

## Forord

Denne rapporten er en masteroppgave i vassdragsteknikk ved Institutt for vann- og miljøteknikk på NTNU. Masteroppgaven er en del av et FoU-prosjekt i Statkraft om luftutblåsing i bekkeinntak. Oppgaven er avgrenset til 20 uker, og er et selvstendig arbeide. Som en praktisk del er det gjort et modellforsøk ved Vassdragslaboratoriet i Trondheim. Morten Skoglund fra TrønderEnergi har vært engasjert i prosjektet, og har fungert som veileder sammen med Lars Jenssen fra Institutt for vann- og miljøteknikk.

Takk til Trond Bjertnes og andre i Statkraft for muligheten til å være med på prosjektet. Det har vært spesielt fint å få gjøre et modellforsøk som en praktisk del av masteroppgaven. Geir Tessaker var til stor hjelp under arbeidet i laboratoriet, da han alltid var fleksibel og hadde en løsning på alle problemene som dukket opp underveis. Takk til Morten Skoglund og Lars Jenssen for god veiledning. Takk også til Kjetil og andre gode venner for all hjelp underveis.

Trondheim, 15. juni 2009



## Sammendrag

Luftutblåsing i bekkeinntak utgjør et problem med tanke materielle skader og sikkerhet rundt vassdragsanleggene. Det eksisterer en beregningsmetode for å unngå utblåsing i bekkeinntak, men det er stilt spørsmål ved om den er god nok. I beregningsmetoden regner en med at lufta stopper å returnere fra tunnelen ved overkritisk strømning. Da akkumuleres det luft i tunnelen, og det oppstår en stor utblåsing når strømmingen i sjakta igjen blir underkritisk.

Det ble gjort et litteraturstudie med fokus på transport og retur av luft i og til sjakter. En fysisk modell i laboratoriet ble bygget, med den hensikt å etterprøve og undersøke transportkriterier og mangler som ble funnet i litteraturen. Modellen simulerte retur av luft fra en flat tunnel til en sjakt med  $45^{\circ}$  helning. Innsamlet data fra utblåsing på bekkeinntak Holmaliåna ble analysert og sammenlignet med tidligere beregninger og resultatene i modellforsøket. På bakgrunn av resultatene ble det foreslått tiltak på inntaket for å unngå utblåsing.

I litteraturen er det manglende informasjon om hvordan luftmengden påvirker hyppigheten og størrelsen på utblåsingene. Arbeidet med modellforsøket i laboratoriet viste at størrelsen på luftputer som returnerer fra tunnel til sjakt vokser med økt luftmengde og vannføring. Hyppigheten av luftputer som returnerer avtar med økt luftmengde og vannføring. I modellen returnerte det luft for Froudetall over 1, og på Holmaliåna var det store utblåsing ved  $Fr \simeq 0,6$ . Med forbehold om at resultatene er pålitelige, viser dette at returen av luft ikke nødvendigvis trenger å stoppe opp for at det skal oppstå store utblåsing.





# Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Innhold	v
Tabeller	viii
Figurer	viii
Symboler	x
<b>I Litteraturstudium</b>	<b>3</b>
<b>1 Transport og retur av luft i en bekkeinntakssjakt</b>	<b>3</b>
1.1 Hva er en luftutblåsing? . . . . .	3
1.2 Modellforsøk med tofasestrømning i bekkeinntak . . . . .	3
1.2.1 Luftlomme i tunnelen . . . . .	4
1.2.2 Små utblåsing . . . . .	6
1.2.3 Store utblåsing . . . . .	6
1.3 Modellforsøk med direkte innføring av bekkeinntakssjakt på en driftstunnel . . . . .	7
1.3.1 Grensehastighet for retur av luftlommer som er i sjakta . . . . .	7
1.3.2 Grensehastighet for gjennombrudd til sjakt . . . . .	9
1.4 Lufttransport i en sjakt . . . . .	9
1.4.1 Transport av luftlommer og -bobler . . . . .	9
1.4.2 Modellforsøk med transport i rør avhengig av luftvolumet . . . . .	11
1.4.3 Lufttransport avhengig av lengde og diameter på sjakt . . . . .	13
1.5 Sammenligning av resultater . . . . .	14
1.6 Oppsummering . . . . .	15
<b>II Modellforsøk</b>	<b>17</b>
<b>2 Fysisk modellforsøk i laboratoriet</b>	<b>17</b>
2.1 Modellen . . . . .	17
2.2 Metode . . . . .	18
2.2.1 Vurdering av metode . . . . .	19
2.3 Forsøk med dykket inntak . . . . .	19
2.3.1 Luftlommen og luftbobler i tunnelen . . . . .	19
2.3.2 Retur av luftputer fra tunnel til sjakt . . . . .	20
2.3.3 Retur av luft fra sjakt til tunnel for $Fr > 1$ . . . . .	21
2.3.4 Retur av luftputer i sjakt . . . . .	21
2.4 Observasjoner med frispelstrømning i sjakt . . . . .	24

---

2.4.1	Trykklinjens innvirkning på strømnings situasjonen . . . . .	25
2.5	Luftutblåsing . . . . .	26
2.6	Resultater . . . . .	26
2.7	Skalering . . . . .	27
2.7.1	Forhold mellom luft og vann . . . . .	27
2.7.2	Luftlomme i tunnel . . . . .	29
2.7.3	Viskositet . . . . .	29
2.7.4	Retur av luft i sjakta . . . . .	29
2.7.5	Rørstørrelse . . . . .	29
2.7.6	Skalering av resultater i modellforsøket . . . . .	30
2.8	Diskusjon av resultater . . . . .	30
2.9	Konklusjon modellforsøk . . . . .	32
 <b>III Holmaliåna</b>		<b>33</b>
<b>3 Bekkeinntak med store utblåsing</b>		<b>33</b>
3.1	Tidligere beregninger for utblåsing på Holmaliåna . . . . .	33
3.2	Datainnsamling . . . . .	35
3.3	Utblåsing . . . . .	35
3.3.1	Utblåsing 11.oktober 2008 . . . . .	36
3.3.2	Utblåsing 25. og 26. april 2007 . . . . .	36
3.3.3	Utblåsing 25. mai 2007 . . . . .	38
3.3.4	Utblåsing 30. mai 2007 . . . . .	38
3.4	Diskusjon . . . . .	38
3.5	Konklusjon utblåsing på Holmaliåna . . . . .	41
3.6	Forslag til tiltak på Holmaliåna . . . . .	41
3.6.1	Begrense inntakets kapasitet . . . . .	41
3.6.2	Utvide sjakta . . . . .	42
3.6.3	Vakumluge . . . . .	42
3.6.4	Utlufting . . . . .	42
3.6.5	Anbefalt tiltak . . . . .	43
 <b>IV Avslutning</b>		<b>45</b>
<b>4 Oppsummerende konklusjon</b>		<b>45</b>
<b>5 Videre arbeid</b>		<b>47</b>
<b>Referanser</b>		<b>49</b>
<b>A Beregninger i forbindelse med modellforsøk</b>		<b>51</b>
<b>B Tegninger og kart over Ulla Førre og Holmaliåna</b>		<b>53</b>
<b>C Beregninger for utblåsing på Holmaliåna</b>		<b>63</b>

---

<b>D</b>	<b>Data for utblåsing</b> er på Holmaliåna 11. oktober 2008	<b>65</b>
<b>E</b>	<b>Data for utblåsing</b> er på Holmaliåna 25. april 2007	<b>75</b>
<b>F</b>	<b>Data for utblåsing</b> er på Holmaliåna 25. mai 2007	<b>81</b>
<b>G</b>	<b>Data for utblåsing</b> er på Holmaliåna 30. mai 2008	<b>83</b>
<b>H</b>	<b>Oppgavetekst</b>	<b>85</b>
	H.1 Kommentar til oppgavetekst . . . . .	88

## Tabeller

1	Sammenheng mellom Froudetall og annen dimensjonsløs strømming . . . . .	11
2	Faktorer for å beregne nødvendige hastighet . . . . .	13
3	Sammendrag av transportkriterier for luftlommer ved full rørstrømming	14
4	Modelldata . . . . .	17
5	Forsøk med dykket inntak . . . . .	20
6	Forsøk med friskeilstrømming i sjakt . . . . .	25
7	Utblåsing på Holmaliåna . . . . .	36

## Figurer

1	Luftinnblanding i en bekkeinntakssjakt . . . . .	3
2	Bilde fra en stor utblåsing på Holmaliåna på Ulla Førre . . . . .	4
3	Forsøksrigg fra modellforsøk med tofasestrømming i bekkeinntak . . . . .	5
4	Ulike overganger mellom sjakt og tunnel i modellforsøk . . . . .	5
5	Returstrøm og boblebaner i tunnel . . . . .	6
6	Utklipp fra filmopptak fra tidligere modellforsøk . . . . .	6
7	Resultater fra modellforsøk med tofasestrømming i bekkeinntak . . . . .	7
8	Testrigg på modellforsøk med direkte innføring av sjakt på tilløpstunnel	8
9	Resultater fra modellforsøk med direkte innføring av sjakt på tilløps- tunnel . . . . .	8
10	Luftboble i en sjakt . . . . .	10
11	Ttransport luftlommer og -bobler i rør . . . . .	10
12	Nødvendig hastighet for lufttransport . . . . .	12
13	Sammenligning av resultater for transport av luft i vannfylte rør . . . . .	12
14	Nødvendige hastigheter for å transportere luft ned en sjakt . . . . .	14
15	Tegning av modellen . . . . .	18
16	Strømningsforhold i tunnelen ved $Fr = 0,6$ og $0,8$ . . . . .	20
17	Strømningsforhold i tunnelen ved $Fr = 1,0$ og $1,2$ . . . . .	21
18	Strømningsforhold i tunnelen ved $Fr = 1,0$ og ulik tilført luftmengde . . . . .	21
19	Luftputer i sjakt ved $Fr = 0,6$ . . . . .	22
20	Luftputer i sjakt ved $Fr = 1,0$ og $1,3$ vol-% tilført luft . . . . .	22
21	Luftputer i sjakt ved $Fr = 1,0$ og ulik mengde tilført luft . . . . .	23
22	Retur av luftputer ved $Fr = 1,2$ . . . . .	23
23	Erosjon fra luftputer i sjakt . . . . .	24
24	Retur i sjakt for $Fr > 0,7$ . . . . .	24
25	Retur i sjakt for $Fr = 1,2$ og friskeilstrømming i sjakt . . . . .	26
26	Luftputer i sjakt ved $Fr = 0,8$ og friskeilstrømming . . . . .	27
27	Sammenlikning mellom målt og teoretisk høyde på luftlommen . . . . .	27
28	Lengde på luftputene . . . . .	28
29	Hyppeghet av returnerte luftputer . . . . .	28
30	Oversikt over Ulla Førre anlegget til Statkraft . . . . .	33
31	Bilde av toppen av sjakta på Holmaliåna . . . . .	34
32	Bilde fra utblåsing på Holmaliåna . . . . .	34

33	Eksempel på utblåsing 11 oktober 2008 . . . . .	35
34	Utblåsing på Holmaliåna i oktober 2008 . . . . .	37
35	Utblåsing på Holmaliåna i april 2008 . . . . .	37
36	Endring i vannstand i Lauvastøl 25.- 26. april 2007 . . . . .	38
37	Utblåsing på Holmaliåna 25. mai 2007 . . . . .	39
38	Detalj over utblåsing 25.mai 2007 . . . . .	39
39	Utblåsing på Holmaliåna 30. mai 2007 . . . . .	40
40	Eksempel på luftekammer . . . . .	43

## Symbolliste

Symbol	Betydning
$a_l$	Faktor, avhengig av $n$
$a$	Lengde på boblebane i tunnelgulvet [m]
$b$	Lengde på boblebane i tunnelhengen [m]
$C_b$	Dragkoeffisienten på en luftpute
$D$	Diameter sjakt/rør
$Fr$	Froudetall
$Fr_m$	Froudetall i modell
$Fr_p$	Froudetall i prototype
$Fr_{start}$	Froudetall i sjakt ved starten av en utblåsingsperiode
$g$	Tyngdekraft
$h_t$	Største vertikale høyde på luftlommen i tunnelen [cm]
$L$	karakteristisk lengde [m]
$L_p$	Returlengde opp i sjakta på luftputer [m]
$l_p$	Lengde på returnerte luftputer fra tunnel til sjakt, målt langsmed sjakta [m]
$n$	dimensjonløs parameter, beskriver sammenheng mellom $V_{luft}$ og $D$
$Q_{maks}$	Maksimal vannføring [ $m^3/s$ ]
$S_f$	Sikkerhetsfaktor, ofte 1,1
$S$	Helning på rør/tunnel
$S_f$	Helning på energilinjen
$t_p$	Antall returnerte luftputer fra tunnel til sjakt pr minutt [ant/min]
$V$	Vannhastighet i fylt rørtverrsnitt
$V_c$	Nødvendig hastighet for å transportere luft ut av et rør
$V_{luft}$	Volum av luftpute
$V_{min}$	Vannhastighet der en luftlomme vil stå i ro
$v_{start}$	Vannhastigheten i fylt sjakttverrsnitt ved starten av en utblåsingsperiode
$y$	Midlere økning i vannstand Grunnvatn [m]
$\beta$	Forhold mellom luft og vann
$\beta_m$	Forhold mellom luft og vann i modell
$\beta_p$	Forhold mellom luft og vann i prototype
$\zeta$	Formfaktor for en luftlomme
$\sigma$	Overflatespenning
$\delta\rho$	Tetthetsforskjell mellom to faser, luft og vann

## Innledning

### Bakgrunn for oppgaven

Luftutblåsinger kan være svært kraftfulle, og i flere tilfeller er inntaksrister blåst bort og betongkonstruksjoner ødelagt. I tillegg til store materielle skader med tilhørende kostnader, utgjør utblåsinger også en fare for sikkerheten rundt vassdragsanleggene. Luftutblåsinger i bekkeinntak ble et økende problem i Norge på 1970-tallet. Ny anleggsteknikk med borrede sjakter førte til at mer luft ble transportert ned i tunnelsystemet på grunn av høyere vannhastighet. Som følge av problemene ble Bekkeinntaksrapporten utarbeidet på 1980-tallet av Vassdragsregulantenenes forening. Denne inneholder en metode for å beregne medriving- og retur av luft i bekkeinntakssjakter.

Bekkeinntak Holmaliåna på Ulla Førre har stadige utblåsinger og skal utbedres. Beregningsmetoden i Bekkeinntaksrapporten er benyttet, men det er mistanke om at inntaket blant annet blåser oftere enn beregningene tilsier. Statkraft gjennomfører derfor et FoU-prosjekt med mål om å øke forståelsen for luftutblåsinger. Denne masteroppgaven inngår som en del av prosjektet.

### Oppgavens struktur

Første del av oppgaven er et litteraturstudium. En luftutblåsning er avhengig av både medriving, transport, oppsamling og retur av luft. Hovedfokuset i denne rapporten er retur og transport av luft fra tunnel til sjakt, og i selve sjakta. Målet med litteraturstudiet er å finne kriteriene for når lufta returnerer, og hva som påvirker størrelsen og hyppigheten av utblåsinger. Mye av litteraturen er hentet fra tidligere modellforsøk på tofasestrømning med luft og vann.

Som en del av oppgaven er det gjort et fysisk modellforsøk på vassdragslaboratoriet i Trondheim. Forsøket har som mål å undersøke de manglene eller uklarhetene som avdekkes i modellstudiet knyttet til retur av luft, samt hyppigheten og størrelsen på luftputene. Returkriterier fra litteraturstudiet blir sammenlignet med resultatene av forsøkene.

Siste del av rapporten er en gjennomgang av innsamlet data fra utblåsinger på bekkeinntak Holmaliåna. Dette kan på mange måter ses på som et fullskala forsøk. Resultatet fra analysen av dataene blir sammenlignet med tidligere beregninger og resultatene i modellforsøket. På bakgrunn av gjennomgangen av innsamlet data blir det foreslått tiltak på Holmaliåna for å unngå de store utblåsinger.

### Begrepsbruk

I rapporten blir uttrykkene *luftbobler*, *-puter* og *-lommer* brukt. Luftlommer blir brukt om et større luftvolum som har samlet seg i sjakt- eller tunnelhengen. Luftbobler er mindre bobler med diameter opp til omtrent 1 cm. Luftpute er en mellomstørrelse mellom lomme og bobler og brukes om et luftvolum som beveger seg i en sjakt eller et rør. Uttrykkene må ses relativt til størrelsen på det røret eller tunnelen luften befinner seg i.

*Retur* av luft brukes når et luftvolum går mot vannstrømmen. *Transport* av luft brukes når et volum går med vannstrømmen.



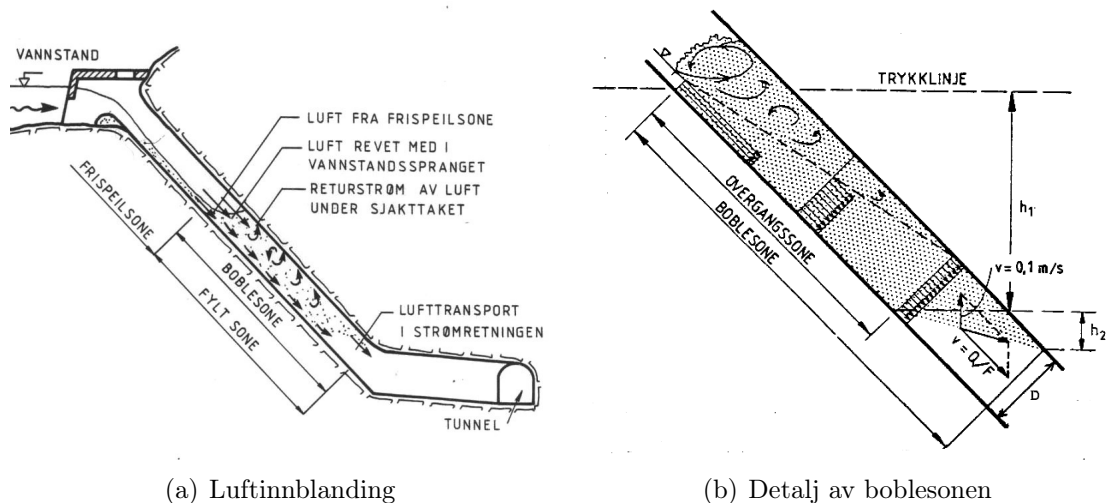


## Del I

## Litteraturstudium

## 1 Transport og retur av luft i en bekkeinntakssjakt

## 1.1 Hva er en luftutblåsing?



(a) Luftinnblanding (b) Detalj av boblesonen  
 Figur 1: Luftinnblanding i en bekkeinntakssjakt med detalj av boblesonen, [1]

Figur 1(a) viser en vanlig utførelse av et bekkeinntak. I sjakta vil det blandes inn luft i frispelisonen og i vannstandsspranget. Ved store nok vannhastigheter vil luften drives ned i tunnelsystemet. I tunnelen eller tverrstollen vil den kunne stige opp til taket og samles i lommer på grunn av lavere vannhastighet. Trykkøkningen gjør at lufta blir komprimert. Luftlommen i tunnelen kan bli stående i sjaktfoten å stange mot vannet i sjakta, fordi den søker mot lavere trykk. Avhengig av vannhastigheten i sjakta, kan hele eller deler av denne lommen returnere opp til friluft. Ved store nok volum vil lufta ekspandere i sjakta og presse vannet foran seg. En blanding av vann og luft blir presset ut gjennom sjakta med enorm kraft. [1]. Et bilde fra en utblåsing er vist i figur 2.

## 1.2 Modellforsøk med tofasestrømming i bekkeinntak

I 1986 ble det gjennomført et modellforsøk med retur av luft fra en tunnel og opp en sjakt [3]. Forsøket var noe av bakgrunns materialet som førte frem til Bekkeinntaksrapporten [1] som har vært gjeldende i Norge for dimensjonering av bekkeinntak med tanke på luftproblemer. Resultatet av modellforsøket viste blant annet at returen fra tunnel til sjakt stoppet opp ved  $Fr > 1$  i sjakta.



Figur 2: Utblåsing på Holmaliåna, [2]

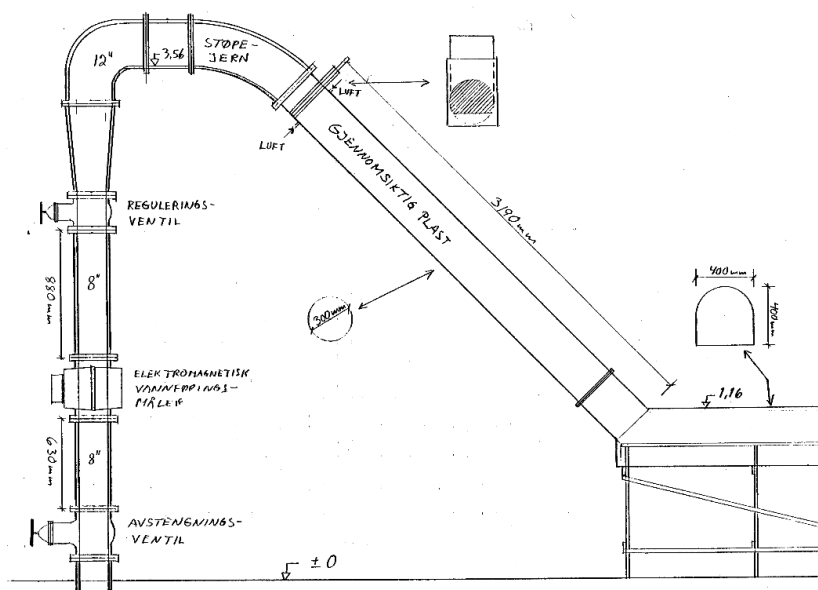
Forsøksriggen er vist i figur 3. Overgangen mellom sjakt og fot ble variert fra skarpkantet, avkuttet og med borret forbindelse, se figur 4. Luft ble tilført øverst i sjakta, og i noen tilfeller også i tunnelen, ved hjelp av trykkluft. Forsøkene ble kjørt med luft-vann-forhold på 1,3 vol-% ved vannhastighet 1 m/s. Dette skulle omtrent tilsvare forholdet mellom komprimert luft og vann ved foten av en sjakt.

### 1.2.1 Luftlomme i tunnelen

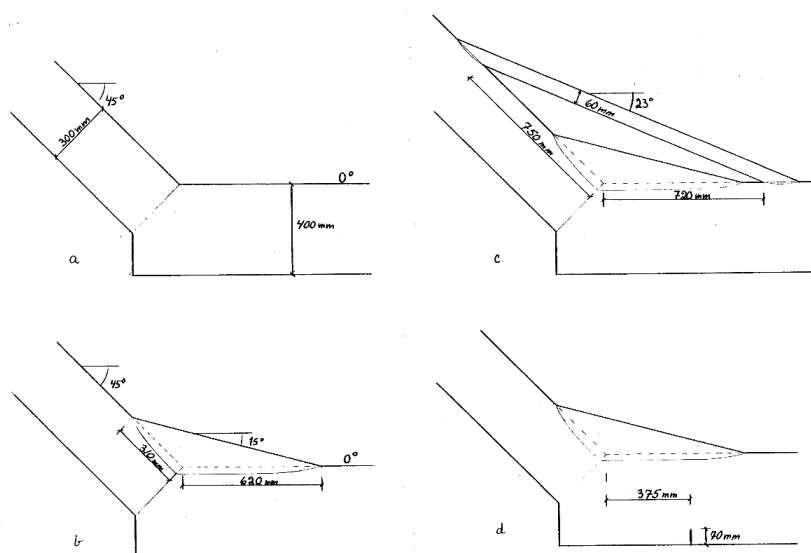
En forutsetning for at en luftutblåsing skal oppstå, er at det finnes et samlet, komprimert luftvolum i tunnelsystemet. Endring i strømningsretning, lavere vannhastighet og trykkøkning gjør at luftbobler som transporteres ned sjakta kan stige mot taket og samles i en luftlomme i tverrstollen eller tunnelen. [1]

I et modellforsøket ble det gjort målinger av lengdene  $a$  og  $b$  ved ulike Froudetall, se figur 5(b). Resultatet viste at ved økt Froudetall økte  $a$  og  $b$ , og forholdet mellom dem. Boblene ble dratt lengre ned i tunnelen ved høyere vannføringer, og det tok lengre tid før alle boblene nådde tunneltaket. [3]

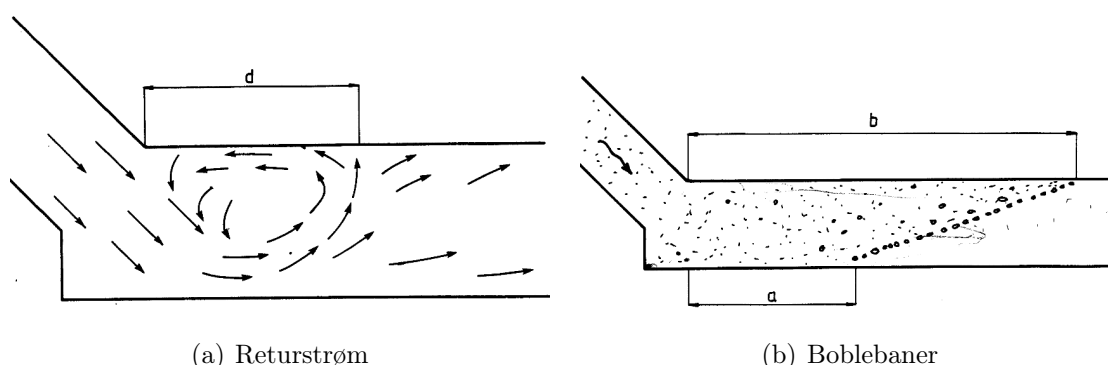
Ved underkritisk strømning,  $Fr \leq 1$ , blir høyden på luftlomma maksimalt en hastighetshøyde, regnet med vannhastigheten i fylt sjakttverrsnitt. Begrunnelsen ligger i en energibetraktning der utgangspunktet er at trykket inne i lomma er like stort. Når luftlommen får tilført luft og høyden blir større enn en hastighetshøyde, returnerer det luftputer til sjakta. For overkritisk strømning,  $Fr > 1$ , vil det ikke returnere luft. Da akkumuleres det luft i tunnelen. [4]



Figur 3: Forsøksrigg fra modellforsøk med tofasestrømning i bekkeinntak, [3]



Figur 4: Ulike overganger mellom sjakt og tunnel i modellforsøk, [3]



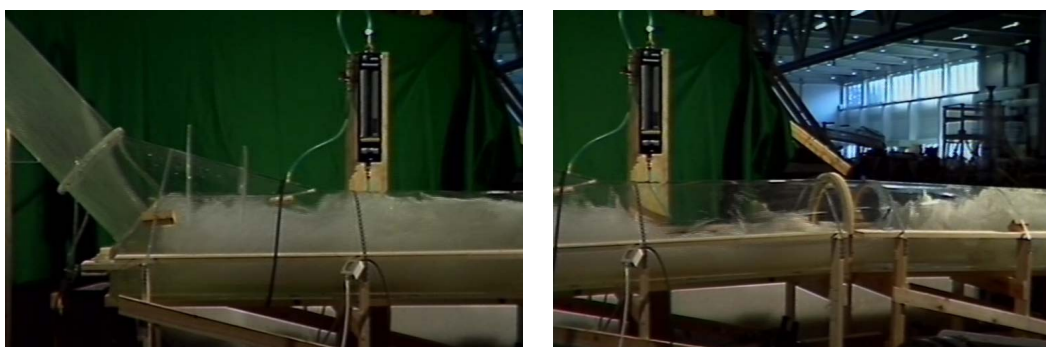
Figur 5: Bildene (a) og (b) viser returstrøm og boblebaner rett nedstrøms sjakta, [1]

### 1.2.2 Små utblåsing

I forsøk med skarpkantet overgang mellom sjakt og tunnel returnerte lufta støtvis til sjakta ved  $Fr = 0,58$  i sjakta. Dette tilsvarte en vannhastighet i fylt sjakttverrsnitt på 1 - 1,3 m/s. Tidsintervallet mellom støtene var 0,5 - 2 sek. Lufta som gikk ut i sjakta samlet seg til en større luftlomme 0,5 - 1 m oppe i sjakta. Her eroderte det luft fra lomma som følge av dragkreftene fra vannet. For at lufta skulle returnerer hele veien opp var det nødvendig at returen av luft fra tunnelen var større enn luftmedrivingen i sjakta. Slik støtvis retur av luft var mulig opp til Froudetallet i sjakta gikk over 0,95. [3]

I forsøkene med avrundet overgang mellom sjakt og tunnel returnerte det også luft støtvis fra tunnelen til sjakta for Froudetall  $\geq 0,58$ . For  $Fr = 1$  returnerte luftlommen i sjakta bare hvis returen av luft fra tunnelen var større enn luftmedrivingen i sjakta. [3]

### 1.2.3 Store utblåsing

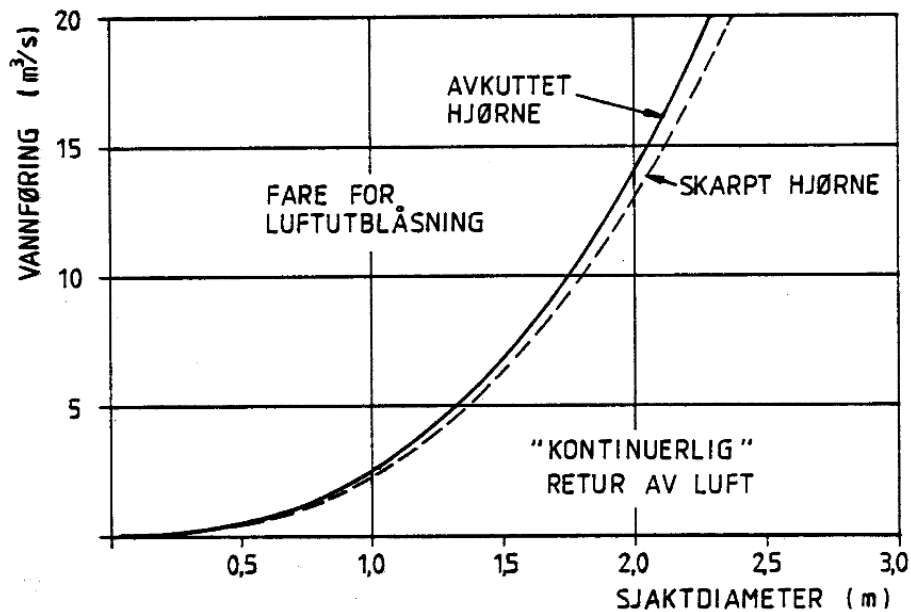


(a) Sjaktfot

(b) Tunnel

Figur 6: Utklipp fra filmopptak under forsøk i [3]. Bildene (a) og (b) viser situasjonen med kritisk vannhastighet og luftinnblanding i sjakta.

