

Poretrykk under betongdammer fundamentert på fjell

Marie Rognes

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Leif Lia, IVM

Medveileder: Grethe Holm Midttømme, NVE

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGAVE

Kandidat: *Marie Rognes*

Tittel: **PORETRYKK UNDER BETONGDAMMER FUNDAMENTERT PÅ FJELL**

1 BAKGRUNN

Dammer bygges for magasinering av vann. De fleste dammene i Norge er bygget i forbindelse med vannkraftproduksjon. NVE har registrert ca. 3 600 dammer som er underlagt forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg, Damsikkerhetsforskriften. En stor andel av disse er betongdammer. For massive betongdammer er oppdrift en stor drivende kraft. Svært få, om noen, betongdammer i Norge har data som dokumenterer virkelig poretrykk under dammen, så beregninger av stabilitet må baseres på teoretiske antakelser om poretrykket. Det kan virke som det har vært utført lite forskning på dette og dermed er det usikkert om de teoretiske poretrykksdiagrammene som benyttes ved stabilitetsberegninger gjenspeiler de virkelige forhold. Av hensyn til at alle dammer skal revurderes jevnlig, og at poretrykket har stor innvirkning på dammers stabilitet, vil det være interessant å skaffe mer kunnskap om poretrykk under betongdammer fundamentert på fjell slik at man får et sikrere grunnlag for å vurdere behov for tiltak på dammene. Det er særlig fundamentforholdene og konstruksjonsmessige tiltak som påvirker poretrykkets størrelse.

2 HOVEDPUNKT I STUDIEN

Opgaven skal dekke, men ikke nødvendigvis være begrenset til hovedspørsmålene nedenfor:

1. Internasjonalt litteraturstudium på betongdammers oppdrift. Gi en detaljert beskrivelse av den eller de publikasjonene som virker mest relevant for norske forhold. Vurder også hvordan dette kan overføres til norske forhold. Gi en vurdering av hvilke parametere som har størst betydning for poretrykksdiagrammet.
2. Internasjonalt er det utført poretrykksmålinger på mange betongdammer. Velg noen relevante av disse målingene og vurder målt poretrykk i sammenheng med bl.a fundamentforholdene, konstruktive tiltak etc. Gi også en vurdering av om disse verdier er relevante for norske forhold og om de kan danne grunnlag for innspill til norsk regelverk. Kommenter særlig kravene gitt i tabell 7-2-2 i Damsikkerhetsforskriften.

3. Beskriv, gjerne med hjelp av beregninger, hvordan oppdrift benyttes i stabilitetsberegningene i noen land/organisasjoner og sammenlign den beregnede stabiliteten med norske krav.
4. Undersøk hvordan etterinstrumentering av poretrykkmålinger er utført på eksisterende dammer, og skisser hvordan dette kan gjøres i praksis. Gi samtidig en begrunnet vurdering av hvor mange/hvilke typer norske dammer som bør etterinstrumenteres for måling av poretrykk.

3 VEILEDNING, DATA OG INFORMASJON

Professor Leif Lia vil være hovedveileder for oppgaven. Dr.ing. Grethe Holm Midttømme vil være medveileder og sammen vil de veilede arbeidet med oppgaven og assistere kandidaten.

Diskusjon med og bidrag fra kolleger og medarbeidere ved NTNU, SINTEF, NVE, og andre nasjonale og internasjonale dameiere, myndigheter eller forskningsinstitusjoner anbefales. Bidrag av betydning skal alltid refereres til på behørig måte.

Vurderingene og analysene som er utført av kandidatene i forbindelse med oppgaven må vurderes ut fra at arbeidet er en del av studiene som kreves for tildeling av graden Master i teknologi. Kandidatene og veileder står derfor fritt til å introdusere antagelser og begrensninger som i en profesjonell forsknings- eller konsulentkontekst kunne ses på som urealistisk eller lite relevant.

4 RAPPORTFORMAT, REFERANSER OG ERKLÆRING

Opgaven skal skrives i et tekstbehandlingsprogram og figurer, tabeller, foto etc. skal være av god rapportkvalitet. Rapporten skal inneholde et sammendrag, en innholdsliste, en liste over figurer og tabeller, en litteraturliste og opplysninger om andre relevante referanser. Sammendraget skal ikke overskride 450 ord og skal være egnet for elektronisk rapportering. Elektroniske data fra modellforsøk (f. eks. video og rådata fra måleutstyr) skal innleveres elektronisk på en ryddig og strukturert måte. Oppgaven skal leveres som pdf i DAIM og trykkes i tre eksemplar som leveres faglærer/institutt.

Masteroppgaven skal ikke leveres senere enn tirsdag 10. juni 2014.

Trondheim, 14. januar 2014



Leif Lia
Professor

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2014 som den avsluttende delen av mastergraden min i Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet (NTNU). Oppgaven er skrevet ved Institutt for vann- og miljøteknikk med fordypning innen vassdragsteknikk.

I forbindelse med masteroppgaven gjennomførte jeg en studietur til Tyskland for befarings av to dammer, dam Klingenberg og dam Gottleuba. Jeg vil gjerne takke Jan Kittler i Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) som arrangerte befaringsen og ga meg gode faglige innspill. En stor takk også til Den norske damkomité for økonomisk støtte til studieturen.

Takk til alle som har bidratt med måledata fra dammer i Norge, Tyskland og Østerrike; Anne Marit Håstein Ruud og Finn Arve Berget i Statkraft, Jan Kittler i LTV og Pius Oberhuber i Verbund Hydro Power AS. I tillegg vil jeg også takke Marie Westberg for bidrag med interessant litteratur.

Jeg vil takke mine to veiledere Grethe Holm Midttømme i Norges vassdrags- og energidirektorat og Leif Lia ved NTNU. Som professor i vannkraft- og vassdragsteknikk var det Leif sine gode forelesninger som gjorde at jeg fikk interessen for fagområdet. Videre har han bidratt med gode faglige innspill under oppgaveskrivingen. En stor takk til Grethe som har hatt rollen som min hovedveileder. Hun har med sitt engasjement om oppgavetemaet vært til stor hjelp og motivasjon gjennom hele prosessen. Hun har satt meg i kontakt med flere av bidragsyterne til denne oppgaven og via hennes gode kontakter i LTV fikk jeg gleden av å gjennomføre studieturen til Tyskland.

Til slutt vil jeg gjerne takke Steinar Fredriksen for motivasjon under oppgaveskrivingen og hjelp til korrekturlesning. Og takk til alle på Verkstedloftet for godt samhold og mange morsomme stunder på kontorene!

Trondheim, 9. juni 2014



Marie Rognes

Sammendrag

Oppdrift skapes når vann trenger inn i sprekker i damfundamentet. Vanntrykket i sprekken, kalt poretrykk, skaper en vertikal kraft som løfter dammen.

Formålet med denne oppgaven er å vurdere hvilke parametere som har størst betydning for fordelingen av poretrykk i et damfundament. Vurderingen er basert på et internasjonalt litteraturstudie og en analyse av poretrykksmålinger. I analysen er det benyttet poretrykksmålinger fra fire gravitasjonsdammer på fjellfundament i Norge, Tyskland og Østerrike. En befaring er gjennomført ved to av dammene.

Oppgavens andre formål er å gi innspill til det norske regelverket om beregning og måling av poretrykk. Innspillene er basert på en sammenligning av stabilitetsberegninger etter regelverket i Norge, Sverige og Sveits. Basert på resultatene fra de to formålene er det vurdert om etterinstrumentering av poretrykk bør tas i bruk ved revurdering av dammer i Norge.

Resultatene i oppgaven viser at egenskapene i damfundamentet i stor grad påvirker poretrykket. Egenskapene, og dermed poretrykket, varierer ofte langs dammens lengdeakse. Selv små sprekker kan påvirke poretrykket mye.

Poretrykket i oppstrøms ende av fundamentet endres mer direkte ved vannstandsendringer enn poretrykket lengre nedstrøms i fundamentet. Det er ikke funnet når en endring i poretrykket oppstår i forhold til en endring i oppstrøms vannstand. Tidligere studier gir ulike konklusjoner. Sammenheng bør derfor undersøkes nærmere i videre studier.

Drenasjesystem er den beste metoden for å redusere poretrykk i et damfundament. Inspeksjonsgangen, som drenasjehullene bores fra, bør plasseres i oppstrøms ende av dammen og nære fundamentet. Injeksjonsskjermer har svært varierende effekt og avhenger mye av utformingen. De bør derfor benyttes som en ekstra sikkerhet framfor som et poretrykksreducerende tiltak.

Dagens krav til poretrykksmålinger i Damsikkerhetsforskriften (2009) samsvarer godt med sikkerhetsfaktorene for stabilitetsberegninger. I Norge måles poretrykk ved svært få dammer. Det er hovedsakelig fordi kravene til poretrykksmålinger i Damsikkerhetsforskriften ikke er strenge, men også fordi kravene er vage. I stedet gir Damsikkerhetsforskriften høye sikkerhetsfaktorer for stabilitetsberegninger. Det gir en bedre sikkerhet enn bruk av poretrykksmålinger, da poretrykket kun måles i utvalgte punkter og størrelsen kan variere mellom punktene.

Damsikkerhetsforskriften deler behovet for instrumentering inn i to grupper basert på godt eller dårlig fjell. Det er behov for en definisjon av begrepet “godt fjell”, eller mer

spesifikke krav til hvilke egenskaper som kreves for at damfundament skal tilhøre den ene eller andre gruppen.

Etterinstrumentering av poretrykksmålere kan være en løsning for dammer som må rehabiliteres og hvor rehabiliteringen er dyr. Instrumentering krever et omfattende nettverk av poretrykksmålere og god kunnskap om fundamentets egenskaper, så det kan vurderes om de målte poretrykksverdiene gjelder for hele damfundamentet. Hvis målte verdier av poretrykket skal benyttes i stabilitetsberegninger ved en rehabilitering må det fastsettes hvor mange målepunkt som bør benyttes og hvor stor sikkerhetsfaktor det er fornuftig å benytte ved beregning av oppdriften.

Abstract

Uplift is caused by water penetrating into discontinuities in a dam foundation. The water pressure in the discontinuities, called the pore pressure, creates a vertical force which lifts the dam.

The purpose of this thesis is to evaluate different parameters which impact the distribution of pore pressure in a dam foundation. The evaluation is based on an international literature study and an analysis of pore pressure measurements. The analysis is based on pore pressure measurements from four gravity dams on rock foundation.

The other purpose of this thesis is to give suggestions to the Norwegian regulations on calculation and measurement of pore pressure. The suggestions are based on a comparison of stability calculations based on the regulatory rules in Norway, Sweden and Switzerland. Based on the results of these two purposes it is evaluated if measurements of pore pressure should be used when reassessing dams in Norway.

The results in this thesis show that the properties in dam foundation affect the pore pressure. The properties of the dam foundation, and thus pore pressure, often vary along the dam. Even small discontinuities can have an impact on the pore pressure.

Based on the result from this thesis, it is not possible to find a relation between changes in pore pressure and a change in the upstream water level. Former studies provide different conclusions. The relationship should be investigated further.

A drainage system is the best method to reduce pore pressure in a dam foundation. The gallery should be placed in the upstream end of the dam and near the foundation. Grout curtains have a varying effect and should only be used as an extra safety measure.

The current requirements for pore pressure measurements in “Damsikkerhetsforskriften” (2009) correspond well with the level of the safety factors for stability calculations. In Norway, pore pressure is measured at very few dams. This is mainly because the requirements for pore pressure measurements in “Damsikkerhetsforskriften” are mild, but also because the requirements are not clear. Instead, “Damsikkerhetsforskriften” gives high safety factors for stability calculations. High safety factors provides a better security than the use of pore pressure measurements, since the pore pressure is measured only in selected points in the dam foundation, and the size of the pore pressure can vary between the points.

The requirement for pore pressure measurements in “Damsikkerhetsforskriften” are based on the quality of the rock in the dam foundation. The terms used in “Damsikkerhetsforskriften” to describe the rock foundation are not clear and they should be

specified.

Pore pressure measurements at older dams can be a good solution instead of rehabilitating the dam. Measuring the pore pressure in a dam foundation requires good knowledge of the foundations properties. If measured values of the pore pressure are used in stability calculations of the dam, it is necessary to use a high safety factor when calculating the uplift pressure.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	iv
Abstract	vi
Symbolliste	xi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 Oppgavens hovedpunkter og avgrensninger	2
2 Poretrykk	3
2.1 Poretrykk i løsmasser	3
2.2 Poretrykk i fjellfundament	11
2.3 Konstruktive tiltak for å redusere poretrykk	20
2.4 Instrumentering av poretrykk	24
3 Regelverk	29
3.1 Norge	29
3.2 Sverige	33
3.3 Sveits	37
4 Håndtering av poretrykk ved fem dammer	41
4.1 Ringedalsdammen	41
4.2 Dam Gottleuba	44
4.3 Dam Klingenberg	48
4.4 Dam Großer Mühdorfer See	52
4.5 Dam Skarsfoss	54
5 Analyse av poretrykksmålinger	55
5.1 Ringedalsdammen	57
5.2 Dam Gottleuba	58
5.3 Dam Klingenberg	59
5.4 Dam Großer Mühdorfer See	60

6	Stabilitetsberegninger	63
6.1	Eksempeldam	63
6.2	Lastsituasjon	65
6.3	Beregninger med teoretisk poretrykksdiagram	66
6.4	Beregninger med målte poretrykksdiagram	66
7	Resultater	67
7.1	Resultater fra analyse av poretrykksmålinger	67
7.2	Resultater fra stabilitetsberegninger	80
8	Diskusjon	85
8.1	Parametere som påvirker poretrykket	85
8.2	Vurdering av regelverk	89
8.3	Instrumentering av poretrykk	90
9	Konklusjon	93
	Referanser	95
	Vedlegg	101
A	Befaringsrapport	103
B	Håndtering av poretrykk	123
C	Analyse av poretrykksmålinger	125
D	Stabilitetsberegninger	147
E	Resultater fra poretrykksanalyse	149

Figurer

2.1	Strømlinje under en tett vegg med hydrostatisk vanntrykk	4
2.2	Potensialets komponenter	5
2.3	Strømlinjer og ekvipotensiallinjer utgjør et strømnett	6
2.4	Sammenheng mellom hastighet, gradient og permeabilitet	7
2.5	Kontrollvolum i et strømnett	8
2.6	Strømnett under en betongdam	10
2.7	Poretrykksdiagram for en betongdam på homogene løsmasser	10
2.8	Oppdrift ved varierende permeabilitet i fundamentet	16
2.9	Poretrykk ved økende oppstrøms vannstand	17
2.10	Eksempeldam	18
2.11	Effekt av injeksjonsskjerm	21
2.12	Strømnettet under en betongdam uten injeksjonsskjerm	21
2.13	Strømnettet under en betongdam med injeksjonsskjerm	21
2.14	Generell utforming av drenasjesystem	22
2.15	Strømnettet under betongdam med drenasjesystem	23
2.16	Optimal plassering av inspeksjonsgang	23
2.17	Drenasjesystemets innvirkning på poretrykk	24
2.18	Standrør og trykkipiezometer med trykkmåler	27
3.1	Oppdrift under gravitasjonsdam	30
3.2	Oppdrift under gravitasjonsdam med drenasjesystem	31
3.3	Oppdrift under gravitasjonsdam	34
3.4	Oppdrift under gravitasjonsdam, dren.sys. og inspeksjonsgang på fundament	35
3.5	Oppdrift under gravitasjonsdam, dren.sys. og inspeksjonsgang i dam	35
3.6	Oppdrift under gravitasjonsdam med injeksjonsskjerm	35
3.7	Oppdrift under gravitasjonsdam	38
3.8	Alternativ beregning av oppdrift under gravitasjonsdam	38
4.1	Tverrsnitt av Ringedalsdammen	42
4.2	Tverrsnitt av Ringedalsdammen med plassering av poretrykksmålere	43
4.3	Nedstrøms side av dam Gottleuba sett fra høyre vederlag	44
4.4	Tverrsnitt av dam Gottleuba	45
4.5	Opp ned “potte” over målepunkt	46
4.6	Inspeksjonsgang i dam Gottleuba med poretrykksmålere	47
4.7	Topp av standrør	47
4.8	Nedstrøms side av dam Klingenberg sett venstre vederlag	48
4.9	Tverrsnitt av dam Klingenberg	49
4.10	Poretrykksmåler benyttet ved dam Klingenberg	51
4.11	Tverrsnitt av dam Großer Mühldorfer See	53

4.12	Dam Skarsfoss under bygging	54
5.1	Eksempel på analyse av måledata	56
5.2	Plotting av poretrykksmålinger	57
5.3	Utsnitt av poretrykksdata for Ringedalsdammen	58
5.4	Utsnitt av poretrykksdata for dam Gottleuba	59
5.5	Eksempel på måledata fra dam Großer Mühdorfer See	61
6.1	Eksempeldam med forenklet tverrsnitt av dam Kjårdavatn	64
6.2	Lastsituasjon	65
7.1	Poretrykk og vannstandsendringer, Ringedalsdammen (snitt 1)	69
7.2	Poretrykk og vannstandsendringer, Ringedalsdammen (snitt 2)	69
7.3	Poretrykk og vannstandsendringer, dam Klingenberg (snitt 3)	70
7.4	Poretrykk og vannstandsendringer, dam Klingenberg (snitt 5)	71
7.5	Poretrykk og vannstandsendringer, dam Großer Mühdorfer See (snitt 15)	72
7.6	Poretrykk og vannstandsendringer, dam Großer Mühdorfer See (snitt 21)	72
7.7	Plotting av poretrykksmålinger	73
7.8	Poretrykk og temperaturendring, dam Klingenberg (snitt 3)	74
7.9	Poretrykk og temperaturendring, dam Gottleuba (snitt 1)	74
7.10	Poretrykk og temperaturendring, dam Großer Mühdorfer See (snitt 15)	75
7.11	Poretrykk og temperaturendring, dam Großer Mühdorfer See (snitt 21)	75
7.12	Innvirkningen av drenasjesystem, dam Gottleuba (snitt 1)	76
7.13	Generelt poretrykksdiagram, Ringedalsdammen (alle snitt)	77
7.14	Generelt poretrykksdiagram, dam Klingenberg (alle snitt)	78
7.15	Generelt poretrykksdiagram, dam Großer Mühdorfer See (alle snitt)	79
7.16	Poretrykksdiagram: Uten drenasjesystem	81
7.17	Poretrykksdiagram: Med drenasjesystem	82

Tabeller

2.1	Permeabilitet i en bergmasse basert på hyppigheten av sprekker	14
2.2	Vannets hastighet og tid som funksjon av fundamentets permeabilitet	19
6.1	Mål for eksempeldam benyttet i stabilitetsberegninger	64
6.2	Forutsetninger benyttet i stabilitetsberegninger	65
7.1	Resultater for stabilitetsberegninger med teoretisk poretrykksdiagram	80
7.2	Resultater for stabilitetsberegninger med målte poretrykksdiagram	83

Symbolliste

Symbol	Enhet	Forklaring
γ_b	kN/m^3	Betongs tyngdetetthet
γ_L	-	Lastkoeffisient
γ_w	kN/m^3	Vannets tyngdetetthet
λ	-	Reduksjonsfaktor for oppstrøms vanntrykk
ν	m^2/s	Kinematisk viskositet
Σ	-	Summetegn
ϕ	$^\circ$	Friksjonsvinkel
A	m^2	Tverrsnittsareal
a	m	Resultant av krefter, momentarm
B, b	m	Bredde
B_b	m	Bredde av damfot
B_n	m	Bunnbredde nedstrøms drenasjeplanet
B_o	m	Bunnbredde oppstrøms drenasjeplanet
e	m	Sprekkåpning
F_h	kN	Horisontal kraft
F_v	kN	Vertikal kraft
G	kN/m	Tyngde
g	m/s^2	Tyngdeakselerasjon
H	m	Totalt ekvipotensialfall, største damhøyde
h	m	Vanndybde
Δh	m	Endring i potensial
h'	m	Vanndybde i standrør
h_0	m	Total energihøyde
h_1	m	Oppstrøms vanndybde
h_2	m	Nedstrøms vanndybde
i	-	Gradient
K	m^2	Permeabilitet
k	m/s	Permeabilitetskoeffisient
k_{dren}	-	Reduksjonsfaktor for drenasjeplan
Δl	m	Lengde av strømlinje

Symbol	Enhet	Forklaring
M_s	kNm	Stabiliserende moment
M_v	kNm	Veltende moment
N_d	-	Antall ekvipotensialfall
P	kN/m	Oppdrift
Q	m ³ /s	Vannføring
q	m ² /s	Vannføring per lengdeenhet
S	m	Sprekkavstand
S_g	-	Sikkerhetsfaktor mot glidning
S_v	-	Sikkerhetsfaktor mot velting
t	sek	Tid
u	kN/m ²	Poretrykk
u_1	kN/m ²	Poretrykk i oppstrøms ende av dammen
u_2	kN/m ²	Poretrykk i nedstrøms ende av dammen
u_{dren}	kN/m ²	Poretrykk i drenasjeplan
$V_{h,n}$	kN/m	Horisontalt vanntrykk nedstrøms dammen
$V_{h,o}$	kN/m	Horisontalt vanntrykk oppstrøms dammen
V_v	kN/m	Vertikalt vanntrykk
v	m/s	Hastighet
v_{porer}	m/s	Hastighet i porer
w	kN/m ²	Hydrostatisk vanntrykk
z	m	Stedshøyde

Kapittel 1

Innledning

I Norge har dammer blitt bygget i lang tid. De første kartlagte dammene her i landet er fra 1600-tallet. Det totale antallet dammer i Norge i dag er ukjent, men Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har registrert om lag 3 600 dammer som er underlagt deres forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg, Damsikkerhetsforskriften (2009). Av dammene brukes rundt 70 % til vannkraftproduksjon (Nynäs, 2013).

I denne oppgaven skal oppdriften under betongdammer på fjellfundament studeres nærmere. Oppdrift skapes ved at vann trenger inn i sprekker og porer i fjellet under dammen og skaper en vertikal kraft som løfter dammen opp. Oppdriften er derfor en drivende kraft som gjør dammen ustabil. Fordelingen av trykket i fundamentet, kalt poretrykk, avhenger av flere parametere og kan ha stor variasjon for ulike damsteder.

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Sikkerhet ved damanlegg er viktig da et eventuelt dambrudd kan få store konsekvenser. Det stilles derfor tekniske krav til dammene underlagt Damsikkerhetsforskriften (2009). De tekniske kravene medfører at mange eldre dammer må rehabiliteres for å oppfylle dagens krav. Det kan gi økonomiske konsekvenser for dameiere. For å kunne senke kostnadene og øke sikkerheten ved dambygging er det derfor av interesse å ha mest mulig kunnskap om kreftene som virker på dammen.

Oppdriften under en betongdam har stor innvirkning på dammens stabilitet. Det kan virke som det har vært utført lite forskning på temaet i Norge tidligere. Det er svært få betongdammer i Norge hvor måling av poretrykk i fundamentet gjennomføres og derfor er det usikkert om den teoretiske fordelingen av poretrykket som benyttes ved stabilitetsberegninger i regelverket gjenspeiler de virkelige forholdene i fundamentet. Dersom mer kunnskap om poretrykket er tilgjengelig vil det gi et sikrere grunnlag både ved revurdering av dammer og ved nybygging. Det vil ha stor betydning både sikkerhetsmessig og økonomisk. Hvis økt kunnskap om poretrykket også kan gjøre at færre dammer må rehabiliteres vil det spare miljøet for materialbruk og utslipp.

1.2 Oppgavens hovedpunkter og avgrensninger

Denne oppgaven har to hovedformål. Det første formålet er å vurdere hvilke parametere som har størst betydning for fordelingen av poretrykk i et damfundament. Det ses hovedsakelig på egenskaper i fundamentet og konstruktive tiltak. Vurderingen skal baseres på et internasjonalt litteraturstudie og en analyse av poretrykksmålinger fra fire gravitasjonsdammer på fjellfundament.

Det andre hovedformålet er å gi innspill til det norske regelverket om beregning og instrumentering av poretrykk. Særlig kravene i tabell “7-2.2 Instrumentering og måling av dammer” i Damsikkerhetsforskriften (2009) skal kommenteres. Tabellen gir en oversikt over hvilke dammer som bør instrumenteres for poretrykk. Innspillene til regelverket skal baseres på en sammenligning av det norske regelverket med regelverket i to andre europeiske land ved bruk av stabilitetsberegninger. Innspillene skal også baseres på resultatene og diskusjonen fra det første formålet.

Basert på resultatene og diskusjonen fra de to hovedformålene over skal det til slutt vurderes om eldre dammer i Norge bør etterinstrumenteres for måling av poretrykk, til bruk ved rehabilitering av dammene.

I forbindelse med oppgaven er det gjennomført en befaring ved to gravitasjonsdammer, Dam Klingenberg og Dam Gottleuba, i Tyskland. Turen ble finansiert av Den norske damkomité (NNCOLD). På befaringen ble det samlet inn informasjon som er benyttet i litteraturstudiet og i analysen av poretrykksmålinger. En befaringsrapport er lagt ved i vedlegg A.

Oppgaven er avgrenset til å se på poretrykket under gravitasjonsdammer av betong på fjellfundament. En gravitasjonsdam er definert som en dam som er avhengig av egen vekt for å være stabil mot velting og glidning (NVE, 2005a). Det er kun sett på poretrykket ved enkle lasttilfeller.

Kapittel 2

Poretrykk

I dette kapitlet presenteres bakgrunnsteorien som er benyttet i oppgaven og funnene fra litteraturstudiet. Kapitlet tar først for seg poretrykk i løsmasser og fjellfundament. Deretter beskrives to metoder for å redusere poretrykket under betongdammer og hvordan poretrykket i fjellfundament kan instrumenteres.

Teorien bygger på vannstrømning gjennom fundamentet. Det er kun sett på strømning for en todimensjonal situasjon.

2.1 Poretrykk i løsmasser

Dette delkapitlet tar for seg hva poretrykk er og hvordan det fordeler seg i løsmasser ved å se på vannstrømning gjennom grunnen. Ut i fra dette kan poretrykksfordelingen under en betongdam bestemmes og dermed også størrelsen på oppdriften under dammen.

2.1.1 Hydrostatisk vanntrykk

Når vann magasineres bak en dam utsettes dammen for et vanntrykk på de ytre flatene på oppstrøms side. Det forutsettes av vannet like oppstrøms dammen står i ro. Dermed blir vanntrykket hydrostatisk, som medfører at trykket øker lineært med vanndybden. Etter Emdal (2009) beregnes hydrostatisk vanntrykk som:

$$w = \gamma_w * h \quad (2.1)$$

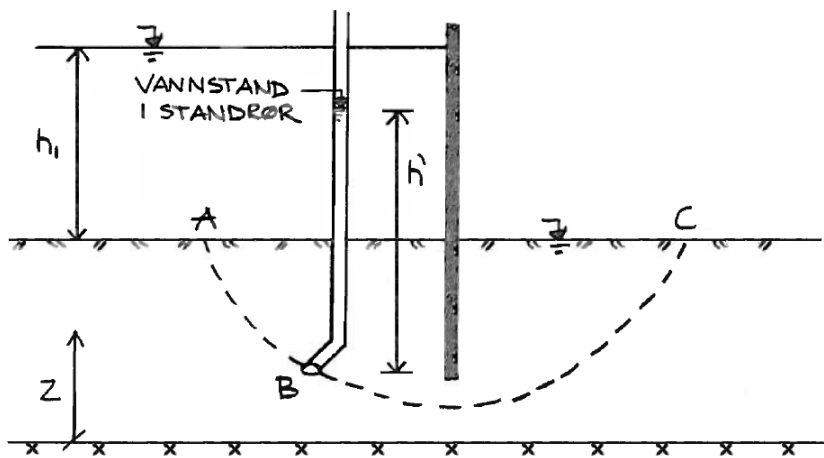
Hvor: w er hydrostatisk vanntrykk i kN/m^2 , γ_w er vannets tyngdetetthet lik 10 kN/m^3 og h er vanndybde i m.

Alle betongdammer og fundament har små sprekker og porer. Det ytre hydrostatiske vanntrykket medfører at vann trenger inn i porene og sprekke. Slik oppstår det et indre vanntrykk i dammen, i fundamentet og mellom dammen og fundamentet. Etter Emdal (2009) kalles dette indre vanntrykket for poretrykk. Videre er det kun sett på poretrykk i fundamentet og på flata mellom dammen og fundamentet.

2.1.2 Strømningsanalyse i løsmasser

Strømningsanalyse er teorien om hvordan vann strømmer gjennom grunnen. Den følgende teorien om strømningsanalyse gjelder for homogene løsmasser. Det vil si at egenskapene er lik i alle retninger (Emdal, 2009).

Figur 2.1 viser en tett vegg i løsmasser med et hydrostatisk vanntrykk. Det forutsettes at vannstanden oppstrøms vegg er konstant og at grunnvannsstanden er i nivå med terrengoverflata nedstrøms vegg. I en slik situasjon er det et hydrostatisk vanntrykk ved A og ingen vanntrykk ved C. Trykkforskjellen gjør at vannet beveger seg gjennom grunnen fra A til C. Vann som trenger ned i fundamentet ved A vil følge en buet linje under vegg og opp ved C, kalt en strømlinje (Emdal, 2009).



Figur 2.1: Strømlinje under en tett vegg med hydrostatisk vanntrykk^a

For hvert punkt på strømlinja kan poretrykket beregnes. Det kan gjøres ved bruk av standrør. Standrør er et rør som er åpent i begge ender. Røret stikkes ned i grunnen til ønsket dybde. Poretrykket i dette punktet gjør at vann stiger opp i standrøret til en høyde, h' . Poretrykket beregnes deretter likt som vanntrykket i ligning (2.1) (Emdal, 2009). Det gir:

$$u = \gamma_w * h' \quad (2.2)$$

Hvor: u er poretrykk i kN/m^2 og h' er vanddybde i standrøret i m.

Den totale energihøyden for et gitt punkt kan beskrives etter Bernoullis ligning for inkompressible væsker i stasjonær tilstand (Emdal, 2009), vist i ligning (2.3).

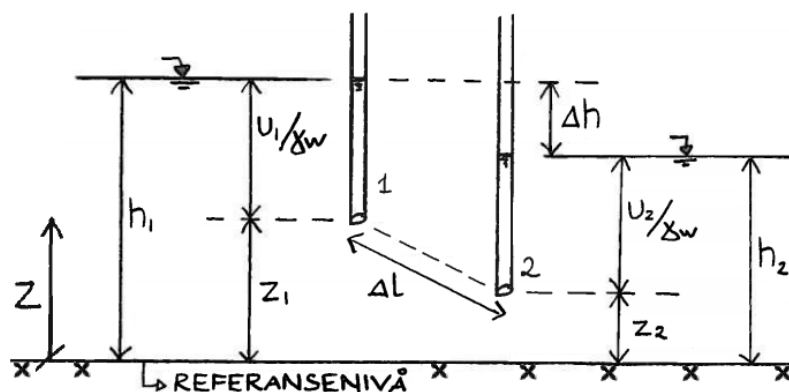
$$h_0 = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v_{porer}^2}{2 * g} \quad (2.3)$$

Hvor: h_0 er total energihøyde i m, z er stedshøyde målt fra et referansenivå i m, u/γ_w er trykkehøyde i m og $v_{porer}^2/(2 * g)$ er hastighetshøyde i m. v_{porer} er vannhastighet i porene i m/s og g er tyngdeakselerasjon i m/s^2 .

^aBasert på figur 5.4 i Emdal (2009)

Lav hastighet i porene gjør at hastighetshøyden kan neglisjeres (Bell, 2007; Emdal, 2009). Da blir energihøyden lik stedshøyden for et gitt punkt pluss trykkehøyden. Trykkehøyden tilsvarer da vanndybden i standrøret, h' , slik det er illustrert i figur 2.1.

Energi-høyden i et punkt kalles potensial. Vannet vil alltid strømme mot et lavere potensial, altså er det potensialforskjellen som driver vannet gjennom grunnen (Emdal, 2009). Figur 2.2 viser potentialets komponenter og hvordan potentialet avtar mellom punkt 1 og 2. Potensialtapet skyldes friksjon i grunnen (Bell, 2007).



Figur 2.2: Potensialets komponenter^b

Gradient og strømnnett

Gradienten mellom to punkter er gitt som endringen i potensial over avstanden mellom punktene, vist i ligning (2.4).

$$i = -\frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2.4)$$

Hvor: i er gradient, Δh er endring i potensial i m og Δl er lengde på strømlinje i m.

Figur 2.2 illustrerer hvordan endring i potensial, Δh , og avstanden mellom punktene, Δl , måles. Opp er definert som positiv retning. Dersom strømmingen går fra høyere til lavere potensial, altså fra punkt 1 til punkt 2 i figur 2.2, blir endringen i potensial negativ og dermed gradienten positiv.

