

RETUR AV LUFT I BEKKEINNTAKSSJAKTER

Sondre Fossheim

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: august 2018

Hovudrettleiar: Leif Lia, IBM

Medveileidar: Morten Skoglund, NVE

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



MASTEROPPGÅVE

Student: **SONDRE FOSSHEIM**

Tittel: **RETUR AV LUFT I BEKKEINNTAKSSJAKTER**

1. BAKGRUNN

Når vasskraft skal byggast ut i alpint landskap, vil det ofte bli bygd lange overføringstunnelar med mange små inntak, kalla bekkeinntak. Mellom bekkeinntak og overførings-/driftstunnel renn vatnet vanlegvis ned ei sjakt eller bratt tunnel, der vatnet vil rive med seg luft. Lufta som kjem inn gjennom inntaket fører til mange ulemper dersom ho tunnelsystemet ikkje er rett utforma og dimensjonert. Vanlege ulemper er akkumulering av luft i tunnel med falltap, luftovermetning i nedstraums vassdrag/vatn og til sist skadelege utblåsingar. Det har heilt sidan 80-talet vore kunnskap tilgjengeleg for og i hovudsak unngå problema, men det viser seg enno at mange vannkraftsystem har problem med luft ifrå bekkeinntak. Dei siste åra har det i Noreg vore lite forskning og merksemd rundt luft, sett bort ifrå eit forskingsprosjekt på NTNU i 2009. Forskingsprosjektet i 2009 var grunna i at etablert kunnskap ifrå 80-talet ikkje fullt ut klarer å forklare det som skjer i bekkeinntakssjakter i fullskala. Spesielt gjeld det retur av luft med Froudetal $F \neq 1$. Forskingsprosjektet klarte på lang veg å vise dette, men enda ikkje i generelle funn eller retningslinjer.

Hausten 2016/Våren 2017 vart det på nytt etablert eit forskingsprosjekt på NTNU, som enda i ei masteroppgåve. Oppgåva viser samanhengen mellom feildimensjonering og utblåsing på heilt nye anlegg. Oppgåva konkluderer også med at det er nødvendig å teste hastighet og retur på bobler i bekkeinntakssjakter med varierende vinkel, der dette vil ha innverknad på kva slag hydrauliske forhold som må til for at luft skal returnere i sjaktene til kvart inntak. Det er spesielt viktig at situasjonen for vertikale sjakter studerast vidare, då problema med luft vil vere mykje større i slike.

Den fysiske modellen som vart bygd i 2017, gjenskarar to-fase straum i detalj. Modellen skal nyttast for vidare studier. Modifikasjonar på modellen kan bli ein del av masteroppgåva.

2. HOVUDPUNT I OPPGÅVA

Arbeidet vil innehalde følgjande hovudpunkt:

1. Litteraturstudie og vurderingar på luft i vasskrafttunnelar.
2. Forslag til undersøkingsprogram basert på eksisterande modell
 - a. Luftmedriving med sjakt $40^\circ - 90^\circ$
 - b. Måling av boblesoner og -rørsler
 - c. Retur av luft med sjakt $40^\circ - 90^\circ$
 - d. Retur av luft frå tunnel med varierende sjakthelling
 - e. Måling av hastighet på vatn og luftbobler/-bølgjer
3. Deltaking i modifikasjonar av fysisk modell
4. Samanlikning av resultat med tidlegare forsøk og med observasjonar i felt
5. Konklusjon og rapportering

Innhaldet i prosjektet vil bli nærmare avgjort av rettleiar i samråd med samarbeidspartnerar som vil bli knytt til prosjektet.

3. RETTLEIING, DATA OG INFORMASJON

Hovudrettleiar vil vere Professor Leif Lia. Medrettleiarar vert Senioring. Morten Skoglund. Kontaktperson i rådgivarbransjen vert siv.ing. Are Sandø Kiel i Sweco Norge. Kontaktperson i Statkraft vert Senioring. Trond Bjertnes.

Diskusjon med og bidrag frå kollegaer og medarbeidarar med NTNU, SINTEF, Rådgivande ingeniørfirma og andre firma og organisasjonar 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 osv. får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i B5-format som .pdf i DAIM og trykkast i tre eksemplar som sendast direkte frå trykkeri til faglærer/institutt. Samandraget skal ikkje gå over meir enn 450 ord og skal vere eigna for elektronisk rapportering.

Masteroppgåva skal ikkje leverast seinare enn den leveringsfristen som kjem fram i DAIM (20 veker + offentlege fridagar vårsemesteret).

Trondheim, 11. april 2018

Leif Lia
Professor

Forord

Denne masteroppgåva er skrive i forbindelse med avslutning av det femårige masterstudiet Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet, NTNU, våren 2018. Oppgåva er utført ved Institutt for Bygg- og miljøteknikk.

Oppgåva omhandla retur av luft i bekkeinntakssjakter, med køyring av fysiske modellforsøk i Vassdragslaboratoriet. Temaet er noko sært og snevert, men det gjorde arbeidet med oppgåva utfordrande og svært spanande. Det var motiverande å få moglegheita til å fordjupe seg i eit tema som ikkje har vore ein del av pensum i tidlegare fag.

Takk til medrettleiar Morten Skoglund for fagleg rettleiing. Ein takk rettast også til Geir Tesaker, Eirik Nygård og Per Erik Hansen for hjelp og god galgenhumor under vekene i laboratoriet.

Ein ekstra stor takk til rettleiar Leif Lia for fagleg støtte, men ikkje minst for uvurderleg hjelp både før og under arbeidet med masteroppgåva.

Siste takk går til familie og sambuar Janne, for oppmuntring og støtte.

Sondre Fossheim

Trondheim, august 2018

Samandrag

Bekkeinntak er mykje brukt i vasskraftsystem i alpint landskap for utnytting av små nedbørsfelt. Overføring av vatn frå mindre bekkar til magasin gjev auka kraftproduksjon, samstundes som at omsyn til økonomi og miljø vert sikra. Ei av utfordringane med bekkeinntak er auka medrivninga av luft til tunnelsystemet, grunna høg vassfart i den bratte sjakta nedstraums inntaket. Luft som hindrast å returnere kontrollert opp sjakta og ut inntaket, kan samlast i tunnelen og føre til kraftige utblåsingar. Utblåsingane har stort skadepotensial som kan føre til unødige kostnader for kraftselskapa, samt moglege ulemper for ein tredjepart. Bygging av bekkeinntak etter gjeldande anbefalingar for dimensjonering av bekkeinntakssjakter, har vist seg å ikkje vere tilstrekkelege for å hindre skadelege utblåsingar.

Hovudmålet med oppgåva var å studere om andre parameterar enn sjakthelling påverka retur av luft i bratte sjakter. Det vart utført fysiske modellforsøk for å undersøke påverknaden av endra diameter og ruheit i sjakta. Modellen bestod av ei fire meter lang sjakt med helling 45 grader, som enda i ein tre meter lang tunnel med 0.5 graders helling. Ein luftkompressor tilførte luft til tunnelen. To sjaktdimensjonar vart testa; sjaktdiameter $D = 210$ mm og $D = 172$ mm. For å simulere auka ruheit, vart det limt inn ringar av plast på innsida av sjaktene.

Det vart gjort målingar av frekvens av returnerte luftbobler frå tunnel til sjakt, samt observasjonar av strøymingsmønster for ulike vassføringar. Det vart ikkje påvist nokon effekt på retur av luft i sjakta grunna endra diameter eller ruheit. Grensa for kontinuerleg retur av luft frå tunnel til sjakt, vart funne ved det dimensjonslause strøymingsforholdet $F = 1.0$ i sjakta. Resultatet samsvarar med tidlegare utførde modellforsøk.

For strøymingsforhold $F = 0.7$ vart det observert akkumulering av luft i tunnelen, og strøymingsmønsteret i sjakta utvikla seg til støytvis strøyming. Strøymingsmønsteret førte til ei ustabil strøyming, der strøyminga veksla mellom trykkstrøyming og strøyming med fri vassflate. Vekslinga gav svingingar av trykk i sjakta og tunnelen. Trass kontinuerleg retur av luft opp sjakta, kan akkumulering av luft saman med den ustabile støytvise strøyminga leie til utblåsingar i fullskala bekkeinntak. For å hindre utvikling av ustabil støytvis strøyming i sjakta, vert det difor anbefalt å dimensjonere bekkeinntakssjakter etter strøymingsforhold $F < 0.7$.

Abstract

Brook intakes (secondary intakes) are used in hydro power systems built in alpine terrain for utilizing small catchments. Transferring water from small brooks to reservoirs, increase the power production in a cost-effective way, with small environmental impacts. Increased air entrainment due to high water velocity in the steep shafts, is a challenge when building brook intakes. If air is prevented from returning through the shaft, accumulation of air in the tunnel system could lead to hazardous blow outs. These blow outs have potential to cause severe damage, and may cause unnecessary costs for the power companies, and possible drawbacks for a third party. Today's guidelines for designing brook intake shafts, are not adequate to avoid harmful blow outs.

The main objective in this master thesis, was to study of how parameters other than the shaft inclination, effects return of air in steep shafts. Physical model tests were carried out to investigate the effect of changed shaft diameter and shaft roughness. The model included a four-meter-long shaft, with an inclination of 45 degrees. At the end of the shaft, was a three-meter-long, horseshoe shaped tunnel, with an inclination of 0.5 degrees. An air compressor provided air to the tunnel. Two different shaft dimensions were tested; $D = 210$ mm and $D = 172$ mm. To simulate increased shaft roughness, plastic rings were glued to the inside of the shaft.

The model tests included measurements of the frequency of air bubbles returning from the tunnel to the shaft, and observations of flow patterns in both the shaft and the tunnel. No effect of changed shaft diameter or shaft roughness on the frequency of returned air bubbles was detected. The threshold for continuously return of air bubbles from tunnel to shaft found from the model tests, conform with previous model tests with a value of the pipe flow number at $F = 1.0$

At pipe flow number $F = 0.7$, air was accumulating in the tunnel and the flow pattern in the shaft changed to slug flow. The flow pattern lead to unstable flow in the shaft, with the flow alternating between pressure flow and free surface flow. The alternation lead to pressure fluctuations in the shaft and tunnel. It is believed, that the accumulation of air and the onset of slug flow could lead to blow outs in full scale brook inlets, even though the air is still able to return continuously through the shaft. To avoid this situation, it is recommended to design brook inlets with a pipe flow number $F < 0.7$.

Innholdsliste

FORORD	V
SAMANDRAG	VII
ABSTRACT	IX
FIGURLISTE	XIII
TABELLISTE	XIV
SYMBOLLISTE	XV
1. INNLEIING	1
1.1. BAKGRUNN	1
1.2. MÅL MED OPPGÅVA.....	4
1.3. OPPBYGGING AV RAPPORTEN	5
1.4. OMGREPSAVKLARING.....	5
2. TO-FASESTRØYMING MED LUFT OG VATN	8
2.1. FLEIR-FASESTRØYMING.....	8
2.2. MEDRIVING OG SAMLING AV LUFT I SJAKTER OG TUNNELAR	14
2.3. LUFTUTBLÅSING I BEKKEINNTAKSSJAKTER	22
2.4. FORSKING PÅ TRANSPORT AV LUFT I HELLANDE RØYR	28
2.5. OPPSUMMERING	34
3. MODELLFORSØK	36
3.1. SAMANLIKNING AV RESULTAT FRÅ PROTOTYPE OG MODELLFORSØK.....	36
3.2. FYSISK MODELL.....	38
3.3. FORSØKSPLAN	41
3.4. OPPSUMMERING	43
4. RESULTAT OG OBSERVASJONAR FRÅ MODELLFORSØK	44
4.1. GJENNOMFØRING AV FORSØK.....	44
4.2. RESULTAT – RETUR AV LUFT TIL SJAKT.....	46
4.3. RESULTAT – GRENSER FOR RETUR AV LUFT	53
4.4. OBSERVASJONAR I SJAKT OG TUNNEL.....	56
4.5. OPPSUMMERING AV RESULTAT OG DRØFTINGAR FRÅ MODELLFORSØK.....	65

5. DISKUSJON – GJENNOMFØRING, MODELL OG METODE.....	68
5.1. GJENNOMFØRING AV MODELLFORSØK.....	68
5.2. VURDERING AV MODELL OG METODE	69
5.3. FORSLAG TIL ENDRING AV MODELL	70
5.4. FORSLAG TIL NYE UNDERSØKINGAR	71
6. KONKLUSJON.....	74
6.1. AVSLUTTANDE KONKLUSJON	74
6.2. VIDARE ARBEID.....	75
7. REFERANSAR.....	77
7.1. HOVUDREFERANSAR	77
7.2. ANDRE REFERANSAR	79
VEDLEGG A – TAL PÅ RETURNERTE LUFTBOBLER	81
VEDLEGG B – MODELLSKISSE FRÅ DAHL OG GUTTORMSEN (1986).....	83
VEDLEGG C – MODELLSKISSE FRÅ PERZYNA (2017).....	84
VEDLEGG D – BILETE AV MODELL.....	85
VEDLEGG E - FORSØKSDATA	89
VEDLEGG F – ROTAMETERAVLESING OG KALIBRERINGSDIAGRAM.....	90

Figurliste

FIGUR 1-1 «LÅNGÅSPRUTEN»	2
FIGUR 1-2 SKADER PÅ BEKKEINNTAKET I EIDE – FANNADALEN ETTER KRAFTIG UTBLÅSING.....	4
FIGUR 1-3 ILLUSTRASJON FOR OMGREPSAVKLARING.	6
FIGUR 1-4 DEFINISJON AV POSITIV OG NEGATIV HELLING	7
FIGUR 1-5 TRANSPORT (I) OG RETUR (II) AV LUFT.....	7
FIGUR 2-1 ILLUSTRASJON AV MEDSTRUAMS FASESTRØYMING (I) OG MOTSTRAUMS FASESTRØYMING (II).	9
FIGUR 2-2 FRIGJERING AV LUFT OPPLØYST I VATN	9
FIGUR 2-3 STRØYMINGSMØNSTER FOR VERTIKAL TO-FASESTRØYMING	10
FIGUR 2-4 STRØYMINGSMØNSTER FOR HORIZONTAL TO-FASESTRØYMING	11
FIGUR 2-5 KRAFTLIKEVEKT PÅ LUFTBOBLE I RØYR	14
FIGUR 2-6 LUFTMEDRIVING I VERTIKALE SJAKTER.....	17
FIGUR 2-7 LUFTMEDRIVING I BRATTE SJAKTER	18
FIGUR 2-8 TRANSPORT AV LUFT I SJAKTER MED ULIKE SJAKTLENGDER.....	20
FIGUR 2-9 RETURSTRAUM ETTER OVERGANG MELLOM SJAKT OG TUNNEL	21
FIGUR 2-10 VASSTANDSSPRANG I OVERGANG MELLOM TUNNEL OG SJAKT	22
FIGUR 2-11 UTBLÅSING VED HOLMALIÅNA	23
FIGUR 2-12 SKISSE AV MODELL BRUKT AV NHL/SINTEF	25
FIGUR 2-13 GRENSEVERDIAR FOR KONTINUERLEG RETUR AV LUFT	26
FIGUR 2-14 GRENSEVERDIAR FOR KONTINUERLEG RETUR AV LUFT	26
FIGUR 2-15 MODELLSKISSE.....	27
FIGUR 2-16 GRENSEVERDI FOR UTBLÅSING I BEKKEINNTAKSSJAKTER	28
FIGUR 2-17 MEKANISMAR FOR TRANSPORT AV LUFT	29
FIGUR 2-18 MODELLOPPSETT I POTHOF OG CLEMENS (2011).	32
FIGUR 2-19 ENDRING AV FALLTAP I RØYR MED AUKA F OG WE	32
FIGUR 2-20 CFD-SIMULERING AV UTBLÅSING I VERTIKALT STIGRØYR	33
FIGUR 3-1 SKISSE AV MODELL.....	38
FIGUR 3-2 INNTAKSKASSA I MODELLEN	39
FIGUR 3-3 BILETE AV MODELL I VASSDRAGSLABORATORIET.....	39
FIGUR 3-4 METODE FOR AUKA RUHEIT I SJAKT.....	41
FIGUR 3-5 ROTAMETER (I) OG ELEKTROMAGNETISK VASSFØRINGSMÅLAR (II).	43
FIGUR 4-1 RESULTAT FRÅ MODELLFORSØK.....	47

FIGUR 4-2 SAMANLIKNING AV RESULTAT MED TIDLEGARE MODELLFORSØK.....	48
FIGUR 4-3 SAMANLIKNING AV RETUR AV LUFTBOBLER I GLATT SJAKT MED ULIK DIAMETER. ...	49
FIGUR 4-4 SAMANLIKNING AV RETUR AV LUFT I SJAKT MED ULIK RUHEIT (D = 210 MM).....	50
FIGUR 4-5 SAMANLIKNING AV RETUR AV LUFT I SJAKT MED ULIK RUHEIT (D = 172 MM).....	50
FIGUR 4-6 STOPP I RETUR AV LUFT FOR F = 0.9 VED D = 172 MM MED AUKA RUHEIT.....	51
FIGUR 4-7 STOPP I RETUR AV LUFT FOR F = 0.9 VED D = 172 MM MED AUKA RUHEIT.....	51
FIGUR 4-8 STÅANDE LUFTLOMME FOR F = 0.9 VED D = 172 MM	53
FIGUR 4-9 LUFTPUTE STÅANDE I SJAKT VED F_{KR}	54
FIGUR 4-10 STRØYMING I SJAKT VED STRØYMINGSFORHOLD F_R	55
FIGUR 4-11 OVERGANG MELLOM TUNNEL OG SJAKT FOR F = 1.3.	56
FIGUR 4-12 OBSERVERTE STRØYMINGSMØNSTER I SJAKT	57
FIGUR 4-13 PROPPSTRØYMING VED F = 0.53 OG D = 172 MM.....	58
FIGUR 4-14 STØYTVIS STRØYMING FOR F = 0.9 VED D = 172 MM.....	59
FIGUR 4-15 LAGDELT STRØYMING FOR F = 1.0 VED D = 172.....	60
FIGUR 4-16 EROSJON AV LUFTBOBLE STÅANDE VED RUHEITSELEMENT I SJAKT.	62
FIGUR 4-17 VASSOVERFLATE MED BØLGJER I TUNNEL	63
FIGUR 4-18 RETUR AV LUFTBOBLE.....	64
FIGUR 5-1 SKADER PÅ TUNNELEN.	68
FIGUR 5-2 MODELLOPPSETT FOR LUKKA SYSTEM.....	71
FIGUR 5-3 EKSEMPEL PÅ RESULTAT FRÅ CFD-SIMULERINGAR AV TO-FASESTRØYMING	72

Tabelliste

TABELL 2.1 SYMBOLFORKLARING.....	16
TABELL 2.2 GRENSEFART FOR NATURLEG UTLUFTING I SJAKTER	19
TABELL 2.3 GRENSEVERDIAR FOR RETUR AV LUFT.....	28
TABELL 3.1 MODELLEDDATA	40
TABELL 3.2 OVERSIKT OVER FORSØKSPARAMETER.....	42
TABELL 4.1 RESULTAT FRÅ MODELLFORSØK: TAL PÅ RETURNERTE LUFTBOBLER PER MINUTT. 46	
TABELL 4.2 LENGDE AV RETURNERANDE LUFTBOBLER.....	52
TABELL 4.3 STRØYMINGSMØNSTER VED ULIKE STRØYMINGSFORHOLD F.....	61
TABELL 4.4 GRENSER FOR RETUR AV LUFT I MODELLFORSØK.	65

Symbolliste

NHL	- Norges Hydrotekniske Laboratorium [-]
NTNU	- Norges teknisk- naturvitenskaplige universitet [-]
BKK	- Bergenhalvøens Kommunale Kraftselskap [-]
SKL	- Sunnhordland Kraftlag [-]
KVO	- Kraftverkene i Orkla [-]
C_d	- Dragkoeffisient [-]
v	- gjennomsnittleg vassfart i sjakt [m/s]
v_s	- gjennomsnittleg vassfart ved frispeglstrøyming [m/s]
y_n	- vassdjup ved normalstrøyming [m]
α	- sjakthelling [rad]
S_o	- sjakthelling = $\sin(\alpha)$ [-]
ρ_w	- densiteten til vatn [kg/m^3]
ρ_a	- densiteten til luft [kg/m^3]
D	- Sjaktdiameter [m]
L	- Sjaktlengde [m]
D_e	- Boblediameter [m]
g	- tyngdens akselerasjon [m/s^2]
π	- Pi [-]
Re	- Reynolds tal [-]
Fr	- Froudes tal [-]
$Eö$	- Eötvös tal [-]
We	- Webers tal [-]
F	- Strøymingsforhold [-]
F_K	- Strøymingsforhold ved kritisk vassfart [-]
F_{KR}	- Strøymingsforhold ved stopp av kontinuerleg retur av luft [-]
F_R	- Strøymingsforhold ved reinskefart [-]
F_{cf}	- Strøymingsforhold justert for falltap [-]
v_c	- grensefart for transport av luft [m/s]
n	- dimensjonslaus luftboblestørleik [-]
ν	- kinematisk viskositet [m^2/s]
σ	- overflatespenning [N/m]
v_m	- vassfart i modell [m/s]
v_p	- vassfart i prototype [m/s]
D_m	- Sjaktdiameter i modell [m]
D_p	- Sjaktdiameter i prototype [m]

L_T	- Tunnellengde [m]
A_T	- Tunnelareal [m ²]
A_s	- Sjektareal [m ²]
f	- Darcy-Weisbachs friksjonsfaktor [-]
h	- høgde på luftboble [-]

1. Innleiing

1.1. Bakgrunn

1.1.1. Luft i bekkeinntak

Vasskraftverkssystem i Noreg og andre land med alpint landskap er dominert av utnytting av høge fall. Utbygging høgt til fjells er kostbart, og fører med seg omfattande naturinngrep. «Takrennesystem» utnyttar nedbørsfeltet til mindre bekkar, og fører vatn i anten overføringstunnelar eller driftstunnelar til eit større magasin eller direkte til kraftstasjonen i systemet, alt avhengig av oppbygging og driftssituasjon. Resultatet er auka kraftproduksjon; større, men færre magasin; og lange overførings- og driftstunnelar.

Inntaka i dei mindre bekkane kallast bekkeinntak. Vatnet frå bekken leiast gjennom ein inntakskonstruksjon, typisk plassert i eller ved sidan av ein sperredam på tvers av bekken. Inntaket fører til ei sjakt, som endar i ein større tunnel. Inntaka har avgrensa moglegheiter for regulering av vassføring, grunna små og grunne magasin. I sjakta akselererer vatnet mot normalstrøyming, før den frie vassflata når trykklinja. Strøymingssituasjonen går frå strøyming med fri vassflate til trykkstrøyming. Den høge vassfarta i strøyminga med fri vassflate, riv med og piskar inn store mengder luft i vassmassane som transporterast vidare til tunnelen. Luft som hindrast i å returnere til friluft opp sjakta eller i andre delar av systemet, kan føre til ulike problem. Bjartnes *et al.* (2016) oppsummerar problema til følgjande:

- Luftlommer kan byggje seg opp i tunnelen, og føre til ei innsnevring av vassvegen. Dette resulterer i auka falltap og påfølgjande tap av produksjon
- Vatnet i tunnelsystemet kan mettast med luft, som seinare frigjerast ved utløpet til kraftstasjon og føre til fiskedød.
- Utblåsing av komprimerte luftlommer som kan føre til skade på sjakt, inntakskonstruksjon og uskuldig tredjepart, i tillegg til varierende trykk i tunnelsystemet med påfølgjande driftsproblem.

Figur 1-1 viser ei kraftig utblåsing ved eitt av bekkeinntaka i tilknytning til Långå kraftverk i Sverige, som tidlegare opplevde årlege, kraftige utblåsingar. Dei kraftigaste utblåsingane raga over dei høgaste tretoppene. I dag er bekkeinntaket utbetra med luftehol på tunnelen, for å unngå utblåsing av luft gjennom sjakta.

1.1.2. Dimensjonering av bekkeinntakssjakter

Utbygging av bekkeinntak auka i takt med utviklinga innan sprengingsteknikk og reduserte anleggskostnader på 60- og 70-talet. Bratte bora sjakter gjev høg vassfart, som aukar meddriving av luft i sjaktene. I 1986 publiserte *Vassdragsregulantenenes foreining* rapporten *Bekkeinntak på kraftverkstunneler* som fylgje av forskning ved *NHL*. Ein viktig del av rapporten gjev tilrådingar for utforming og dimensjonering av bekkeinntakssjakter for å unngå kraftige utblåsingar: Bekkeinntakssjakter må dimensjonierast for å sikre kontinuerleg retur av luft frå tunnel og opp sjakta for alle vassføringar. På bakgrunn av modellforsøk, vart det anbefalt å dimensjonere sjakter etter eit dimensjonslaust strøymingsforhold F mellom vassfarten og sjaktdiameter. Øvre grense for kontinuerleg retur av luft opp sjakta er i fylgje rapporten $F = 1$. Dimensjonering av sjaktdiameter etter $F = 1$ skal hindre utblåsingar i sjakta. Rapporten står fram til i dag som einaste grunnlagsdokument tilgjengeleg for konsulentar og kraftverksutbyggjarar ved planlegging og bygging av bekkeinntak i Noreg.



Figur 1-1 «Långåspruten» (Persson, 2015).

1.1.3. Registrerte utblåsingar i Noreg

Fleire bekkeinntak i Noreg er utsett for regelmessige utblåsingar av ulik alvorsgrad. Bekkeinntaket i Holmaliåna, nedstraums Grunnvatn i Ulla-Førre-systemet, har sidan bygginga

på 80-talet vore plaga med kraftige utblåsingar som har gitt store skader på inntakskonstruksjonen. Sjakta har ei helling på 48 grader, og er i overkant av 130 meter lang. I dag er inntaket strupa i påvente av ombygging i 2018/2019, noko som gir dagleg tap av produksjon.

Statkraft har utført kontinuerlege observasjonar av tilsig, produksjon, trykkforhold, osv. i systemet. Etter gjennomgang av tilgjengeleg materiale, konkluderte Gjerde (2009) med at store utblåsingar fann stad i Holmaliåna ved strøymingsforhold $F > 0.6$ i sjakta. Sett i samanheng med anbefalingane for dimensjonering av sjakter i *Bekkeinntak på kraftverkstunneler*, tek utblåsingane i Holmaliåna til ved lågare vassføringar i sjakta enn forventa.

Gjerde (2009) konkluderte med at utforminga av tunnel og overgang mellom sjakt og tunnel i Holmaliåna kunne spele ei rolle i dei kraftige utblåsingane ved inntaket. Samling av meddriven luft i tverrstollen i tunnelen, kan vere ei forklaring på utblåsingane ved lågare strøymingsforhold F . Det kan tyde på at andre forhold enn diameteren på sjakta spelar ei rolle for utblåsingar i bekkeinntak.

Det finnst lite publisert materiale på kor mange og kva bekkeinntak i Noreg som er gjenstand for problem med luftutblåsingar. Hoel (2009) utførde i si masteroppgåve ei spørjeundersøking om problem ved norske bekkeinntak, sendt til vassdragsteknisk ansvarlege i fleire norske kraftselskap. Av totalt 336 bekkeinntak, var det registrert utblåsingar ved 16 inntak, der skadeomfanget ved 11 av dei vart klassifisert som alvorleg eller svært alvorleg. Av inntaka i spørjeundersøkinga vart berre BKKs bekkeinntak i Eide i Fannadalen namngitt. Andre kjende tilfelle av inntak med luftutblåsingar er:

- Fleire bekkeinntak som går inn på overføringstunnel i tilknytning Rana kraftverk (Statkraft).¹
- Bekkeinntaket Svelgen i tilknytning Blådalsvassdraget (SKL), bygd på midten av 2000-talet. Bekkeinntaket er bygd med vertikal sjakt på overføringstunnel, som gjev store mengder luft i sjakt og tunnel.¹
- Eit bekkeinntak i tilknytning Røldal kraftverk (Hydro Energi).¹
- Brattset kraftverk (KVO) har fleire bekkeinntak som leiar vatn direkte inn på driftstunnelen. I bekkeinntaket Nåva, har det vorte registrert utblåsingar når alt vatnet som går gjennom kraftstasjonen kjem frå bekkeinntaka i systemet.¹

¹ Informasjon frå Leif Lia i forbindelse med rettleiing, 10.08.2018.

- Bekkeinntaket i Kobbelva i tilknytning Skjomen kraftverk (Statkraft) (Bekkeinntakskomiteén, 1986).
- Ved eit bekkeinntak i tilknytning Aura kraftverk (Statkraft) har det vorte registrert at inntaksrista har vorte blåse vekk (Hoel, 2009).

Figur 1-2 viser eit eksempel på skader frå utblåsingar i bekkeinntakssjakter, der armerte betongkonstruksjonar er totalskadde.



Figur 1-2 Skader på bekkeinntaket i Eide – Fannadalen etter kraftig utblåsing (Hoel, 2009).

Kraftselskap kan ikkje akseptere bygging av bekkeinntak som gjev luftutblåsingar. Økonomisk marginale prosjekt kan i verste tilfelle verte ulønsame. Potensielle farar for ein uskuldig tredjepart ved kraftige utblåsingar er også for store. Difor er det viktig å jobbe fram eit betre kunnskapsgrunnlag for dimensjonering av bekkeinntakssjakter enn det som ligg føre i «Bekkeinntak på kraftverkstunnelar».

1.2. Mål med oppgåva

Denne masteroppgåva tek sikte på å danne eit nytt grunnlag for dimensjonering av bekkeinntakssjakter. Erfaringar frå Holmaliåna og andre bekkeinntak med fare for luftutblåsingar, viser at dimensjonering på bakgrunn av skalert vassfart frå modellforsøk ikkje er tilstrekkeleg for å unngå skadelege utblåsingar. Perzyna (2017) studerte effekten av sjakthelling på grenser for retur av luft i bekkeinntakssjakter i modellforsøk i

Vassdragslaboratoriet ved NTNU. Modellen takast i bruk i eit utvida forsøksprogram i denne oppgåva.

Hovudmålet med oppgåva er å studere om andre parameterar enn sjakthelling har påverknad på retur av luft i bratte sjakter. Effekten av to parameterar er nærare studert:

- Sjaktdiameter / arealforhold mellom sjakt og tunnel.
- Ruheit i sjakt.

I tillegg til identifisering av grenser for kontinuerleg retur av luft, rapporterast strøymingsmønster ved ulike vassføringar i sjakta. Resultata frå forsøka samanliknast med tidlegare modellforsøk på retur av luft i bekkeinntakssjakter, og diskuterast i lys av relevant litteratur.

Modellforsøka i oppgåva avgrensar seg til fenomenet med retur av luft frå overgangen mellom sjakt og tunnel. Mekanismane for meddriving av luft i bekkeinntakssjakter og luftransport i tunnelsystemet er ikkje studert i modellen.

1.3. Oppbygging av rapporten

Kapittel 2 presenterer teori frå tilgjengeleg litteratur om to-fasestrøyming, luftmeddriving i lukka system og transport av luftbobler, -lommer og -puter. Vidare diskuterer rapporten bekkeinntak meir generelt, med eit fokus på problem knytt til luft i sjakter og tunnelar. Ein gjennomgang av forskning på luftutblåsing i bekkeinntakssjakter belyser problematikken i detalj. Kapitlet er meint brukt som bakgrunn for forståing av fenomenet med to-fasestrøyming og mekanismane ved transport og retur av luft i to-fase røyrstrøyming.