All retur av luft fra tunnelen opphørte ved  $Fr = 1$  eller høyere. For skarpkantet



Figur 7: Resultater fra modellforøk med tofasestrømning i bekkeinntak, [3]

overgang gikk grensen ved  $Fr = 0,95$ . Forsøket ble filmet, og noen bilder fra filmen kan ses i figur 6(a) og 6(b). Resultatene fra forsøket er presentert grafisk i figur 7. Grensen for når store utblåsing oppstår ble på bakgrunn av resultatene satt ved  $Fr = 1$  sjakta. Hvis vannføringen i sjakta ble overkritisk ville det akkumuleres mye luft i tunnelen. Når strømmingen ble underkritisk igjen kunne hele luftvolumet returnere opp sjakta som er stor utblåsing. [1]

#### Skalering av forsøket

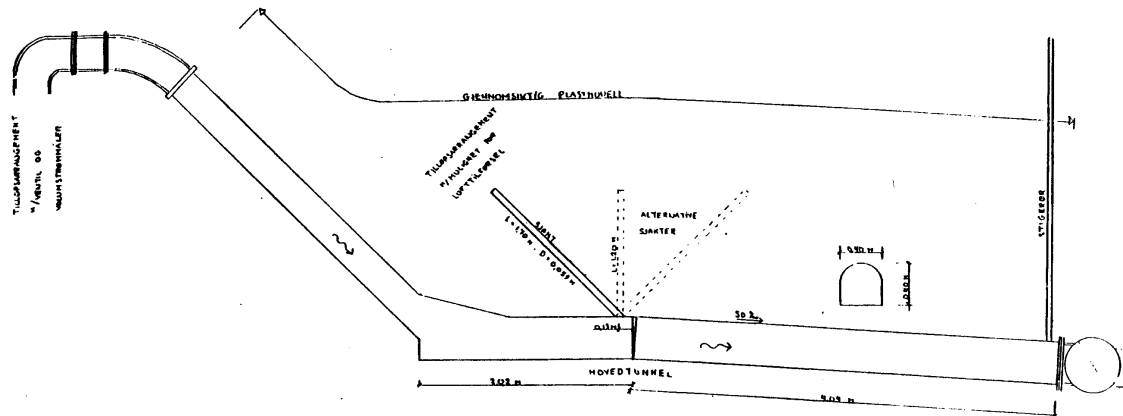
Forsøket var skalert etter Froudes lov, og ble antatt å ha gyldighet for konstruksjoner i fullskala med noenlunde lik geometri og et tverrsnittsforshold mellom tunnel og sjakt på opptil 10:1. Det var sjakta som var avgjørende for lufttransporten, slik at det var den det måtte skaleres etter. [3]

### 1.3 Modellforsøk med direkte innføring av bekkeinntakssjakt på en driftstunnel

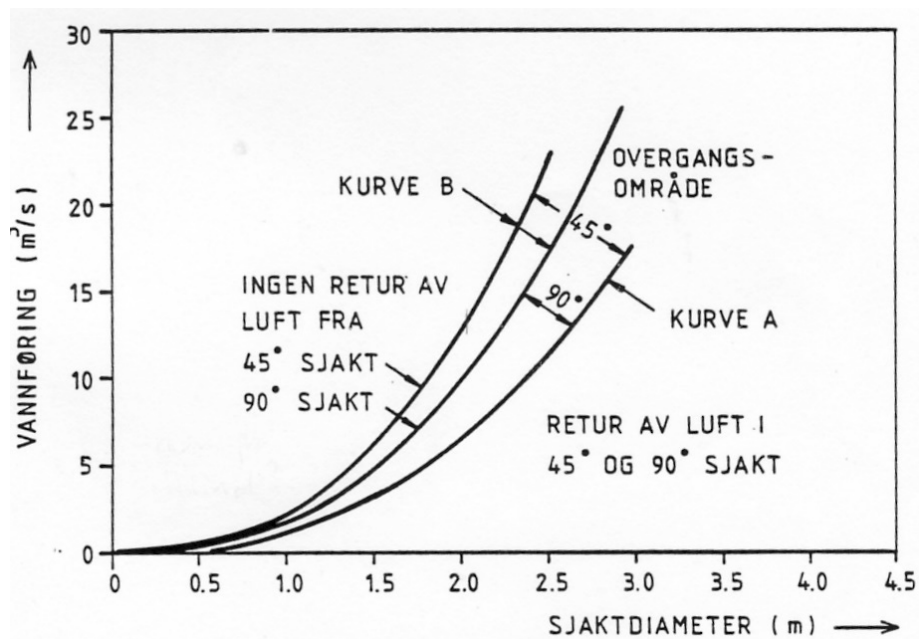
I et annet modellforsøk ved vassdragslaboratoriet i 1986 ble det undersøkt retur av luft opp en sjakt fra en driftstunnel [5]. Forsøksriggen er vist i figur 8, og resultatet av forsøket er vist i figur 9.

#### 1.3.1 Grensehastighet for retur av luftlommer som er i sjakta

I forsøkene ble det funnet en grensehastighet for når en luftpute som er i sjakta returnerer videre opp hele sjakta eller om den blir transport med vannstrømmen ned i tunnelen igjen. Den grensehastigheten var uavhengig av forholdene i driftstunnelen. Den er markert som kurve A i figur 9.



Figur 8: Testrigg på modellforsøk med direkte innføring av sjakt på tilløpstunnel, [5]



Figur 9: Resultater fra modellforsøk med direkte innføring av sjakt på tilløpstunnel, [5]

### 1.3.2 Grensehastighet for gjennombrudd til sjakt

Forsøkene viste at grensehastigheten for gjennombrudd fra tunnel til sjakt, er avhengig av vannhastigheten og graden av forstyrrelser i driftstunnelen. Grensehastigheten er markert som kurve B i figur 9 med et overgangsområde. Det ble observert at luftlommen i tunnelen returnerte til sjakta ved forstyrrelser i vannstrømmen under hengen i tunnelen. Dette kunne typisk være at det returnerte en stor luftlomme under tunnelhengingen som kolliderte inn i luftlomma rett under sjaktfoten. Ved store forstyrrelser i tunnelen kunne grensehastigheten for gjennombrudd til sjakt bli den samme som for luftputer som er i sjakta. All retur av luft stoppet ved  $Fr = 1$  i sjakta.

Resultatene i figur 9 er basert på forsøk uten innblanding av luft i sjakta. I forsøk med luftinnblanding, returnerte luftlommene ved større vannhastigheter, det vil si ved større Froudetall. I en sjakt med luftinnblanding vil det være høyest konsentrasjon av luft i øvre delen av vannstrømmen, der hvor luftputa returnerer fra tunnelen. Luftputa kan få tilskudd av luft fra sjakta, og returnerer lettere på grunn av større oppdrift.

## 1.4 Lufttransport i en sjakt

Utblåsing er avhengig av at det samles et stort volum i tverrstollen. Derfor er det interessant å se på når en sjakt transporterer luftlommer.

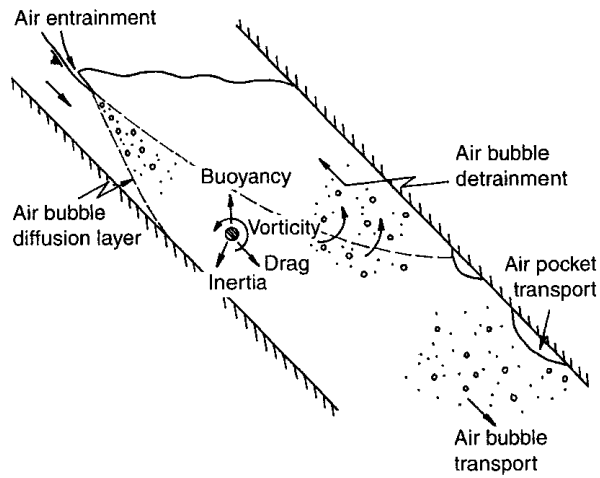
### Krefter som virker på en luftlomme i en sjakt

Lufttransport avhenger av treghetskrefter, dragkrefter, oppdrift, viskositet og overflatespenninger, dette er illustrert i figur 10. Dimensjonsanalyse har vist at den nødvendige hastigheten for å transportere luftlommer og -bobler er en funksjon av Froudetallet, Reynoldstallet, overflatespenninger og rørhelning. For store nok rør ( $d > 175$  mm) kan overflatespenninger neglisjeres. Flere forskere har derfor funnet at den nødvendige hastigheten for lufttransport er avhengig av rørhelning og  $(gD)^{0,5}$ . Det er få undersøkelser som har brukt ulike rørdiametre i forsøkene, slik at det er dårlig dokumentert hvor stor innflytelse rørstørrelsen har på resultatene. [6, 7]

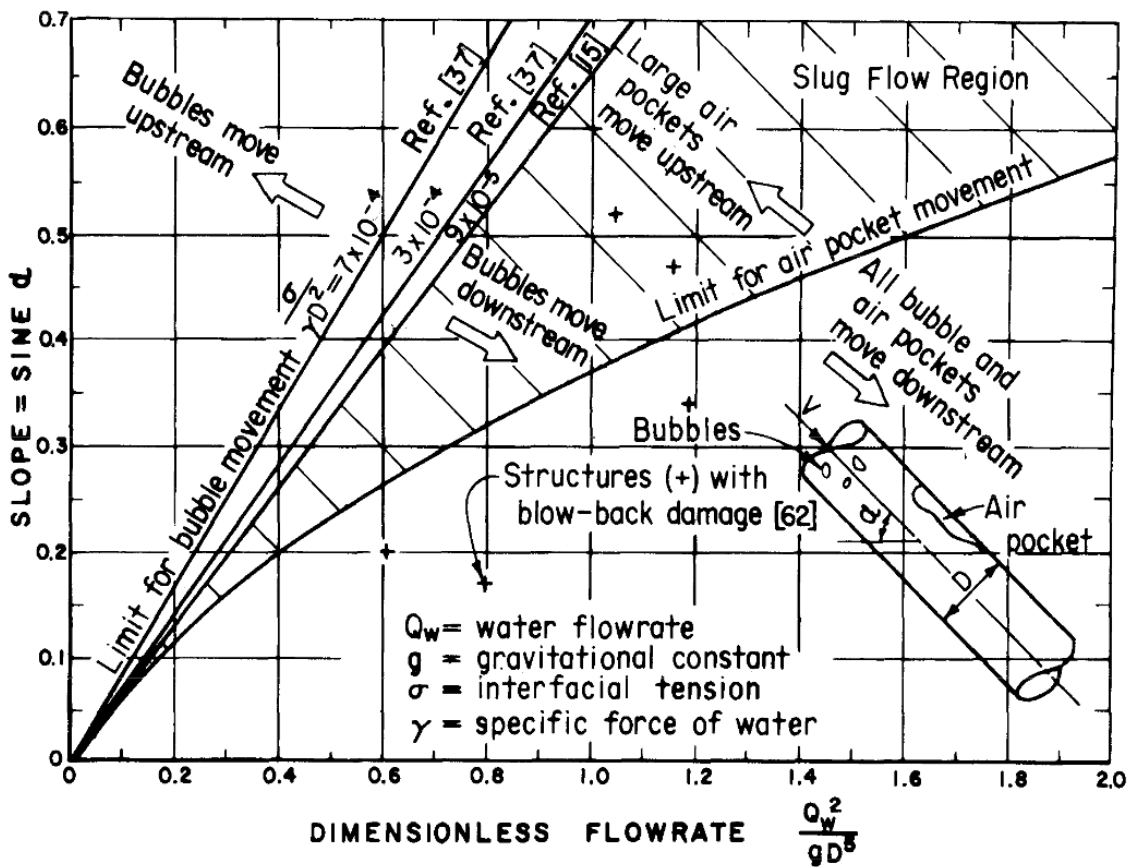
#### 1.4.1 Transport av luftlommer og -bobler

Figur 11 beskriver transport av luftbobler og -lommer i et vannfylt rør, med overgangsområder. Sammenhengen mellom Froudetall og uttrykket på x-aksen er gitt i tabell 1. I følge figur 11 vil store luftlommer i rør med helning på  $45^\circ$  bevege seg oppover i sjakta for Froudetall større enn ca 1,3. Grensen for når all luft slutter å returnere ligger utenfor grafen. [8]

Uttrykket på x-aksen er et resultat av en dimensjonsanalyse, der utgangspunktet var at den nødvendige vannføringen for lufttransport var en funksjon av boblediameter, tetthet, dragkoeffisienten til luftboblen og rørhelningen. Uttrykket i likning 1 ble da det endelige resultatet.



Figur 10: Luftboble i en sjakt, [7]



Figur 11: Oversikt over lufttransport i rør som funksjon dimensjonsløs hastighet og helning, [8]



$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$\frac{Q_w^2}{gD^5}$	0,02	0,1	0,22	0,39	0,62	0,89	1,21	1,58	2

Tabell 1: Sammenheng mellom Froudetall og annen dimensjonsløs strømming

$$\frac{Q_w^2}{gD^5} = f\left(\frac{\gamma D^2}{\sigma}, S_f, S_o, C_b\right) \quad (1)$$

der  $\frac{\gamma D^2}{\sigma}$  er Eötvös-tallet, en sammenhengen mellom oppdrift og overflatespenninger, se likning 2.

$$Eötvös = \frac{\Delta\rho g L^2}{\sigma} \quad (2)$$

På figur 11 er disse parametrene oppgitt på grensehastighetene for transport av bobler.

I et modellforsøk ble minimumshastigheten for å transportere en luftlomme ut av et vannfylt rør testet og sammenlignet med tidligere resultater [9]. De var funnet ved modellforsøk og ved å beregne dragkrefter og oppdrift for en luftlomme. Resultatet var likning 3. Det ble funnet avvik i resultatene, og en ny grensehastighet ble funnet. Hastigheten er gitt ut fra likning 4. For et rør med helning  $45^\circ$  skal Froudetallet være 1,05 eller høyere for å transportere alle luftlommer ut av røret. I følge tidligere resultater skulle Froudetallet være 0,95 eller mer. Resultatene er vist i figur 12.

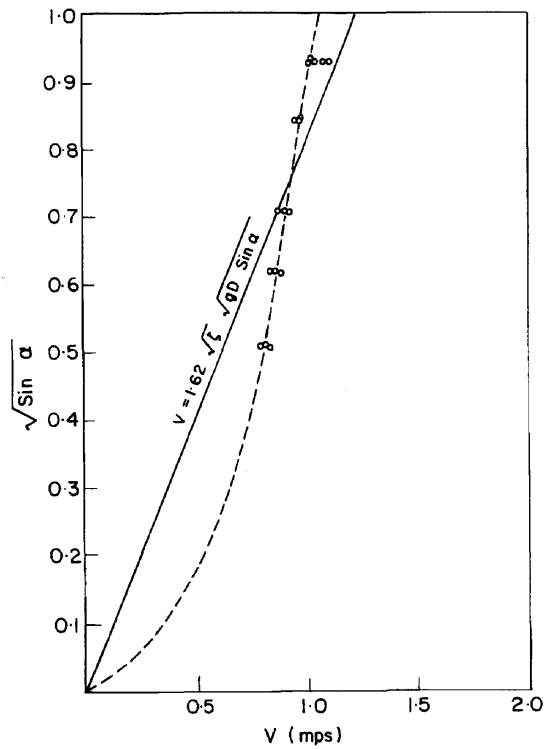
$$V_{min} = 1,62\sqrt{\zeta}\sqrt{gD \sin \theta} \quad (3)$$

$$\frac{V_c}{\sqrt{gD}} = 0,25\sqrt{\sin \theta} + 0,825 \quad (4)$$

#### 1.4.2 Modellforsøk med transport i rør avhengig av luftvolumet

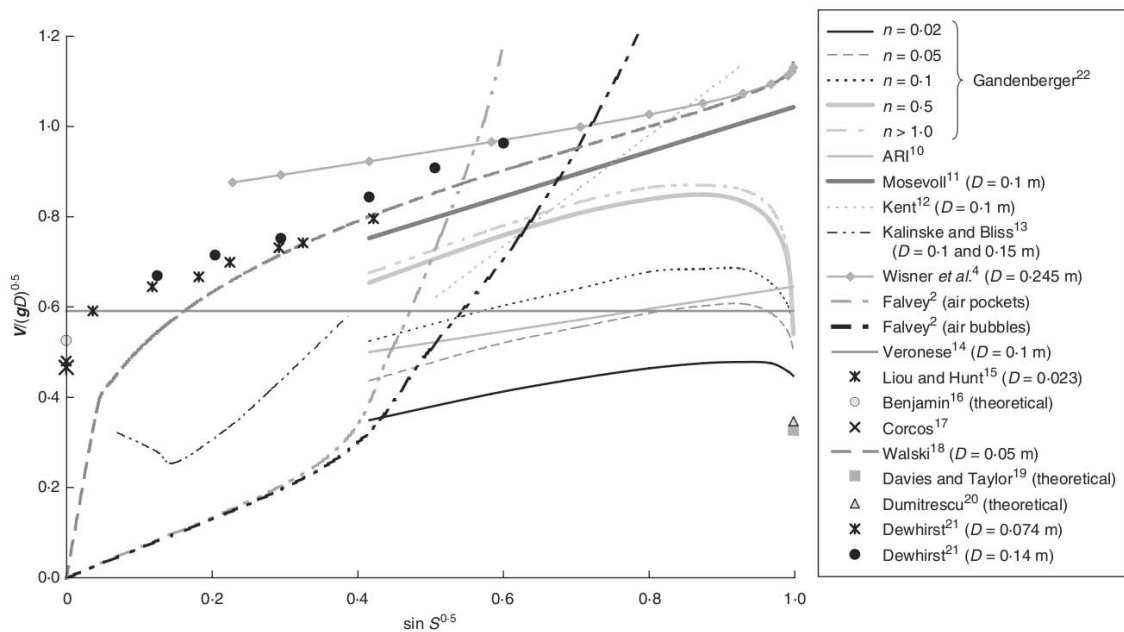
Den nødvendige hastigheten for å fjerne luftlommer av forskjellige størrelser ble funnet ved et modellforsøk [6]. Røret hadde diameter 150 mm og varierende helning mellom  $0^\circ$  til  $22,5^\circ$ .

I forkant av modellforsøket ble det gjort en grundig gjennomgang av tilgjengelig litteratur rundt transport av luft i vannfylte rør. Studien viste at det ikke var enighet om en generell likning for transport av luftbobler eller luftlommer i rør. Til tross for ulike tilnærminger til problemstillingen, hadde de fleste forskere funnet en sammenheng mellom dimensjonsløs hastighet og rørhelning. Det ble gjort en sammenlikning



Figur 12: Nødvendig hastighet for lufttransport, [9]

av ulike resultater, se figur 13. Det kommer frem av figuren at det er sprikende resultater blant de forsøkene som er gjort med helning på  $45^\circ$ . [6]



Figur 13: Sammenligning av resultater for transport av luft, [6]

Gjennom modellforsøket [6] ble likningene 5 og 6 utviklet.

$$\frac{V}{(gD)^{0,5}} = S_f[0,56 * (\sin S)^{0,5} + a_l] \quad (5)$$

I 5 er  $a_l$  gitt av  $n$ , som er et uttrykk for luftvolumet og regnes ut etter likning 6. Forholdet mellom  $a_l$  og  $n$  er gitt i tabell 2.

$a_l = 0,45$	$n < 0,06$
$a_l = 0,50$	$0,06 \leq n < 0,12$
$a_l = 0,57$	$0,12 \leq n < 0,30$
$a_l = 0,61$	$0,30 \leq n < 2$

Tabell 2: Faktorer for å beregne nødvendig hastighet for lufttransport, [6]

$$n = \frac{4V_{luft}}{\pi D^3} \quad (6)$$

Likning 5 er kun testet i modellforsøk for helning opp til  $22,5^\circ$ . I følge rapporten [6] er det andre undersøkelser som viser at resultatene kan brukes for helninger opp mot  $40^\circ$ .

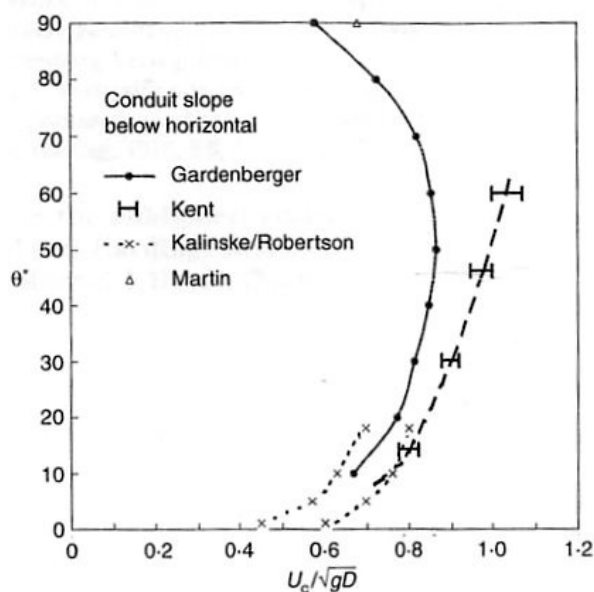
Ved å sette inn  $S_f = 1.1$ ,  $S = 45^\circ$  og maks- og minimumsverdier for  $a_l$  i likning 5, gir det  $Fr = 1,01$  og  $Fr = 1,18$ .

I et modellforsøk ble en stor luftlomme ført inn i et hellende rør, mens vannføringen ble justert for å holde luftlommen i likevekt [9]. På grunn av vannstrømmen eroderte det luft vekk fra lommen, og den ble tilslutt redusert til en stabil størrelse. En økning i vannhastigheten førte ikke til ytterligere erosjon, men til at luftlommen ble ført med vannstrømmen og ut av røret. Resultatene viste at for en bestemt diameter, helning og vannhastighet finnes det en luftlommestørrelse som er stabil.

### 1.4.3 Lufttransport avhengig av lengde og diameter på sjakt

I litteraturen er det gitt lufttransportkriterie i sjakt etter  $L/D$ -forhold [7].  $L$  er rørlengden nedenfor innblandingspunktet, og  $D$  er sjaktdiameteren. For sjakter med  $L/D > 20$  er transportkapasiteten avhengig av Froudetallet i sjakta. Flere forsøk har vist dette tidligere, og en sammenfatning av resultatene er vist i figur 14.

For korte sjakter,  $L/D < 5$  vil all luft bli transportert ut av sjakta. For sjakter med  $5 < L/D < 20$  vil innblandet luft samle seg til luftlommer i sjakta. Luft som når utgangen er derfor en blanding av luftlommer i hengen og luftbobler. Mengden luft som når utgangen av sjakta er avhengig av mengden innblandet luft og hastigheten ved utløpet av sjakta. Mengden innblandet luft vil variere med hastigheten på vannet i frispelssonen.



Figur 14: Nødvendige hastigheter for å transportere en luftlomme ned et vannfylt rør, [7]

## 1.5 Sammenligning av resultater

I tabell 3 er det gitt en oppsummering av kriteriene for retur og transport av luftlommer fra tunnel og i en sjakt med 45° helning.

Lufttransportkriterier i full rørstrømning			
Referanse	Fr	Henvisning	Kommentar
Grenser for retur av luft			
[5]	0,5 - 1	Figur 9	Retur fra tunnel og sjakt opphører
[3]	1	Figur 7	Retur fra tunnel opphører
[8]	1,3	Figur 11	Store luftlommer returnerer i sjakta
Grenser for transport av luft			
[7] <sup>Gandenberger</sup>	0,85	Figur 14	Sjakta transporterer all luft
[7], [9]	0,95	Figur 14	Sjakta transporterer all luft
[6], $n < 0,06$	1,01	Likning 5 og 6, tabell 2	Sjakta transporterer all luft
[9]	1,05	Figur 12	Sjakta transporterer all luft
[6], $n=2$	1,18	Likning 5 og 6, tabell 2	Sjakta transporterer all luft

Tabell 3: Sammendrag av transportkriterier for luftlommer ved full rørstrømning

Som det fremgår av tabellen er det ulike kriterier for retur og transport av luft i et

hellende vannfylt rør.

## 1.6 Oppsummering

Forsøkene som beskriver retur fra tunnel til sjakt har lite informasjon om hyppighe- ten og størrelsen varierer med vannføringen. Det er også usikkert hvordan størrelsen varierer med mengden luft i forhold til vann. Hvis høyden på luftlomma i tunnelen er en hastighetshøyde slik som teorien sier, kan det tenkes at størrelsen eller hyppighe- ten på returnerte luftputer går opp ved økt vannføringer eller økt tilført luftmengde for underkritisk strømning i sjakta.

Når det gjelder retur av luftputer i selve sjakta, er det ulike resultater når det gjelder betydningen av størrelsen. [9] fant en stabil luftputestørrelse for en bestemt vannføring, helning og rørdiameter. Resultatene til [6] viste at for økende størrelse på luftputene var det nødvendige med høyere vannhastighet for å transportere luften. Liknende sammenhenger mangler i de andre forsøkene, og dette kan være noe av årsaken til at transportkriteriene varierer slik som de gjør. Et større luftvolum har større oppdrift, slik at det vil øke den nødvendige hastigheten for å transportere luften.

I beskrivelsene av lufttransport i [6], [7] og [9], ble det fokusert på hvilke vannhastig- heter som tømte røret for luft. I forhold til det som skjer i en bekkeinntakssjakt er det noe mangelfullt, ettersom luftinnblandingen i sjakta ikke blir tatt med i betrakt- ningen. Luftinnblanding i sjakta vil føre til at luftputene får tilført luft, og blir da vanskeligere å fjerne på grunn av økt oppdrift. Det kan derfor være rimelig å tro at Froudetallet som skal til for å hindre retur av en luftpute i en bekkeinntakssjakt er høyere enn det som er funnet i de aktuelle forsøkene. Unntaket er transportkriteriene i [8] som var betydelig høyere enn annen litteratur. I [5] ble det funnet en relativt lav grense for når luftputene i sjakta kunne returnere helt opp. Her ble det poengtert at med luftinnblanding i sjakta økte Froudetallet for når luftputene kunne returnere.

De ulike kriteriene er utarbeidet gjennom modellforsøk, og feil skalering av resultatene kan oppstå. Av de resultatene som er sammenlignet her er det brukt rørdiameter mellom 59 og 300 mm. Etersom store rør transporterer luft bedre enn små, kan dette utgjøre en skalaeffekt.

Retur og transport av luft er avhengig av Froudetallet i sjakt og av sjakthelning- en. Det er imidlertid ikke enighet om ett Froudetall. Samtidig er det varierende informasjon om, og hvordan, størrelsen på luftputene varierer med mengde luft og vannføring. For å studere retur av luft i et bekkeinntak er det nødvendig å se på retur fra tunnel til sjakt og retur av luft i selve sjakta. Der vil blant annet luftinn- blanding være en medvirkende faktor.



## Del II

# Modellforsøk

## 2 Fysisk modellforsøk i laboratoriet

Det ble bygget en fysisk prosessmodell i laboratoriet i forbindelse med denne rapporten. Hensikten var å undersøke retur av luft i et bekkeinntak.

### 2.1 Modellen

Modellen er vist på figur 15, og nøkkeltall er gitt i tabell 4

Modelldata	
Sjakt diameter	220 mm
Tunneltverrsnitt	0,14 m <sup>2</sup>
$Q_{maks}$	76 l/s
Lengde sjakt	3,7 m
Helning sjakt	45 <sup>0</sup>
Lengde tunnel	2 m
Helning tunnel	0,5 %

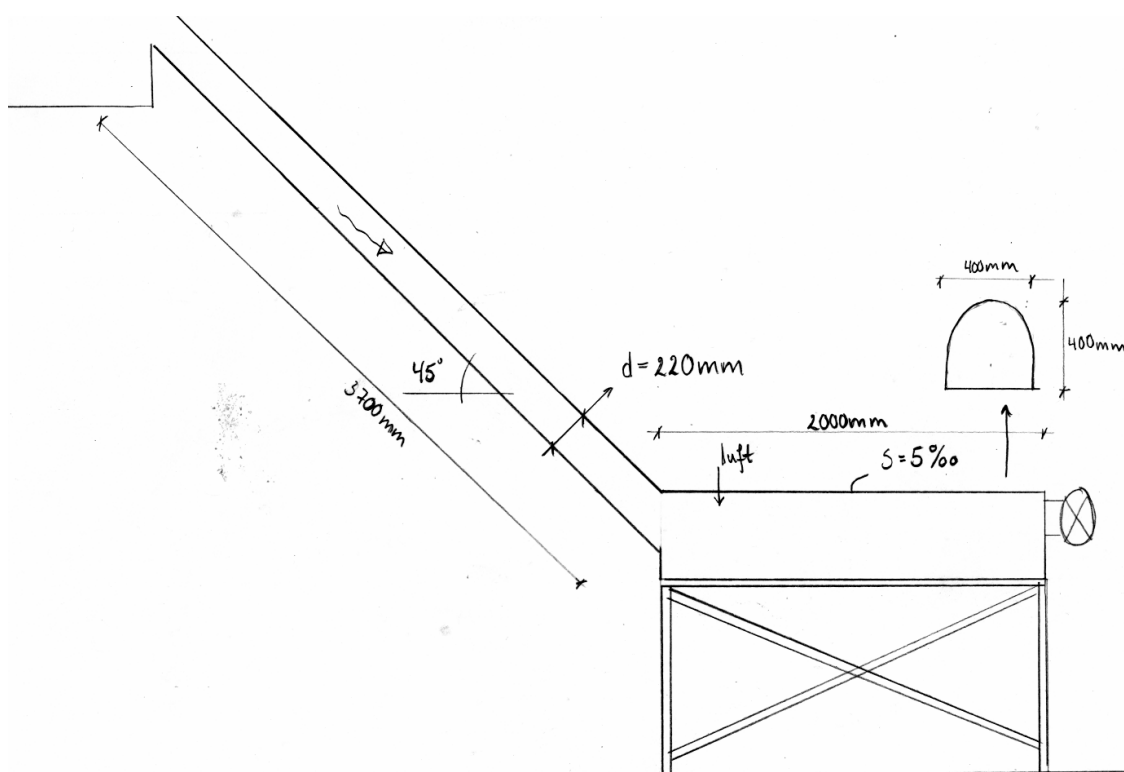
Tabell 4: Modelldata

#### Vannveier

Vannet ble pumpet opp til en inntakskasse. Derfra gikk en 3,7 m lang sjakt med en helning 45<sup>0</sup> ned på en 2 m lang tunnel. Trykket i tunnelen ble styrt av en ventil i enden av tunnelen.