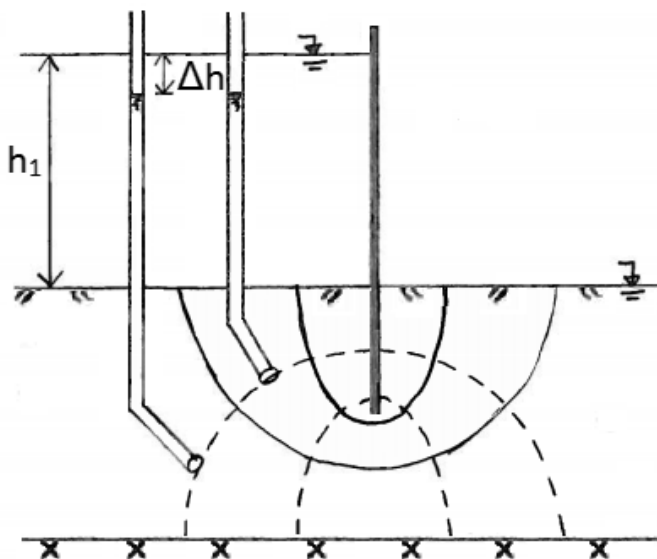
En vannpartikkel vil alltid strømme mot et lavere potensial og velge minste motstands vei. Dermed vil vannet alltid strømme i retning av den største gradienten. Strømlinje mellom to punkter viser derfor retningen på den største gradienten mellom punktene. Siden et gitt punkt kun har størst gradient i en gitt retning, kan ikke to strømlinjer krysse hverandre (Emdal, 2009).

Flere punkter i et fundament vil ha samme potensial. En linje som trekkes mellom sammenhengende punkter med samme potensial kalles en ekvipotensiallinje. Ved stasjonær tilstand vil et punkt kun ha et gitt potensial og dermed vil ikke ekvipotensiallinjene

^bBasert på figur 5.5 i Emdal (2009)

kunne krysse hverandre. Det er ingen strømming mellom punkter med samme potensial, altså langs ekvipotensiallinjene. Dermed vil gradienten langs linjene være $i = 0$. Siden en vannpartikkel alltid strømmer i retning av den største gradienten vil strømlinjene stå vinkelrett på ekvipotensiallinjene (Emdal, 2009).

Et sett av strømlinjer og ekvipotensiallinjer for en strømmingssituasjon kalles et strømnett. Ved bruk av grensebetingelser kan et strømnett for situasjonen i figur 2.1 lages. Ved en gitt vanddybde vil potensialet være konstant i horisontal retning. Det er derfor en ekvipotensiallinje langs fundamentflata både oppstrøms og nedstrøms veggen i figur 2.3. Langs faste overflater er det alltid en strøm av vannmolekyler. Det er derfor en strømlinje langs den tette veggen i fundamentet og langs overgangen mellom løsmasser og fjell (Emdal, 2009). Når det også er kjent at strømlinjer og ekvipotensiallinjer alltid står vinkelrett på hverandre kan et strømnett lages. Dette er illustrert i figur 2.3. Her er de stiplede linjene ekvipotensiallinjer og de heltrukne linjene er strømlinjer.



Figur 2.3: Strømlinjer og ekvipotensiallinjer utgjør et strømnett^c

Foreløpig kan ikke potensialfallet mellom ekvipotensiallinjene finnes ut fra strømnettet. Dersom potensialfallet er kjent kan fordelingen av vanntrykk i fundamentet, kalt poretrykk, bestemmes. Potensialfallet kan bestemmes ved å se på vannføring gjennom grunnen.

Vannføring gjennom grunnen

Vannføring gjennom grunnen kan beskrives ved Darcys lov, vist i ligning (2.5).

$$Q = -k * A * \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2.5)$$

Hvor: Q er vannføring i m^3/s , k er permeabilitetskoeffisienten i m/s og A er tverrsnittsareal i m^2 .

^cBasert på figur 5.17 i Emdal (2009)

Permeabilitetskoeffisienten, k , beskriver vannets strømningshastighet gjennom et materiale og beregnes som vist i ligning (2.6) (Verruijt, 1982).

$$k = K * \frac{g}{\nu} \quad (2.6)$$

Hvor: K er permeabilitet i m^2 og ν er kinematisk viskositet i m^2/s .

Som ligningen viser avhenger permeabilitetskoeffisienten både av materialets egenskaper gjennom permeabiliteten og væskens egenskaper gjennom den kinematiske viskositeten. Permeabiliteten til et materiale avhenger i stor grad av porøsiteten, som er definert som volumforholdet mellom porer og fast stoff i materialet (Emdal, 2009). Dersom motstanden mot vanngjennomstrømning er lik i alle retninger har materialet isotropisk permeabilitet. Den kinematiske viskositeten endrer seg med temperaturen og dermed avhenger permeabilitetskoeffisienten også av temperatur (Verruijt, 1982).

Videre kan vannføring også beregnes etter ligning (2.7):

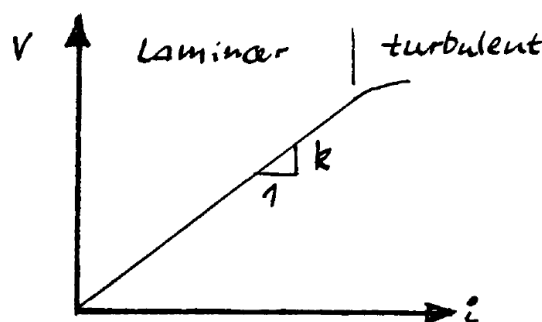
$$Q = v * A \quad (2.7)$$

Hvor: v er vannets hastighet målt i m/s .

Ved bruk av ligning (2.4) og (2.7) kan Darcys lov i ligning (2.5) skrives som:

$$v = k * i \quad (2.8)$$

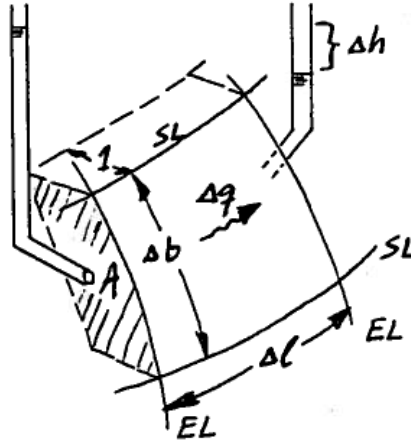
Ligning (2.8) beskriver vannhastigheten gjennom grunnen som en funksjon av permeabiliteten og gradienten. Den gjelder kun for laminær strømning i homogene masser (Bell, 2007). Figur 2.4 viser hvordan sammenhengen i ligning (2.8) ikke gjelder når hastigheten i grunnen blir for stor slik at turbulent strømning oppstår (Emdal, 2009). Hastigheten blir høy der gradienten er høy, som etter ligning (2.4) oppstår der endringen i potensialet er stort over en kort avstand. Det vil typisk være i områder under en tett vegg, som kan sees i figur 2.3. Som beskrevet på side 5 er hastigheten i grunnen normalt liten. Videre forutsettes derfor all strømning i grunnen som laminær.



Figur 2.4: Sammenheng mellom hastighet, gradient og permeabilitet (Emdal, 2009)

Vannføring i strømnnett

Endringen i potensial mellom to ekvipotensiallinjer, Δh , kan finnes fra vannføringen i en strømkanal. En strømkanal er definert som en fiktiv kanal mellom to strømlinjer (Emdal, 2009). Videre er det sett på et kontrollvolum i strømkanalen, som er avgrenset mellom to ekvipotensiallinjer, som vist i figur 2.5.



Figur 2.5: Kontrollvolum i et strømnnett (Emdal, 2009)

Som figuren viser er tverrsnittsarealet, A , lik kontrollvolumets bredde, Δb , ganger en enhetsdybde. Fra Darcys lov kan vannføring gjennom kontrollvolumet utledes:

$$\Delta Q = -k * A * \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

$$\Delta Q = -k * \Delta b * 1 * \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Hvor: b er kontrollvolumets bredde i m.

Det kan skrives om til:

$$\Delta Q = -k * \Delta h * \frac{\Delta b}{\Delta l} \quad (2.9)$$

Kontinuitetsligningen sier at vannføringen inn i et kontrollvolum er lik vannføringen ut av kontrollvolumet, hvis det forutsettes at vann ikke lagres i kontrollvolumet (Verruijt, 1982). Dermed må vannføringen gjennom to kontrollvolum i samme strømkanal, kontrollvolum 1 og 2, være lik. Fra ligning (2.9) blir derfor:

$$-k_1 * \Delta h_1 * \frac{\Delta b_1}{\Delta l_1} = -k_2 * \Delta h_2 * \frac{\Delta b_2}{\Delta l_2}$$

Det er tidligere forutsatt at grunnen består av homogene løsmasser. For at grunnen skal være homogen må permeabiliteten være isotropisk. Dermed er også permeabilitetskoeffisienten isotropisk og $k_1 = k_2$. Det gir:

$$\Delta h_1 * \frac{\Delta b_1}{\Delta l_1} = \Delta h_2 * \frac{\Delta b_2}{\Delta l_2}$$

Dersom strømnettet tegnes med tilnærmet kvadratiske ruter mellom strømlinjene og ekvipotensiallinjene, som gjort i figur 2.3, vil $\Delta b = \Delta l$. Da blir:

$$\Delta h_1 = \Delta h_2$$

Et strømnnett med tilnærmet kvadratiske ruter vil derfor ha samme ekvipotensialfall, Δh , mellom hver ekvipotensiallinje. Hvis det totale ekvipotensialfallet, H , er kjent kan ekvipotensialfallet mellom hver ekvipotensiallinje beregnes. Etter Emdal (2009) er:

$$\Delta h = \frac{H}{N_d} \quad (2.10)$$

Hvor: H er totalt ekvipotensialfall i m og N_d er antall like ekvipotensialfall.

Når potensialfallet mellom hver ekvipotensiallinje er kjent kan potensialet i et gitt punkt beregnes. Deretter kan poretrykket i punktet finnes etter ligning (2.3).

Eksempel: Poretrykk under en betongdam på løsmasser

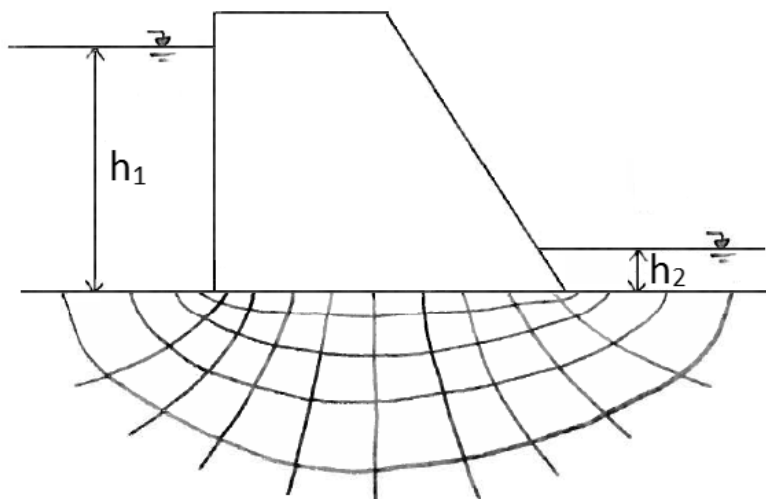
Ved bruk av reglene for strømlinjer og ekvipotensiallinjer kan strømnettet og poretrykket under en betongdam på løsmasser bestemmes. Ved bruk av ligning (2.3) og (2.10) kan poretrykksfordelingen beregnes dersom det totale ekvipotensialfallet, H , er kjent og strømnettet lages med tilnærmet kvadratiske ruter. Det forutsettes at betongdammens permeabilitet er mye lavere enn løsmassene under dammen slik at vann kun strømmer gjennom fundamentet. Ved en slik situasjon vil strømnettet under betongdammen være som vist i figur 2.6.

Dersom vannstanden oppstrøms og nedstrøms dammen er kjent kan endringen i potensial og poretrykk mellom to ekvipotensiallinjer beregnes etter ligning (2.3) og (2.10). Stedshøyden settes til $z = 0$ ved damfoten. I figur 2.6 er antall ekvipotensialfall $N_d = 10$. Det gir:

$$\Delta h = \frac{H}{10} = \frac{h_1 - h_2}{10}$$

$$\Delta u = (\Delta h - z) * \gamma_w = \frac{h_1 - h_2}{10} * \gamma_w$$

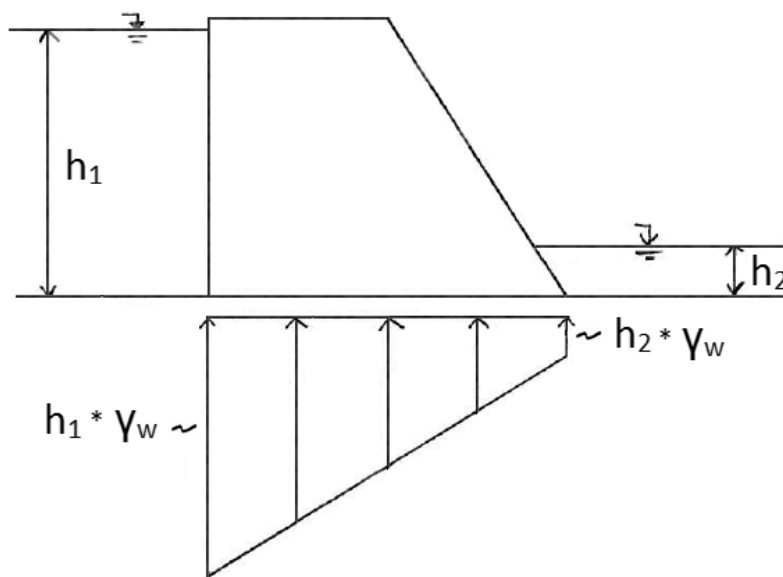
Hvor: h_1 er vanndybde oppstrøms dammen i m og h_2 er vanndybde nedstrøms dammen i m.



Figur 2.6: Strømnett under en betongdam

Det er poretrykket i flata mellom dammen og fundamentet som gir oppdrift på dammen. Som strømnettet i figur 2.6 viser er avstanden lik mellom hver ekvipotensiallinje ved flata. Ligningen på forrige side viser at endringen i poretrykk mellom to ekvipotensiallinjer er konstant og lik for hvert ekvipotensialfall ved stasjonære forhold. Poretrykksdiagrammet blir derfor som vist i figur 2.7. Her avtar poretrykket lineært fra oppstrøms til nedstrøms hydrostatisk vanntrykk.

Arealet av poretrykksdiagrammet gir den totale kraften som virker på dammen, kalt oppdrift.



Figur 2.7: Poretrykksdiagram for en betongdam på homogene løsmasser

2.2 Poretrykk i fjellfundament

Fjell som fundament er viktig å undersøke da forholdene her sannsynligvis er den enkeltfaktoren som påvirker poretrykksfordelingen under en dam aller mest (Strassburger, 1989). Oppsprekking og porer i fjellet gjør bergmassen anisotrop og dette påvirker i stor grad poretrykksfordelingen under betongdammer. Allerede i 1925 påpekte Karl Terzaghi (1883-1963) at selv små geologiske detaljer, som ikke kan forutsees fra forundersøkelser på damsteder, kan ha en kritisk påvirkning på poretrykket (Goodman, 1999; ICOLD, 2004a).

Dette delkapittelet inneholder først en beskrivelse av egenskapene til fjell og vannstrømning i bergmasser. Videre følger en beskrivelse av faktorer som påvirker fordelingen av poretrykket i et damfundament, og tre eksmepler.

2.2.1 Fjell som fundament

Egenskaper i et fjellfundament påvirker poretrykket under en betongdam. Denne delen inneholder derfor først en beskrivelse av bergarters og bergmassens egenskaper. Deretter følger en kort beskrivelse av berggrunnen i Norge.

Bergarters egenskaper

Berggrunnen er bygd opp av ulike typer bergarter. I dagligtale brukes ordet “bergart” om harde bergarter, mens ordet “løsmasser” benyttes om sand, grus, leire etc. (Sigmond, 2012). Bergartene er bygd opp av mineraler. Bergartens egenskaper avhenger i stor grad av typen og mengden av de ulike mineralene, i tillegg til størrelsen, formen og orienteringen av mineralene (Nilsen og Broch, 2011).

Mineralenes egenskaper kan være retningsavhengige og noen mineraler viser stor forskjell i styrke og elastisitet i ulike retninger. Dersom mineralene har samme orientering vil bergarten få anisotrope egenskaper. Det vil si at egenskapene er ulik i forskjellige retninger (Nilsen og Broch, 2011).

Bergmassens egenskaper

Ved bruk av fjell som fundament er det mer hensiktsmessig å omtale bergmassen framfor bergarter. Bergmasse kan defineres som berggrunnen in situ, altså bergarter med tilhørende diskontinuiteter slik de er å finne i naturen (Nilsen og Broch, 2011).

De fleste bergarter har utviklet svakhetsretninger som kalles kløyvretninger. Kløyvretningene har oppstått fra tidligere spenningsendringer. Kløyvretningene varierer dermed både med bergart og sted (Nilsen og Broch, 2011). Diskontinuiteter i bergmassen oppstår ofte i bergartens kløyvretninger. Diskontinuiteter kan være alt fra små sprekker til store forkastninger (Bell, 1992).

Diskontinuiteter og svakhetssoner er karakteristisk for bergmassen og må derfor inkluderes når materialtekniske parametere vurderes. Oppsprekkingen gjør bergmassen diskontinuerlig, i tillegg til å være anisotrop, og bergmassen er derfor mer komplisert enn bergarter. For eksempel ved vurdering av bergmassens styrke vil bergmassens diskontinuiteter spille en større rolle enn bergartens styrke (Nilsen og Broch, 2011).

Sprekker er de vanligste diskontinuitetene. Det er derfor kun fokusert på sprekker videre i oppgaven. Sprekker er en langsgående oppsprekking i bergmassen med liten eller ingen forskyvning av bergmassen ved oppsprekkingen. Sprekker kan oppstå i alle bergarter. Flere parallelle sprekker kalles et sprekkese. To eller flere sprekkese som skjærer hverandre med mer eller mindre konstant vinkel kalles et sprekkesystem (Bell, 1992).

Sprekkene kan enten være primær eller sekundær. Det primære sprekkesystemet er dannet fra de naturlige påkjenningene bergmassen har vært utsatt for og avhenger av bergartens egenskaper. Dette kan for eksempel være tektoniske spenninger, som er spenninger som opptrer i jordskorpa, og temperatursvingninger. Sprekkesystemet avhenger også av bergartens mekaniske egenskaper som styrke, elastisitet og anisotropiforhold. I tillegg til sprekkesystemet har de fleste bergmasser også en del tilfeldige primære sprekker som ikke følger mønsteret i sprekkesystemet. De sekundære sprekkene oppstår som følge av menneskelige påkjenninger ved for eksempel sprengning ved anleggsdrift (Nilsen og Broch, 2011).

Den øvre delen av berggrunnen kalles dagbergsonen. Denne delen av berggrunnen ligger over grunnvannspeilet og er derfor i stor grad preget av tilførsel av luft og rennende vann. Den er mer oppsprukket enn dyptliggende fjell på grunn av temperaturvariasjoner nær overflata og forvitring. Også spenningsavlastning, for eksempel ved erosjon av overliggende løsmasser, kan gjøre at fjellet sprekker opp nær overflata. Større oppsprekingsgrad i dagbergsonen gjør at bergmassen her normalt er svakere enn mer dyptliggende bergmasser. De dyptliggende bergmassene er fortsatt utsatt for store spenninger. Dermed er oppsprekingsgraden lavere (Nilsen og Broch, 2011).

Berggrunnen i Norge

Overflata av berggrunnen i Norge er preget av flere istider de siste 1-2 millioner årene. Isdekkene under istiden har i stor grad skurt vekk og erodert bergmasser i den øvre delen av berggrunnen. Særlig sterkt oppsprukket berg og svakere bergarter har blitt erodert vekk. Geologisk sett er det kort tid siden den siste istiden i Norge. Overflateforvitring, som sterkt oppsprukket berg, er derfor sjeldent å finne i Norge (Nilsen og Broch, 2011).

Sett i internasjonal sammenheng har Norge stort sett harde bergarter. Berggrunnen er av god kvalitet, selv om områder med varierende forhold også eksisterer. Bergartene i Norge er stort sett impermeable. Porøsiteten er lav og oftest under 1 %. Det vil si at vannstrømningen gjennom bergmassen stort sett foregår langs sprekker (Nilsen og Broch, 2011). Den vanligste bergarten i Norge er gneis (Sigmond, 2012).

2.2.2 Vannstrømning i bergmasser

Vann forekommer i berggrunnen både bundet til mineralene og som fritt vann i sprekker og porer. Vannet i sprekke og porene, kalt grunnvann, kan bevege seg fritt. Som vist i delkapittel 2.1 kan strømningshastigheten til fritt vann i grunnen beskrives som vist i ligning (2.5) etter Darcys lov, gjengitt under.

$$v = k * i$$

Darcys lov gjelder kun for homogene løsmasser (Nilsen og Broch, 2011). Dersom ligningen skal gjelde for vannstrømning i bergmasser må bergarten være svært permeabel, eller helt tett og bergmassen regelmessig oppsprukket slik at vannstrømmen blir jevnt fordelt.

Bergartene i Norge er stort sett impermeable og oppsprekkingen er sjeldent homogen. Darcys lov kan derfor ikke benyttes til å beskrive vannstrømningen i berggrunnen i Norge. Etter ICOLD (2005) kan Darcys lov ofte brukes som et estimat på vanngjennomstrømning ved undersøkelse av et damfundament. Videre er det beskrevet hvordan vann strømmer gjennom sprekker i bergmassen, da dette er aktuelt for norske forhold.

Vannstrømning og permeabilitet i sprekkesystem

Vannstrømningen i en bergmasse avhenger av sprekkesystemets form og hydrauliske egenskaper. De hydrauliske egenskapene avhenger igjen av hver enkelt sprekkes utforming. Fasongen til sprekke er i følge Bell (1992) vanskelig å fastslå. Siden det ikke finnes metoder for å kartlegge alle diskontinuitetene i en bergmasse i detalj vil heller ikke geometrien til sprekkesystemet kunne fastslås. Sprekker er ofte langstrakte og tilnærmet plane i den retningen de er lengst. Fasongen på dette planet er vanskelig å fastslå da den eneste parameteren som ofte kan måles er sprekkes lengde langs et undersøkelsesplan, for eksempel overflata (Bell, 1992).

Flere studier er gjennomført om strømning gjennom sprekker. De fleste baserer seg på parallellplateprinsippet, som er prinsippet om at en sprekke kan beskrives som åpningen mellom to parallelle plater. Ligning (2.11) viser Louis' ligning, som er basert på Darcys ligning. Den viser strømningshastigheten mellom to parallelle glatte plater (Nilsen og Broch, 2011).

$$v = \frac{g * e^2}{12 * \nu} * i \quad (2.11)$$

Hvor: e er sprekkeåpning (avstand mellom plater) i m.

Videre kan vannføring gjennom sprekken per lengdeenhet beregnes etter ligning (2.7):

$$q = \frac{g * e^3}{12 * \nu} * i \quad (2.12)$$

Hvor: q er vannføring per lengdeenhet i m^2/s .

Ligning (2.12) viser at vannføringen gjennom en idealisert sprekk avhenger av sprekkenes bredde i tredjepotens. Det vil si at dersom en sprekk øker bredden med en faktor på 10, for eksempel fra 0,1 mm til 1,0 mm, vil vannføringen øke med en faktor på 10^3 . Ligningen viser også at 1000 sprekker med en bredde på 0,1 mm slipper gjennom like mye vann som én sprekk på 1,0 mm (Nilsen og Broch, 2011).

Videre kan bergmassens permeabilitetskoeffisient utledes fra ligning (2.11). Etter Gimenes og Fernández (2006) er den:

$$k_m = \frac{g * e^3}{12 * \nu} * \frac{1}{S} \quad (2.13)$$

Hvor: S er avstand mellom sprekkeene i m.

For naturlige sprekker er ikke sammenhengen mellom permeabilitetskoeffisienten og sprekkeåpning like enkel som vist i ligning (2.12) og (2.13). Naturlige sprekker har ikke den enkle geometrien som er benyttet ved utledning av ligningene. Naturlige sprekker har sjeldent en konstant sprekkeåpning, de er ikke alltid kontinuerlige og ruheten kan variere. Ut fra dette er det derfor vanskelig å bestemme permeabilitetskoeffisienten for bergmassen annet enn empirisk (Nilsen og Broch, 2011). Gimenes og Fernández (2006) viser også til at ligning (2.13) kun kan benyttes til å estimere permeabiliteten i fjell ved en forundersøkelse av et damsted.

ICOLD (2005) har lagd en oversikt over permeabiliteten i en bergmasse basert på hyppigheten av sprekker i fundamentet. Oversikten er gjengitt i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Permeabilitet i en bergmasse basert på hyppigheten av sprekker (ICOLD, 2005)

Beskrivelse	Sprekkavstand [m]	Permeabilitetskoeffisient [m/s]
Meget permeabel	< 0,2	$10^{-2} - 1$
Middels permeabel	0,2 - 0,6	$10^{-5} - 10^{-2}$
Litt permeabel	0,6 - 2,0	$10^{-9} - 10^{-5}$
Tett	> 2,0	$< 10^{-9}$

2.2.3 Poretrykk ved ulike grunnforhold

Vanngjennomstrømningen i grunnen avhenger av bergmassens permeabilitet, som beskrevet i del 2.2.2. Varierende permeabilitet i fundamentet under en betongdam skaper ulike fordelinger av poretrykk. I denne delen presenteres forhold ved fundamentet som kan påvirke poretrykket.

Studier om poretrykk i damfundament

Hoveddelen av teorien i resten av dette delkapittelet, delkapittel 2.3 og 2.4 er basert på to tidligere studier om poretrykk under betongdammer på fjellfundament.

Det første studiet er utarbeidet av A. Strassburger for Electric Power Research Institute (EPRI) i 1989. Hensikten med studiet er å finne ut mer om poretrykksfordelingen under betongdammer på fjellfundament. Denne kunnskapen skal videre benyttes ved revurdering av dammer. I Strassburgers (1989) studie analyseres innvirkningen på poretrykk i et damfundament fra konstruktive tiltak, vannstandsendringer i magasinet og temperaturendringer. Konstruktive tiltak er omtalt i delkapittel 2.3. Poretrykksmålinger og annen relevant måledata fra 225 betongdammer er benyttet i studiet, de fleste i USA (Strassburger, 1989).

Det andre studiet er gjennomført av International Commission on Large Dams (ICOLD) i 2004. I studiet er ulike temaer ved poretrykk under betongdammer analysert. De aktuelle temaene i studiet for denne oppgaven er retningslinjer for beregning av poretrykk i ulike europeiske land, en analyse av tidligere studier om poretrykk under betongdammer og teknikker for rensing av drenasjesystem. I ICOLDs (2004b) analyse av tidligere studier er det fokus på gravitasjonsdammer i betong. Analysen tar for seg 4 tidligere studier, hvor en av dem er studiet omtalt over for EPRI. I ICOLDs (2004b) studie vurderes ulike parametere som påvirker poretrykket. Det er sett på geologien i fundamentet, konstruktive tiltak, vannstandsendringer og temperaturendringer (ICOLD, 2004b).

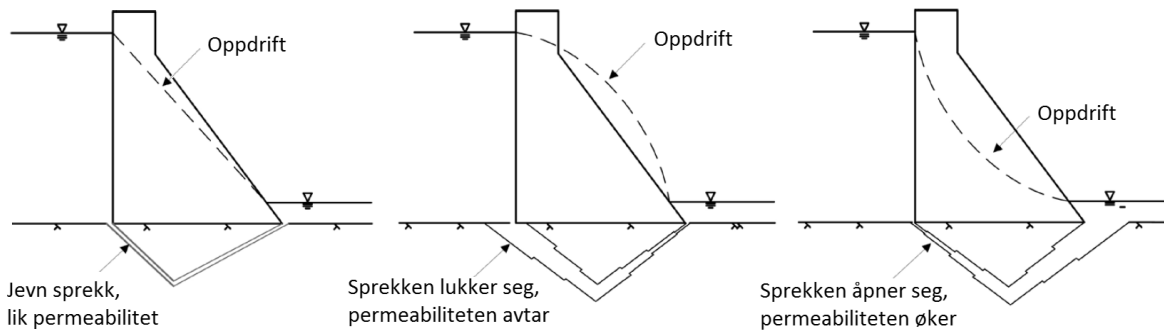
Egenskaper i damfundamentet

I følge Strassburger (1989) er et ideelt fundament, som gir lavest poretrykk under en dam, et fundament med jevn og høy styrke. Det er tett i oppstrøms ende av dammen og åpent i nedstrøms ende. En motsatt situasjon er ikke ønskelig.

Grenoble et al. (1995^d) viser også til at permeabiliteten i grunnen påvirker fordelingen av poretrykket, vist i figur 2.8. En vid sprekk illustrerer høy permeabilitet, altså et åpent fundament. En smal sprekk illustrerer lav permeabilitet, altså et tett fundament. Ved et fundament som er tett i oppstrøms ende og åpent i nedstrøms ende vil den totale oppdriften bli mindre enn ved lik permeabilitet under hele dammen. Uavhengig av permeabiliteten i fundamentet vil i følge Leliavsky (1959) poretrykket i oppstrøms ende av fundamentet alltid være lik oppstrøms vanntrykk.

I ICOLDs (2004b) studie konkluderes det med at poretrykksfordelingen i fundamentet i stor grad avhenger av sprekksystemet i fundamentet, da sprekkenes mange ganger mer permeable enn det intakte fjellet. Sprekksystemets egenskaper avhenger av størrelsen på sprekkeåpninger, graden av sammenkobling mellom sprekkenes og permeabiliteten i sprekkenes. Det ble ikke funnet en spesifikk sammenheng mellom geologiske egenskaper og poretrykket.

^dReferert i Westberg (2009)



Figur 2.8: Oppdrift ved varierende permeabilitet i fundamentet (Grenoble et al., 1995^d)

2.2.4 Variasjon i poretrykk ved vannstandsendringer

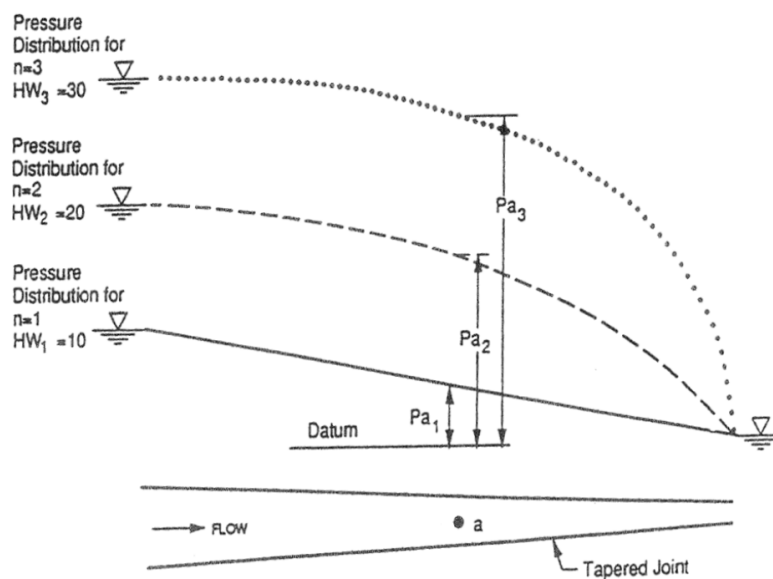
Poretrykksendringer i fundamentet ved vannstandsendringer er avhengig av om fundamentet er åpent eller tett. For åpne fundament vil størrelsen på poretrykket endre seg mer direkte i forhold til vannstanden enn ved lukkede fundament, både i størrelse og tid (Strassburger, 1989).

Størrelsen på poretrykket i forholdt til vannstanden påvirker hvordan poretrykket endres ved vannstandsendringer. Dersom poretrykket er høyt relativt til vannstanden vil poretrykket endres mer direkte ved vannstandsendringer. Ved lavt poretrykk relativt til vannstanden er responsen generelt tregere og sammenhengen mellom poretrykket og vannstanden er liten (Strassburger, 1989). ICOLD (2004b) konkluderer i sin studie at poretrykket ikke endres i takt med vannstanden i magasinet. Studiet viser at poretrykket stiger både prosentvis mer og prosentvis mindre enn vannstanden i magasinet.

I følge Strassburger (1989) er endringen i poretrykket noe forsinket i forhold til vannstandsendringene. Den observerte forsinkelsen er alt fra dager til flere uker. Ved høye vannstander i magasinet over en kort periode, som ved flom, kan det være tilfelle at vannstanden i magasinet er tilbake på normalt nivå før poretrykket i fundamentet er endret. ICOLD (2004b) konkluderer i sin studie at det ikke er en tidsforsinkelse mellom endring i vannstand og endring i poretrykket, og at det generelt er usannsynlig at en slik tidsforsinkelse oppstår. I følge ICOLD (2004b) er resultatene fra Strassburgers (1989) studie feiltolket. Inntrykket om en forsinket poretrykksendring har oppstått som følge av sesongvariasjoner og feil bruk av måleinstrument. Poretrykksmålerne egner seg ikke til registrering av poretrykk ved store vannstandsendringer på grunn av en treghet i instrumentet. Instrumenter for måling av poretrykk er omtalt i delkapittel 2.4.

Ved øking av oppstrøms vannstand vil spenningsfordelingen i fundamentet endres. Ofte vil dammen trykke mer mot nedstrøms del av fundamentet på grunn av det økte horisontale vanntrykket på oppstrøms side. Da avtar trykket mot fundamentet i oppstrøms ende. Det medfører at sprekker i oppstrøms ende av fundamentet åpnes slik at permeabiliteten øker, samtidig som sprekker i nedstrøms ende av fundamentet lukkes. Det tilsvarer den midterste situasjonen i figur 2.9. Dermed øker ikke poretrykket lineært med vannstanden i magasinet (Grenoble et al., 1995^d). Dette er illustrert i figur 2.9.