Kapittel 3 gir ein gjennomgang av modellforsøket med fokus på oppsett av modellrigg, utstyr og forsøksplan, og diskusjon kring skalering av resultat mellom modellforsøk og fullskala. Ein del av resultata frå modellforsøka var kvalitative observasjonar. Resultata, og drøftinga av dei, vert difor presentert saman i kapittel 4, for betre oversikt for lesaren. Kapittel 5 drøftar gjennomføring av modellforsøka, i tillegg til foreslegne endringar av modelloppsett og forsøksmetode. Rapporten avsluttast med konklusjon og forslag til vidare arbeid i kapittel 6.

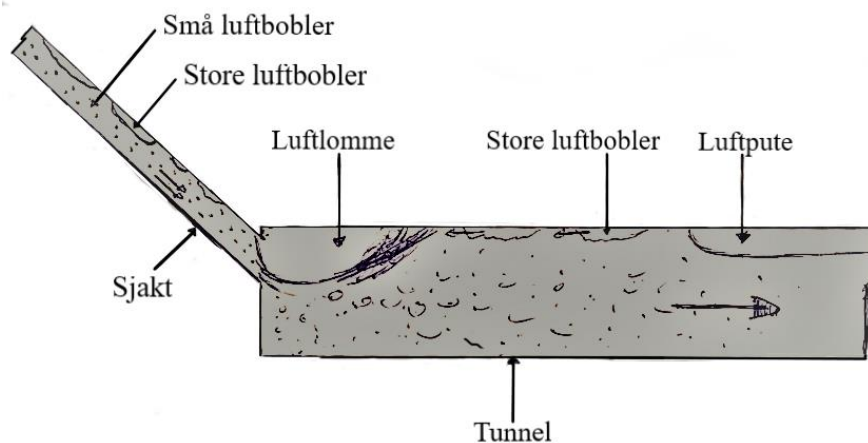
1.4. Omgrepsavklaring

I oppgåva skiljast følgjande omgrep:

- *Små luftbobler* er små, einskilde bobler av luft. Diameteren til luftboblene varierer mellom 1-10 mm, og transporterast over heile strøymingstverrsnittet. Samanslåing

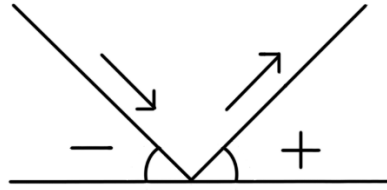
av mindre luftbobler gjev *store luftbobler*, som transporterast langs hengen i røyr/sjakt/tunnel.

- I overgangen mellom sjakt og tunnel dannast det ved spesielle strøymingsforhold ei stasjonær *luftlomme*. Strøyminga i bakkant av luftlomma er svært turbulent, og avhengig av vassfarta under luftlomma, kan det dannast eit vasstandssprang i enden av lomma.
- *Luftputer* er lange, samanhengande strengar av luft i tunnelhengen som kan strekkje seg over fleire kilometer. Luftputene dannast ofte i lange, slake tunnelstrekningar, og i høgbrekk i tunnelar.



Figur 1-3 Illustrasjon for omgrepsavklaring.

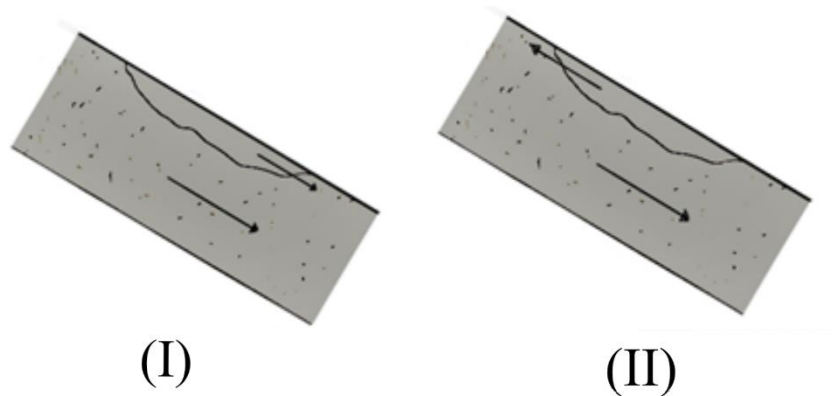
- Begrepet *sjakt* vert brukt om den bratte og sirkulære delen av tunnelen. Hellinga på sjakta er typisk over 40 grader.
- *Tunnel* er brukt om delen av tunnelsystemet med slakare helling, og har typisk utforminga som ein hestesko; sirkulært utforma i hengen, med rette veggjar.
- Definisjon av *negativ helling* og *positiv helling* er vist i Figur 1-4. Pilene viser vatnets strøymingsretning.



Figur 1-4 Definisjon av positiv og negativ helling. Pilene viser vatnets strøymingsretning.

- *Transport av luft* er mekanismen der luftbobler, -puter og -lommer transportert i same retning som vasstraumen. *Retur av luft* er mekanismen der luftbobler, -puter og -lommer transportert mot retninga til vasstraumen.

Figur 1-5 illustrerer skilnaden mellom dei to.



Figur 1-5 Transport (I) og retur (II) av luft.

- *Strøymingsforholdet F* refererer til det dimensjonslause forholdet mellom vassfart og røyr diameter i lukka strøyming. Forholdstalet liknar mykje på, men må ikkje forvekslast med, Froude-talet Fr , som er forholdet mellom vassfart og bølgefart i strøyming med fri vassflate.
- Størsteparten av litteraturen om to-fasestrøyming og strøyming med luft-vatn i hellande røyr er på engelsk. Fleire sentrale ord og uttrykk manglar omsetjingar til norsk. Der undertekna sjølv har omsett ord og uttrykk frå engelsk til norsk, er dette markert på følgjande måte:

«norsk omsetjing (engelsk ord)»

2. To-fasestrøyming med luft og vatn

Retur av luft i bekkeinntakssjakter omhandlar samstundes strøyming av vatn og luft i trykksette vasstunnelar, og er dermed eit to-fasestraum-problem. Dette kapittelet gir ein gjennomgang av generell teori om to-fasestrøyming og krefter på luft i vasstunnelar. Vidare presenterast mekanismar for meddriving av luftbobler, danning av luftlommer, og transport og retur av luft i bekkeinntakssjakter. Det vert gjort greie for tidlegare forskning på retur av luft i bekkeinntakssjakter. Kapittelet avsluttast med ei oppsummering av nokre av dei viktigaste funna frå den presenterte teorien.

2.1. Fleir-fasestrøyming

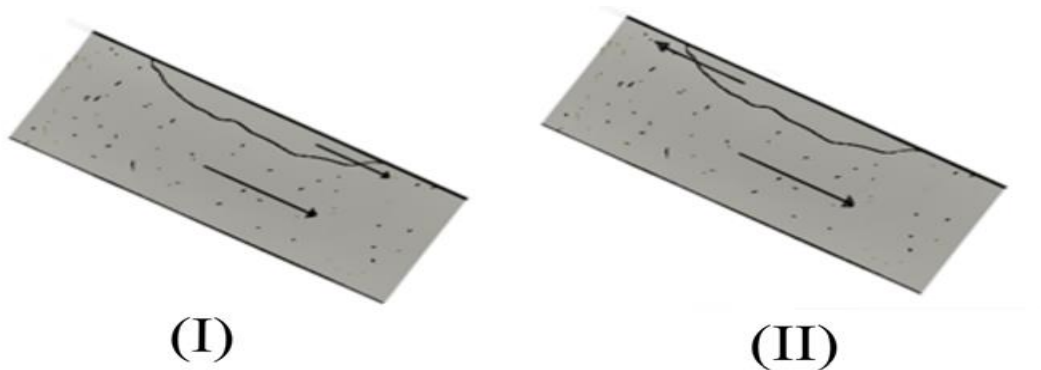
2.1.1. Kva er fleir-fasestrøyming?

Fleir-fasestrøyming er samstundes strøyming av komponentar i ulik fase (væske, gass eller fast stoff), og/eller komponentar med ulik kjemisk samansetting (t.d. olje-vatn-luft-strøyming). Kvar komponent har ein definert volumdel i strøyminga, der summen av delvoluma er lik I . Fleir-fasestrøyming er sentralt i ei tallaus mengde fenomen, både naturlege og «menneskeskapte». Brennen (2005) listar opp eit utval:

- Vêrfenomen som regn, snø og skodde.
- Strøyming ved ulike typar skred.
- Blodstrøyming i blodårene til menneskjer og dyr.
- Pumping av olje og gass frå reservoar.

To-fasestrøyming er den enklaste forma for fleir-fasestrøyming, og er som namnet tilseier strøyming med to ulike komponentar/fasar. Det skiljast mellom strøyming med *væske-væske*, *væske-gass*, *fast stoff-væske*, *fast stoff-gass*, og *gass-gass* (Awad, 2007; Brennen, 2005). Isgang i elvar er eit døme på *fast stoff-væske*-strøyming som opptrer innan vassdragshydraulikk, men det er i hovudsak *væske-gass*-strøyming med luft og vatn som vert teke høgde for i planlegging, bygging og drift av vassdragstekniske konstruksjonar.

Den relative strøymingsretninga til fasane i to-fasestrøyming skil to-faseproblem i to strøymingssituasjonar. *Medstraums fasestrøyming* (concurrent flow) er strøyming der fasane strøymer i same retning. Ved *motstraums fasestrøyming* (countercurrent flow) har fasane ulik strøymingsretning relativt til kvarandre (Gupta, 1983).



Figur 2-1 Illustrasjon av medstruams fasestrøyming (I) og motstruams fasestrøyming (II).

Transport av luft i vassstunnelar er eit eksempel på medstruams fasestrøyming med luft og vatn, medan retur av luft er eit eksempel på motstruams fasestrøyming.

2.1.2. To-fasestrøyming i vassdragstekniske konstruksjonar

I strøyming med luft-vatn skiljast det mellom *oppløyst luft* og *fri luft*. Oppløyst luft er luft molekylært løyst opp i vatnet. Når mengda oppløyst luft i eit vassvolum overskrider mettingspunktet til vatnet, er vatnet *overmetta*. Faseovergangen frå fri luft til oppløyst luft i vassstunnelar tek lang tid, og inntreffe til dømes når luftputer vert ståande over lang tid i lokale høgbrekk. Faseovergangen frå oppløyst luft til fri luft, kan i motsetning gå føre seg svært raskt. Frigjeringsa av luft aukar med auka vassstemperatur og reduksjon av trykk. Rask seinking av trykk over ein trykkturbin, kan ved overmetting av vatnet resultere i kvitt, brusande vatn nedstruams kraftstasjonen, som vist i Figur 2-2. Slike forhold kan mellom anna føre til brå fiskedød (Bekkeinntakskomiteén, 1986).

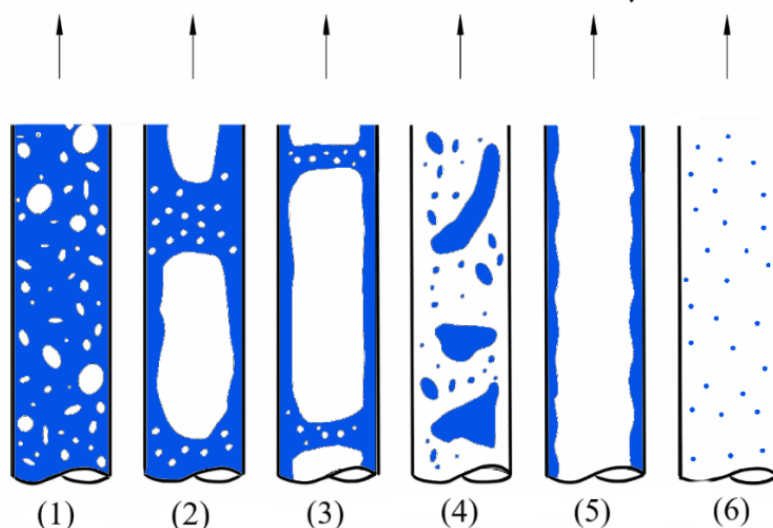


Figur 2-2 Frigjering av luft oppløyst i vatn (Normann, 2018).

Fri luft er luftbobler, -lommer og -puter separert frå vatnet. Fri luft i vasstunnelar oppstår av fleire grunnar. Meddriving av luft grunna kvervlar i vassoverflata som syg luft, er ei vanleg problemstilling ved prosjektering av til dømes inntak til kraftverkstunnelar og botntappeløp i damanlegg (Jenssen *et al.*, 2006; Liu, 2012). Fylling av vasstunnelar og -røyr kan fange luft som allereie er til stades i systemet i lokale høgbrekk, og auke falltapet i systemet (Lia *et al.*, 2003). Meddriving av luft ved turbulent strøyming med høg fart, medfører redusert kapasitet i flaumløp (Falvey, 1980). Utblåsing av luft i bekkeinntakssjakter er resultat av samling av fri luft i sjakt og tunnel.

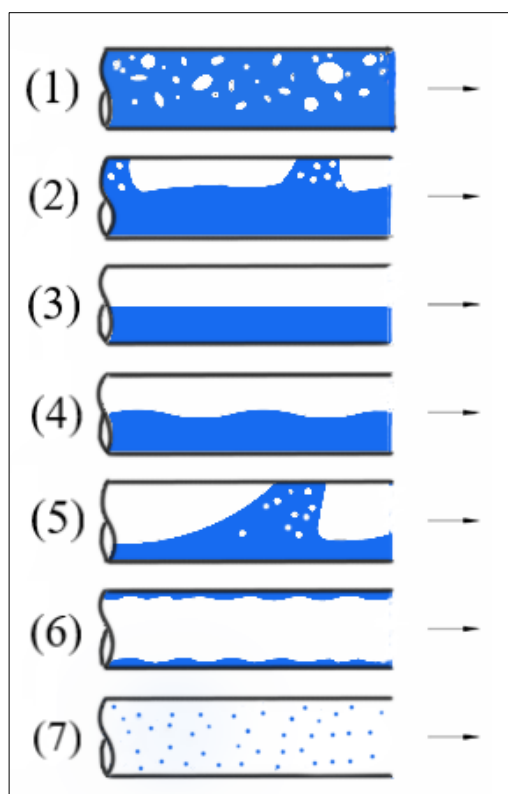
2.1.3. Strøymingsmønster i luft-vatn-strøyming

Densiteten til luft og vatn er svært ulik. Vatn har ein densitet på om lag 1000 kg/m^3 ved 4°C og atmosfærisk trykk, medan densiteten til luft er på om lag 1.27 kg/m^3 ved same temperatur og trykk. Den store skilnaden fører til at vatn og luft er separert frå kvarandre i normaltilstand. Ved miksing av fasane, fører skilnaden til svært kompliserte strøymingssituasjonar (Kobus, 1984). Grenseflata mellom luft og vatn varierer med mengde, fart, og relativ strøymingsretning mellom vatn og luft. Dei ulike grenseflatene gjev opphav til ulike *strøymingsmønster* (Weisman, 1983). Ulike Strøymingsmønster påverkar transporten av luft og vatn, og kan føre til ustabile trykksvingingar i systemet. Bekkeinntakssjakter har ikkje direkte innsyn til korleis strøyminga endrar seg og vert påverka av ulik vassføring og mengde luft. Kunnskap om effekten av ulike strøymingsmønster, og grenser for skifte mellom dei, er viktig for forståing av korleis luft i vassrøyr, -sjakter og -tunnelar påverkar strøyminga.



Figur 2-3 Strøymingsmønster for vertikal to-fasestrøyming. (1) Boblestrøyming, (2) proppstrøyming, (3) støytvis strøyming, (4) kvervelstrøyming, (5) ringstrøyming og (6) dropestrøyming (Lauchlan *et al.*, 2005).

Klassifisering av strøymingsmønster i to-fasestrøyming med gass og væske er primært basert på observasjonar av strøyming i gjennomsiktige røyr. Weisman (1983) refererer til Hosler (1968) og Gibson (1981), som fann likskap mellom strøymingsmønster i sirkulære og ikkje-sirkulære tverrsnitt. Publisert materiale om strøymingsmønster i to-fasestrøyming er i stor grad avgrensa til observasjonar av medstraums fasestrøyming. I følgje Rouhani og Sohal (1983), er det gitt opp til 84 namn på dei åtte strøymingsmønstra som går igjen i litteraturen. Lauchlan *et al.* (2005) summerte opp strøymingsmønster for horisontal og vertikal strøyming med væske og gass, der fasane har same strøymingsretning. Oppsummeringa var basert på litteratursamanfatningane til Falvey (1980) og Rouhani og Sohal (1983). Figur 2-3 og Figur 2-4 illustrerer strøymingsmønster for høvesvis vertikal og horisontal to-fasestrøyming med gass og væske. Dei fleste strøymingsmønster er for både medstraums og motstraums to-fasestrøyming, men ikkje alle strøymingsmønster er relevante for strøyming med vatn og luft i vasstunnelar.



Figur 2-4 Strøymingsmønster for horisontal to-fasestrøyming. (1) Boblestrøyming, (2) Proppstrøyming, (3) lagdelt strøyming, (4) bølgestrøyming, (5) støytvis strøyming, (6) ringstrøyming og (7) dropestrøyming (Lauchlan *et al.*, 2005).

Lista under viser namn og forklaring på dei ulike strøymingsmønstera frå Lauchlan *et al.* (2005):

- *Boblestrøyming* (Bubble flow) – Luftbobler av ulik storleik er fordelt over heile røyrverrsnittet, med auka konsentrasjon av luft i øvre halvdel av tverrsnittet. Ved høge vassføringar og auka turbulens er boblestorleiken liten, og vatnet opptrer som skum. Boblestrøyming er relevant for bekkeinntakssjakter ved meddriving, transport og retur av luft.
 - *Proppstrøyming* (Plug flow) – Oppstår ved auka volum luft, som fører til at små bobler slår seg saman til store bobler i hengen. Luftboblene har ofte ei karakteristisk «kuleform», med ein sverm av små bobler mellom «luftproppane». Proppstrøyming er typisk for retur av luft i bekkeinntakssjakter ved låge vassføringar.
 - *Lagdelt strøyming* (Stratified flow) – Vatn og luft er fullstendig separert, der vatn strøymar i botn av røyrret med ei jamn vassoverflate i grensesjiktet mellom luft og vatn. Luftputer gir opphav til lagdelt strøyming, og finnst spesielt i høgbrekk i vasstunnelar.
 - *Bølgjestrøyming* (Wavy flow) – Auka vassfart og luftmengde gjev bølgjer i den lagdelte strøyminga. Amplituden til bølgjene er ikkje så stor at dei slår i hengen.
 - *Støytvis strøyming* (Slug flow) – Når vassfarta aukar, slår bølgjene til slutt opp i hengen og lukkar tverrsnittet. Lufta transporterast mellom bølgjetoppene i ei støytvis rørsle. Støytvis strøyming er ustabil strøyming som fører til svingingar i trykk, og vibrasjonar i tunnelsystemet. Støytvis strøyming opptrer ved retur av luft ved høgare vassføringar i bekkeinntakssjakter.
 - *Kvervelstrøyming* (Churn flow) Eit turbulent strøymingsmønster der luftboblene brytast opp til ei uregelmessig form. Overgangsfase mellom støytvis strøyming og ringstrøyming i vertikal røyrstrøyming.
 - *Ringstrøyming* (Annular flow) – Når luftmengda vert større og dominerande, legg vatnet seg som ein film langs røyrret, medan lufta strøymar i sentrum. Ikkje relevant for vasstunnelar.
 - *Dropestrøyming* (Spray flow) – Ei vidare auke av luftmengde, fører til ein strøyming av gass med små dropar av vatn fordelt over heile tverrsnittet. Ikkje relevant for vasstunnelar.
-

Dei fleste undersøkingar på strøymingsmønster for strøyming med luft og vatn, er utført med transport av luft i horisontale røyr og røyr med positiv helling. Det er gjort få undersøkingar av strøymingsmønster for transport og retur av luft i negativt hellande røyr, som er gjeldande situasjon i vassstunnelar og bekkeinntakssjakter.

I følge Rouhani og Sohal (1983) er strøymingsmønstera i motstraums fasestrøyming ved horisontal strøyming avgrensa til stratifisert strøyming, bølgestrøyming og støytvis strøyming. Motstraums fasestrøyming med vatn og luft i positivt hellande røyr er ikkje mogleg, sidan oppdriftskrefter og dragkrefter på luftboblene begge verkar i same retning.

Rouhani og Sohal (1983) refererte til Barnea *et al.* (1980), Taitel og Dukler (1976), og Weisman og Kang (1981) sine observasjonar av strøymingsmønster i to-fasestrøyming for hellingar mellom 0 og 90 grader. Strøymingsmønstera observert var like mønster vist i Figur 2-3 og Figur 2-4, med unntak av kvervelstrøyminga, som berre vart observert i vertikale sjakter. Pothof og Clemens (2011) observerte lagdelt strøyming i hellande røyr ved stor vassføring og lufttilførsel.

Transport av luft i bekkeinntakssjakter er ein gradvis overgang frå boblestrøyming til proppstrøyming, medan retur av luft aukar med vassfarta i sjakta frå boblestrøyming/proppstrøyming til støytvis strøyming.

2.1.4. Kompressibilitet av luft

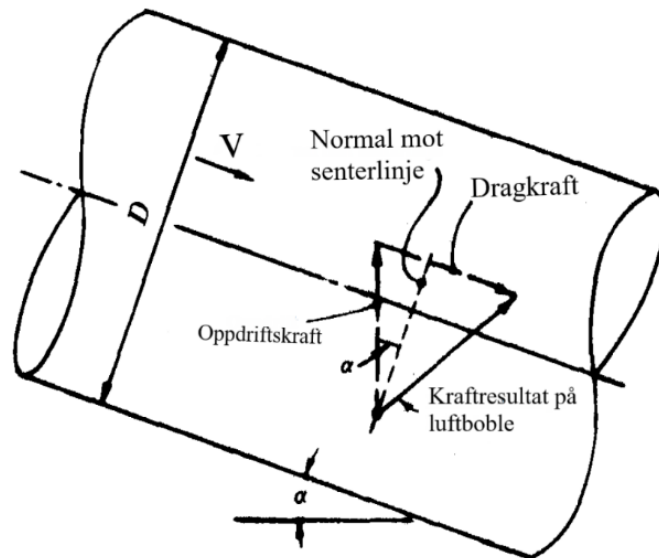
Sjølv om vatn er *litt* kompressibelt, reknast fasen i hydraulikk som inkompressibel. Det vil seie at volumet til ein vassmasse ikkje endrar seg ved endring av trykk. Til samanlikning er luft svært kompressibelt, og volumet minkar raskt med aukande trykk. Eksempelvis endrar densiteten til vatn seg frå om lag 1000 kg/m^3 ved 1 atm og 4°C , til om lag 1000.07 kg/m^3 ved 3 atm, medan densiteten til luft endrar seg frå 1.27 kg/m^3 til 3.82 kg/m^3 ved same forhold.

Utføring av modellforsøk med strøyming av luft og vatn under høgt trykk fører til store skalaeffektar. Kompresjon av luft i fullskala og effektane av den store kompresjonen, er ikkje mogleg å gjenskape i modell. I fullskala opptrer lufta i systemet som ei fjør, som kan gi store trykksvingingar. Usikkerheitene aukar med auka geometrisk skalaforhold og auka mengde luft i strøyminga. Effekten av kompressibiliteten til luft i bekkeinntakssjakter er vidare kommentert i 2.3.1.

2.2. Medriving og samling av luft i sjakter og tunnelar

2.2.1. Krefter på luftbobler

Transport og retur av luft i tofasestrøyming er eit resultat av ein kraftbalanse på luftboblene i vatnet. Dragkraft og oppdriftskraft er dei dominerande kreftene i kraftbalansen. Storleiken til luftbobla, farta til vatnet og sjakt-/tunnelhelling er dei viktigaste parameterane som påverkar kraftbalansen.



Figur 2-5 Kraftlikevekt på luftboble i røyr (Falvey, 1980).

Figur 2-5 viser kraftbalansen på ei luftboble i eit røyr med negativ helling. For vasstunnelar med positiv helling, vil resultatanten frå dragkreftene og oppdrifta verke i same retning, og luftbobla transporterast i strøymingsretninga. For vasstunnelar med negativ helling, returnerer luft motstraums dersom oppdrifta er større enn dragkreftene (Falvey, 1980).

Kraftbalansen illustrert i Figur 2-5 kan formulerast som i likning 1:

$$C_d \rho_w \frac{\pi D_e^2}{4} \frac{v^2}{2} = (\rho_w - \rho_a) \frac{\pi D_e^3}{6} g S_0 \quad (1)$$

- Der: C_d = drag koeffisient
 v = gjennomsnittleg vassfart
 S_0 = sjakthelling = $\sin(\alpha)$
 ρ_w = densitet av vatn
 ρ_a = densitet av luft
 D_e = diameter til luftboble
 g = tyngdens akselerasjon

Når venstre side av likning 1 er større enn høgre side, vil luftbobler transporterast med vatnet i negativt hellande røyr. Omforming av likning 1 og divisjon av begge sider med sjaktdiameter D , gir eit uttrykk for ei dimensjonslaus vassfart for transport av luft i røyr:

$$\frac{v^2}{gD} = \frac{4 D_e}{3 D} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \frac{S_0}{C_d} \quad (2)$$

Likning 2 gjev eit dimensjonslaust uttrykk for transport og retur av luft som ein funksjon av sjakthelling, densiteten til luft, densiteten til vatn, dragkoeffisienten C_d , og forholdet mellom diameteren til røyret og diameteren til luftbobla. Falvey (1980) påpeiker, at i lukka røyrstrøyming kan korkje dragkoeffisient eller forholdet mellom røyr diameter og luftboblediameter fastsetjast. Dermed må det takast i bruk dimensjonsanalyse med viktige parameter, for å kunne utføre korrelasjonsstudiar for grenser for transport og retur av luft i lukka strøyming (symbolforklaringar i Tabell 2.1):

- D_e/D er ein funksjon av det auka falltapet under luftbobla som oppstår grunna luftboblas innsnevring av tverrsnittet. Falltapet er avhengig av Reynolds tal:

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (3)$$

For røyrstrøyming er strøyminga laminær for $Re < 2300$, og med ei grense for fullt utvikla turbulent strøyming for $Re > 4000$. I vassdragshydraulikk er strøyminga «alltid» fullt utvikla. I ei bekkeinntakssjakt med 2 meter diameter og ei vassføring på $1 \text{ m}^3/\text{s}$ er $Re \approx 640\,000$.

- D_e/D påverkast også av overflatespenning mellom luft og vatn, avhengig av Eötvös-tal

$$Eö = \frac{\Delta\rho g D^2}{\sigma} \quad (4)$$

I to-fasestrøyming med luft og vatn i røyr med $D = 150 \text{ mm}$ er $Eö \approx 3000$, og gir grensa for når overflatespenningar avhengig av røyr diameter påverkar transporten av luftbobler (Pothof og Clemens, 2011).

- Luftboblers «kritiske storleik», den stabile storleiken luftbobla treng for å at oppdriftskreftene vert tilstrekkelege til at luftbobla skal kunne returnere mot

vasstraumen, er avhengig av forholdet mellom overflatespenning til luft og vatn, og tregheitskreftene av vasstraumen. Forholdet er gitt av Webers tal:

$$We = \frac{\rho v^2 D_e}{\sigma} \quad (5)$$

Når $We > 1$ vert skjerspenninga mot luftbobla stor nok til å overvinne overflatespenninga som held luftbobla saman, og små luftbobler kan eroderast laus frå den store luftbobla med diameter D_e .

Tabell 2.1 Symbolforklaring

Symbol	Forklaring
D	Diameter av røyr [m]
D_e	Diameter av luftboble [m]
v	Vassfart [m/s]
ν	Kinematisk viskositet til vatn [m^2/s]
ρ	Densitet til vatn [kg/m^3]
g	Tyngdens akselerasjon [m/s^2]
$\Delta\rho$	Skilnad i densitet mellom luft og vatn [kg/m^3]

Grensa for transport og retur av luftbobler er dermed gitt av likning 6, og er ein funksjon av følgjande dimensjonslause parameter:

$$\frac{v}{\sqrt{gD}} = f(Eö, We, Re, n, S_0) \quad (6)$$

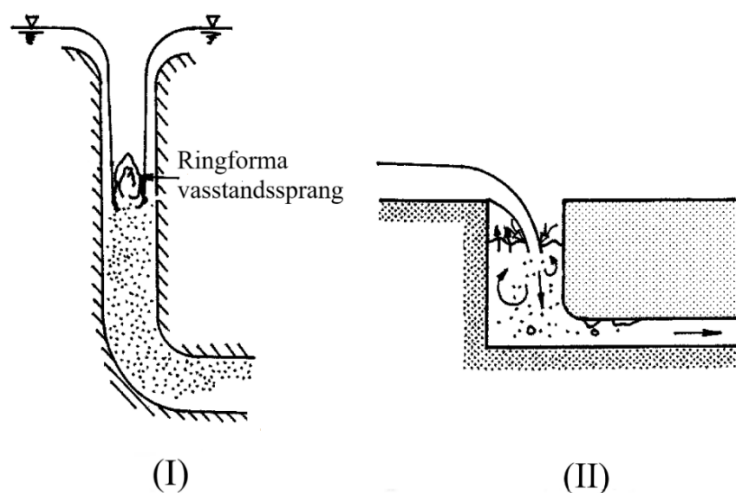
Vidare definerast det dimensjonslause *strøymingsforholdet* F (pipe flow number) i likning 7:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (7)$$

Strømningsforholdet F brukast for å samanlikne resultat frå ulike forsøk på transport og retur av luft i lukka røyrstrøyming. Strømningsforholdet er det mest brukte kriteriet for grense mellom transport og retur av luft i trykkstrøyming og er brukt til skalering mellom prototype og modell.

2.2.2. Luftmedriving

Luftmedriving er prosessen der grensesjiktet mellom luft og vatn endrar seg i slik grad at luft vert dregen med som ein del av vasstraumen. Eit stort tal forskning på mekanismar for medriving av luft i strøyming med fri vassflate og i overgang mellom røyrstrøyming og strøyming med fri vassflate har resultert i ulike empiriske uttrykk. Luftmedrivingsprosessen er ikkje skalerbar, grunna avhengigheita av boblestørleiken til lufta. Boblestørleiken er avhengig av vassfarta, som i modellforsøk skalert etter Froudes modellov er lågare enn i fullskala. Mangelen på eit dimensjonslaust kriterium for luftmedriving (liknande Shields-parameter for erosjon og sedimentering), avgrensar moglegheitene for overføring av resultat frå fysiske modellforsøk mellom ulike hydrauliske konstruksjonar (Ervine, 1998).

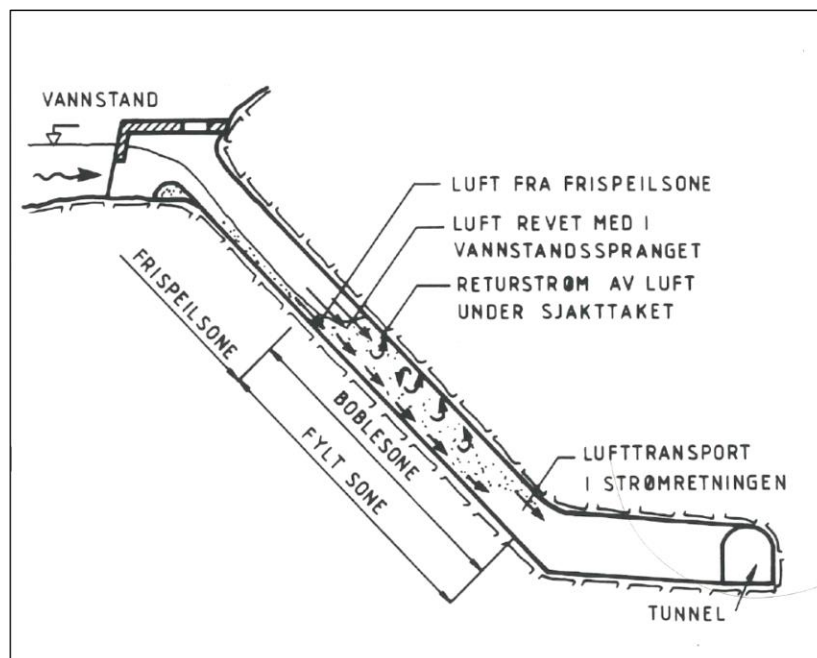


Figur 2-6 Luftmedriving i vertikale sjakter. Ringforma overløp (I) og konvensjonelt overløp (II) (Ervine, 1998).