Sjakta hadde sirkulært tverrsnitt og var av plexiglass. Valget av diameter var gjort på bakgrunn av flere forhold:

- I tidligere modellforsøkt ble det brukt en rørdiameter på 150 mm. Det ble anbefalt å teste andre diametre for å avdekke eventuelle faktorer knyttet til dette. I [6]
- I tidligere modellforsøk var diameterforholdet mellom tunnel og sjakt i modellen,  $D/d$  lik 2. Ved å bruke  $d = 220$  mm ble  $D/d$  lik 3,7 i modellen. Overgangen mellom sjakt og tunnel hadde også en litt annen geometrisk utforming. [3]
- For å unngå skaleringsproblemer med viskositeten, bør Reynoldstallet være over  $10^5$ . Med  $d = 220$  mm blir Reynoldstallet større enn  $10^5$  i sjakta for Froudetall større enn 0,4.



Figur 15: Tegning av modellen

Tunnelen var av plexiglass og ble bygd med tverrsnitt som var brukt i tidligere forsøk på Vassdragslaboratoriet.

### Lufttilførsel og -innblanding

Modellen kunne kjøres med frispeilstrømning i sjakta og dykket innløp opp til en vannføring på 76 l/s. På den måten kunne det varieres om det skulle blandes inn luft i sjakta. For vannhastigheter opp mot kritisk gjorde innløpsforholdene i sjakta det slik at det ble revet med noe luft selv ved dykking av innløpet.

I tilfeller med dykket innløp ble det tilført luft i tunnelen via trykkluft tilgjengelig i laboratoriet. Mengden tilført luft ble målt ved hjelp av et rotameter av typen Metric 18A, med et måleområde mellom 10 og 100 l/min ved 1 atm.

## 2.2 Metode

På bakgrunn av litteraturstudiet ble det besluttet å gjennomføre tester i intervallet  $0,6 < Fr < 1,2$ . Det ble gjort målinger av høyden på luftlommen ( $h_t$ ), boblebanene a og b (som vist i figur 5(b) i kapittel 1.2.1), lengden på luftputene ( $l_t$ ), hvor langt luftputene returnerte opp i sjakta ( $L_p$ ) og hvor hyppig de returnerte ( $t_p$ ).

Målingene av a, b og  $h_t$  ble basert på observasjoner over tid, der den maksimale, vertikale høyden på lomma ble målt. For å måle lengden på putene ble det tatt bilde av luftputene i bunnen av sjakta, der det var cm-merker og markeringer for hver



5. cm.  $L_p$  ble basert på observasjoner. Hyppigheten av returnerte luftputer,  $t_p$ , ble målt ved å telle antall returnerte luftputer pr minutt. Dette ble gjentatt minst 3 ganger for hver test.

### 2.2.1 Vurdering av metode

Luftlommen stod aldri i ro, den pulserte opp og ned og frem og tilbake, samtidig som luftputer gikk til sjakta og noe luft ble revet ut av tunnelen nedstrøms. Det var derfor vanskelig å gjøre en eksakt måling. Lengden på a og b varierte også noe. Det ble tatt flere bilder av luftputene ved hver vannføring og luftmengde. Kvaliteten varierte, men flere var gode nok til å anslå putenes lengde. For Froudetall opp mot 0,8 returnerte luftputene så hyppig og fort at de var tidvis vanskelig å telle.

Ettersom hensikten med målingene var å se en trend på hvordan det utviklet seg med vannføringen og luftmengden, er unøyaktigheten i målingene akseptabel.

## 2.3 Forsøk med dykket inntak

Observasjoner under forsøk med dykket inntak er samlet i tabell 5. Strømningsforhold i tunnelen og størrelse på luftputene i sjakta er vist i figur 16(a) til 21(b). Flere av forsøkene ble filmet.

For å kunne sammenligne resultater fra forsøk med de ulike Froudetallene ble det testet med samme luftvolumprosent i forhold vannføring. For  $Fr = 1$  ble det også testet med rotameterets minimale og maksimale kapasitet. Mengden tilført luft var ikke nødvendigvis riktig i forhold til fullskala. I fullskala vil luftinnholdet i sjaktfoten være avhengig av blant annet vannhastigheten før og etter vannstandsspranget og lengden på sjakta. Luftinnholdet vil derfor kunne variere mye.

### 2.3.1 Luftlommen og luftbobler i tunnelen

#### Høyden på luftlommen

Bredden og høyden på luftlommen i tunnelen økte med vannføringen og luftmengden. For Froudetall opp mot 1 og høyere, vokste luftlomma ut i sjakta før luftputer returnerte støtvis til sjakta. For konstant vannføring, men økt tilført luftmengde, steg høyden på luftlomma. Det ble altså ikke funnet en maksimal høyde for hver vannføring, ettersom høyden viste seg å variere med tilført luftmengde.

#### Luftbobler i tunnelen

Det var tydelig at mengden luftbobler økte med vannføringen og tilført luftmengde. Boblelengdene a og b økte også med vannføringen og luftmengden. For Froudetall større enn 0,8 ble luftboblene ført ut av tunnelen før de fikk samlet seg til større lommer og puter i tunnelhengen.

Observasjoner med dykket inntak og lufttilførsel i tunnelen										
Froudetall	0,6		0,8		1,0				1,2	
vol-% luft	1,3	2,0	1,3	2,0	min	1,3	2,0	maks	1,3	2,0
l/s	0,43	0,66	0,59	0,9		0,73	1,12		0,87	1,34
$h_t$ [cm]	1,5	2,5	3	4	3	4,5	5	5,5	6,5	7
a [m]	0,45	0,60	1,00	1,20	1,50	1,50	1,70	1,75	1,80	2,00
b [m]	1,25	1,35	2,00	>2,00	>2,00	>2,00	>2,00	>2,00	>2,00	>2,00
$l_p$ [m]	0,15		0,3	0,35	0,25	0,45	0,5	0,65	0,80	0,85
$t_p$ [ant/min ]	62	56	38	33	18	20	17	14	9	8
$L_p$ [m]			3	3	1,5	1,5	2,5	2,5	1,5	1,5

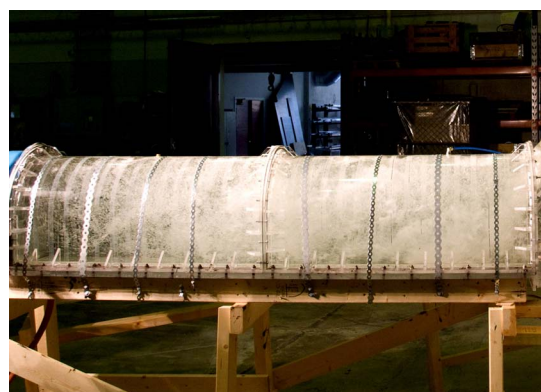
Tabell 5: Forsøk med dykket inntak

(a)  $Fr = 0,6$  og 1,3 vol-% tilført luft(b)  $Fr = 0,8$  og 1,3 vol-% tilført luft

Figur 16: Bildene (a) og (b) viser forsøk med  $Fr = 0,6$  og  $Fr = 0,8$  med 1,3 vol-% tilført luft. Lengdene a og b øker for  $Fr = 0,8$  sammenlignet med  $Fr = 0,6$

### 2.3.2 Retur av luftputer fra tunnel til sjakt

Ved alle vannføringer som ble testet, returnerte det luftputer fra luftlommen i tunnelen til sjakta. Størrelsen på returnerte luftputer var forskjellig, avhengig av tilført luftmengde i tunnelen og vannføring. For en konstant tilført luftmengde og vannføring var størrelsen på luftputene relativt jevn. Ved økt vannføring økte putenes lengde og hyppigheten ble lavere. Det samme skjedde for økt tilført luftmengde og konstant vannføring.

(a)  $Fr = 1,0$  og  $1,3$  vol-% tilført luft(b)  $Fr = 1,2$  og  $1,3$  vol-% tilført luft

Figur 17: Bildene (a) og (b) viser forsøk med  $Fr = 1,0$  og  $Fr = 1,2$  med  $1,3$  vol-% tilført luft. Lengdene a og b øker for  $Fr = 1,2$  sammenlignet med  $Fr = 1,0$ .

(a)  $Fr = 1,0$  og  $0,45$  vol-% tilført luft(b)  $Fr = 1,0$  og  $2,7$  vol-% tilført luft

Figur 18: Bildene (a) og (b) viser forsøk med  $Fr = 1,0$  ved  $0,45$  og  $2,7$  vol-% tilført luft. Det er klar forskjell i lengdene på a og b og mengde luft i tunnelen.

### 2.3.3 Retur av luft fra sjakt til tunnel for $Fr > 1$

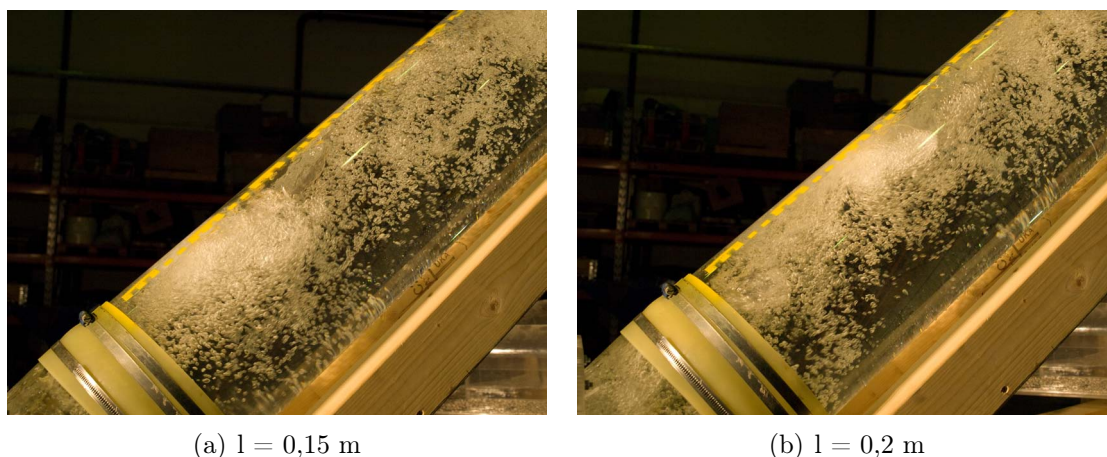
Som beskrevet i kapittel 1.2.3 ble det i [3] ved  $Fr = 0,95$  og skarpkantet overgang stående en luftlomme i sjaktfoten, uten at det returnerte luftputer til sjakta. Dette ble forsøkt gjenskapt i modellen, men var ikke vellykket. For  $Fr = 1,35$ , som tilsvarte modellens maksimale vannføring, gikk det likevel luftputer fra tunnelen og ut i sjakta. Dette er vist i figur 22(a) til 22(d).

### 2.3.4 Retur av luftputer i sjakt

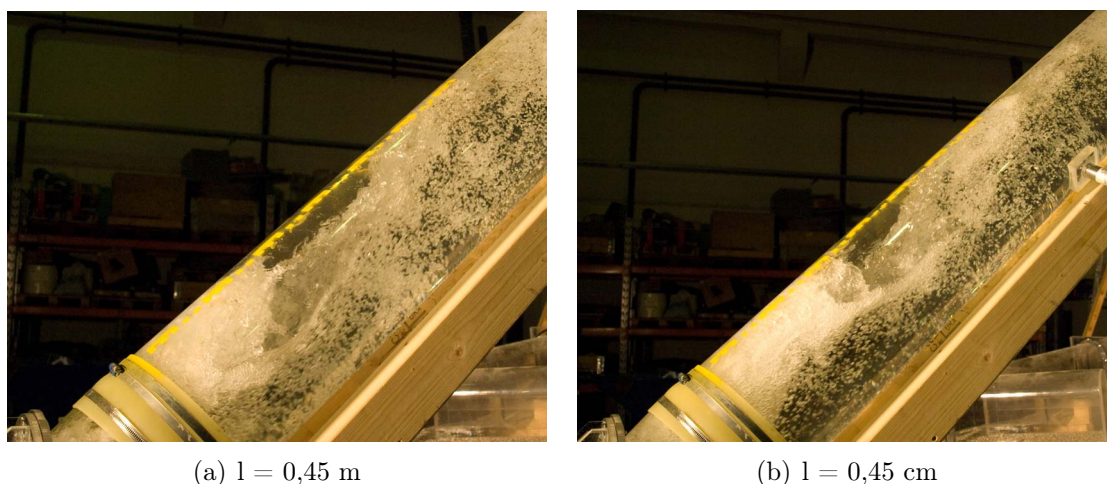
Luftputer som slapp ut i sjakta ble utsatt for erosjon i form av luftbobler i nedstrøms ende, se figur 23(a) og 23(b). Boblene som ble revet av luftputen ble dratt medstrøms mot tunnelen. På vei nedover slo noen av boblene seg sammen med andre luftputer.

Returlengden  $L_p$





Figur 19: Bildene (a) og (b) viser forsøk med  $Fr = 0,6$  og  $1,3$  vol-% tilført luft. Størrelsen på luftputene varierte mellom  $0,15$  og  $0,2$  m.



Figur 20: Bildene (a) og (b) viser forsøk med  $Fr = 1,0$  og  $1,3$  vol-% tilført luft. Lengden på luftputene var ca  $0,45$  m.

Erosjonen av luftbobler i sjakta førte til at luftputene fikk lavere oppdrift, og i noen tilfeller stoppet luftputene opp. For å returnere videre var det nødvendig at luftputene slo seg sammen med andre puter, eventuelt fikk tilskudd av luft fra luftbobler. De stedene der det var mye luftbobler i sjakta økte returhastigheten på luftputen.

Følgende observasjoner ble gjort:

- Ved  $Fr < 0,6$  returnerte alle luftputer til kassen
- For  $Fr > 0,6$  stoppet luftputene opp øverst i sjakta. For å returnere helt opp i kassen måtte flere luftputer slå seg sammen. Hvis lufttilførselen ble kuttet, ble putene drevet nedover mens det eroderte luftbobler i nedstrøms ende. Når luftputen ble liten nok ble den dratt ned i tunnelen igjen.
- For  $Fr > 0,7$  stanset luftputene øverst i sjakta. Der ble de stående, mens

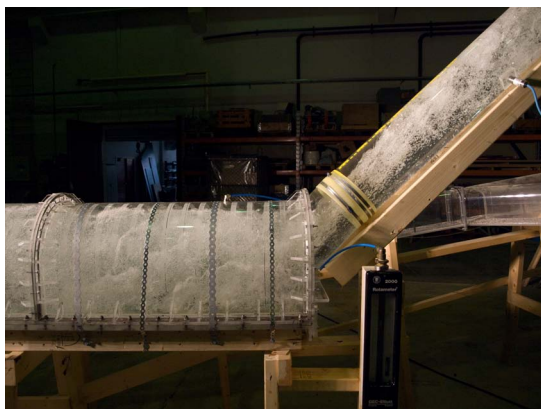


(a)  $l = 0,25 \text{ m}$

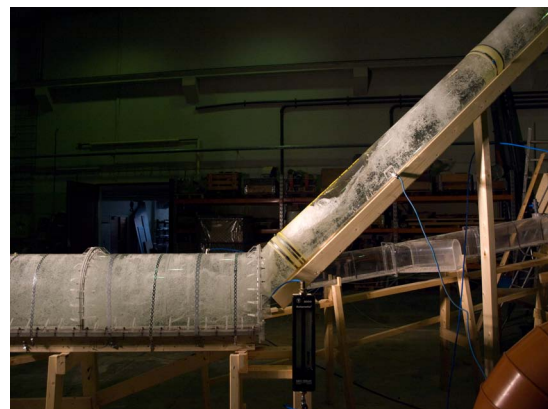


(b)  $l = 0,65 \text{ m}$

Figur 21: Bildene (a) og (b) viser forsøk med  $Fr = 1,0$  og  $0,45$  og  $2,7 \text{ vol-\%}$  tilført luft. Det er tydelig forskjell i størrelsen på den returnerte luftputen



(a)  $Fr = 1,2$



(b)  $Fr = 1,2$



(c)  $Fr = 1,2$



(d)  $Fr = 1,2$

Figur 22: Bildene viser retur av luftputer fra tunnel til sjakta for  $Fr = 1,2$

det eroderte mye luftbobler nedover. For økt Froudetall returnerte luftputene stadig kortere opp i sjakta.



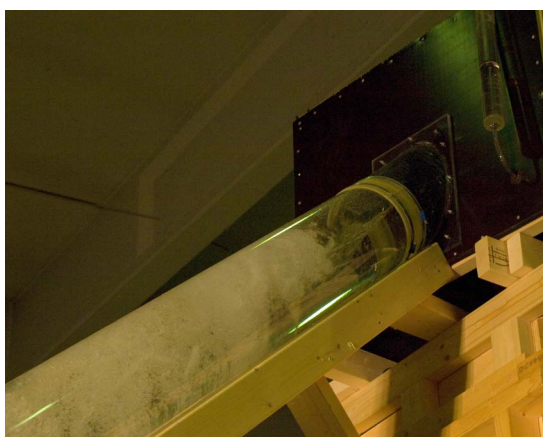


(a) Erosjon nedstrøms luftputa



(b) Erosjon nedstrøms luftputa

Figur 23: Bildene (a) og (b) viser hvordan luftbobler eroderte fra luftputene i sjakta



(a) Ingen retur til kasse for  $Fr = 0,8$



(b) Ingen retur til kasse for  $Fr = 1,2$

Figur 24: Bildene (a) og (b) viser hvordan luftputene ikke returnerte til kassen for  $Fr > 0,7$ . På bilde (b) går luftputene opp til midten av sjakta

På grunn av erosjonen av luftbobler, var luftputene som gikk opp i sjakta mye større enn luftputene som ble dratt ned i tunnelen igjen. Den nødvendige størrelsen for å bryte gjennom til sjakta var altså mye større enn den vannet kunne transportere ned i tunnelen.

## 2.4 Observasjoner med frispeilstrømning i sjakt

Frispeilstrømning i sjakta ga en langt mer uryddig situasjon enn med dykket inntak. Forsøkene ble filmet og fotografert, og observasjoner er samlet i tabell 6. Forsøkene i tabellen ble gjort med fylt tverrsnitt fra omtrent midten av sjakta. Vannspeilet i sjakta pendlet avhengig av luftvolumet i tunnelen. Pendlingen økte med vannføringen, ettersom luftinnblandingen da økte.

Observasjoner med frispeilsstrømning i sjakt				
Froudetall	0,6	0,8	1,0	1,2
a	100	170	200	>200
b	180	>200	>200	>200
$t_p$	30	12	5	3
$l_p$ [m]	0,15 - 0,25	0,25 - 1	1 - 1,7	> 1
$h_t$ [cm]	2,5	6	9	10

Tabell 6: Forsøk med frispeilsstrømning i sjakt

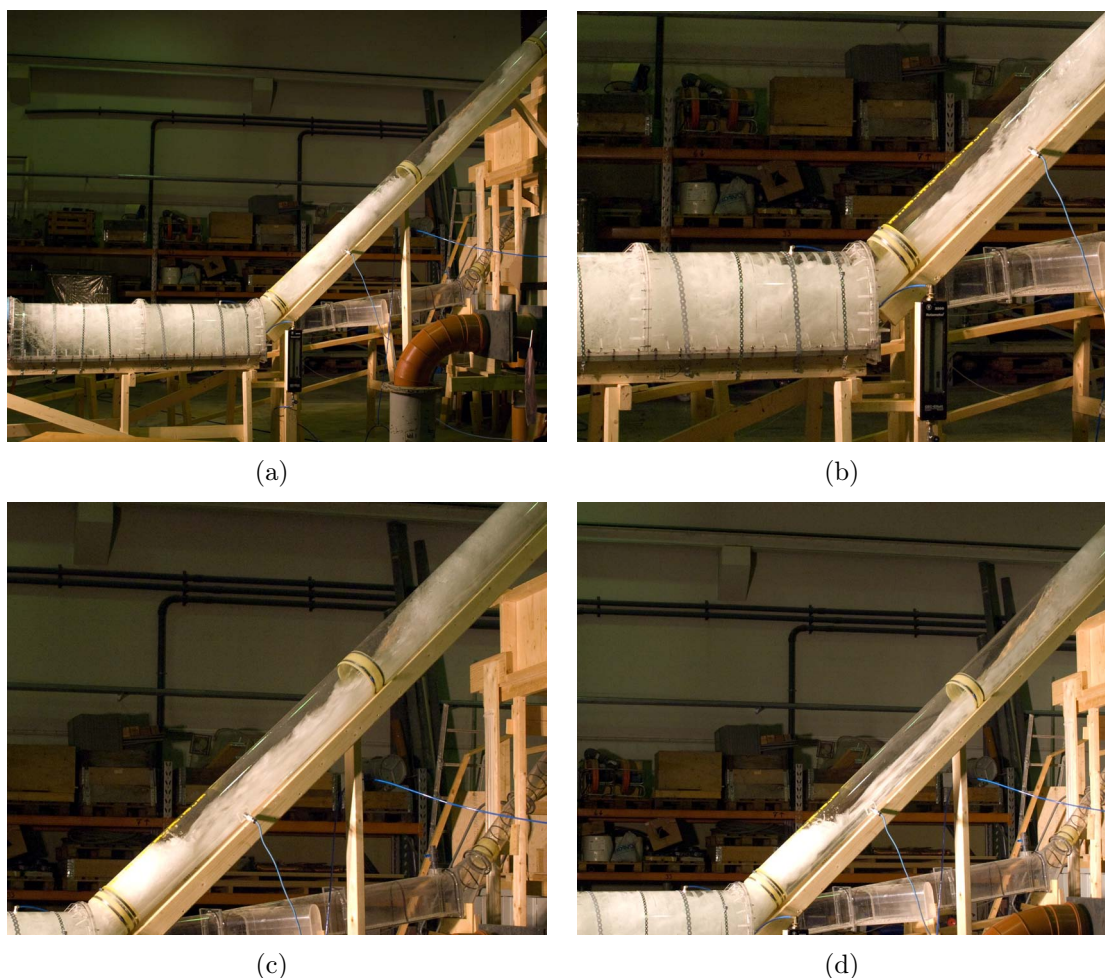
I forsøkene med frispeilsstrømning var det generelt mer luft i vannveiene. Lengdene a og b, høyden på luftlommen, hyppigheten og lengden på luftputene viste samme trender som forsøkene med dykket inntak. I disse forsøkene returnerte det også luft ved  $Fr > 1$  i sjakta. En slik situasjon er vist i figur 25(a) til 25(a).

#### 2.4.1 Trykklinjens innvirkning på strømningssituasjonen

Trykket hadde påvirkning på luftmengden, strømningssituasjonen i tunnelen og returen av luft i sjakta:

- Lav trykklinje i sjakta ga høy vannhastighet i frispeilssonen og mye innblanding av luft. Luftputene som returnerte fra tunnel til sjakt økte i størrelse og hyppigheten gikk ned.
- Ved høyere trykklinje i sjakta økte hyppigheten av returnerte puter. Samtidig ble størrelsen på putene mindre.
- Lav trykklinje i sjakta gjorde at lufta ble dratt lenger inn i tunnelen. Dette var synlig blant annet ved at lengdene a og b økte. I forsøket med  $Fr = 0,8$  varierte a med opptil 70 cm avhengig av vannstanden i sjakta.
- Vannstandsspranget i sjakta steg som følge av at luftmengden i tunnelen og sjakta økte.

Ved  $Fr = 0,6$  returnerte det hyppig og jevnt små luftputer til sjakta. Størrelsen varierte, men returen av luft var jevn. Vannstandsspranget i sjakta var relativt stabilt på grunn av jevn retur av luft. Ved  $Fr = 0,8$  og opp til 1,2 var det en langt mer kaotisk prosess. Luftputene som returnerte varierte mer i størrelse og tidsintervall. Dette førte til at vannstandsspranget i sjakta pendlet og var ustabil (mellom 1,5 og 3 m). Luftputene som returnerte til sjakta var av varierende lengde, mye avhengig av lengden på fylt sjakttverrsnitt. Trenden var likevel at gjennombruddsstørrelsen på luftputene som returnerte til sjakta økte med vannføringen og luftmengden. For



Figur 25: Bildene (a), (b), (c) og (d) viser retur av luft til sjakta for  $Fr = 1,2$  og friskeilsstrømning i sjakta.

$Fr \geq 0,8$  kunne luftputene bli stående i sjakta og erodere eller vokse. Små puter kunne gå i oppløsning, mens andre fikk nok tilførsel av luft og returnerte helt opp. situasjonen med  $Fr = 0,8$  og friskeilsstrømning er vist i figur 26(a) og 26(b).

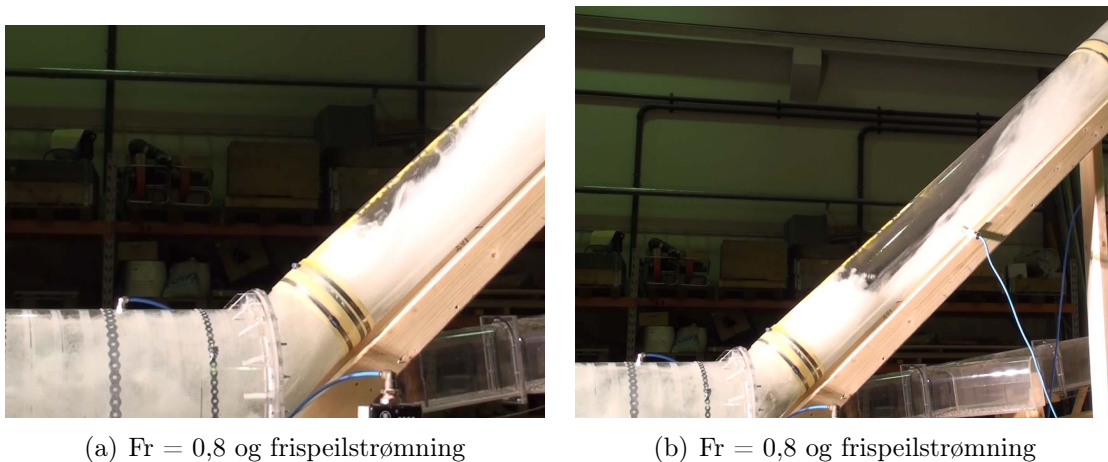
## 2.5 Luftutblåsing

I modellen ble det ikke gjenspekt store utblåsing. Under forsøk med dykket innløp var luftputene for små og trykket var sannsynligvis for lite til at ekspansjonen var stor nok. Som nevnt i kapittel 2.3.4 stoppet luftputene i sjakta ved disse forsøkene ved  $Fr > 0,7$ . I forsøk med friskeilsstrømning i sjakta ble luftlommene større, men trykket var likevel for lite til å få den nødvendige ekspansjonen.

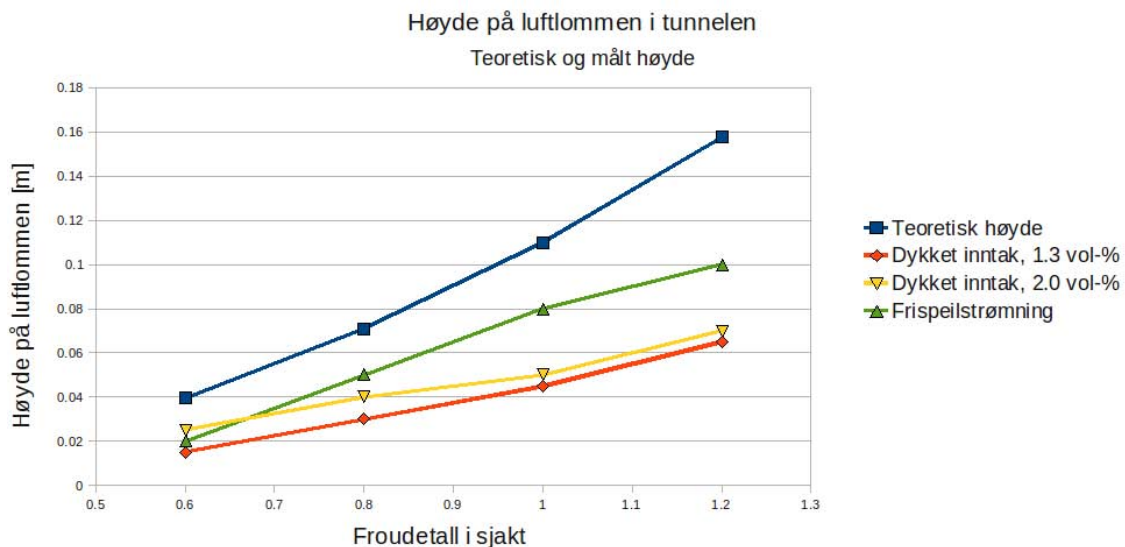
## 2.6 Resultater

De viktigste resultatene fra forsøkene er grafisk i figur 27, 28 og 29.





Figur 26: Bildene (a) og (b) viser varierende størrelse på luftputer i sjakta ved samme Froudetall.



