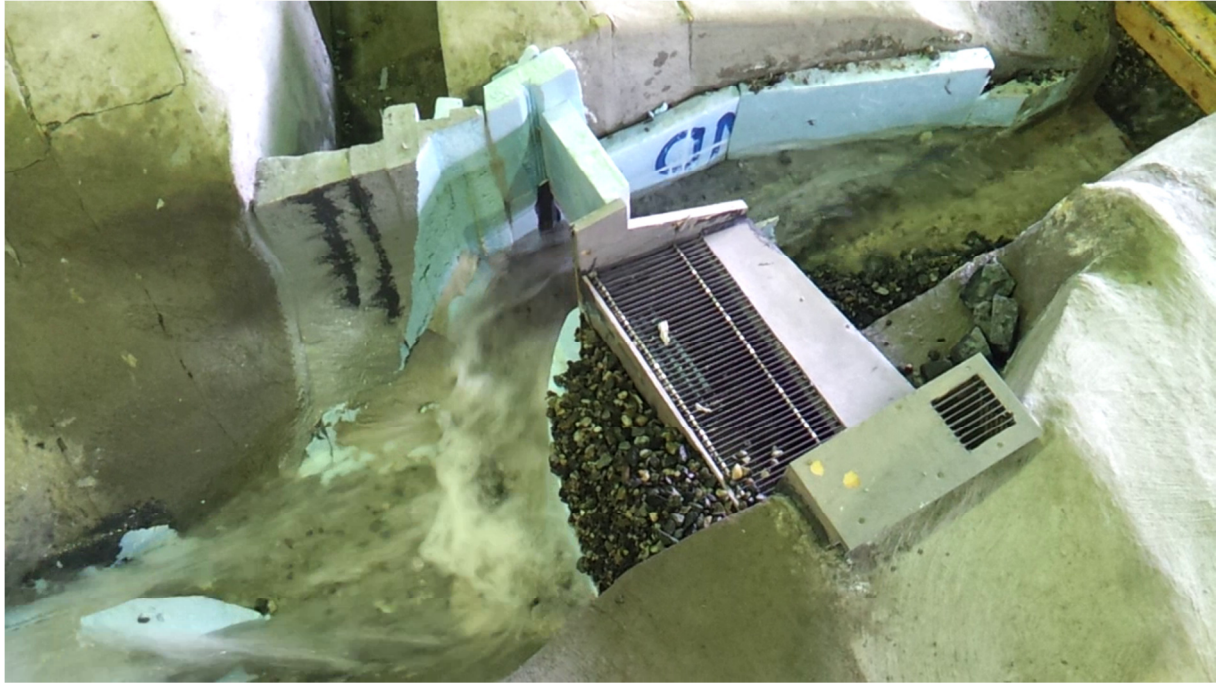
Det var ikke mulig å gjøre forsøk med blokker for denne løsningen da blokkene hadde en tendens til å låse seg fast i ledeklossen og dermed danne en vegg som fungerte som energidreper.

Fyllingsgrad	4,59 l/s = 4 m ³ /s		4,02 l/s = 3,5 m ³ /s		3,45 l/s = 3 m ³ /s	
	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp
100%	4,3	16,8	4,5	17,4	6,0	23,2
87%	3,8	14,5	4,1	15,8	5,8	22,3
75%	3,0	11,6	4,7	18,1	5,5	21,3
67%	3,5	13,5	3,8	14,5	5,5	21,3
50%	3,1	11,9	3,6	13,9	4,2	16,1
38%	2,5	9,7	3,2	12,3	5,0	19,4
25%	2,0	7,7	2,7	10,3	3,4	13,2

Tabell 3.5: Spyletid i minutter ved parallellspyling med ledevegg og strømledekloss.



Figur 3.7: Spyletid i minutter ved parallellspyling med ledevegg og strømledekloss.