I bratte og vertikale sjakter er forholda oppstrøms og nedstrøms trykklinjas lokasjon bestemmande for mengde luft riven med vasstraumen. Luftmedriving grunna kvervlar ved inntaksrister eller turbulens i samlekanalar er til samanlikning liten. For vertikale sjakter er luftmeddrivinga påverka av type overløpsterskelen ved sjaktopninga. Med sirkulær overløpsterskel, dannast eit ringforma vasstandssprang der systemet går over til lukka strøyming. Lufta rivast med i vasstandsspranget, samt i den turbulente strøyminga langs

sjaktveggen. I inntak med konvensjonelle overløp fører den fallande vasstrålens impuls til medriving av luft i strålens treffpunkt. Kraftig turbulens rundt sjølve treffpunktet fører også til medriving av luft (Falvey, 1980). Begge forholda er illustrert i Figur 2-6.

Figur 2-7 viser luftmedriving i sjakter med helling mindre enn 90 grader. Sjakta delast opp i to soner: Frispeglsona og fylt sone. I overgangen mellom sonene dannast det eit vasstandssprang. I frispeglsona akselererer vatnet mot normalstrøyming, og det dannast eit turbulent grensesjikt langs botn og veggjar i sjakta. Når kvervlane frå turbulensen er store nok til å bryte vassflata, riv dei luft inn i vasstraumen. Turbulensen frå vasstandsspranget, og den skytande straumen frå frispeglssona inn i den lukka delen av tverrsnittet, aukar luftmedrivinga ytterlegare (Bekkeinntakskomiteén, 1986).



Figur 2-7 Luftmedriving i bratte sjakter(Bekkeinntakskomiteén, 1986).

Mengde luft som vert riven med i fyrste del av sjakta og transportert vidare nedover til tunnelen, er avhengig av *lufttransportkapasiteten* i sjakta og *innblandingskapasiteten* i vasstandsspranget (Bekkeinntakskomiteén, 1986). Lufttransportkapasiteten er eit mål for mengde luft vasstraumen i den fylte delen av sjakta kan transportere. Den er avhengig av hellinga på sjakta, farta til vatnet, turbulens nedstraums vasstandsspranget, og stigfarten til luftboblene: Eit resultat av kraftbalansen mellom drag og oppdrift på enkeltbobler (Ahmed, Ervine og McKeogh, 1984).

Innblandingskapasiteten gir ei øvre grense for kor mykje luft som kan blandast inn i frispeglsona og vasstandsspranget. I flaumsituasjon er lufttransportkapasiteten mykje større enn innblandingskapasiteten grunna høg vassfart i den fylt sone. Det gjer innblandingskapasiteten

avgrensande for netto lufttransport i sjakta. Ved lågare vassføringar, er lufttransportkapasiteten den avgrensande faktoren for kor mykje av den innblanda lufta som transporterast med vidare i sjakta. (Bekkeinntakskomiteén, 1986).

Luft som ikkje dragast med nedover sjakta, returnerer til friluft gjennom den turbulente sona i vasstandsspranget. Mekanismen kallast *naturleg lufting* (Bekkeinntakskomiteén, 1986). Naturleg lufting finn stad når vassfarta i fylt sone er lågare enn grensa for transport av luft i den fylte delen av sjakta. Tabell 2.2 viser ulike grenseverdier for naturleg lufting frå ulike publikasjonar. Spreiinga i grenseverdiane illustrerer utfordringa med skalering av fysiske modellforsøk på luftmediving, sidan storleiken på luftboblene påverkar oppdrifta og stigfarten til boblene i vesentleg grad.

Tabell 2.2 Grensefart for naturleg utlufting i sjakter

Vassfart i sjakt	Kjelde
1.0	Ahmed, Ervine og McKeogh (1984)
0.8	Ervine (1998)
0.6	Bekkeinntakskomiteén (1986)
0.15 - 0.25 (vertikal sjakt)	Bekkeinntakskomiteén (1986)

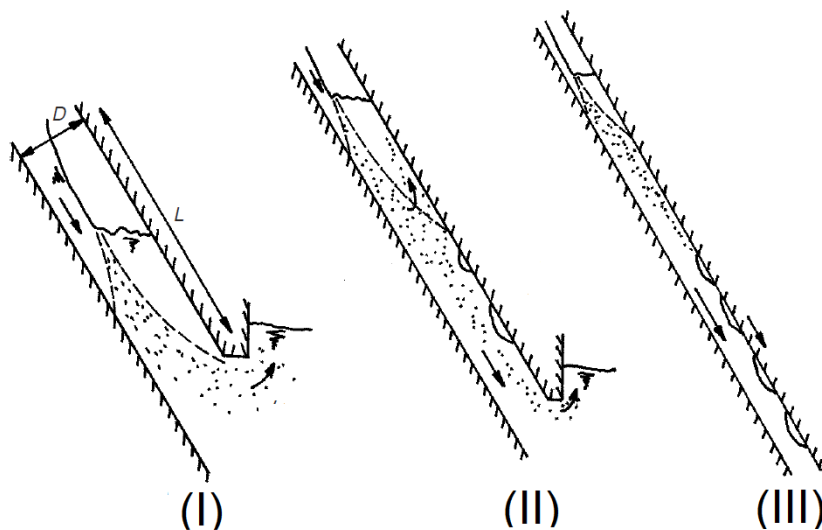
Mortensen, Barfuss og Johnson (2011) undersøkte påverknad av endra vasstemperatur på luftmediving, og konkluderte med at luftmedivinga auka med minkande vasstemperatur. Overflatespenninga mellom luft og vatn minka med minkande vasstemperatur, og førte til at boblediameteren til dei medrivne boblene vart mindre. Konsekvensen vart at stigfarten til dei små luftboblene vart lågare. For bekkeinntakssjakter som overfører vatn frå smeltevatnet frå brear eller smeltevatn under vårflaumar, kan effekten føre til auka innblandingsskapitet i sjakta, som gir auka transport av luft til tunnelen.

Bekkeinntakskomiteén (1986) presenterer nokre tommelfingerreglar for mengde luft medrive i bekkeinntakssjakter som utgangspunkt for planlegging av bekkeinntak. Estimata for lufttransport i frispeglsona er 10-40 volum% luft i vasstraumen *ved fullt utvikla luftinnhold*. Fullt utvikla luftinnhold er gjeldande når lengda på frispeglsona er 100-200 gongar djupna ved normalstrøyming for bora sjakter, og 50-100 for råsprenge sjakter. Medivinga i vasstandsspranget er om lag 10-15 volum% og 5-10 volum% av vasstraumen for høvesvis

råsprenge og bora sjakter. Til samanlikning dimensjonerast lukka flaumløp med luftmeddriving på 30 volum% luft, med krav om strøyming med fri overflate i heile flaumløpet for dimensjonerande avløpsflaum (NVE, 2005).

2.2.3. Samling av luft i sjakt og tunnel

Strøymingsmønsteret i sjakter ved luftmeddriving er dominert av boblestrøyming, som er gjeldande langs heile *bubblesona*, vist i Figur 2-7. Først er heile tverrsnittet fylt av små bobler. Ei viss lengde nedstrøms vasstandsspranget, stig boblene mot hengen og slår seg saman til større luftbobler, og strøymingsmønsteret går over til å likne meir på proppstrøyming. Lengda på bubblesona er avgjerande for om lufta når tunnelen som små eller store luftbobler.



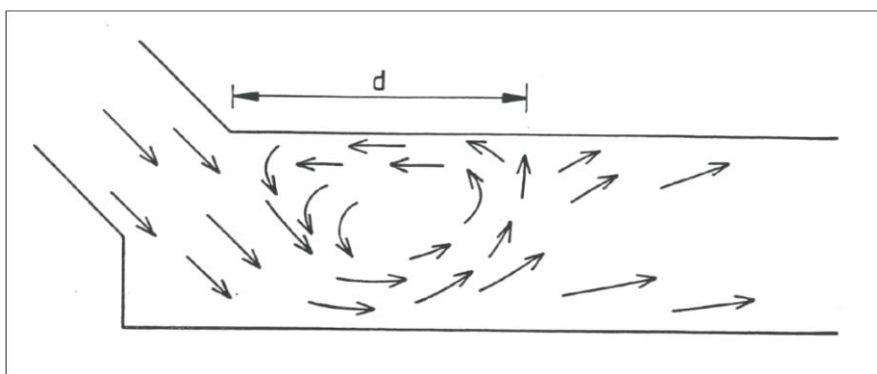
Figur 2-8 Transport av luft i sjakter med ulike sjaktlengder (Ervine, 1998).

Figur 2-8 illustrerer tre transportregimer for luft i sjakt, presentert av Ervine (1998). Transportregimene er avhengig av forholdet mellom sjaktdiameter D og lengda L frå vasstandsspranget til utløpet av sjakta:

- (I) Ved $L/D < 5$ vert all luft transportert som små luftbobler i suspensjon.
- (II) Ved $5 < L/D < 20$ transporterast delar av lufta som større luftbobler i hengen, medan resten transporterast som små luftbobler i suspensjon.
- (III) Ved $L/D > 20$ transporterast all luft som store luftbobler i hengen.

I bekkeinntakssjakter varierer forholdstalet L/D med trykklinja i sjakta (Guttormsen, 1981), men er oftast så lange at dei i dei fleste tilfelle fell innanfor kategori III.

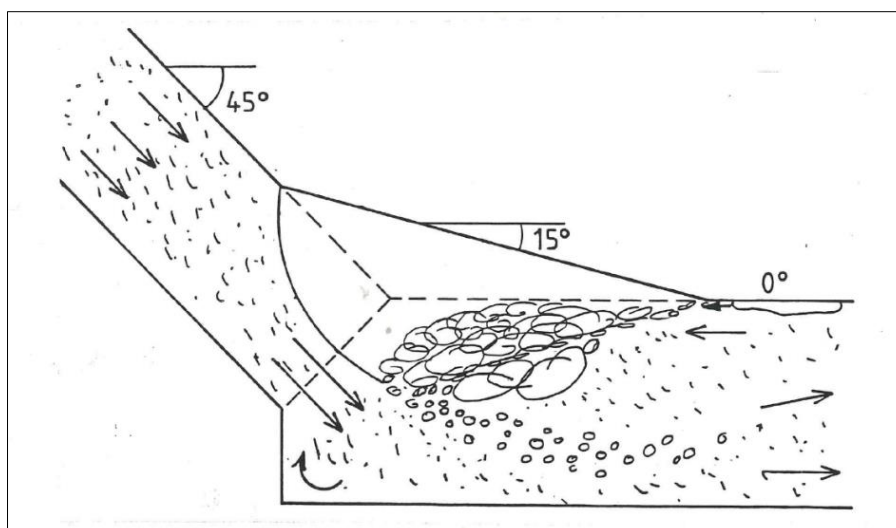
I tunnelen endrast strøyminga samanlikna med strøyminga i sjakta. Auka tverrsnittsareal gjev minka vassfart. Samstundes aukar trykket i strøymingsretninga grunna omsetjing av hastigheitsenergi til trykkenergi. Strøyminga i overgangen mellom sjakt og tunnel, illustrert i Figur 2-9, fører til ein returstraum langs hengen som startar ei viss lengde nedstrøms enden av sjakta. Returstraumen oppstår som eit resultat av endra strøymingsretning i overgangen. Endringa i strøymingsretning medfører eit lokalt trykktap ved hengen. Luftbobler søkjer mot lågare trykk, og trykktapet fører til ein returstraum av store luftbobler mot overgangen mellom sjakt og tunnel. Luftboblene returnerer opp sjakta når dei er store nok til at oppdriftskreftene på bobla er større enn dragkreftene.



Figur 2-9 Returstraum etter overgang mellom sjakt og tunnel. Avstanden d er avstanden til der vassfarten $v = 0$ i tunnelhengen (Berg, 1986).

Ved auka vassføring og auka tilførsel av luft, dannast dei ei luftlomme i overgangen mellom sjakt og tunnel, illustrert ved Figur 2-10. Storleiken på lomma aukar med auka vassføring og lufttilførsel. Luftlomma strupar strøymingstverrsnittet, og det oppstår strøyming med fri vassflate under lomma. Trykket er det same langs heile vassflata, og situasjonen ter seg på same vis som ved strøyming med fri vassflate i friluft. Eit vasstandssprang kan dannast ved nedstrøms ende av luftlomma når vassfarta under lomma er stor nok. Det lokale trykktapet bak, og den kraftige strøyminga i forkant, held luftlomma stasjonær i overgangen mellom sjakt og tunnel.

Vasstandsspranget eroderer luftlomma, og vasstraumen dreg med seg små luftbobler nedover i tunnelen. Om storleiken til luftlomma veks eller minkar, er avhengig av mengde tilført luft frå returstraumen bak lomma, graden av erosjon i vasstandsspranget og mengde luft som returnerer opp sjakta (Bekkeinntakskomiteén, 1986).



Figur 2-10 Vasstandssprang i overgang mellom tunnel og sjakt(Berg, 1986).

Strøymingsmønsteret i sjakta ved retur av luft er avhengig av vassføringa i sjakta. Ved låg vassføring, luft returnere som små bobler i sjakthengen. Auka vassfart krev større luftbobler for at luft skal kunne returnere, og fører til ein overgang til proppstrøyming. Ved vidare auke av vassfarta, endrast strøymingsmønsteret til støytvis strøyming. Det er ikkje funne nokon grenser for når strøymingsmønsteret endrar seg med endra strøymingsforhold F .

2.3. Luftutblåsing i bekkeinntakssjakter

2.3.1. Kva er ei luftutblåsing?

Bekkeinntakssjakter kan vere frå titals til hundretals meter lange, noko som kan gi tilsvarande høgt trykk i sjakta og tunnelen. Det høge trykket komprimerer lufta i systemet. Kompresjonen fører til ei lagring av potensiell energi i lufta, som aukar med veksande trykk. Ei luftboble på retur opp sjakta, ekspanderer raskt grunna det fallande vasstrykket. Ekspansjonen fører til auka oppdrift, lufta akselererer, og skyv vatnet framføre seg til lufta når friluft gjennom inntakskonstruksjonen.

Ei luftutblåsing er hendinga der større volum komprimert luft evakuerer ut sjakter, tunnelar eller luker, og gir ein eksplosjonsliknande effekt i det blandinga av vatn og luft når friluft (Bjartnes *et al.*, 2016). Ei luftlomme på 2000 m^3 komprimert under 30 mVS, har ein potensiell energi ekvivalent med energien i 200 kg dynamitt (Bhatia, 1978). Dersom store mengder komprimert luft får samle seg i overgangen mellom tunnel og sjakt, kan rask frigjering av den potensielle energien føre til kraftige utblåsingar. Ved dykka luker og tunnelar kjem utblåsinga til syne som kraftig «brusing» i overvatnet, sett til dømes ved botntappeløp i høge dammar. I bekkeinntakssjakter vil kraftige utblåsingar skyte eit «prosjektil» av luft og vatn som fyl den

forlenga bana av sjakta. Utblåsinga kan øydelegge armerte betongkonstruksjonar og blåse bort varegrinder (Bekkeinntakskomiteén, 1986). Figur 2-11 viser eit bilete av ei kraftig utblåsing ved Holmaliåna i Ulla-Førre-vassdraget.



Figur 2-11 Utblåsing ved Holmaliåna (Bekkeinntakskomiteén, 1986).

Ei kraftig utblåsing kan også skape problem i sjølve sjakta. Bjartnes *et al.* (2016) refererer til Skoglund (1993), med rapportar av utsprengde hóler på storleik med hus i bekkeinntakssjakter drivne i dårleg fjell.

2.3.2. Føresetnader for utblåsingar i bekkeinntakssjakter

Nokre hovudføresetnader *må* vere til stade for at utblåsingar i sjakter skal finne stad:

-
- *Luft må vere innestengt eller føres inn i systemet i tilstrekkelige mengder*
 - *Lufta må komprimeres slik at det etableres stor «spreng-virkning» når den senere ekspanderer*
 - *Lufta må skilles ut fra vannet før den løses opp*
 - *Den utskilte lufta må samles til et større luftvolum under trykk, dvs. luftvolumet må hindres i å unnvike oppover før det blir stort*
 - *Det må finnes en mekanisme som gjør at luftvolumet utløses samlet når det er blitt tilstrekkelig stort, og starter vandringen mot lavere trykk*

(Bekkeinntakskomiteén, 1986, s. 89)

Lufta som blåstast ut bekkeinntakssjakter kjem ikkje naudsynleg frå same inntak, men kan til dømes kome frå luft riven med i andre bekkeinntak i systemet, luftputer danna i tunnelsystemet under fylling av tunnelen, mm.

For tilfelle der den utblåste lufta kjem frå same bekkeinntak, er dette i følge Bekkeinntakskomiteén (1986) eit resultat av feildimensjonering av sjakttverrsnittet. Underdimensjonerte tverrsnitt fører til høg vassfart i sjakta, som hindrar *kontinuerleg retur av luft* frå tunnelen og opp sjakta. Grensefarten for kontinuerleg retur er vassfarta i sjakta der store luftlommer samlast i overgang mellom sjakt og tunnel, og hindrast i å luftast kontrollert opp sjakta. Ei minke av vassfarten til under grenseverdien, kan føre til at luftlomma evakuere opp sjakta og fører til kraftige utblåsingar. Grunnar til redusert vassfart i sjakta kan vere:

-
- *Når vannføringen i bekkeinntaket reduseres på slutten av en flom*
 - *Når vannføringen i bekkeinntaket reduseres ved plutselig igjen-tetting, f. eks. når isflak eller torv legger seg på grinda*
 - *Når trykket stiger fordi pådraget i kraftstasjonen reduseres*
 - *På grunn av dynamiske effekter som oppstår hvis vannstandsspranget i tunnelen ikke er stabilt*
 - *Når kapasiteten til inntaket reduseres p.g.a. falltap ved luftlommen*
 - *Når kapasiteten til inntaket reduseres fordi vannstrømmen slår i taket ved innløpet til sjakta og lukker inne en større luftlomme øverst i sjakta*

(Bekkeinntakskomiteén, 1986, s.92)

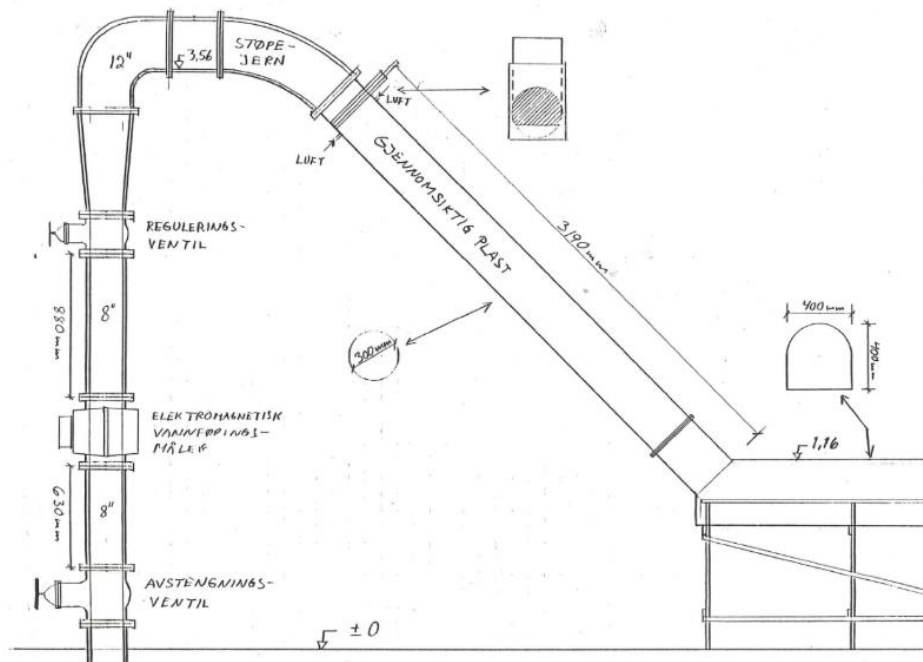
2.3.3. Modellforsøk på retur av luft i bekkeinntakssjakter

Fire tidlegare modellforsøk er utført ved *SINTEF/NHL* og *NTNU* i forbindelse med ulike forskingsprosjekt og masteroppgåver. Målet med forsøka har i hovudsak vore det same: Fastsetjing av grenseverdiar for kontinuerleg retur av luft i bekkeinntakssjakter.

Likning 8, også presentert i 2.2.1, har vorte brukt til samanlikning og skalering av resultat mellom dei ulike modellforsøka og fullskala bekkeinntakssjakter.

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (8)$$

Berg (1986) fann grenser for retur av luft frå tunnel til sjakt ved bruk av fysiske modellforsøk. Resultata frå forsøka leia til anbefalingane for dimensjonering av bekkeinntakssjakter i rapporten *Bekkeinntak på kraftverkstunnelar*. Modellen er vist i Figur 2-12. Sjakta i modellen hadde 45 graders helling.



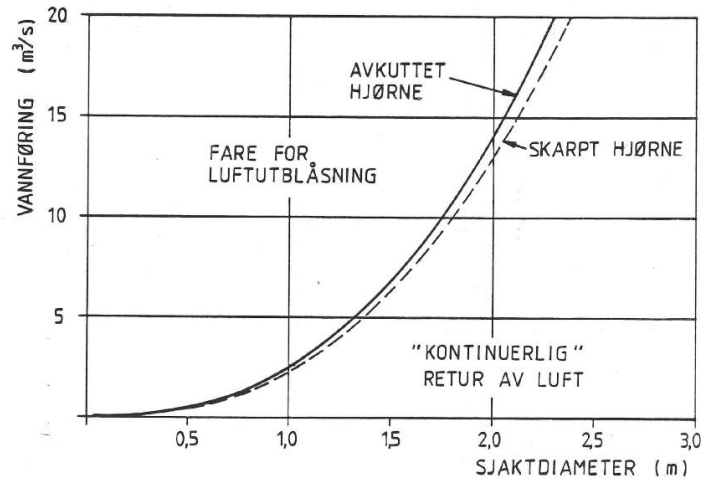
Figur 2-12 Skisse av modell brukt av NHL/SINTEF (Berg, 1986).

Modellen forsøkte å gjenskape strøymingssituasjonen i nedre del av sjakt, øvre del av tunnel, samt overgangen mellom desse. Varierte parameter i modellforsøka var vassføring, tilført mengde luft, vasstrykk, og utforminga av overgangen mellom sjakt og tunnel. Tunnelhellinga varierte med null fall og eit fall på 1:20. Overgangen mellom sjakt og tunnel varierte mellom skarpkanta og avkutta hjørne, der det avkutta hjørnet gav ei gradvis auke av tunnelverrsnittet i overgangen.

Berg (1986) slutta at strøymingsforholdet i sjakta var avgjerande for retur av luft. Skalerte resultat er presentert i Figur 2-13, som også er trykt Bekkeinntakskomiteén (1986). Grafen det einaste verktøyet planleggjarar og utbyggjarar har tilgjengeleg for dimensjonering av sjakter mot utblåsing av luft i bekkeinntakssjakter.

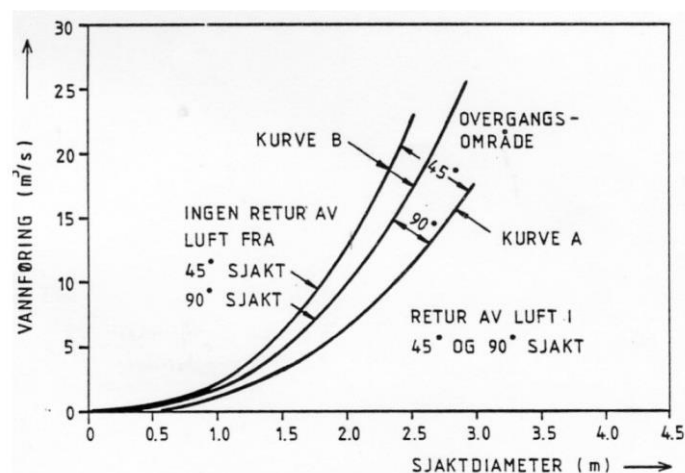
Resultata viser ein grenseverdi for kontinuerleg retur av luft ved strøymingsforhold $F = 1$ og $F = 0.95$ i sjakta for høvesvis avkutta og skarpkanta hjørne. Forholdet vart kommentert for å

vere gyldig for arealforhold mellom sjakt og tunnel på mellom 1:2 og 1:10, med aukande usikkerheit for aukande forholdstal (Berg, 1986). Grunngevinga for dette forholdet er ikkje kommentert, og det vart ut i frå det som er rapportert frå forsøka berre utført forsøk med arealforhold på 1:2.



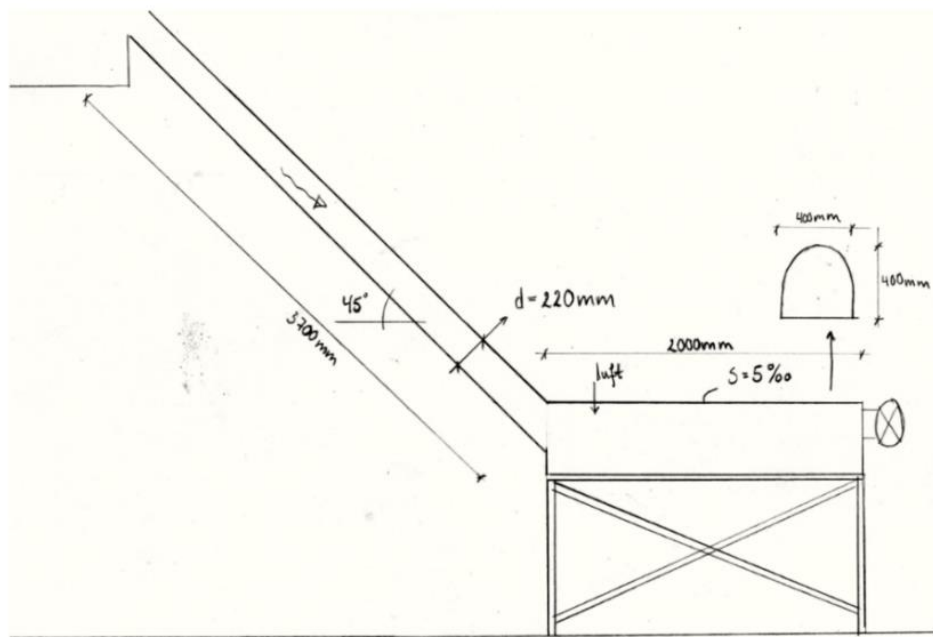
Figur 2-13 Grenseverdier for kontinuerleg retur av luft (Berg, 1986).

Dahl og Guttormsen (1986) inkluderte forsøk med sjakthelling på 90 grader modellforsøk på retur av luft i bekkeinntakssjakter direkte innført på driftstunnel. Sjaktdiameteren i forsøket var 59 mm. I forsøket stoppa all retur av luft frå tunnel til sjakt ved strøymingsforhold $F = 0.94$ og $F = 0.71$ i sjakta, for høvesvis 45 og 90 graders sjakthelling. All luft returnerte opp sjakta for strøymingsforhold $F < 0.47$. Vedlegg B viser skisse av modellen, og Figur 2-14 viser resultatata frå modellforsøket. Informasjonen om forsøka er basert på tolking av dei to figurane, som begge er henta frå Gjerde (2009).



Figur 2-14 Grenseverdier for kontinuerleg retur av luft (Dahl og Guttormsen, 1986).

Gjerde (2009) utførde nye modellforsøk i forbindelse med si masteroppgåve ved NTNU. Oppgåva vart knytt til eit Forskings- og Utviklingsprosjekt i Statkraft. Modellforsøket tok utgangspunkt i modellen frå Berg (1986), og testa grenseverdier for kontinuerleg retur av luft for sjakthelling 45 grader og 220 mm diameter. Modellen inkluderte moglegheita for å utføre forsøk med strøyming med fri vassflate i øvre delar av sjakta. Figur 2-15 viser oppsett av modellen med relevante dimensjonar. Det vart observert at luftbobler som returnerte frå tunnel til sjakt vart ståande i sjakta for $F = 0.7$. Forsøka viste også retur av luft frå tunnel til sjakt for strøymingsforhold $F > 1$, men luftboblene returnerte ikkje heile vegen ut av sjakta.



Figur 2-15 Modellskisse (Gjerde, 2009).

Perzyna (2017) utvida forsøksprogramma frå Berg (1986) og Gjerde (2009), og inkluderte forsøk med sjakthellingar på 45, 60 og 90 grader. Illustrasjon av modellen ligg i Vedlegg C. I forsøket vart det skilja mellom tre ulike grenseverdier:

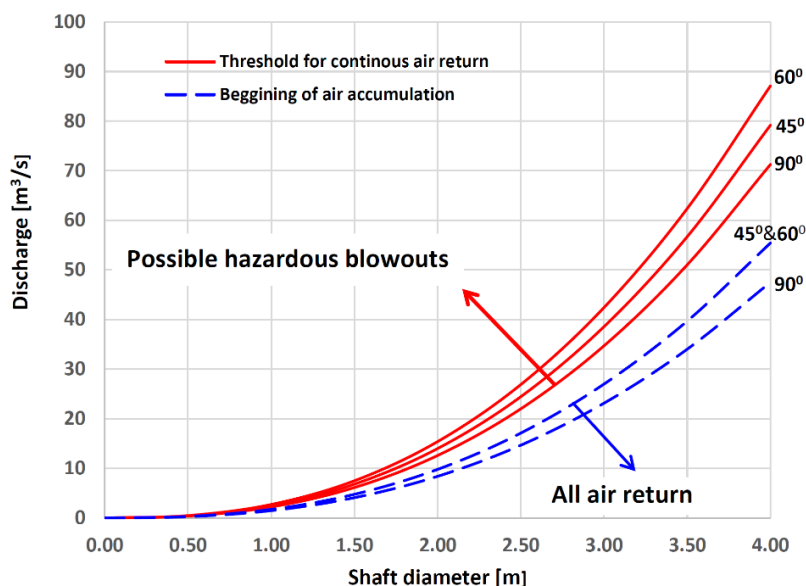
- *Kritisk fart*, vassfarta som gav stasjonære luftbobler i sjakta.
- Grensefart for *kontinuerlig retur av luft*, grensa for når einsskilde luftbobler ikkje kunne returnerer frå tunnel til sjakt.
- *Reinskefart*, for tilfelle der luftputer som hadde vekse opp sjakta returnerte ned tunnelen når lufttilførselen vart stengd av.

Resultata frå forsøka er lista opp i Tabell 2.3, med grafisk visning i Figur 2-16.

Tabell 2.3 Grenseverdier for retur av luft (Perzyna, 2017).