^dReferert i Westberg (2009)



Figur 2.9: Poretrykk ved økende oppstrøms vannstand (Grenoble et al., 1995^e)

2.2.5 Variasjon i poretrykk ved temperaturendringer

Poretrykksfordelingen under en dam kan variere med temperaturen. En dam utvider og trekker seg sammen ved henholdsvis varme og kulde. Når dammen trekker seg sammen minker trykket mot fundamentet, særlig i oppstrøms ende. Dermed kan sprekker i oppstrøms ende av fundamentet åpnes og poretrykket her øke (ICOLD, 2004b). Økingen i poretrykket er størst mot slutten av vinteren. Temperaturen påvirker poretrykket, men i en mindre størrelsesorden enn vannstandsvariasjoner (Strassburger, 1989).

Poretrykket påvirkes av temperaturvariasjoner på grunn av fire faktorer. Den første faktoren er volumendringer i betongkonstruksjonen som gir spenningsendringer mot fundamentet. Den andre faktoren er volumendringer i bergmassen som medfører volumendringer av sprekken og dermed påvirker permeabiliteten. Særlig nedstrøms dammen kan bergmassen være utsatt for direkte solstråling. Små endringer i permeabiliteten i nedstrøms ende av fundamentet kan ha stor innvirkning på poretrykksfordelingen. En tredje faktor som kan påvirke poretrykksfordelingen er temperaturendringer i vannet i magasinet, som videre kan påvirke temperaturen i fundamentet ved vanngjennomstrømming. Den siste faktoren er at temperaturen påvirker vannets viskositet. Lave temperaturer øker den kinematiske viskositeten, som igjen minker permeabiliteten (Guidicini og Andrade, 1988^e), som vist i ligning (2.13).

2.2.6 Eksempler

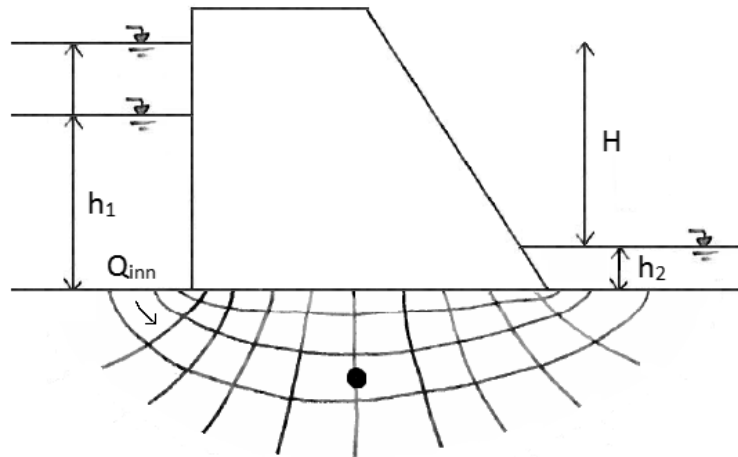
I denne delen er det vist tre eksempler på hvordan parameterene som er omtalt i dette delkapittelet påvirker vanngjennomstrømmingen og poretrykket i et fundament. Eksemplene er basert på strømmingsteori og Darcys lov. Selv om Darcys lov kun er gyldig for et homogent fundament er den benyttet i eksemplene for å illustrere hvordan

^eReferert i Westberg (2010)

permeabiliteten påvirker strømningshastigheten og poretrykket. I alle eksemplene er dammen i figur 2.10 benyttet.

Eksempel: Vannets hastighet i fundamentet

Dette eksempelet viser hvor lang tid vannet bruker fra magasinet til et punkt i fundamentet midt under dammen ved ulike permeabilitetskoeffisienter for fundamentet. Punktet er vist med en prikk i figur 2.10. Permeabilitetskoeffisientene er hentet fra tabell 2.1. Vannstanden oppstrøms og nedstrøms dammen er konstant.



Figur 2.10: Eksempeldam

Forskjellen mellom oppstrøms og nedstrøms vannstand, H , er satt lik damfotens bredde, B . Da vil trykkforskjellen mellom magasinet og punktet midt under dammen være $H/2$. Lengden på strømlinjen mellom magasinet og punktet forutsettes å være omtrent lik $B/2$. Da blir gradienten, etter ligning (2.4):

$$i = \frac{H/2}{B/2} = \frac{H}{B} = 1$$

Vannhastigheten etter Darcys lov blir da:

$$v = k * i = k * 1 = k$$

Tiden beregnes som vist i ligning (2.14).

$$t = \frac{l}{v} = \frac{l}{k} \quad (2.14)$$

Hvor: t er tid i sekunder.

Tabell 2.2 viser hvor lang tid vannet bruker på å strømme fra magasinet til punktet i figur 2.10 ved ulike permeabilitetskoeffisienter. Resultatet viser at tidsforskjellen mellom et tett og et permeabelt fundament er stor.

Tabell 2.2: Vannets hastighet og tidsforbruk som funksjon av fundamentets permeabilitet

Beskrivelse	Permeabilitetskoeffisient [m/s]	Tid [dager]	Tid [år]
Tett	10^{-9}	57870,4	158,5
Litt permeabel	10^{-7}	578,7	1,6
Middels permeabel	10^{-5}	5,8	0,0
Permeabel	10^{-3}	0,1	0,0

Eksempel: Poretrykk ved varierende permeabilitet i grunnen

Dette eksempelet viser hvordan fordelingen av poretrykket i fundamentet endrer seg som følge av varierende permeabilitetskoeffisient i fundamentet.

Vannføringen gjennom et kontrollvolum i en strømkanal, ΔQ , kan beskrives som vist i ligning (2.9) fra delkapittel 2.1. For situasjonen i figur 2.10 er strømnettet tegnet med kvadratiske ruter. Da blir vannføringen gjennom kontrollvolumet:

$$\Delta Q = -k * \Delta h$$

Oppstrøms og nedstrøms vannstand forutsettes konstant. Da vil vannføringen gjennom kontrollvolumet være konstant. Hvis permeabilitetskoeffisienten er lik i hele fundamentet vil også potensialfallet mellom hver ekvipotensiallinje i strømnettet under dammen i figur 2.10 være likt.

Dersom permeabiliteten i fundamentet varierer må også potensialfallet i kontrollvolumene variere, siden vannføringen er konstant ved konstante vannstander. Som ligningen over viser er permeabilitetskoeffisienten, k , og potensialfallet gjennom et kontrollvolum, Δh , omvendt proporsjonale. Dersom fundamentet under dammen i figur 2.10 har lav permeabilitet i oppstrøms ende av dammen og høy permeabilitet i nedstrøms ende av dammen vil potensialfallet mellom ekvipotensiallinjene være motsatt. Det vil si at det vil være et høyt potensialfall i oppstrøms ende av dammen og et lavt potensialfall i nedstrøms ende av dammen. Dermed vil poretrykksdiagrammet bli som for den midterste dammen i figur 2.8.

Eksempel: Øking av vannstand i magasin

Dette eksempelet viser hvordan poretrykket i et punkt i fundamentet midt under dammen, vist med en prikk i figur 2.10, endrer seg ved en øking av vannstanden i magasinet. Det forutsettes homogen permeabilitet i grunnen. Siden strømnettet har 10 ekvipotensialfall blir potensialfallet mellom hver ekvipotensiallinje, etter ligning (2.10):

$$\Delta h = \frac{h_1 - h_2}{N_d} = \frac{H}{10}$$

Som i forrige eksempel kan vannføringen gjennom et kontrollvolum beskrives som:

$$\Delta Q = -k * \Delta h = -k * \frac{H}{10}$$

Dersom vannstanden i magasinet øker samtidig som nedstrøms vannstand holdes konstant medfører det at H øker. Allikevel vil ikke potensialfallet mellom hver ekvipotensiallinje, Δh , øke momentant fordi vannføringen i strømkanalen, Q , ikke øker momentant. For at vannføringen ved punktet midt under dammen i figur 2.10 skal øke må det første tilføres mer vann gjennom strømkanalen fra magasinet.

I oppstrøms ende av strømkanalen kan mer vann tilføres strømkanalen ved at Q_{inn} øker. Da øker potensialfallet, Δh , mellom bunnen av magasinet og den først ekvipotensiallinja proporsjonalt med Q_{inn} . Når den økte vannføringa når punktet midt under dammen vil også endringen i potensial mellom ekvipotensiallinjene, og dermed også poretrykket, endres her. Fram til da er endringen i potensial mellom punktet og nedstrøms ende av strømkanalen det samme som før vannstanden i magasinet ble økt, altså vil poretrykket i punktet være det samme som før. Poretrykket ved punktet beholder derfor samme verdi som ved den lave vannstanden helt til den økte vannføringen fra oppstrøms side av dammen når punktet.

Det medfører at tiden vannet bruker fra magasinet til punktet midt under dammen avgjør hvor raskt poretrykket i punktet endres ved en vannstandsending i magasinet. Som vist i tabell 2.2 i det første eksempelet er tiden vannet bruker på å strømme gjennom fundamentet avhengig av permeabilitetskoeffisienten og kan variere fra noen få timer til mange år.

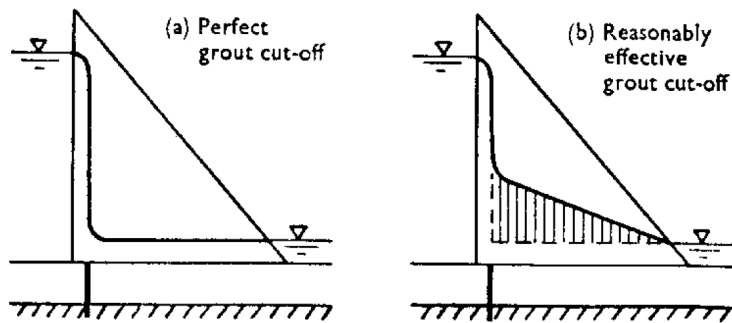
2.3 Konstruktive tiltak for å redusere poretrykk

Sprekker i et fjellfundament kan skape situasjoner som gir høyt poretrykk under dammer. For å unngå slike situasjoner er det ofte ønskelig å senke poretrykket under dammen, særlig når grunnflata er stor. De to vanligste metodene er injeksjonsskjerm og drenasjesystem, som er omtalt i dette kapitlet.

2.3.1 Injeksjonsskjerm

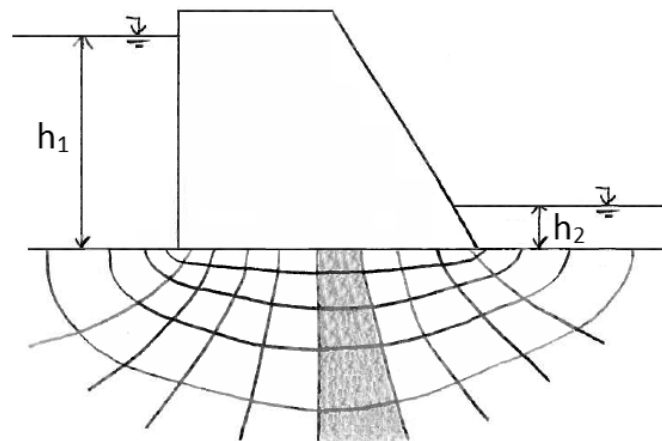
En injeksjonsskjerm består av en eller flere rader av borehull som er injisert med en sementblanding slik at porer og sprekker i fundamentet tettes. Dermed minker permeabiliteten i de injiserte delene av fundamentet. Injeksjonsskjerm er den mest brukte metoden for å redusere poretrykk i fjellfundament (ICOLD, 2005).

En injeksjonsskjerm skaper en tilnærmet tett vegg. I teorien vil en helt tett vegg med tilstrekkelig dybde bety at all vannstrømning gjennom veggen hindres, og at poretrykket nedstrøms veggen derfor tilsvarer nedstrøms vanntrykk (Casagrande, 1961). Dette er illustrert i figur 2.11 for dam "a".

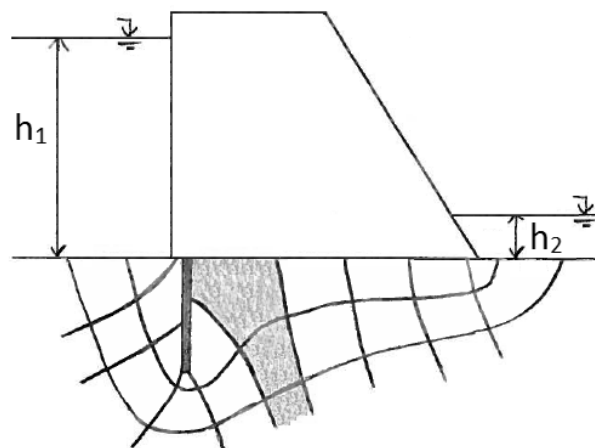


Figur 2.11: Effekt av injeksjonsskjerm (Casagrande, 1961)

Dersom injeksjonsskjermen ikke har tilstrekkelig dybde vil en vannstrøm gå under vegg. Det gir en økt vannvei (Strassburger, 1989). Når økningen av vannveien skjer i oppstrøms ende av dammen vil det oppstå et større potensialfall her, som vist i figur 2.13. Figur 2.12 og 2.13 viser strømnettet til en betongdam med og uten injeksjonsskjerm på homogent fundament. Injeksjonsskjermen i figur 2.13 forutsettes helt tett, men uten tilstrekkelig dybde. De skraverte feltene viser hvor poretrykket er likt for de to dammene. Poretrykksfordelingen for dammen i figur 2.13 blir som for dam "b" i figur 2.11.



Figur 2.12: Strømnettet under en betongdam uten injeksjonsskjerm



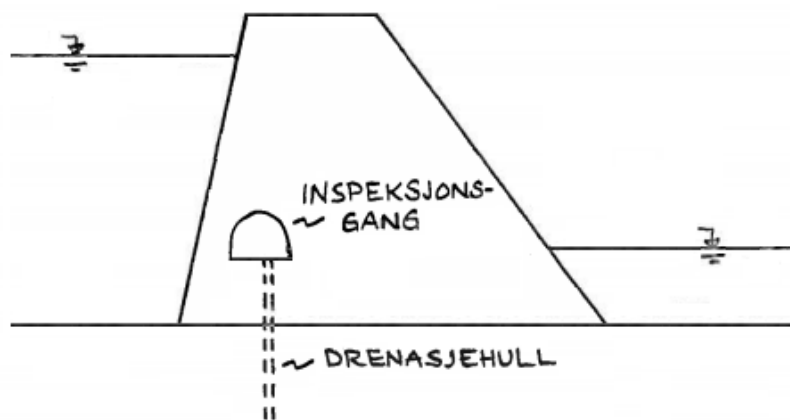
Figur 2.13: Strømnettet under en betongdam med injeksjonsskjerm

Reduksjonen i poretrykk fra en injeksjonsskjerm avhenger både av plasseringen, tettheten og dybden til injeksjonsskjermen, samt bredden på dammen. I tillegg vil injeksjonsskjermen sjelden bli helt tett ved utforming, sementen vil gradvis skylles ut og spenningsendringer i fundamentet kan skape nye sprekker (Strassburger, 1989). Poretrykksreduksjonen fra en injeksjonsskjerm er derfor usikker. En enkelt rad med injisering vil ikke ha nevneverdig effekt på poretrykket. En injeksjonsskjerm bestående av flere rader kan redusere poretrykket, men effekten bør kunne bekreftes ved poretrykksmålinger (ICOLD, 2004b). Også Strassburger (1989) viser til at effekten av en injeksjonsskjerm er varierende.

Injeksjonsskjermer kan være effektive for å redusere poretrykket, men dersom det reduserte poretrykket skal benyttes videre ved sikkerhetsvurderinger av dammen bør poretrykket måles slik at effekten av injeksjonsskjermen til en hver tid kan bekreftes. Et problem ved injeksjonsskjermer er at effekten av dem er vanskelig å forutse ved bygging, slik at de ofte inkluderes som en ekstra sikkerhet og ikke som et poretrykksreducerende tiltak i seg selv (Strassburger, 1989).

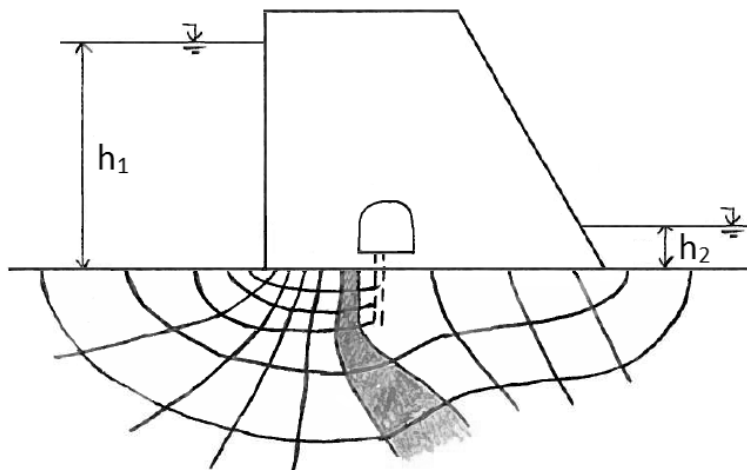
2.3.2 Drenasjesystem

Drenasjesystem er den desidert mest effektive metoden for å redusere poretrykk i damfundament (Strassburger, 1989; ICOLD, 2004b). Et drenasjesystem består vanligvis av en rad hull boret ned i fundamentet fra en inspeksjonsgang i dammen. I tillegg kan det være drenasjehull gjennom hele damkroppens høyde dersom det er ønskelig å redusere poretrykket her. En generell utforming er vist i figur 2.14. Det er denne utformingen som videre er omtalt som “drenasjesystem”. Drenasjesystem kan også utføres som boksdrenasje, som generelt er utformet som et hulrom i dammens lengdeakse langs fundamentet. Noen dammer har inspeksjonsgangen på damfundamentet og er derfor i praksis boksdrenasje med drenasjehull (Strassburger, 1989). Drenasjesystemet plasseres vanligvis nedstrøms en eventuell injeksjonsskjerm.



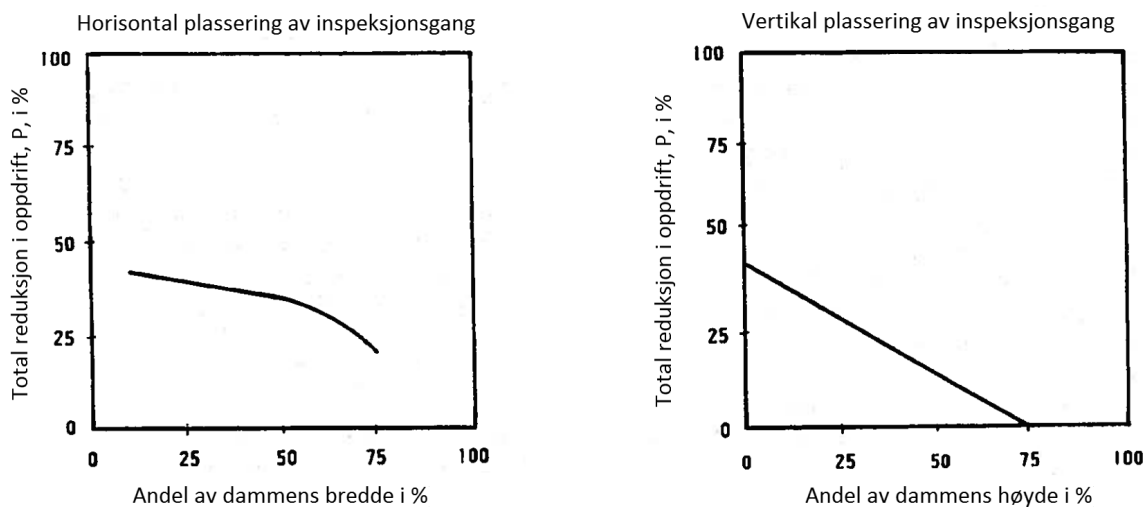
Figur 2.14: Generell utforming av drenasjesystem, med drenasjehull boret fra en inspeksjonsgang

Figur 2.15 viser hvordan et drenasjesystem påvirker strømnettet under en dam på et homogent fundament. Strømnettet viser at poretrykket ved drenasjesystemet er lavere enn for en situasjon uten drenasjesystem. Det skraverte feltet viser hvor poretrykket er likt som for situasjonen uten drenasjesystem, vist i figur 2.12. Effekten av drenasjesystemet avhenger av forholdene på damstedet, utførelsen av drenasjesystemet og vedlikehold (Guttormsen, 2006).



Figur 2.15: Strømnettet under en betongdam med drenasjesystem

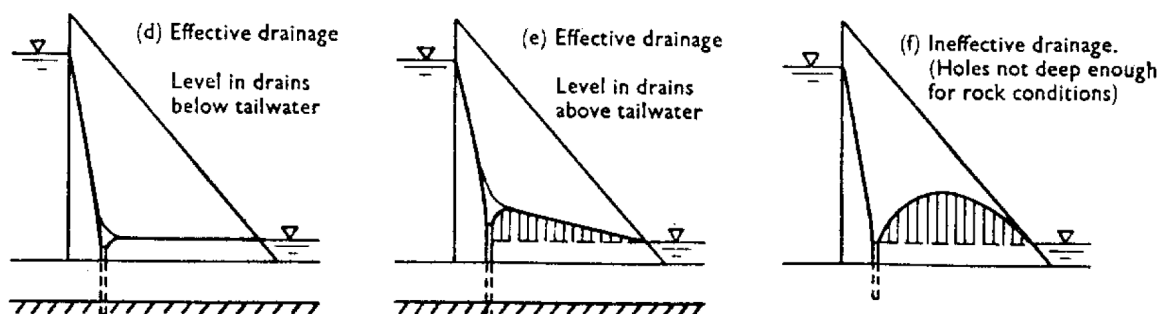
Plasseringen av inspeksjongangen har stor innvirkning på drenasjesystemets effekt. Maksimal poretrykksreduksjon i drenasjeplanet er begrenset av inspeksjongangens høyde over damfundamentet. Grafen til høyre i figur 2.16 viser at en inspeksjongang plassert på damfundamentet gir en større reduksjon i total oppdrift enn en inspeksjongang plassert i dammen. Grafen til venstre i figur 2.16 viser at den horisontale plasseringen av inspeksjongangen spiller en mindre rolle på den totale oppdriften enn den vertikale plasseringen, men at optimal plassering er i oppstrøms ende av dammen (Strassburger, 1989).



Figur 2.16: Optimal plassering av inspeksjongang (Strassburger, 1989)

Figur 2.17 viser hvordan ulike drenasjesystem påvirker poretrykket. Dam “d” har et effektivt drenasjesystem med inspeksjongangen plassert lavere enn nedstrøms vannstand. Det gir et poretrykk lik nedstrøms vanntrykk fra drenasjesystemet til nedstrøms ende av dammen. Dam “e” har et effektivt drenasjesystem med inspeksjongang plassert høyere enn nedstrøms vannstand. I denne situasjonen vil poretrykket ved drenasjesystemet være lik høyden av inspeksjongangen og deretter avta lineært til nedstrøms vanntrykk.

Dam “f” har et mindre effektivt drenasjesystem, siden drenasjehullene ikke er boret dypt nok ned i fundamentet. Dette medfører en oppbygging av poretrykk nedstrøms drenasjesystemet (Casagrande, 1961). Strassburgers (1989) studie viser at poretrykket nedstrøms drenasjesystemet ofte overstiger poretrykket ved drenasjesystemet. En antakelse om lineært avtagende poretrykk fra drenasjesystemet til nedstrøms vannstand er derfor ikke konservativ.



Figur 2.17: Drenasjesystemets innvirkning på poretrykk (Casagrande, 1961)

Vedlikehold av drenasjesystemet er viktig. Effekten er best når drenasjehullene er nye og avtar deretter ofte med tiden dersom hullene tettes med avsetninger. Avsetningene er ofte av kalsiumkarbonat, løst opp fra betongen eller fundamentet. Det finnes flere metoder for å rense drenasjehullene. De kan for eksempel spyles eller bores på nytt (Strassburger, 1989; ICOLD, 2004b). Den beste metoden for å øke effekten er i følge Strassburger (1989) å bore hullene med litt større radius og litt dypere enn før. Dette fjerner avsetningene på en god måte samtidig som økt radius har en positiv effekt.

2.4 Instrumentering av poretrykk

ICOLD påpeker i flere av sine utgivelser at instrumentering av dammer er viktig og særlig måling av poretrykk. ICOLD (2013b) mener at en hver dam som utgjør høy risiko ved brudd bør instrumenteres og overvåkes. Dermed kan dammens tilstand til en hver tid vurderes (ICOLD, 2005). Også Casagrande (1961) mener at dersom det er den minste tvil om hvordan poretrykket vil fordele seg under en dam er det nødvendig å gjennomføre poretrykksmålinger.

Bruk av målte verdier av poretrykket er viktig ved revurdering av sikkerheten ved eldre dammer. Den faktiske oppdriften kan variere mye i forhold til oppdriften som er

beregnet etter regelverk. Hvis dameier kjenner den faktiske poretrykksfordelingen under dammen og den er lavere enn den teoretiske fordelingen etter regelverket i landet, kan dette hindre en unødvendig ombygging av dammen (ICOLD, 2004a). Også Strassburger (1989) anbefaler dameiere å legge mer vekt på å gjennomføre poretrykksmålinger ved revurdering av dammer. Mange dammer får økt stabiliteten ved å etterinstallere strekkstag, men det kan være kostbart. Av dammene i studiet til Strassburger (1989) er flere av dem rehabilitert med strekkstag uten at poretrykksmålinger lå til grunne ved avgjørelsen.

Det er også mulig å gjennomføre dataanalyser for å beregne poretrykksfordelingen i et fundament, men i følge ICOLD (2004a) inneholder en slik analyse for mange usikkerheter og antakelser. Måledata er derfor den mest verdifulle informasjonen om poretrykksfordelingen i et damfundament (ICOLD, 2004b).

Spross, Johansson og Larsson (2014) har vurdert om målt poretrykk bør benyttes i stabilitetsberegninger for en dam. De konkluderer med at det ikke øker sikkerheten da det er sannsynlig at poretrykket vil øke ved et senere tidspunkt, for eksempel ved at et eventuelt drenasjesystem tetter seg. Hvis målt poretrykk skal benyttes i en sikkerhetsvurdering er det viktig å sørge for at sannsynligheten for økt poretrykk er liten (Spross, Johansson og Larsson, 2014). For å kunne benytte poretrykksmålinger til stabilitetsberegninger mener Strassburger (1989) at målingene bør være fra en periode på minst ett år, med magasinet nær maksimal vannstand. Et problem belyst av ICOLD (2005) er at poretrykksmålere kun gir informasjon om utvalgte punkter i fundamentet og målingene er dermed ikke nødvendigvis representative for et større område.

Selv om poretrykksmålinger ikke benyttes ved sikkerhetsvurderinger er målingene fortsatt nyttig. Poretrykksmålingene kan bekrefte om eventuelle konstruktive tiltak virker og dersom en øking i poretrykket oppstår vil det kunne oppdages, slik at nødvendig vedlikehold kan gjennomføres i tide (Spross, Johansson og Larsson, 2014).

2.4.1 Poretrykksmålinger

Poretrykksfordelingen under en dam kan variere mye, både langs damfotens bredde og dammens lengde. Det er derfor viktig med et omfattende nettverk av målepunkter for å oppnå pålitelige poretrykksmålinger. For hvert tverrsnitt i en dam hvor poretrykk skal måles bør det være flere målepunkt langs damfotens bredde (ICOLD, 2004b). Også nedstrøms et eventuelt drenasjesystem er det viktig å ha målepunkt da poretrykket ikke nødvendigvis avtar lineært fra drenasjesystemet til nedstrøms vannstand slik det ofte antas (Strassburger, 1989). Poretrykksmålinger bør foretas både i grenseflata mellom dammen og fundamentet og i fundamentet (ICOLD, 2013b). ICOLD (2005) anbefaler at poretrykket registreres en gang i uka for dammer på fjellfundament. Avlesninger bør foregå hyppigere ved uvanlige hendelser, som ved høy vannstand i magasinet og særlig ved flomhendelser (Strassburger, 1989).

I tillegg til å gjennomføre poretrykksmålinger må også vannstanden i magasinet registreres samtidig som poretrykket. Det kan også være verdifullt å måle lufttemperatur og lekkasje gjennom drenasjesystemet dersom dammen har dette (ICOLD, 2013b).

Lekkasje er viktig å måle da registrering av redusert lekkasje samtidig som poretrykket gradvis øker kan bety at drenasjesystem er tett (Strassburger, 1989).

Videre følger en kort beskrivelse av to typer instrument som kan benyttes til måling av poretrykk. Begge instrumentene er beskrevet nærmere i “Engineering in Rock Masses” av F. G. Bell (1992). En beskrivelse av vedlikehold og kalibrering av måleinstrumentene og valg av instrumenter finnes i “Bulletin 158: Dam Surveillance Guide” av ICOLD (2013b).

Standrør

Standrør er den enkleste metoden for å måle poretrykk. Standrør er et rør i plast eller metall som er åpent i begge ender. I nedre ende av standrøret festes en porøs tupp. A. Casagrande utviklet på 1940-tallet en keramisk tupp som fortsatt benyttes. Det er også vanlig å bruke en tilsvarende tupp i plast. Standrøret føres ned i et borehull gjennom dam og/eller fundament. Bunnen av borehullet, rundt tuppen, fylles så med sand og grus. Deretter forsegles nedre del av standrøret med et lag av leire og betong slik at trykket i standrøret ikke skal påvirkes av forholdene lengre opp i fundamentet og dammen. Resten av borehullet fylles så med sand og grus (Bell, 1992).

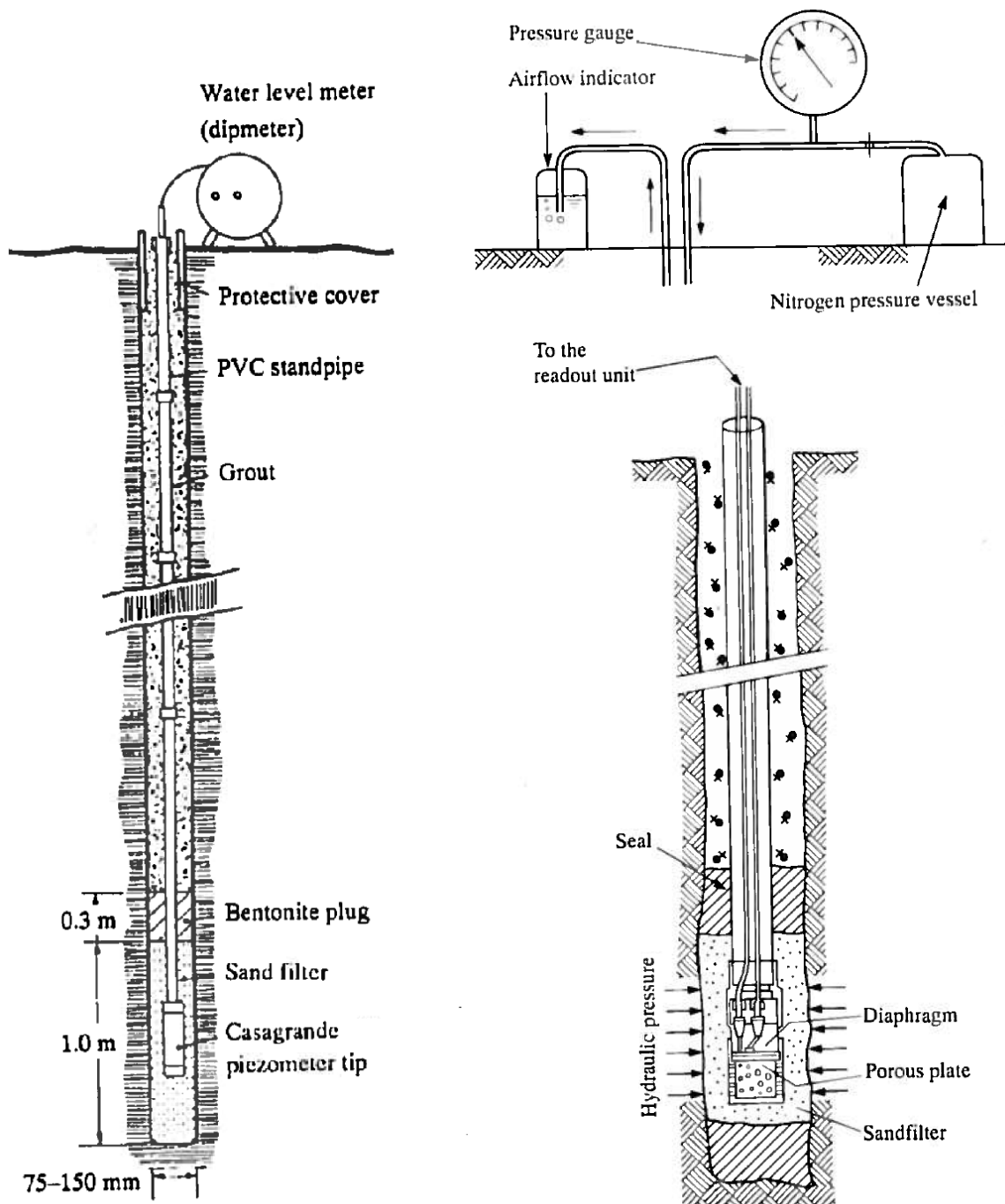
Poretrykket registreres ved å måle vannstanden i standrøret, som tilsvarende trykkehøyden i målepunktet (Bell, 1992). Dersom trykkehøyden er høyere enn lengden på standrøret kan poretrykket måles med en trykkmåler installert øverst på standrøret (ICOLD, 2005). Venstre del av figur 2.18 viser hvordan et standrør kan utformes.