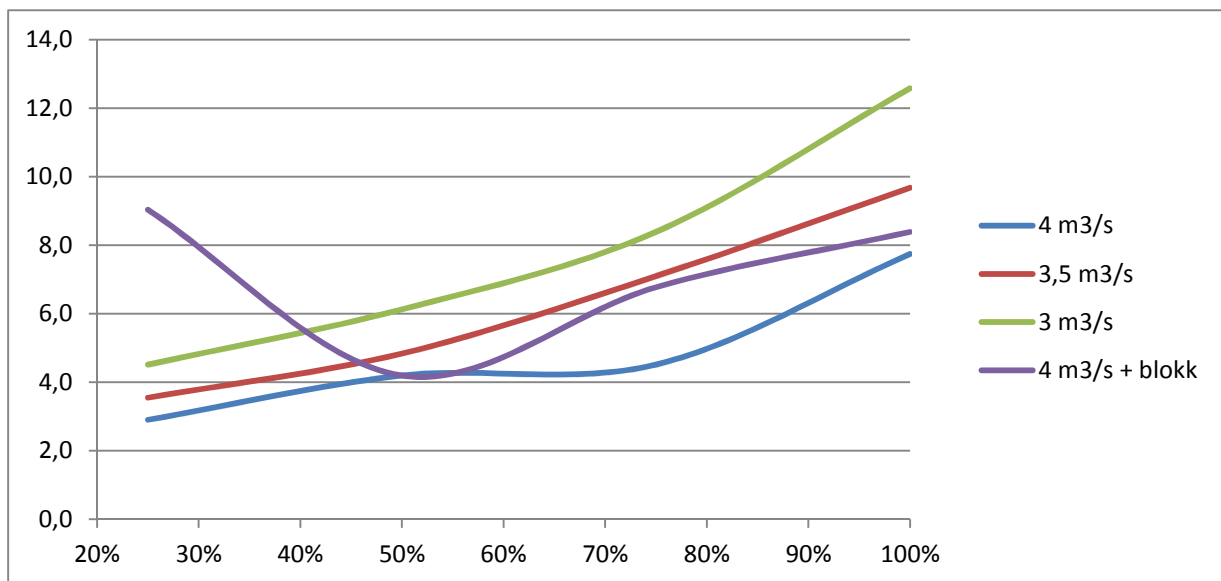
Figur 3.8: Sedimentforhold i inntaket ved slutten av spyling. $4 \text{ m}^3/\text{s}$ og 100% fyllingsgrad

3.1.4 Sidespyling

Sidespyling viste seg å gi svært gode resultater. Med 7,7 minutter spyletid ved 4 m³/s og 100% fyllingsgrad er det den eneste løsningen som blir ferdig på under 10 minutter. Det eneste å lese ut fra resultatene er relativt høy spyletid for 25% fullt basseng med blokker tilsatt. Dette skyldes at to av blokkene la seg i en formasjon som fungerte energidrepende mens en blokk la seg foran spyleluken og sperret for sedimenter (figur 3.12), noe som kan skje for alle løsninger. Man ser at løsningen likevel fungerer bra, selv om spyletiden blir noe lenger.

	4,59 l/s = 4 m ³ /s		4,02 l/s = 3,5 m ³ /s		3,45 l/s = 3 m ³ /s		4,59 l/s = 4 m ³ /s med 4 blokker		
Fyllingsgrad	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp	
100%	2,0	7,7	2,5	9,7	3,3	12,6	2,2	8,4	
75%	1,2	4,5	1,8	7,1	2,2	8,4	1,8	6,8	
50%	1,1	4,2	1,3	4,8	1,6	6,1	1,1	4,2	
25%	0,8	2,9	0,9	3,5	1,2	4,5	2,3	9,0	