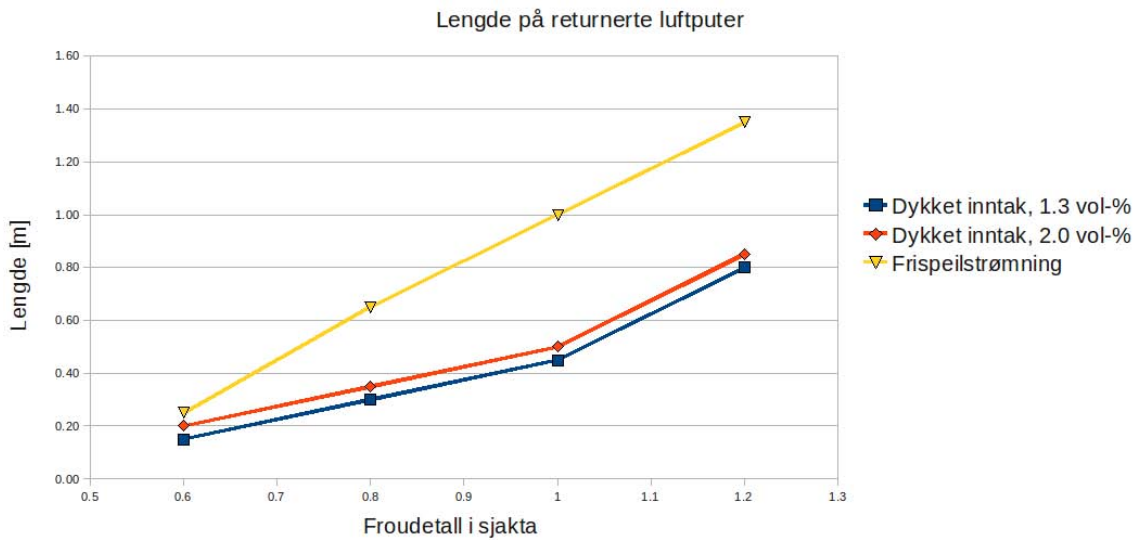
Figur 27: Sammenlikning mellom målt og teoretiske høyde på luftlommen i tunnelen

## 2.7 Skalering

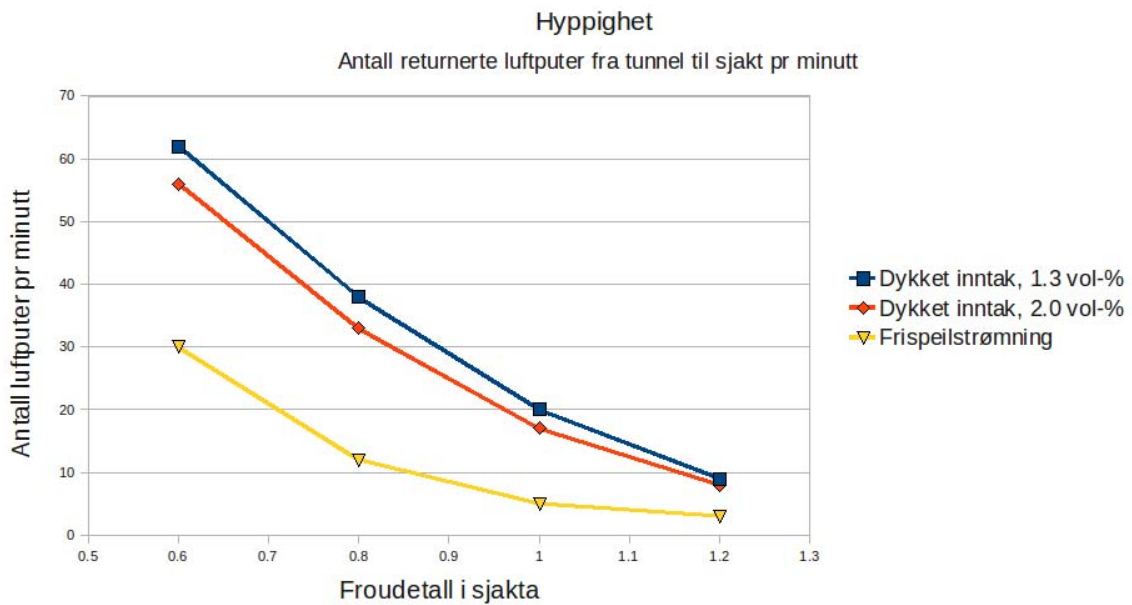
### 2.7.1 Forhold mellom luft og vann

Forholdet mellom luft og vann,  $\beta$ , vil være mindre i en modell enn i fullskala. Det vil si relativt mindre luft i en modell. Det er flere grunner til dette [10] :

- Laverer skjærhastigheter i vannstandsspranget fører til at færre og større bobler blir innblandet i modellen sammenlignet med fullskala
- Boblenes stigehastighet vil være lik i modell og fullskala. I en modell skalert etter Froudes lov vil vannhastigheten være lavere. Dette fører til at færre bobler når tverrstollen/tunnelen i en modell enn i fullskala, og  $\beta_m$  blir mindre enn  $\beta_p$ .



Figur 28: Målt lengde på luftputene



Figur 29: Hyppighet av returnerte luftputer fra tunnel til sjakt.

### 2.7.2 Luftlomme i tunnel

For at luftansamlingen i tunnelen skal modelleres riktig, er det to kriterier som må oppfylles:  $Fr_m = Fr_p$ , og  $\beta_m = \beta_p$ . Som følge av større luftbobler i modellen (med større stigehastighet) er det færre bobler som når tunnelen i modellen. Disse to kriteriene er derfor vanskelige å oppnå samtidig, og kan håndteres på ulike måter [10]:

- Bygge en stor modell der  $\beta_m \rightarrow \beta_p$ .
- Tilføre for eksempel oppvaskmiddel for å minske overflatespenninger og dermed øke dannelsen av små bobler

For forsøk på retur av luft er det viktigst at formen på luftlommen er modellert riktig, det vil si når  $Fr_m = Fr_p$ . Det er imidlertid viktig å være klar over at  $\beta$  ikke er det samme i modell og fullskala.

Ved bruk av Froudes modellov blir ikke dannelsen av luftlommen riktig, ettersom det krever rett modellering av luftinnblandingen og strømningsforholdene i sjaktfoten. Formen på lomma blir derimot riktig.

Bobler som når tunnelen vil bli dratt lenger med vannstrømmen i fullskala enn i modell på grunn av høyere vannhastighet. Dette fører til at luftboblene i fullskala blir dratt lenger med vannstrømmen før de når taket enn i modellen. Det kan derfor ta lengre tid å bygge opp en luftlomme i en fullskala enn i en modell, og tidsaspektet blir ikke riktig skalert. Hvis en tar høyde for at det vil være en trykkforskjell, vil boblene i fullskala bli mindre enn i modellen. Dette vil da være med på å øke forskjellen [3] [10]. Ved 100 mVS er oppdriften redusert med 1,3 %, i denne sammenheng regnes dette for å være ubetydelig. [3]

### 2.7.3 Viskositet

Ved bruk av Froudes modellov er det ikke tatt hensyn til modellering av viskositeten. Ettersom viskositeten i en modell og fullskala er den samme, vil det si at den relativt sett er for stor i modellen, ettersom Reynoldstallet blir lavere der på grunn av lavere vannhastighet. For diametre over 200 mm kan de viskøse kreftene neglisjeres [10, 6]. Eventuelt kan de neglisjeres for  $R > 10^5$  [3, 9].

### 2.7.4 Retur av luft i sjakta

Retur av luft fra tunnel til sjakt kan skaleres direkte etter Froudes modellov, altså ved at  $Fr_m = Fr_p$ . [3, 5, 10]

### 2.7.5 Rørstørrelse

I [9] ble det gjort en sammenlikning mellom modellforsøket og ulike prototyper. Sammenlikningen viste at store rør fjerner eller transporterer luften mye fortere enn

mindre rør ved samme Froudetall. En mulig forklaring som nevnes kan være at luftboblene i modell og prototype er av omtrent samme størrelse, mens vannhastigheten er mindre i en modell ved samme Froudetall. Dette ble ansett for å kunne være en betydelig skaleringsseffekt. [9]

### 2.7.6 Skalering av resultater i modellforsøket

Modellen ble kjørt etter Froudes modellov, og returen av luft var derfor riktig skalert. I forsøkene med frispeilstrømming i sjakta var ikke innblandingen av luft riktig modellert. Resultatet var mindre luft i tunnelen enn det ville vært i fullskala. Dette må tas hensyn til i tolkingen av resultatene, ettersom mengde luft viste seg å ha innvirkning på hyppighet og størrelse på luftputene.

Diameteren i modellen var større enn 200 mm og Reynoldstallet var større enn  $10^5$  under alle forsøkene. Skalaeffekter knyttet til viskositet skal derfor være unngått.

## 2.8 Diskusjon av resultater

### Luftlommen i tunnelen

Forsøkene viste at høyden på luftlommen økte med vannføringen og luftmengden. At luftlommen var lavere enn en hastighetshøyde kan være en skalaeffekt. Ettersom modellen ble kjørt etter Froudes modellov ble ikke luftinnblandingen riktig modellert, og mindre luft nådde tunnelen enn det ville gjort i en prototype.

### Retur av luftputer fra tunnel til sjakt

Ved økt vannføring og lik vol-% tilført luft, gikk hyppigheten ned og størrelsen på luftputene økte. Nedgangen i hyppigheten kan ha sammenheng med at mer luft ble transportert ut av røret ved høyere vannføringer. Det tok dermed lengre tid å samle et stort nok luftvolum til å returnere. Nødvendig størrelsen for å returnere økte sannsynligvis på grunn av at dragkraften fra vannet økte med vannføringen.

Ved konstant vannføring og økt mengde tilført luft, gikk også hyppigheten ned samtidig som størrelsen på luftputene gikk opp. I det tilfellet var dragkraften fra vannet konstant, samtidig som oppdriften økte. Forklaringen kan være at mer tilført luft i tunnelen ga økt vannhastighet foran luftlomma, som igjen hindret luften i å returnere. Derfor var det nødvendig med et større luftvolum for å returnere da luftmengden økte. Resultatet var da at hyppigheten gikk ned fordi det tok lenger tid å samle det nødvendige volumet.

I forsøkene med frispeilstrømning returnerte luftputene sjeldnere enn i forsøk med dykket inntak, og størrelsen på putene var generelt større. Ettersom det var mer luft i systemet ved frispeilstrømning i sjakta enn ved dykket inntak, viste dette samme trend som forsøkene med dykket inntak.

Trykklinjens innvirkning på returen av luft var tydelig i forsøkene med frispeilstrømning, ettersom størrelsen minket og hyppigheten økte med stigende trykklinje. Ved lav trykklinje vil hastigheten i sjakthengen være mindre enn ved høyere trykklinje, og en skulle dermed tro at luftputer lettere kunne returnere ved lav trykklinje. Re-

sultatet fra dette forsøket viste altså det motsatte. Luftmengden kan derfor være en medvirkende faktor. Lav trykklinje gir mer innblandet luft, og i de andre forsøkene ga det større og færre returnerte luftputer.

I modellen endret returen av luft seg i overgangen mellom  $Fr = 0,6$  og  $0,8$ . Da ble erosjonen av luft fra putene så kraftig at det måtte tilføres luft for at putene skulle kunne returnere videre. En slik overgang kan være en annen i fullskala ettersom det er mer luft i forhold til vann der.

### **Retur av luft fra tunnel til sjakt for $Fr \geq 1$**

I modellen returnerte det luftputer fra tunnelen til sjakta også da det var overkritisk hastighet i sjakta. Dette er andre resultater enn kriteriene som ble funnet i litteraturstudiet i del I. Ettersom modellforsøket har flest likheter med forsøket i [3] sammenlignes resultatene mest med det.

Det er flere faktorer som kan være årsak til ulike resultater:

- På grunn av ulik sjaktdiameter var det ulike vannhastigheter ved  $Fr = 1$  i sjakta. I [3] var vannhastigheten  $1,75$  m/s mot  $1,5$  m/s i dette forsøket. Det ble imidlertid testet for vannhastighet lik  $1,75$  som tilsvarte  $Q = 67$  l/s. Da returnerte det likevel luft fra tunnelen til sjakta. Det var med andre ord ikke for lav vannhastighet som var grunnen til ulike resultater.
- Ruheten i tunnelen var ikke riktig modellert i forhold til en råsprengt tunnel i fullskala. Sammenlignet med tidligere modellforsøk skal det ikke ha stor betydning, ettersom de også var laget av plexiglass.
- Avløpet og til dels tunnelen i dette forsøket var ikke optimalt. På grunn av kort tunnel og lite avløp, ble luft som samlet seg i tunneltaket i den bakerste seksjonen sugd ut gjennom avløpet. I forhold til [3] var det vesentlig mindre luft som ble samlet i tunnelen. Sett i sammenheng med at hyppigheten sank for økt luftmengde i forsøkene, kan luftmengden i tunnelen være en årsak til de ulike resultatene. Samtidig skulle mindre luft i tunnelen gjøre det vanskeligere å bygge opp den nødvendige størrelsen på luftlommen for at puter kunne returnerer.
- I modellen var det en annen geometri i overgangen mellom sjakt og tunnel enn i [3]. Det var også et annet forhold mellom diametrene i sjakta og tunnelen i dette forsøket. I [3] ble det funnet at lufta returnerte ved høyere vannhastigheter for avrundet hjørne. At det var skarpkantet hjørne i dette forsøket skulle derfor bare være en fordel med tanke på å hindre lufta i å returnere.

Den største forskjellen mellom dette modellforsøket og [3] er luftmengden. Gjennom de forsøkene som er gjort i dette modellforsøket har den vist seg å ha innvirkning på størrelse og hyppighet. Hvis det hadde vært mulig å samle mer luft i tunnelen hadde resultatene i [3] kanskje vært mulig å gjenskape.

### **Store utblåsing**

Ettersom det ikke ble gjenspekt store utblåsing i modellen er det vanskelig å si noe nøyaktig om hva som egentlig skjer. Ut fra trendene for hvordan hyppigheten og størrelsen på returen av luft fra tunnelen utviklet seg med vannføringen og luftmeng-

den, vil returen av luft opphøre for  $Fr > 1$  for en utforming tilsvarende modellen. Hvis det er slik at store utblåsing oppstår etter at returen av luft fra tunnelen opphører, betyr det også at store utblåsing oppstår når  $Fr > 1$  i sjakta.

## 2.9 Konklusjon modellforsøk

Modellforsøket viste at retur av luft til sjakt ikke nødvendigvis stopper opp når Froudetallet i sjakta er over 1. Det viste også at retur av luftputer i sjakta er avhengig av tilførsel av luft. Ved  $Fr > 0,8$  var erosjonen fra luftputa i sjakta så stor at det var nødvendig med tilførsel for å returnere helt opp.

I forsøket ble det funnet følgende sammenheng mellom luftputenes størrelse, hyppighet, luftmengde og vannføring:

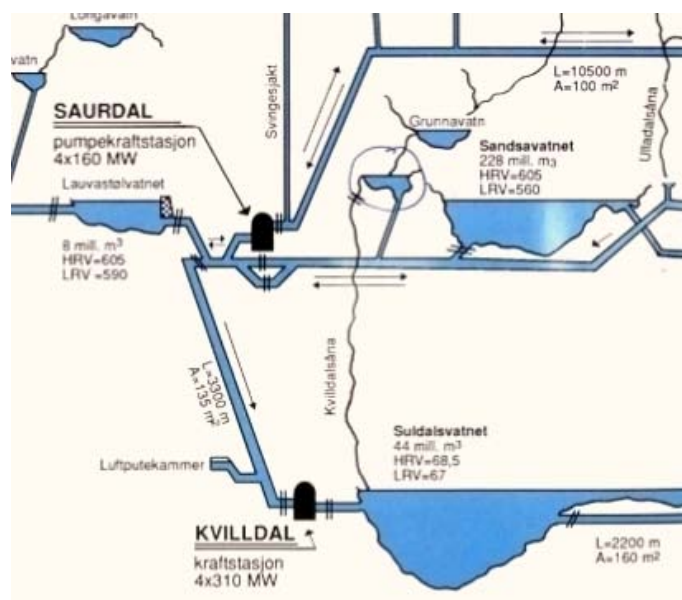
- Hyppigheten av returnerte luftputer gikk ned ved økt vannføring og luftmengde.
- Størrelsen på luftputene som returnerte gikk opp ved økt vannføring og luftmengde.

## Del III

## Holmaliåna

## 3 Bekkeinntak med store utblåsingar

Bekkeinntak Holmaliåna ligger på Ulla Førre-anlegget i Rogaland og eies av Statkraft. Bekkeinntaket føres inn på tunnelen til Lauvastølsvatnet, Saurdal pumpekraftverk og Kvilldal kraftverk. Ulla Førre har et sammensatt vannveisystem med mange bekkeinntak og lange tunneler. En oversikt over deler av anlegget er vist i figur 30, der inntaket er markert med en ring. En større oversikt over anlegget er vist i vedlegg B.



Figur 30: Oversikt over Ulla Førre anlegget til Statkraft, [11]

Holmaliåna er et type 1 inntak med borret sjakt som føres inn på en tverrstoll før tilløpstunnelen. Tverrstollen har et tverrsnittsareal på  $50 \text{ m}^2$ , er 30 m lang og heller 1:8 ned på tunnelen. Tegninger av inntaket ligger i vedlegg B. Det er registrert luftutblåsingar på inntaket helt siden det ble satt i drift rundt 1985, der flere av utblåsingene er av voldsom karakter. Betongkonstruksjoner på inntaket er ødelagt og lengden på vann og luftstrålen som skytes ut er være 200 m eller mer.

### 3.1 Tidligere beregninger for utblåsingar på Holmaliåna

I følge beregningsmetoden i [1] trekker Holmaliåna luft for vannføringer over  $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Inntakets kapasitet er oppgitt på tegning til  $35 \text{ m}^3/\text{s}$ , og middelvannføringen er  $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Årlig middelflom er beregnet til  $26,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . [12]. Det er undersøkt om





Figur 31: Toppen av sjakta på Holmaliåna, bildet er tatt i okt. 2008



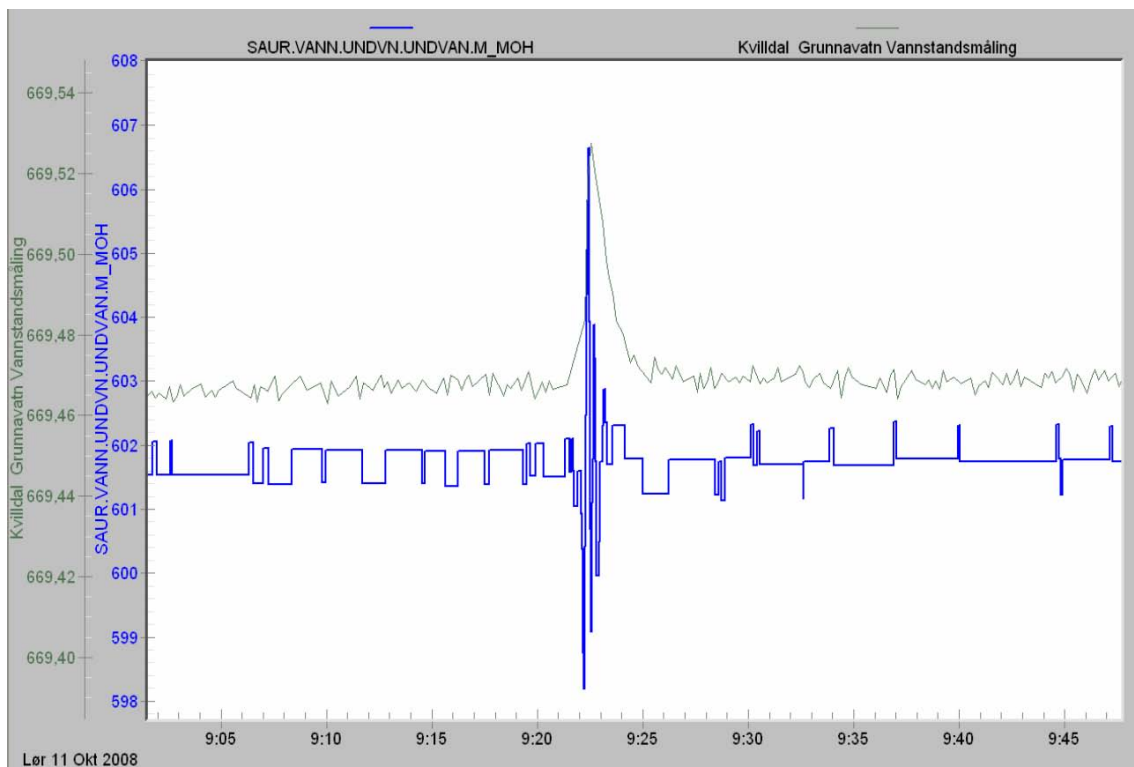
Figur 32: Bilde fra utblåsing på Holmaliåna, [2]



luft kan komme oppstrøms eller nedstrøms fra gjennom andre inntak i tunnelsystemet, men dette er etter beregningsmetoden ikke mulig. All luft som blåser ut av inntaket kommer derfor inn samme vei. Tidligere beregninger viser også at inntaket får store utblåsingener når vannføringen går over  $15,7 \text{ m}^3/\text{s}$ , ettersom det tilsvarer kritisk vannføring i sjakta. [13]

## 3.2 Datainnsamling

I løpet av driftsperioden til inntaket har Statkraft samlet inn data i forbindelse med utblåsingene. Datagrunnlaget består av vannstandsmålinger, nedbørsmålinger og trykkmålinger. Samtidig er noen utblåsingener filmet. Ut fra vannstandsmålinger i inntakskulpen til Holmaliåna, Grunnvatn, og trykkmålinger i undervannet på Saurdal kraftstasjon er utblåsingene synlige som økning i vannstand og trykksvingninger. Et eksempel er vist i figur 33. Utblåsingener på figuren er filmet, og har da en varighet på omtrent 25 sekunder. Dette er en stor utblåsing med potensiale for å gjøre skade.



Figur 33: Eksempel på utblåsing 11 oktober 2008, [11]

## 3.3 Utblåsingener

I denne rapporten er det analysert 4 perioder med utblåsingener på Holmaliåna mellom april 2007 og oktober 2008. I tabell 7 er det samlet nøkkeldata for utblåsingener. Nødvendige beregninger i forbindelse med analysene som er gjort finnes i vedlegg C, og hele datagrunnlaget ligger i vedlegg D, H, F og G.

Utblåsingene på Holmaliåna				
Periode	Oktober 2008	April 2007	25.mai 2007	30.mai 2007
Antall timer	5	18	11	6
Antall utblåsingene	6	15	6	3
Fr, Q og v og y i fylt sjakttverrsnitt:				
$Fr_{min/maks}$	0,61/0,67	0,57/0,65	0,58/0,65	0,50/0,80
$Fr_{start}$	0,61	0,56	0,65	0,56
$Q_{min/maks}$ [m <sup>3</sup> /s]	9,3/10,5	8,8/9,9	9,0/9,9	7,8/12,4
$v_{min/maks}$ [m/s]	2,7/3,0	2,5/2,8	2,6/2,8	2,2/3,6
$v_{start}$ [m/s]	2,7	2,5	2,8	2,5
$y$ [m]	0,07	0,08	0,06	0,06

Tabell 7: Data fra fire perioder med utblåsingene på Holmaliåna

### 3.3.1 Utblåsingene 11.oktober 2008

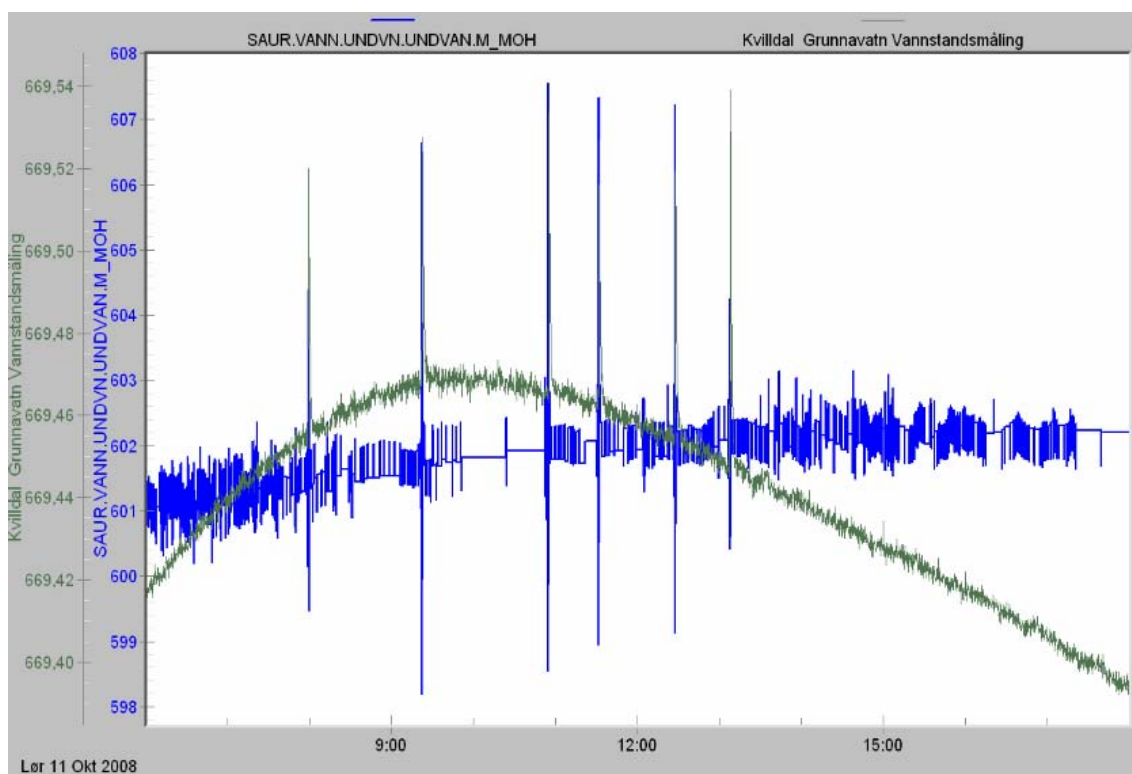
I perioden mellom kl 08:00 og 13:00 den 11. oktober 2008, var det 6 utblåsingene på Holmaliåna, se figur 34.

Tidsintervallet mellom utblåsingene var ganske likt i hele perioden, men hyppigheten økte mot slutten da vannstanden i Grunnvatnet gikk ned. Saurdal og Kvilldal kraftstasjon hadde ikke produsert på flere dager før utblåsingene denne dagen, og stod også stille i utblåsingeperioden. Vannet som ble tatt inn i Holmaliåna gikk derfor til Sandsavatn. En slik situasjon fører til at all luft som går ut i tilløpstunnelen på Holmaliåna går mot Sandsavatn, ettersom tunnelen stiger på denne strekningen [6].

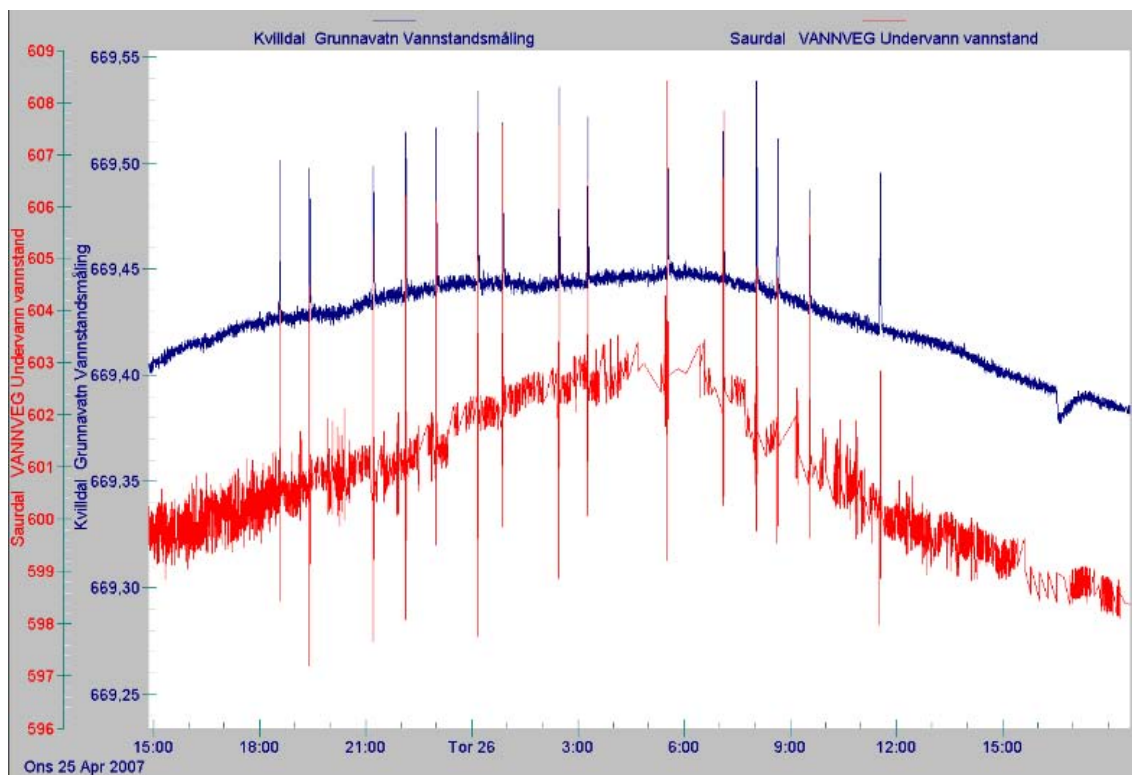
### 3.3.2 Utblåsingene 25. og 26. april 2007

I perioden mellom onsdag 25. april kl 18:00 og torsdag 26 april 2007 kl 12:00 var det 15 registrerte utblåsingene på Holmaliåna, se figur 35.

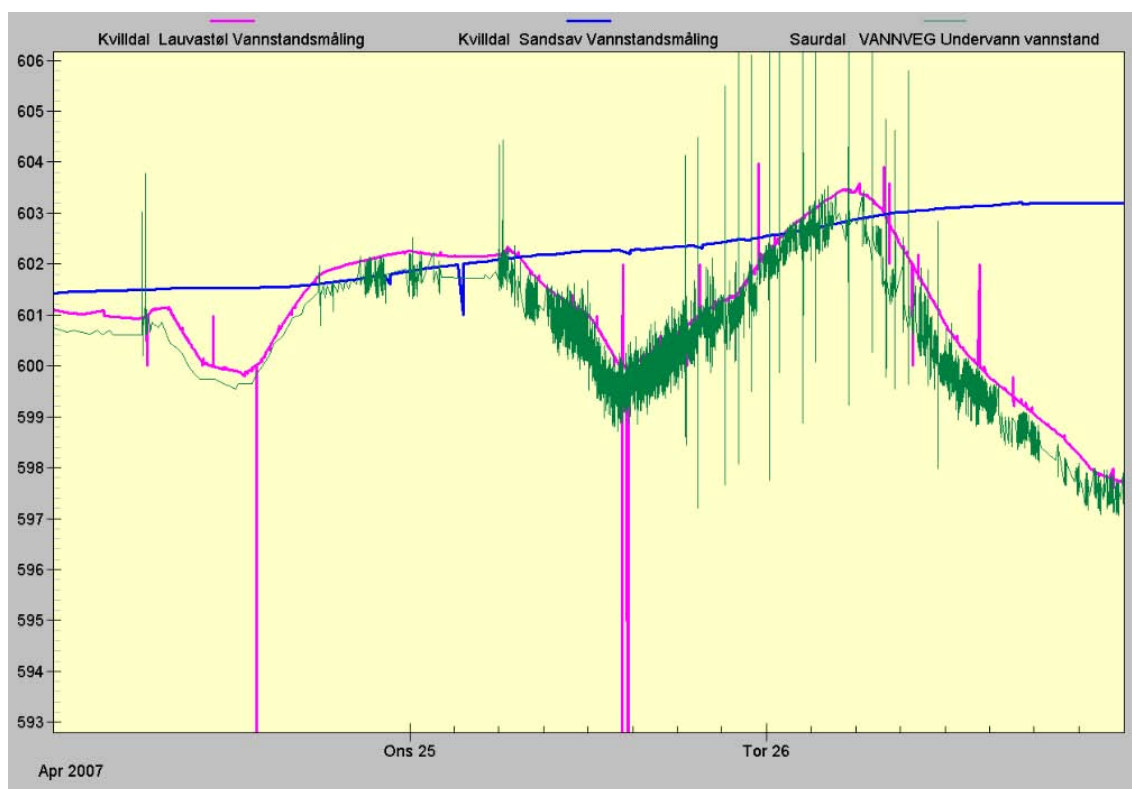
I hele denne perioden var det pumpevirksomhet i Saurdal kraftstasjon. I Kvilldal var det produksjonsstans mellom kl 21:00 og 06:00. Under utblåsingeperioden steg vannstanden i Sandsavatn fra kt 602 til kt 603, mens den i Lauvastøl varierte mer. En oversikt over vannstandsvariasjonen i Sandsavatn og Lauvastøl er gitt i figur 36. Det er usikkert hvilken vei vannet gikk i tilløpstunnelen i denne perioden, fordi forholdet mellom tappingen og tilsiget ikke er kjent.