Ulempen med å benytte standrør er lang responstid fra endring av poretrykk i fundamentet til endring av vannstand i standrøret. Vannstandsendringen krever at en viss mengde vann renner inn eller ut av standrøret. Ved lav permeabilitet er vannhastigheten i fundamentet treg og responstiden dermed lang (Bell, 1992). ICOLD (2004b) mener at standrør ikke egnes som instrument dersom raske endringer i poretrykket skal måles i fundament med lav permeabilitet. Standrør har moderat pålitelighet og lang levetid.

Trykkipiezometer

Et trykkipiezometer består av et borehull med to rør som kobles til en membran ved tuppen. Tuppen dekkes med sand og grus og forsegles deretter med samme metode som for standrør. Systemet fylles så med vann. Vanntrykket i systemet styres deretter av et eksternt trykk, gjerne fra nitrogengass. Avlesning av poretrykket skjer fra en trykkmåler (Bell, 1992). Høyre del av figur 2.18 viser hvordan et trykkipiezometer kan utformes.

Fordelen med trykkipiezometer er at de er lette å operere og gir nøyaktige målinger. Responstida er generelt kort og de egner seg derfor godt ved poretrykksmålinger i fundament med lav permeabilitet (Bell, 1992). ICOLD (2013b) rangerer trykkipiezometre til å ha høy pålitelighet og lang levetid. Installasjonen er kritisk for at måleren skal bli pålitelig (ICOLD, 2005).



Figur 2.18: Standrør i borehull til venstre og trykpiezometer med trykkmåler til avlesning av poretrykk til høyre (Bell, 1992)

2.4.2 Etterinstrumentering av poretrykk

Etterinstrumentering er installering av måleinstrumenter etter at en dam er i drift. En etterinstrumentering kan gjennomføres enten for å erstatte utdaterte måleinstrument eller for å få ny informasjon om en dam (ICOLD, 2013b).

Etterinstrumentering av poretrykksmålere kan gjennomføres ved å bore hull fra enten en inspeksjonsgang eller fra oppstrøms og nedstrøms siden av dammen. Hullene bores gjennom dammen og ned i fundamentet. Deretter kan instrumenter installeres i borehullene. Borehullene bør gå et par meter ned i fundamentet slik at sannsynligheten for å treffe en sprekk i fundamentet øker (Kittler, 2014).

En beskrivelse av to dammer som er etterinstrumentert, Ringedalsdammen og dam Klingenberg, er vist i kapittel 4.

Kapittel 3

Regelverk

I dette kapitlet presenteres deler av regelverket om damsikkerhet i Norge, Sverige og Sveits. Regelverket er senere benyttet ved gjennomføring av stabilitetsberegninger, beskrevet i kapittel 6.

Fra regelverket om damsikkerhet er det vist på hvordan oppdrift under en gravitasjonsdam beregnes og videre hvordan oppdriften inkluderes i stabilitetsberegninger. Det er også sett på krav til instrumentering av poretrykk.

Kun regelverket for gravitasjonsdammer i betong for enkle lasttilfeller er presentert. Det er sett bort i fra tilfeller som spennstag og fjellbolter, samt kohesjon og helning på planet mellom dam og fundament. Det forutsettes at det alltid er trykkspenninger på hele flata mellom dam og fundamentet.

3.1 Norge

Siden 1909 har norske dammer vært underlagt offentlig tilsyn av NVE. Tilsynet er lovfestet i “Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg”, forkortet Damsikkerhetsforskriften (2009). NVE har utformet en rekke retningslinjer og veiledere som utdyper kravene i damsikkerhetsforskriften (NVE, 2010). Videre i dette delkapitlet benyttes “Retningslinjer for betongdammer” (NVE, 2005a), “Retningslinjer for laster og dimensjonering” (NVE, 2003) og “Retningslinjer for overvåkning og instrumentering av vassdragsanlegg” (NVE, 2005b).

3.1.1 Beregning av oppdrift

Etter Damsikkerhetsforskriften (2009) er oppdrift definert som en permanent last. For en dam uten poretrykksreduksjon beregnes poretrykket som lineært avtagende under hele dammen, fra oppstrøms til nedstrøms vanntrykk (NVE, 2005a). Oppdriften beregnes som vist i ligning (3.1) og illustrert i figur 3.1.

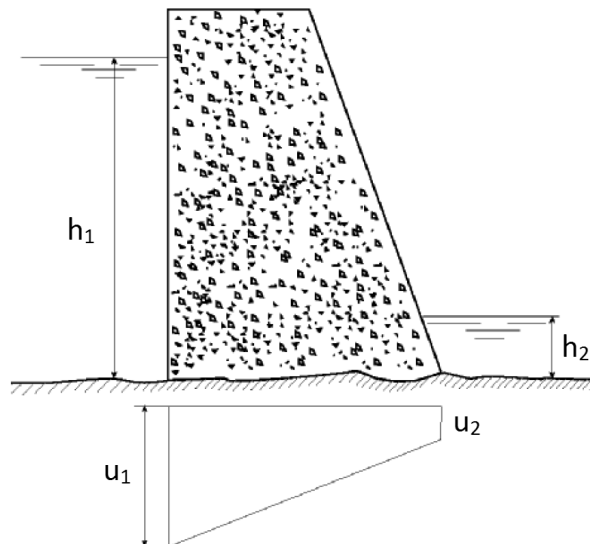
$$P = \frac{u_1 + u_2}{2} * B_b \quad (3.1)$$

Hvor: P er oppdrift i kN/m, u_1 er poretrykk i oppstrøms ende av fundamentet i kN/m², u_2 er poretrykk i nedstrøms ende av fundamentet i kN/m² og B_b er bredde av damfot i tverrsnittet i m.

Videre er:

$$u_1 = h_1 * \gamma_w \quad (3.2)$$

$$u_2 = h_2 * \gamma_w \quad (3.3)$$



Figur 3.1: Oppdrift under gravitasjonsdam (NVE, 2005a)

Drenasjesystem

Fundamentet under betongdammer skal dreneres dersom oppbygging av poretrykk eller strømning av vann i fundamentet kan gjøre dammen ustabil (Damsikkerhetsforskriften, 2009). Dersom redusert oppdrift skal benyttes ved stabilitetsberegninger må drenasjesystemet utformes etter krav i “Retningslinjer for betongdammer” (NVE, 2005a).

NVE (2005a) krever at drenasjesystemet skal utformes med drenasjehull i fjellfundamentet med utløp i en inspeksjonsgang i dammen, som er lett tilgjengelig. Nivået på inspeksjonsgangen må ligge over normal nedstrøms vannstand. I inspeksjonsgangen er det krav til at hvert enkelt drenasjehull skal være synlig og at vannet skal dreneres ut av dammen ved fall i inspeksjonsgangen. Drenasjesystemet skal ligge nedstrøms

en eventuell injeksjonsskjerm og minst 1 m pluss 5 % av dammens høyde nedenfor oppstrøms damtå.

I tillegg bør drenasjehullene ha:

- Diameter større enn 100 mm
- Senteravstand mindre enn 3 m
- En dybde tilsvarende minst 50 % av oppstrøms vanntrykk

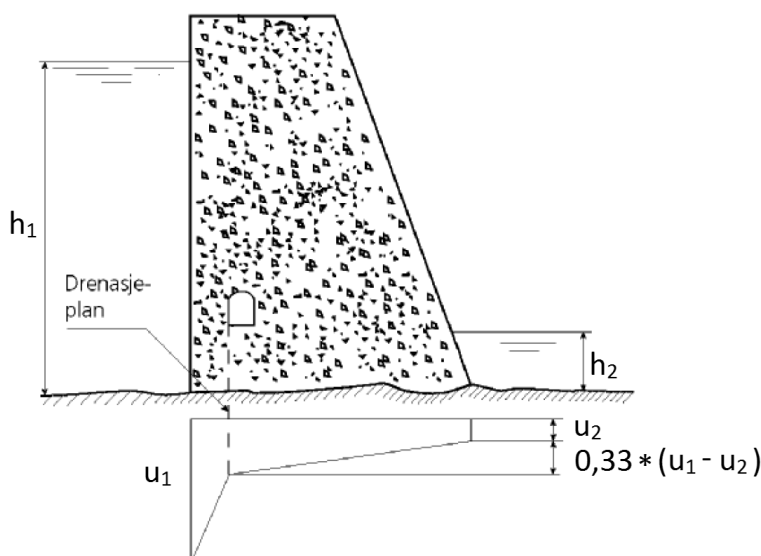
Oppdriften under en dam med drenering beregnes med lineært avtagende poretrykk fra oppstrøms vanntrykk til drenert poretrykk, u_{dren} , i drenasjeplanet og videre med lineært avtagende poretrykk til nedstrøms vanntrykk. Drenasjeplanet referer til plasseringen av drenasjehullene og er vist i figur 3.2. Det reduserte poretrykket, u_{dren} , beregnes som vist i ligning (3.4). Oppdriften får en fordeling som vist i figur 3.2 og beregnes som vist i ligning (3.5) (NVE, 2005a).

$$u_{dren} = u_2 + k_{dren} * (u_1 - u_2) \quad (3.4)$$

Hvor: u_{dren} er poretrykk i drenasjeplanet i kN/m^2 og k_{dren} er reduksjonsfaktor for drenasjeplanet.

$$P = \frac{u_1 + u_{dren}}{2} * B_o + \frac{u_{dren} + u_2}{2} * B_n \quad (3.5)$$

Hvor: B_o er bredde av damfot oppstrøms drenasjeplanet i m og B_n er bredde av damfot nedstrøms drenasjeplanet i m.



Figur 3.2: Oppdrift under en gravitasjonsdam med drenasjesystem (NVE, 2005a)

Reduksjonsfaktoren er $k_{dren} = 0,33$ med mindre forsøk eller målinger på damstedet gir grunnlag for å benytte en annen verdi. Poretrykket i drenasjeplanet, u_{dren} , kan ikke være lavere enn poretrykket tilsvarende vannstanden i avløpet fra inspeksjonsgangen (NVE, 2005a).

Injeksjonsskjerm

Dersom sprekker i fundamentet kan føre til lekkasje skal fundamentet injiseres. Injeksjonsskjermen skal være tett nok til at lekkasjer ikke kan påvirke dammens stabilitet eller medføre uakseptabelt vanntap. Regelverket tillater ikke at poretrykket reduseres som følge av en injeksjonsskjerm (NVE, 2005a).

3.1.2 Velte- og glidestabilitet

Alle gravitasjonsdammer skal kontrolleres for velte- og glidestabilitet i bruddgrensetilstand og ulykkesgrensetilstand (Damsikkerhetsforskriften, 2009). Videre er det kun sett på bruddgrensetilstand. Da skal følgende lasttilfeller benyttes (NVE, 2003):

- Høyeste regulerte vannstand (HRV) og istrykk
- Dimensjonerende flomvannstand (DFV)

I begge lasttilfellene benyttes lastkoeffisienten $\gamma_L = 1,0$ for alle laster. Stabilitetskravene skal innfris for alle sannsynlige bruddplan i dammen, på flata mellom dam og fundament og i fundamentet (NVE, 2005a). Videre i oppgaven er det kun sett på flata mellom dam og fundament.

Veltestabilitet

Kravet til veltestabilitet for bruddgrensetilstand oppfylles dersom resultanten av alle krefter, a , ligger innenfor kjernetversnittet. Kjernetversnittet er definert som den midterste tredjedelen av damfotens bredde. Resultanten av alle krefter, a , måles fra nedstrøms damtå og oppover langs damfoten (NVE, 2005a). Den beregnes som vist i ligning (3.6).

$$a = \frac{\Sigma M_s - \Sigma M_v}{\Sigma F_v} \quad (3.6)$$

Hvor: a er resultanten av alle krefter i m, ΣM_s er sum av stabiliserende moment i kNm, ΣM_v er sum av veltende moment i kNm og ΣF_v er sum av vertikale krefter i kN.

Glidestabilitet

Sikkerheten mot glidning kontrolleres ved å påvise at horisontalkreftene kan overføres fra konstruksjonen til fundamentet uten at glidning oppstår (NVE, 2005a). Sikkerhetsfaktoren mot glidning, S_g , beregnes som:

$$S_g = \frac{\Sigma F_v}{\Sigma F_h} * \tan \phi \quad (3.7)$$

Hvor: S_g er sikkerhetsfaktor mot glidning, ΣF_h er sum av horisontale krefter i kN og ϕ er friksjonsvinkel.

I bruddgrensetilstand skal $S_g \geq 1,5$ for å oppnå sikkerhet mot glidning (Damsikkerhetsforskriften, 2009). Friksjonsvinkelen, ϕ , kan variere fra 40° ved løse bergarter med skifrihet til 50° for harde bergarter og ru overflate (NVE, 2005a).

3.1.3 Måling av poretrykk

I tabell 7-2.2 i Damsikkerhetsforskriften (2009) stilles det krav til måling av poretrykk for betongdammer i klasse 2, 3 og 4, som er fundamentert på fjell med utpregede svakhetssoner. For betongdammer i klasse 2, 3 og 4, som er fundamentert på godt fjell, stilles det ingen krav til måling av poretrykk. Det følger ikke en definisjon av godt fjell.

Ved måling av poretrykk skal målingene skje kontinuerlig. Det vil si at poretrykket registreres minst en gang i året eller hyppigere. I tillegg til registreringen av poretrykket skal også vannstanden i magasinet registreres ved samme tidspunkt. For damstedet skal det utarbeides grenseverdier for målingene som angir når eventuelle sikkerhetstiltak skal iverksettes. Måledataene skal evalueres fortløpende etter at en avlesning er gjennomført (NVE, 2005b).

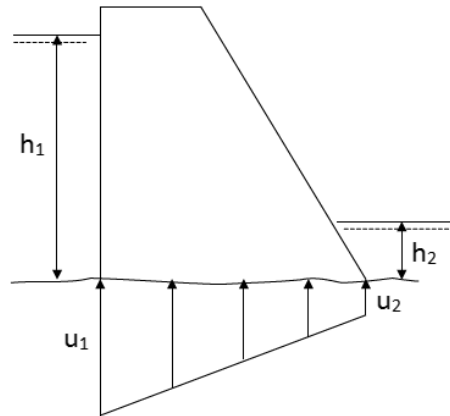
3.2 Sverige

I Sverige finnes det ikke et offisielt regelverk for prosjektering av dammer. Kraftindustrien har selv utarbeidet retningslinjer for damsikkerhet, kalt “RIDAS - Kraftföretagens riktlinjer för damsikkerhet” (ICOLD, 2013a). Retningslinjene viser normal praksis ved prosjektering av nye dammer i Sverige (ICOLD, 2004a).

3.2.1 Beregning av oppdrift

For en dam uten poretrykksreduksjon beregnes poretrykket som lineært avtagende under hele dammen. Oppdriften beregnes som vist i ligning (3.8) og illustrert i figur 3.3 (Svensk Energi, 2011).

$$P = \frac{u_1 + u_2}{2} * B_b \quad (3.8)$$



Figur 3.3: Oppdrift under gravitasjonsdam (Svensk Energi, 2011)

Drenasjesystem

Dersom redusert oppdrift fra et drenasjesystem skal benyttes ved stabilitetsberegninger må drenasjesystemets effekt kontrolleres, for eksempel ved å måle poretrykket like nedstrøms drenasjehullene. I tillegg bør drenasjehullene ha (Svensk Energi, 2011):

- Diameter større enn 75 - 100 mm
- Senteravstand på 1,5 - 3,0 m
- En dybde tilsvarende minst 50 % av oppstrøms vanntrykk

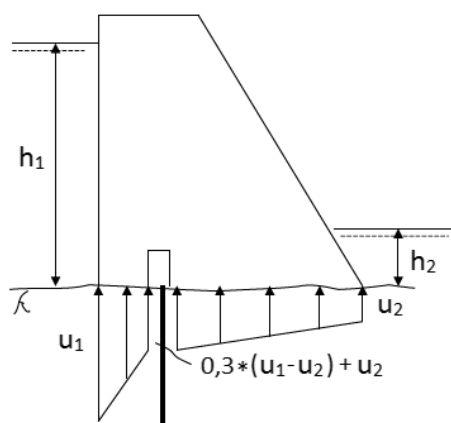
Retningslinjene skiller mellom to typer drenasjesystem. Det første tilfellet er med inspeksjonsgang langs fjellfundamentet, vist i figur 3.4. Det andre tilfellet er for inspeksjonsgang i dammen, vist i figur 3.5.

I begge tilfellene beregnes oppdriften med lineært avtagende poretrykk fra oppstrøms vanntrykk til drenert poretrykk, u_{dren} , i drenasjeplanet og videre med lineært avtagende poretrykk til nedstrøms vanntrykk. Det reduserte poretrykket, u_{dren} , beregnes som vist i ligning (3.9) (Svensk Energi, 2011). Oppdriften får en fordeling som vist i figur 3.4 og 3.5, og beregnes som vist i ligning (3.10).

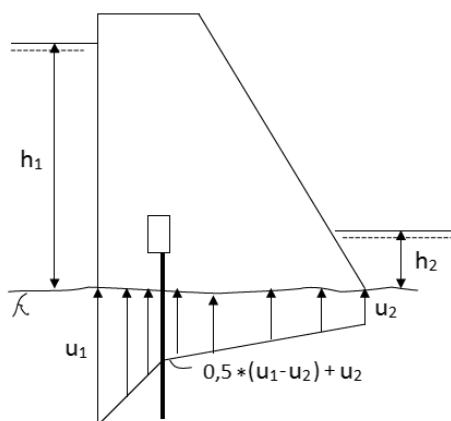
$$u_{dren} = u_2 + k_{dren} * (u_1 - u_2) \quad (3.9)$$

$$P = \frac{u_1 + u_{dren}}{2} * B_o + \frac{u_{dren} + u_2}{2} * B_n \quad (3.10)$$

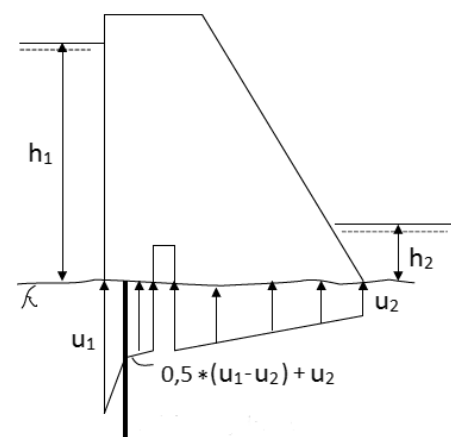
Svensk Energi (2011) har satt $k_{dren} = 0,3$ dersom inspeksjonsgangen ligger langs fjellfundamentet og $k_{dren} = 0,5$ dersom inspeksjonsgangen er i dammen.



Figur 3.4: Oppdrift under gravitasjonsdam med drenasjesystem og inspeksjonsgang på fundament (Svensk Energi, 2011)



Figur 3.5: Oppdrift under gravitasjonsdam med drenasjesystem og inspeksjonsgang i dammen (Svensk Energi, 2011)



Figur 3.6: Oppdrift under gravitasjonsdam med injeksjonsskjerm (Svensk Energi, 2011)

Injeksjonsskjerm

Dersom redusert oppdrift fra en injeksjonsskjerm skal benyttes ved stabilitetsberegninger må injeksjonsskjermens effekt kontrolleres, for eksempel ved å måle poretrykket like nedstrøms skjermen. Effekten må kontrolleres da den kan avta med tiden som følge av utvasking av sementen som brukes i injiseringen. Injeksjonsskjermen må være plassert i oppstrøms ende av dammen (Svensk Energi, 2011). Retningslinjene gir ingen krav til plassering av injeksjonsskjermen i forhold til drenasjesystemet, men som figur 3.6 viser ligger injeksjonsskjermen oppstrøms en eventuell inspeksjonsgang.

Redusert poretrykk ved injeksjonsskjermen kan beregnes likt som u_{dren} i ligning (3.9), med $k_{dren} = 0,5$. Oppdriften får en fordeling som vist i figur 3.6 og beregnes som vist i ligning (3.10) (Svensk Energi, 2011).

3.2.2 Velte- og glidestabilitet

Alle gravitasjonsdammer skal kontrolleres for velte- og glidestabilitet for tre ulike lasttilfeller. De tre lasttilfellene er vanlig lasttilfelle, eksepsjonelt lasttilfelle og ulykkeslasttilfelle. Alle tre lasttilfellene består av flere situasjoner som kontrolleres ved stabilitetsberegninger (Svensk Energi, 2011). Videre er det valgt å se nærmere på følgende situasjoner:

- Vanlig lasttilfelle: Høyeste regulerte vannstand og maksimalt istrykk
- Eksepsjonelt lasttilfelle: Dimensjonerende flomvannstand

Retningslinjene viser ikke til bruk av lastkoeffisienter ved beregning av velte- og glide-stabilitet.

Veltestabilitet

Svensk Energi (2011) gir to krav for veltestabilitet. Det første kravet er at forholdet mellom stabiliserende og veltende moment skal være større enn sikkerhetsfaktoren mot velting, vist i ligning (3.11) (Svensk Energi, 2011):

$$S_v = \frac{\Sigma M_s}{\Sigma M_v} \quad (3.11)$$

Hvor: S_v er sikkerhetsfaktor mot velting.

For vanlige lasttilfeller skal $S_v \geq 1,5$. Ved eksepsjonelt lasttilfelle skal $S_v \geq 1,35$.

I tillegg kommer et krav ved vanlig lasttilfelle at resultanten av kreftene skal ligge innenfor kjernetverrsnittet, som utgjør den midterste tredjedelen av tverrsnittet (Svensk Energi, 2011). Kraftresultanten beregnes som:

$$a = \frac{\Sigma M_s - \Sigma M_v}{\Sigma F_v} \quad (3.12)$$

Glidestabilitet

Sikkerhet mot glidning kontrolleres ved å påvise at horisontalkreftene kan overføres fra konstruksjonen til fundamentet. Kravet for glidestabilitet er som vist i ligning (3.13) (Svensk Energi, 2011).

$$S_g \leq \frac{\Sigma F_h}{\Sigma F_v} * \tan \phi \quad (3.13)$$

For gravitasjonsdammer fundamentert på fjell skal $S_g > 1,35$ i vanlig lasttilfelle. For eksepsjonelt lasttilfelle skal $S_g > 1,10$ (Svensk Energi, 2011).

3.2.3 Måling av poretrykk

Dersom stabiliteten til en dam skal beregnes basert på redusert poretrykk fra drenasjesystem eller en injeksjonsskjerm skal effekten kontrolleres. Det kan gjøres ved å foreta poretrykksmålinger i fundamentet (Svensk Energi, 2011). I forbindelse med denne oppgaven har kun retningslinjen for betongdammer vært tilgjengelig. Denne delen omtaler ikke hvordan poretrykksmålinger skal gjennomføres.

3.3 Sveits

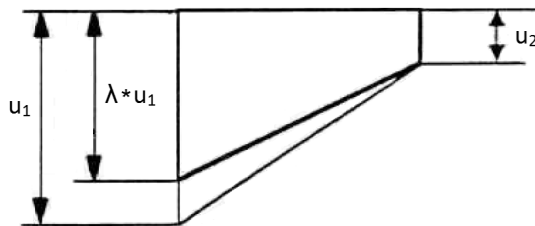
I år 1999 ble en ny sveitsisk forskrift gjort gjeldene, kalt Damforskriften (Mouvet, Müller og Pougatsch, 2011). Damforskriften gir ikke spesifikke krav til prosjektering av dammer. Sveits' statlige kontor for vann og geologi, "Federal Office for Water and Geology" (FOWG), har derfor lagt retningslinjer med anbefalte metoder ved prosjektering av dammer. Retningslinjene er ikke lovpålagt (ICOLD, 2004a; 2013a).

3.3.1 Beregning av oppdrift

For en dam uten drenasjesystem eller injeksjonsskjerm vil poretrykket avta lineært fra oppstrøms til nedstrøms ende av dammen. Poretrykket har en fordeling som vist i figur 3.7 og oppdriften beregnes som vist i ligning (3.14). Korreksjonsfaktoren er $\lambda = 1$ for en situasjon uten poretrykksreduksjon (FOWG, 2002a).

$$P = \frac{\lambda * u_1 + u_2}{2} * B_b \quad (3.14)$$

Hvor: λ er reduksjonsfaktor for oppstrøms vanntrykk.



Figur 3.7: Oppdrift under gravitasjonsdam (FOWG, 2002a)

Drenasjesystem og injeksjonsskjerm

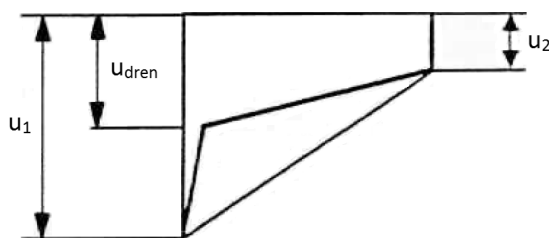
FOWG (2002a) viser til to metoder for å beregne redusert oppdrift under en gravitasjonsdam med drenasjesystem og injeksjonsskjerm.

Den første metoden er vist i figur 3.7 og oppdriften beregnes etter ligning (3.14). Her vil reduksjonsfaktoren λ variere mellom 0,75 og 1. For et godt fungerende drenasjesystem settes $\lambda = 0,75$ (FOWG, 2002a).

Den andre metoden er vist i figur 3.8. Poretrykket i drenasjeplanet beregnes etter ligning (3.15) og oppdriften etter ligning (3.16). FOWG (2002a) oppgir ikke hvilken verdi som kan benyttes for reduksjonsfaktoren, k_{dren} , i retningslinjene. I retningslinjene henvises det til boka “Aufrieb bei betonsperren”, “Oppdrift på betongdammer”, utgitt av Den sveitsiske damkomité i 1992.

$$u_{dren} = u_2 + k_{dren} * (u_1 - u_2) \quad (3.15)$$

$$P = \frac{u_1 + u_{dren}}{2} * B_o + \frac{u_{dren} + u_2}{2} * B_n \quad (3.16)$$



Figur 3.8: Alternativ beregning av oppdrift under gravitasjonsdam med drenasjesystem og injeksjonsskjerm (FOWG, 2002a)

3.3.2 Velte- og glidestabilitet

Alle gravitasjonsdammer skal kontrolleres for velte- og glidestabilitet for tre ulike lasttilfeller. De tre er vanlig lasttilfelle, eksepsjonelt lasttilfelle og ekstremt lasttilfelle (FOWG, 2002a). Videre er det valgt å se nærmere på følgende to tilfeller:

- Eksepsjonelt lasttilfelle: Vanlig vannstand og istrykk
- Eksepsjonelt lasttilfelle: Høy vannstand

Retningslinjene viser ikke til bruk av lastkoeffisienter ved beregning av velte- og glide-stabilitet.

Veltestabilitet

Kravet til veltestabilitet oppfylles dersom resultanten av alle krefter, a , ligger innenfor kjernetverrsnittet. Resultanten beregnes som vist i ligning (3.17) (FOWG, 2002a):

$$a = \frac{\Sigma M_s - \Sigma M_v}{\Sigma F_v} \quad (3.17)$$

FOWG (2002a) gir ingen definisjon av kjernetverrsnittet.

Dersom et rotasjonspunkt er tydelig definert for dammen kan veltestabiliteten også beregnes som (FOWG, 2002a):

$$S_v = \frac{\Sigma M_s}{\Sigma M_v} \quad (3.18)$$

I eksepsjonelt lasttilfelle skal $S_v > 1,3$ (FOWG, 2002a).

Glidestabilitet

Sikkerheten mot glidning kontrolleres ved å påvise at horisontallasten kan overføres fra konstruksjonen til fundamentet uten at glidning oppstår. Sikkerhetsfaktoren mot glidning beregnes som (FOWG, 2002a):

$$S_g = \frac{\Sigma F_v}{\Sigma F_h} * \tan \phi \quad (3.19)$$

I eksepsjonelt lasttilfelle skal $S_g > 1,3$ (FOWG, 2002a).

3.3.3 Måling av poretrykk

For dammer over 10 meter anbefaler FOWG (2002b) at poretrykksmålinger foretas en gang i uka til en gang i måneden. Hvert tverrsnitt hvor poretrykket måles bør ha flere målepunkter langs damfotens bredde. FOWG (2002b) mener at poretrykksmålinger også bør benyttes til forskning, i tillegg til å øke sikkerheten av dammen.

Kapittel 4

Håndtering av poretrykk ved fem dammer

I dette kapitlet presenteres fem betongdammer fundamentert på fjell for å vise hvordan poretrykk i fundamentet er håndtert.

For alle dammene er det sett på valg av konstruktive tiltak for å redusere poretrykket i fundamentet eller eventuelle grunner til at slike tiltak er valgt bort. For dammene hvor poretrykksmålinger gjennomføres er utformingen av systemet beskrevet.

Av de fem dammene som er presentert ligger to i Norge, to i Tyskland og den siste i Østerrike. Dammene er valgt fordi de representerer både gamle og nye dammer og ulike valg for poretrykksreduksjon og poretrykksmålinger.

4.1 Ringedalsdammen

Ringedalsdammen er en gravitasjonsdam fra 1918. Dammen ligger i Tyssovassdraget i Odda kommune i Hordaland og eies av Statkraft. Dammens tverrsnitt er vist i figur 4.1.

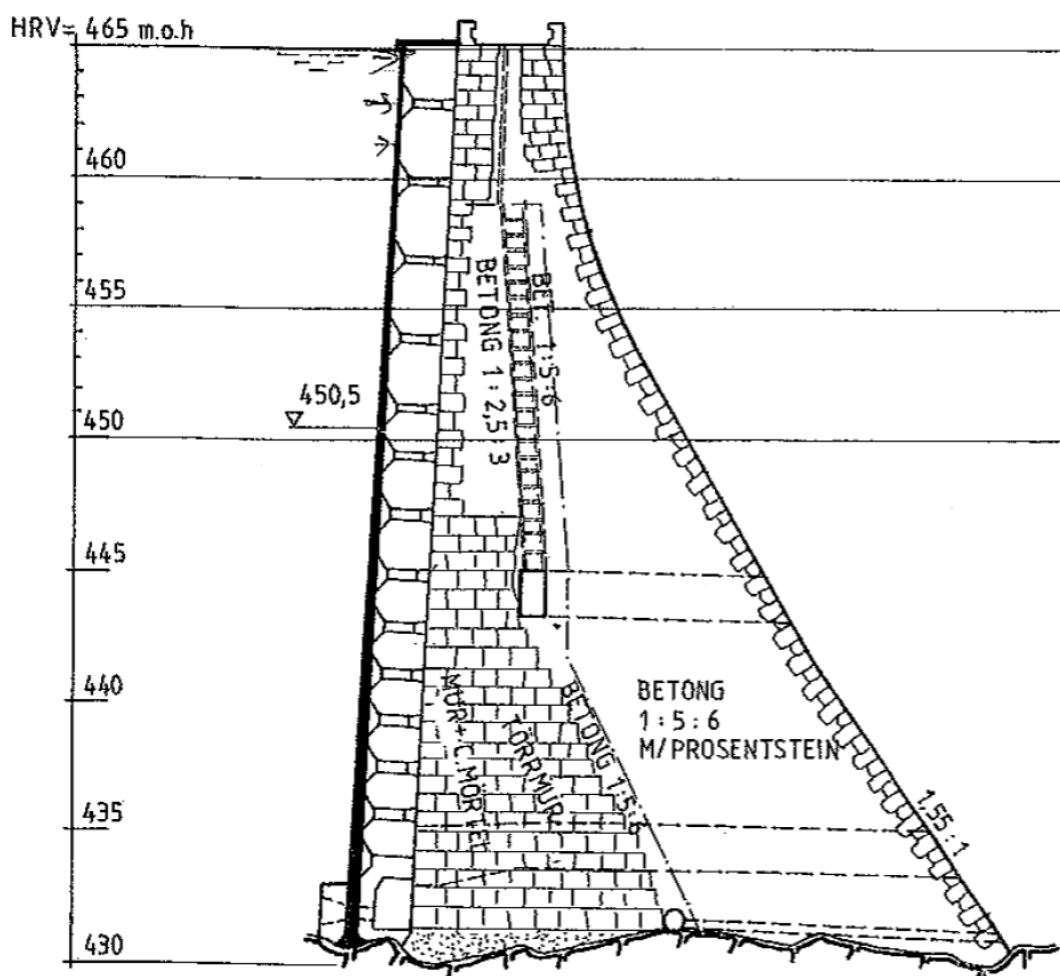
Videre følger noen opplysninger om dammen (Nynäs, 2013; Sweco, 2013; Grøner, 1999b):

Byggeår	1910-1918
Damtype og material	Gravitasjonsdam av betong, kjerne av mur
Høyde	33 meter
Lengde	520 meter
Injeksjonsskjerm	Ja
Drenasjesystem	Nei
Poretrykksmålere	Ja
Fundament	Grunnfjells-granitt. Antas relativt tett, noen lekkasjer

Poretrykksreduksjon

Ringedalsdammen har en frittstående frontplate i armert betong på oppstrøms side av dammen. Som vist i figur 4.1 ligger plata et par meter oppstrøms hovedkonstruksjonen og støtter seg på søyler mot dammen (Nynäs, 2013). Dermed blir poretrykket under dammen i oppstrøms ende av hovedkonstruksjonen mindre enn vanntrykket fra magasinet (Sweco, 2013).