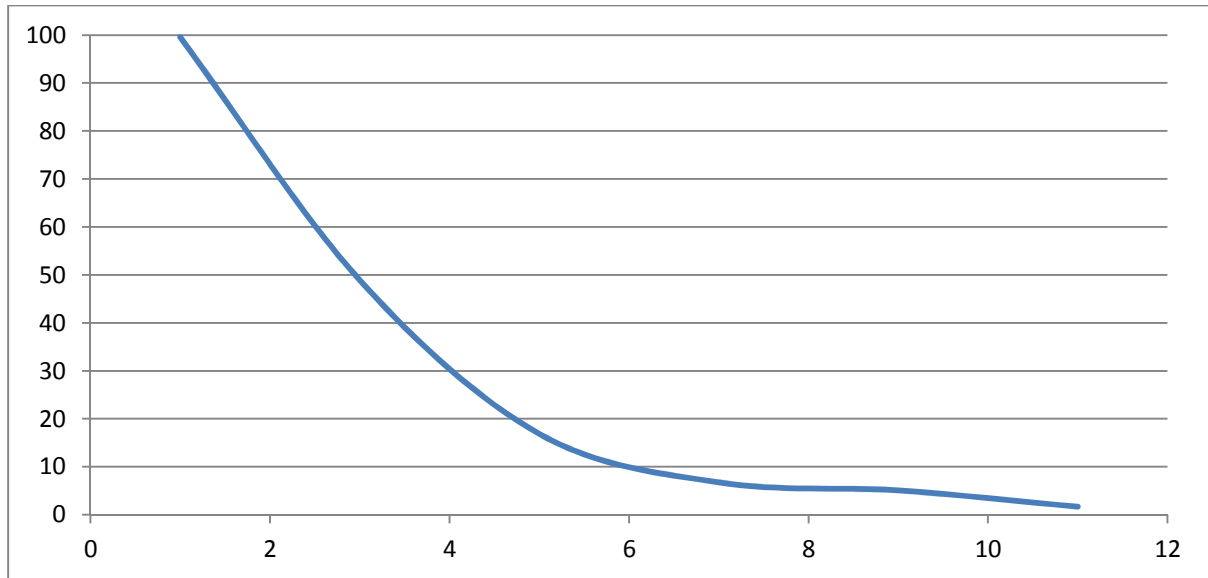
Tabell 3.6: Spyletid i minutter ved sidespyling



Figur 3.9: Spyletid i minutter ved sidespyling

	4,59 l/s = 4 m ³ /s		4,02 l/s = 3,5 m ³ /s		3,45 l/s = 3 m ³ /s		4,59 l/s = 4 m ³ /s med 4 blokker		
Fyllingsgrad	m ³	Andel	m ³	Andel	m ³	Andel	m ³	Andel	Blokker spylt
100%	27	7 %	30	8 %	46	11 %	30	8 %	2
75%	24	6 %	34	8 %	42	11 %	24	6 %	3
50%	12	3 %	14	3 %	15	4 %	10	3 %	4
25%	7	2 %	7	2 %	10	3 %	10	3 %	2

Tabell 3.7: Sedimentvolum igjen (i prototypskala) og andel av totalt bassengvolum igjen med sedimenter



Figur 3.10: Spyleintensitet i prototypskala. Y-aksen angir antall kubikkmeter sediment spylt per minutt og x-aksen angir tidspunkt i spyleprosessen.



Figur 3.11: Sedimentforhold i inntaket ved slutten av spyling. $4 \text{ m}^3/\text{s}$ og 100% fyllingsgrad



Figur 3.12: Blokker (markert med rødt) som hindrer effektiv spyling.