	Kritisk grensefart	Grensefart for kontinuerlig retur av luft	Reinskefart
Helling	F [-]	F [-]	F [-]
45°	0.9	1	1.3
60°	1	1.1	1.4
90°	0.85	0.9	1

Perzyna (2017) konkluderte med at trass grensa for kontinuerleg retur av luft, kunne akkumulering av luft ved lågare strøymingsforhold enn $F = 1.0$ føre til luftutblåsing i sjakta.



Figur 2-16 Grenseverdi for utblåsing i bekkeinntakssjakter (Perzyna, 2017).

I tillegg til grensene for retur av luft, konkluderer oppgåva med at luft vart akkumulert i tunnelen for $F \geq 0.7$, og at dette kunne føre til mindre utblåsingar i sjakta.

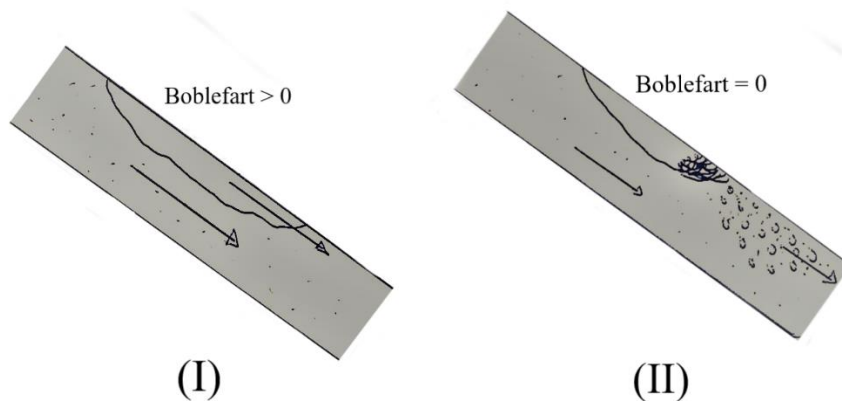
2.4. Forsking på transport av luft i hellande røyr

2.4.1. Mekanismer for transport av store luftbobler

Avsnitt 2.2.1 greia ut om kraftbalansen på luft i vasstunnelar: Retur av luft tek til når oppdriftskreftene på ei luftboble er større enn dragkreftene frå vatnet. I motsett tilfelle, transporterast lufta i strøymingsretninga. Figur 2-17 illustrerer dei to mekanismer for transport av luft, beskrive i Wisner, Mohsen og Kouwen (1975):

- *Soping* (sweeping) – Heile luftbobla transporterast i eitt.
- *Erosjon og meddriving* (generation and entrainment) – Turbulens i nedre ende av luftbobla eroderer og riv av mindre luftbobler (erosjon), som sidan kan transporterast vidare med vasstraumen (meddriving).

Grensene for dei to mekanismane har i litteraturen vorte gitt ei rekkje ulike namn. Bruken av namna har også vorte blanda av ulike forfattarar. Wisner, Mohsen og Kouwen (1975) definerte *sopofarten* (sweeping velocity) om vassfarta som trengs for å transportere luftlommer ved soping, og *reinskefarten* (clearing velocity) som grensefarta for transport av luft uavhengig av transportmekanisme. Liu (2012) definerte *kritisk fart* (critical velocity) som sopofart, og refererte til Little for namngjeving av grensefarten for når luftbobler vart ståande i røyret; *svevefart* (hovering velocity).



Figur 2-17 Mekanismer for transport av luft. Soping (I) og erosjon og meddriving (II).

Bhatia (1978) introduserte hellinga på trykklinja som metode å føreseie transport og retur av luftlommer i vassstunnelar. Når trykklinja har større helling enn tunnelen, går luftbobla mot strøymingsretninga til vatnet. Når hellinga på trykklinja er mindre enn hellinga på tunnelen, transporterast luftboblene i strøymingsretninga. Bakgrunnen for teorien var at oppdriftskreftene i luftboblene fører til at lufta søkjer mot lågare trykk. Guttormsen (1981), Bekkeinntakskomiteén (1986) og Lia *et al.* (2003) presenterte også same teori.

2.4.2. Samanheng mellom sjakthelling og grenser for transport av luft

Det er gjort mange forsøk for å finne grenser for transport av luft i røyrstrøyming, med stor spreing i strøymingsforhold F for dei ulike mekanismane forklart i avsnitt 2.4.1. Litteraturstudiet av Pothof og Clemens (2008), konkluderte at skilnadane sannsynleg skuldast

skalaeffektar og ulike forsøksprosedyrar, samt samanlikning av grenseverdier på tvers av ulike transportmekanismer. Nokre funn frå litteraturstudiet er lista opp under:

- Kalinske og Bliss (1943) fann samanheng mellom auka røyrehelling og auka grensefart for start av erosjon og medriving. Både Kalinske og Bliss (1943) og Kent (1952) kommenterte at grensefart for soping (transport av heile luftbobla i eitt) er merkbar større enn grensefart for erosjon og medriving (gradvis nedbryting av luftbobla).
- Kent (1952) konkluderte med at storleiken på stasjonære, store luftbobler auka med auka røyrehelling.
- Gadenberger (1957) rapporterte at grensa for overgangen mellom retur og transport av luft auka med aukande helling opp til om lag 45 grader, og minkar for hellingar opp til 90 grader. Implikasjonen av dette er at retur av luft lettast tek til ved 45 graders helling, medan grensefarta for retur av luft gradvis synk mot ein minsteverdi for vertikale røyr.
- Lubbers (2007) utførte forsøk med hellingar mellom 0 og 90 grader og ulik diameter, og konkluderte med at grensa for transport av luft ikkje endra seg for røyr diameter over 200mm. I likskap med Gadenberger (1957), vart det rapportert om lågast grense for transport av luft ved vertikal strøyming. I vertikal strøyming er boblestorleiken mindre stabil enn i røyr med mindre helling, sidan dei ikkje har noko «tak» å støtte seg til for å halde seg stabile.

Funna viser at grenseverdiane for transport og retur av luft endrar seg med endra helling, og at grensa for transport av luft er lågare i vertikale sjakter enn sjakter med lågare helling. Bekkeinntakskomiteén (1986) fraråder bygging av bekeinntakssjakter med sjakthelling 60 grader eller brattare.

2.4.3. Påverknad av falltap på variasjon av grenser for transport av luft

Samanlikning av funna i litteraturstudiet til Pothof og Clemens (2008) viste at endring av grensefart for transport som følgje av endra røyrehelling, fylde same trend for dei ulike forsøka, men verdiane varierte med ulik røyr diameter. I eit forsøk på å skilje ut skaleringseffektar grunna ulik diameter, vart det undersøkt om falltapet i røyret spelte inn på transporten av luft. Likning 9 inkluderer Darcy-Weisbachs friksjonsfaktor f i uttrykket strøymingsforhold F ved reinsking:

$$F_{cf} = F_c \sqrt{f} = v_c \sqrt{\frac{f}{gD}} \quad (9)$$

Der: F_c = strøymingsforhold ved reinsking

F_{cf} = strøymingsforhold ved reinsking, justert for falltap i røyret

f = Darcy-Weisbachs friksjonsfaktor

v_c = vassfart i røyr ved reinsking

D = røyr diameter

g = tyngdens akselerasjon

For samanlikning av grenser for transport av luft for to røyr med to ulike diameterar, impliserer likning 9 at ved like strøymingsforhold F_{cf} , vil trykklinjene for dei to røyra ha same helling. Pothof og Clemens (2008) testa det modifiserte strøymingsforholdet på resultat frå tre tidlegare forsøk gjennomført med ulik diameter, som alle viste ulike strøymingsforhold F for grense for transport av luft. Det modifiserte strøymingsforholdet F_{cf} viste tilnærma like verdiar for dei tre forsøka.

Det er ikkje funne nokon liknande introduksjon av betydninga av trykklinja for transport og retur av luft, og for strøymingsforholdet F i internasjonal litteratur, men er som nemnt i 2.4.1 ein brukt teori i norsk litteratur.

Pothof og Clemens (2011) vidareførte arbeidet publisert i 2008 med meir omfattande og detaljerte forsøk på grenser for transport av luft. Prinsippskisse av modellen er vist i Figur 2-18. Konklusjonen frå forsøka var at det ekstra falltapet i røyret som oppstod grunna ståande luftbobler, kunne skalerast med omsyn til modifisert Webers tal, vist i likning 10:

$$We_D = \frac{\rho v^2 D}{\sigma} \quad (10)$$

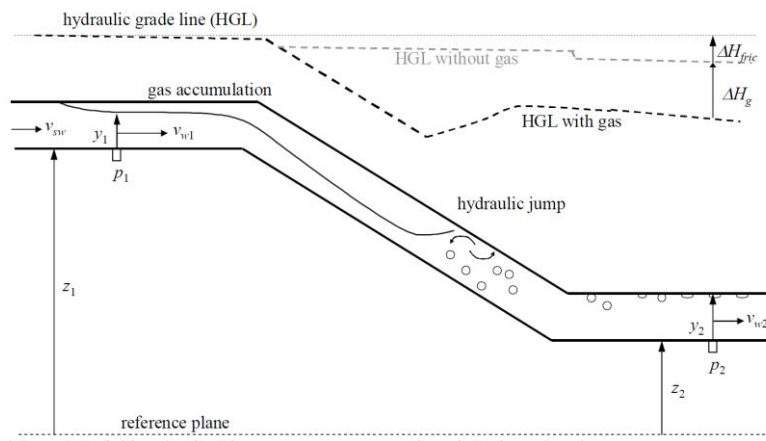
Der: D = Diameter røyr

v = vassfart

ρ = densitet av vatn

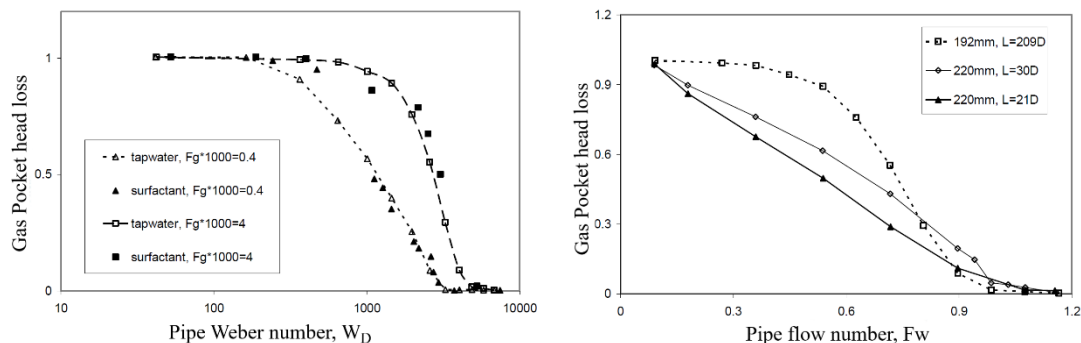
σ = overflatespenning luft/vatn

Forsøka vart utført ved at luft vart tilført i den horisontale delen oppstraums den hellande røyrstrekinga, slik at det oppstod eit vasstandssprang i den hellande delen av modellen. Når luftputa oppstraums vasstandsspranget i røyret var stabil, vart det teke trykkmålingar langs røyret for å kvantifisere falltapedet langs luftflomma.



Figur 2-18 Modelloppsett i Pothof og Clemens (2011).

Ei auke av Webers tal indikerer ei auke i evna vasstraumen har til å erodere luftbobler, -lommer og -puter. Forsøka viste ein reduksjon av det ekstra falltapedet i røyret ved aukande strøymingstal F og «modifisert Webers tal», som vist i Figur 2-19.



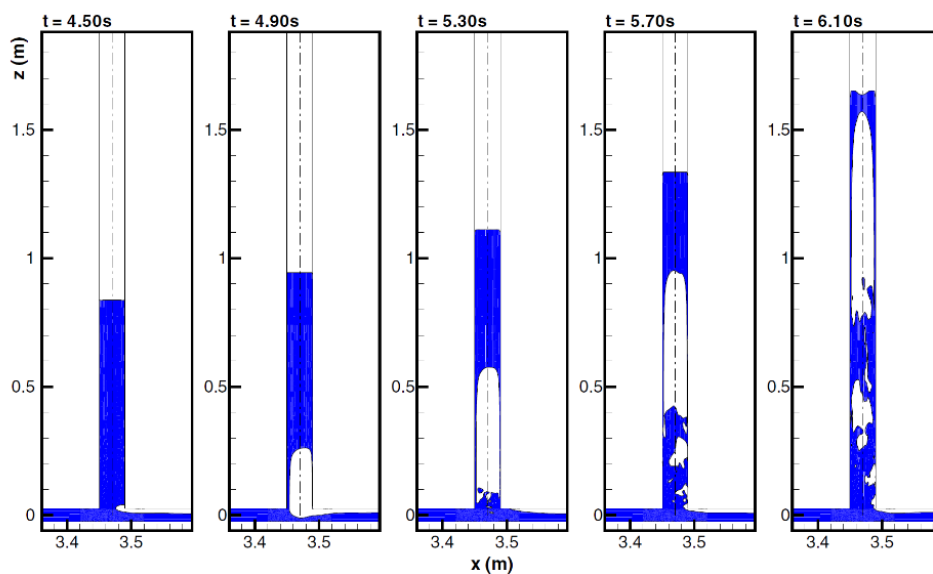
Figur 2-19 Endring av falltap i røyr med auke F og We Pothof og Clemens (2011).

Resultata indikerer at når vassfarta (og dermed Webers tal) aukar, aukar vasstraumens evne til erosjon av lufta i røyret. Når erosjonen aukar, minkar storleiken på dei stabile luftboblene og luftputene i den hellande delen av røyret, og lufta transporterast nedover med vasstraumen. Bekkeinntakssjakter er svært lange samanlikna med sjaktlengda som kan brukast i modellar, og det kan tenkast at luft som returnerer frå overgangen mellom sjakt og tunnel, på eit tidspunkt slår seg saman og vert ståande «stabile» lenger oppe i sjakta, men at sjaktlengda i modell er for kort til å observere dette. Webers tal er mykje større i fullskala bekkeinntakssjakter samanlikna med modell (storleiksorden 1:10 000). Skilnaden indikerer ei stor auke av erosjonspotensialet

til vasstraumen. Konsekvensen kan vere at lufta som returnerer frå tunnel til sjakt aldri når ut sjakta i toppen, men utsettast for erosjon og medriving på veg opp sjakta, og til slutt transporterast attende til tunnelen.

2.4.4. Storleiksforhold mellom sjakt og tunnel

Chan, Cong og Lee (2017a) forsøkte å finne utløyssande orsakar til geysir-liknande utblåsingar i ein modell med vertikalt stigrøyr på eit horisontalt røyr. Modellen kan samanliknast med modellen i Dahl og Guttormsen (1986), med vertikal sjakt direkte på driftstunnel. Forsøka avdekkja at ein avgrensande parameter for utblåsingar var forholdet mellom diameteren på stigrøyrret (sjakt) og det horisontale røyrret (tunnel). Det vart berre registrert utblåsingar ved forhold mellom sjaktdiameter og tunneldiameter lågare enn 0.62.



Figur 2-20 CFD-simulering av utblåsing i vertikalt stigrøyr (Chan, Cong og Lee, 2017b)

Resultata vart verifisert av simuleringar i ein 3D CFD-modell av Chan, Cong og Lee (2017b). Figur 2-20 viser resultat frå ei av simuleringane. I tillegg til å verifisere forholdet mellom stigerøyr og horisontalt røyr som avgrensande for utblåsingar, viste simuleringar at krafta på utblåsingane (kvantifisert med stigefarta på vatnet i stigerøyrret under utblåsing), auka med auka trykk i det horisontale røyrret, auka volum luft i tunnelen, samt auka skilnad i diameter for stigerøyrret og det horisontale røyrret. Berekningstida på simuleringane låg på mellom 360-400 timar.

2.4.5. Påverknad av ruheit på variasjon av transport av luft

Liu og Yang (2012) undersøkte effekt av ruheit på grenser for transport av luft i røyr diameter lik 240 mm og 18.2 graders helling, i forbindelse med forskning på luftmeddriving i botn-tappeluker på høge damanlegg. To av konklusjonane frå forsøka var at:

- Grensefart for erosjon av luftboblene minka i røyr med auka ruheit.
- Grensefart for transport ved soping (transport av heile luftbobler), auka med auka ruheit.

Funna tyder på at luftbobler og luftputer i røyr med stor ruheit, i hovudsak transporterast ved erosjon og meddriving. Som kommentert over av Kalinske og Bliss (1943) og Kent (1952), er grensa for erosjon og meddriving lågare enn grensa for soping. Det kan då tenkjast at auka turbulens i bekkeinntakssjakter samanlikna med glatte røyr brukt i modellforsøk, fører til erosjon av større luftbobler, som vidare fører til at luftbobler som returnere frå tunell til sjakt, lettare eroderast i sjakta og transporterast attende til tunnelen.

Liu og Yang (2013) observerte ei minke av strøymingsforhold F for transport av luft for forsøk utført med aukande diameter. Ei mogleg forklaring vart linka til forsøka utført av Glauser og Wickenhäuser (2009), som viste at grensa for transport auka med ei auke av den dimensjonslause parameteren h/D , der h var høgda på luftbobla i røyrret og D diameteren på røyrret. Liu og Yang (2013) konkluderte at dersom forholdet $F = f(h/D)$ er ulikt for ulike diameterar, vil luftboblene dekkje ein mindre prosent av røyrverrsnittet ved auke av røyr diameter. Konsekvensen er at grensa for transport av luft minkar, sidan oppdrifta minkar, medan dragkreftene framleis held seg relativt store grunna auken av vassfarta i røyrret.

2.5. Oppsummering

To-fasestrøyming er eit komplekst fenomen som oppstår i mange samanhengar. Strøymingsmønster for to-fasestrøyming med luft og vatn er nøye studert for medstraums fasestrøyming (der luft og vatn strøymer i same retning). Den manglande systematiske forskinga på strøymingsmønster i røyr med motstraums fasestrøyming, demonstrerer det særigne med fenomenet «retur av luft i bekkeinntakssjakter».

Eit breitt felt innan forskning på luft i røyr, har kome til einigheit om at transport av luft i røyr kan føreseiast på bakgrunn av det dimensjonslause strøymingsforholdet F , mykje likt Froudes tal for strøyming med fri vassflate. Grenseverdiane endrar seg med endra helling på røyrret. Påverknaden av andre parameter vert sett på som neglisjerbar. Forsøka utført på retur av luft i bekkeinntakssjakter, sluttar seg til denne semja, og har kome til same konklusjon om at

kontinuerleg retur av luft stoppar opp for strøymingsforhold $F \geq 1$, med nokre variasjonar for ulike sjakthellingar. Av dei ulike uttrykka for transport og retur av luft presentert i 2.4.1 og Perzyna (2017) brukast følgjande vidare i rapporten i form av strøymingsforhold F :

- Strøymingsforhold ved kritisk fart, F_K – Grensa for når luftbobler vert ståande stasjonær i sjakta.
- Strøymingsforhold ved grense for kontinuerleg retur av luft, F_{KR} – Grensa når einskilde luftbobler ikkje returnerer frå tunnel til sjakt.
- Strøymingsforhold ved reinsking, F_R – Grensa der luft ikkje returnerer frå tunnel til sjakt, korkje som luftbobler eller luftpute.

Trass i semja om skalering av grenser for transport og retur av luft i røyr på bakgrunn av strøymingsforholdet F , samsvarar ikkje resultata med erfaringar frå nokre fullskala bekkeinntak. For å unngå skadelege utblåsingar, anbefalar *Bekkeinntak på kraftverkstunnelar* dimensjonere bekkeinntakssjakter for å sikre kontinuerleg retur av luft. Erfaringar frå Holmaliåna viser utblåsingar før denne grensa er nådd. Det kan tyde på at ein samanheng mellom vassfart, sjaktdiameter og sjakthelling aleine, ikkje er tilstrekkeleg for å predikere utblåsingar av luft i lukka system. Skilnaden mellom resultata i bekkeinntaksmodellane og fullskala bekkeinntak, tyder på ein av to ting:

1. Større utblåsingar i bekkeinntakssjakter kan førekome sjølv ved kontinuerleg retur av luft frå tunnel til sjakt. Dersom dette er tilfelle, er det element ved mekanismen for utblåsing som ikkje er fullt ut forstått ved hjelp av modellforsøk.
2. Strøymingsforholdet F kan ikkje brukast direkte til skalering av resultat frå modell til prototype, grunna ukjende effektar som påverkar skaleringa.

Funn i nyare publisert litteratur kan tyde på at

- Ruheit og falltap kan ha innverknad på grensene for transport og retur av luft.
- Sjaktdiameter, og arealforholdet mellom tunnel og sjakt, kan vere avgrensande for faren for utblåsingar.
- Auka diameter og vassfart påverkar erosjon og storleik av luftbobler.

På bakgrunn av resultata og parameterane testa i tidlegare modellforsøk på retur av luft i bekkeinntakssjakter, og funna i litteraturstudiet lista opp ovanfor, vart det slutta å utføre nye modellforsøk for å sjå nærare på om endra sjaktdiameter og sjaktruheit har ein effekt på retur av luft i bekkeinntakssjakter.

3. Modellforsøk

For undersøking av retur av luft i bekkeinntakssjakter har det i masteroppgåva vorte gjennomført modellforsøk i ein fysisk modell i Vassdragslaboratoriet ved NTNU i Trondheim. Modellen som vart brukt i forsøka var same modellen brukt i Gjerde (2009) og Perzyna (2017). Det vart gjort nokre endringar på modellen før dei nye forsøka, i samråd med rettleiarar av oppgåva.

Modellen gjenskapa forholda i nedre delar av bekkeinntakssjakter og overgangen frå sjakt til tunnel. Retur av luft frå tunnel og var fenomenet i fokus. Meddriving av luft var ikkje eit fokus i forsøksopplegget. Ein av hovudgrunnane var skalaforholda i modell og prototype: Sjakta i modellforsøket var for kort til å kunne skilje prosessane med luftmeddriving og retur av luft frå kvarandre i same forsøk.

I tidlegare forsøk har fylgjande vorte testa ut:

1. Ulik utforming på overgang mellom sjakt og tunnel (Berg, 1986)
2. Ulik av sjaktdiameter (Berg, 1986; Gjerde, 2009; Perzyna, 2017)
3. Ulik sjakthelling (Perzyna, 2017)

For forsøka i denne oppgåva vart det bestemt å sjå vidare på effekten av endra sjaktdiameter/arealforhold mellom sjakt og tunnel, og effekten av auka ruheit i sjakta.

3.1. Samanlikning av resultat frå prototype og modellforsøk

For full likedanning mellom forsøk i modell og prototype, trengs det likskap mellom Froude tal, Reynolds tal og Webers tal. Det er som kjent ikkje mogleg utan å køyre fullskala modellforsøk. Forsøk på hydrauliske konstruksjonar skalerast normalt sett slik at påverknaden av viskøse krefter kan neglisjerast, og med likskap etter *Froudes modellov*. Med oppfylling av Froudes modellov, kan resultat frå modellforsøk med geometrisk likskap mellom modell og fullskala, skalerast og overførast til fullskala.

Modellforsøk på hydrauliske konstruksjonar tek i stor grad føre seg strøyming med fri vassflate, der Froudes modellov klart er gjeldande. Om modell-lova kan brukast for den trykksette situasjonen i bekkeinntakssjakter med retur av luft, er ikkje gitt utan vidare. To ting kan tale for at skalering etter Froudes modellov kan brukast i modellforsøk på retur av luft i bekkeinntakssjakter:

1. «Overflatebølge-analogien»: Retur av luft i lukka system kan sjåast på som ei overflatebølge som beveger seg oppover langs ei vassflate. Ved strøyming med fri

vassflate set Froudetallet ei grense for når bølger kan forplante seg mot straumen. Denne grensa går ved kritisk strøyning, $F = 1$.

2. Mekanismen som styrer retur og transport av luft er i størst grad avhengig av forholdet mellom tregleiskrefter (farta til vasstraumen) og gravitasjonskrefter (oppdrift av luftbobler i vatn).

Påstand 1 kan vere gyldig utan at påstand 2 er gyldig. Tidlegare modellforsøk tyder på at luft ikkje får returnert opp sjakta for strøymingsforhold $F > 1$ i sjakta. Mekanisme 2 er avhengig av at forholdet mellom oppdriftskrefter og dragkrefter begge aukar med same faktor for auka sjaktdimensjon for å vere gyldig. Dersom dette ikkje er tilfelle, og dragkreftene aukar meir enn oppdriftskreftene, returnerer ikkje luft kontinuerleg sjølv om det i fylgje overflatebølgeanalogien er mogleg.

Modell og forsøksplan vart utarbeida slik at påverknaden av viskositet og overflatespenning kunne neglisjerast:

- Reynolds tal, Re , måtte vere større enn 10^5 for å unngå påverknad av viskøse krefter. Avgrensinga sette ei nedre grense for vassføring i sjakta.
- Pothof og Clemens (2011) fann at reinskefarten skalerte med Eötvös tal, men påverknaden kunne neglisjerast for røyr diameter $D < 150$ mm.

Resultat frå tidlegare modellforsøk på bekkeinntakssjakter, har vorte skalert til fullskala etter likning 11:

$$\frac{v_m}{\sqrt{g D_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{g D_p}} \quad (11)$$

Der v_m = vassfart i modell

v_p = vassfart i fullskala

D_m = sjaktdiameter i modell

D_p = sjaktdiameter i fullskala

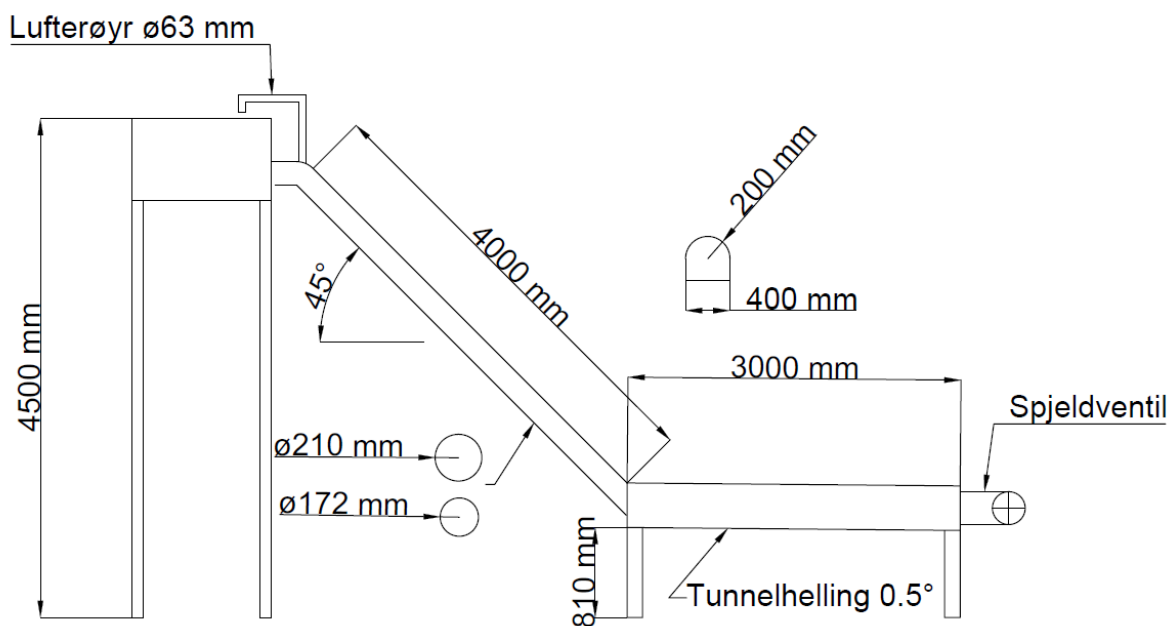
g = tyngdens akselerasjon

Dersom effektar av endra diameter og ruheit ikkje påverkar resultata i modellforsøk med ulikt oppsett, kan strøymingsforholdet F brukast til samanlikning mellom ulike modellforsøk, og til skalering av resultat frå modell til fullskala.

3.2. Fysisk modell

3.2.1. Modellgeometri

Figur 3-1 viser ei skisse av modellen brukt i forsøka. I fylgje Berg (1986), er strøymingsforholdet F i sjakta, og utforminga av overgangen mellom sjakt og tunnel, bestemmande for retur av luft i bekkeinntakssjakter. Modellen vart utforma slik at den representerer nedre del av ei sirkulær bekkeinntakssjakt, med overgang til eit hesteskoforma tunneltverrsnitt. Vassforsyninga vart montert i botnen av ei kasse oppstraums sjakta, som fungerte som inntaksmagasin. Inntakskassa sørger for at innløpet til sjakta til ei kvar tid var dykka. Det dykka innløpet skulle hindre medrivning av luft i toppen av sjakta.

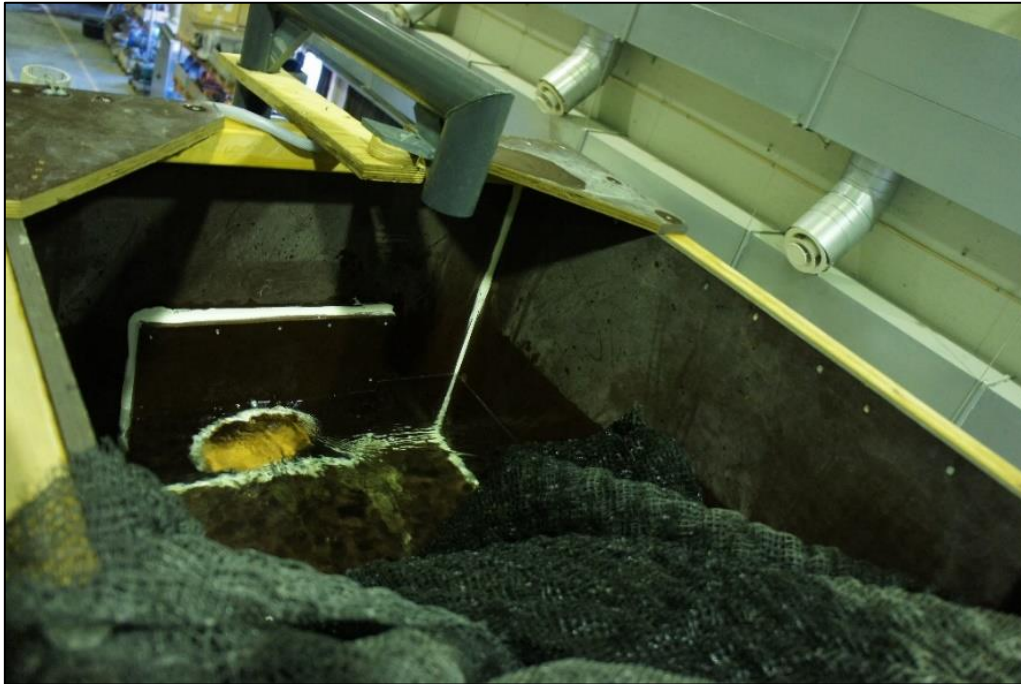


Figur 3-1 Skisse av modell.

Den 4 meter lange sjakta vart montert på inntakskassa med ein vinkel på 45 grader, og enda opp i ein tunnel som bestod av tre seksjonar á 1 meter. Både sjakt og tunnel var bygd av gjennomsiktig akrylplast. Veggane og hengen i tunnelen hadde 10 mm tjukn, medan botn av tunnelen var 20 mm tjukk. Sjakta bestod av to seksjonar av prefabrikkerte røyr, med veggthjukk 5 mm og 4 mm for høvesvis 210 mm og 172 mm røyr diameter. Sjaktdelane vart haldne saman av to gummiband klemt saman med slangeklemmer for å hindre lekkasjar.