Dammen har en injeksjonsskjerm i oppstrøms ende av dammen. Den ansees som relativt tett i 3 av 4 snitt i dammen hvor poretrykket måles (Sweco, 2013). Injeksjonsskjermen er ikke vist i arbeidstegningene.



Figur 4.1: Tverrsnitt av Ringedalsdammen (Grøner, 1984)

Poretrykksmålinger

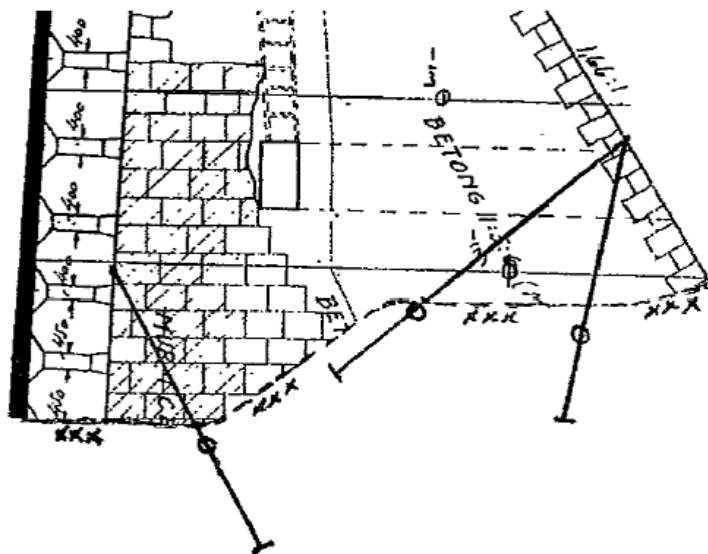
Ringedalsdammen ble revurdert i 1999. Forutsetninger fra datidens "Forskrift for Dammer" ga et tilnærmet rektangulært poretrykksdiagram under dammen og dammen oppfylte derfor ikke kravene til stabilitet. Dersom dameier installerte poretrykksmålere

og et trekantet poretrykksdiagram ble bekreftet, kunne dette benyttes ved stabilitetsberegninger (Grøner, 1999a). Tillatelse til bruk av tilpasset oppdrift skyltes i følge NVE (1999) at den spesielle konstruksjonen av Ringedalsdammen, med frittstående oppstrøms frontplate, skiller seg fra ordinære gravitasjonsdammer. Det ble derfor bestemt at poretrykksmålere skulle installeres i dammen (Grøner, 1999a).

Før installering av poretrykksmålerne ble en befaring gjennomført for å undersøke sprekkorienteringen og lekkasjer i fundamentet, for å bestemme plasseringen av poretrykksmålerne. Fire kontrollsnitt ble valgt ut. I hvert kontrollsnitt ble tre hull boret i henholdsvis oppstrøms ende av dammen, midt under dammen og nedstrøms ende av dammen. Hullene ble boret fra dammens oppstrøms og nedstrøm side og 2-3 meter ned i fundamentet, som vist i figur 4.2 (Grøner, 1999b). I figuren representerer sirkelen plasseringen av måleinstrumentet. Alle målepunktene ligger i flata mellom dammen og fundamentet eller i fundamentet like under kontaktflata (Grøner, 2000).

Poretrykksmålerne ble installert i 1999. Kun et mindretall av målerne ble installert på en tilfredsstillende måte (Grøner, 2000). I 2000 ble derfor noen av målerne reinstallert (Statkraft Grøner, 2003).

I år 2012 ble avlesning av poretrykket gjennomført en gang i uka (Sweco, 2013).



Figur 4.2: Tverrsnitt av Ringedalsdammen med plassering av poretrykksmålere (Statkraft Grøner, 2003)

Det ble også vurdert å forankre Ringedalsdammen med stag. Kostnadene ved denne løsningen ble av Grøner (1999a) vurdert til å være høyere enn poretrykksmålere, da tidligere dammer hvor stagforankring er gjennomført har vært både kortere og lavere enn Ringedalsdammen. Grøner (1999a) anbefalte derfor dameier å installere poretrykksmålere.

En analyse av poretrykksmålingene er beskrevet i kapittel 5.

4.2 Dam Gottleuba

Dam Gottleuba er en gravitasjonsdam fra 1974. Dammen ligger i Sachsen, Tyskland. I forbindelse med denne masteroppgaven ble det gjennomført en befaring ved dammen. En befaringsrapport er vedlagt i vedlegg A. Den videre informasjonen om dammen er hentet fra egne observasjoner fra befaringen og personlig kommunikasjon med Jan Kittler (2014), med mindre det er vist til andre kilder.

Figur 4.3 viser dammens utforming. Dammens tverrsnitt er vist i figur 4.4.



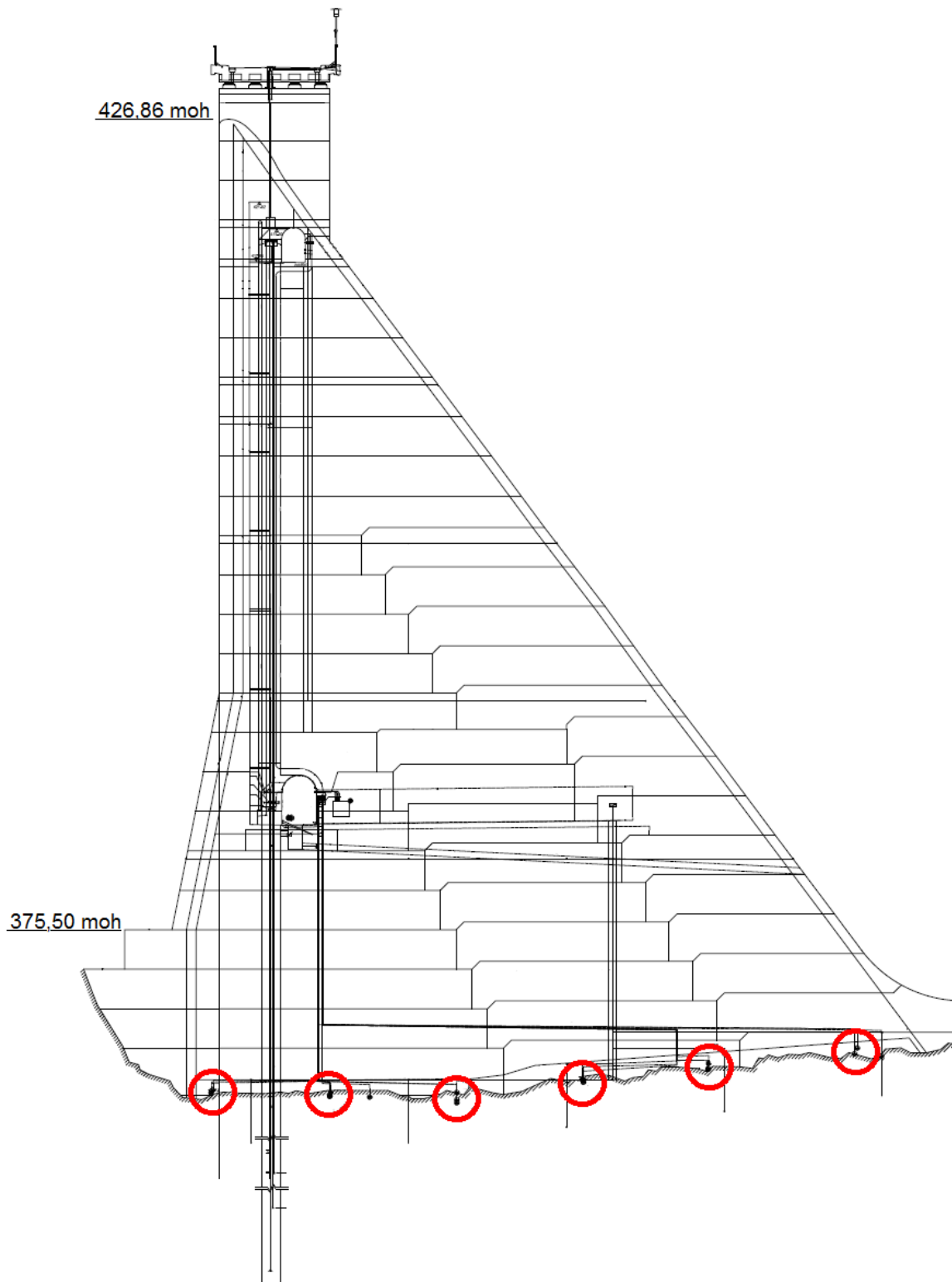
Figur 4.3: Nedstrøms side av dam Gottleuba sett fra høyre vederlag (Adam, 2014)

Videre følger noen opplysninger om dammen:

Byggeår	1965-1974
Damtype og material	Gravitasjonsdam av betong
Høyde	57 meter
Lengde	330 meter
Injeksjonsskjerm	Ja
Drenasjesystem	Ja
Poretrykksmålere	Ja
Fundament	Hovedsakelig gneis. Ikke ansett som særlig godt.

Poretrykksreduksjon

Dammens fundament er injisert i oppstrøms ende. Injiseringen ble gjennomført ved bygging av dammen og det har ikke vært utført etterinjisering. Injeksjonsskjermen består av to rader med 1,5 meters avstand. Det er 3 meter mellom hvert injeksjonshull i radene.



Figur 4.4: Tverrsnitt av dam Gottleuba med plassering av måleinstrument for poretrykk, vist med rødt. Injeksjonsskjermen ligger oppstrøms målepunktet lengst oppstrøms, men er ikke vist på tegningen (LTV, 2010)

De to radene er forskjøvet omtrent 1,5 meter i forhold til hverandre. I den høyeste delen av dammen har injeksjonsskjermene en dybde på ca. 17 og 27 meter. Den korteste er plassert lengst oppstrøms. Allerede ved første fylling av dammen var det mistanke om en feil ved injeksjonsskjermen i den høyeste delen av dammen, da høye poretrykk ble registrert her.

I 1981 ble det boret 12 drenasjehull i den høyeste delen av dammen. Det ble gjennomført på grunn av mistanken om feil i injeksjonsskjermen. Hullene ble boret fra inspeksjonsgangen og omtrent 10 meter ned i fundamentet. De ble boret på skrå mot oppstrøms side av dammen. I 2000 ble ytterligere 5 hull boret i samme del av dammen. I løpet av dammens driftstid har drenasjehullene blitt holdt både åpne og lukket slik at effekten fra drenasjesystemet kan vurderes av dameier. Det er ikke utført vedlikehold av drenasjesystemet. LTV mener det ikke er nødvendig da systemet er utformet slik at luft ikke slipper til i drenasjerørene. Det vil derfor ikke oppstå avsetninger i rørene.

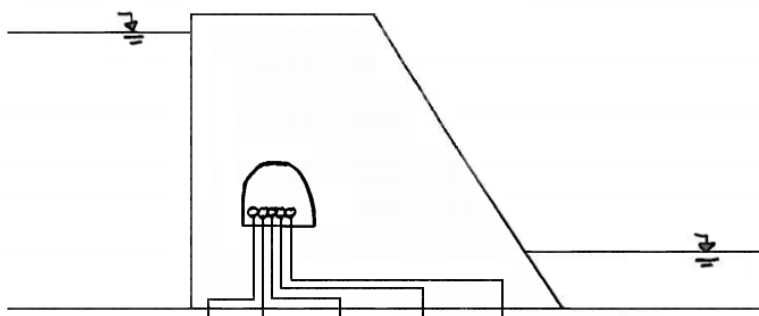
Poretrykksmålinger

Poretrykksmålere i form av standrør ble installert ved bygging av dammen. Standrør er beskrevet i del 2.4.1. Poretrykket er målt i flata mellom dammen og fundamentet. Stedene som ble valgt for måling hadde tydelige sprekker i fundamentet.

Poretrykksmålerne ble utført som vist i figur 4.5. En “potte” ble satt opp ned på fundamentet, med standrør opp til inspeksjonsgangen. Rørene ble bøyd helt nede ved fundamentet og ført vertikalt opp i inspeksjonsgangen, som vist i figur 4.6. Dermed kommer flere rør fra ulike målepunkt samlet opp til inspeksjonsgangen. Rørene ble bøyd helt nede ved fundamentet for at vannstanden i rørene skal kunne måles manuelt fra inspeksjonsgangen. De manuelle målingene gjennomføres ved å måle vannstanden i standrørene. Vannstanden i standrøret tilsvarer trykkehøyden i målepunktet.



Figur 4.5: Opp ned “potte” over målepunkt (LTV, 2006)



Figur 4.6: Inspeksjonsgang i dam Gottleuba med poretrykksmålere. Standrørene er bøyd ved fundamentet og ført samlet opp til inspeksjonsgangen

I fundamentet er det 51 målepunkt med automatisk avlesning og 218 målepunkt for manuell avlesning av poretrykket. De manuelle registreringene blir foretatt omtrent en gang i måneden. De automatiske registreringene har en nøyaktighet på 1 cm og de manuelle en nøyaktighet på 5 cm.

Figur 4.7 viser toppen av to standrør. I standrøret til høyre er trykkehøyden fra poretrykket høyere enn lengden på standrøret. Det er derfor installert en trykkmåler øverst på standrøret.

En analyse av poretrykksmålingene er beskrevet i kapittel 5.



Figur 4.7: Toppen av to standrør, et med og et uten trykkmåler

4.3 Dam Klingenberg

Dam Klingenberg er en gravitasjonsdam fra 1914. Dammen ligger i Sachsen, Tyskland. I forbindelse med denne masteroppgaven ble det gjennomført en befaring ved dammen. En befaringsrapport er vedlagt i vedlegg A. Den videre informasjonen om dammen er hentet fra egne observasjoner fra befaringen og personlig kommunikasjon med Jan Kittler (2014) med mindre det er vist til andre kilder.

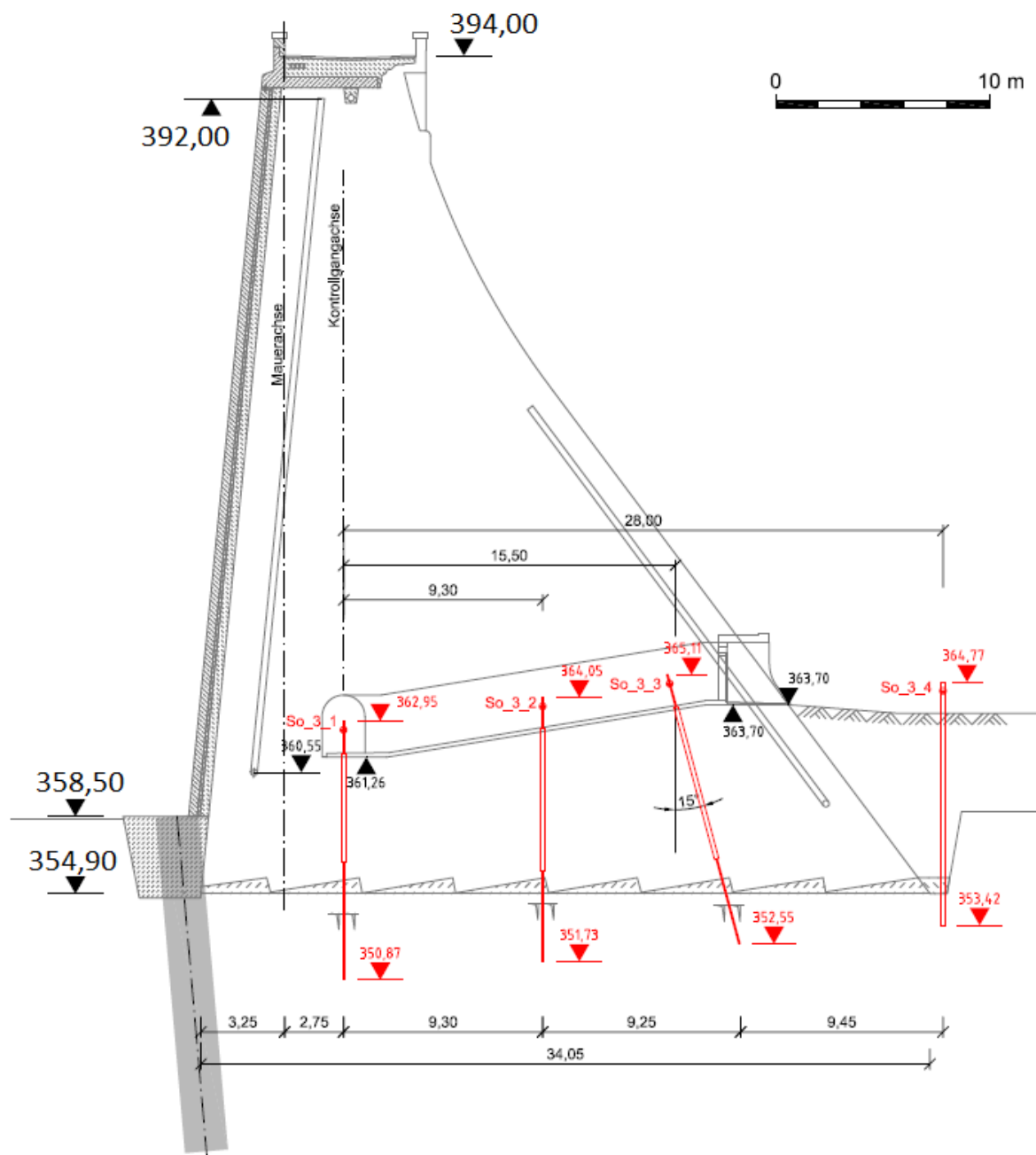
Figur 4.8 viser dammens utforming. Dammens tverrsnitt er vist i figur 4.9.

Videre følger noen opplysninger om dammen:

Byggeår	1908-1914
Damtype og material	Gravitasjonsdam av naturstein
Høyde	40 meter
Lengde	310 meter
Rehabilitering	2005-2013
Injeksjonsskjerm	Ja, kort
Drenasjesystem	Nei
Poretrykksmålere	Ja
Fundament	Hovedsakelig gneis. Ansett som godt



Figur 4.8: Nedstrøms side av dam Klingenberg sett venstre vederlag (Adam, 2014)



Figur 4.9: Tverrsnitt av dam Klingenberg med plassering av måleinstrument for poretrykk i tverrgående inspeksjonsgang (LTV, 2011)

Poretrykksreduksjon

I oppstrøms ende av dammen er det en kort injeksjonsskjerm, som vist i figur 4.9. Denne ble injisert under rehabiliteringen av dammen. Veggen ble injisert av konstruksjonsmessige årsaker ved bygging av ny frontplate på dammen. Injeksjonsskjermen er ikke dyp nok til å minke lekkasje gjennom fundamentet.

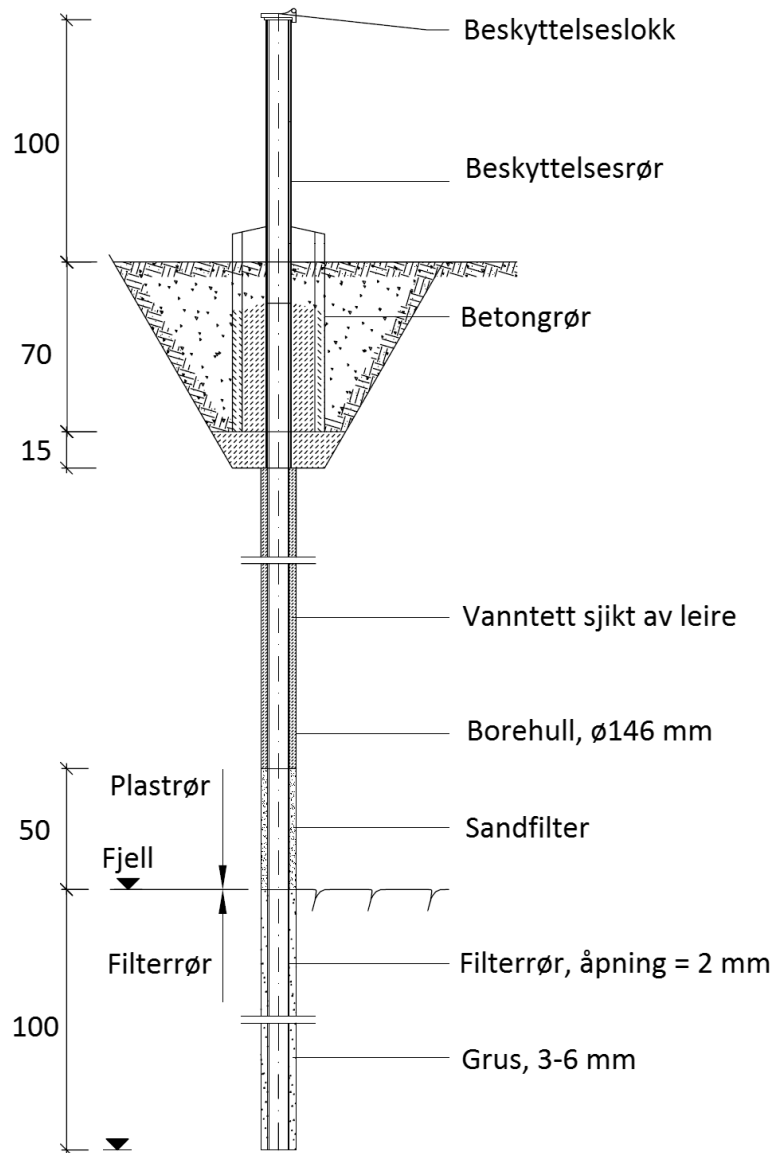
Poretrykksmålinger

I år 2005-2013 ble dam Klingenberg rehabilitert og poretrykksmålere ble installert i 6 tverrsnitt i dammen. En inspeksjonsgang ble sprengt ut langs dammens lengdeakse. Deretter ble det sprengt ut 6 tverrgående inspeksjonsganger langs dammens bredde i de aktuelle målesnittene. Hull ble boret fra de tverrgående inspeksjonsgangene ned i fundamentet, og poretrykksmålere ble installert. Hullene til måleinstrumentene ble boret et par meter ned i fundamentet for å øke sannsynligheten for at en sprekk i fundamentet ble truffet av borehullet. I dammens tverrsnitt i figur 4.9 er en tverrgående inspeksjonsgang og plassering av måleinstrument vist.

Poretrykket ved dam Klingenberg måles med standrør, som er beskrevet i del 2.4.1. Figur 4.10 viser utformingen til en av tre ulike standrør som er benyttet ved dam Klingenberg. Grovt sett består måleren av et borehull som går gjennom dammen og omtrent 2 meter ned i fundamentet. I borehullet er det plassert et plastrør gjennom dammen og et filterrør i delen av borehullet i fundamentet. Filterrøret er et plastrør med åpninger på 2 mm. Rundt filterrøret er borehullet fylt opp med grus, som vist i figur 4.10. Rundt den nedre delen av plastrøret er det fylt opp med sand. Over sanden er borehullet fylt med leire for å lage et vanntett sjikt. Den øverste delen av plastrøret står fritt og er dekket av et beskyttelsesrør (LTV, 2014).

Poretrykksmålingene foregår manuelt 4-6 ganger i måneden ved 19 målepunkt. Avlesningene har en nøyaktighet på 2 cm.

En analyse av poretrykksmålingene er beskrevet i kapittel 5.



Figur 4.10: Poretrykksmåler benyttet ved dam Klingenberg (LTV, 2014)

4.4 Dam Großer Mühdorfer See

Dam Großer Mühdorfer See er en gravitasjonsdam fra 1957. Dammen ligger i Kärnten i Østerrike. Beliggenheten er vist i vedlegg B. Dammens tverrsnitt er vist i figur 4.11.

Videre følger noen opplysninger om dammen (Verbund, 2013):

Byggeår	1954-1957
Damtype og material	Gravitasjonsdam av betong
Høyde	46 meter
Lengde	433 meter
Injeksjonsskjerm	-
Drenasjesystem	Ja
Poretrykksmålere	Ja
Fundament	-

Poretrykksreduksjon

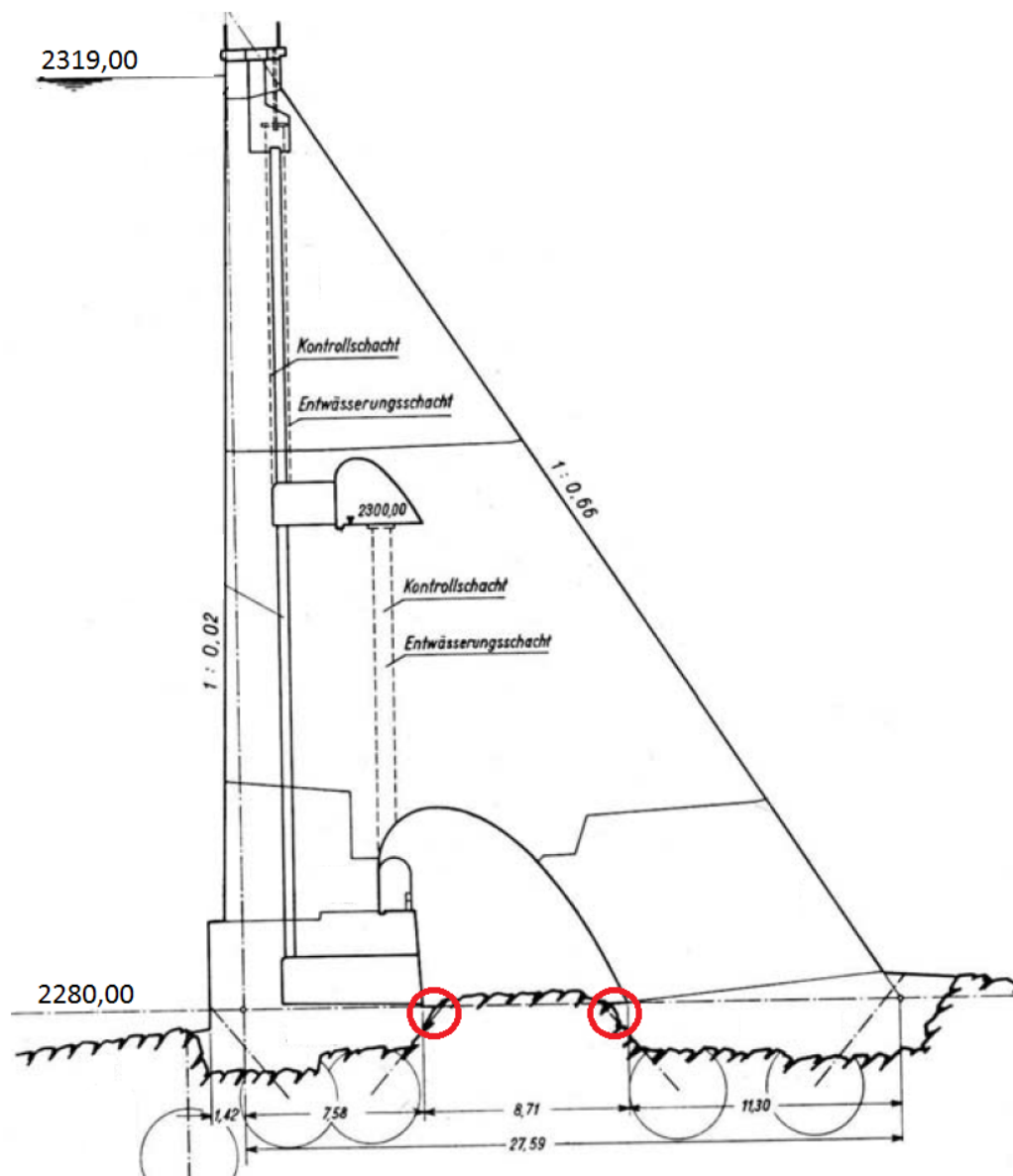
Dam Großer Mühdorfer See har drenasjesystem i oppstrøms ende av dammen. Det består av vertikale borehull med en diameter på ca. 70 cm. Hullene har en senteravstand på 4,5 meter. Dammen har to inspeksjonsganger, hvor den største ligger på fundamentet. Dette er vist i figur 4.11. Inspeksjonsgangen på fundamentet gir i følge Verbund (2013) redusert poretrykk i fundamentet.

Det foreligger ikke informasjon om en eventuell injeksjonsskjerm. Tilgjengelige tegninger av dammen viser ingen injeksjonsskjerm.

Poretrykksmålinger

I 1986 ble det installert 6 poretrykksmålere i dammen i hvert sitt tverrsnitt. I desember 2008 ble det installert ytterligere 18 poretrykksmålere. Etter denne installasjonen har alle tverrsnittene med poretrykksmålere 2 målepunkt langs damfotens bredde. I alle snittene ligger begge målepunktene like ved inspeksjonsgangen på fundamentet, som vist med rødt i figur 4.11 (Verbund, 2013).

En analyse av poretrykksmålingene er beskrevet i kapittel 5.



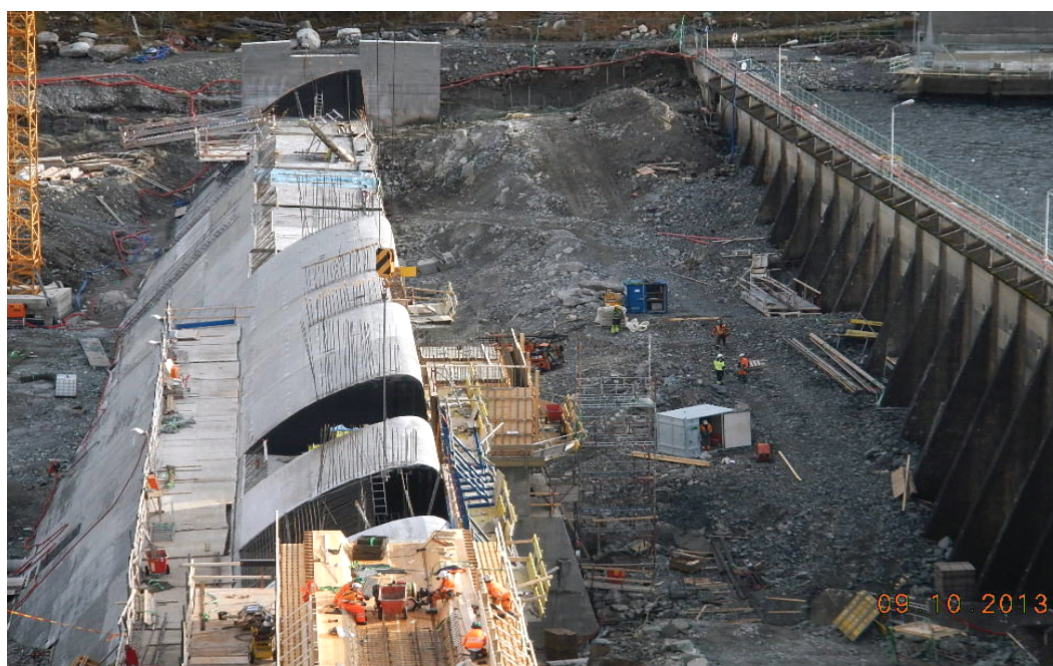
Figur 4.11: Tverrsnitt av dam Großer Mühlbacher See med generell plassering av måleinstrument for poretrykk, vist med rødt (Verbund, 2013)

4.5 Dam Skarsfoss

Dam Skarsfoss er en gravitasjonsdam i Rjukanvassdraget i Tinn kommune i Telemark og eies av Norsk Hydro. Dammen ble påbegynt i 2012 og er fortsatt under bygging. Figur 4.12 viser dammen i oktober 2013. Noe av den videre informasjonen om dam Skarsfoss er hentet fra e-postsamtale med Lars Kristian Westby (2014). E-posten er vist i vedlegg B.

Videre følger noen opplysninger om dammen (Gunleiksrud, 2013; Westby, 2014):

Byggeår	2012-d.d.
Damtype og material	Gravitasjonsdam av betong
Høyde	17 meter (høyde til HRV)
Lengde	168 meter
Injeksjonsskjerm	Ja
Drenasjesystem	Nei
Poretrykksmålere	Nei
Fundament	Godt fjell



Figur 4.12: Dam Skarsfoss under bygging (Gunleiksrud, 2013)

Det er utført systematisk dypinjeksjon av fundamentet i oppstrøms ende av dammen langs hele dammens lengde. Det er også utført kontaktinjeksjons mellom dammen og fundamentet. Dammen er utført uten drenasjesystem (Westby, 2014).

Poretrykksmålinger ble ikke vurdert ved dam Skarsfoss da dammen er fundamentert på godt berg, som også er injisert (Westby, 2014).

Kapittel 5

Analyse av poretrykksmålinger

I dette kapittelet beskrives gjennomføringen av en analyse av poretrykksmålinger fra 4 gravitasjonsdammer på fjellfundament.

Ut fra måledataene fra de fire dammene er det undersøkt om det finnes en sammenheng mellom de målte verdiene av poretrykk i fundamentet og:

- Vannstandendringer
- Temperaturendringer
- Konstruktive tiltak

Først følger en generell beskrivelse av hvordan måledataene er analysert. Deretter presenteres utvalgte tverrsnitt som er analysert for de fire dammene. Resultatene fra analysen er vist i kapittel 7.

Analyse av måledata

Alle måledataene av poretrykket er enten gitt som total energihøyde, h_0 , i enheten moh. eller som trykkehøyde i enheten m. Der poretrykket er gitt i moh. vil målepunktets høyde over havet tilsvare stedshøyden, z . I analysen er alle måledataene i moh. gjort om til trykkehøyde, u/γ_w , for målepunktet. Omregningen er vist under, etter ligning (2.3) fra del 2.1.2.