Figur 34: Utblåsing på Holmaliåna i oktober 2008, [11]



Figur 35: Utblåsing på Holmaliåna i april 2008, [11]



Figur 36: Endring i vannstand i Lauvastøl 25.- 26 april 2007, [11]

### 3.3.3 Utblåsing 25. mai 2007

I perioden mellom kl 05:00 og kl 16:00 25. mai 2007 ble det registrert 6 utblåsing, se figur 37.

Utblåsingene var mye hyppigere mot slutten av perioden da vannstanden i Grunnvatn sank. På figur 38 kan en se at trykket synker jevnt i undervannet på Saurdal kraftstasjon før utblåsingene. Dette mønsteret er noe ulikt andre utblåsing, der en kan se trykksenkingen samtidig som utblåsing.

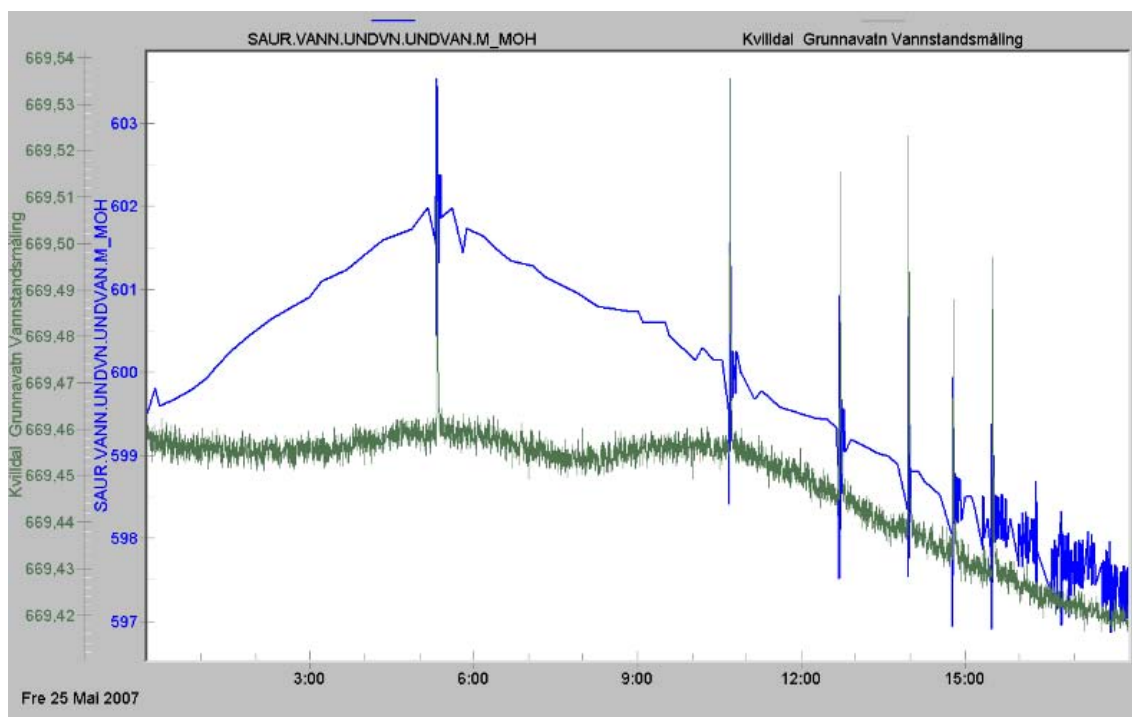
### 3.3.4 Utblåsing 30. mai 2007

Utblåsingene 30. mai 2007 kan ses i figur 39. Dette er en typisk flomsituasjon der vannstanden i Grunnvatn stiger og synker 0,23 m på knapt to døgn.

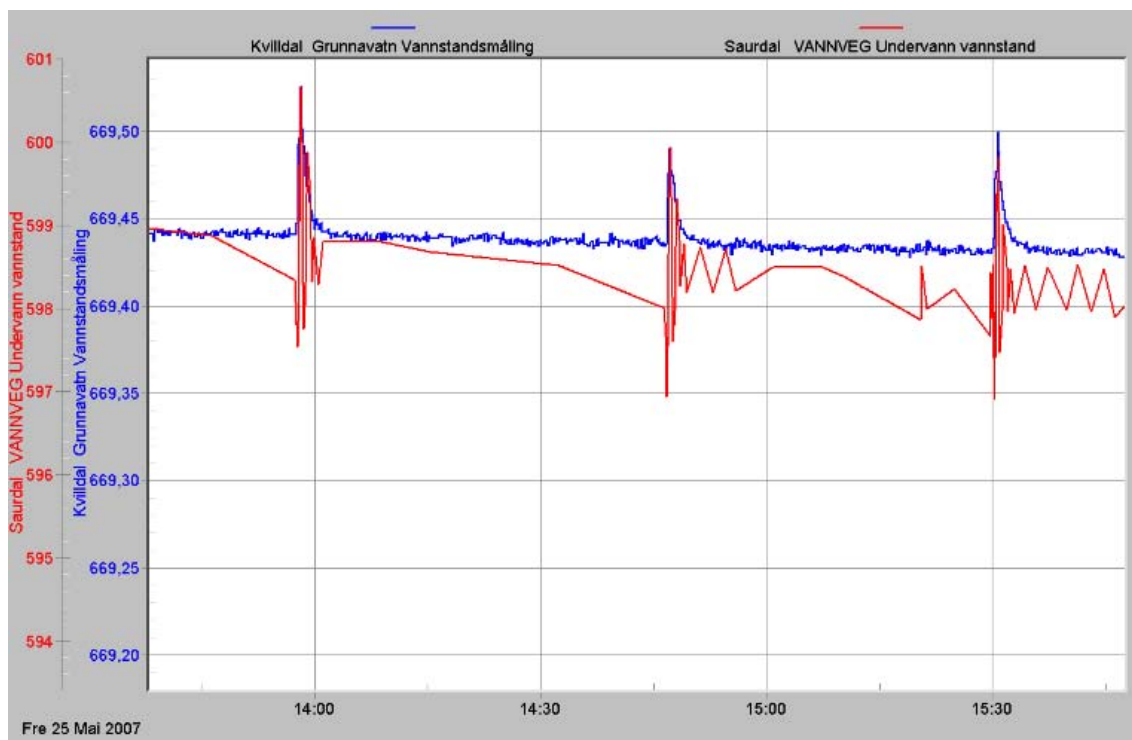
## 3.4 Diskusjon

### Sammenlikning med tidligere beregninger

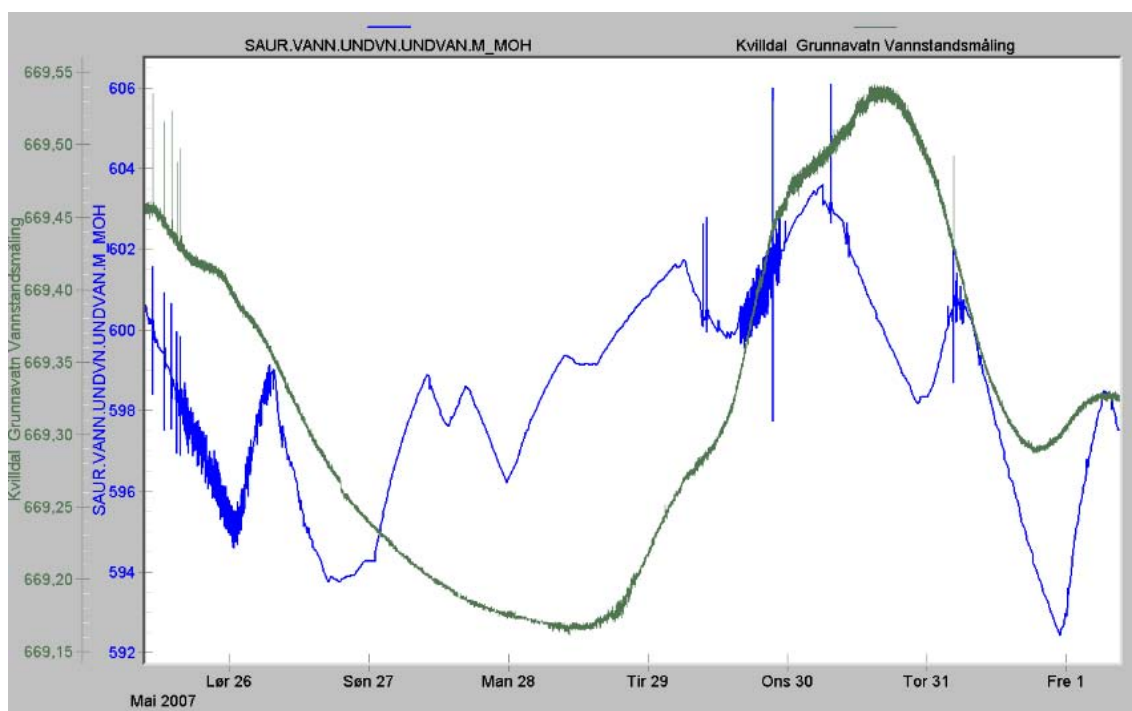
Det er tidligere beregnet at inntaket trekker luft når  $Q \geq 2,8 \text{ m}^3/\text{s}$  [13]. Alle utblåsingene, unntatt april 2007, starter i et intervall mellom  $8,7 \text{ m}^3/\text{s}$  og  $9,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , som tilsvarer et Froudetall på omtrent 0,6 i sjakta. Hvis tidligere beregninger stemmer,



Figur 37: Utblåsingar på Holmaliåna 25. mai 2007, [11]



Figur 38: Detalj over utblåsingar 25.mai 2007, [11]



Figur 39: Utblåsingene på Holmaliåna 30. mai 2007, [11]

betyr dette at før Froudetallet går over 0,6 er den medrevne luften ikke et problem i forhold til store utblåsingene.

Dataene viser også at inntaket har store utblåsingene for vannføringer under 15,7 m<sup>3</sup>/s, som var den tidligere antatte grensen. Etersom alle utblåsingene starter i intervallet  $0,56 < Fr < 0,65$  er det sannsynlig at det er her grensen går for når store utblåsingene oppstår på Holmaliåna. Etersom utblåsingene også stopper opp når Froudetallet i sjakta går under 0,6, er det tydelig at utblåsingene skjer når  $Fr > 0,6$  i sjakta. Et annet viktig poeng er at vannføringen ikke er overkritisk før eller under utblåsingsperiodene.

Utblåsingene i oktober 2008, der vannet går mot Sandsavatn under hele utblåsingsperioden, viser at det kan samles store nok luftmengder i tverrstollen til store utblåsingene. Dette viser også at tidligere beregninger som viste at luft ikke kan komme fra andre inntak kan være riktig.

### Sammenlikning med resultatene i modellforsøket

Hyppigheten på utblåsingene i oktober 2008 og 25. mai 2007 går opp når vannstanden i Grunnavatn er synker. I modellstudiet i del II ble det observert at hyppigheten av returnerte luftputer økte ved minkende vannføring. Dette stemmer godt med det som er registrert på Holmaliåna. Mindre vannføring i sjakta fører til mindre dragkrefter fra vannet, slik at en utblåsing lettere kan oppstå. Av ukjente årsaker er denne trenden ikke like tydelig i utblåsingsperioden 25. april.

Størrelsen på utblåsingene er likevel ikke mye forandret når vannstanden i Grunnavatn synker. Dette står i motsetning til observasjonene i modellforsøket, der størrel-

sen på putene gikk ned da vannføringen minket. Ettersom vannhastigheten i sjakta går ned, minker også medrevet luftmengde. Økningen i vannstand i Grunnvatn er likevel stabil, og tyder på at luftmengden i utblåsningene er uavhengig av utblåsningsintervallet.

Trykkendringene som registreres er sannsynligvis et resultat av utblåsningene. Trykkfallet i forbindelse med økningen i vannstanden i Grunnvatn kan være en stor luftpute som går ut av sjakta, tverrstollen eller tunnelen, altså en utblåsing. Trykket synker som følge av at et volum forsvinner. Når sjakta fylles igjen øker trykket. De mindre trykkvariasjonene i forkant av utblåsingen kan være små utblåsinger som ikke går ut av sjakta eller pulseringer i tunnelsystemet. Dette ble det ikke gjort målinger av i modellforsøket så her er det ikke noe sammenligningsgrunnlag.

Sammenligning av resultatene for luftretur i modellforsøket og Holmaliåna med tanke på store utblåsinger gir overraskende resultater. I modellforsøket returnerte det luftputer til sjakta for  $Fr > 1,2$ . Ut fra det skulle en tro at store utblåsinger ikke oppstod før Froudetallet i sjakta gikk over dette, men på Holmaliåna starter de når Froudetallet er rundt 0,6. Dette er også mye lavere enn  $Fr = 1$ , som var kriteriet i mye av litteraturen og tidligere beregninger. Det er flere ting som kan skje:

- Returen av luft stopper opp i Holmaliåna når Froudetallet går over 0,6 i sjakta på Holmaliåna.
- Store utblåsinger kan skje uten at returen av luft opphører.

Sammenlignet med det som ble observert i modellforsøket om luftretur i sjakta ved  $0,6 < Fr < 0,8$  er det mest sannsynlig det siste punktet som skjer på Holmaliåna. Selv om returen ikke stopper opp ved denne vannføringen, kan det tenkes at lufttransporten ned i tunnelen er større enn returen opp sjakta, slik at det akkumuleres luft i tverrstollen. Når volumet blir stort nok, oppstår en stor utblåsing.

### 3.5 Konklusjon utblåsinger på Holmaliåna

Ut ifra den datamengden som er gjennomgått her kan det konkluderes med følgende:

- Utblåsinger oppstår uavhengig av hvilken vei vannet i tilløpstunnelen går
- Store utblåsinger kan oppstå med luft som kun ligger i tverrstollen
- Det oppstår store utblåsinger uten at vannføringen i sjakta er overkritisk
- Utblåsningene skjer når Froudetallet i sjakta er større enn omtrent 0,6
- Utblåsningene blir hyppigere når vannføringen i sjakta minker

### 3.6 Forslag til tiltak på Holmaliåna

#### 3.6.1 Begrense inntakets kapasitet

På bakgrunn av gjennomgangen av utblåsinger på Holmaliåna virker det hensiktsmessig å hindre at Froudetallet i sjakta går over 0,6. Det kan forhindres ved at

inntakets kapasitet begrenses til  $9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ved bruk av vannføringsdata pr døgn i perioden 1930 - 2007 viser beregninger at redusering av inntakets kapasitet til  $9 \text{ m}^3/\text{s}$  representerer tapt energiproduksjon på  $7,9 \text{ GWh}$  pr år. Dette anses derfor som et lite egnet tiltak.

### 3.6.2 Utvide sjakta

Et tiltak vil være å utvide sjaktdiameteren slik at det ikke rives med luft ned på tverrstollen. Det unngås ved at vannhastigheten i sjakta ikke går over  $0,6 \text{ m/s}$  [13]. For å unngå det ved  $Q_{maks} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$  er det nødvendig med en sjaktdiameter på  $8,6 \text{ m}$ .

Et annet alternativ er å forhindre at store utblåsing oppstår. Etter analysen som er gjort i kapittel 3 må Froudetallet i fylt sjakttverrsnitt da ikke gå over  $0,6$ . For  $Q_{maks} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$  krever det en sjaktdiameter på minst  $4,1 \text{ m}$ .

Sjakttverrsnittet kan utvides ved opprømming eller strossing. Begge deler krever tørrlegging av sjakta og tunnelen, og vil derfor bety betydelig produksjonstap i tillegg til byggekostnaden.

### 3.6.3 Vakumluke

En vakumluke hindrer luft i å komme inn i sjakta og tunnelen. Luka er nivåstyrt og lukker sjakta i toppen slik at det oppstår vakum nedstrøms luka. En slik løsning vil ikke kreve stans i Ulla Førre systemet. Inntaket må imidlertid bygges om, så det vil være et vanntap i anleggsperioden i tillegg til byggekostnaden.

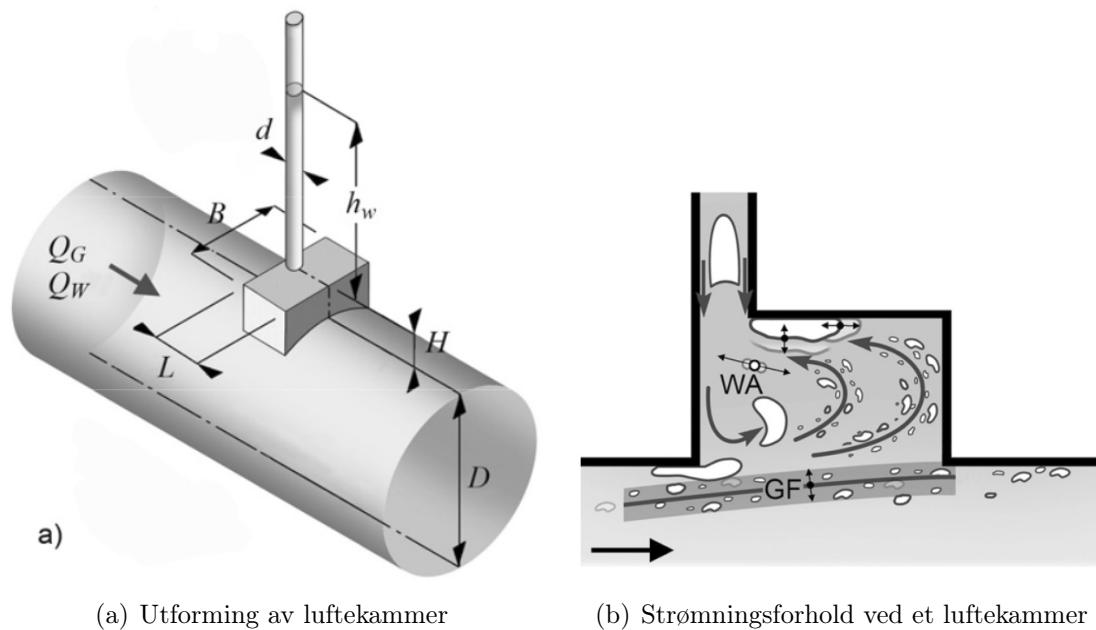
Vakumluke har fungert bra i flere tilfeller. En kan likevel ikke utelukke at det kan oppstå en utblåsing, og at luka blir ødelagt som følge av det.

### 3.6.4 Utlufting

Gjennomgang av data fra utblåsing i kapittel 3 viste at lufta som blåser kan ligge i tverrstollen. Et tiltak vil derfor være å punktere luftlommen ved å borre hull fra bakken og ned dit. Dette krever ikke driftsstans i systemet. Det vil være gunstig å borre flere hull, for eksempel 4-5 stk, for å være sikker på å treffe luftlommen. Hvis luftehullene viser seg å fungere dårlig og det stadig er utblåsing, kan det vurderes å lage et utluftingskammer i tverrstollen for å samle opp medrevet luft bedre. Sprenging av et slikt kammer krever driftsstans i systemet, og vil derfor utgjøre tapt energiproduksjon i tillegg til byggekostnaden. Det er viktig å være klar over at det kan oppstå problemer med ising i luftehullene på vinteren.

Utlufting av tunneler er testet i modellforsøk, der det ble utarbeidet retningslinjer for dimensjonering av utluftingsrør og -kamre i etterkant. Den mest gunstige utformingen av de som ble testet er vist i figur 40(a). I forsøkene ble det funnet at kamre med liten  $H$  var ugunstig, ettersom luften da ikke ble fanget i kammeret. [14]





Figur 40: Bildene (a) og (b) viser gunstig utforming av et luftekammer med strømningsforhold, [14]

### 3.6.5 Anbefalt tiltak

Effekten av å utvide sjakta for å hindre luftmedriving eller utblåsing er usikker ettersom det ikke er helt sikkert når dette skjer.

Punktering av luftlommen i tverrstollen ved hjelp av luftehull anses som det beste alternativet. Det vil være et rimelig alternativ som sannsynligvis kan ha god effekt. Hvis det viser seg å fungere dårlig, bør det vurderes å lage et luftekammer i tverrstollen.



## Del IV

# Avslutning

## 4 Oppsummerende konklusjon

I litteratur som ble gjennomgått i denne rapporten er det enighet om at retur og transport av luft i rør er avhengig av vannhastighet, rørdiameter og rørhelning. Det er imidlertid ikke enighet om ett kriterie for retur og transport av luft. Når det gjelder luftutblåsing er det manglende informasjon om hvordan luftvolumet påvirker hyppigheten og størrelsen på utblåsingene.

Arbeidet med modellforsøket i laboratoriet og analyse av utblåsingene på Holmaliåna ga følgende resultater:

- Størrelsen på luftputer som returnerer fra sjakt til tunnel vokser med økt luftmengde og vannføring.
- Hyppigheten av luftputer som returnerer avtar med økt luftmengde og vannføring. Tilsvarende observasjon ble gjort på Holmaliåna. Der økte hyppigheten da vannføringen i sjakta gikk ned.
- Luft kan returnere fra tunnel til sjakt for Froudetall høyere enn 1 i sjakta.
- Ved Froudetall høyere enn 0,7 var luftputene avhengig av tilførsel av luft for å kunne returnere opp hele sjakta.
- Store utblåsing på Holmaliåna oppstår før det er kritisk strømning i sjakta.
- Store utblåsing på Holmaliåna oppstår med luft som bare ligger i tverrstollen

I eksisterende beregningsmetoder regnes det med at store utblåsing oppstår etter at returen av luft fra tunnelen opphører ved overkritisk strømning i sjakta. Resultatene i denne rapporten viser at dette ikke nødvendigvis er riktig. I modellforsøket returnerte det luft til sjakta for  $Fr > 1$ , og i Holmaliåna ble det store utblåsing ved  $Fr \simeq 0,6$ . Med forbehold om at resultatene er pålitelige, viser dette at returen av luft ikke nødvendigvis trenger å stoppe opp for at det skal oppstå store utblåsing. På Holmaliåna synes grensen for å samle et stort volum i tverrstollen til å gå ved Froudetall på omtrent 0,6 i sjakta. Det er imidlertid ikke sikkert at dette gjelder for alle andre inntak med luftproblemer. Ut fra de resultatene som er funnet i denne rapporten vil det mest aktuelle tiltaket på Holmaliåna være å borre luftehull ned på tverrstollen.



## 5 Videre arbeid

Resultatene i rapporten viser at store utblåsing oppstår på Holmaliåna uten at det forekommer overkritisk strømming i sjakta. Det hadde vært interessant å vite om det er slik for flere inntak med utblåsningsproblemer. Hvis det er tilfellet er det nødvendig med en justering av beregningsmetoden i [1].

I denne oppgaven har retur av luft vært i fokus. Ettersom en luftutblåsing også er avhengig av luftinnblanding, kan det være nyttig å studere dette nærmere.

For å utrette det beste og mest effektive tiltaket på Holmaliåna kan det være nødvendig å gå gjennom mer data enn det som er gjort her. Hvis det er ønske om å gjøre tiltak i selve sjakta med tanke på utvidelse, er det nødvendig å vite enda mer sikkert når utblåsingene starter.



## Referanser

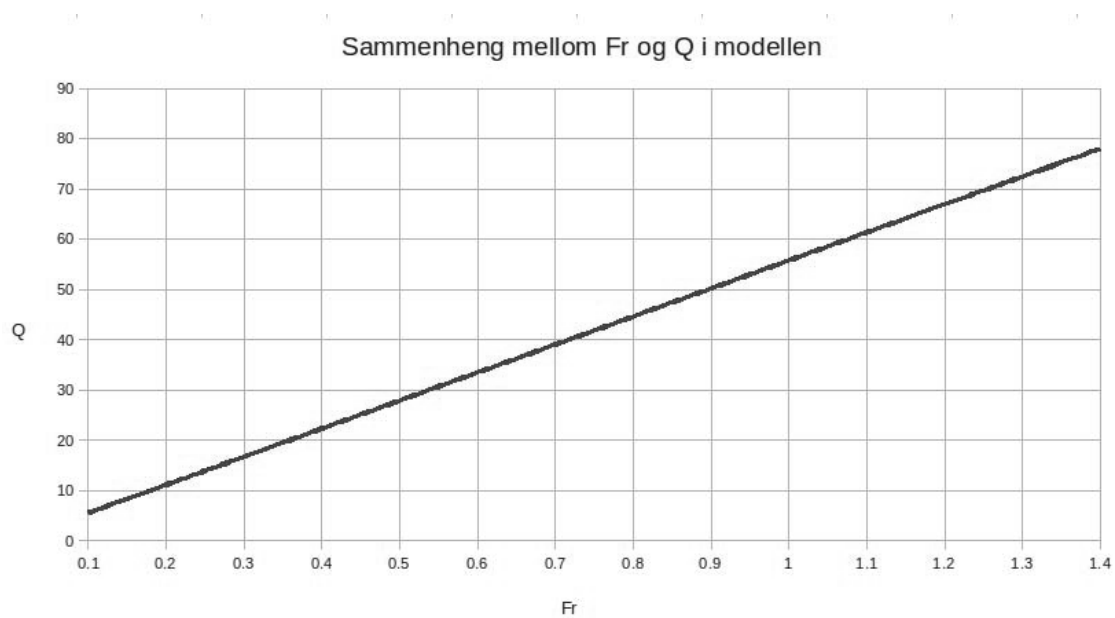
- [1] Bekkeinntakskomiteen. *Bekkeinntak på Kraftverkstunneler, Sluttrapport fra Bekkeinntakskomiteen, 2. utgave*. Vassdragsregulantenenes Forening, 1986.
- [2] Statkraft ved Trond Bjertnes, april 2009. Bilder.
- [3] Arve Berg. Modellforsøk av tofase luft-vann-strømning i bekkeinntakssjakter. Technical report, Norsk hydroteknisk laboratorium, 1986. Prosjektnummer: STF60 A86011.
- [4] Morten Skoglund. *Luftproblemer i bekkeinntakssjakter*. Sintef NHL.
- [5] Reidar Dahl og Odd Guttormsen. Direkte innføring av bekkeinntakssjakt på driftstunnel - modellforsøk. Technical report, Norges Hydrotekniske Laboratorium, 1986. Prosjektnummer: STF60 F86002.
- [6] Manuela Escarameia. Investigating hydraulic removal of air from water pipelines. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management*, Water management 160:25 – 34, mars 2007.
- [7] D. A. Ervine. Air entrainment in hydraulic structures:a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1998.
- [8] Henry T. Falvey. Air water flow in hydraulic structures. Technical report, Water and power Resources Services, Engineering and Research Center, 1980.
- [9] Paul E. Wisner og Farrukh N. Mohsen og Nicholas Kouwen. Removal of air from water lines by hydraulic means. *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society and Civil Engineering*, 1975.
- [10] D. A. Ervine og S. K. Himmo. *Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, 2. utgave*, chapter 4.15. IAHR, DVWK, 1985. ISBN: 3 921694 98 1.
- [11] Statkraft og Trond Bjertnes. Driftsdata for ulla førre. 2009.
- [12] Ragnhild Utvik Gjerde. Luftproblemer i bekkeinntak. Prosjektoppgave ved NTNU, desember 2008.
- [13] Morten Skoglund og Leif Lia. Luftproblemer i holmaliåna. Rapport på oppdrag for Statkraft, prosjektnr: V11619, sept 2007.
- [14] Martin Wickenhäuser. *Zweiphasenströmung in Entlüftungssystemen von Druckstollen*. PhD thesis, Versuchsanstalt für Wasserbau in Zürich, 2008. ISSN: 0374 0056.