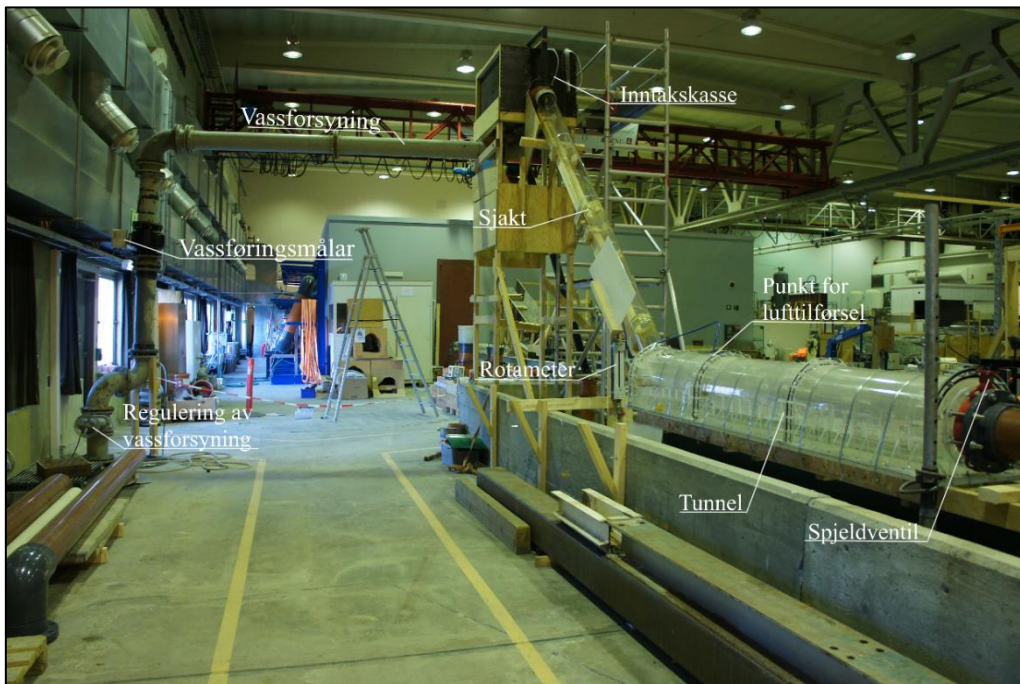
Mellom inntakskasse og sjakt vart det brukt eit røyrbend i PVC som sjakta vart tredd inn på. Eit PVC-røyr samansveisa i vinklar og sveisa fast i toppen av røyrbendet skulle sikre utlufting av luftbobler ståande i den horisontale overgangen mellom sjakt og inntakskasse. Ein

plastnetting fungerte som diffusor for rolege innstrøymingsforhold til sjakta. Figur 3-2 viser bilete av inntakskassa.



Figur 3-2 Inntakskassa i modellen. Bilete av inntakskasse med sjaktinnløp, lufferøyr og plastnetting for rolege strøymingsforhold i ved innløpet.

Ein spjeldventil ved enden av tunnelen vart brukt for regulering av vassføringa og trykket i systemet. Eit stigerøyr viste vasstanden i kassa.



Figur 3-3 Bilete av modell i Vassdragslaboratoriet.

Tabell 3.1 sumerar opp dei viktigaste geometriske parameterane i modellen.

Tabell 3.1 Modelldata

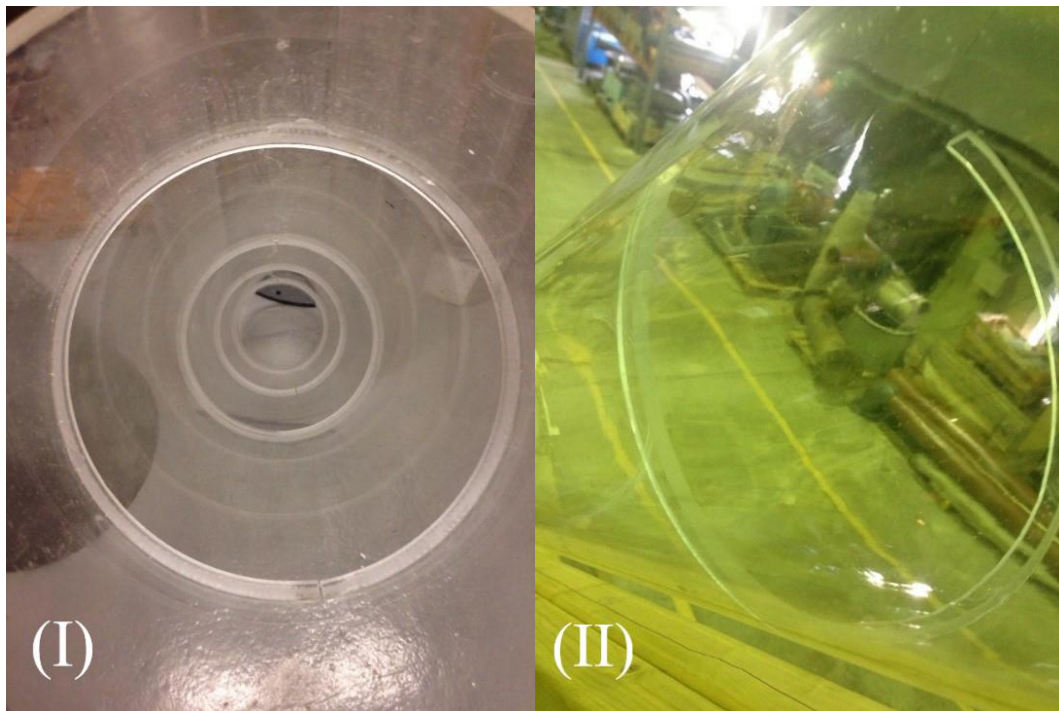
Modelldata	
Sjakt diameter	210 mm / 172 mm
Sjakt diameter D_2	172 mm
Lengde sjakt L	4 m
Lengde tunnel L_T	3 m
Areal tunnel A_T	0.14 m ²
A_T/A_{S1}	1/4.2
A_T/A_{S2}	1/6
Helling sjakt	45°
Helling tunnel	0.5°

3.2.2. Lufttilførsel og sjaktruheit

Den korte sjaktlengda førte til at modellen ikkje kunne brukast både til modellering av luftmediving i øvre deler av sjakt og retur av luft i nedre deler av sjakt. Det ville vore vanskeleg å kontrollere trykklinja i sjakta ved strøyming med fri vassflate i øvre delar av sjakta, og situasjonen ville påverka strøyminga i overgangen mellom sjakt og tunnel som forsøket hadde som mål å studere. I tillegg er luftmediving ein ikkje-skalerbar prosess, og luftmediving i øvre del av sjakta ville gitt dårleg kontroll over forholdet mellom vatn og luft i modellen. Forsøka vart derfor utført med dykka innløp.

I staden for å inkludere mediving av luft ved strøyming med fri vassflate i den øvre delen av sjakta, vart luft tilført i tunnelen ved hjelp av ein luftkompressor. Luftkompressoren gjorde det mogleg å sikre kontroll over forholdet mellom luft og vatn, slik at dette var likt i dei ulike forsøka. Tilført mengde luft var 1.3 % av vassføringa, som i følgje Berg (1986) er gjeldande i overgangen mellom sjakt og tunnel i bekkeinntak. Forsøket skilde ikkje mellom luft rive med i

sjakta og luft frå andre delar av tunnelsystemet. Punktet for luftinntak var plassert om lag en halv meter frå overgangen mellom sjakt og tunnel, og visast i Figur 3-3.



Figur 3-4 Metode for auka ruheit i sjakt. Ringar vart sveisa på innsida av røyret. $D = 210$ mm (I) og $D = 172$ mm (II).

For å undersøkje effekten av auka ruheit i sjakta, vart innsida av sjaktene endra etter forsøk med glatte røyr. Ringar i akrylplast med breidde 5 mm og omkrins lik indre omkrins av sjaktene vart sveisa fast i røyra, som vist i Figur 3-4. Tjukna til ringane var lik tjukna til sjaktene. I sjakta med diameter 210 mm, vart det lagt inn 9 ringar med omlag 40 mm avstand. I sjakta med diameter 172 mm, vart det lagt inn 10 ringar med om lag 36 mm avstand.

3.3. Forsøksplan

Forsøka vart utført med formål å studere oppførsel til luft i bekkeinntakssjakter, med eit fokus på kva effekt endring i diameter og ruheit hadde på resultatet. Det viktigaste søkte resultatet i forsøka var grenseverdien for kontinuerleg retur av luft opp sjakta, F_{KR} .

Forsøka vart utført med ulike vassføringar i modellen. Vassføringa vart auka stegvis til ei maks vassføring for dei to sjaktdiameterane. Maks vassføring avgrensa seg til verdiar for strøymingsforholdet $F = 1.3$ for begge forsøka. Vedlegg E viser samanheng mellom vassføring Q , strøymingsforhold F og Reynolds tal Re i forsøka med dei to sjaktdiameterane.

Tabell 3.2 Oversikt over forsøksparameter.

#	Parameter
1	D = 210 mm, glatt røyr
2	D = 210 mm, med auka ruheit
3	D = 172 mm, glatt røyr
4	D = 172 mm, med auka ruheit

Endring av forsøksparameter førte til permanente endringar på modellen. Forsøka vart difor utført i rekkjefølgja i Tabell 3.2

Det vart teke bilete og video av sjakta og tunnelen under nokre av forsøka, for å dokumentere endring i strøymingsmønster ved ulike strøymingsforhold F . For teste effekten auka strøymingsforhold hadde på retur av luft, vart tal på returnerte luftbobler frå tunnel til sjakt registrert.

Før kvart forsøk vart modellen tømt for luft, og det vart sikra eit stabilt vassnivå over innløpet til sjakta. Etablering av same vassnivå i kassa ved starten av kvart forsøk, skulle sørge for like forhold under dei ulike forsøka.

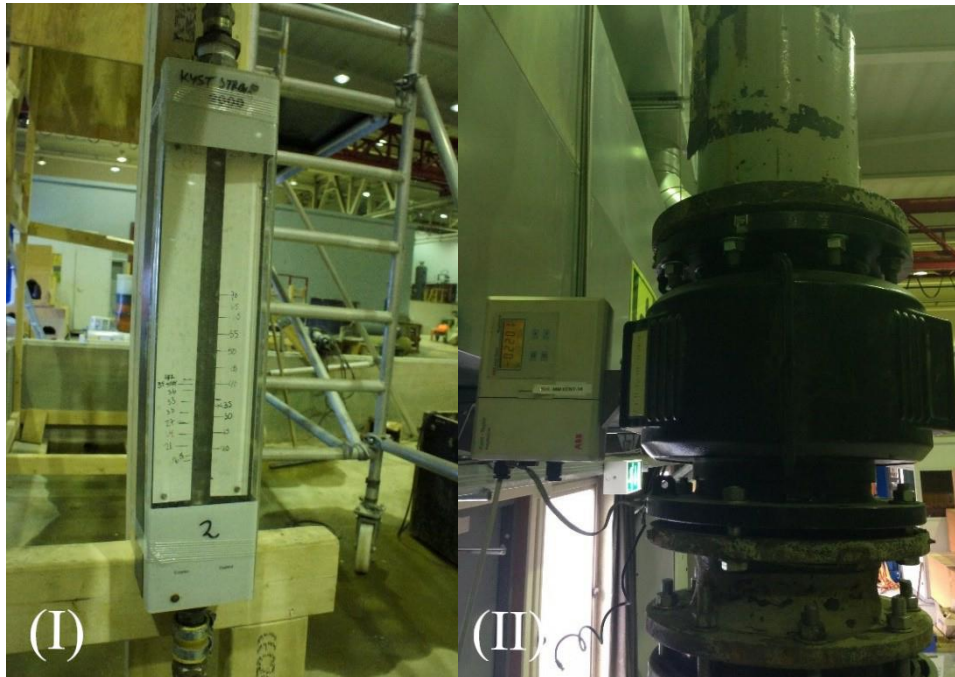
3.3.1. Måleutstyr

For kontroll og observasjon av forsøksgjennomføring, samt resultat frå forsøka, vart følgjande måleutstyr teken i bruk:

- Ein elektromagnetisk vassføringsmålar av typen *ABB Kent-Taylor Mag Master* målte vassføringa inn til inntakskassa.
- Eit rotameter av typen *Metric 18A* målte mengde luft tilført i modellen, med eit måleområde mellom 10-100 l/min luft ved atmosfærisk trykk.
- Video- og fotokamera vart brukt for dokumentasjon.

Elektromagnetiske vassføringsmålalar baserer seg på Faradays induksjonslov for fastsetjing av vassføring ved trykkstrøyming i røyr. Vatnet i røyret strøymar igjennom eit magnetfelt indusert av vassføringsmålaren, og konduktiviteten til vatnet fører til ei spenningsauke registrert av vassføringsmålaren. Spenningsauken aukar proporsjonalt med fluksen (vassføringa) gjennom

magnetfeltet. Vassføringsmålaren *ABB Kent-Taylor Mag Master* hadde ei måleusikkerheit på om lag 0.15% for målområdet i forsøka.



Figur 3-5 Rotameter (I) og elektromagnetisk vassføringsmålar (II).

Eit rotameter er ein gjennomstrøymingsmålar som brukast for måling av strøyming med både gass og væske. Ein *flytar* plassert i eit konisk røyr, pressast opp av løftkrafta gitt av væska eller gassen som strøymar rundt flytaren. Ved å lese av kor høgt flytaren stod i det koniske røyret, kunne antal liter per minutt som strøymar gjennom målaren lesast av frå eit kalibreringsdiagram.

Stighøgda til flytaren i rotameteret vart påverka av endra trykk, og avlesingane måtte justerast for avviket mellom lest verdi og mengde tilført luft. I forsøka vart avlesingane på rotameteret justert for eit vasstrykk lik 3.5 meter vasstrykk. Vedlegg F viser mengde tilført luft i liter per minutt for kvart forsøk, saman med kalibreringsdiagrammet verdiane er henta i frå.

3.4. Oppsummering

Modellen brukt i forsøka gjenskapte forholda i nedre del av bekkeinntakssjakter, og overgangen mellom sjakt og tunnel. Ein luftkompressor og eit rotameter vart brukt for tilføring og kontroll av mengde luft i modellen. Fire forsøksoppsett vart testa; glatt og ru sjakt med diameter $D = 210$ mm og $D = 172$ mm. Vedlegg D viser fleire bilete av modellen.

4. Resultat og observasjonar frå modellforsøk

For å studere retur av luft i bekkeinntakssjakter vart det utført modellforsøk i Vassdragslaboratoriet ved NTNU. Dette kapittelet presenterer resultat og observasjonar frå modellforsøka, som vart gjennomført over tre veker.

Målet med modellforsøka var å finne påverknaden av strøymingsforhold F , sjaktdiameter og sjaktruheit på retur av luft frå tunnel til sjakt. Det vart forsøkt å avdekkje grenser for tre ulike strøymingsforhold, tidlegare påvist av Perzyna (2017):

- Strøymingsforhold ved kritisk fart, F_K – Grensa for når luftbobler vart ståande stasjonær i sjakta
- Strøymingsforhold ved grense for kontinuerleg retur av luft, F_{KR} – Grensa for når einskilde luftbobler ikkje returnerte frå tunnel til sjakt
- Strøymingsforhold ved reinsking, F_R – Grensa for når luft ikkje returnerte frå tunnel til sjakt, korkje som luftbobler eller luftputer.

I tillegg til undersøking av dei tre grensene, vart det gjort observasjonar av strøymingsmønster i tunnel og sjakt. Forsøka undersøkte korleis strøymingsforholdet F , sjaktdiameter og sjaktruheit påverka ulike strøymingsmønster og overgangen mellom dei, og i kva grad dei ulike strøymingsmønster påverka retur av luft frå tunnel til sjakt.

4.1. Gjennomføring av forsøk

For å studere påverknad av strøymingsforholdet F , diameter og ruheit på retur av luft, vart det utført forsøk med tilførsel av luft under heile forsøket, og teljing av tal på returnerte luftbobler frå tunnel til sjakt. Strøymingsforholdet F vart endra med ei stegvis auke av vassføringa i sjakta. For $D = 210$ mm vart det køyrt forsøk med vassføringar mellom 20 - 65 l/s, med ei stegvis auke på 5 l/s. For $D = 172$ mm, auka vassføringa stegvis med 3 l/s², med vassføringar mellom 16 - 36 l/s. Vassføringa i forsøka vart valt slik at det vart mogleg med direkte samanlikning resultata frå forsøka. Vedlegg E viser samanhengen mellom vassføring Q , vassfart v , strøymingsforhold F og Reynoldstal Re under forsøka for begge sjaktdiameterane.

Rekkjefylgja av modelloppsettet var som vist i Tabell 3.2. Det vart køyrd fire rundar med forsøk for kvart oppsett av modellen. Forsøka vart gjennomført som følgjer (sjå Figur 3-3 for bilete av modellen):

² 2 l/s mellom $F = 0.53$ og $F = 0.6$

-
1. Tunnel og sjakt vart fylt med vatn, og tømt for luft slik at det ikkje stod luft i tunnelen ved starten av forsøka.
 2. Justering av reguleringsventilen på vassforsyninga sikra rett vassføring til inntakskassa. Avlesing av den elektromagnetiske vassføringsmålaren viste vassføringa.
 3. Justering av spjeldventilen ved tunnelutløpet sikra stabilt vassnivå i sjakta før forsøksstart. Vasstanden i kassa vart forsøkt sett til om lag midt i inntakskassa under alle forsøka. Av kontinuitet, følgjer det at eit stabilt vassnivå i kassa, skulle gi same vassføring i sjakt som den elektromagnetiske vassmålaren viste.
 4. Vassføringsmålaren vart sjekka etter justering av vassnivå inntakskasse, og justert for eventuelle avvik.
 5. Ventil for lufttilførsel vart opna, og justert etter verdi lest av på rotameteret. Lufttilførselen var 1.3 % av vassføringa under alle forsøka.
 6. Registrering av tal på bobler som returnerte frå tunnel og ut av sjakta per minutt.
 7. Øvrige observasjonar av fenomenet i tunnel og sjakt vart notert.
-

Proseduren i lista ovanfor vart køyrd fire gongar, for kvar av dei fire forsøksrundane. For forsøk med strøymingsforhold $F \leq 0.9$, gav dette totalt 192 registreringar av tal på returnerte luftbobler for sjaktdiameter $D = 210$ mm (glatt og ru røyr), og 160 registreringar for sjaktdiameter $D = 172$ mm (glatt og ru røyr). For å avdekkje eventuell påverknad av tidsintervallet for teljing av luftbobler, vart registreringa av returnerande luftbobler utført både over 60 og 30 sekund.

I turbulensen danna bak ei returnerande luftboble, kunne mindre luftbobler returnere ut av tunnelen. Dei mindre luftboblene slo seg raskt saman med større bobler. Det vart vurdert at dei mindre luftboblene ikkje var store nok til at dei kunne returnere ut av sjakta åleine, og vart difor ikkje registrert som «ein retur».

For forsøk med strøymingsforhold $1.0 \leq F \leq 1.3$ vart det ikkje registrert retur av luftbobler til sjakt, og drøfting av resultat frå forsøka vart basert på kvalitative observasjonar av sjakt og tunnel. Påverknad av strøymingsforhold F , sjaktdiameter og sjaktruheit på strøymingsmønster i sjakt og tunnel vart også vurdert ut i frå observasjonar under forsøka. I tillegg vart det teke

video av nokre av forsøka, som supplement til observasjonane. Videoane vart også brukt til måling av lengda til dei returnerte luftboblene i sjakta.

4.2. Resultat – Retur av luft til sjakt

4.2.1. Tal på returnerande luftbobler

Registreringa av talet på returnerte luftbobler frå tunnel og ut av sjakta vart brukt som hovudmetode for å undersøkje kva effekt endra sjaktdiameter og sjaktruheit hadde på retur av luft. Ei gjennomgåande auke eller minke av returnerande luftbobler der berre ein parameter var endra på mellom forsøka, ville tyda på at påverknad av parameteren på returen av luft.

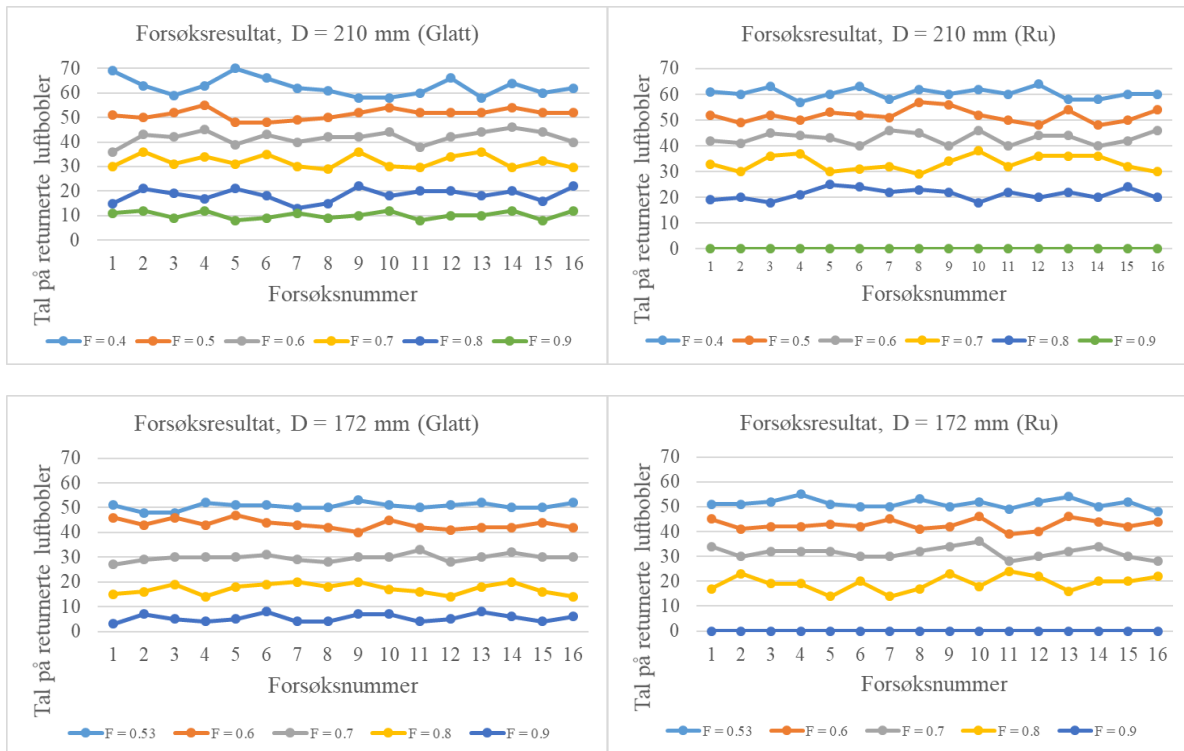
Tabell 4.1 Resultat frå modellforsøk: Tal på returnerte luftbobler per minutt.

D	210 - Glatt		210 - Ru		172 - Glatt		172 - Ru	
	Ret/min	+/-	Ret/min	+/-	Ret/min	+/-	Retur/min	+/-
0.4	62	4	60	2	-	-	-	-
0.5	51	2	52	3	*51	*1	*51	*2
0.6	42	3	43	2	43	2	43	2
0.7	32	3	33	3	30	1	32	2
0.8	18	3	21	2	17	2	19	3
0.9	10	2	-	-	5	2	-	-

*F = 0.53

Tabell 4.1 viser ei samanlikning av resultata frå dei fire oppsetta av modellen, med gjennomsnitt og standardavvik for tal på luftbobler som returnerte frå tunnel og ut sjakta. Gjennomsnittet og standardavviket er runda opp til heiltal.

Figur 4-1 viser registrerte luftbobler som returnerte frå tunnel og ut sjakta for alle måleseriane frå forsøka. Alle registreringar presenterast som tal på returnerte luftbobler per minutt, og finnst i tabellform i Vedlegg A.



Figur 4-1 Resultat frå modellforsøk. Figurane viser tal på registrerte luftbobler som returnerte frå tunnelen og ut sjakta for dei fire modelloppsetta.

Resultata i Tabell 4.1 og Figur 4-1 viser ein klar trend:

- Talet på luftbobler som returnerer frå tunnelen og ut sjakta, minka med auka strøymingsforhold F i sjakta for same forhold mellom vassføring og tilføring av luft.

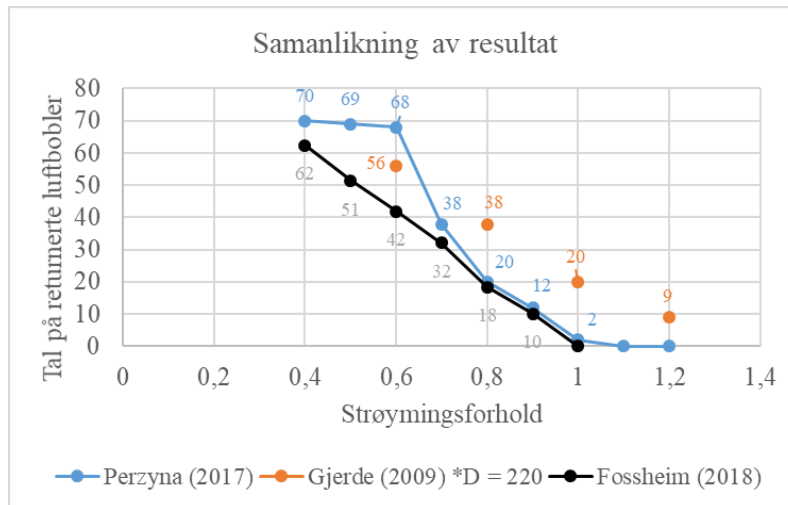
Auka vassfart i sjakta, førte til ei auke av dragkreftene på luftboblene som returnerer opp sjakta. Dermed aukar storleiken til luftboblene, med følgje at talet på returnerte luftbobler minkar.

Figur 4-2 viser ei samanlikning av resultatet frå forsøka med $D = 210$ mm og glatt røyr, med resultata frå Perzyna (2017) og Gjerde (2009). Oppsummert viser samanlikninga at

- For strøymingsforhold $F < 0.7$ registrerte Perzyna (2017) eit markant høgare tal returnerte bobler.
- For strøymingsforhold $F \geq 0.7$ er talet på returnerte bobler relativt likt med resultatet til Perzyna (2017).
- Resultata frå Gjerde (2009) skil seg tydeleg frå dei to dataseriane i samanlikninga

Skilnaden mellom resultata i denne oppgåva med resultata i Perzyna (2017), kan skuldast luftrøyret montert i røyrbendet mellom inntakskasse og sjakt. Luftrøyret reduserte mengde luft som vart ståande i røyrbendet mellom inntakskasse og sjakt. Luftboblene strupa innløpet til sjakta, og strupinga auka med auka mengde luft i overgangen. Når vassføringa i sjakta gjekk

ned, kunne fleire luftbobler lettare returnere opp sjakta. Effekten av luftrøyret var tydlegast for $F < 0.7$, som kan vere ei forklaring på kvifor resultatane nærmar seg kvarandre for $F \geq 0.7$



Figur 4-2 Samanlikning av resultat med tidlegare modellforsøk.

Gjerde (2009) utførte forsøk med sjaktdiameter $D = 220$ mm, men samanlikna med resultatane med ulike diameter i Tabell 4.1, er det lite sannsynleg at dei ulike resultatane skuldast ein effekt av endra diameter. Ulik forsøkgjennomføring eller kriterium for kva som skal teljast som returnerte luftbobler, kan vere ei forklaring på skilnaden i resultatane.

4.2.2. Effekt av endra diameter

For sjå nærare på om endra sjaktdiameter hadde påverknad på retur av luft, vart resultatane frå dei to ulike sjaktdiameterane for glatte røyr samanlikna. Resultatane viste at:

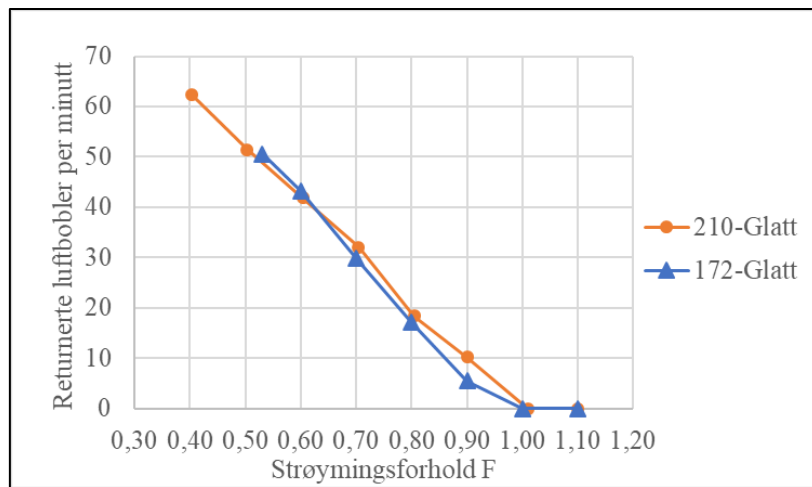
- Det ikkje var ein eintydig effekt av endra diameter på talet på luftbobler som returnerer frå tunnel til sjakta for same strøymingsforhold F .
- Ingen luftbobler returnerte frå tunnel og opp sjakta for strøymingsforhold $F \geq 1$.

Figur 4-3 viser grafisk samanlikning av gjennomsnittsverdiene for tal luftbobler som returnerte frå tunnel og ut sjakta ved ulike strøymingsforhold F i sjakta.

Nedgangen i tal på returnerte luftbobler for auka strøymingsforhold F , fylde ein lineær trend. Det var små skilnader i talet på returnerte luftbobler mellom forsøka med ulike diameter, og ingen tydeleg reduksjon eller auke som følgje av endring av diameter. Resultatane for $D = 172$ mm viste både høgare og lågare verdiar enn for $D = 210$ mm for ulike strøymingsforhold F .

Den største skilnaden i tal på returnerte luftbobler vart observert ved strøymingsforhold $F = 0.9$. Med auka strøymingstal, auka usikkerheita i målingane. Storleiken til dei returnerte luftboblene auka, og det vart ståande luft i røyrbandet i toppen av sjakta. Lufta førte til ei seinking av

innløpskapasiteten frå inntakskasse til sjakt, og påverka målingane. Denne effekten auka med auka vassføring, og forsøka vart difor vanskelegare å halde kontroll på når strøymingsforholdet F auka.



Figur 4-3 Samanlikning av retur av luftbobler i glatt sjakt med ulike diameter.

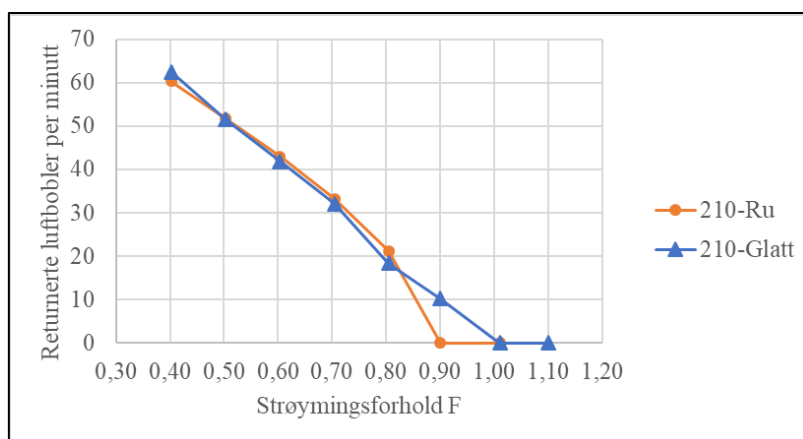
For strøymingsforhold $F \geq 1$ stoppa returen av luftbobler opp for begge sjaktdiameterane, og luft vart ståande som ei luftpute mellom sjakt og tunnel. Lengda luftputa stod opp sjakta, minka tilsynelatande med aukande F. Trenden var lik for begge sjaktdiameterane. Den auka vassfarta førte til ei auke i dragkrafta på bobla. Når lengda til puta minka, minka også oppdrifta til luftbobla. Det resulterte i mindre dragkrefter, sidan kortare luftpute, gav kortare lengde for dragkrafta å virke på. Til slutt oppstod det ein likevektssituasjon, og lengda til luftputa vart stabil.