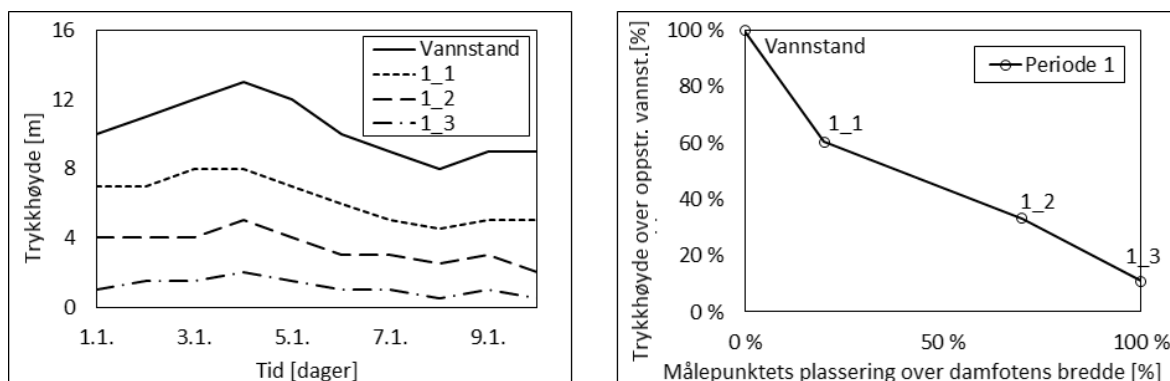
$$\frac{u}{\gamma_w} = h_0 - z$$

I analysen av sammenhengen mellom poretrykk og vannstandsendringer er vannstanden i magasinet og poretrykket som trykkehøyde plottet mot tid, som vist til venstre i figur 5.1. Dermed kan variasjonen av poretrykket over tid sammenlignes med vannstanden i magasinet. Det er valgt å analysere data fra perioder hvor vannstanden endrer seg mye.

Alle målepunktene ved dammene er angitt med navnet X_Y, hvor X står for nummeret på tverrsnittet og Y står for nummeret på målepunktet. Målepunkt X_1 ligger i oppstrøms ende av dammen. Deretter telles det oppover mot nedstrøms ende av dammen.

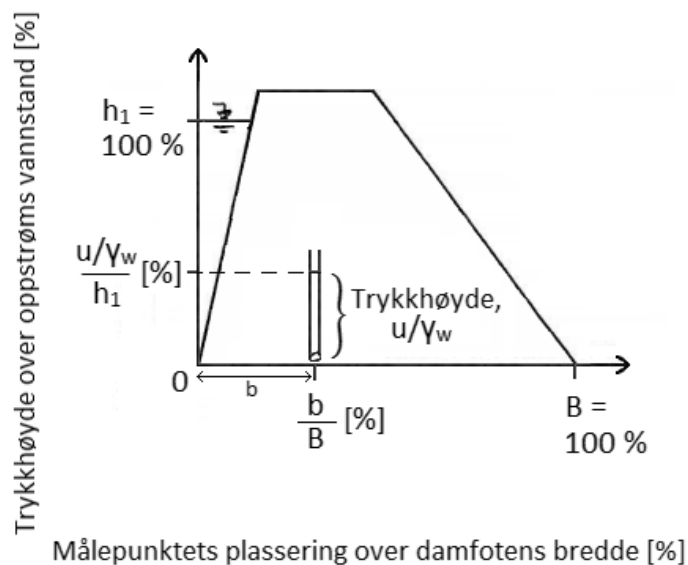
I analysen av sammenhengen mellom poretrykk og temperaturendringer er måledataene delt inn i de fire sesongene vinter, vår, sommer og høst. Deretter er gjennomsnittet av poretrykket for hvert målepunkt i hver sesong regnet ut. Poretrykket som prosentandel av oppstrøms vannstand er så plottet mot målepunktets plassering langs damfotens bredde. Det tilsvarer situasjonen vist til høyre i figur 5.1. Det er valgt å analysere perioder som går over flere år for å få et representativt utvalg. For dammene der poretrykksmålinger er tilgjengelig over flere år er det valgt å analysere data fra både eldre og nyere målinger for å se om det er en endring over tid.

I analysen av sammenhengen mellom poretrykk og konstruktive tiltak er gjennomsnittet av poretrykket for alle målepunktene beregnet. Deretter er poretrykket som prosentandel av oppstrøms vannstand plottet mot målepunktets plassering langs damfotens bredde, som vist til høyre i figur 5.1. For dammene der poretrykksmålinger er tilgjengelig over flere år er det valgt å analysere data fra både eldre og nyere målinger for å se om det er en endring over tid.



Figur 5.1: Eksempel på analyse av måledata

I grafen til høyre i figur 5.1 er poretrykksverdiene plottet som fremstillingen i figur 5.2 viser. Langs grafens x-akse er poretrykksmålerens avstand fra oppstrøms damtå vist som en prosentandel av damfotens totale bredde, B . Langs y-aksen er trykkehøyden i målepunktet vist som en prosentandel av oppstrøms vannstand, h_1 .



Figur 5.2: Plotting av poretrykksmålinger

5.1 Ringedalsdammen

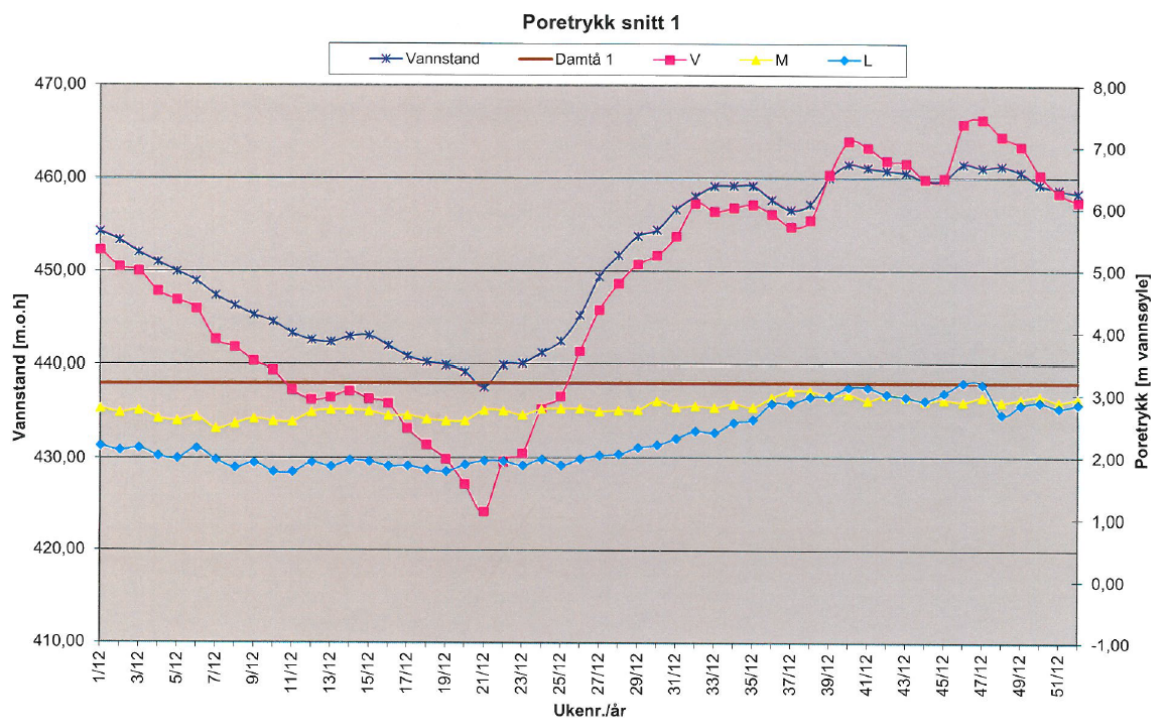
Ringedalsdammen er en gravitasjonsdam fra 1918 i Tyssovassdraget i Hordaland. En beskrivelse av dammen er vist i delkapittel 4.1. Måledata for Ringedalsdammen er gjort tilgjengelig fra Sweco Norge AS.

Dammen har 4 rader med poretrykksmålere. Hver rad har 3 målepunkter fra oppstrøms til nedstrøm ende av damfoten. Det er valgt å analysere poretrykksmålingene fra tre rader, snitt 1, 2 og 3. Plasseringen av målepunktene for alle tverrsnittene er vist i figur C.1 til C.3 og i tabell C.1, i vedlegg C.1. Plasseringen av nedstrøms målepunkt i snitt 4 er ukjent (Grøner, 2000) og snittet er derfor ikke analysert. Bredden av damfoten er satt til å være bredden av hovedkonstruksjonen, uten frontplata oppstrøms dammen.

Alle målepunktene for poretrykk forutsettes å være plassert omtrent på flata mellom dammen og fundamentet (Grøner, 2000). Poretrykket som registreres er dermed poretrykket som gir oppdrift under dammen.

Måledata er tilgjengelig fra perioden 01/2012-12/2012 med én avlesning i uka. Datagrunnlaget er gitt i form av grafer som viser poretrykket og vannstanden i magasinet over tid. Vannstanden i magasinet er gitt i enheten moh. og poretrykket som trykkehøyde i enheten m. Et eksempel fra datagrunnlaget er vist i figur 5.3. For å gjennomføre analysen er datagrunnlaget vist i figur 5.3 skrevet inn i programmet Excel for videre behandling.

I vedlegg C.1 er det vist hvilke deler av perioden med måledata som er benyttet i analysen for de ulike parameterne som er undersøkt. Det er ikke gjennomført en analyse av sammenhengen mellom poretrykk og temperaturendringer ved Ringedalsdammen. Det er kun tilgjengelig data for ett år og datagrunnlaget anses derfor ikke som tilstrekkelig for en slik analyse.



Figur 5.3: Utsnitt av poretrykksdata for Ringedalsdammen (Sweco, 2013)

5.2 Dam Gottleuba

Dam Gottleuba er gravitasjonsdam fra 1974 i Sachsen i Tyskland. En beskrivelse av dammen er vist i delkapittel 4.2. Måledata for dam Gottleuba er gjort tilgjengelig fra Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV), som er Sachsens statlige administrasjon av demninger.

Dam Gottleuba har flere rader med poretrykksmålere langs hele dammens lengde. I forbindelse med denne oppgaven er informasjon om plassering av måleinstrumentene kun tilgjengelig for den høyeste delen av dammen. Det er derfor kun analysert poretrykksmålinger fra denne delen.

Den høyeste delen av dammen har tre rader med poretrykksmålinger. Hver rad har 6 målepunkt fra oppstrøms til nedstrøms ende av damfoten. Det er valgt å analysere poretrykksmålingene fra to rader, snitt 1 og 3. De to snittene er plassert omtrent 10 m fra hverandre. Plasseringen av målepunktene for tverrsnittene er vist i figur C.4 og tabell C.3, i vedlegg C.2. Målepunktet lengst oppstrøms i fundamentet ligger nedstrøms injeksjonsskjermen og oppstrøms drenasjesystemet.

Alle målepunktene for poretrykk er plassert på flata mellom dammen og fundamentet (LTV, 2010). Poretrykket som registreres er dermed poretrykket som gir oppdrift under dammen.

Tilgjengelig måledata er for perioden 1978-2013, med omtrent én registrering av poretrykket i måneden. Dataene er behandlet av dameier slik at usannsynlige verdier, som

trolig skyldes en målefeil, er fjernet. Datagrunnlaget er gitt i tabellform med manuelle avlesninger for hver poretrykksmåler, som vist i figur 5.4 for snitt 3 for perioden 01/1981-12/1981. Verdiene for vannstanden i magasinet og poretrykket er oppgitt i enheten moh.

DATO	Vannstand magasin	Poretrykksmålere					
		3_1	3_2	3_3	3_4	3_5	3_6
27.01.1981	421,8	418,59	388,28	386,81	382,77	381,87	380,17
24.02.1981	421,8	418,2	386,71	385,14	381,37	380,77	379,37
26.03.1981	421,83	418,89	388,48	387,2	382,87	381,97	380,67
13.04.1981	421,8	414,18	382,77	380,87	379,17	378,77	377,97
20.04.1981	421,82	413,88	382,87	380,77	379,07	378,67	377,87
19.05.1981	422,16	413,29	382,97	380,97	379,17	378,87	378,07
18.06.1981	423,51	414,18	383,27	381,07	379,27	378,67	377,97
13.07.1981	423,49	413,59	383,07	381,17	379,17	378,57	377,87
11.08.1981	423,72	413	383,77	381,17	378,97	378,67	377,87
09.09.1981	423,54	412,61	383,77	381,27	379,07	378,77	377,97
05.10.1981	423,5	412,12	383,77	380,97	378,87	378,57	377,67
03.11.1981	425,85	413,98	383,86	381,07	379,27	378,87	377,77
01.12.1981	426,71	414,86	383,86	381,57	379,47	378,97	377,97
28.12.1981	426,7	414,57	383,96	381,67	379,57	378,97	378,07

Figur 5.4: Utsnitt av poretrykksdata for dam Gottleuba. Målingene har enheten moh.

I vedlegg C.2 er det vist hvilke deler av perioden med måledata som er benyttet i analysen for de ulike parameterne som er undersøkt.

Den nærmeste målestasjonen til dam Gottleuba viser at området har temperaturforskjeller over året. Gjennomsnittstemperaturen ligger rundt 20 °C på sommeren og 0 °C på vinteren (MET, 2014).

Drenasjesystemet ved dam Gottleuba har i perioder bare vært delvis åpent. Effekten av drenasjesystemet er derfor analysert. Poretrykksmålingene er plottet på tilsvarende måte som vist til høyre i figur 5.1. Figur C.5 i vedlegg C.2 viser en oversikt over når drenasjesystemet i dammen har vært åpent og lukket.

5.3 Dam Klingenberg

Dam Klingenberg er en gravitasjonsdam i naturstein fra 1908 i Sachsen i Tyskland. En beskrivelse av dammen er vist i delkapittel 4.3. Måledata for dam Gottleuba er gjort tilgjengelig fra LTV.

Dam Klingenberg har 6 rader med poretrykksmålere. Hver rad har 3-6 målepunkt fra oppstrøms til nedstrøms ende av damfoten. Det er valgt å analysere poretrykksmålingene fra to rader, snitt 3 og 5, som hver har 4 målepunkt. Tverrsnittene er i den høyeste delen av dammen. Plasseringene av målepunktene er vist i figur C.6 og C.7 og tabell C.5, i vedlegg C.3.

Alle målepunktene for poretrykk er plassert et par meter ned i fundamentet. Poretrykket som registreres må derfor omregnes til et poretrykk for flata mellom dammen

og fundamentet, siden det er poretrykket her som gir oppdrift. Metoden for denne omregningen er vist i vedlegg C.3.1. Plasseringen av punktene i kontaktflata er vist i tabell C.6 i vedlegg C.3. Det er poretrykket i punktene på kontaktflata som er vist i resultatene.

Tilgjengelig måledata er for perioden 07/2007-01/2014, med 4-6 registreringer av poretrykket i måneden. Dataene er behandlet av dameier slik at usannsynlige verdier, som trolig skyldes en målefeil, er fjernet. Dataene er gitt i tabellform med manuelle avlesninger for hver poretrykksmåler som for dam Gottleuba, vist i figur 5.4. Verdiene for vannstanden i magasinet og poretrykksmålerne er oppgitt i enheten moh.

I vedlegg C.3 er det vist hvilke deler av perioden med måledata som er benyttet i analysen for de ulike parameterne som er undersøkt.

Den nærmeste målestasjon til dam Klingenberg er den samme som for dam Gottleuba (MET, 2014).

5.4 Dam Großer Mühdorfer See

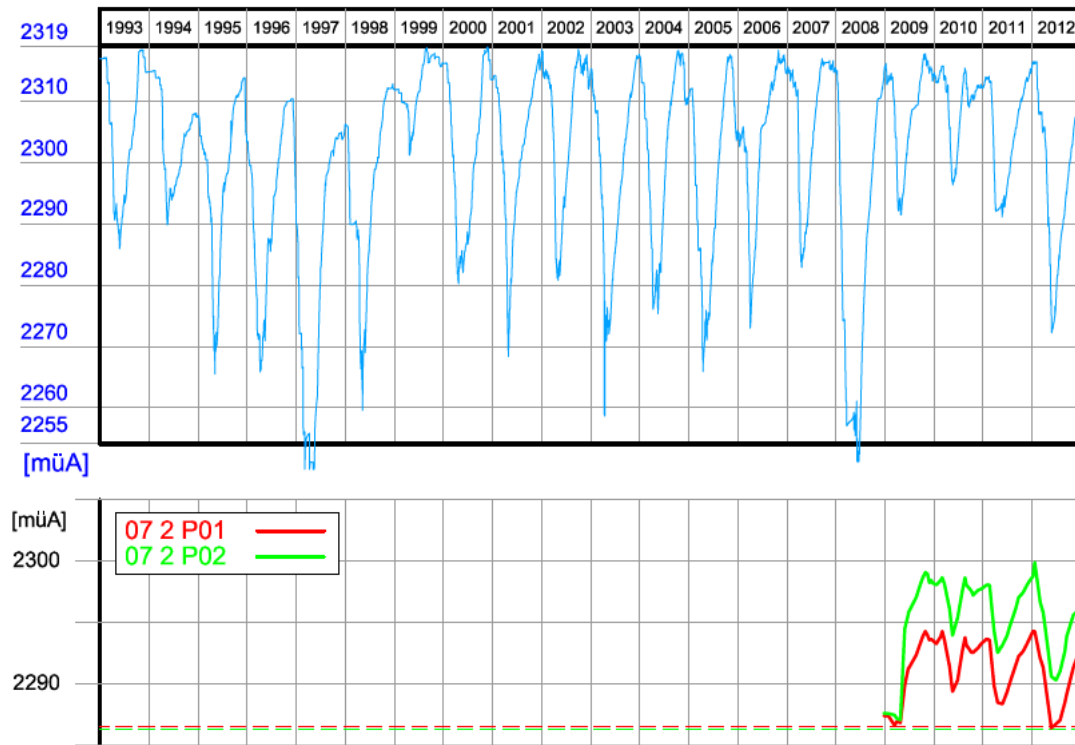
Dam Großer Mühdorfer See er en gravitasjonsdam fra 1957 i Kärnten i Østerrike. En beskrivelse av dammen er vist i delkapittel 4.4. Måledata for dam Großer Mühdorfer See er gjort tilgjengelig fra Verbund Hydro Power AG.

Dam Großer Mühdorfer See har 13 rader med poretrykksmålere. Hver rad har to målepunkt. I flere av radene er minst én av poretrykksmålerne defekte slik at det ikke er aktuelt å analysere målingene (Verbund, 2013). Av de fullstendige måleseriene er det valgt å analysere poretrykksmålingene fra 4 rader. Plasseringene av målepunktene for alle tverrsnittene er vist i figur C.13 til C.16 og tabell C.10, i vedlegg C.4.

Alle målepunktene for poretrykk er plassert omtrent på flata mellom dammen og fundamentet (Verbund, 2013). Poretrykket som registreres er dermed poretrykket som gir oppdrift under dammen.

Tilgjengelig måledata er for perioden 01/2009-12/2012. Poretrykket er registrert ved manuell avlesning. Det er ikke kjent hvor hyppig avlesningene er gjennomført. Datagrunnlaget er gitt i form av grafer som viser poretrykket og vannstanden i magasinet over tid. Både vannstanden og poretrykket er gitt i enheten moh. Et eksempel fra datagrunnlaget er vist i figur 5.5. For å gjennomføre analysen er datagrunnlaget vist i figur 5.5 skrevet inn i programmet Excel for videre behandling. Det er lest av 12 verdier per år, en for hver måned. Det er valgt å benytte 12 målepunkt per år da grafene i datagrunnlaget ikke gir grunnlag for en finere inndeling.

I løpet av perioden med tilgjengelig måledata har vannstanden i magasinet i noen perioder vært svært lav. I disse periodene er poretrykket i noen av målepunktene høyere enn oppstrøms vanntrykk. Periodene med svært lav vannstand i magasinet er ikke tatt med i analysen, da poretrykket som en prosentandel av oppstrøms vannstand blir svært høy. I vedlegg C.4 er det vist hvilke deler av perioden med måledata som er benyttet i analysen for de ulike parameterne som er undersøkt.



Figur 5.5: Eksempel på måledata fra dam Großer Mühdorfer See (Verbund, 2013)

Temperaturmålinger fra damstedet viser temperaturforskjeller over året. Gjennomsnittlig temperatur ligger rundt 10 °C om sommeren og -8 °C om vinteren (Verbund, 2013).

Kapittel 6

Stabilitetsberegninger

Det er gjennomført to sett med stabilitetsberegninger i denne oppgaven. I dette kapitlet er framgangsmåten for stabilitetsberegningene og forutsetninger beskrevet.

Først er det gjennomført stabilitetsberegninger med teoretiske poretrykksdiagram etter regelverket i Norge, Sverige og Sveits for å kunne sammenligne regelverket i de tre landene. Deretter er det gjennomført stabilitetsberegninger etter det norske regelverket med bruk av poretrykksdiagram fra målte poretrykksverdier for å se hvordan de ulike fordelingene av poretrykket påvirker en dams stabilitet. De målte poretrykksdiagrammene som er benyttet i beregningene er et utvalg av resultatene fra analysen av poretrykksmålinger.

Stabilitetsberegningene er gjennomført på dam Kjårdavatn. Dam Kjårdavatn er valgt som eksempeldam fordi stabilitetsberegningene i en revurdering av dammen gjennomført av Sweco (2011) viser at dammen ikke oppfyller kravene til stabilitet gitt i Damsikkerhetsforskriften (2009). Det er derfor interessant å undersøke hvordan bruk av ulike poretrykksdiagram påvirker dammens stabilitet.

Resultatene fra beregningene er vist i kapittel 7.2.

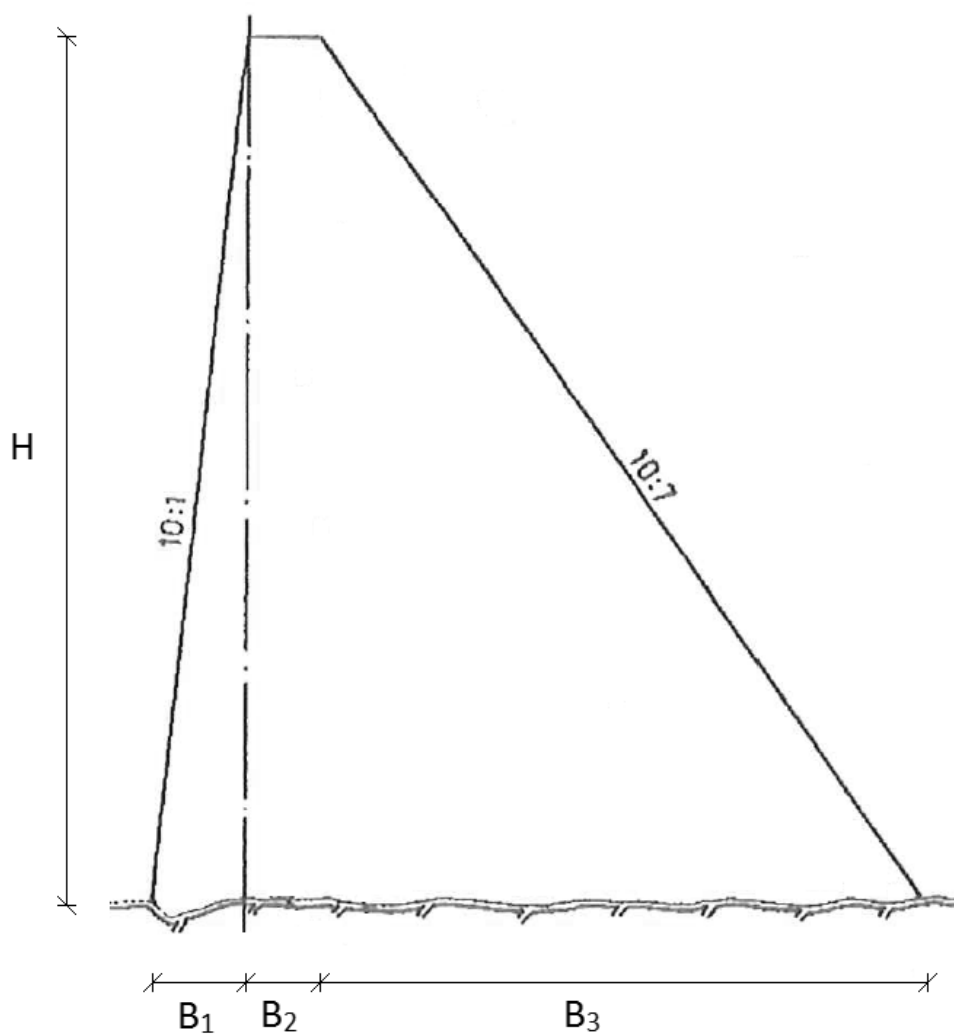
6.1 Eksempeldam

Dam Kjårdavatn ligger i Narvik kommune i Nordland og er eid av Statkraft Energi AS. Det er en gravitasjonsdam i betong fra 1972. Dammen har en lengde på 542 m og en høyde på 12,6 m. Den har fjellbolter med senteravstand 1,0 m langs hele dammens lengdeakse (Sweco, 2011).

Dammens tverrsnitt er vist i figur D.1 i vedlegg D. I stabilitetsberegningene er det benyttet et forenklet tverrsnitt av dammen vist i figur 6.1. Det er sett bort fra fjellboltene ved dam Kjårdavatn på eksempeldammen. I beregningene er verdiene oppgitt i tabell 6.1 benyttet.

Tabell 6.1: Mål for eksempeldam benyttet i stabilitetsberegninger (Sweco, 2011)

Beskrivelse	Forkortelse	Verdi	Enhet
Dimensjonerende flomvannstand	DFV	616,0	moh.
Kote damfot	H_{bunn}	604,0	moh.
Største høyde	H	11,6	m
Oppstrøms bunnbredde	B_1	1,2	m
Midtre bunnbredde	B_2	0,9	m
Nedstrøms bunnbredde	B_3	8,3	m
Total bunnbredde	B	10,4	m

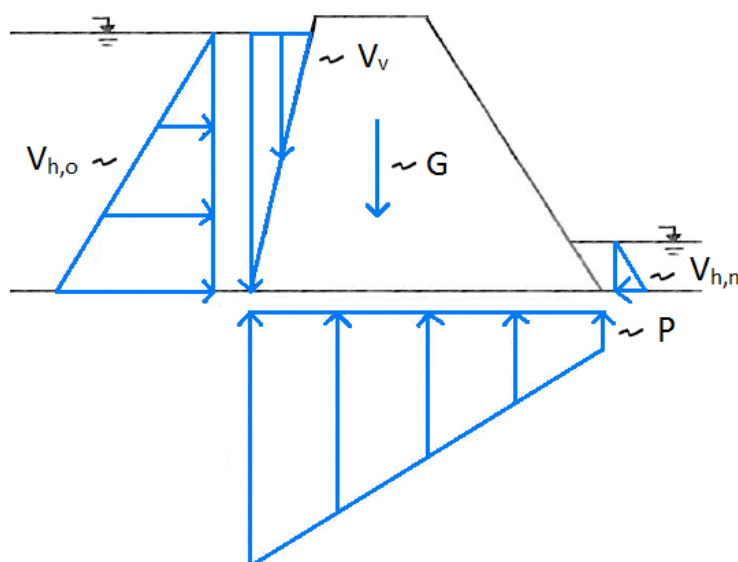


Figur 6.1: Eksempeldam med forenklet tverrsnitt av dam Kjårdavatn (Sweco, 2011)

6.2 Lastsituasjon

Stabilitetsberegningene er gjennomført med lastsituasjonen vist i figur 6.2. Følgende laster er tatt med i beregningene:

- Dammens tyngde, G
- Oppstrøms horisontalt vanntrykk, $V_{h,o}$
- Nedstrøms horisontalt vanntrykk, $V_{h,n}$
- Vertikalt vanntrykk, V_v
- Oppdrift, P



Figur 6.2: Lastsituasjon

For beregningene som er gjennomført med redusert poretrykk som følge av drenasjesystem og injeksjonsskjerm er det forutsatt at inspeksjonsgangen ligger i dammen. Videre er det forutsatt at drenasjesystemet er godt fungerende og plassert 1,5 m nedstrøms den oppstrøms damtåa. Forutsetningene i tabell 6.2 benyttet.

Tabell 6.2: Forutsetninger benyttet i stabilitetsberegninger

Beskrivelse	Symbol	Verdi	Enhet
Nedstrøms vannstand	h_2	0	m
Betongens tyngdetetthet	γ_b	24	kN/m ³
Friksjonsvinkel	ϕ	45	°

6.3 Beregninger med teoretisk poretrykksdiagram

Det er gjennomført stabilitetsberegninger etter regelverket i Norge, Sverige og Sveits. Beregningene er gjennomført for å kunne vurdere beregning av oppdrift og sikkerhetsfaktorene i det norske regelverket. Det er gjennomført beregninger for to situasjoner, uten drenasjesystem og injeksjonsskjerm og med drenasjesystem og injeksjonsskjerm. Situasjonene er valgt fordi de viser ytterpunktene for verdien av oppdriften.

Det er valgt å benytte lastsituasjonen dimensjonerende flomvannstand (DFV) ved bruddgrensetilstand etter det norske regelverket. Denne lastsituasjonen forutsettes å tilsvare omtrent den samme lastsituasjonen som “Eksepsjonelt lasttilfelle: Dimensjonerende flomvannstand” etter regelverket i Sverige og “Eksepsjonelt lasttilfelle: Høy vannstand” etter regelverket i Sveits.

Ved beregning av alle lastene er det benyttet lastfaktor $\gamma_L = 1,0$ som beskrevet i det norske regelverket, da det som vist i kapittel 3 ikke foreligger informasjon om lastfaktorer benyttet i regelverket i Sverige og Sveits. Oppdriften og deretter velte- og glide stabilitet er beregnet etter regelverket i de enkelte landene. Det gjør at oppdriften er den eneste lasten som avhenger av krav i regelverket og oppdriftens påvirkning på stabiliteten kan vurderes.

Det er benyttet følgende faktorer i beregningene for situasjonen med drenasjesystem og injeksjonsskjerm, fra kapittel 3:

- Norge: Drenasjehull boret 1,5 m nedstrøms øvre damtå gir $k_{dren} = 0,33$
- Sverige: Inspeksjonsgang i dammen og injeksjonsskjerm gir $k_{dren} = 0,5$
- Sveits: Godt fungerende drenasjesystem gir $\lambda = 0,75$

I Sveits gir retningslinjene to metoder for å beregne veltestabilitet. Det er valgt å benytte metoden i ligning (3.18) fra delkapittel 3.3.

6.4 Beregninger med målte poretrykksdiagram

Det er gjennomført stabilitetsberegninger etter regelverket i Norge med poretrykksdiagram fra målte poretrykksverdier. Beregningene er gjennomført for å vurdere hvordan ulike poretrykksdiagram påvirker en dams stabilitet. Figur 7.16 og 7.17 i del 7.2.2 viser poretrykksdiagrammene benyttet i beregningene. Poretrykksdiagrammene er delt inn i to situasjoner, med og uten drenasjesystem. Poretrykksdiagrammene er hentet fra resultatene i del 7.1.3. Til sammenligning er teoretiske poretrykksdiagram beregnet etter regelverket i Norge tatt med, hentet fra del 7.2.1.

Beregningene er utført med samme valg og forutsetninger som beregningene etter regelverk, beskrevet i delkapittel 6.3, med oppdriften som eneste variable last. For alle poretrykksdiagrammene er poretrykket i oppstrøms ende av dammen satt til 100 % av vannstanden i magasinet. I nedstrøms ende av dammen er poretrykket satt til samme verdi som poretrykket i målepunktet som ligger lengst nedstrøms.

Kapittel 7

Resultater

I dette kapitlet er resultatene fra analysen av poretrykksmålinger presentert i delkapittel 7.1 og resultatene fra stabilitetsberegningene presentert i delkapittel 7.2.

Resultatene er diskutert i kapittel 8.

7.1 Resultater fra analyse av poretrykksmålinger

For å vurdere hvilke parametere som påvirker fordelingen av poretrykket i et damfundament er det gjennomført en analyse av poretrykksmålinger fra fire betongdammer på fjellfundament. Utførelsen av analysen er beskrevet i kapittel 5.

I analysen er det undersøkt om det finnes en sammenhengen mellom endring i poretrykk og vannstand i magasinet, sammenhengen mellom endring i poretrykk og temperatur og innvirkningen av konstruktive tiltak på fordelingen av poretrykket.

I dette delkapitlet er utvalgte resultater fra analysen presentert. Alle resultatene er vist i vedlegg E.

7.1.1 Poretrykk og vannstandsendringer

Det er undersøkt om det finnes en sammenheng mellom vannstandsendringer i magasinet og responsen i poretrykket for alle de fire dammene. Det er undersøkt hvor mye poretrykket i de ulike målepunktene endrer seg med vannstanden og når endringen i poretrykket oppstår i forhold til endringen av vannstanden.