3.1.5 Spyling under inntaket

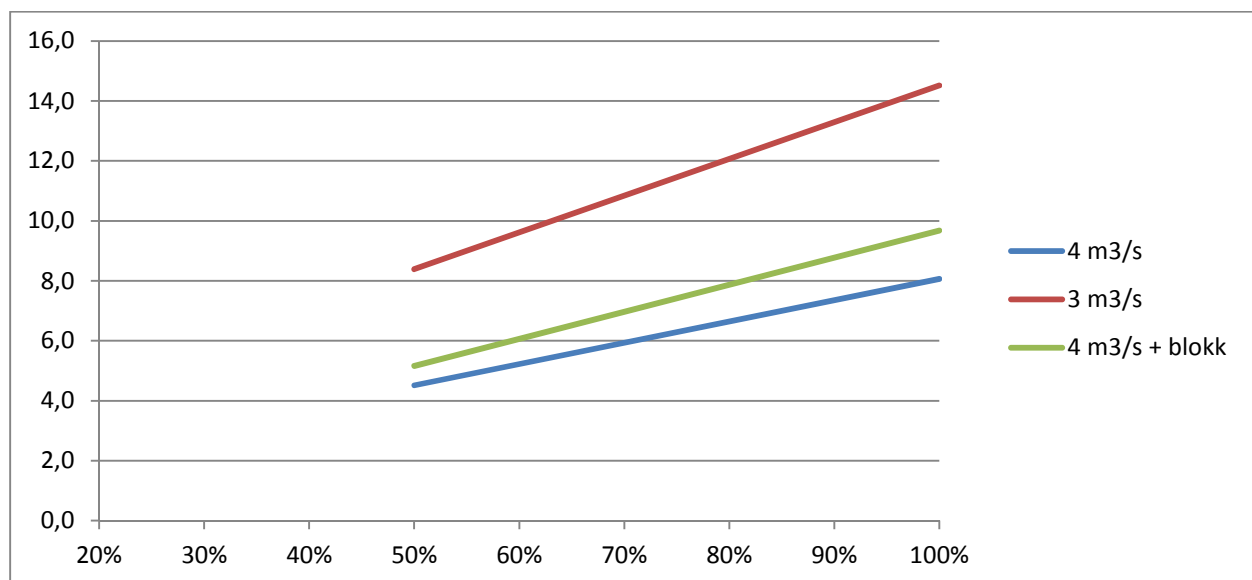
På grunn av uforutsett lang tid til modifisering av modellen (herdetid, dårlig betong) ble det ikke tid til å kjøre en full serie med tester for spyling under inntaket. Ved momentan åpning av luke førte skredet av sedimenter til opphopning i kulverten gjennom inntaket, noe som resulterer i relativt dårlig spyling i starten. Det ble forsøkt å begrense lukeåpningen for å redusere strømmen av sedimenter, men dette hjalp ikke da man også ødela for en effektiv vannstrøm gjennom kulverten.

Det ser ut som om det etter hvert i spylingen danner seg en frispeilstrømning oppunder kulverttaket og når dette oppstår får man en veldig effektiv spyling. For å motvirke dette anbefales det å forsøke med horisontalt kulverttak og en bunn med større helning slik at høyden i kulverten øker gjennom inntaket.

Spesielt mulig blokkering i kulvert er noe som bør testes videre, da dette potensielt kan føre til store kostnader, både i form av tap av vann og reparasjonskostnader.

Fyllingsgrad	4,59 l/s = 4 m ³ /s		3,45 l/s = 3 m ³ /s		4,59 l/s = 4 m ³ /s med 4 blokker	
	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp	Modell	Prototyp
100%	2,1	8,1	3,8	14,5	2,5	9,7
50%	1,2	4,5	2,2	8,4	1,3	5,2

Tabell 3.8: Spyletid i minutter ved spyling under inntaket.



Figur 3.13: Spyletid i minutter for spyling under inntaket. NB: Bare data for 50% og 100% fyllingsgrad.

	4,59 l/s = 4 m ³ /s		3,45 l/s = 3 m ³ /s		4,59 l/s = 4 m ³ /s med 4 blokker		
Fyllingsgrad	m ³	Andel	m ³	Andel	m ³	Andel	Blokker spylt
100%	27	7 %	46	11 %	30	8 %	2
50%	12	3 %	15	4 %	10	3 %	4

Tabell 3.9: Sedimentvolum igjen (i prototypskala) og andel av totalt bassengvolum igjen med sedimenter.