4.2.3. Effekt av endra ruheit

For sjå nærare på om endra sjaktruheit hadde påverknad på retur av luft, vart resultatane frå modellforsøka med same diameter, men ulike ruheit i sjakta, samanlikna. Resultatane viste at:

- Det ikkje var ein eintydig effekt av endra sjaktruheit på talet på luftbobler som returnerer frå tunnel til sjakt for ulike strøymingsforhold.
- Ingen luftbobler returnerte frå tunnel og ut sjakta for strøymingsforhold $F \geq 0.9$.

Figur 4-5 og Figur 4-4 samanliknar tal på returnerte luftbobler per minutt for glatt og ru sjakt for ulike strøymingsforhold F, for høvesvis 210 mm og 172 mm sjaktdiameter.

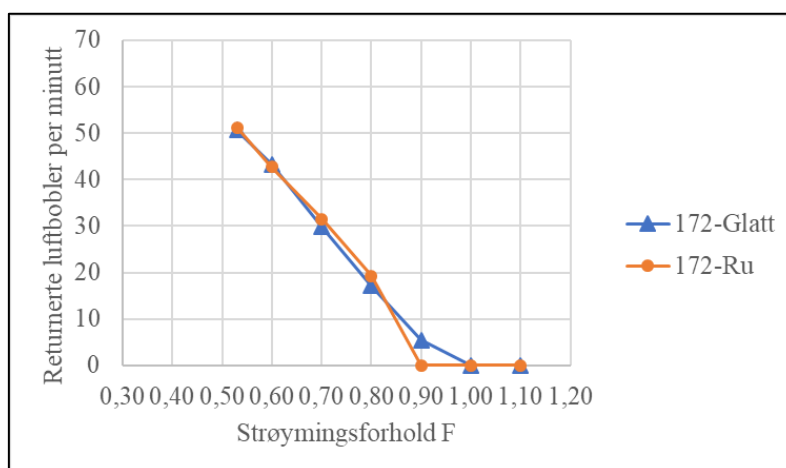


Figur 4-4 Samanlikning av retur av luft i sjakt med ulik ruheit (D = 210 mm).

Den grafiske framstillinga viser at talet på returnerte bobler ikkje vart påverka av den auka ruheita i sjakta. For sjaktdiameter $D = 210$ mm, var målingane nær identiske for dei to situasjonane for strøymingsforhold $F \leq 0.8$.

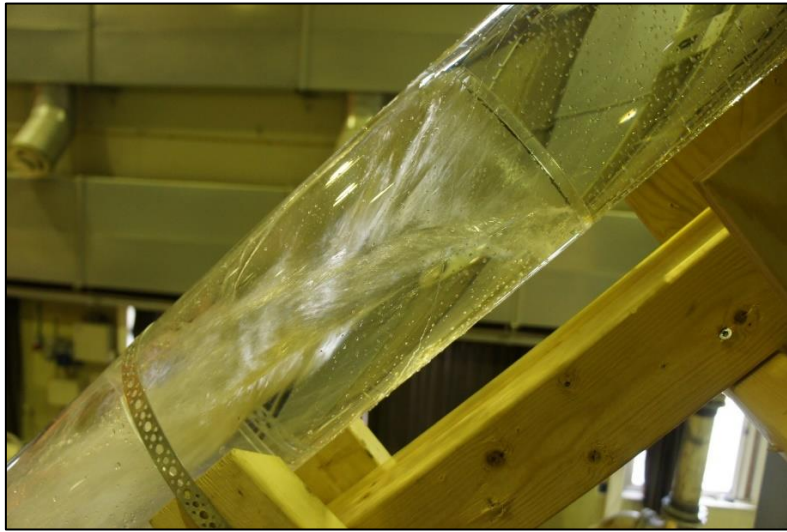
Det vart også observert ein effekten av ringane for strøymingsforhold $F = 0.8$: Dei fyrste luftboblene som returnerer opp sjakta, flytta seg oppover stegvis oppover «frå ring til ring».

Trass påverknaden av ringane, klarte alle luftboblene å returnerer til toppen og ut av sjakta, og konklusjonen vart at den auka ruheita i sjakta ikkje hadde nokon effekt på talet på returnerte luftbobler.



Figur 4-5 Samanlikning av retur av luft i sjakt med ulik ruheit (D = 172 mm).

For strøymingsforhold $F = 0.9$ viser begge figurane stopp i retur av luftbobler opp og ut av sjakta. Luftboblene kunne returnerte frå tunnelen til sjakta, men vart ståande ved ruheitselementa i øvre del av sjakta. Figur 4-6 og Figur 4-7 viser situasjonen. Sidan luftboblene ikkje klarte å returnere *ut* av sjakta, vart dei ikkje registrert som returnerte luftbobler. Ved struping av vassføringa i sjakta, kunne luftboblene returnere vidare opp og ut sjakta.



Figur 4-6 Stopp i retur av luft for $F = 0.9$ ved $D = 172$ mm med auka ruheit. Biletet viser situasjonen frå sida av sjakta.

I forsøk med strøymingsforhold $F \geq 1$, hadde ringane same effekt på luftputa i sjakta: Luftputa vaks oppover sjakta, men vart ståande ved ein av ringane.



Figur 4-7 Stopp i retur av luft for $F = 0.9$ ved $D = 172$ mm med auka ruheit. Biletet viser situasjonen frå oversida av sjakta.

Utforminga på ruheitselementa var sannsynleg grunnen til effekten den auka ruheita hadde på returnerte luftbobler i forsøka med strøymingsforhold $F \geq 0.9$. Perfekt sirkulære utstikkingar, som ringane i sjakta opptredde som, oppstår sjeldan i bekkeinntakssjakter. I både bora og sprengde bekkeinntakssjakter, vil det finnast «ruheitselement» av ulik storleik i sjakt-tverrsnittet. Sprengde sjakter har ei uregelmessig form, med utholingar og knølar stikkande ut

frå «normalprofilen». I bora sjakter er utholingar dominerande, og oppstår grunna svake soner i berget og nedfall i sjakta.

Den unaturlege utforminga av ruheita i sjakta, gjorde at metoden ikkje var godt egna for å teste effekten av ruheit på retur av luft. Det medfører at situasjonen observert for strøymingsforhold $F = 0.9$ ikkje kan generaliserast og skalerast til fullskala bekkeinntakssjakter.

4.2.4. Lengder av luftbobler i sjakt

Det vart utført målingar av boblestørleik frå videoopptaka frå modellforsøka for å studere påverknaden av strøymingsforhold F , sjaktruheit og endra diameter på størleiken til luftboblene om returnerte frå tunnelen og ut sjakta. Tabell 4.2 viser resultat frå målingane, som kan oppsummerast til:

- Lengda av luftboblene auka med auka strøymingstal F
- Med auka strøymingstal F , auka variasjonen i boblelengda for same strøymingstal.

Tabell 4.2 Lengde av returnerande luftbobler.

Strøymingsforhold F	Lengde av luftbobler	Lengde av luftbobler (Gjerde, 2009)
[-]	[mm]	[mm]
0.4	150 – 200	-
0.5	200 - 300	-
0.6	300 – 400	150
0.7	400 – 700	-
0.8	500 – 900	300
0.9	1000 – 1500	1500

Luftboblene som returnerte opp sjakta auka i størleik for aukande strøymingsforhold F . I tillegg aukar lengdeintervallet: Dess høgare strøymingsforholdet F vart, dess større vart skilnaden i boblelengde for dei minste og største boblene. For $F > 1.0$, kunne den observerte luftputa strekkje seg nesten heile vegen opp sjakta. Det vart ikkje påvist ein tydeleg skilnad mellom lengda på boblene i forsøka med ulike sjaktdiameter og ruheit.

Samanlikninga med målte lengder på luftbobler i Gjerde (2009), viste stor skilnad i målte lengder av luftboblene. Det er usikkert kva som er grunnen til dei store skilnadane, men resultatata viser at storleiken på boblene som får returnert opp sjakta ikkje naudsynleg er stabil.

Lengdene gitt i tabellen må sjåast i lys av usikkerheita til målingane. Det var utfordrande å få til gode målingar basert på videoopptaka frå forsøka, men målingane gav ei oversikt over korleis storleiken til luftboblene endra seg med auka vassføring.

4.3. Resultat – Grenser for retur av luft

Det vart forsøkt å avdekkje grenser for tre ulike strøymingsforhold, tidlegare påvist av Perzyna (2017):

- Strøymingsforhold ved kritisk fart, F_K – Grensa for når luftbobler vart ståande stasjonær i sjakta.
- Strøymingsforhold ved grense for kontinuerleg retur av luft, F_{KR} – Grensa for når einiskilde luftbobler ikkje returnerte frå tunnel til sjakt.
- Strøymingsforhold ved reinsking, F_R – Grensa for når luft ikkje returnerte frå tunnel til sjakt, korkje i form av luftbobler eller luftpute.

4.3.1. Strøymingsforhold ved kritisk fart, F_K

For strøymingsforhold $F = 0.9$ vart dei fyrste luftboblene som returnerte opp sjakta gradvis erodert, med resultat at farten og storleiken til boblene minka. Det førte til at luftboblene vart ståande i sjakta. Så snart luftboblene slo seg saman med nye luftbobler, returnerte dei vidare oppover og ut sjakta. Situasjonen er illustrert i Figur 4-8.



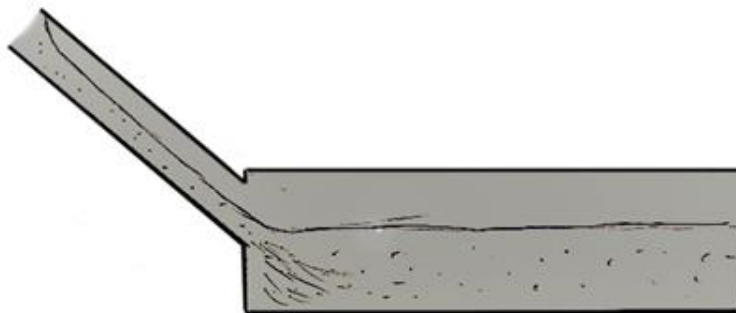
Figur 4-8 Stående luftlomme for $F = 0.9$ ved $D = 172$ mm.

Sidan alle forsøka vart utført med kontinuerleg tilføring av luft, oppstod situasjonen med ståande luftbobler berre i starten av kvart forsøk. Når fyrste samling av luft hadde nådd toppen av sjakta, returnerte alle luftboblene til toppen av sjakta utan å verte ståande stabile lenger nede i sjakta. Perzyna (2017) observerte stabile, ståande luftbobler for strøymingsforhold $F = 0.9$. Det kjem ikkje godt fram i rapporten om situasjonen oppstod ved kontinuerleg tilføring av luft til tunnelen, eller om lufttilføringa vart stoppa i det luftboblene var på veg opp sjakta.

Samanlikna med fullskala bekkeinntakssjakter, var sjakta i modellen svært kort. Luftboblene som til slutt vart transportert ut av sjakta via stigerøyret, kan tenkjast å verte ståande lenger oppe, med ei auke av sjaktlengda. Ved stopp i tilføringa av luft når dei fyrste luftboblene vart ståande i sjakta, ville den gradvise erosjon av luftbobla minka boblestorleiken, og transportert den eroderte lufta attende til tunnelen. Sidan situasjonen berre vart observert for strøymingsforhold $F = 0.9$, vert dette strøymingsforholdet ved kritisk fart i sjakta, F_K .

4.3.2. Strøymingsforhold ved grense for kontinuerleg retur av luft, F_{KR}

Resultata i Tabell 4.1, Figur 4-4 og Figur 4-5 viser at grensa for kontinuerleg retur av luft vart registrert for strøymingsforhold $F = 1.0$ og strøymingsforhold $F = 0.9$ for høvesvis glatt og ru sjakt. Evalueringa av utforminga på ruheitselementa i 4.2.3, leia til konklusjonen at resultata frå ru sjakt ikkje kunne overførast til fullskala. Grensa for kontinuerleg retur av luft F_{KR} var difor lik 1 for både glatt og ru sjakt.



Figur 4-9 Luftpute ståande i sjakt ved F_{KR} .

Luft returnerte framleis til sjakta frå tunnelen for strøymingsforhold $F = 1.0$, men ikkje i form av einsskilte luftbobler. I staden vart det danna ei luftpute som strakk seg langs heile tunnelen og vidare oppover i sjakta, som illustrert av Figur 4-9. Lengda på luftputa opp sjakta varierte frå mellom midten av sjakta og til rett opp under røyrbendet ved inntakskassa.

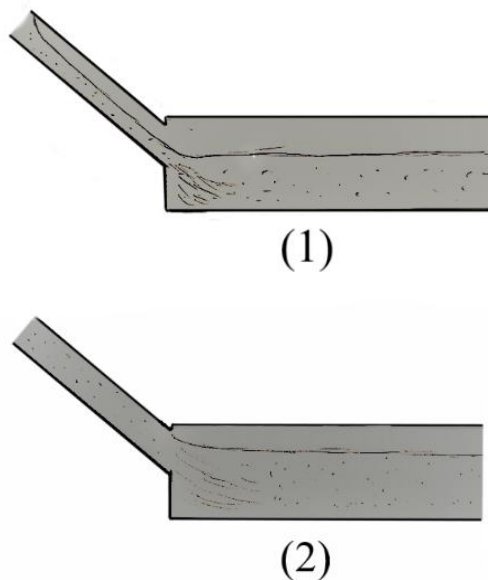
Både Berg (1986) og Perzyna (2017) rapporterte om stopp i kontinuerleg retur av luft for strøymingsforhold $F = 1.0$, noko som stemmer godt med resultatane frå modellforsøka. Gjerde (2009) rapporterte om framleis retur av luft som einskilde bobler opp sjakta ved strøymingsforhold $F > 1$. I Gjerde (2009) var tunnelhellinga større enn ved forsøka i denne rapporten (2.86 grader mot 0.5 grader), og tunnelen var også 1 meter kortare. Det bør difor gjerast forsøk med endra tunnelhelling og ein lenger tunnel, for å avdekkje kva effekt dette kan ha på retur av luft.

4.3.3. Strøymingsforhold ved «reinsking», F_R

Reinsking er transport av luft uavhengig av transportmekanisme. Strøymingsforholdet ved reinsking, F_R , vart undersøkt ved å finne strøymingsforholdet F der luft ikkje lenger vart ståande i sjakta, men transportert attende til tunnelen.

Det vart observert to ulike scenarior for strøymingsforhold $1.1 \leq F \leq 1.3$.

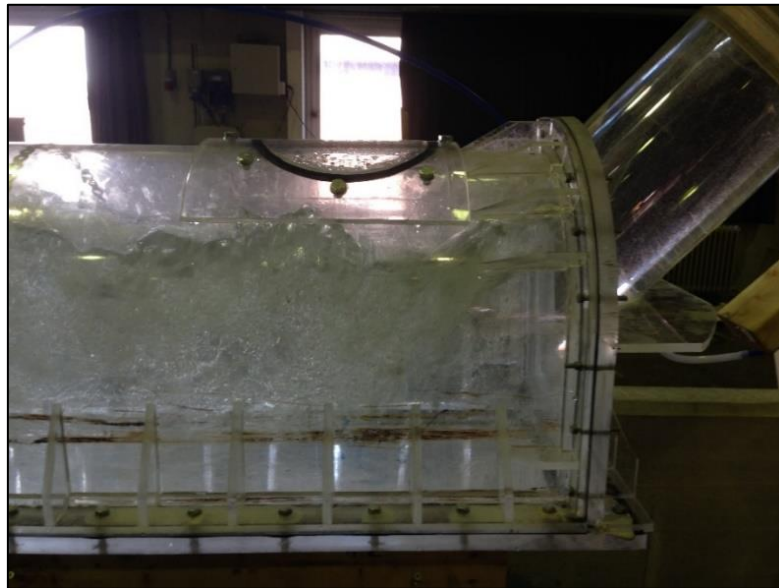
- (1) Luftputa frå tunnelen vaks opp sjakta, men kortare enn ved $F = 1.0$.
- (2) Luftputa klarte ikkje å bryte opp sjakta, og vart ståande i tunnelen.



Figur 4-10 Strøyming i sjakt ved strøymingsforhold F_R .

Situasjon 1 vart observert for alle dei tre nemnde strøymingsforholda. Ved stopp i lufttilførselen til tunnel, vart luftputa ståande i sjakta for både $F = 1.1$ og $F = 1.2$. For $F = 1.3$, vart luftputa pressa attende til tunnelen ved nokre av forsøka, som observert av Perzyna (2017). At luftputa

vart pressa attende til tunnelen, tyder på at all luft riven med i sjakta ville blitt transportert ut av sjakta og til tunnelen.



Figur 4-11 Overgang mellom tunnel og sjakt for $F = 1.3$.

Figur 4-11 viser situasjon 2. Luftputa kunne vekse seg eit kort stykke opp sjakta, men vart til slutt pressa ned att til overgangen mellom sjakt og tunnel, sjølv utan stopp i tilføringa av luft. Situasjonen vart oppstod for strøymingsforhold $F = 1.3$ for begge sjaktdiameterane, som vart den observerte grensa for strøymingsforhold ved reinsking, F_R .

4.4. Observasjonar i sjakt og tunnel

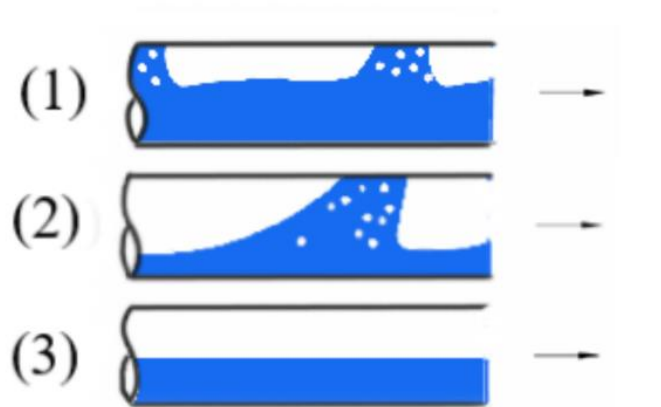
4.4.1. Strøymingsmønster i sjakt

Bekkeinntakssjakter gjev ikkje direkte innsyn til korleis strøyminga endrar seg og vert påverka av ulik vassføring og mengde luft. Kunnskap om ulike strøymingsmønster, og grenser for skifte mellom dei, er viktig for forståing av korleis luft i vassrøyr, -sjakter og -tunnelar påverkar strøyminga.

På bakgrunn av observasjonar, video og bilete vart det funne tre ulike strøymingsmønster i sjakta for ulike strøymingsforhold F , med tilføring av luft lik 1.3% av vassføringa. Strøymingsmønstera observert likna på nokre av dei presentert i kapittel 2.1.3, og er illustrert i Figur 4-12:

- **Proppstrøyming** - Store luftbobler returnerte langs hengen. Hadde ei karakteristisk «kuleform», med ein sverm av små bobler bak kvar luftboble.

- **Støytvis strøyming** - Luftboblene returnerte med ei støytvis rørsle. Ustabil strøyming som førte til svingingar i trykk i tunnelsystemet og vibrasjonar i sjakta
- **Lagdelt strøyming** - Vatn og luft vart fullstendig separert.



Figur 4-12 Observerte strøymingsmønster i sjakt. Proppstrøyming (1), støytvis- (2) og lagdelt strøyming (3).

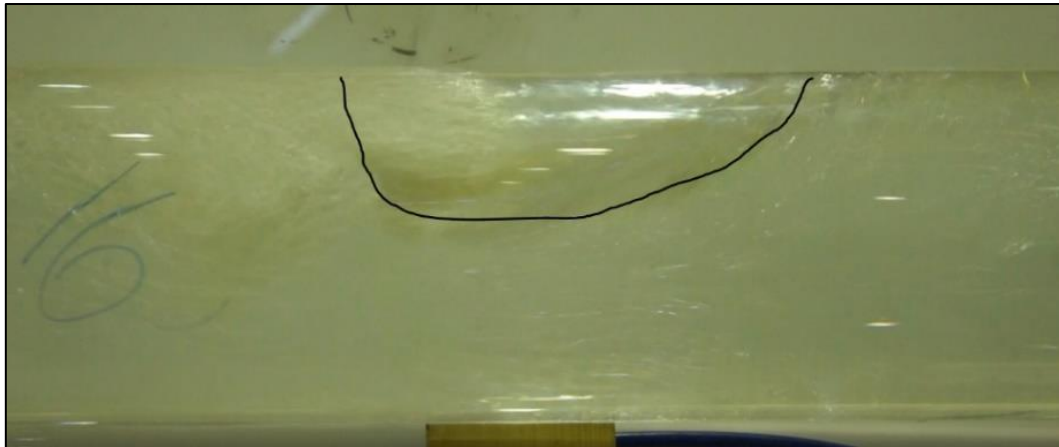
Proppstrøyming

I det lågare sjiktet av strøymingsforhold F dominerte proppstrøyming retur av luft opp sjakta. Luftbobler returnerte enkeltvis langs hengen i sjakta, med ein «kuleforma» tupp og eit turbulent strøymingsbilete i bakre ende av bobla. I tillegg vart det observert at

- Boblene returnerte med ei jamn fart opp sjakta.
- Strøyminga i sjakta arta seg som rein trykkstrøyming, som førte til eit stabilt system.

Figur 4-13 viser eit bilete av ein returnerande «propp». Turbulensen i bakre ende av luftbobla vart skapt av ein kvervel retta inn mot luftbobla. Kvervelen eroderte luftbobla, og reiv av små bobler med nokre millimeters diameter. Vasstraumen transporterte dei dei eroderte luftboblene nedover. Dei små luftboblene enda anten opp attende i tunnelen, eller slo seg saman med andre luftbobler i sjakta og returnerte vidare oppover.

Strøyminga i sjakta arta seg som rein trykkstrøyming. Konsekvensen var liten grad av variasjon i vassfarta langs sjakta, og at returen av luft ikkje førte til store trykksvingingar i sjakta. Strøyminga i sjakta var derfor stabil, og retur av luft i bekkeinntakssjakter ved proppstrøyming vil vere fordelaktig, då strøymingsmønsteret ikkje fører til uførutsette trykkvariasjonar og vibrasjonar i tunnelsystemet.



Figur 4-13 Proppstrøyming ved $F = 0.53$ og $D = 172$ mm

Støytvis strøyming

Med auka vassføring og strøymingsforhold F , auka storleiken til luftboblene som returnerte opp sjakta. Innsnevringa av sjakttverrsnittet, danna av dei større luftboblene, førte til danninga av vasstandssprang i enden av kvar returnerande luftboble. Overgangen i strøymingsmønster førte til at

- Den jamne boblefarta opp sjakta vart erstatta med retur av luft i form rykkvis boblerørsle
- Strøyminga i sjakta vart ustabil, og arta seg som ei blanding av trykkstrøyming og strøyming med fri vassflate.

Boblene veksla mellom å vere ståande og skyte fart oppover i sjakta. Når ei luftboble var på veg ut av tunnelen og opp sjakta, vaks luftbobla oppover i sjakta med ein relativt jamn fart. Når sjakttverrsnittet i overgangen mellom sjakt og tunnel vart lukka, skaut luftbobla fart oppover sjakta. Denne støytvise rørsle held fram oppover i sjakta, i takt med at nye luftbobler returnerte frå tunnelen til sjakta.

Strøymingsmønsteret gav eit skifte frå rein trykkstrøyming i sjakta, til ei variert strøyming med både trykkstrøyming og strøyming med fri vassflate. Variasjonen i strøymingskarakteristikk førte til at vassfarta varierte langs sjakta. I strøyminga med fri vassflate akselererte vatnet under luftboblene, før det brått vart bremsa når sjakttverrsnittet vart fylt opp i enden av kvar luftboble. Vekslinga mellom trykkstrøyming og strøyming med fri vassflate, førte til ei pulsering av trykk i sjakta, når hastigheitsenergi brått vart omforma til trykkenergi. Det kan vere ei forklaring på kvifor boblerørsle endra seg frå relativt jamn til støytvis rørsle. Trykksvingingane og den vekslende strøymingskarakteristikken, gjorde systemet ustabil. I fullskala kan det tenkjast at

store trykksvingingar i sjakta kan frigjere større mengder luft frå tunnel til sjakt, og forårsake luftutblåsingar.



Figur 4-14 Støytvis strøyming for $F = 0.9$ ved $D = 172$ mm. Ei luftboble er på veg ut av sjakta, medan ei ny er på veg oppover frå nedre del av sjakta.

Bak luftboblene hadde vasstandsspranget ein sterk eroderande effekt på luftbobla, og samanlikna med forsøka med proppstrøyming, vart ei større mengde små, avrivne luftbobler transportert attende til tunnelen. Konsekvensen for fullskala bekkeinntakssjakter, vert at større mengder luft vil akkumulereast i tunnelen når strøymingsmønsteret i sjakta karakteriserast som støytvis strøyming.

Lagdelt strøyming

Etter kvart som strøymingsforholdet auka til grensa for kontinuerleg retur av luft, F_{KR} , oppstod strøymingsmønsteret som vist i Figur 4-9 og Figur 4-15.

Einskilde luftbobler klarte ikkje lenge å returnere opp sjakta. I staden, vart det ståande ei luftpute som strekte seg frå tunnelen og opp sjakta, i eit strøymingsmønster som likna lagdelt strøyming. Sidan luftputa vart ståande i ro i sjakta, kan strøyminga beskrivast som eit tilfelle av skytande straum av vatn under stillestående luft.

I øvre del av sjakta var strøyminga karakterisert ved rein trykkstrøyming, før strøyminga gjekk over til strøyming med fri vassflate frå toppen av luftputa og ned til sjakta. Skiljet mellom dei to var relativt stabilt sidan luftputa vart ståande relativt i ro, og systemet nådde ein tilsynelatande meir stabil tilstand enn ved forsøka med den ustabile, støytvise strøyminga. Tilstanden var likevel utsett for endringar av trykk og vassføring i tunnel og sjakt. Ved tilfelle der

spjeldventilen vart strupa eller stengd, returnerte ikkje luft frå luftputa som einskilte luftbobler som gradvis vart sloppe opp sjakta. I staden returnerte heile luftputa i eitt opp sjakta.



Figur 4-15 Lagdelt strøyming for $F = 1.0$ ved $D = 172$. Den ståande luftputa strekk seg frå tunnel og over det andre gule bandet som knyt saman sjaktdelane.

Lengda på sjakta og effekten av kompresjonen av lufta, var mykje mindre i modellen enn den er i fullskala. Det vart derfor ikkje observert noko utblåsing i modell når luftputa returnerte opp sjakta ved stenging av spjeldventilen. I fullskala, vil ein plutselig retur av store mengder komprimert luft ståande opp i sjakta, føre til store utblåsingar. Ved til dømes stenging eller regulering av eit kraftverk, vil det auka trykket i tunnelsystemet kunne føre til at ståande luftputer søkjer mot vatnets strøymingsretning, ekspanderer opp sjakta, og endar som alvorlege utblåsingar ved inntaket.

4.4.2. Grenser mellom strøymingsmønster i sjakt

Tabell 4.3 listar opp dei tre strøymingsmønster observert under modellforsøka, og for kva strøymingsforhold F dei vart observert.

Tabellen viser at overgangen mellom proppstrøyming og støytvis strøyming vart funne for strøymingsforhold $F = 0.7$. Dei returnerande luftboblene veksla mellom ei støytvis rørslе og

meir jamn fart oppover sjakta. Ved strøymingsforhold $F = 0.8$ var strøymingsmønsteret tydeleg gått over til støytvis strøyming.

Tabell 4.3 Strøymingsmønster ved ulike strøymingsforhold F

Strøymingsforhold [F]	Strøymingsmønster [-]
0.4	Proppstrøyming
0.5	Proppstrøyming
0.6	Proppstrøyming
0.7	Propp-/Støytvis strøyming
0.8	Støytvis strøyming
0.9	Støytvis strøyming
> 1.0	Lagdelt strøyming

Alle forsøk vart gjort med same forhold mellom luft og vatn (lufttilførsel på 1.3% av vassføringa), og det var derfor ikkje mogleg å seie noko om korleis grensa mellom støytvis strøyming og proppstrøyming endrar seg med ulike forhold mellom luft og vatn.

4.4.3. Påverknad av diameter og ruheit

Endring av diameter og ruheit gav ingen endring i strøymingsmønster ved dei ulike strøymingsforholda. Med auka ruheit i sjaktene, auka erosjonen av luftboblene, som tilsynelatande førte til at vasstraumen transporterte fleire bobler attende til tunnelen med vasstraumen.

Ved overgang til støytvis strøyming, førte ruheitsselementa til svært turbulent strøyming i sjakta, og dei fylte delane av sjakta mellom luftboblene var ofte så turbulent at strøyminga såg ut som skum. Ved proppstrøyming var vassfarta i sjakta låg (sjå Vedlegg E), og dei relativt små boblene gjorde at strøyminga oppførte seg tilnærma som rein trykkstrøyming. Den store avstanden mellom ringane førte difor til lite auke i turbulens. Ei fortetting av ringane, kunne moglegvis ført til ein større effekt på returen av luft.

4.4.4. Effekt av ruheit på transport av luftbobler i sjakt

I tillegg til den observerte effekten på returen av luft ved strøymingsforhold $F = 0.9$, påverka ringane transport og erosjon av luftbobler i sjakta. I dei to glatte sjaktene, kunne luftbobler transporterast nedstraums i ein kombinasjon av soping (transport av heile luftbobla i eitt) og erosjon (gradvis lausriving av mindre luftbobler). Ringane i sjaktene fjerna moglegheita for soping av luftboblene. Når vassfarten i sjakta auka, vart luftboblene ståande ved ringane. Den einaste måten luft kunne transporterast vidare på, var ved erosjon av nedre ende av luftbobla. Dette gjaldt både store luftbobler og luftputene ståande opp i sjakta. Ringane påverka ikkje boblene i suspensjon i vasstraumen.



Figur 4-16 Erosjon av luftboble ståande ved ruheitsselement i sjakt.

Dei avrivne boblene, vart anten transportert attende til tunnelen, eller akkumulert ved neste ring. Sjølv med ei vesentleg auke i vassfarten, var denne erosjon og medriving einaste mekanismen som førte til transport av lufta heilt attende til tunnelen. Situasjonen var lik både når ringane i sjakta dekte heile tverrsnittet ($D = 210$ mm), og når ringane ikkje dekte hengen i sjakta (172 mm).