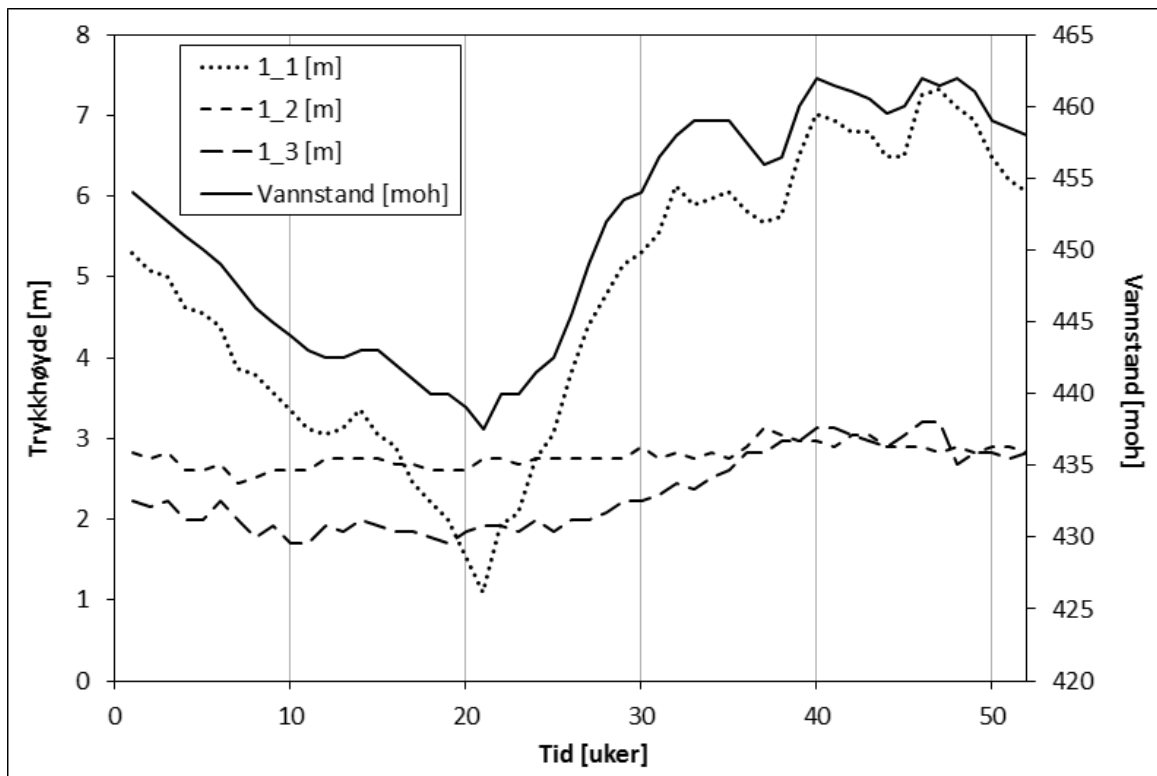
Figur 7.1 til 7.6 viser resultatene fra 6 utvalgte snitt i dammene. I alle grafene refererer målepunkt X_1 til målepunktet som ligger lengst oppstrøms. Deretter telles det oppover mot nedstrøms ende av dammen.

Generelt er sammenheng mellom poretrykket og vannstandsendring i magasinet størst i oppstrøms ende av fundamentet og minst i nedstrøms ende av fundamentet. De fleste resultatene viser at poretrykket endres samtidig som vannstandsendringen oppstår.

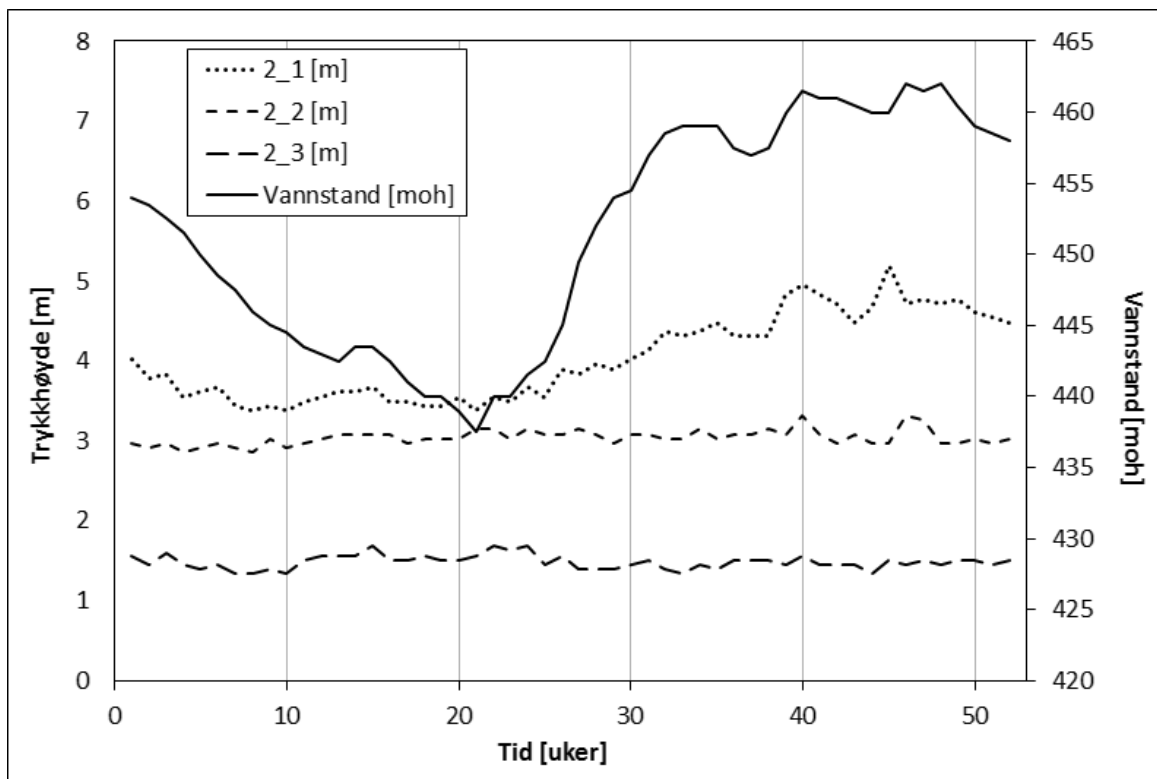
Ringedalsdammen

Figur 7.1 for snitt 1 i Ringedalsdammen viser at sammenheng mellom poretrykk og vannstandsendring er størst i oppstrøms ende av fundamentet. I målepunktet lengst oppstrøms i fundamentet er det en klar sammenheng mellom vannstanden og poretrykket. Poretrykket i målepunktene lengre nedstrøms i fundamentet viser mindre sammenheng med vannstanden. For snitt 2 vist i figur 7.2 viser også poretrykket i målepunktet lengst oppstrøms en sammenheng med vannstanden, selv om utslaget er mindre enn ved snitt 1. For snitt 2, som ved snitt 1, viser de to målepunktene midt under og i nedstrøms ende av dammen liten sammenheng med vannstanden.

For snitt 1 ved Ringedalsdammen, vist i figur 7.1, endres poretrykket i målepunktet lengst oppstrøm samtidig som vannstanden endres. De to grafene har stort sett topp- og bunnpunkt på de samme avlesningene langs tidsaksen. For snitt 2 har poretrykket i målepunktet lengst oppstrøms noen endringer som ikke samsvarer med vannstandsendringen, spesielt rundt uke 45.



Figur 7.1: Ringedalsdammen (snitt 1): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2012-12/2012



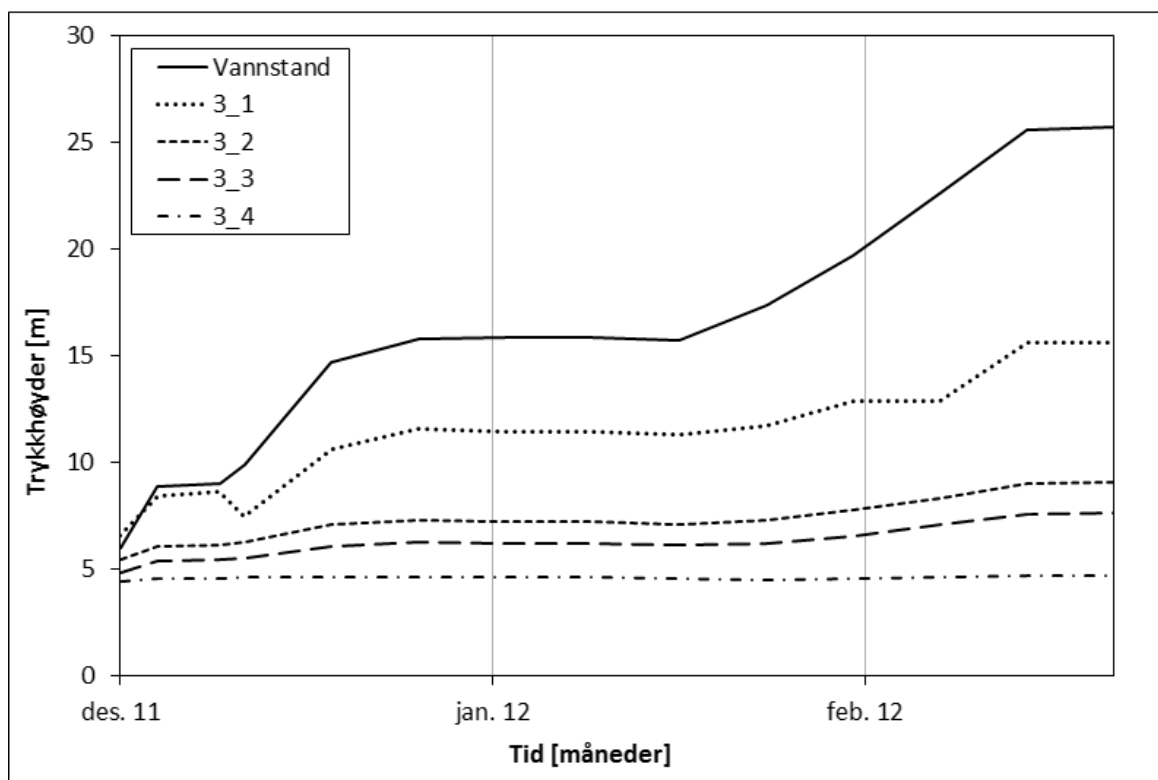
Figur 7.2: Ringedalsdammen (snitt 2): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2012-12/2012

Dam Klingenberg

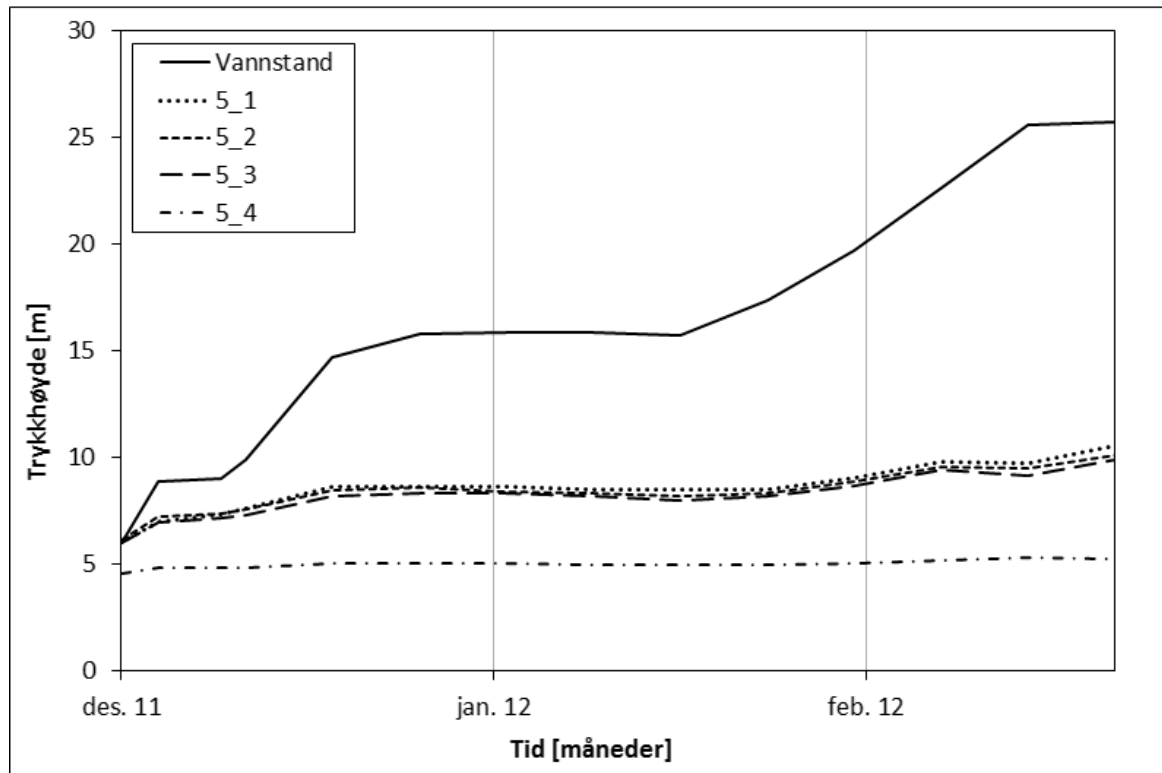
Resultatene for dam Klingenberg er vist i figur 7.3 for snitt 3 og figur 7.4 for snitt 5.

Poretrykket i fundamentet ved dam Klingenberg viser minst sammenheng med vannstanden i magasinet, av resultatene presentert i dette kapitlet. Poretrykket i målepunktet i oppstrøms ende av fundamentet ved snitt 3, i figur 7.3, viser noe sammenheng med vannstanden. Poretrykket lengre nedstrøms i fundamentet og poretrykket i alle målepunktene for snitt 5, i figur 7.4, viser generelt liten endring i poretrykket når vannstanden øker.

Siden endringen i poretrykket er liten i de fleste målepunktene ved de to snittene i dam Klingenberg, er det vanskelig å se ut fra grafene om det er en tidsforsinkelse mellom endringen i vannstanden og poretrykket.



Figur 7.3: Dam Klingenberg (snitt 3): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 12/2011-03/2012



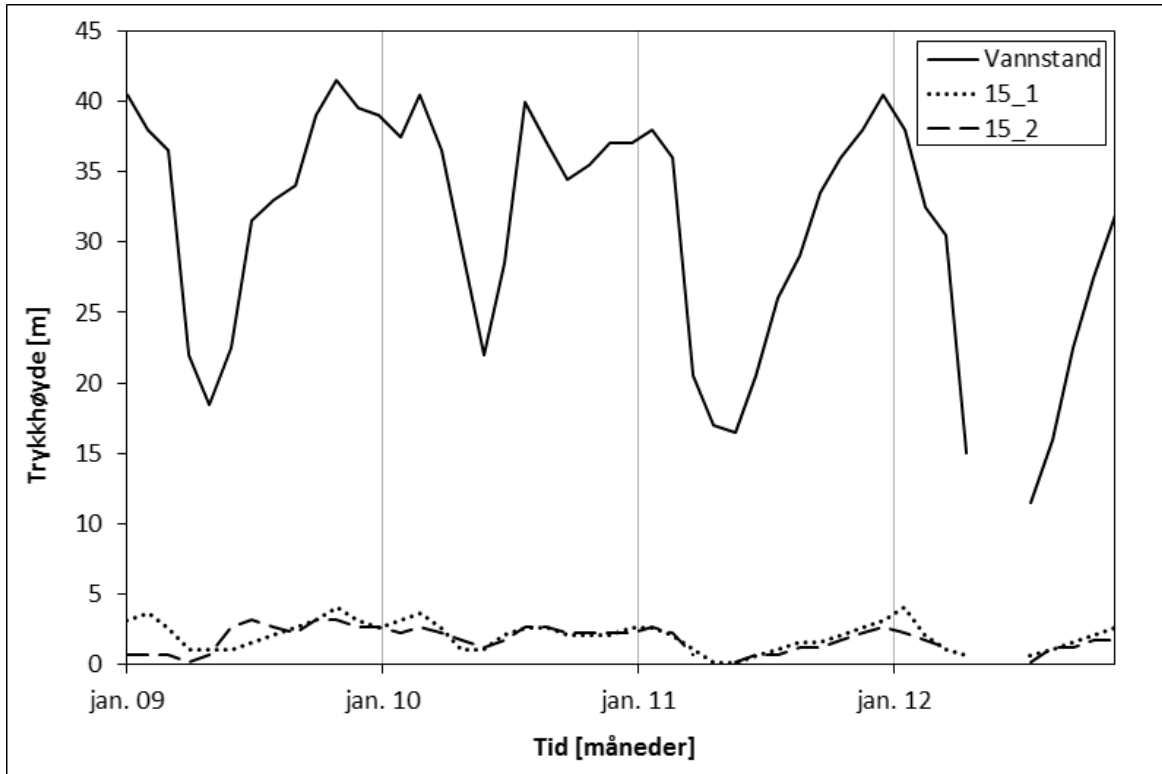
Figur 7.4: Dam Klingenberg (snitt 5): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 12/2011-03/2012

Dam Großer Mühdorfer See

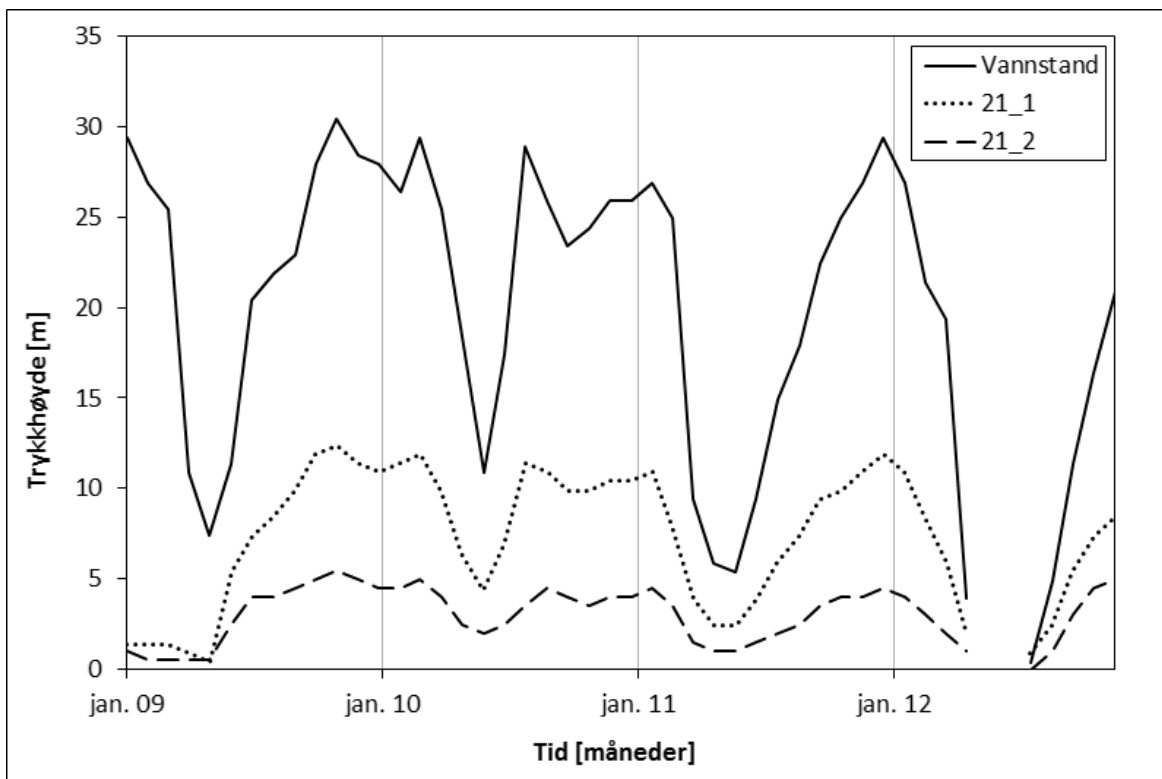
Figur 7.5 viser resultatene for snitt 15 ved dam Großer Mühdorfer See. Poretrykket i begge målepunktene i snittet endrer seg lite ved vannstandsendringer, selv om vannstandsendringene er store. Poretrykket i målepunktet lengst oppstrøms endrer seg allikevel nokså likt med vannstanden. Det kan sees ved at de to grafene stort sett har topp- og bunnpunkt på de samme avlesningene langs tidsaksen. Grafen for poretrykket i målepunktet lengst nedstrøms har også noen av de samme topp- og bunnpunktene som grafen for vannstanden, men i mindre grad enn poretrykket i målepunktet lengst oppstrøms.

I snitt 21, vist i figur 7.6, er det en sammenheng mellom endringen i vannstanden og poretrykket i målepunktene. For begge målepunktene har grafene for poretrykket samme topp- og bunnpunkt som grafen for vannstanden.

Siden topp- og bunnpunktene på grafene i resultatene for dam Großer Mühdorfer See stort sett er de samme, viser resultatene at poretrykket endres samtidig som endringen i vannstand oppstår.



Figur 7.5: Dam Großer Mühdorfer See (snitt 15): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2009-12/2011

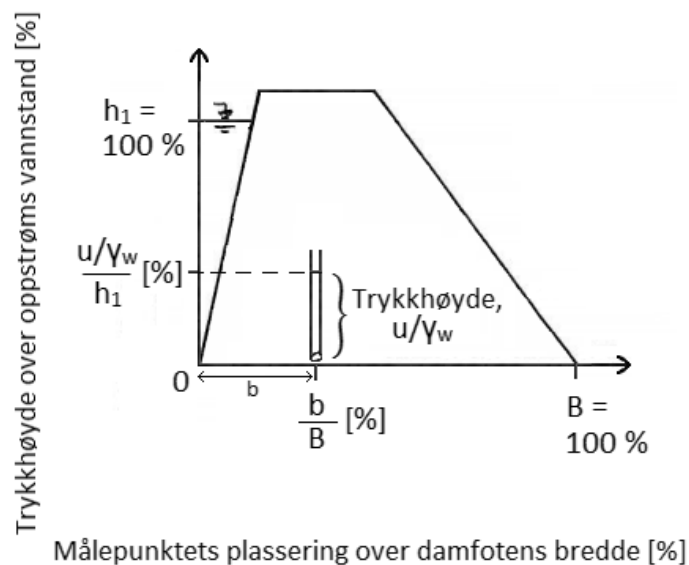


Figur 7.6: Dam Großer Mühdorfer See (snitt 21): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2009-12/2011

7.1.2 Poretrykk og temperaturendring

Det er undersøkt om det finnes en sammenheng mellom temperaturendringer i lufta og responsen i poretrykket for tre av dammene. For å vurdere innvirkning av temperaturen er poretrykksmålingene delt inn i de fire sesongene vinter, vår, sommer og høst. Deretter er gjennomsnittlig poretrykk i hvert målepunkt beregnet for hver sesong.

Figur 7.7 viser hvordan resultatene i denne delen og del 7.1.3 er fremstilt. Figuren er gjengitt fra kapittel 5. I resultatene viser grafenes x-akse poretrykksmålerens avstand fra oppstrøms damtå som en prosentandel av damfotens totale bredde, B . Langs y-aksen er trykkehøyde i målepunktene vist som en prosentandel av oppstrøms vannstand, h_1 .

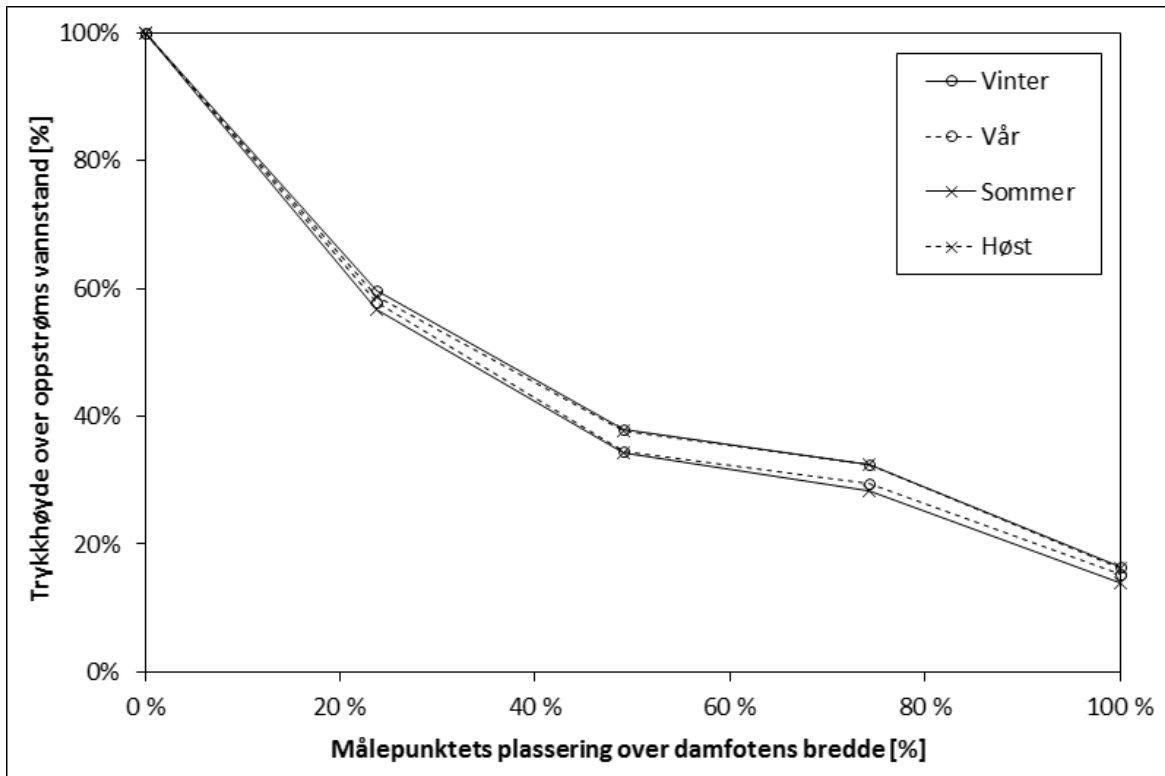


Figur 7.7: Plotting av poretrykksmålinger

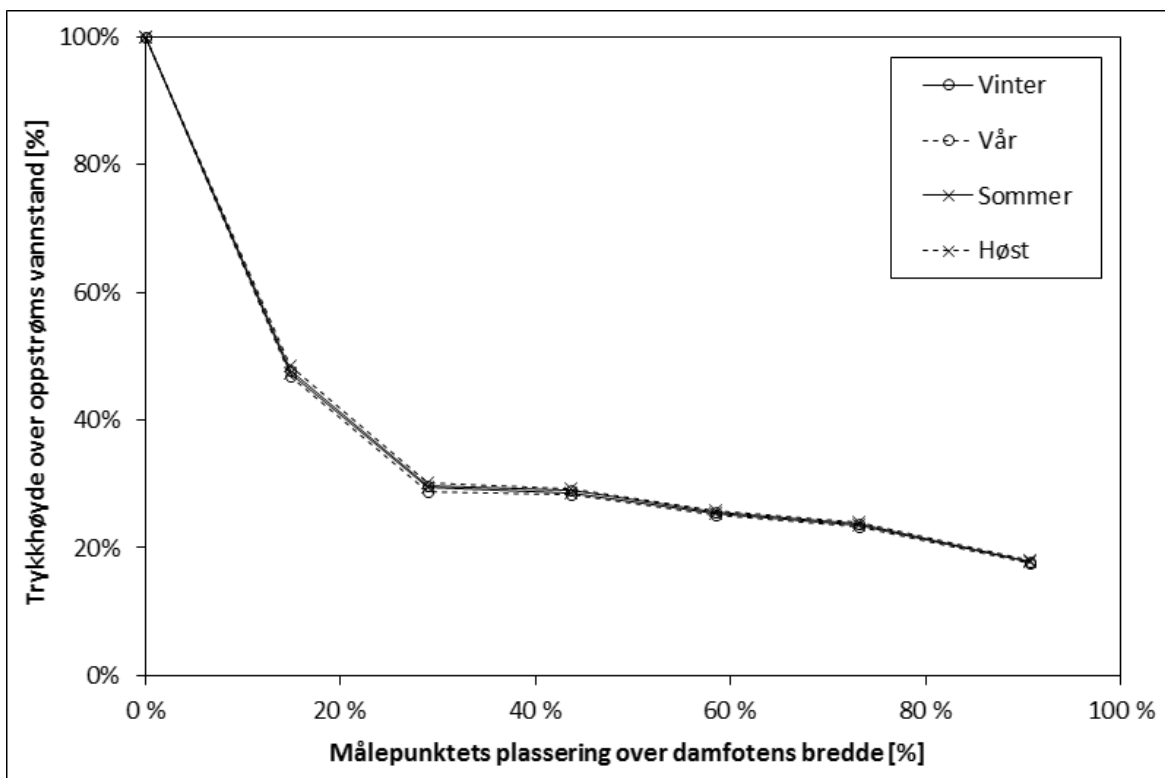
Figur 7.8 til 7.11 viser resultatene fra 4 utvalgte snitt i dammene. Resultatene viser ingen klar sammenheng mellom temperaturendringer over året og poretrykket.

I figur 7.8 for snitt 3 ved dam Klingenberg er poretrykket i målepunktene noe høyere om vinteren og høsten enn om sommeren og våren. For snitt 1 ved dam Gottleuba derimot, vist i figur 7.9, er poretrykket likt over hele året.

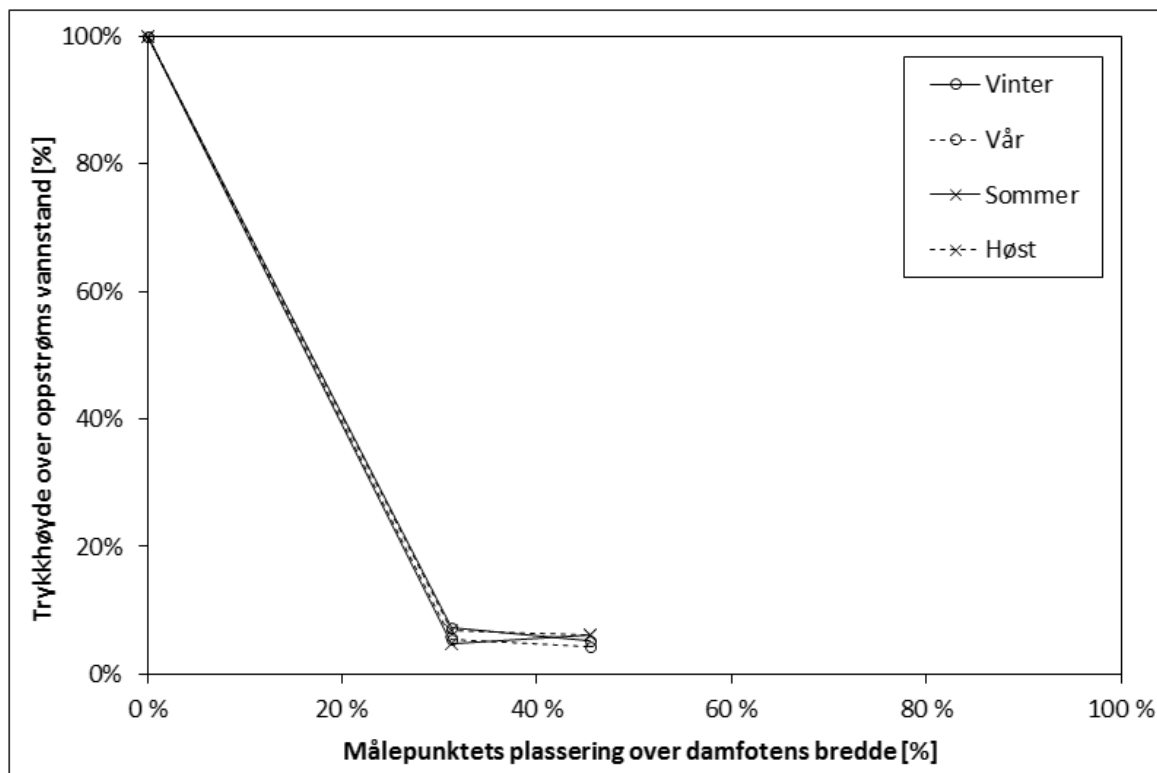
Figur 7.10 og 7.11 viser resultatene for snitt 15 og 21 for dam Großer Mühdorfer See. I snitt 15 viser resultatene at det er lite variasjon i poretrykket over året. I snitt 21 er forskjellen for målepunktet lengst oppstrøms ganske stor. Her er poretrykket høyest om høsten og sommeren, og lavest om vinteren og våren. I målepunktet lengst nedstrøms er poretrykket nokså likt.