Figur 3.14: Sedimentforhold i inntaket ved slutten av spyling. 4 m³/s og 100% fyllingsgrad

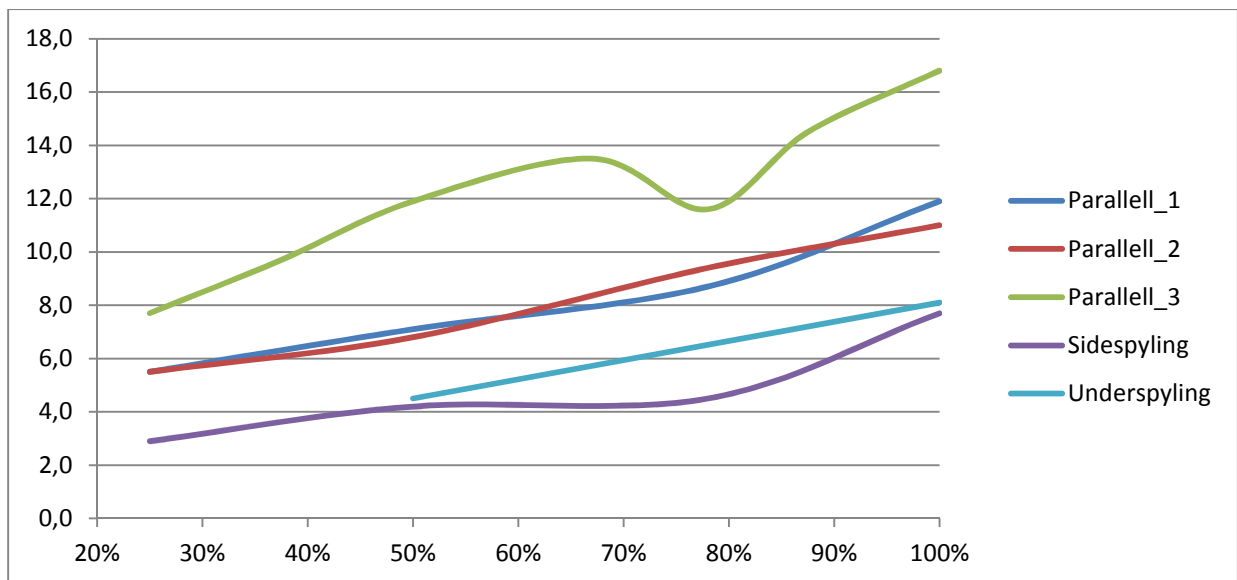
3.2 Sammenligning

3.2.1 Testresultatene

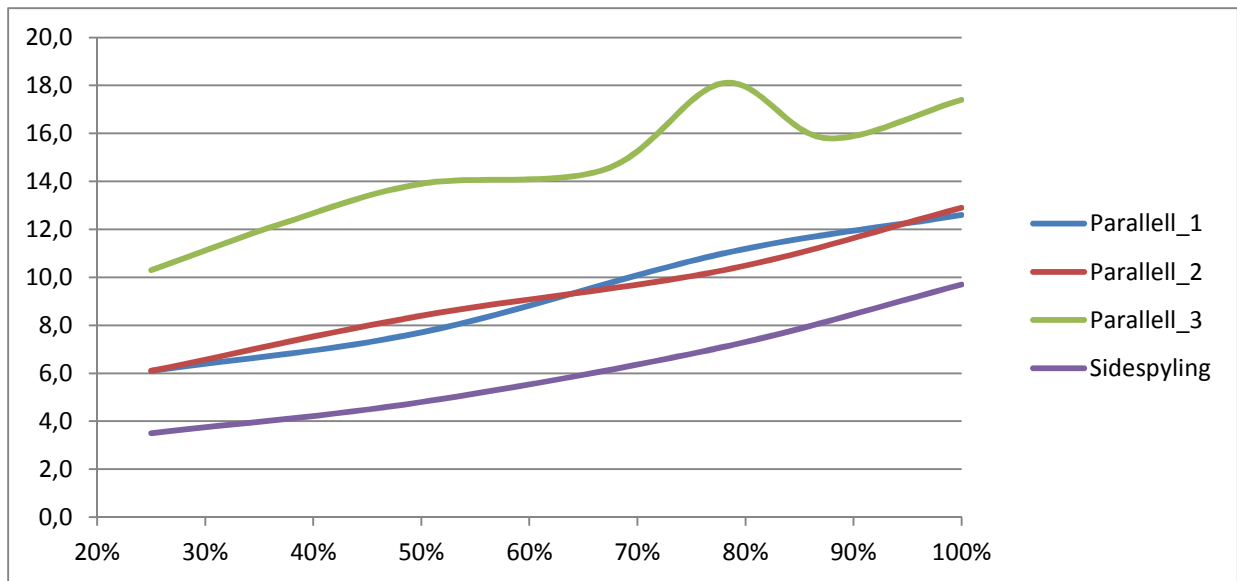
I figurene 3.15 – 3.18 kan man se en sammenligning av spyleresultatene basert på vassføring. Man ser her at løsningen med sidespyling er den mest effektive, mens de få resultatene fra spyling under inntaket viser at denne løsningen også har et stort potensial.