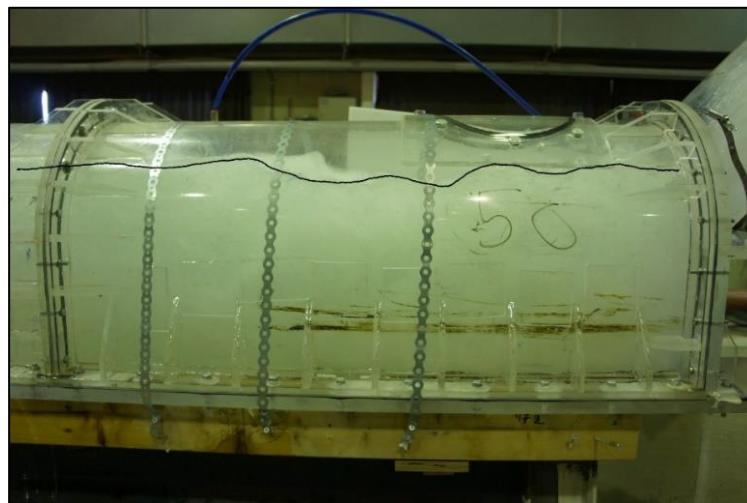
Observasjonen gir grunn til å tru ei ru overflate, som ein finn både ved bora og sprengde sjakter, vil påverke transporten av luftbobler i fullskala bekkeinntakssjakter. Dersom luft transportert frå toppen av sjakta og nedover mot tunnelen vert ståande ved ein utstikkande bergknøl eller ei utholing, kan vidare tilført luft gjere at større mengder luft vert ståande stasjonære i sjakta. Ei plutsleg frigjering av denne luftbobla kan tenkjast å returnere vidare opp sjakta, ekspandere, og skape ei større eller mindre utblåsing, avhengig av volumet til den ståande luftbobla.

I tunnelen, vil effekten av ruheita kunne påverke retur av luft ståande lenger nedstrøms tunnelen mot overgangen mellom tunnel og sjakt. Den slake tunnelhellinga vil gi mindre oppdrift, som kan føre til at effekten av ruheita i tunnelen aukar. I situasjonar der større volum luft vert hindra å nå fram til overgangen til sjakta, kan ei plutselig frigjering av det store volumet luft føre til utblåsingar i sjakta.

4.4.5. Strøymingsmønster i tunnel

Strøymingsbiletet i tunnelen endra seg med strøymingsforholdet F i sjakta. Følgjande observasjonar vart gjort av strøyminga i tunnelen:

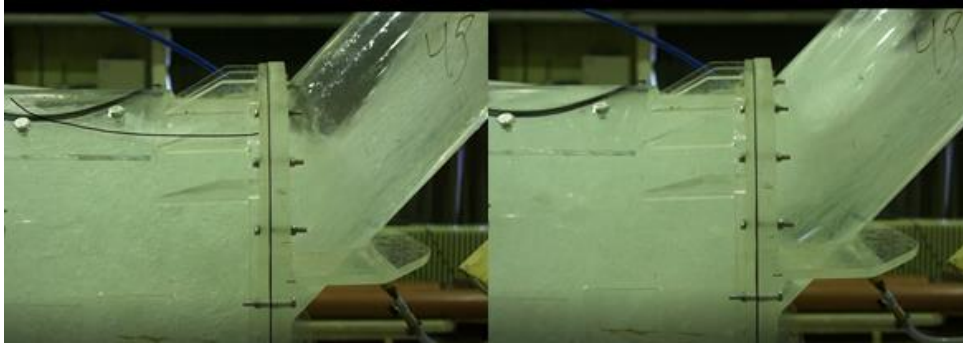
- Ved strøymingsforhold $F \leq 0.6$ samla all tilført luft seg i overgangen mellom tunnel og sjakt, og returnerte umiddelbart opp sjakta.
- Ei auke av strøymingsforholdet til $F = 0.7$, førte til lagdelt strøyming i tunnelen, med danning av ei luftpute som strakk seg langs heile tunnelhengen.
- Ved $F = 0.8$ og $F = 0.9$ auka tjukna til luftputa, og strøymingsmønsteret endra seg frå lagdelt strøyming til bølgestrøyming. Situasjonen er vist i Figur 4-17.
- Auka sjaktruheit påverka ikkje strøyminga i tunnelen.



Figur 4-17 Vassoverflate med bølger i tunnel for $F = 1.0$ ved $D = 210$ mm.

Observasjonane tyder på at overgang til støytvis strøyming i sjakta (strøymingsforhold $F = 0.7$ i modellforsøka), vil føre til akkumulering av luft i tunnelen. I situasjonar der mengde tilført luft til tunnelen er større enn mengde luft som returnerer opp sjakta, vil det kunne bygge seg opp større luftvolum i tunnelen som kan føre til utblåsingar, sjølv om kontinuerleg retur av luft er sikra.

Ved bølgestrøyminga i tunnelen, vart det observert bølger som slo opp i hengen ved overgangen mellom tunnel og sjakt, i tillegg til ei bølge nummer to nedstrøms punktet for tilføring av luft. Når bølgjene slo i hengen likna strøyminga i tunnelen på støyttvis strøyming. Bølgja lukka opninga til sjakttverrsnittet, som resulterte i at luftbobler ståande i overgangen mellom sjakt og tunnel vart pressa ut av tunnelen og opp sjakta. Situasjonen er vist i Figur 4-18.



Figur 4-18 Retur av luftboble. Markeringa til venstre viser ei luftlomme i front av ei bølge på veg mot sjakta. I det bølga når sjakta, lukkar bølga sjakttverrsnittet og sender den ståande luftbobla opp sjakta.

For $F \geq 1.0$ vart luftputa i tunnelen så stor at bølgjene i vassoverflata ikkje klarte å nå hengen. Dette kan vere ein grunn til at ein skilde luftbobler ikkje returnerer til sjakt for strøymingsforhold $F = 1.0$.

Bølgestrøyminga og den støyttvise strøyminga som oppstod i tunnelen, var sannsynleg eit resultat av den turbulensen danna av endra strøymingsretning i overgangen mellom sjakt og tunnel, samt dei store skilnadane i vassfart mellom vasstraumen i sjakta og tunnelen. Ein modell med ein lenger tunnel, vil kunne avdekkje om strøymingsmønsteret held fram lenger ned i tunnelen. Dersom strøyminga i tunnelen utviklar seg til støyttvis strøyming over lengre strekk i tunnelen, vil ustabiliteten av strøyminga kunne påverke returen av luft opp sjakta. Ustabiliteten kan til dømes utløyse utblåsingar om det står store mengder lenger nedstrøms i tunnelen.

4.4.6. Utstrekning av boblesone i tunnel

Lengda til boblesona i tunnelen minka med diameteren på sjakta. For $F = 1.3$ strekte boblesona seg i overkant av 2 meter ut i tunnelen for forsøk med sjaktdiameter $D = 172$ mm. Ved same strøymingsforhold strekte boblesona seg til enden av tunnelen, over 3 meter, for forsøk med sjaktdiameter $D = 210$ mm. Observasjonen bekreftar at lengda til boblesona i tunnelen bestemmast av vassfarta i tunnelen, som rapportert av Berg (1986). Sidan strøymingsforholdet F er avhengig av diameteren til sjakta, minkar vassfarta i tunnel og sjakt for same strøymingsforhold i minkande sjaktdiameter. Konsekvensen er at til større skilnad mellom sjaktareal og

tunnelareal er, til kortare vert boblesona. Vidare fører dette til at det tek kortare tid frå luft transportert til tunnelen frå sjakta, til lufta samlast for retur i overgangen mellom tunnel og sjakt.

4.5. Oppsummering av resultat og drøftingar frå modellforsøk

4.5.1. Konklusjon frå modellforsøk

Følgjande konklusjonar kan trekkjast etter analyse av resultat frå utførde modellforsøk med sjaktdiameter $D = 210$ mm og $D = 172$ mm og 45 graders sjakthelling:

- Frekvens av returnerte luftbobler minkar med aukande strøymingsforhold F
- Storleik av returnerte luftbobler aukar med aukande strøymingsforhold F
- Endring av sjaktdiameter påverkar ikkje frekvensen av returnerte luftbobler frå tunnel til sjakt
- Auka sjaktruheit påverkar ikkje frekvensen av returnerte luftbobler frå tunnel til sjakt.
- Luft akkumulerast i tunnel for strøymingsforhold $F \geq 0.7$

Resultata frå modellforsøka synleggjer ikkje nokon skalaeffekt på retur av luft frå tunnel til sjakt som følgje av endra diameter og sjaktruheit. Grensene for retur av luft oppsummerast i Tabell 4.4. Grensene stemmer overeins med grenser rapportert av Berg (1986) og Perzyna (2017).

Tabell 4.4 Grenser for retur av luft i modellforsøk.

F_F	F_{KR}	F_R
Strøymingsforhold ved kritisk fart	Strøymingsforhold ved grense for kontinuerleg retur av luft	Strøymingsforhold ved reinsking
0.9	1.0	1.3

Endring av diameter og ruheit påverka ikkje dei observerte strøymingsmønster i sjakta, og grensene mellom dei. For strøymingsmønster $F < 0.7$ returnerte all luft som einskilde bobler i hengen på sjakta, og strøyminga var stabil og arta seg som rein trykkstrøyming.

For strøymingsforhold $0.7 \leq F \leq 0.9$, vart strøyminga i sjakta klassifisert som støytvis strøyming. Den støytvise strøyminga førte til

- Ei veksling mellom trykkstrøyming og strøyming med fri vassflate oppover i sjakta.

- Trykkpulseringar og vibrasjonar i sjakta.
- Akkumulering av luft i tunnel.

Ved store pulseringar i trykk, kan den akkumulerte lufta frigjerast frå tunnel til sjakt, og føre til utblåsingar i sjakta.

Ved grensa for kontinuerleg retur av luft, F_{KR} , vart det danna ei luftpute som strakk seg frå tunnelen og opp sjakta. Luftputa kunne verte lang, og ei plutselig frigjering av denne vil kunne føre til utblåsingar som kan gjere stor skade på inntakskonstruksjonar og sjakt i fullskala bekkeinntak.

Observasjonar av strøyminga i sjakta, tyda på at auka ruheit i sjakta spelar inn på mekanismane for *transport* av luft i sjakter og tunnelar. Med auka sjaktruheit, vart ikkje luft transportert ut av sjakta som heile, store luftbobler eller luftputer. I staden vart lufta ståande ved ruheitsselementa i sjakta, og var fjerna ved erosjon og medrivning. I slakare tunnelar der oppdriftskreftene ikkje dominerer som i bratte sjakter, kan effekten føre til samling av store luftvolum i tunnelen som kan gi store utblåsingar i sjakta.

Det vart observert strøyming i tunnelen som likna bølgestrøyming og støyttvis strøyming. Bølgjer som slo i hengen ved overgangen mellom tunnel og sjakt, pressa lufta som stod i overgangen ut av tunnelen og opp sjakta. Observasjonane tyder på at forhold i tunnelen også spelar ei rolle for retur og utblåsingar av luft i sjakta. Bølgestrøyminga og den støyttvise strøyminga kan vere eit resultat av den korte tunnelen i modellen, og bør undersøkjast vidare i ein modell med lenger tunnel.

4.5.2. Samanlikning med utblåsingar i fullskala

Saman med analysen av utblåsingar i Holmaliåna frå Gjerde (2009), tyder resultatata frå modellforsøka at utblåsingar i bekkeinntakssjakter kan finne stad sjølv om det er sikra kontinuerleg retur av luft frå tunnelen og opp sjakta. Dersom volum transportert luft til tunnel er større enn volum returnert luft frå tunnel og ut av sjakta, vil det kunne bygge seg opp ei større luftlomme og luftputer i tunnel, som i verste tilfelle kan føre til alvorlege utblåsingar.

Utblåsingane i Holmaliåna tek til for strøymingsforhold $F > 0.6$, noko som tyder på at akkumulering av luft i tunnelen kan starte tidlegare enn det påviste grensa ved strøymingsforhold $F = 0.7$ frå modellforsøka i denne oppgåva. Sidan grensa for luftakkumulering fell saman med grensa for overgang til den ustabile, støyttvise strøyminga i sjakta, ville det vore interessant å sjå vidare på korleis denne grensa endra seg med auka og minka lufttilførsel til tunnelen.

På bakgrunn av observasjonane av strøymingsmønster i sjakta og berekningane til Gjerde (2009) frå Holmaliåna, anbefalast det å dimensjonere bekkeinntakssjakter slik at ein unngår utvikling av støyttvis strøyming i sjakta. Dimensjonering av sjaktdiameter slik at strøymingsforholdet $F < 0.7$, vil kunne avgrense utvikling av den ustabile støyttvise strøyminga i sjakta, i tillegg til å eliminere store luftputer ståande i mellom sjakt og tunnel som oppstår ved $F = 1.0$.

Ei auke av sjaktdiameter for å oppnå lågare strøymingsforhold i sjakta, vil føre til auka kostnadar ved utbygging av bekkeinntak. Det må difor gjerast vurdering av kva som er mest kostnadseffektivt av å auke diameteren på sjakta, og andre tiltak som til dømes boring av luftehol på tunnelen for punktering av luftlommer.

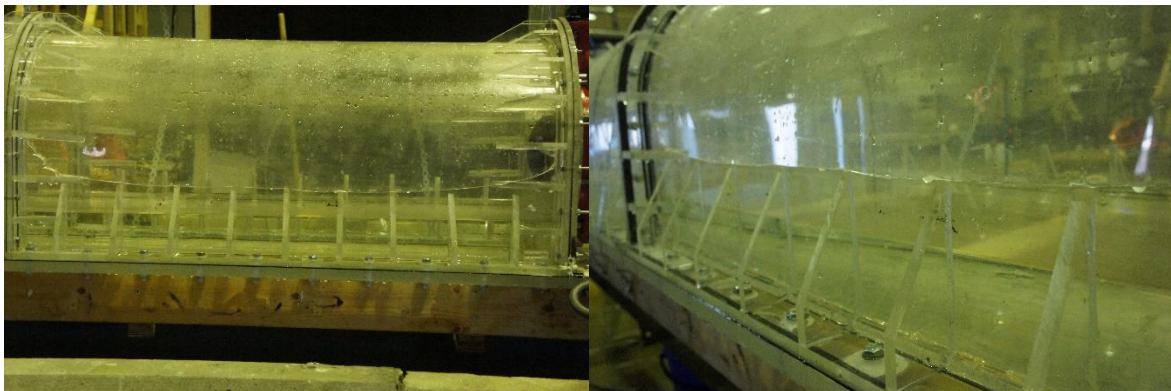
5. Diskusjon – gjennomføring, modell og metode

5.1. Gjennomføring av modellforsøk

Alle modellforsøk vert påverka av kvaliteten på gjennomføringa av forsøka. Modellforsøk der måleinstrument står for registrering av resultat, krev kalibrering av måleinstrumenta for å sikre pålitelegheita til resultatata. For samanlikning av resultat frå uttesting av ulike parameterar, krevjast det like forhold under alle forsøksrundane. Sidan resultatata frå modellforsøka i denne oppgåva vart innhenta ved observasjonar heller enn målingar gjort med måleinstrument, kan ulik utføring gjennom forsøka truge pålitelegheita til resultatata.

Teljinga av tal på returnerte luftbobler vart påverka av den aukande turbulensen som følgje av auka vassfart i sjakta. Dei mange rundane med forsøk med same parameter gav likevel eit godt grunnlag for å kunne seie noko om gjennomsnittet av tal på returnerte luftbobler. I overgangen frå proppstrøyming til støytvis strøyming, vart det utfordrande å skilje mellom luftbobler som returnerte til toppen av sjakta, og luftbobler som måtte slå seg saman med andre for å returnere heile vegen opp.

Analyse av videoopptak og bilete vart brukt til å måle storleiken til luftboblene som returnerte frå tunnelen og opp sjakta. Manglande målestokk på videoane, utfordrande lysforhold og ulik plassering av kamera under ulike målingar, førte til at målingane i rapporten må sjåast som eit anslag av boblestorleiken.



Figur 5-1 Skader på tunnelen.

Grunna forskyvingar av andre forsøk i laboratoriet, vart gjennomføringa av forsøka sett under eit større tidspress enn i tidsplanen. I tillegg førte store og tidkrevjande reparasjonar av skader på modellen til ytterlegare forseinkingar i oppstarten av forsøka. Høgt vasstrykk og ein gamal tunnel, førte til totalt fire tilfelle der tunnelen sprakk som vist i Figur 5-1. Forseinkingane medførte kort tid til å teste og verte kjend med modellen før oppstart av forsøka.

Gjennomføringa av forsøka vart difor meir effektiv og systematisk for oppsetta med $D = 172$ mm, enn med $D = 210$ mm. Utsettingane avgrensa moglegheitene til å gjennomføre forsøk med enda fleire parameterar, som til dømes ulike sjakthellingar og vidare auke av ruheita i sjakta.

5.2. Vurdering av modell og metode

5.2.1. Modell og metode

Ein god modell og ei føremålstenleg metode er naudsynt for å kunne overføre kunnskap og resultat henta frå modellforsøk til fullskala. Modellen brukt i forsøka gjenskapa forholda i overgangen mellom sjakt og tunnel på ein god måte, og gav saman med forsøksmetoda nyttige svar på mekanismar ved retur av luft i bekkeinntakssjakter:

- Utforminga av overgangen mellom sjakt og tunell i modellen gjorde det mogleg å generalisere mekanismane for retur av luft frå tunnel og sjakt.
- Teljing av tal på returnerte luftbobler gav ein god indikasjon på korleis auka vassføring påverkar returen av luft.
- Modellen gav innsyn i korleis strøymingsmønster i sjakta vart påverka av endra strøymingsforhold, og korleis strøymingsmønster påverka returen av luft i sjakta.
- Modellen gav ei enkel framstilling av eit komplekst problem.

Modellen og forsøksmetodane brukt, var mindre eigna til å studere detaljer ved retur av luft i sjakter:

- Modellen klarte ikkje gjenskape påverknaden av komprimering av luft i sjakt og tunnel. Trykket i modellen var mykje lågare enn trykket som oppstår i fullskala bekkeinntakssjakter. Det gjorde at sjølve utblåsinga av luft ikkje kan studerast.
- Metoden med teljing av luftbobler kan ha vore for lite følsam for å finne påverknad av endra ruheit og sjaktdiameter.
- Observasjon av strøymingsmønster i sjakt og tunnel gav ingen detaljert informasjon om til dømes kor store trykkendringar som oppstod i systemet ved dei ulike strøymingsmønster.
- Utforming av ruheitselementa var for unaturleg, og var ikkje eigna metode for å undersøke effekten som auka ruheit i sjakta hadde på retur av luft.

Trass manglane i modell og metode lista ovanfor, gav modellforsøka fleire svar på korleis retur av luft i bekkeinntakssjakter artar seg.

5.2.2. Kvalitet og kontroll av modellforsøk

Einaste målepunkt for vassføring i sjakta var måling av vassføringa inn til inntakskassa. Regulering av spjeldventilen ved tunnelen var bestemmande for kor mykje vatn som gjekk frå inntakskassa og ned sjakta. Det var svært vanskeleg å oppnå ein stabil vasstand i inntakskassa, og vassføringa i sjakta var veldig sensitiv for justering av spjeldventilen. Når forsøka vart sett i gong med tilføring av luft til tunnelen, vart situasjonen vanskelegare å kontrollere:

- Tilføring av luft førte til auka motstand mot vasstraumen i sjakta, og seinka innløpskapasiteten. Luft ståande i overgang mellom sjakt og inntakskasse strupa inntaket ytterlegare. Spjeldventilen måtte aktivt regulerast under forsøka for å kunne halde ein viss kontroll over vassføringa.
- Vassforsyninga var avhengig av trykket i inntakskassa. Når vasstanden i kassa auka, minka vassføringa frå vassforsyninga.
- Tunnelen var relativt kort og hadde låg helling. Storleiken på luftputa i tunnelen førte til at avløpet i enden av tunnelen saug luft under forsøka. Når avløpet saug luft, påverka dette kapasiteten ved avløpet.

Kontrollen av forsøka vart redusert med auka vassføring, med størst usikkerheit i forsøka med støyttvis strøyming. Ei endring i vassføring i sjakta på 3 l/s for $D = 172$ mm førte til ei endring av strøymingsforholdet F med 0.1. Ved proppstrøyming fekk luftboblene raskt evakuere opp luftrøyret i toppen av sjakta, som då hadde god effekt. Den lagdelte strøyminga var også lettare å kontrollere, då små justeringar av spjeldventilen gav ei relativt stabil vassføring.

5.3. Forslag til endring av modell

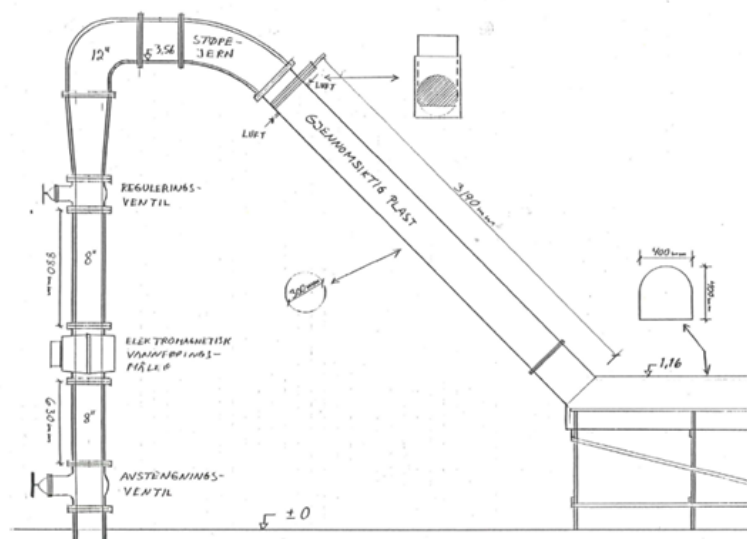
For vidare modellforsøk på retur av luft i bekkeinntakssjakter kan endringar på oppsettet av modellen sikre betre kontroll under forsøka:

- Ombygging frå eit opent til eit lukka system kan føre til mindre påverknad på strøymingsforholdet F ved tilføring av luft. Berg (1986) utførde forsøk på eit lukka system, der vassforsyninga gjekk rett til sjakta. Løysinga er illustrert i Figur 5-2.

Med framleis opent system, kan følgjande tiltak betre kontroll over strøymingsforholdet F i sjakta:

- Plassering av innløp til sjakta i botnen av inntakskassa, eller endring av overgangen som ei forlenging av sjakta utan røyrbend, kan gjere det lettare for luft å returnere heilt ut sjakta.

- Unngå dykking av vassforsyning, for å hindre effekten som den auka vasstanden i inntakskassa utgjør. Dette krev større inntakskasse for å oppnå rolege innstrøymingsforhold.
- Bruke ein automatisk reguleringsventil ved tunnelutløp for automatisk justering av vassføring i modellen.
- Ein større, lengre og brattare tunnel vil kunne redusere effekten luft som sugast ut av avløpet hadde på forsøka. Eventuelt kan avløpet plasserast i botn av tunnelen. Avløpet må då vere stort nok til at det ikkje dannast kvervlar som sug luft.



Figur 5-2 Modelloppsett for lukka system (Berg, 1986).

For vidare undersøkingar av påverknad av ruheit på retur av luft, trengs det endra utforming av ruheitselementa i sjakta. Liming av mindre klossar i akrylplast fordelt i sjakttverrsnittet kan vere ein måte å simulere ruheit i sjakta meir likt røynda. Eit fast tal klossar per kvadratmeter røyr kan vere eit mål for å kontrollere effekten av ulike mengder av klossane.

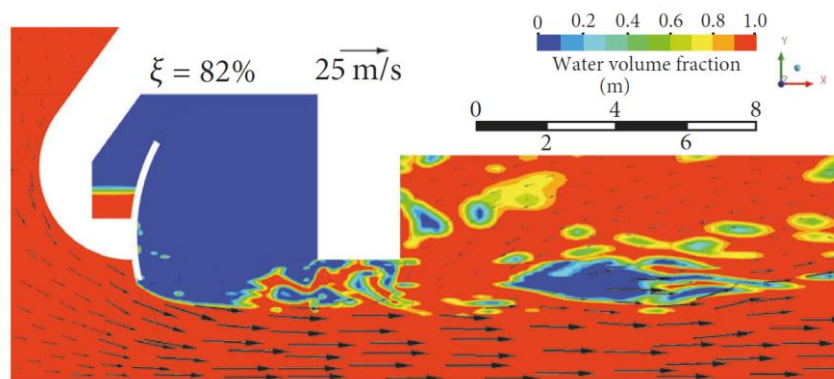
5.4. Forslag til nye undersøkingar

Nye undersøkingar kan vere med på å auke kunnskapen om forholda i bekkeinntakssjakter ved ulike strøymingsforhold

- Trykkmålingar langs sjakt og tunnel under forsøka kan auke forståinga for korleis dei ulike strøymingsmønster i sjakta påverkar systemet. I kombinasjon med liknande målingar i fullskala, vil det gi eit betre grunnlag samanlikning av resultat frå modellforsøk, med observasjonar i prototype.

- Simuleringar av modellforsøk ved bruk av CFD: Simulering av bekkeinntakssjakter i fullskala, vil vere for krevjande per dags dato, grunna lang simuleringstid. Fysiske modellforsøk har ei øvre skaleringsgrense grunna avgrensingar i plass og kapasitet til pumper. Validerte simuleringresultat frå samanlikning av modellforsøk og CFD-simuleringar i same skala, kan brukast for å utføre modellsimuleringar i skala mellom fullskala og øvre grense for fysiske modellar, og samstundes ligge innanfor akseptabel simuleringstid.

Figur 5-3 viser eit eksempel frå Yang *et al.* (2018) på bruk av CFD-simuleringar av to-fasestrøyming i eit botntappeløp i modellskala (1:20). Simuleringstida var om lag 8 månader.



Figur 5-3 Eksempel på resultat frå CFD-simuleringar av to-fasestrøyming (Yang *et al.*, 2018).

- Undersøkingar som spesifikt ser på faktorar som påverkar boblestorleik og mekanismar for erosjon av luftbobler som returnerer mot vasstraumen, vil gi viktig kunnskap kring detaljer ved retur av luft i bekkeinntakssjakter. Undersøkingar på falltapets betydning på retur av luft bør gjennomførast. Pothof og Clemens (2011) viste ein mogleg samanheng mellom Webers-tal, falltap og transport av luftbobler. Glauser og Wickenhäuser (2009) påpeikar også usikkerheita om forholdet mellom storleiken til luftbobler og røyr diameter aukar lineært. Kunnskap om moglege skalaeffektar er viktig for å betre forstå resultat frå forsøk med modellar som modellen brukt i denne oppgåva. Ein forenkla modell kan gi svar på om skalaeffektane eksisterer.
- Vidare undersøking av påverknad av endra luft/vatn-forhold i sjakt på strøymingsmønster kan gi kunnskap om kva forholdet har å seie for retur av luft i bekkeinntakssjakter. Det ville vore nyttig å avdekkje om grensene mellom

strøymingsmønstera i sjakta er avgrensa av strøymingsforholdet F , eller om grensene endrar seg med endra forhold mellom luft og vatn.

6. Konklusjon

6.1. Avsluttande konklusjon

Dei utførde modellforsøka med sjakthelling 45 grader og sjaktdiameter $D = 210$ mm og $D = 172$ mm bekreftar funna frå tidlegare modellforsøk av Berg (1986) og Perzyna (2017): Kontinuerleg retur av luft frå tunnelen og opp sjakta er avgrensa til strøymingsforhold $F < 1.0$ i sjakta. Resultata frå forsøka kan ikkje påvise nokon effekt av endra diameter og ruheit i sjakta på retur av luft frå tunnel og opp sjakt, og dimensjonering av bekkeinntakssjakter etter strøymingsforhold F funne i modellforsøk er framleis gjeldande.

Auka ruheit i sjakta påverka ikkje retur av luft, men hadde ei tydeleg effekt på mekanismane for transport av luft i sjakta. Gradvis erosjon og medrivning av luftbobla var den dominerande transportmekanismen ved introduksjon av ruheitselement i sjakta. Transport av luftbobler ved soping, der heile luftbobla transporterast i eitt, opphøyrd i forsøka med ru sjakt.

Erfaringar frå fullskala bekkeinntak og observasjonar under forsøka tyder på at utblåsingar kan finne stad sjølv ved kontinuerleg retur av luft opp sjakta. Strøymingsmønsteret i sjakta påverkar kor mykje luft som returnerer frå tunnel til sjakt. Ved overgangen frå proppstrøyming til støyttvis strøyming, akkumulerast det luft i tunnelen. Luftvolumet som akkumulerast, kan føre til utblåsingar ved plutsleg retur.

Med støyttvis strøyming i sjakta oppstår det ein strøymingssituasjon der strøyminga vekslar mellom trykkstrøyming og strøyming med fri vassflate. Vekslinga fører til trykksvingingar og gjer strøyminga i sjakt og tunnel ustabil. Den ustabile strøyminga kan vere ein utløyssande mekanisme for utblåsingar i bekkeinntakssjakter, og føre til utblåsingar sjølv ved kontinuerleg retur av luft til sjakta.

Basert på resultata og observasjonane frå modellforsøka, anbefalast det å dimensjonere bekkeinntakssjakter etter likning 12, for å sikre at proppstrøyming er det gjeldande strøymingsmønsteret i sjakta ved retur av luft.

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} < 0.7 \quad (12)$$

Ved å unngå støyttvis strøyming i sjakta, reduserast akkumulering av luft i tunnelen og store trykksvingingar i systemet. Det kan redusere faren for store utblåsingar i sjakta. Grensa funne ved ein lufttilførsel lik 1.3% av vassføringa i sjakta. Påverknaden av minke eller auke av

lufttilføring på grensa mellom proppstrøyming og støyttvis strøyming i sjakta, bør undersøkjast vidare i modell og prototype.

Bygginga av modellen som eit ope system, førte til utfordringar knytt til kontroll av vassføring under forsøka. Eit lukka system der vassforsyninga går direkte inn på sjakta, vil kunne auke kontrollen og kvaliteten på framtidige modellforsøk. Trass utfordringane med gjennomføring og kontroll av forsøka, har modellforsøka auka forståinga for det komplekse fenomenet med retur av luft i bekkeinntakssjakter.

6.2. Vidare arbeid

Vidare modellforsøk

Med modifikasjonar av den fysiske modellen som sikrar betre kontroll over strøymingsforholdet F i sjakta, anbefalast det å utføre vidare modellforsøk med modellen. Eit større fokus på parameterar som påverkar strøymingsmønstera i sjakta er ei naturleg forlenging av funna frå forsøka i denne oppgåva.

Metoden brukt i denne oppgåva for å simulere auka ruheit i sjakta, var ikkje eigna for formålet. Nye undersøkingar bør gjennomførast. Arealforholdet mellom sjakt og tunnel bør aukast vidare, og bruk av ein mykje lenger tunnel vil kunne utelukke eventuell påverknad tunnallengda har hatt under tidlegare forsøk. Trykkmålingar langs sjakta og tunnelen under forsøka kan auke forståinga for korleis dei ulike strøymingsmønstera påverkar systemet. Undersøkingar med varierende sjakthelling og forhold mellom luft og vassføring anbefalast.

Undersøkingar som meir spesifikt ser på faktorar som påverkar boblestørleik og mekanismar for erosjon av luftbobler som returnerer mot vasstraumen, kan føre til viktig kunnskap kring detaljer ved retur av luft. Undersøkingar på falltapets betydning på retur av luft bør gjennomførast.

Målingar i fullskala

Innsamling av data frå bygde bekkeinntak både med og utan utfordringar med luftutblåsingar, vil betre kunnskapsgrunnlaget kring luftutblåsingar. Trykkmålingar langs sjakta og tunnelen, vil kunne brukast til samanlikning av fysiske modellforsøk eller CFD-simuleringar. Sjølv enkle målingar som måling av vasstand og tilsig til bekkeinntaka, vil gi nyttig informasjon om forholda som fører til luftutblåsing.