## A Beregninger i forbindelse med modellforsøk

Parametre	sjakt	tunnel			
d	220	350			
A	0.038	0.14	0.10		
v	0.0000013	0.0000013			
y	2.6		vert.sjakth		
L	3.68	2	rørlengde		
Forhold A/a	3.77				
	sjakt		Tunnel		
Fr	v [m/s]	Q	Reynold	V	Reynold
0.6	0.88	0.033	148030	0.23	62506
1	1.47	0.056	246716	0.39	104177
1.2	1.76	0.067	296059	0.47	125012

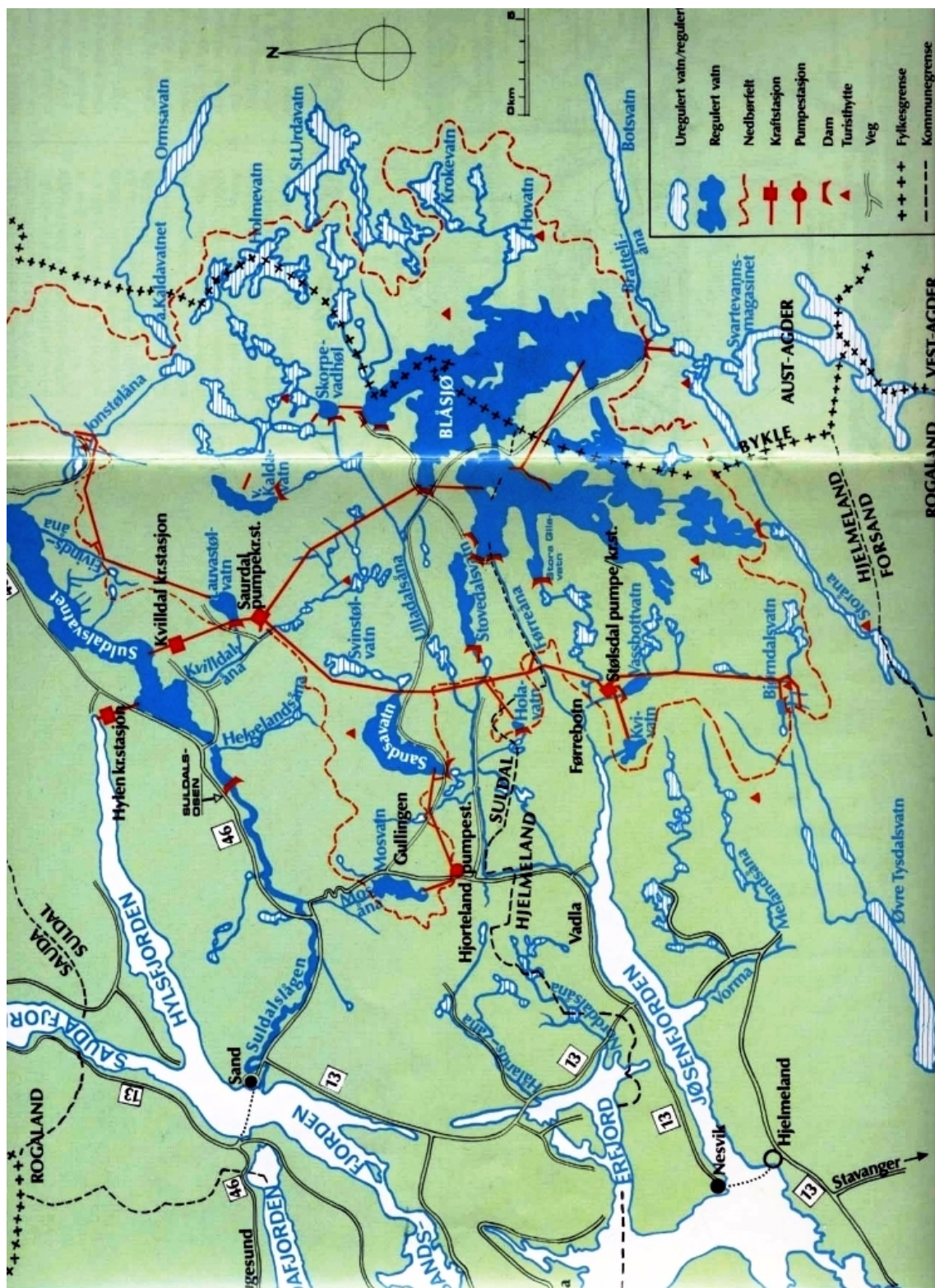






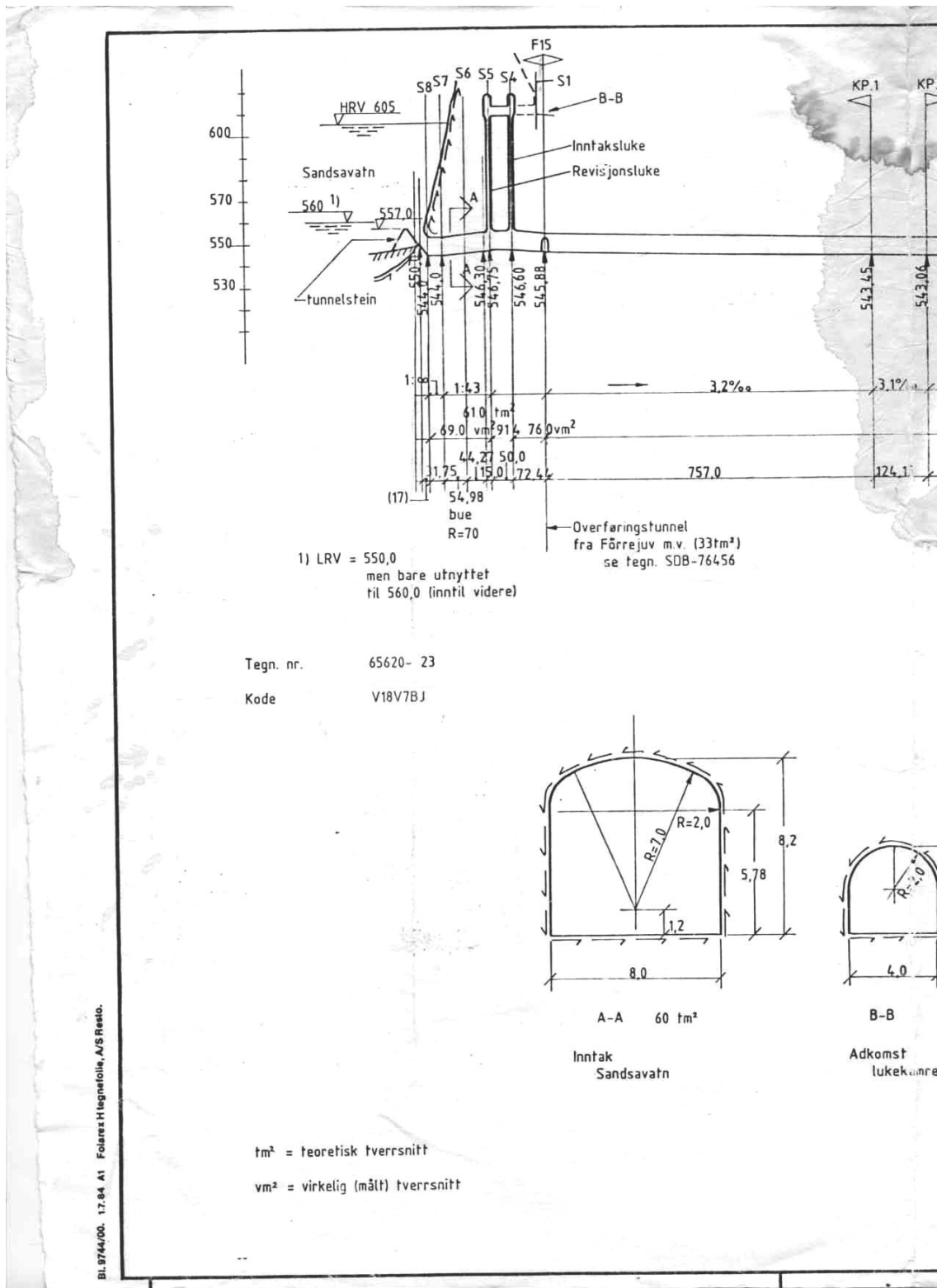




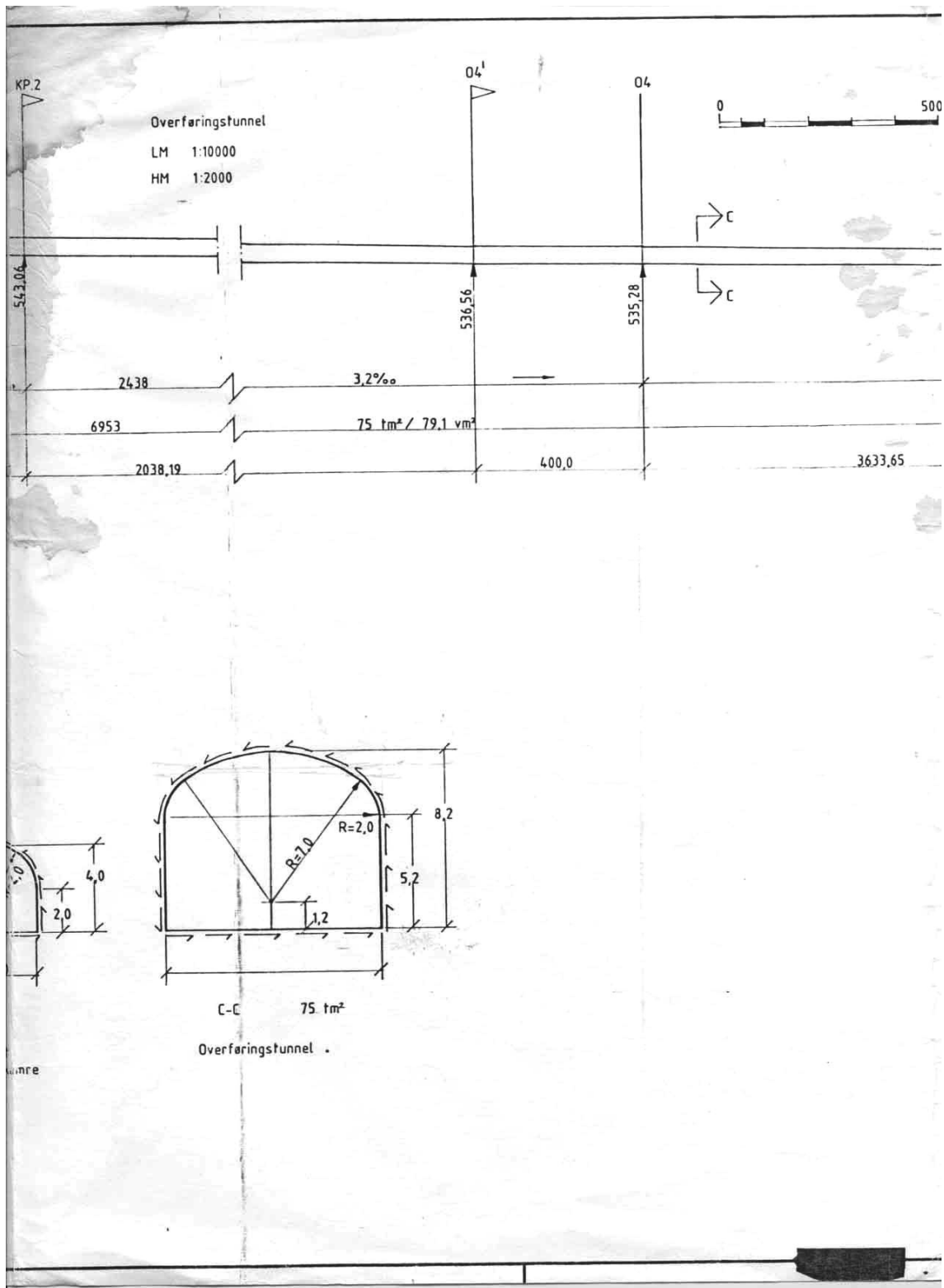


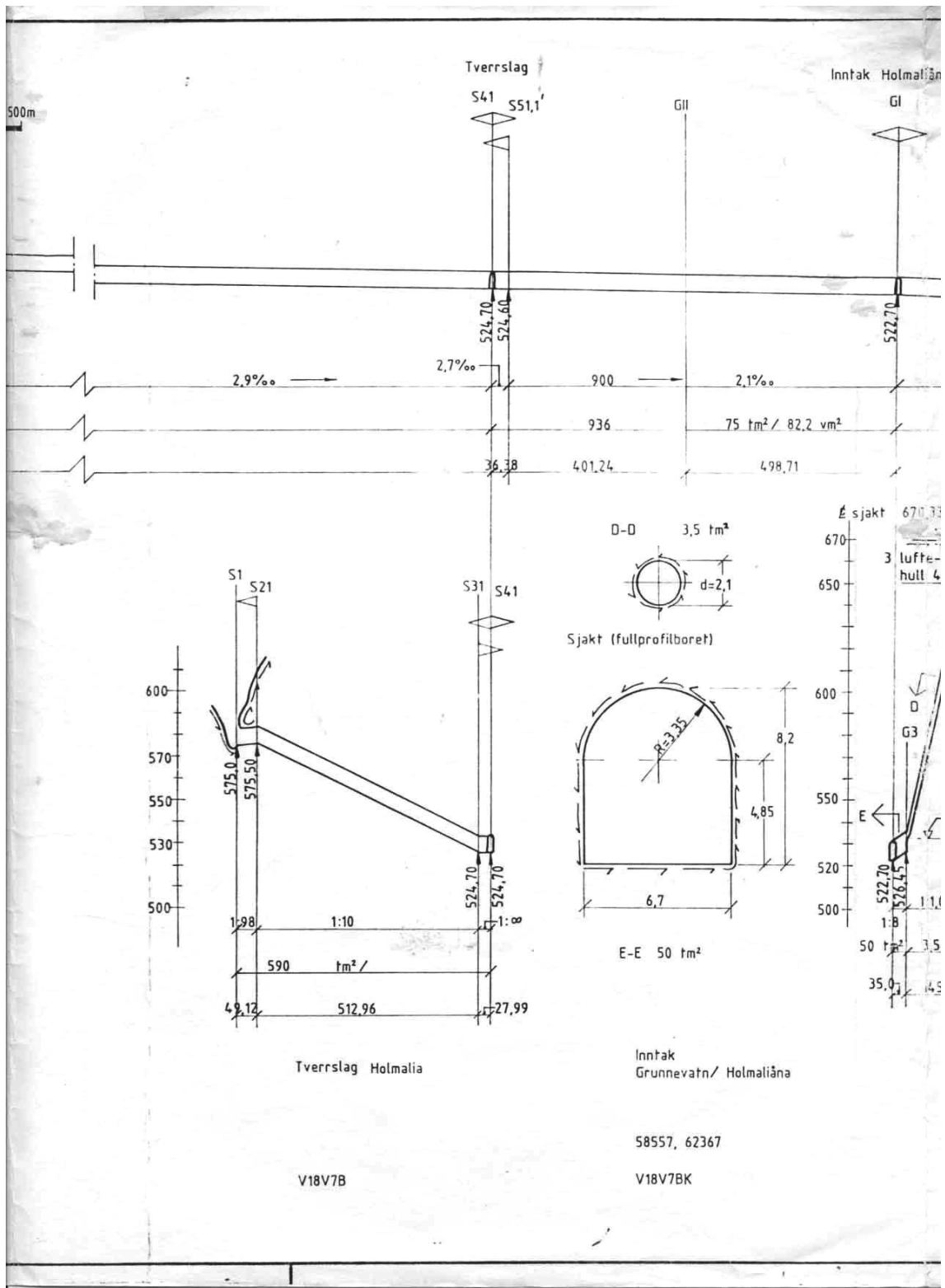


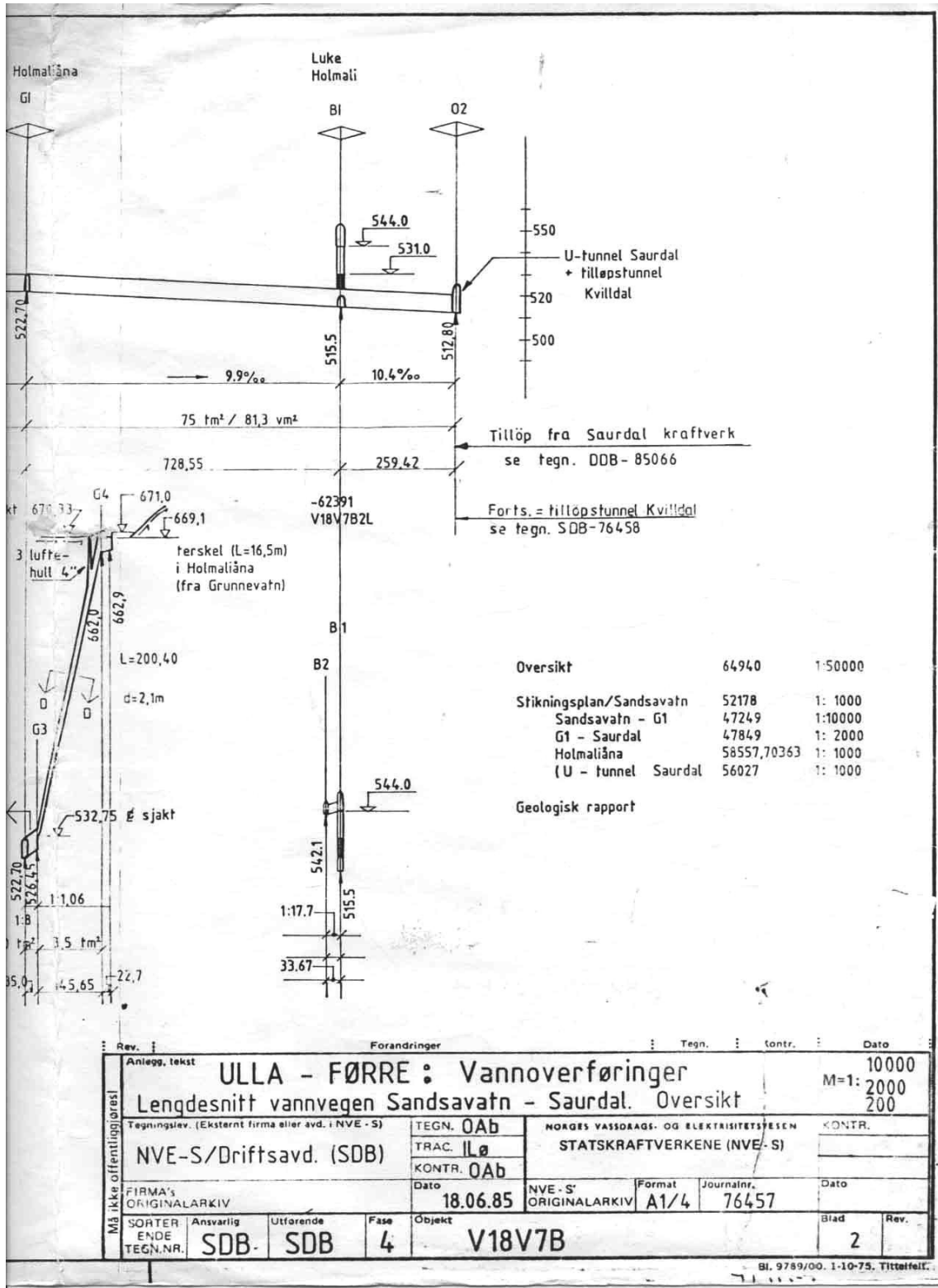












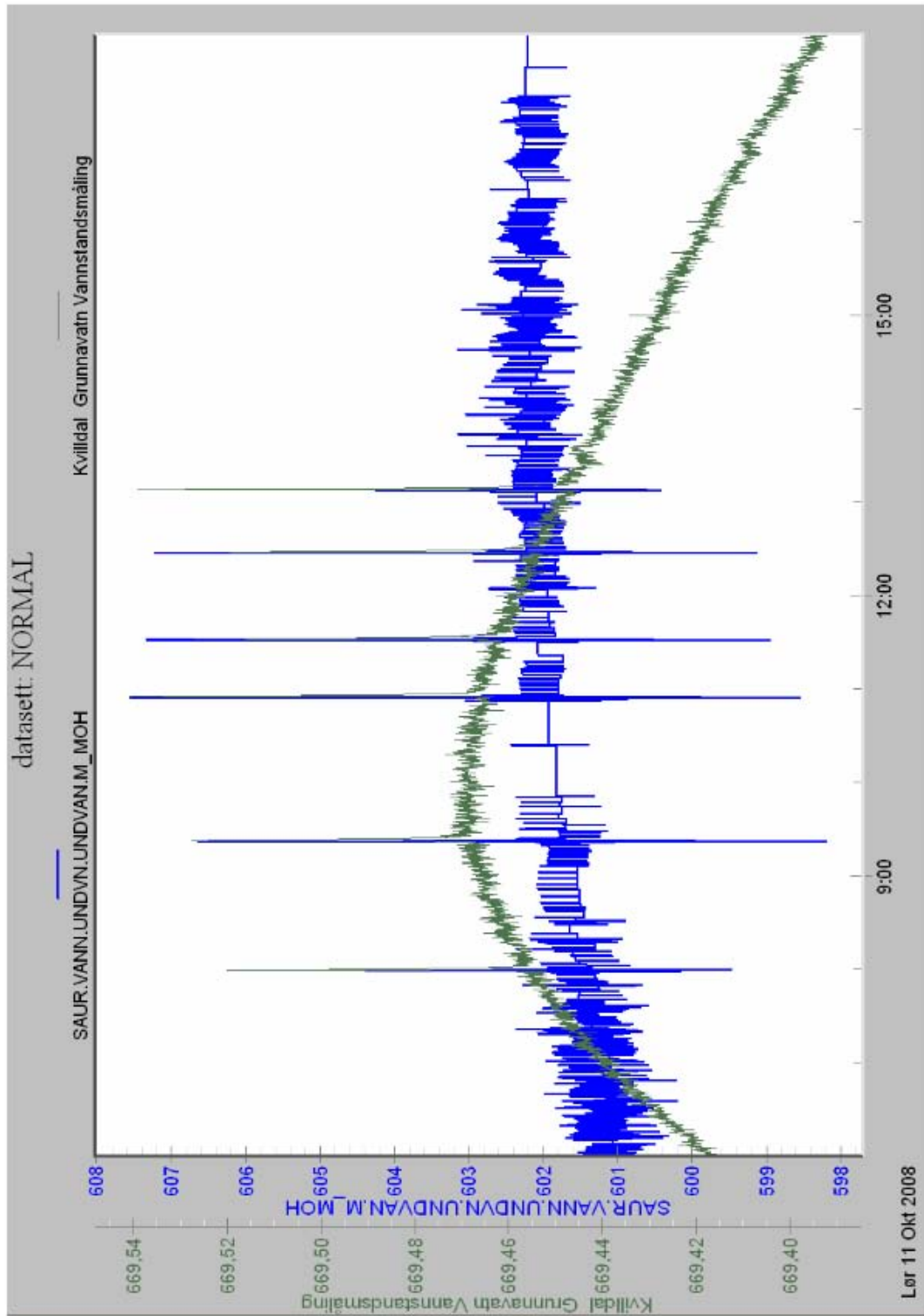


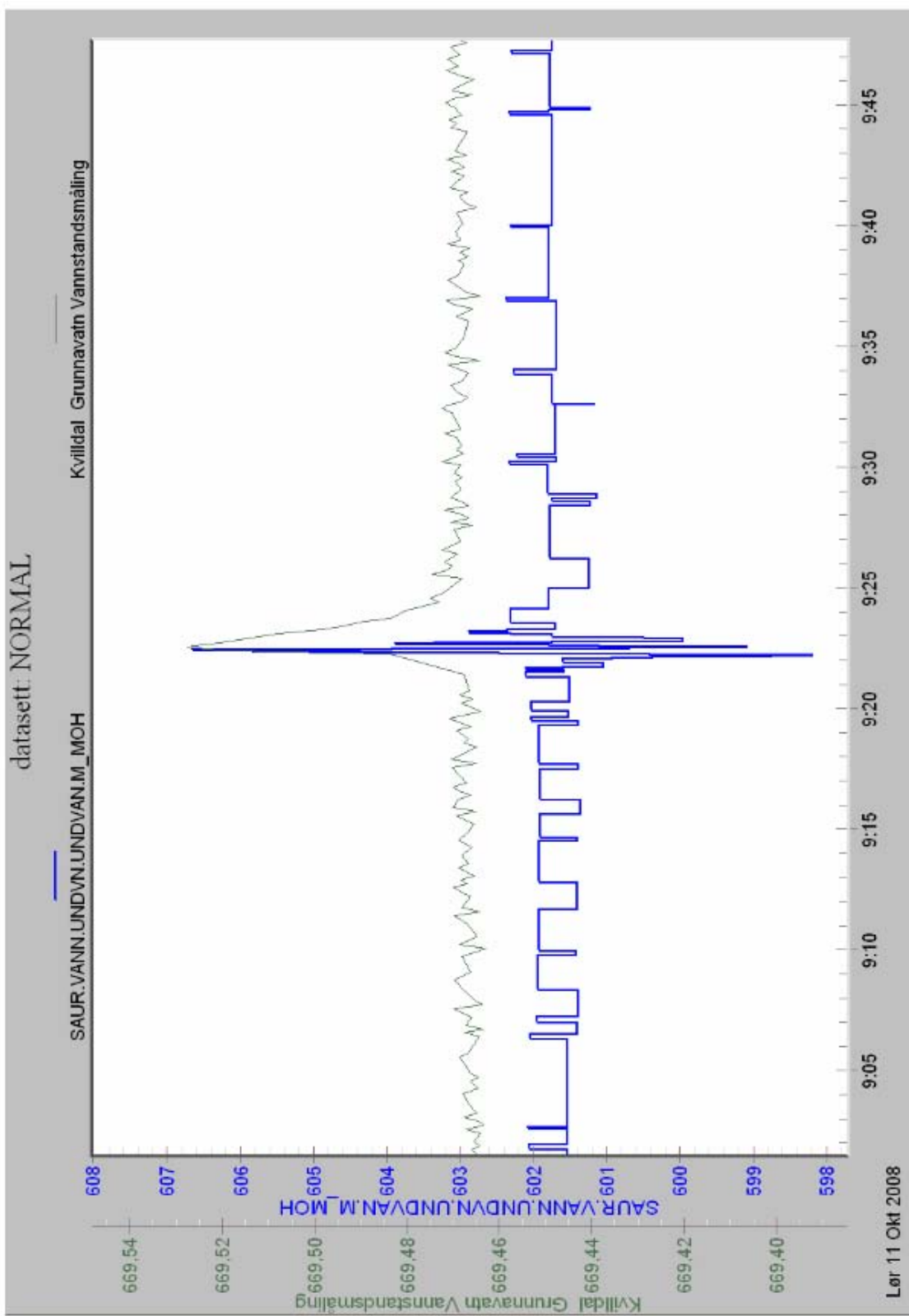
## C Beregninger for utblåsing på Holmaliåna

<b>Utblåsing på Holmaliåna</b>				
Kapasitet rist	75.200			
Terskel inntak	669.000			
Lengde overløp	16.000			
C	2.000			
D i sjakt	2.100			
A	3.462			
Bunn sjakt	532.500			
	Okt 2008	Apr 2007	25. mai 2007	30. mai 2007
min Grunnvatn	669.440	669.43	669.43	669.39
maks Grunnvatn	669.475	669.46	669.46	669.53
start Grunnvatn	669.440	669.42	669.46	669.42
Q min sjakt	9.340	8.866	9.023	7.794
Q maks sjakt	10.476	9.984	9.984	12.347
Q start	9.340	8.710	9.984	8.710
v min sjakt	2.698	2.561	2.606	2.251
v maks sjakt	3.026	2.884	2.884	3.567
v start	2.698	2.516	2.884	2.516
Fr min	0.609	0.578	0.588	0.508
Fr maks	0.683	0.651	0.651	0.805
Fr start	0.609	0.568	0.651	0.568
kt Sandsavatn min	601.400	602		
kt Sandsavatn maks	601.800	603		
fylt sjaktlengde min	68.900	69.500		
fylt sjaktlengde maks	69.300	70.500		

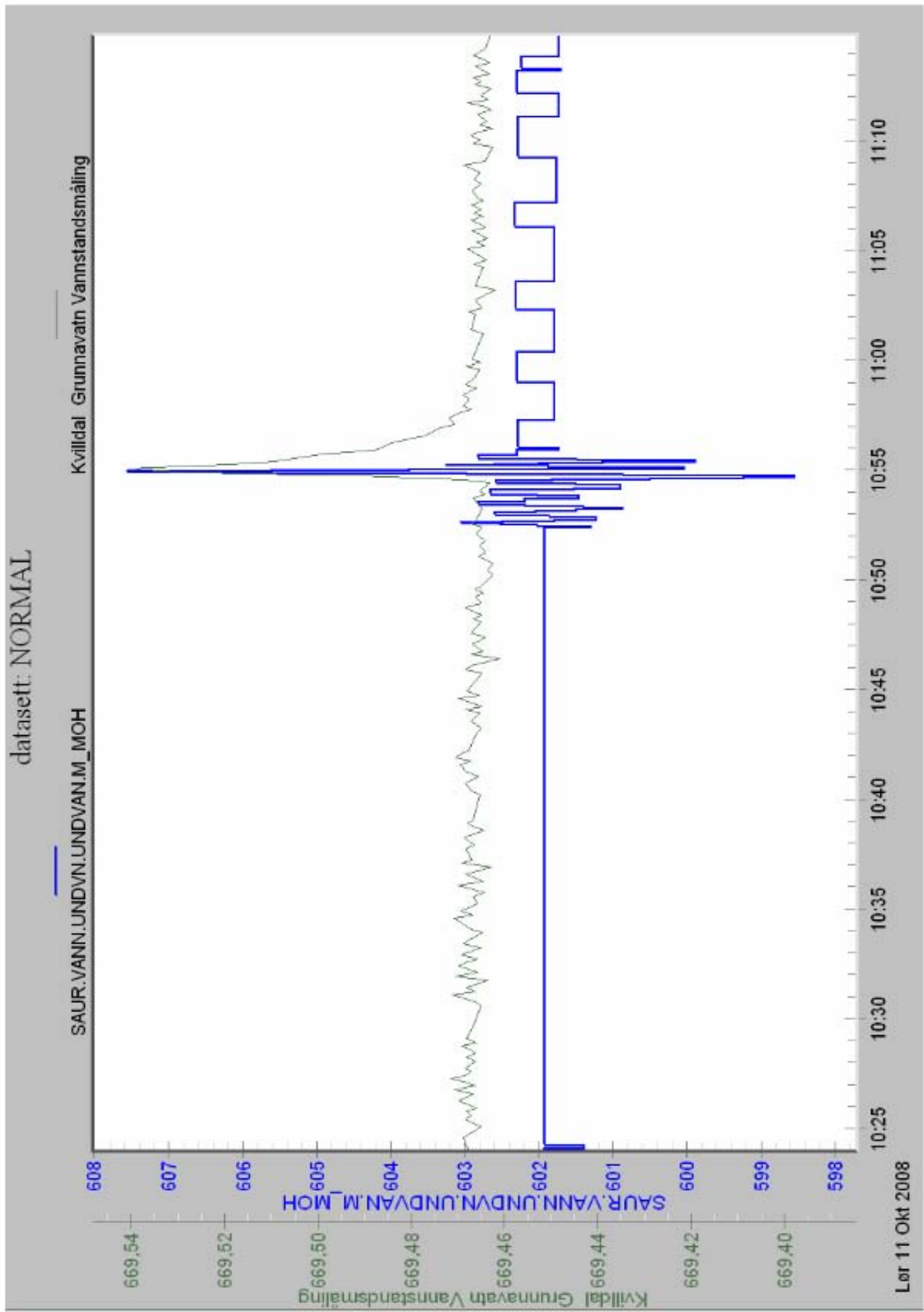
Vannstandsøkning i Grunnavatn						
Oktober 2008			April 2007			
topp	vannstand	økning [m]	topp	vannstand	økning [m]	
669.520	669.455	0.065	669.500	669.425	0.075	
669.530	669.470	0.060	669.500	669.425	0.075	
669.540	669.470	0.070	669.500	669.430	0.070	
669.540	669.460	0.080	669.510	669.430	0.080	
669.510	669.450	0.060	669.510	669.430	0.080	
669.540	669.440	0.100	669.530	669.440	0.090	
		0.07	669.520	669.440	0.080	
			669.530	669.440	0.090	
			669.520	669.440	0.080	
25 mai 2007			669.520	669.440	0.080	
topp	bunn	økning [m]	669.510	669.440	0.070	
669.535	669.460	0.075	669.540	669.440	0.100	
669.535	669.465	0.070	669.510	669.430	0.080	
669.515	669.445	0.070	669.490	669.430	0.060	
669.510	669.45	0.065	669.500	669.420	0.080	
669.490	669.440	0.050			0.08	
669.5	669.435	0.060				
		0.06				
30 mai 2007						
topp	vannstand	økning [m]				
669.500	669.440	0.060				
669.495	669.430	0.065				
		0.06				