I forhold til parallellspyling kommer løsningene med og uten ledevegg nesten likt ut for $4 \text{ m}^3/\text{s}$ og $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$, mens det for $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ser ut som ledeveggen spiller positivt inn. Under spyling fikk man et veldig likt spylemønster i disse to løsningene, så det er ikke overraskende at de følger hverandre svært tett.

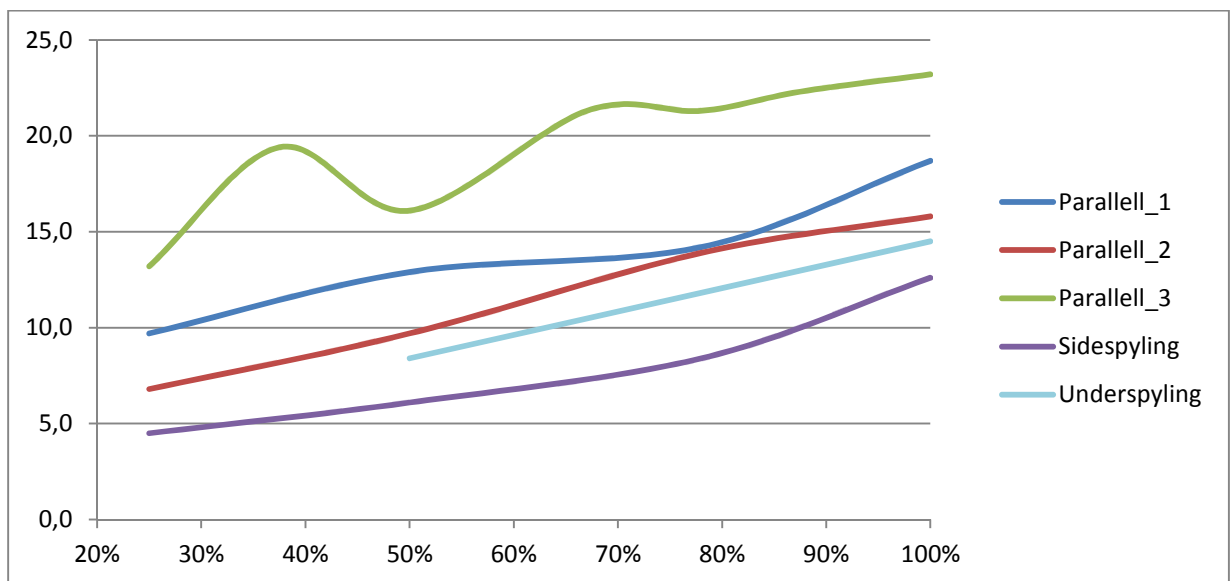
Resultatene bekreftes av spyleintensiteten vist i figur 3.19.