Bruk av numeriske modellar

Det er ikkje tidlegare utført CFD-simuleringar av retur av luft i bekkeinntakssjakter. Bruk av avanserte numerisk modellering, kan gi høgare grad av detaljkunnskap om to-fasestrøyming i bekkeinntakssjakter.

7. Referansar

7.1. Hovudreferansar

- Ahmed, A. A., Ervine, D. A. og McKeogh, E. J. (1984) The Process of Aeration in Closed Conduit Hydraulic Structures, i Kobus, H. (red.) *Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, Esslingen am Neckar, Tyskland, 3-6 September*. Technische Akademie Esslingen: Technische Akademie Esslingen, s. 1-11
- Awad, M. M. (2007) *Two-phase flow modeling in circular pipes*. PhD, Memorial University of Newfoundland. Tilgjengeleg frå:
http://research.library.mun.ca/10109/1/Awad_MohamedMahmoud.pdf.
- Bekkeinntakskomiteén (1986) *Bekkeinntak på kraftverkstunneler, Sluttrapport fra Bekkeinntakskomiteén*. Asker: Vassdragsregulantenenes forening.
- Berg, A. (1986) *Modellforsøk av tofase luft-vann-strømning i bekkeinntakssjakter*. (Rapportnummer STF60 A86011). Trondheim: NHL.
- Bhatia, H. C. (1978) *Field experiences, literature-review and probable theoretical explanations on air explosions from intakes*. Norges Tekniske Høgskole: Vassdrags- og havnelaboratoriet.
- Bjartnes, T. M. et al. (2016) *Air accumulation in hydropower tunnels*. Upublisert paper presentert på Hydro 2016. Montreux, Sveits.
- Brennen, C. E. (2005) *Fundamentals of multiphase flow*. Pasadena, CA: Cambridge university press.
- Chan, S. N., Cong, J. og Lee, J. H. (2017a) Geyser formation by release of entrapped air from horizontal pipe into vertical shaft, *Journal of hydraulic engineering*, 143(9).
- Chan, S. N., Cong, J. og Lee, J. H. (2017b) 3D Numerical Modeling of Geyser Formation by Release of Entrapped Air from Horizontal Pipe into Vertical Shaft, *Journal of hydraulic engineering*, 144(3).
- Ervin, D. A. (1998) Air Entrainment in Hydraulic Structures: A Review, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water, Maritime and Energy*, 130(3), s. 142-153. doi: 10.1680/iwtme.1998.30973.
- Falvey, H. T. (1980) *Air-water flow in hydraulic structures*. Denver, Colorado: Water and Power Resources Service, Engineering and Research Centre.
- Gjerde, R. U. (2009) *Luftproblem i bekkeinntak: Modellstudie av retur av luft og vurdering av bekkeinntak Holmaliåna*. MSc., Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet.
- Glauser, S. og Wickenhäuser, M. (2009) Bubble movement in downward-inclined pipes, *Journal of hydraulic engineering*, 135(11), s. 1012-1015. doi: 10.1061/ASCEHY.1943-7900.0000093.

- Gupta, R. (1983) Cocurrent gas-liquid downflow in packed beds, i Cheremisinoff, N. P. og Gupta, R. (red.) *Handbook of fluids in motion*. Stoneham, MA: Butterworth Publisher, s. 515.
- Guttormsen, O. (1981) *Bekkeinntak - Vannveger - Luftproblemer*. Trondheim: NTH, Institutt for vassbygging.
- Hoel, R. (2009) *Lufttransport i tunnel*. MSc., Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Jensen, L. et al. (2006) *Inntakshåndboken - Rettledning og utforming av inntak til små kraftverk i Norge*. Oslo: NVE.
- Kobus, H. (1984) Local air entrainment and detrainment, i Kobus, H. (red.) *Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, Esslingen am Neckar*. Technische Akademie Esslingen.
- Lauchlan, C. et al. (2005) Air in pipelines, *HR Wallingford. Report SR*, 649.
- Lia, L. et al. (2003) *Luftlommer i vanntunneler*. (156-2003). Oslo: EBL Kompetanse.
- Liu, T. (2012) *Air-pocket transport in conjunction with bottom-outlet conduits for dams*. PhD, KTH Royal Institute of Technology.
- Liu, T. og Yang, J. (2012) Experiments of Air-pocket Movement in an 18.2 odownward 240-mm Conduit, *Procedia Engineering*, 28, s. 791-795. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.811.
- Liu, T. og Yang, J. (2013) Experimental studies of air pocket movement in a pressurized spillway conduit, *Journal of Hydraulic Research*, 51(3), s. 265-272. doi: 10.1080/00221686.2013.777371.
- Mortensen, J. D., Barfuss, S. L. og Johnson, M. C. (2011) Scale effects of air entrained by hydraulic jumps within closed conduits, *Journal of Hydraulic Research*, 49(1), s. 90-95. doi: 10.1080/00221686.2010.536695.
- Normann, E. S. (2018) *Oppløyst luft i Ekso* [Digitalt bilete]. Finnast ved Uni Research Miljø. Tilgjengeleg frå: <https://www.bt.no/nyheter/lokalt/i/3jdMLd/Fiskedoden-i-Ekso--Kunne-ikke-ha-skjedd-pa-et-verre-tidspunkt> (Henta: 17.08.2018).
- NVE (2005) *Retningslinjer for flomløp*. Oslo: NVE.
- Persson, H. (2015) *Långåspruten har bytt skepnad* [Digitalt bilete]. Finnast ved Tidningen Härjedalen. Tilgjengeleg frå: <https://www.tidningenharjedalen.se/artikel/jamtland/harjedalen/langaspruten-har-bytt-skepnad> (Henta: 30.04.2018).
- Perzyna, S. (2017) *Air return in brook intake shafts*. MSc., Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Pothof, I. og Clemens, F. (2008) On gas transport in downward slopes of sewerage mains, i *11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Skottland*.

- Pothof, I. W. M. og Clemens, F. (2011) Experimental study of air–water flow in downward sloping pipes, *International journal of multiphase flow*, 37(3), s. 278-292. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.10.006.
- Rouhani, S. og Sohal, M. (1983) Two-phase flow patterns: A review of research results, *Progress in Nuclear Energy*, 11(3), s. 219-259. doi: 10.1016/0149-1970(83)90012-4.
- Weisman, J. (1983) Two-phase flow patterns, i Cheremisinoff, N. P. og Gupta, R. (red.) *Handbook of fluids in motion*. Stoneham, MA: Butterworth Publishers, s. 409-419.
- Wisner, P., Mohsen, F. og Kouwen, N. (1975) Removal of air from water lines by hydraulic means, *Journal of the Hydraulics Division*, 101(2), s. 243-257.
- Yang, J. *et al.* (2018) Transient Air-Water Flow and Air Demand following an Opening Outlet Gate, *Modelling and Simulation in Engineering*, 2018, s. 12. doi: 10.1155/2018/3194935.

7.2. Andre referansar

Innholdet frå referansane er henta frå andre kjelder

- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. og Duckler, A. E. (1980) Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes – comparison of experimental data with theory, *Int. J. Multiphase Flow*, 6.
- Dahl, R. og Guttormsen, O. (1986) *Direkte innføring av bekkeinntakssjakt - modellforsøk*. Trondheim: NHL.
- Gandenberger, W. (1957) *Über die wirtschaftliche und betriebssichere Gestaltung vom Fernwasserleitungen*. München: R. Oldenbourg Verlag.
- Gibson, J. (1981) *Effect of Liquid Properties, Angle of Inclination, and Pipeline Geometry on Flow Patterns in Cocurrent Liquid-Gas Flow*. MSc., University of Cincinnati, Cincinnati, OH.
- Hosler, E. R. (1968) *AIChE Symp. Series 64* No 82: 54.
- Kalinske, A. A. og Bliss, P. H. (1943) Removal of air from pipe lines by flowing water, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 13(10).
- Kalinske, A. A. og Robertson, J. M. (1943) Closed conduit flow, *Trans. ASCE*, 108.
- Kent, J. C. (1952) *The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes*. PhD, University of California.
- Lubbers, C. L. (2007) *On gas pockets in wastewater pressure mains and their effect on hydraulic performance*, Delft: Delft University of Technology.
- Skoglund, M. (1993) Inspeksjonsrapport for tunnelstrekningen Stølsdal Brokadalsbekken på Ulla-Førreanleggene. SINTEF NHL.

- Taitel, Y. og Duckler, A. E. (1976) A model for predicting flow regime transition in horizontal and near horizontal gas-liquid flow, *AIChE J.* 22.
- Weisman, J. og Kang, S.Y. (1981) Flow patterns in vertical and upwardly inclined tubes, *Int. J. Multiphase flow*, 7.

Vedlegg A – Tal på returnerte luftbobler

Rådata frå teljing av returnerte luftbobler frå tunnel og ut sjakt. Verdiane i **utheva skrift** er frå forsøk der det vart utført teljing av luftbobler over 30 sekund. Resterande verdiane er frå forsøk der det vart utført teljing av luftbobler over 60 sekund

210-G							
F = 0.4	F = 0.5	F = 0.6	F = 0.7	F = 0.8	F = 0.9	F = 1.0	
69	51	36	30	15	11	0	
63	50	43	36	21	12	0	
59	52	42	31	19	9	0	
63	55	45	34	17	12	0	
70	48	39	31	21	8	0	
66	48	43	35	18	9	0	
62	49	40	30	13	11	0	
61	50	42	29	15	9	0	
29	26	21	18	11	5	0	
29	27	22	15	9	6	0	
30	26	19	15	10	4	0	
33	26	21	17	10	5	0	
29	26	22	18	9	5	0	
32	27	23	15	10	6	0	
30	26	22	16	8	4	0	
31	26	20	15	11	6	0	

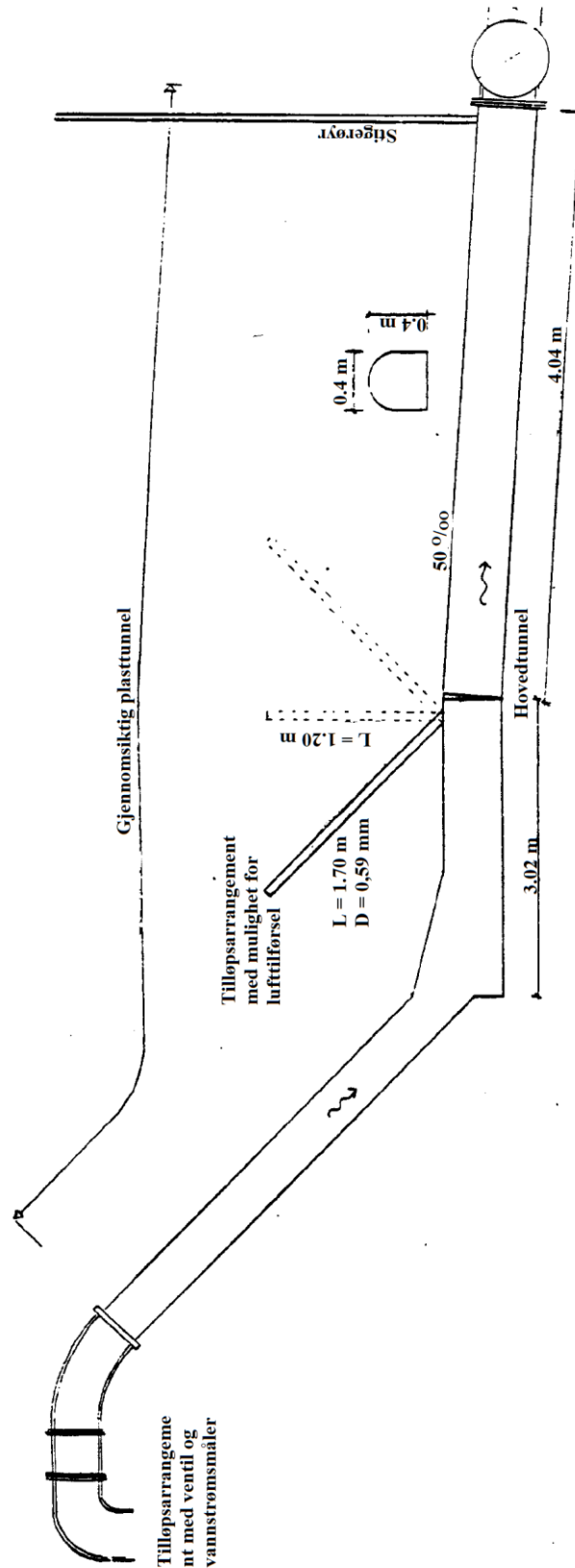
210-R							
F = 0.4	F = 0.5	F = 0.6	F = 0.7	F = 0.8	F = 0.9	F = 1.0	
61	52	42	33	19	0	0	
60	49	41	30	20	0	0	
63	52	45	36	18	0	0	
57	50	44	37	21	0	0	
60	53	43	30	25	0	0	
63	52	40	31	24	0	0	
58	51	46	32	22	0	0	
62	57	45	29	23	0	0	
30	28	20	17	11	0	0	
31	26	23	19	9	0	0	
30	25	20	16	11	0	0	
32	24	22	18	10	0	0	
29	27	22	18	11	0	0	
29	24	20	18	10	0	0	
30	25	21	16	12	0	0	
30	27	23	15	10	0	0	

172-G						
F = 0.53	F = 0.6	F = 0.7	F = 0.8	F = 0.9	F = 1.0	
51	46	27	15	3	0	
48	43	29	16	7	0	
48	46	30	19	5	0	
52	43	30	14	4	0	
51	47	30	18	5	0	
51	44	31	19	8	0	
50	43	29	20	4	0	
50	42	28	18	4	0	
53	40	30	20	7	0	
51	45	30	17	7	0	
50	42	33	16	4	0	
51	41	28	14	5	0	
26	21	15	9	4	0	
25	21	16	10	3	0	
25	22	15	8	2	0	
26	21	15	7	3	0	

172-R						
F = 0.53	F = 0.6	F = 0.7	F = 0.8	F = 0.9	F = 1.0	
51	45	34	17	0	0	
51	41	30	23	0	0	
52	42	32	19	0	0	
55	42	32	19	0	0	
51	43	32	14	0	0	
50	42	30	20	0	0	
50	45	30	14	0	0	
53	41	32	17	0	0	
50	42	34	23	0	0	
52	46	36	18	0	0	
49	39	28	24	0	0	
52	40	30	22	0	0	
27	23	16	8	0	0	
25	22	17	10	0	0	
26	21	15	10	0	0	
24	22	14	11	0	0	

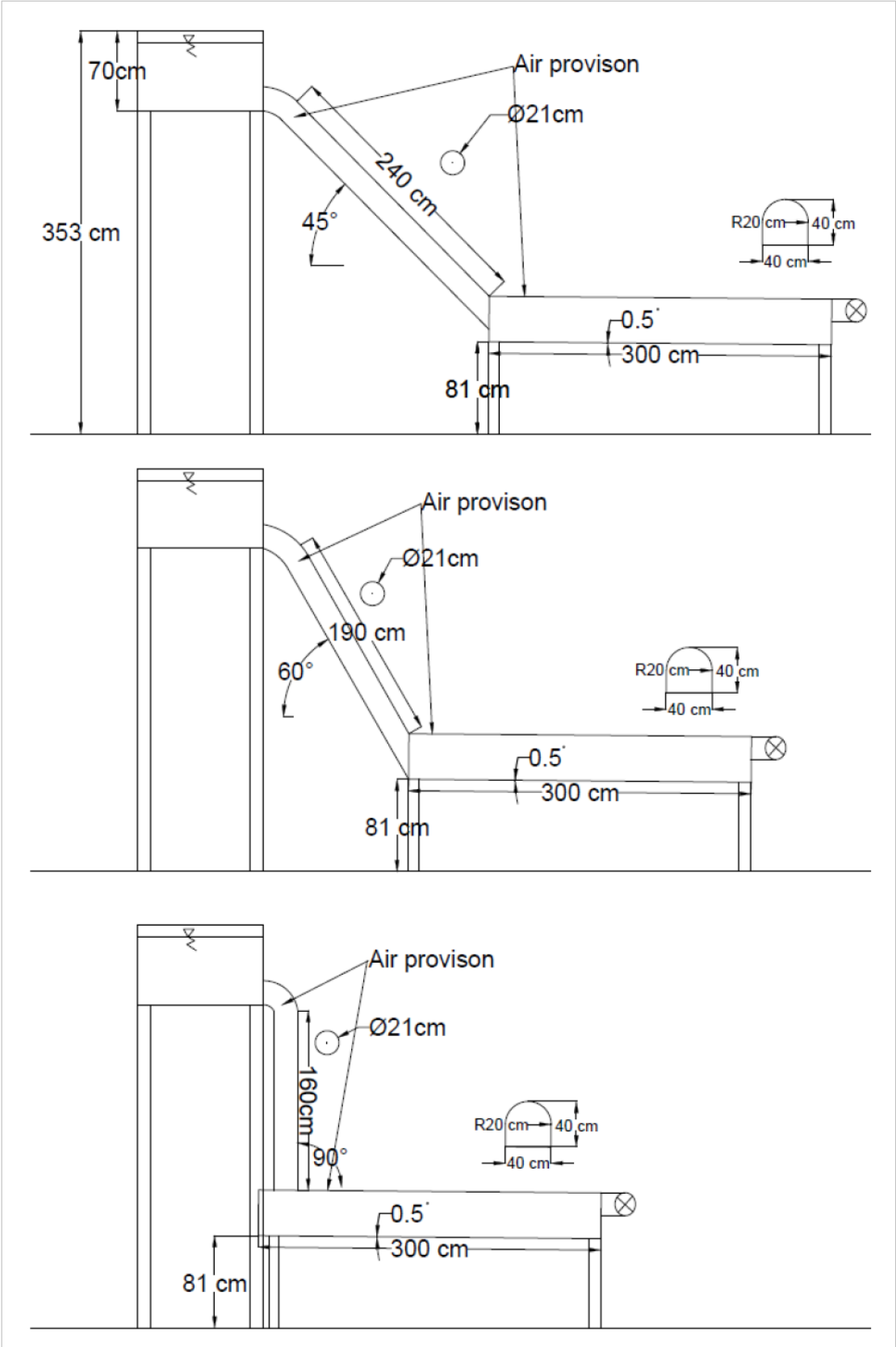
Vedlegg B – Modellskisse fra Dahl og Guttormsen (1986)

Modellskisse, Dahl og Guttormsen (1986)



Vedlegg C – Modellskisse frå Perzyna (2017)

Modellskisse, Perzyna (2017)



Vedlegg D – Bilete av modell

Tunnel



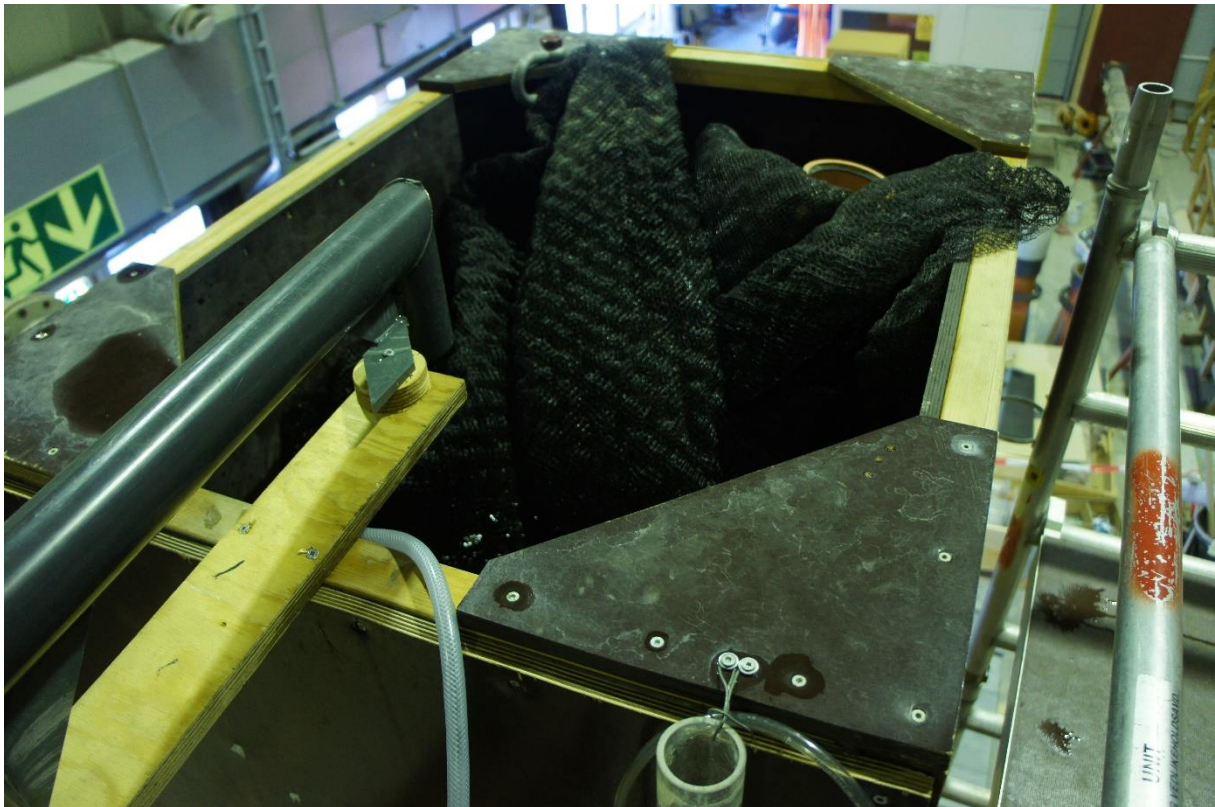
Tunnel



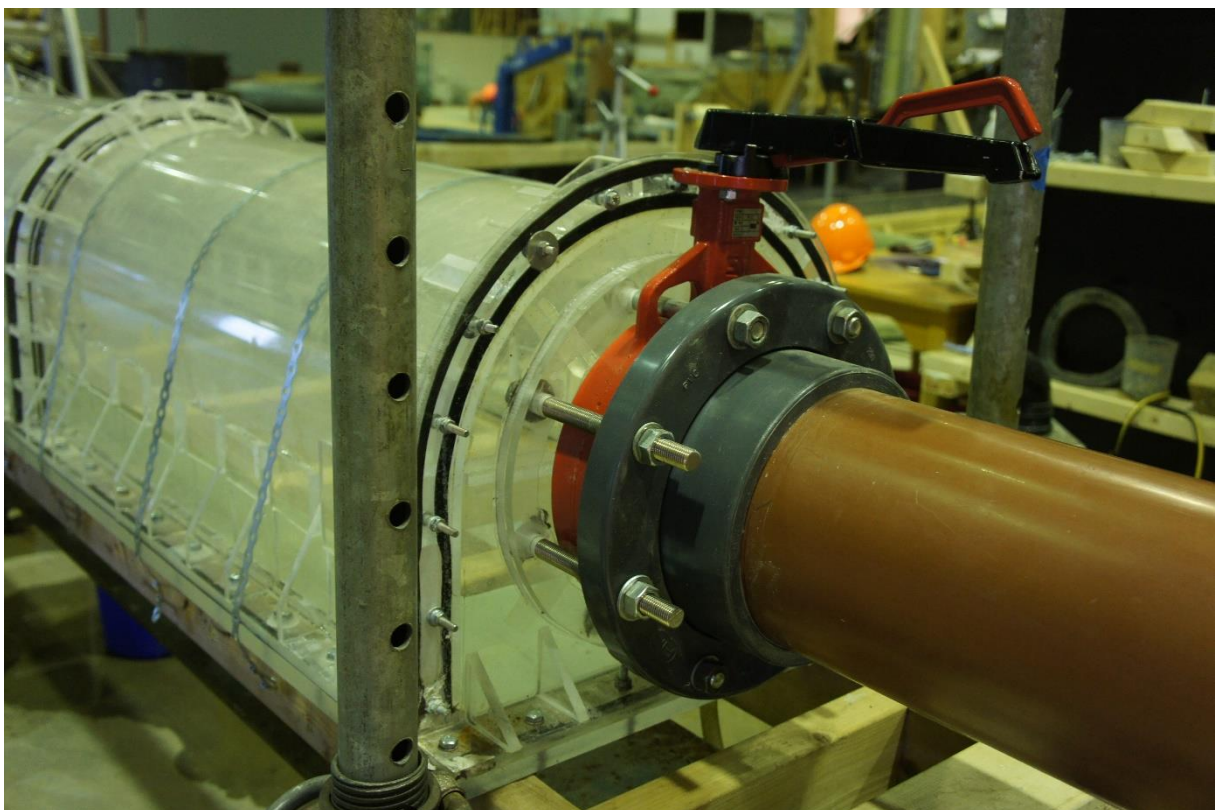
Overgang inntakskasse/sjakt, lufterør og vasstandsmåler



Inntakskasse



Tunnelutløp med spjeldventil



Tunnel og sjakt



Vedlegg E - Forsøksdata

Vassføring, vassfart, Reynolds tal og strøymingstal F i modellen

D [mm]	210
As [m ²]	0,035
As/At	1/4

Q	v	Re	F
[l/s]	[m/s]	[-]	[-]
5	0,14	2,7E+04	0,10
10	0,29	5,3E+04	0,20
15	0,43	8,0E+04	0,30
20	0,58	1,1E+05	0,40
25	0,72	1,3E+05	0,50
30	0,87	1,6E+05	0,60
35	1,01	1,9E+05	0,70
40	1,15	2,1E+05	0,80
45	1,30	2,4E+05	0,91
50	1,44	2,7E+05	1,01
55	1,59	2,9E+05	1,11
60	1,73	3,2E+05	1,21
65	1,88	3,5E+05	1,31
70	2,02	3,7E+05	1,41

D [mm]	172
As [m ²]	0,023
As/At	1/6

Q	v	Re	F
[l/s]	[m/s]	[-]	[-]
5	0,22	3,25E+04	0,17
10	0,43	6,50E+04	0,33
14	0,60	9,11E+04	0,46
16	0,69	1,04E+05	0,53
18	0,77	1,17E+05	0,60
21	0,90	1,37E+05	0,70
24	1,03	1,56E+05	0,80
27	1,16	1,76E+05	0,89
30	1,29	1,95E+05	0,99
33	1,42	2,15E+05	1,09
36	1,55	2,34E+05	1,19
39	1,68	2,54E+05	1,29
42	1,81	2,73E+05	1,39

Vedlegg F – Rotameteravlesning og kalibreringsdiagram

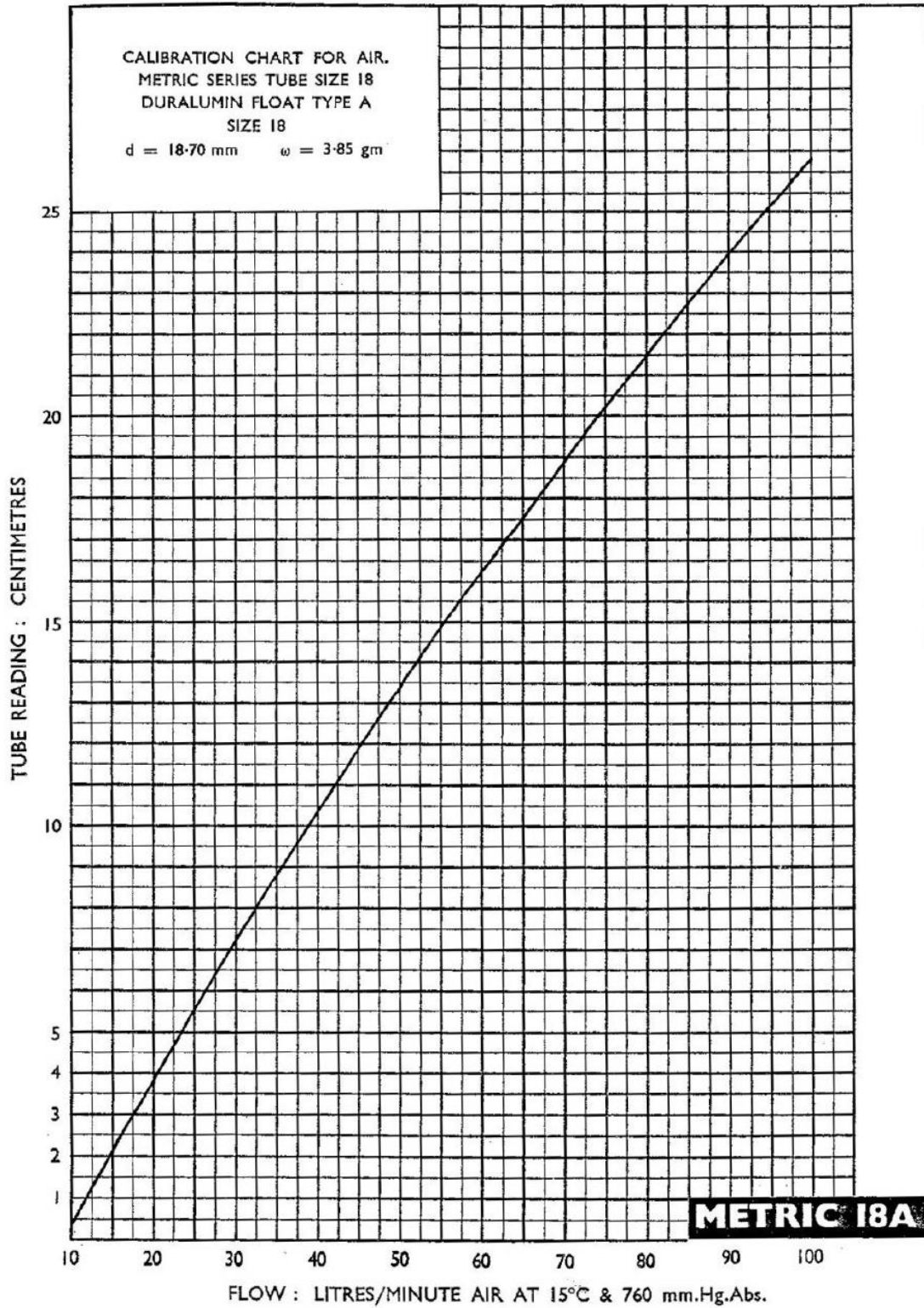
Kalibreringsdiagram og rotameteravlesning for ulike vassføringar i modellen for lufttilførsel lik 1.3 % av vassføringa. Avlesingane er kalibrert for eit ekstra trykk på 3.5 mVs.

Rotameteravlesning med trykk-korreksjon, D = 210 mm

Vassføring	Lufttilførsel	Korreksjon	Avlesning rotameter
[l/s]	[l/min]	[l/min]	[cm]
20	15,6	17,8	30
25	19,5	22,2	45
30	23,4	26,7	60
35	27,3	31,1	75
40	31,2	35,6	90
45	35,1	40,0	105
50	39	44,5	120
55	42,9	48,9	130
60	46,8	53,4	140
65	50,7	57,8	150
70	54,6	62,3	160

Rotameteravlesning med trykk-korreksjon, D = 172 mm

Vassføring	Lufttilførsel	Korreksjon	Avlesning rotameter
[l/s]	[l/min]	[l/min]	[mm]
16	12,5	14,2	20
18	14,0	16,0	25
21	16,4	18,7	30
24	18,7	21,3	40
27	21,1	24,0	50
30	23,4	26,7	60
33	25,7	29,3	70
36	28,1	32,0	80
39	30,4	34,7	90
42	32,8	37,4	100



AIR CALIBRATION CHART FOR METRIC SERIES ROTAMETER TUBE SIZE 18 WITH FLOAT TYPE A