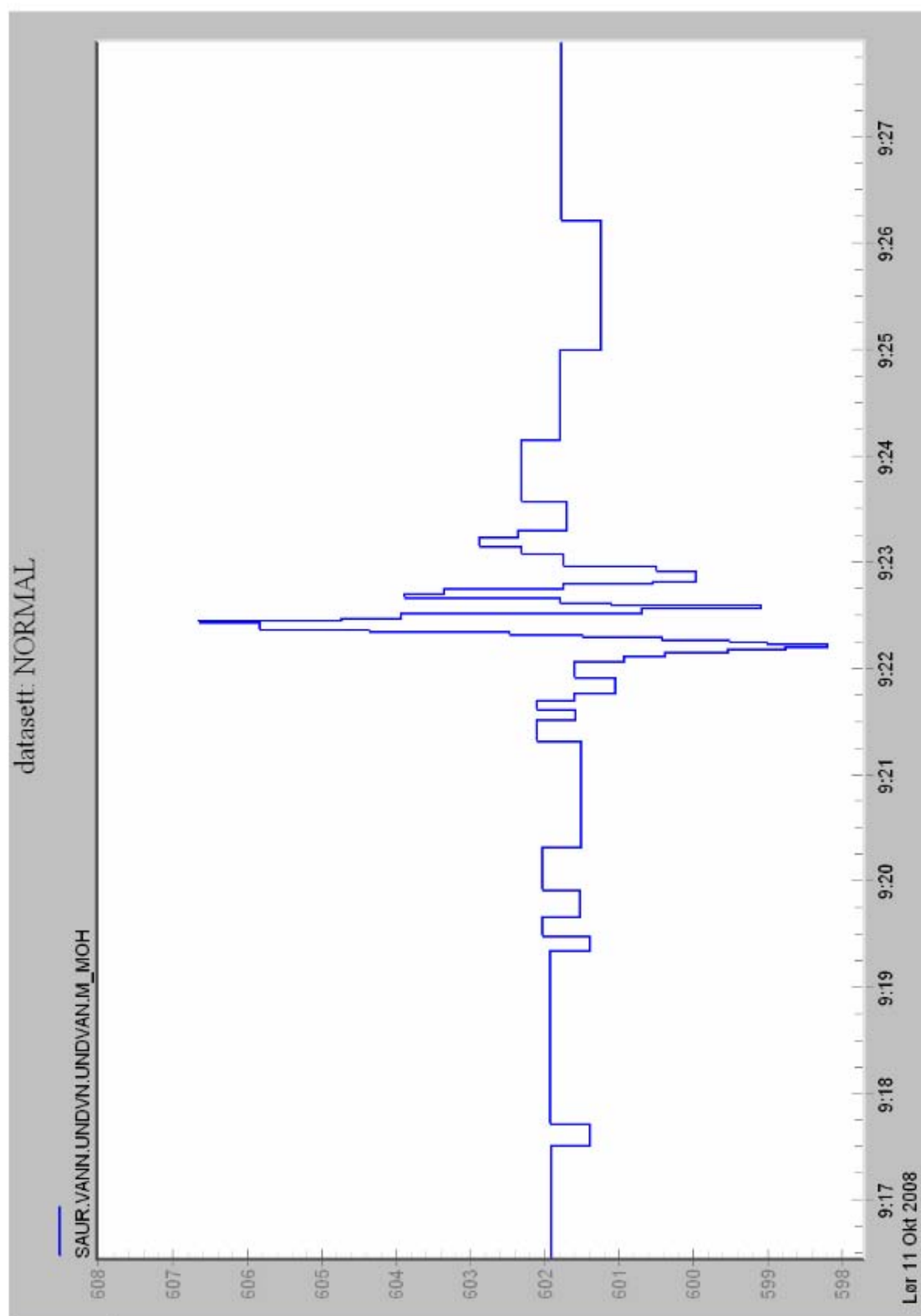
D Data for utblåsing på Holmaliåna 11. oktober 2008