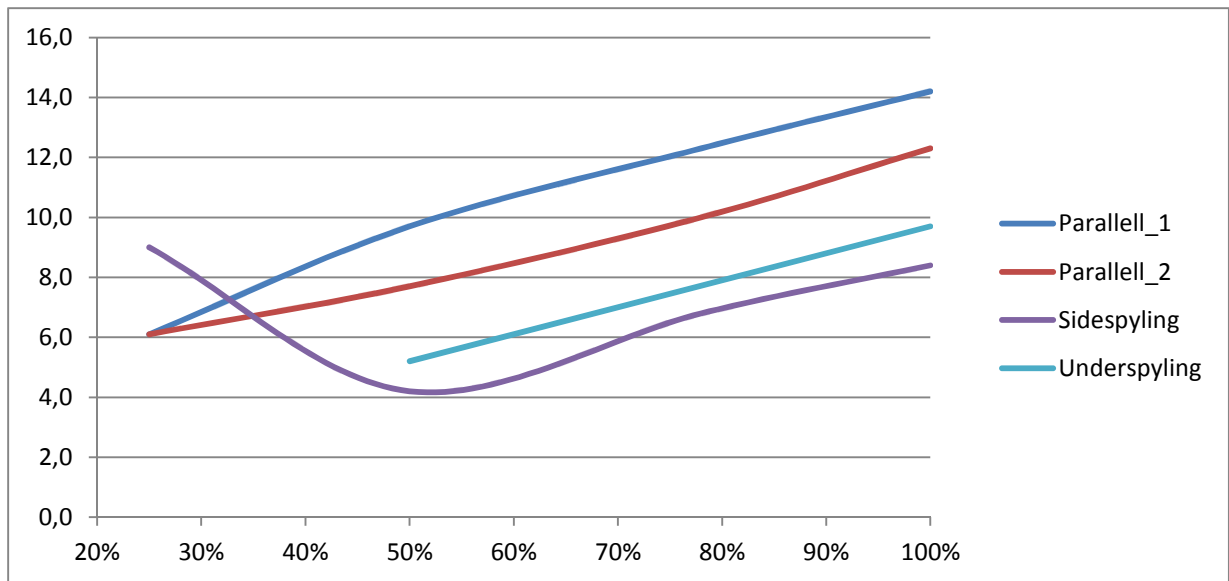
Figur 3.15: Spyletid for de forskjellige løsningene ved $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Parallell_1 = parallellspyling, Parallell_2 er med ledevegg og Parallell_3 er med ledevegg og strømledekloss.



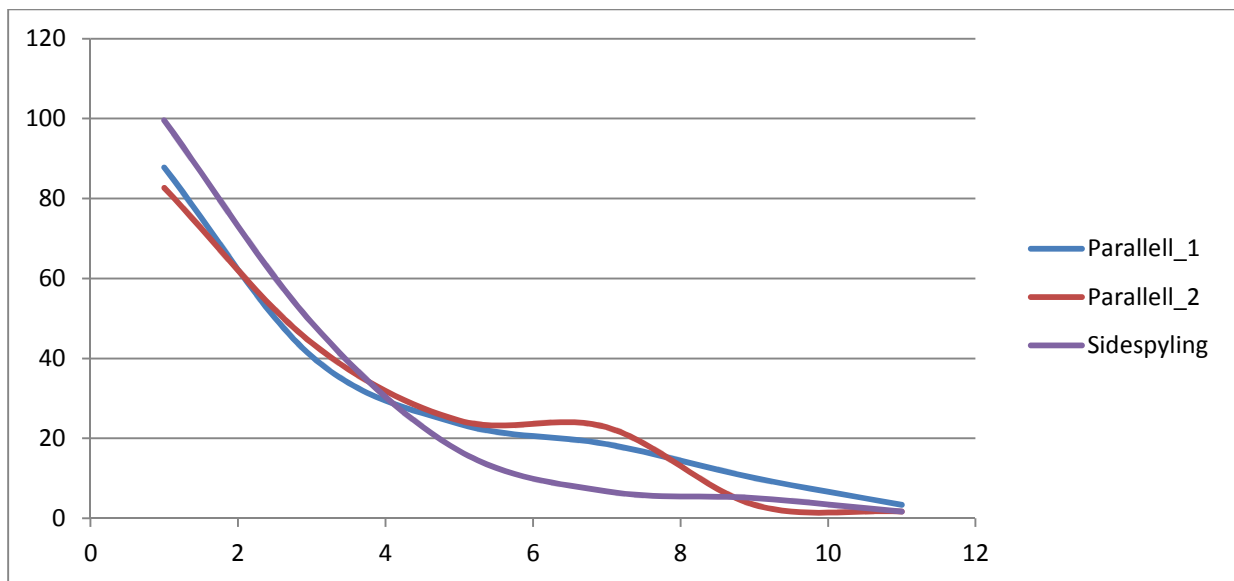
Figur 3.16: Spyletid for de forskjellige løsningene ved 3,5 m³/s. Parallell_1 = parallellspyling, Parallell_2 er med ledevegg og Parallell_3 er med ledevegg og strømledekloss.



Figur 3.17: Spyletid for de forskjellige løsningene ved 3 m³/s. Parallell_1 = parallellspyling, Parallell_2 er med ledevegg og Parallell_3 er med ledevegg og strømledekloss.



Figur 3.18: Spyletid for de forskjellige løsningene ved $4 \text{ m}^3/\text{s}$ og blokker tilsatt. Parallell_1 = parallellspyling og Parallell_2 er med ledevegg.



Figur 3.19: Spyleintensitet

3.2.2 Økonomi

Ved dagens løsning er årlig tap gjennom tapt vassmengde på grunn av blokkert vinterinntak og ising på rist samt åpen tappeluke under fjerning av sedimenter estimert til kr. 140 000 [Buuer, 2012]. Det er her antatt middelvassføring under fjerning av sedimenter og en kraftpris på 40 øre/kWh. I tillegg kommer kostnader for utstyr og lønnskostnader under det krevende arbeidet med manuell tømning.

Ser man på forskjellen i vannmengde brukt mellom beste og dårligste løsning (ekskludert løsning med strømldekloss) får man at man bruker 3366 m³ vann ved å spyle med 3 m³/s i 18,7 minutter (parallelspyling) mens det går med 1848 m³ ved å spyle med 4 m³/s i 7,7 minutter (sidespyling). Ved et fall for Stasjonselv på 606 meter går det henholdsvis 5558 kWh og 3052 kWh tapt ved spyling (ligning 3.1), ekskludert virkningsgrad. Ved å benytte samme pris som Magnus Buuer (40 øre/kWh) blir tapet ved spyling henholdsvis kr. 2223 og kr. 1221.

$$E = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot Q \cdot t \quad (3.1)$$

3.3 Konklusjon

Ut fra resultatene presentert i denne rapporten kan det konkluderes med følgende:

Ved et inntaksbasseng på størrelsen det her er snakk om (cirka 130 m² og 400 m³) fungerer alle løsningene tilfredstillende på alle testede vassføringer (3, 3,5 og 4 m³/s). Av de testede løsningene er sidespyling den mest effektive løsningen i forhold til tid og energi tapt, men med differanse i tapt inntekt på grunn av vanntap i størrelsesorden 1000 – 1500 kroner mellom dårligste og beste alternativ vil det sannsynligvis være andre forhold som bestemmer valg av spyleløsning.

Om man vil ha en fullstendig spyling av bassenget (spyle 100% av sedimentene) virker spyling under inntaket som den beste løsningen. Med vegger i bassenget og inn mot spylekanal brattere enn rasvinkel til sedimentene vil man med en slik løsning kunne få et helt rent basseng, med unntak av de største blokkene. En slik løsning bør gjennomgå flere tester for å kunne konkludere 100% sikkert at man ikke vil ende opp med blokkering i kulvert gjennom inntaket. Midlertidig og ikke permanent blokkering var et problem i startfasen av spyling under testing, men man kan ikke utelukke permanent blokkering basert på antall tester som ble kjørt.

Kildeliste

[Buuer, 2012] Magnus Frankrig Buuer. *Tyrolerinntak – Spyling av grove sedimenter*. Masteroppgave ved Institutt for vann og miljø, NTNU (2012)

[Glover et al, 2003] Brian Glover, Dagfinn Lysne, Håkon Støle og Einar Tesaker. *Hydropower development bind 8: Hydraulic design*. Norwegian University of Science and Technology (2003)

[Paulsen & Grane, 2009] Hans Paulsen og Bjørn Grane. *Sedimenter og miljøutfordringer ved Statkrafts anlegg i Skjomen* (2009)

[Ruud, 2010] Anne Marit Ruud. *Sedimenter i Skjomens vannveier – problemer og løsninger* (2010)