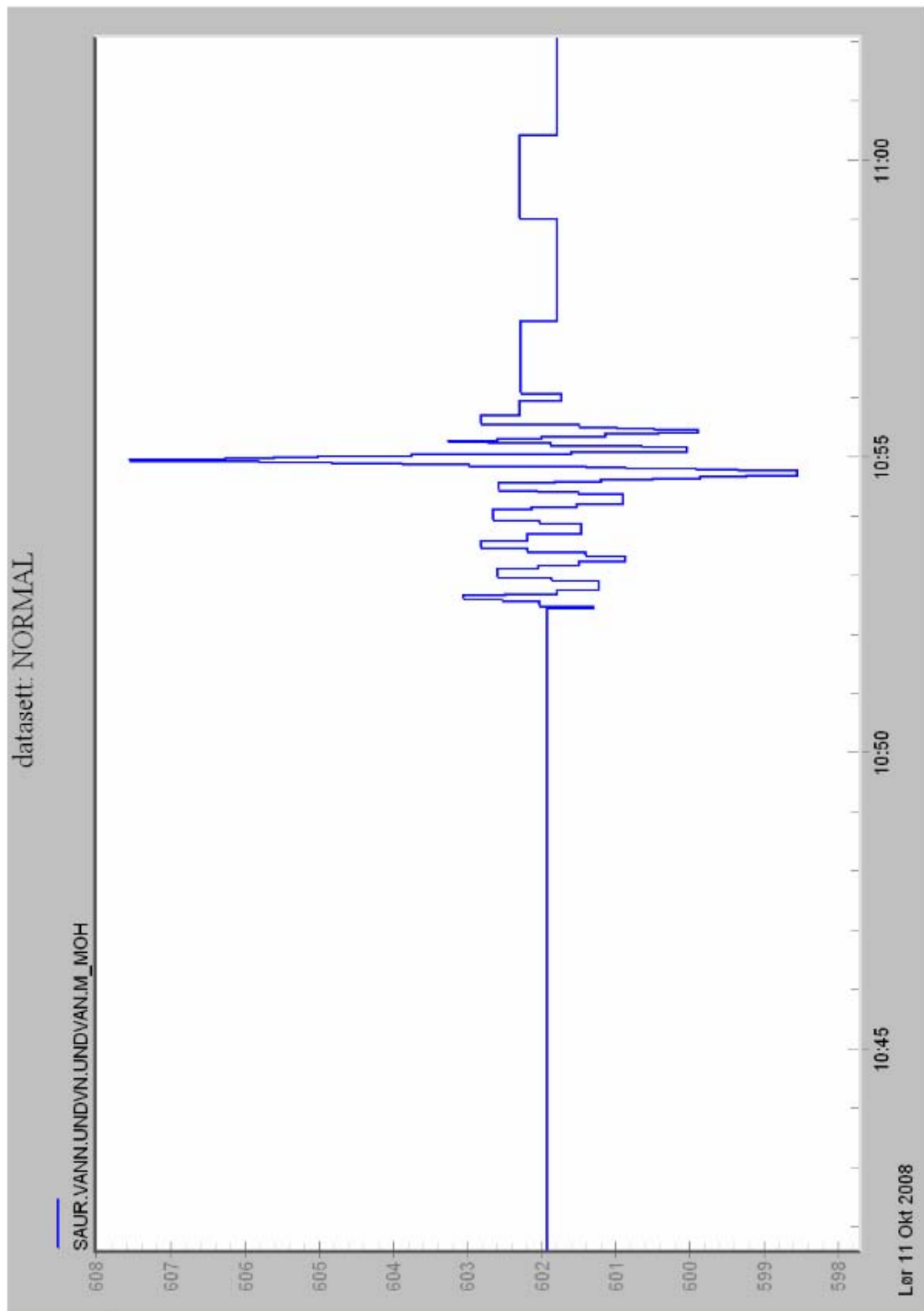


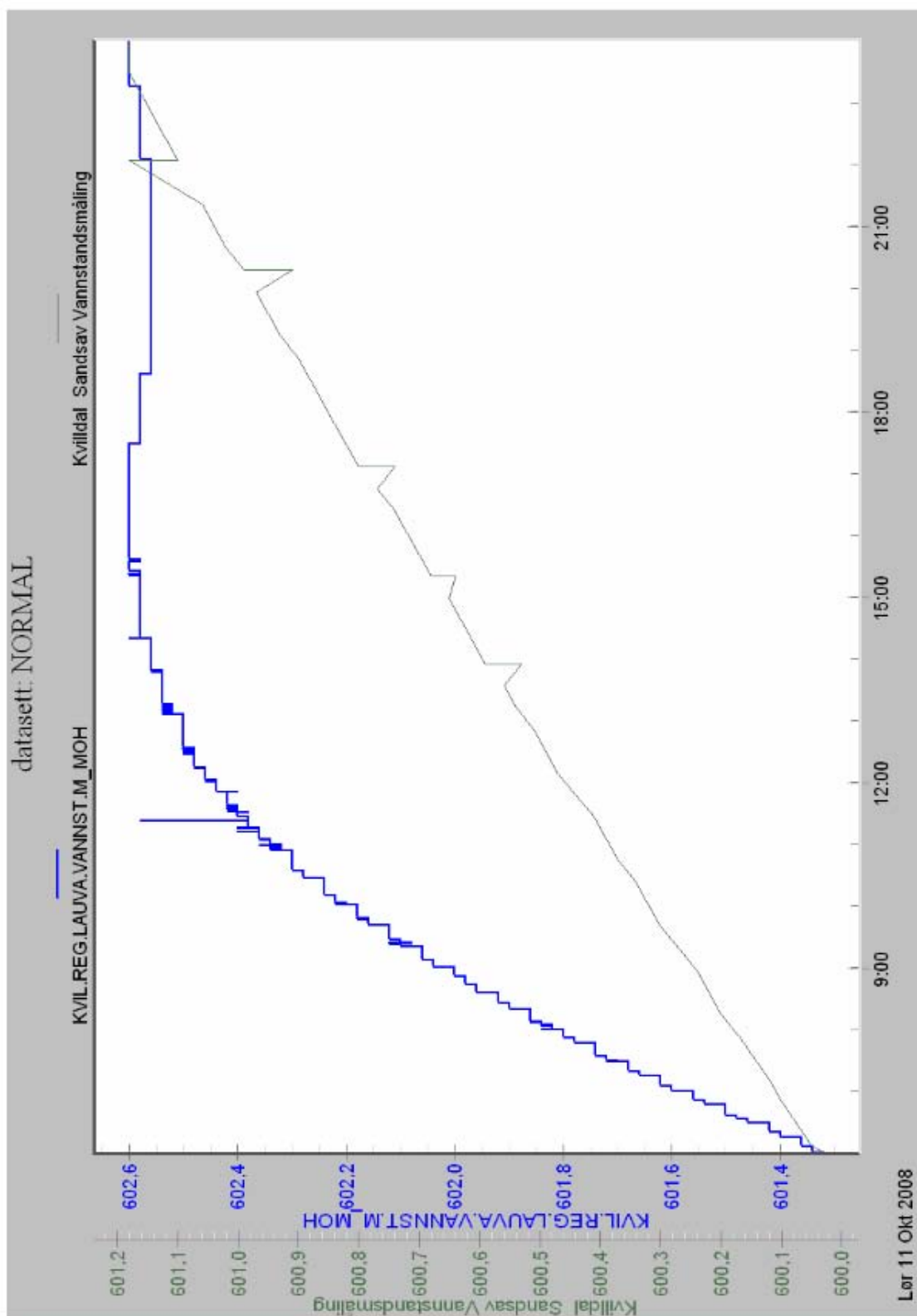




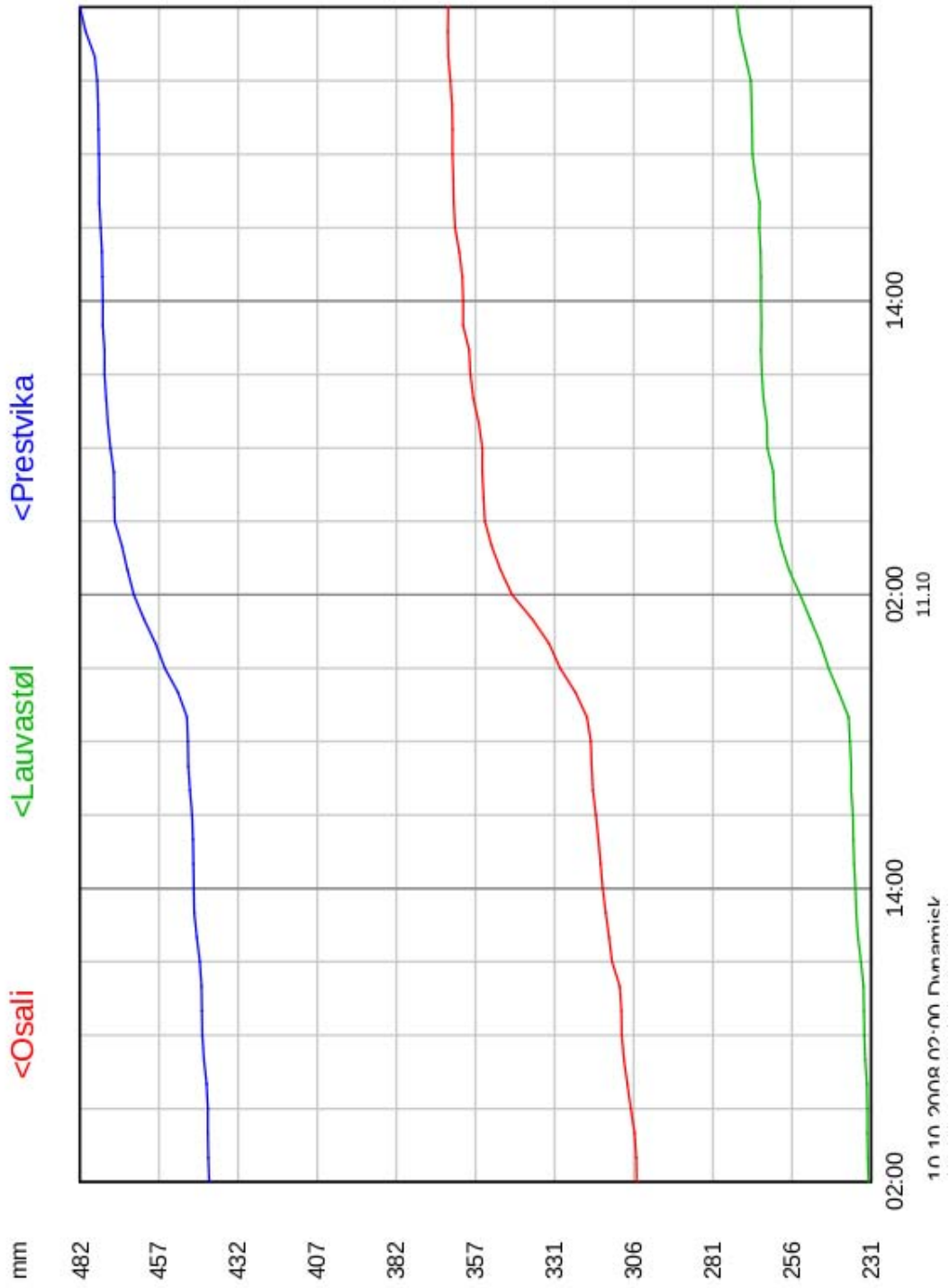


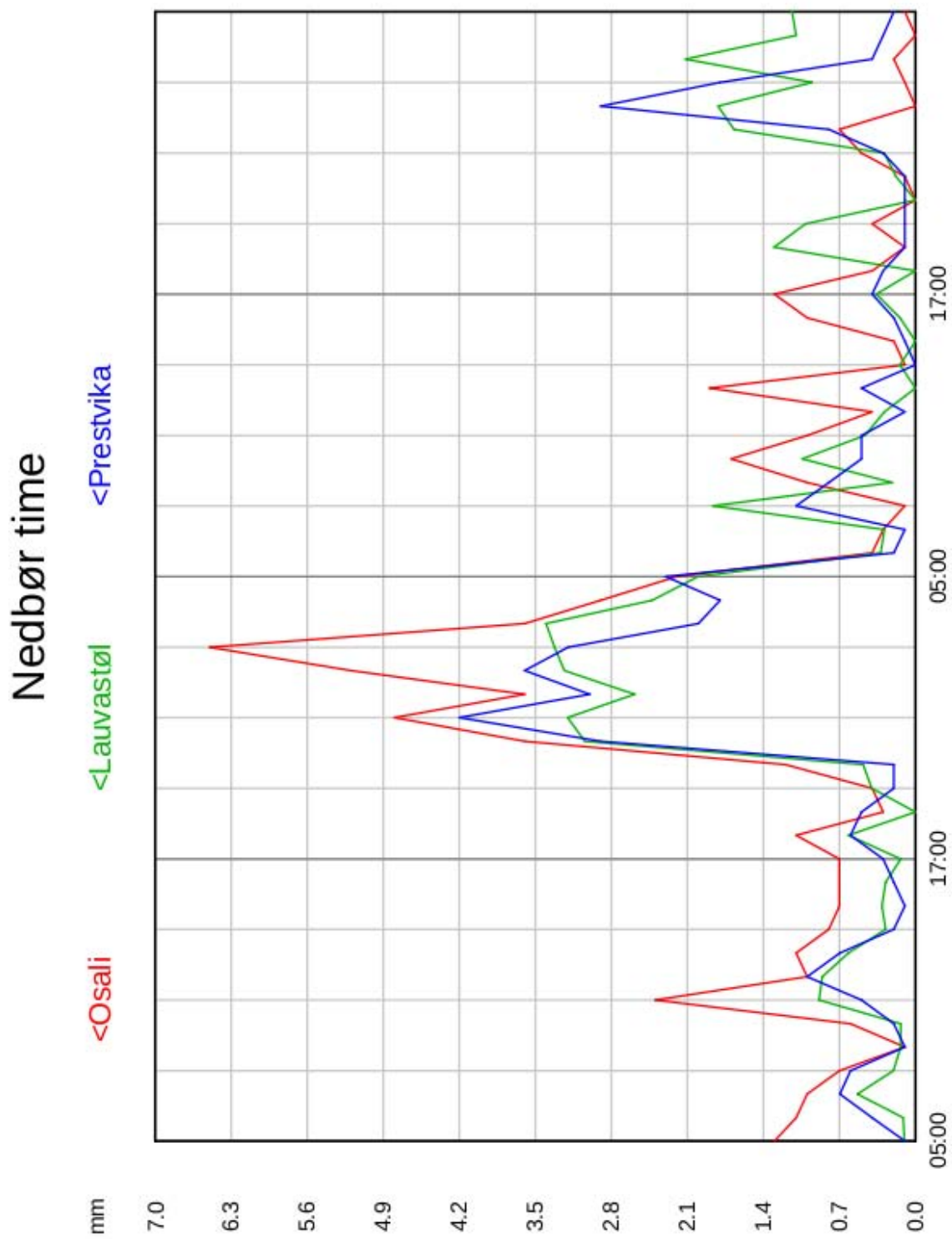






# Nedbør Bøtte





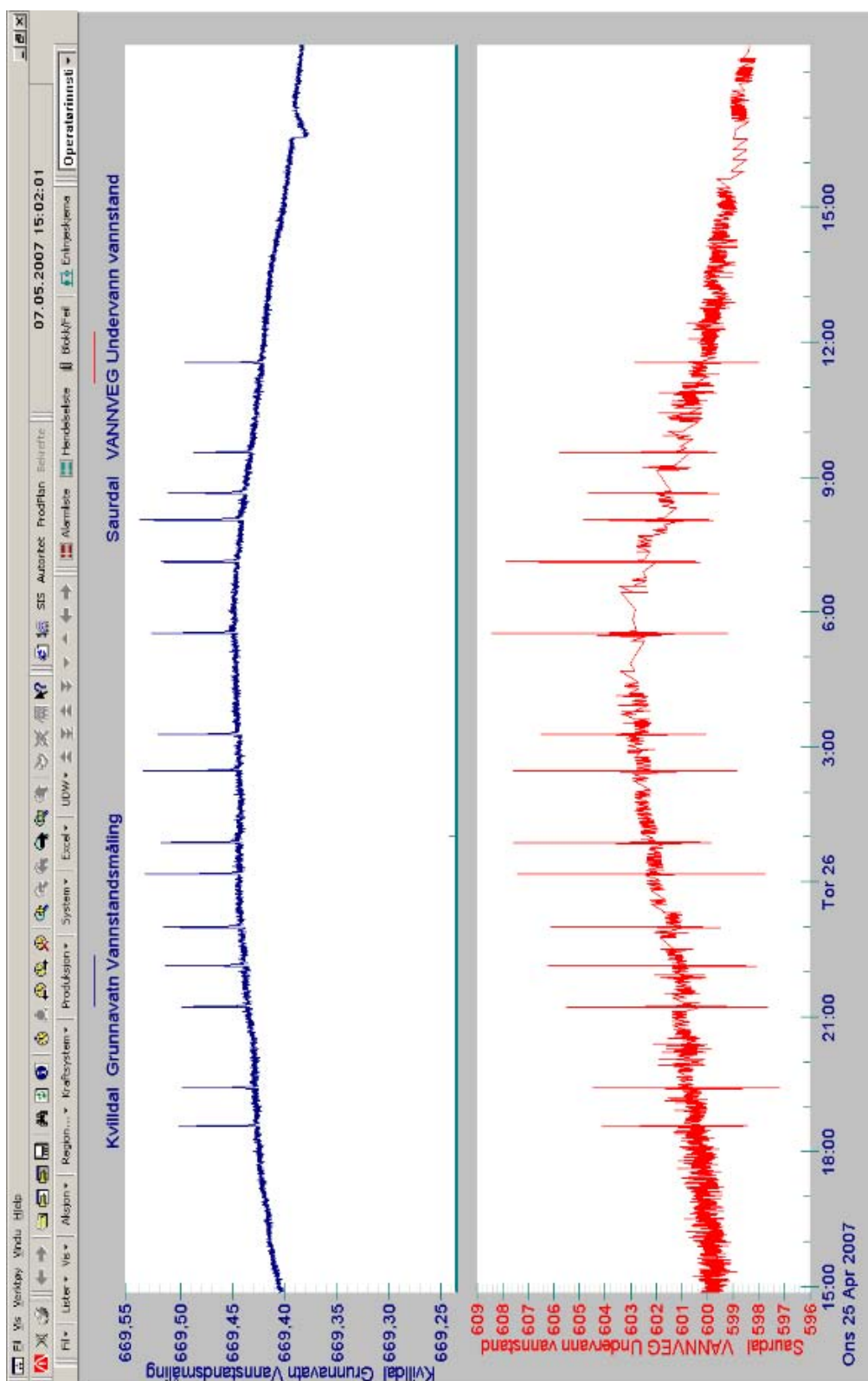
## Vannføring Osali/Lauvastøl

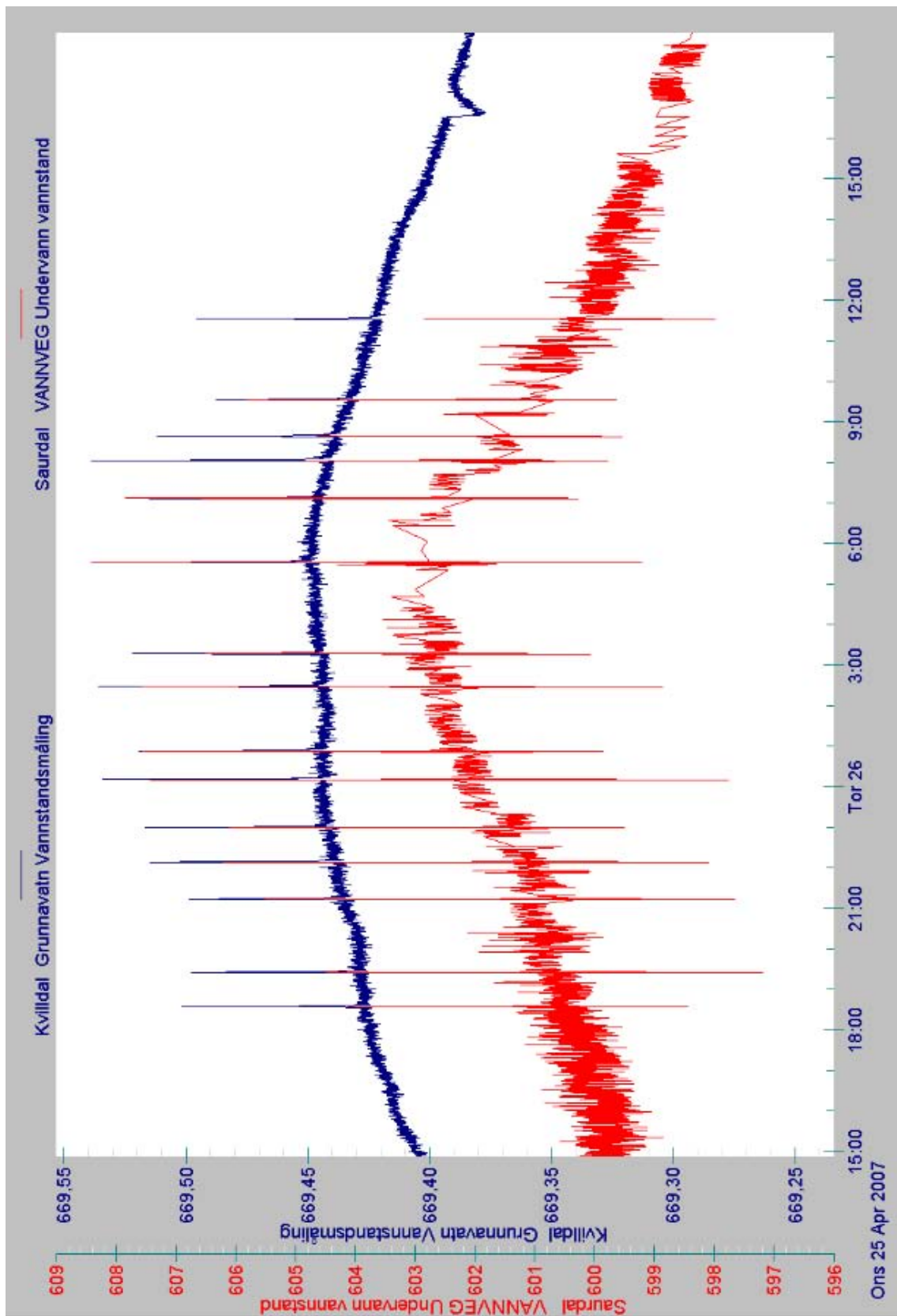


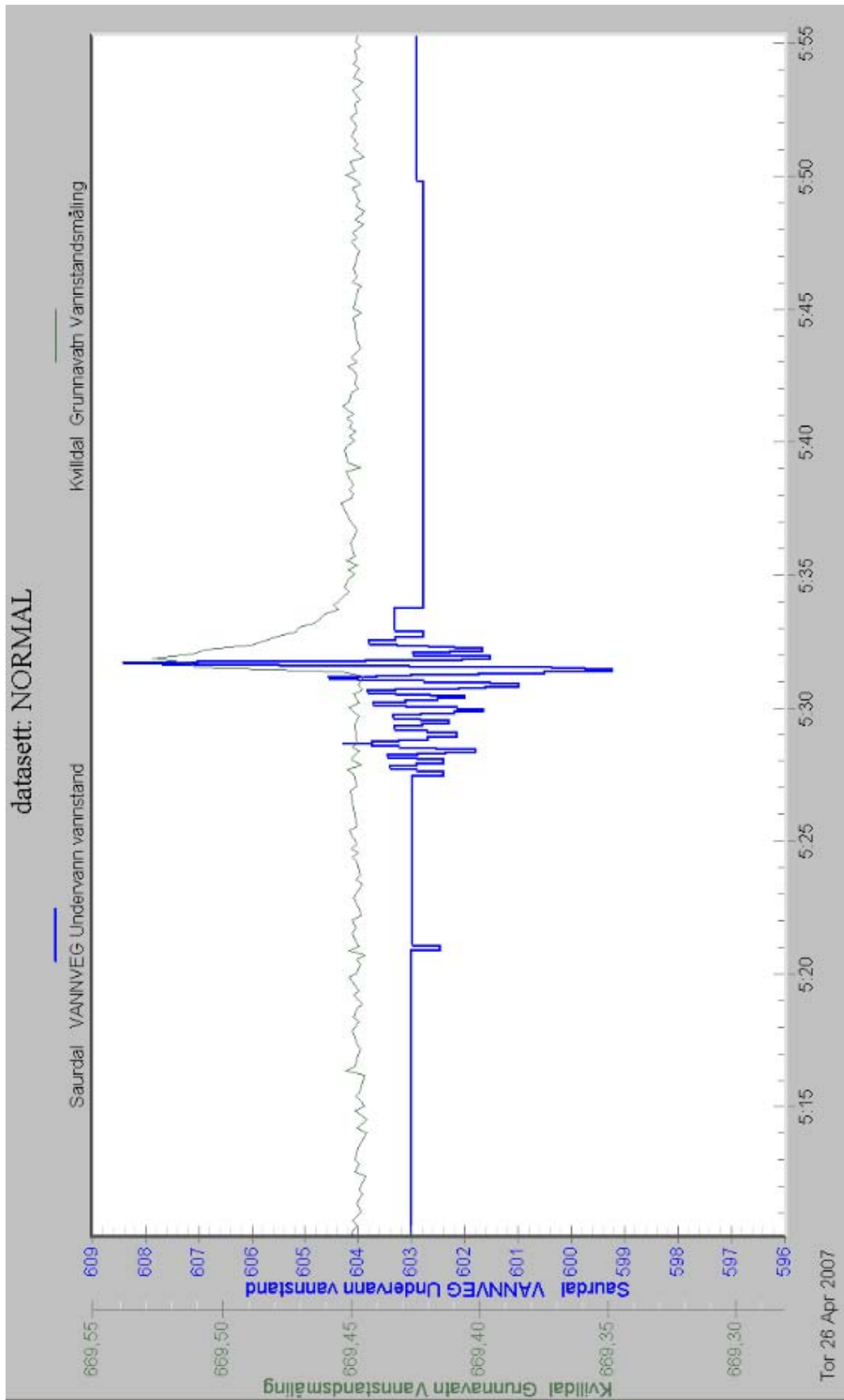


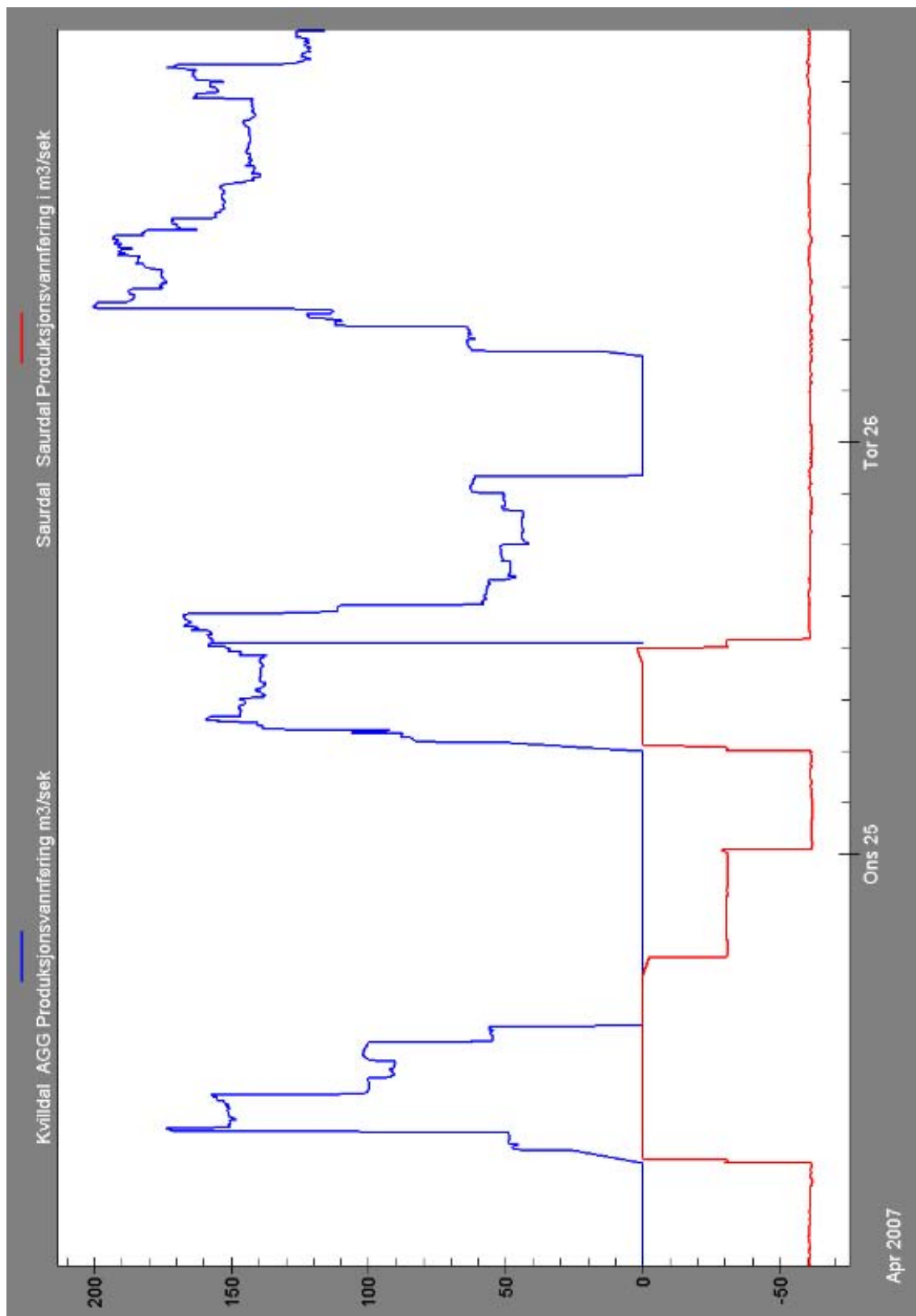


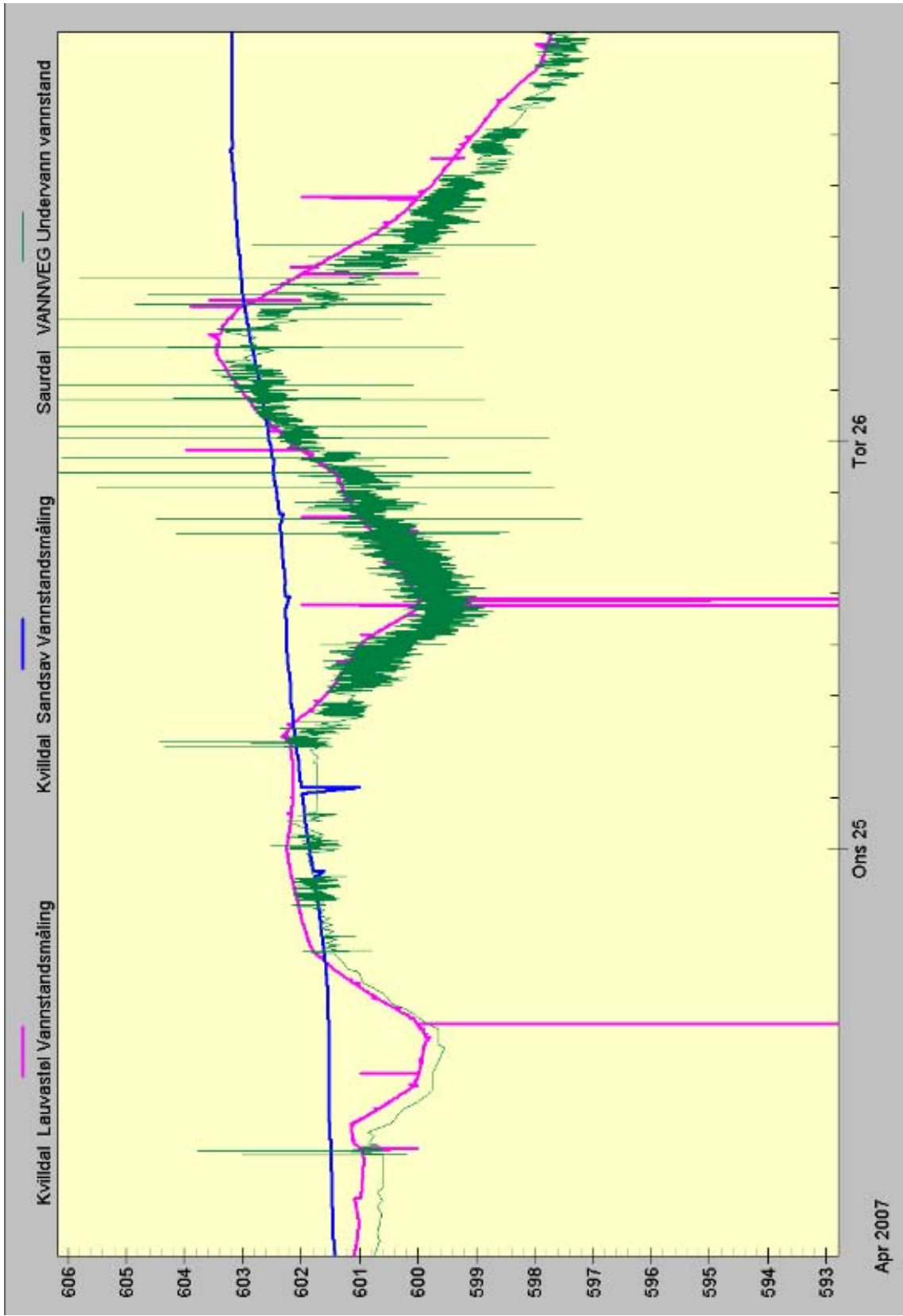
## E Data for utblåsing på Holmaliåna 25. april 2007

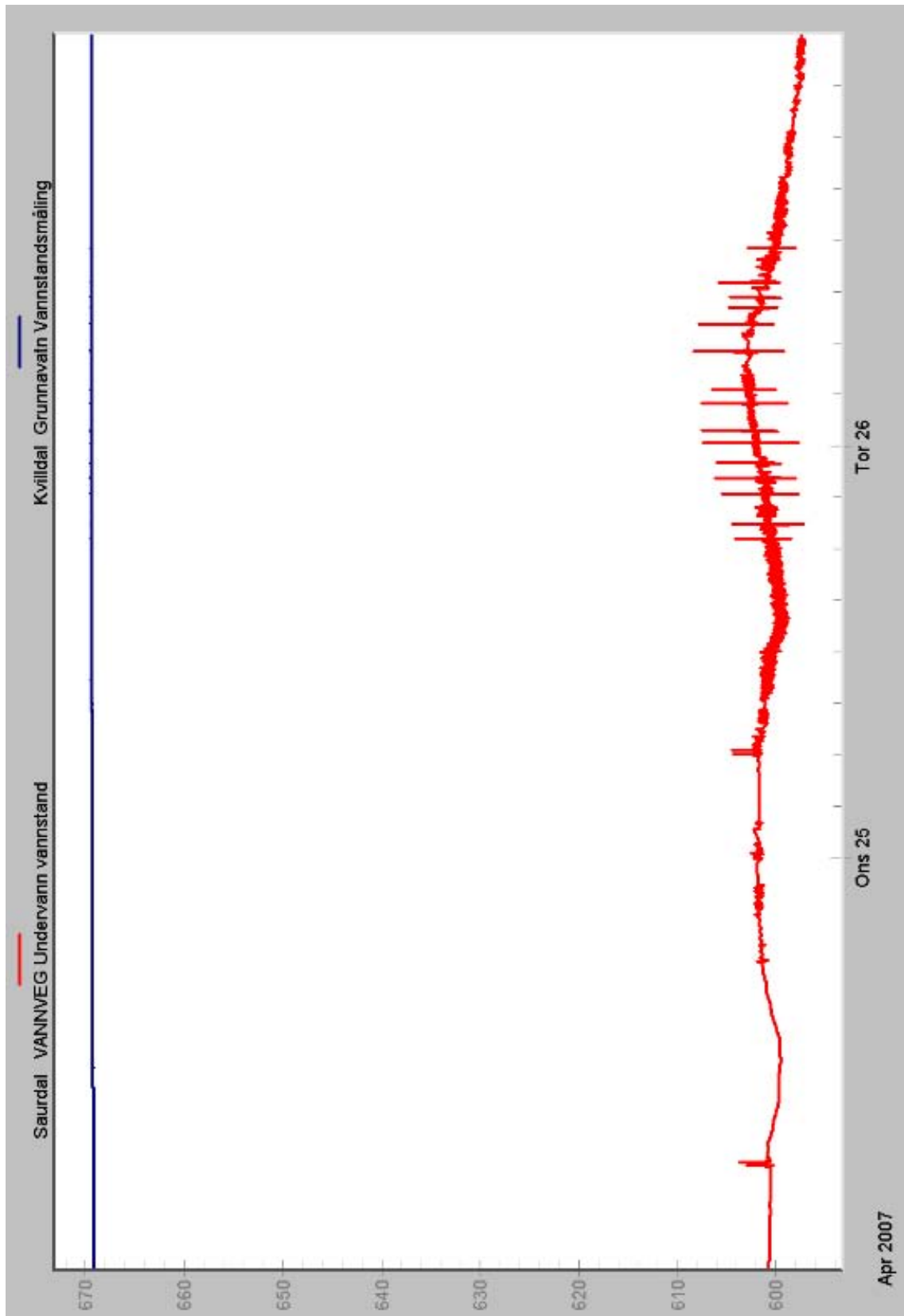




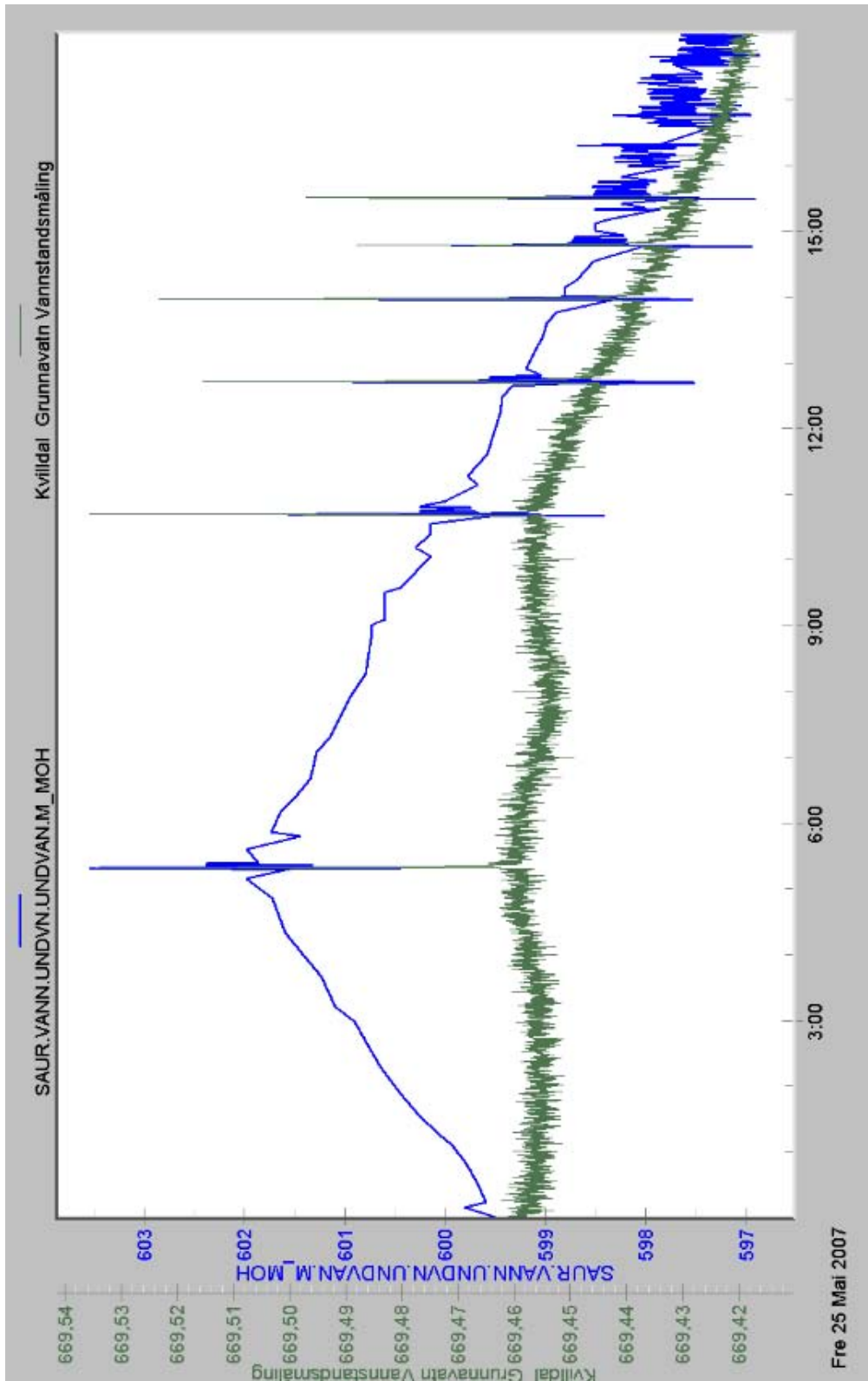




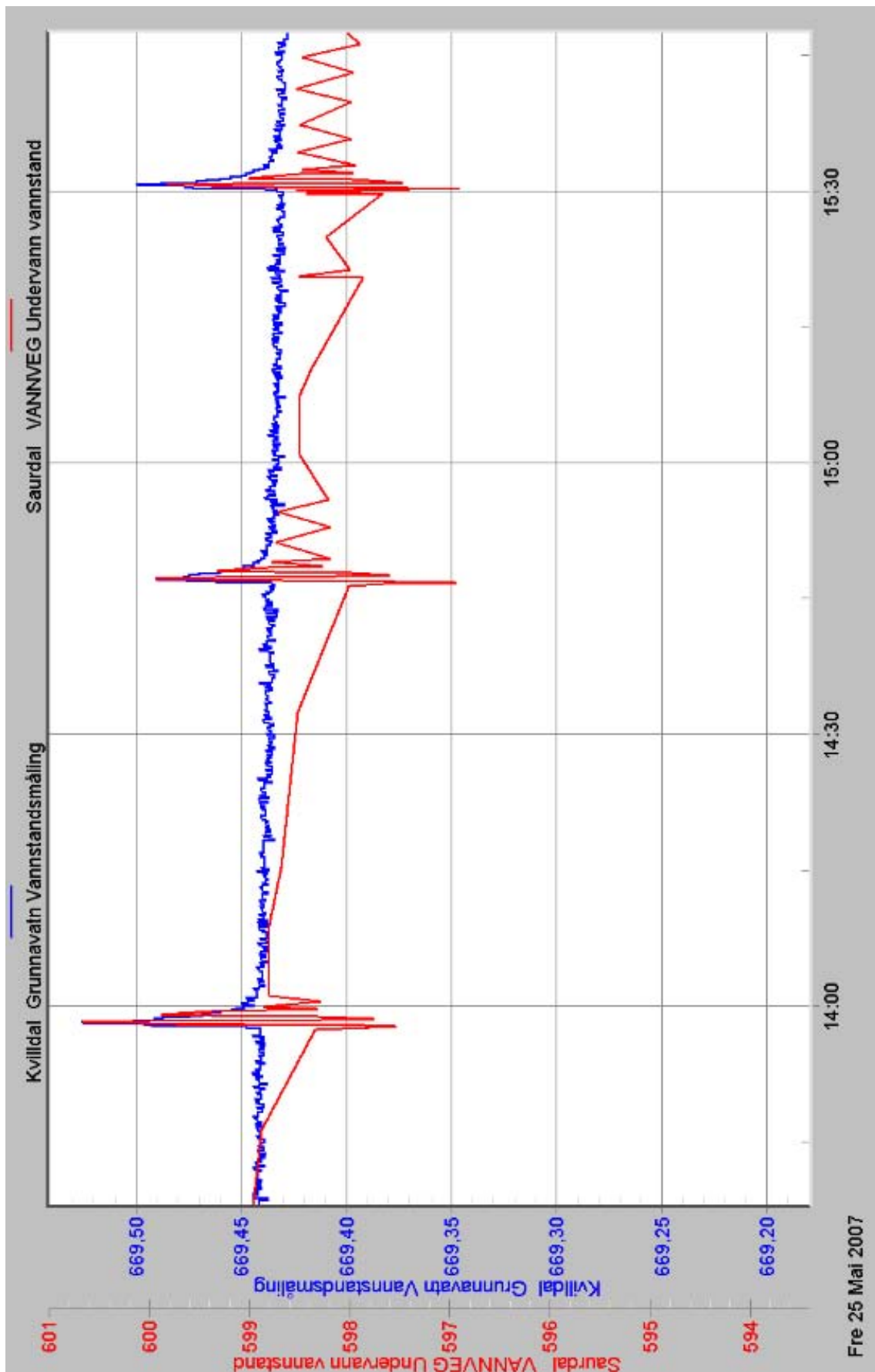




F Data for utblåsing på Holmaliåna 25. mai 2007

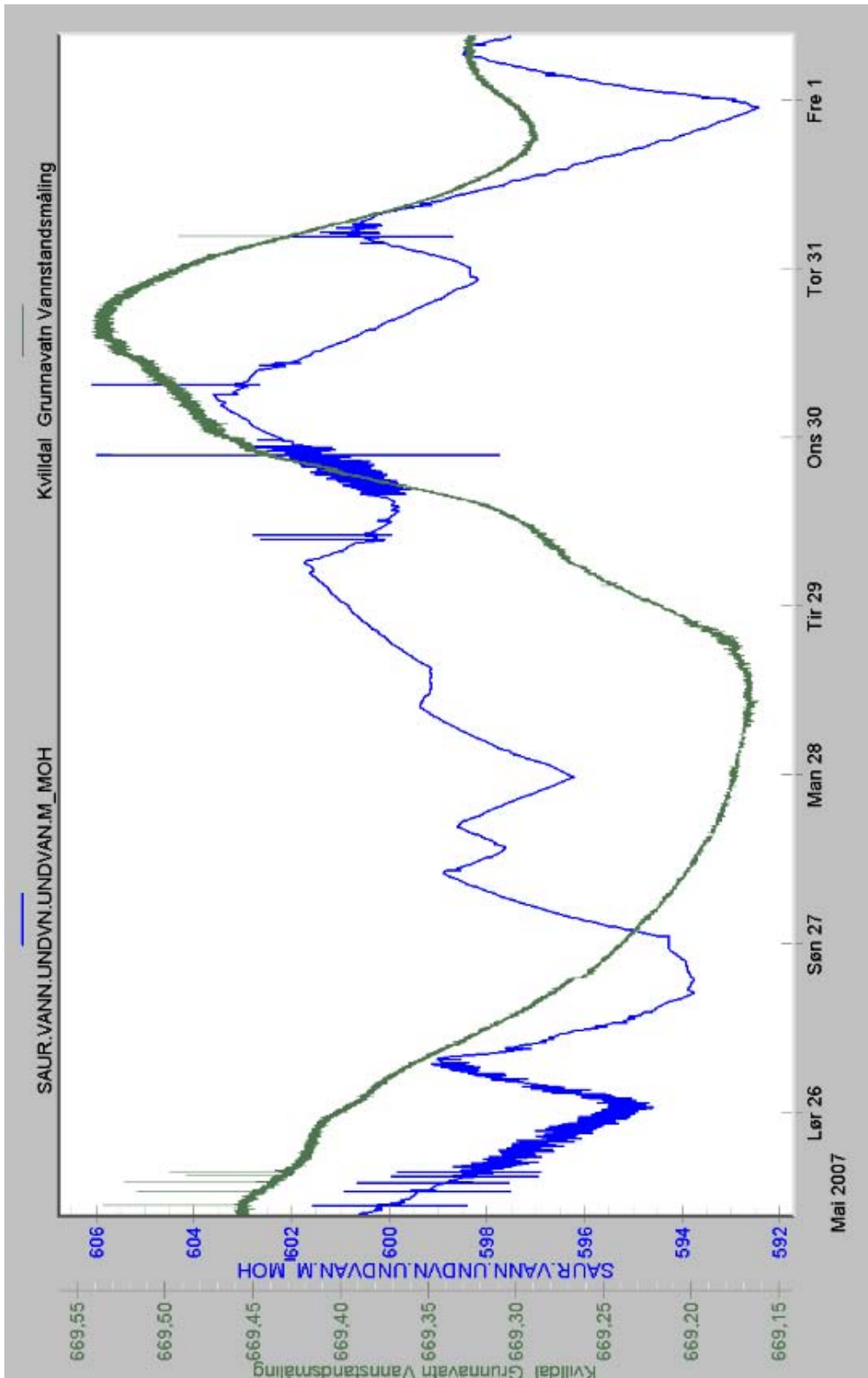








G Data for utblåsing på Holmaliåna 30. mai 2008





## H Oppgavetekst



1 av 4

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi  
Vassdragslaboratoriet, Institutt for vann- og miljøteknikk

---

### MASTEROPPGAVE våren 2009 for

Stud techn. Ragnhild Utvik Gjerde

#### Luftproblem i bekkeinntak.

Modellstudie av retur av luft og vurdering av inntak Holmaliåna.

#### Bakgrunn

Det er mange problem med luft i tilknytning til bekkeinntak. Luft som rives med og blandes inn i vannet i den øvre delen av sjakten, kan bli ført inn i tunnelsystemet der den samler seg i luftlommer. Luftlommene kan føre til ekstra falltap, til redusert kapasitet og til kraftige utblåsninger. Dette er uønsket av hensyn til driften av kraftverket, og fordi det utgjør en fare for folk nær inntaket.

Det er ønskelig å undersøke problemet nærmere, vurdere konsekvensene og foreslå tiltak for å utbedre probleminntak.

Morten Skøglund hos Trønder Energi AS har undersøkt luftproblem ved bekkeinntak på oppdrag fra Statkraft Energi AS. Arbeidet med masteroppgaven vil bli knyttet til Mortens arbeid, og han vil ta en stor del av veiledningen.

Ragnhild Utvik Gjerde og Ragnhild Hoel har nettopp fullført hver sin prosjektoppgave om luftproblem i bekkeinntak. Masteroppgaven er en videreføring av prosjektet.

---

**Postadresse**  
7491 Trondheim

**Org.nr.** 974 767 880  
**E-post:**  
ivm-info@ivt.ntnu.no  
<http://www.ivt.ntnu.no/ivm/>

**Besøksadresse**  
S.P.Andersens veg 5  
Valgrinda

**Telefon**  
+47 73 59 47 51  
**Telefaks**  
+47 73 59 12 98

### **Oppgaver**

Oppgavene som skal løses gjennom masterarbeidet er beskrevet under. Kandidaten skal bruke teoretiske betraktninger, laboratorieforsøk og data fra eksisterende inntak.

#### **Litteraturstudium**

Litteraturstudiet skal omfatte:

- Gjennomgang og av litteratur om luftproblem i bekkeinntak med hovedvekt på problemstillingene i denne oppgaven.
- Gjennomgang av tidligere modellstudier, sammenfatning av metoder, problem og resultat.
- Gjennomgang av metoder og problem knyttet til laboratoriestudier av luft-vann problem, herunder skalering, skalaeffekter, målemetoder, praktiske problem og løsninger.
- Gjennomgang og systematisering av relevante prototypmålinger.

Studien skal lede fram til anbefalinger for gjennomføring av modellstudien.

#### **Planlegging av modellstudie**

Luftlomme, retur av luft og luftutblåsning vil bli studert i modell. Kandidaten skal planlegge og delta i bygging av modellen. Kandidaten må kombinere kunnskap om luftproblem, modellstudier, målemetoder, skalering og skalaeffekter med praktiske tillempinger som er nødvendig for modellbygging. På den måten får oppgaven en betydelig praktisk del, i tillegg til den teoretiske.

#### **Luftlommen nederst i sjakten**

I modellstudien skal kandidaten undersøke hvordan luftlommen nederst i sjakten, herunder hvordan lommen dannes og utvikler seg, lommens form og utbredelse, lufttransport og stabilitet. Observasjonene skal sammenliknes med teori, resultat fra tidligere studier og målinger i prototyp (hvis tilgjengelig).

Kandidat og faglærer vil detaljere oppgaven etter at litteraturstudien er ferdig.

#### **Retur av luft**

I modellstudien skal kandidaten undersøke retur av luft fra luftlommen og opp gjennom sjakten, herunder betingelsene for retur av luft, hva som påvirker hvordan luften returnerer og hvordan luftretur påvirker trykkforholdene i systemet. Observasjonene skal sammenliknes med teori, resultat fra tidligere studier og målinger i prototyp (hvis tilgjengelig).

Kandidat og faglærer vil detaljere oppgaven etter at litteraturstudien er ferdig.

#### **Luftutblåsning**

Kandidaten skal undersøke luftutblåsning gjennom sjakten, både teoretisk og gjennom en modellstudie. Forhold som skal studeres er hvilke forhold som utløser luftutblåsning og hva som påvirker utblåsningens omfang. Observasjonene skal sammenliknes med teori, resultat fra tidligere studier og målinger i prototyp (hvis tilgjengelig).

Kandidat og faglærer vil detaljere oppgaven etter at litteraturstudien er ferdig.

### **Inntak Holmaliåna**

Holmaliåna er et bekkeinntak i Ulla – Førre systemet der stadig kommer utblåsing. Statkraft har samlet data om utblåsingene, blant annet trykkmålinger og videoopptak.

Kandidaten skal analysere inntakets oppførsel og vurdere hvordan beregninger stemmer med det som er observert. Kandidaten skal foreslå og dimensjonere tiltak for å hindre utblåsing.

### **Generelt**

Teksten over er en ramme for kandidatens arbeid. Når man ser hvordan arbeidet går kan det bli nødvendig å justere oppgavene. Evt. justeringer skal skje i samråd med veileder og faglærer ved instituttet.

Normert arbeidsbelastning for masteroppgaven er 30 studiepoeng som tilsvarer 20 ukers arbeid.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundigheten i bearbeidingen, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

### **Besvarelsen**

Besvarelsen skal ha sammendrag, innholdsfortegnelse (med fortegnelse over evt. vedlegg og bilag), symbolliste og komplett paginering. Omslaget skal ha standard NTNU-utføring.

Alt kildemateriale som ikke er av generell karakter, skal angis slik at man uten problemer kan finne tilbake til kilden. Dette gjelder også opplysninger og informasjon som er gitt muntlig.

En kopi av denne oppgaveteksten skal legges ved oppgaven.

Instituttet vil ha full rett til å bruke resultatene av arbeidet, som om det var utført av en ansatt under den ordinære arbeidsbelastning. Bruk av resultatene til publisering etc. kan bare skje i samarbeid med og etter avtale med faglærer og student (og eventuelt eksterne samarbeidspartner).

Følgende skal leveres:

To trykte, innbundne kopier av oppgaven.

En CD som inneholder

- Hele besvarelsen, inkludert vedlegg og omslag som en høykvalitets PDF-fil.
- Hele besvarelsen som Word-fil eller liknende (RTF).
- Alt viktig grunnlag, for eksempel video, bilder, beregninger og tegninger.

**Innleveringsfrist:**

Fristen framgår av eget uttaksskjema.

**Veileder:**

I. amanuensis Lars Jensen

**Evt. ekstern kontakt:**

Morten Skoglund, TrønderEnergi AS

Institutt for vann- og miljøteknikk

Dato: 19/1-2009

Lars Jensen  
Faglærer

## H.1 Kommentar til oppgavetekst

En del av oppgaveteksten omfatter å undersøke hvordan luftretur påvirker trykkforholdene i tunnelen. Dette er beskrevet under punktet *Retur av luft*. Dette er ikke utført på grunn av mangel på tid.