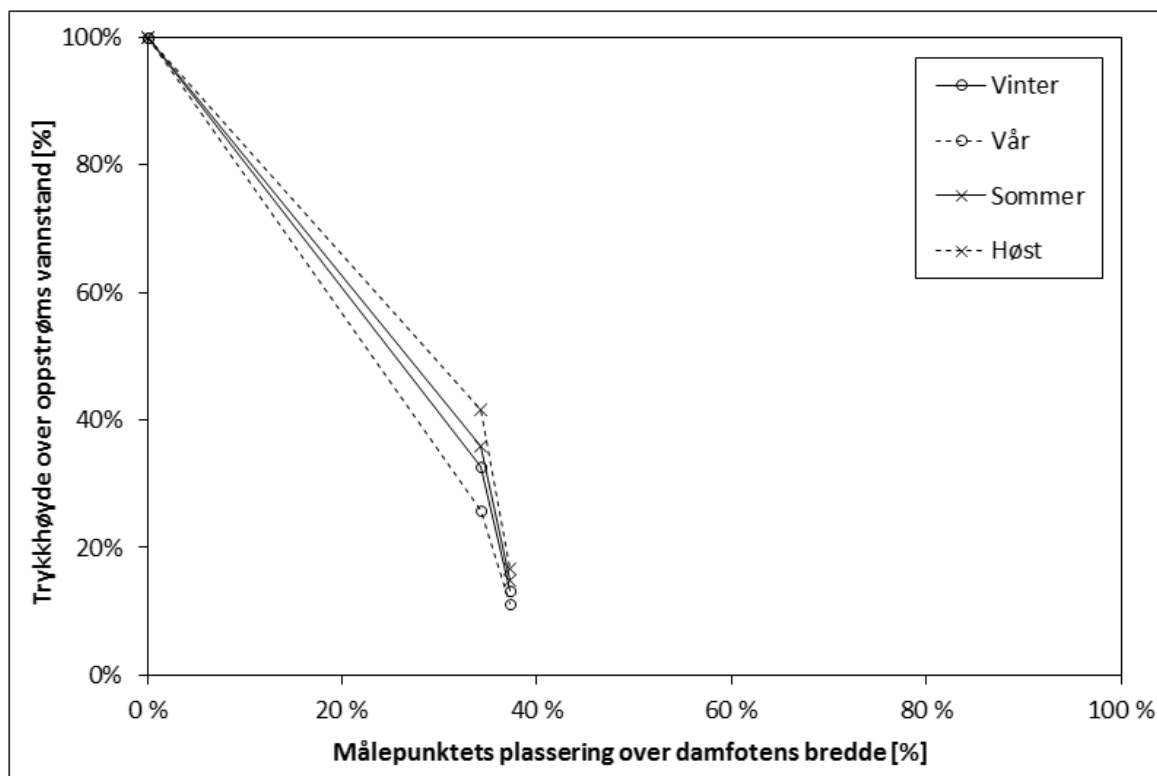
Figur 7.8: Dam Klingenberg (snitt 3): Gjennomsnittsmålinger over hver sesong i perioden 04/2012-01/2014



Figur 7.9: Dam Gottleuba (snitt 1): Gjennomsnittsmålinger over hver sesong i perioden 01/2011-12/2013



Figur 7.10: Dam Großer Mühdorfer See (snitt 15): Gjennomsnittsmålinger over hver sesong i perioden 01/2009-12/2011



Figur 7.11: Dam Großer Mühdorfer See (snitt 21): Gjennomsnittsmålinger over hver sesong i perioden 01/2009-12/2011

7.1.3 Innvirkning av konstruktive tiltak

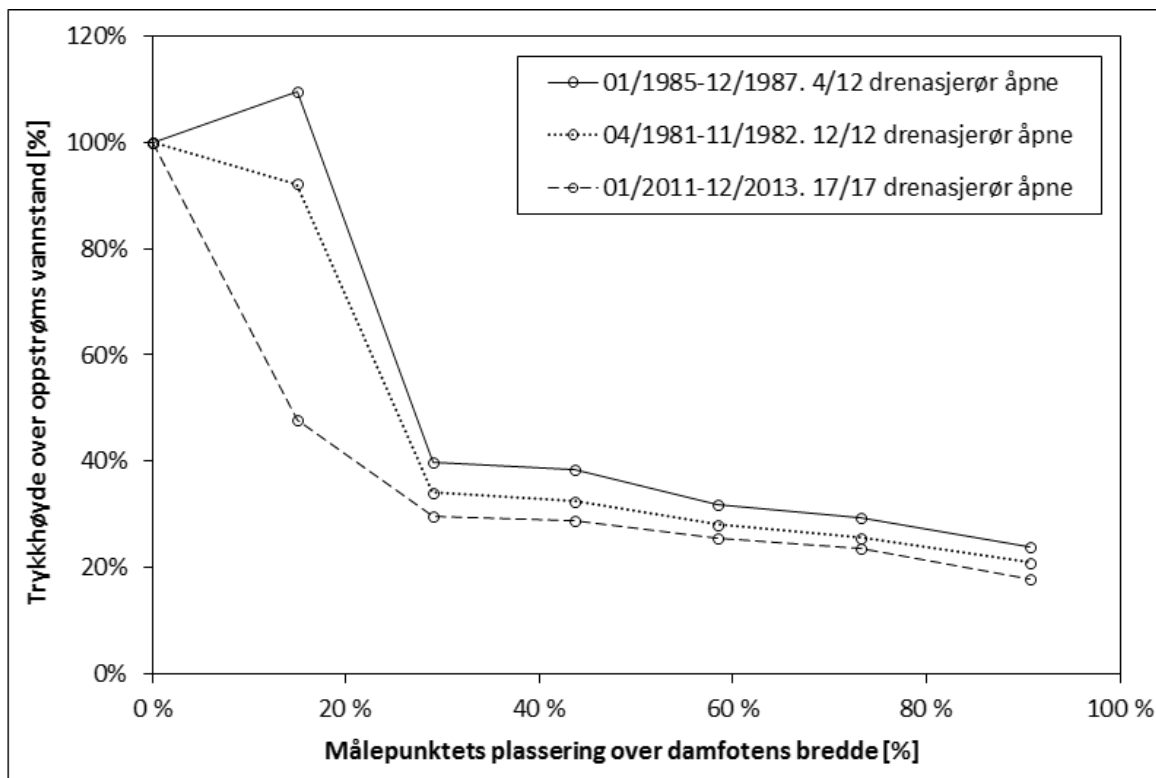
Det er undersøkt om det finnes en sammenhengen mellom konstruktive tiltak ved dammene og poretrykksfordelingen under dammen. For å vurdere innvirkningen er gjennomsnittlig poretrykk i hvert målepunkt beregnet over utvalgte perioder. Resultatene er fremstilt som forklart i del 7.1.2 og vist i figur 7.7. Resultatene er vist i figur 7.12 til 7.15.

Dam Gottleuba

Dam Gottleuba har injeksjonsskjerm i oppstrøms ende av fundamentet, og drenasjesystem like nedstrøms. Målepunkt X_1 er plassert i mellom injeksjonsskjermen og drenasjesystemet, omtrent 15 % fra oppstrøms damtå. Målepunkt X_2 er plassert like nedstrøms drenasjesystemet, omtrent 30 % fra oppstrøms damtå. Dette er vist i dammens tverrsnitt i figur C.4 i vedlegg C.2.

I løpet av dammens levetid har drenasjehullene i drenasjesystemet ved dam Gottleuba vært både åpne og lukket. Figur 7.12 viser poretrykket for tre utvalgte perioder. I de tre periodene er et ulikt antall drenasjerør åpne. Drenasjesystemet strekker seg langs hele den midterste delen av dammen.

I den første perioden, 1981-1982, er alle 12 drenasjerørene i dammen åpne. I den andre perioden, 1985-1987, er kun 4 av 12 drenasjerør åpne. Som figur 7.12 viser er poretrykket



Figur 7.12: Dam Gottleuba (snitt 1): Gjennomsnittsmålinger for hvert målepunkt over 3 perioder med et ulikt antall drenasjerør åpne

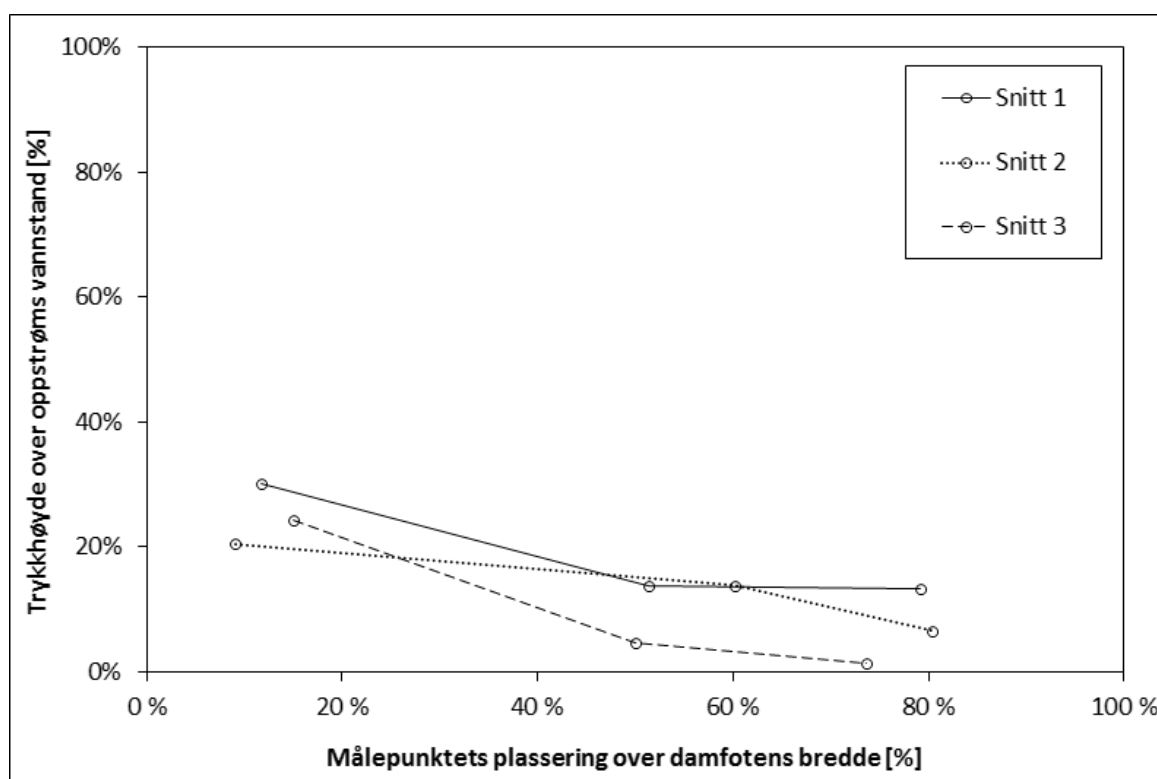
i denne perioden høyere for alle målepunktene enn for den første perioden. I år 2000 ble 5 nye drenasjehull boret i dam Gottleuba. I den tredje perioden, 2011-2013, er 17 av 17 drenasjerør åpne. Poretrykket i alle målepunktene i denne perioden er lavere enn for de to første periodene, som vist i figur 7.12.

Resultatene i figur 7.12 viser at drenasjesystemet har stor innvirkning på poretrykket, og at effekten øker med antall åpne drenasjehull. Den viser også at injeksjonsskjermen, som er plassert mellom oppstrøms damtå og målepunktet lengst oppstrøms, har en mindre effekt på poretrykket enn drenasjesystemet. I den andre perioden, 1985-1987, hvor kun 4 av 12 drenasjerør er åpne, er poretrykket i målepunktet lengst oppstrøms større enn oppstrøms vannstand. Det viser at injeksjonsskjermen i snitt 1 har en minimal effekt.

Ringedalsdammen

Ringedalsdammen har to poretrykksreducerende tiltak. Det første tiltaket er utformingen av dammen. Ringedalsdammen er konstruert med en frittstående oppstrøms frontplate som minker poretrykket i fundamentet (Sweco, 2013). I tillegg har dammen injeksjonsskjerm i oppstrøms ende av fundamentet.

I figur 7.13 er gjennomsnittlig poretrykk i målepunktene for alle de tre analyserte tverrsnittene i Ringedalsdammen presentert. Figuren viser at poretrykket i fundamentet er lavt under hele dammen.



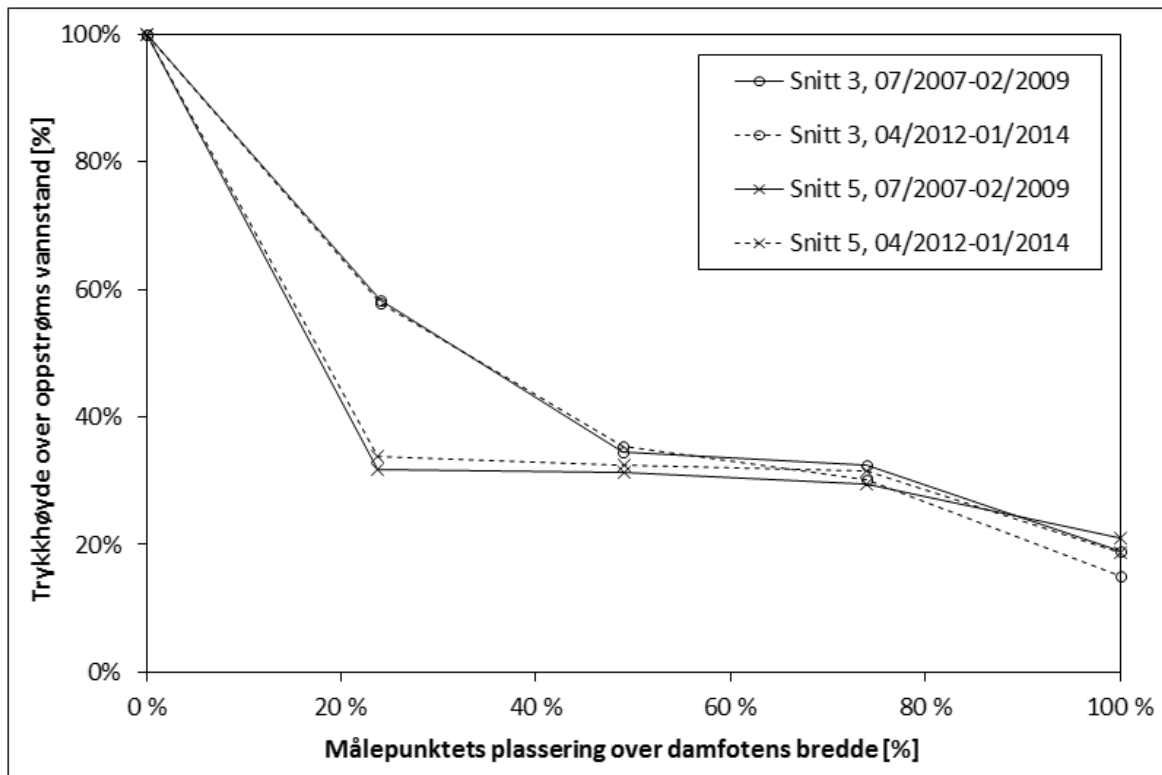
Figur 7.13: Ringedalsdammen (alle snitt): Gjennomsnittsmålinger for hvert målepunkt i perioden uke 30-52 i 2012

Dam Klingenberg

Dam Klingenberg har en kort injeksjonsskjerm i oppstrøms ende av fundamentet. I følge Kittler (2014) er ikke injeksjonsskjermen dyp nok til å hindre lekkasje gjennom fundamentet. Den er kun injisert ved rehabilitering av dammen av konstruksjonsmessige årsaker. Det er ikke drenasjesystem ved dam Klingenberg.

I figur 7.14 er gjennomsnittlig poretrykk i målepunktene for begge de analyserte tverrsnittene, for to perioder, presentert. Figuren viser at poretrykket i snitt 3 er høyere enn poretrykket i snitt 5 for de fleste målepunktene. Forskjellen er særlig stor i målepunktet lengst oppstrøms. Her er det nesten dobbelt så høyt poretrykk i snitt 3 som i snitt 5.

Dersom det forutsettes at den korte injeksjonsskjermen har liten påvirkning på poretrykket, viser figur 7.14 at endringen i poretrykk langs dammens lengdeakse skyldes noe anent enn konstruktive tiltak.



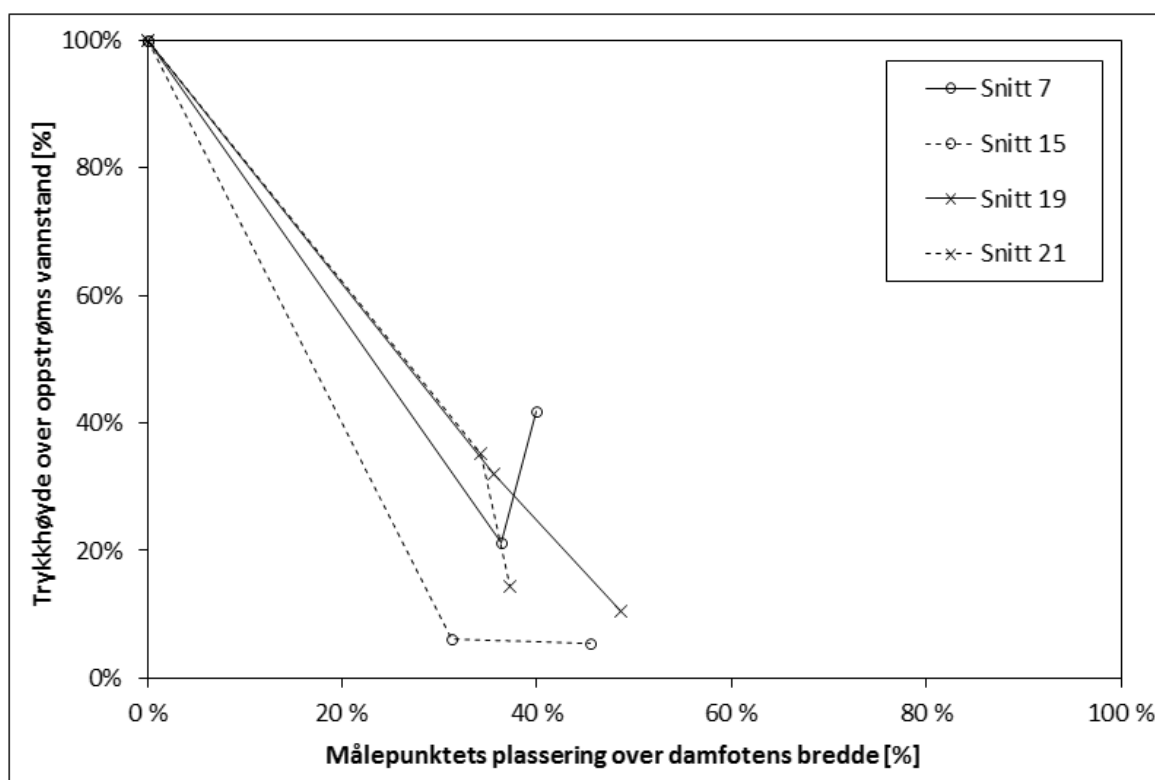
Figur 7.14: Dam Klingenberg (alle snitt): Gjennomsnittsmålinger for hvert målepunkt over periodene 07/2007-02/2009 og 04/2012-01/2014

Dam Großer Mühdorfer See

Dam Großer Mühdorfer See har et drenasjesystem i oppstrøms ende av dammen. Målepunktene som ligger lengst oppstrøms, målepunkt X_1, ligger nedstrøms drenasjesystemet. Dammen har også en inspeksjonsgang liggende på dammens fundament. Denne inspeksjonsgangen fungerer som boksdrenasje og gir derfor en ekstra drenerende effekt.

Alle de analyserte tverrsnittene har to målepunkt. Begge målepunktene ligger like oppstrøms og nedstrøms inspeksjonsgangen, som vist i figur C.13 til C.16 i vedlegg C.4. Det er ikke injeksjonsskjerm ved dammen.

I figur 7.15 er gjennomsnittlig poretrykk i målepunktene for alle de fire analyserte tverrsnittene i dam Großer Mühdorfer See presentert. Figuren viser at de konstruktive tiltakene til sammen har en god drenerende effekt, da poretrykket er nokså lavt i de fleste målepunktene. Særlig lavt er poretrykket i snitt 15.



Figur 7.15: Dam Großer Mühdorfer See (alle snitt): Gjennomsnittsmålinger for hvert målepunkt i perioden 01/2009-12/2012

7.2 Resultater fra stabilitetsberegninger

I dette delkapittelet er resultatene fra stabilitetsberegningene beskrevet i kapittel 6 presentert.

7.2.1 Stabilitetsberegninger med teoretiske poretrykksdiagram

For å vurdere det norske regelverket er det gjennomført stabilitetsberegninger av en eksempel dam. Beregningene er gjennomført med bruk av poretrykksdiagram etter regelverket i Norge, Sverige og Sveits. Stabilitetsberegningene er utført for to situasjoner, med og uten drenasjesystem og injeksjonsskjerm. Resultatene er vist i tabell 7.1.

Sikkerheten mot glidning beregnes likt i alle de tre landene, men ulike sikkerhetsfaktorer benyttes. Ved sikkerheten mot velting angir regelverket i Sverige og Sveits en sikkerhetsfaktor. Det norske regelverket gir derimot et krav om at resultatanten av alle kreftene skal ligge innenfor dammens kjernetverrsnitt.

For situasjonen uten injeksjonsskjerm og drenasjesystem beregnes oppdriften, P , likt i alle de tre landene. Både den relative sikkerheten for glidning og velting blir lavest beregnet etter regelverket i Norge. Det viser at Norge har de strengeste sikkerhetskravene. Beregningene etter det norske regelverket gjør at eksempel dammen er ustabil.

For situasjonen med injeksjonsskjerm og drenasjesystem er den beregnede oppdriften, P , etter regelverket i Norge en del lavere enn etter regelverket i Sverige og Sveits. Også for denne situasjonen blir den relative sikkerheten for både glidning og velting lavest beregnet etter regelverket i Norge.

Tabell 7.1: Resultater for stabilitetsberegninger med teoretisk poretrykksdiagram etter regelverket i Norge, Sverige og Sveits

	Norge	Sverige	Sveits
Sikkerhet mot velting	$a > B/3$	$S_v > 1,35$	$S_v > 1,3$
Sikkerhet mot glidning	$S_g > 1,5$	$S_g > 1,10$	$S_g > 1,3$
<i>Uten injeksjonsskjerm og drenasjesystem</i>			
Oppdrift, P [kN/m]	624,0	624,0	624,0
Relativ sikkerhet mot velting	105,3 %	112,5 %	116,8 %
Relativ sikkerhet mot glidning	94,9 %	129,4 %	109,5 %
<i>Med injeksjonsskjerm og drenasjesystem</i>			
Oppdrift, P [kN/m]	295,9	402,0	468,0
Relativ sikkerhet mot velting	124,8 %	140,4 %	137,5 %
Relativ sikkerhet mot glidning	125,3 %	157,4 %	126,1 %

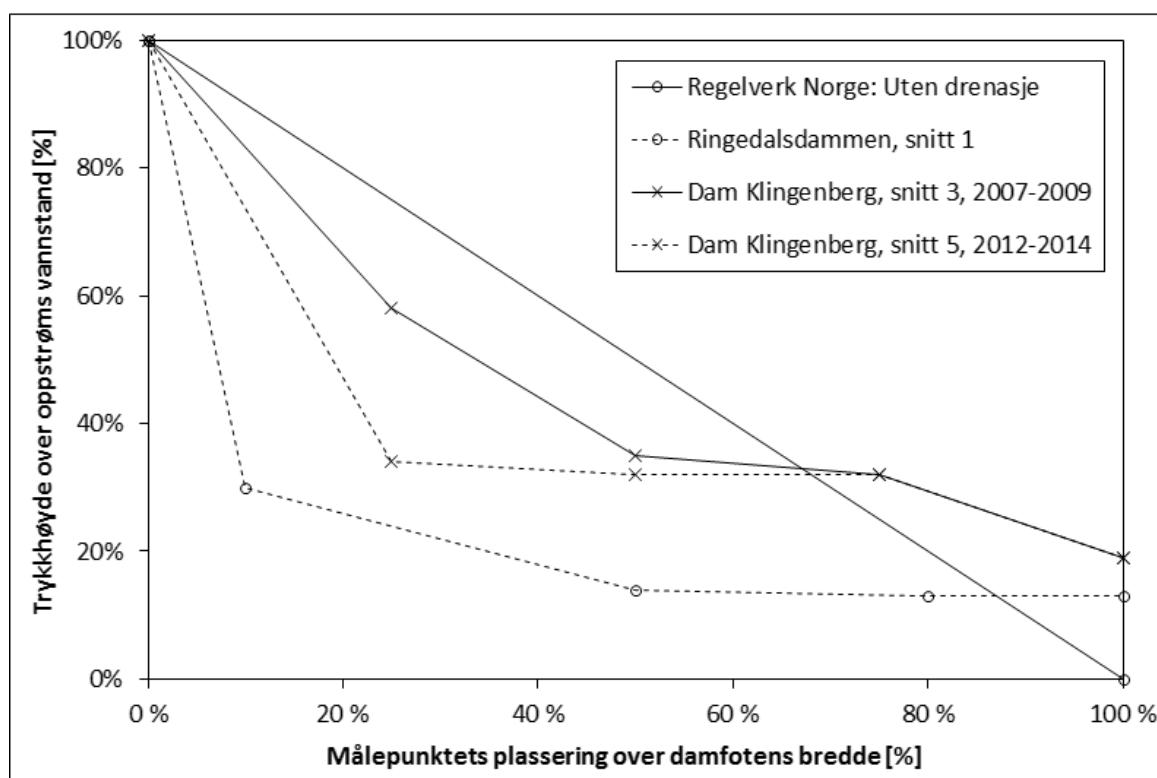
7.2.2 Stabilitetsberegninger med poretrykksdiagram fra målte verdier av poretrykket

For å vurdere hvordan ulike poretrykksdiagram påvirker stabiliteten til en eksempel-dam er det gjennomført stabilitetsberegninger etter regelverket i Norge. Poretrykksdiagrammene som er benyttet i beregningene er basert på resultatene fra analysen av poretrykksmålinger som er gjennomført i denne oppgaven.

Poretrykksdiagrammene fra analysen som er benyttet i stabilitetsberegningene er vist i figur 7.16 og 7.17. Tabell 7.2 viser resultatene fra beregningene. Resultatene er delt opp i to situasjoner, uten og med drenasjesystem.

Figur 7.16 viser ett poretrykksdiagram for Ringedalsdammen og to for dam Klingenberg. Ingen av dammene har drenasjesystem. Figuren viser også poretrykksdiagrammet beregnet etter det norske regelverket for en dam uten drenasjesystem.

Som figuren viser er de målte poretrykksverdiene lavere enn poretrykket beregnet etter det norske regelverket. Dermed blir også eksempeldammen stabil for alle de målte poretrykksdiagrammene i figuren, som vist i den øvre delen av tabell 7.2. Her er den relative sikkerheten godt over 100 % for alle tilfellene, unntatt ved snitt 3 ved dam Klingenberg. Den relative sikkerheten etter regelverket i Norge er den samme som i tabell 7.1.

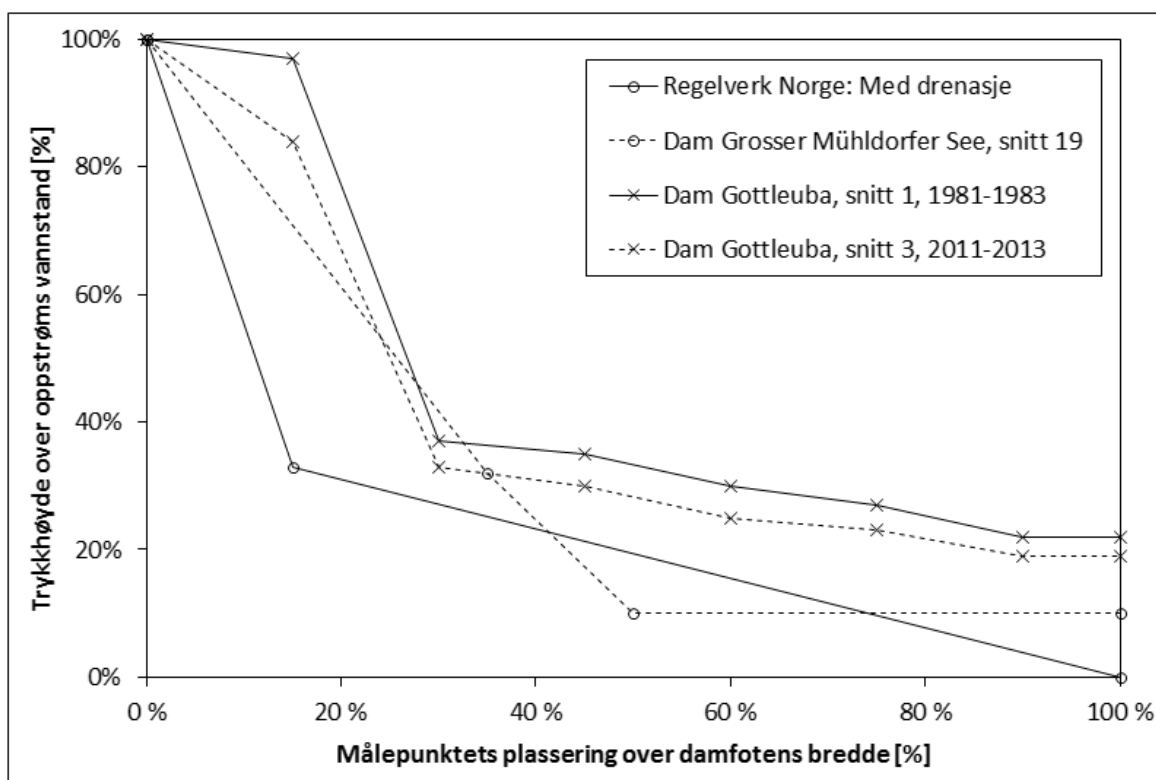


Figur 7.16: Poretrykksdiagram: Uten drenasjesystem

Figur 7.17 viser ett poretrykksdiagram for dam Grosser Mühldorfer See og to for dam Gottleuba. Begge dammene har drenasjesystem. Figuren viser også poretrykksdiagrammet beregnet etter det norske regelverket for en dam med drenasjesystem.

Som figuren viser er de målte poretrykksverdiene høyere enn poretrykket beregnet etter det norske regelverket. Allikevel blir eksempeldammen stabil for alle de målte poretrykksdiagrammene i figuren, som vist i den nedre delen av tabell 7.2. Her er den relative sikkerheten mot velting godt over 100 %, men den relative sikkerheten mot glidning er kun i overkant av 100 % for to av tilfellene. Den relative sikkerheten etter regelverket i Norge er den samme som i tabell 7.1.

Begge poretrykksdiagrammene for dam Gottleuba, som har drenasjesystem, gir høyere oppdrift under dammen enn oppdriften ved dammene uten drenasjesystem. Dette er vist i tabell 7.2.



Figur 7.17: Poretrykksdiagram: Med drenasjesystem

Tabell 7.2: Resultater for stabilitetsberegninger med målte poretrykksdiagram

	Oppdrift, P [kN/m]	Relativ sikkerhet mot velting	Relativ sikkerhet mot glidning
<i>Uten drenasjesystem</i>			
Etter regelverk	624,0	105,3 %	94,9 %
Ringedalsdammen, snitt 1	273,9	130,4 %	127,3 %
Dam Klingenberg, snitt 3	546,0	113,5 %	102,1 %
Dam Klingenberg, snitt 5	461,8	120,9 %	109,9 %
<i>Med drenasjesystem</i>			
Etter regelverk, $k_{dren} = 0,33$	295,8	124,8 %	125,3 %
Dam Gottleuba, snitt 1	564,7	113,0 %	100,4 %
Dam Gottleuba, snitt 3	500,1	116,4 %	106,3 %
Dam Grosser Mühdorfer See	358,8	115,3 %	119,4 %

Kapittel 8

Diskusjon

I dette kapittelet vil formålene, presentert innledningsvis i kapittel 1, diskuteres. Diskusjonen er basert på litteraturstudiet og resultatene presentert i kapittel 7.

8.1 Parametere som påvirker poretrykket

Det er gjennomført et litteraturstudie og en analyse av poretrykksmålinger fra fire dammer for å vurdere hvilke parametere som har størst innvirkning på poretrykket i fundamentet under en gravitasjonsdam.

I litteraturstudiet er det hovedsakelig sett på to studier av Strassburger (1989) og ICOLD (2004b). I begge studiene foreligger det ikke detaljert informasjon om fundamentene og de konstruktive tiltakene ved dammene som er vurdert. Det samme gjelder for de fire dammene som er analysert i denne oppgaven.

Det er gjennomført få studier om poretrykk i damfundament i Norge. Denne oppgaven kan derfor anses som et utgangspunkt for videre forskning om temaet. I denne oppgaven er det derfor ikke gått i dybden på forholdene som påvirker poretrykket. Det er sett på ulike parametere som kan påvirke poretrykket i et damfundament, for å finne ut hvilke av parameterne som har størst innvirkning på poretrykket. Både litteraturstudiet og analysen av poretrykksmålingene danner derfor et godt grunnlag for å vurdere hvilke parametere som har størst innvirkning på poretrykket i damfundament i Norge.

Videre følger en diskusjon rundt de ulike parameterene som er analysert i oppgaven.

Fundamentet

For en betongdam med lav permeabilitet på et homogent fundament vil poretrykket i fundamentet avta lineært under dammen. Det er sjeldent tilfelle at et fjellfundament er homogent og permeabiliteten kan variere både langs dammens lengdeakse og langs damfotens bredde. Det kan skape situasjoner hvor høyt poretrykk bygges opp i fundamentet.

Alle dammene benyttet i analysen av poretrykksmålinger har konstruktive tiltak for å redusere poretrykket. Det er derfor ikke mulig å skille innvirkningen på poretrykket fra varierende egenskaper i fundamentet fra innvirkningen av de konstruktive tiltakene. Både fundamentet og effekten av konstruktive tiltak kan variere langs dammen.

Dam Klingenberg har kun en kort injeksjonsskjerm i oppstrøms ende av dammen. I følge Kittler (2014) vil ikke injeksjonsskjermen redusere vannstrømningen gjennom fundamentet. Det er allikevel sannsynlig at injeksjonsskjermen vil påvirke poretrykket i fundamentet. Innvirkningen fra injeksjonsskjermen på poretrykket antas å være tilstrekkelig liten, slik at resultatene fra dam Klingenberg kan benyttes til å vurdere om poretrykket blir påvirket av fundamentets egenskaper.

Resultatene fra dam Klingenberg viser at fundamentets innvirkning på poretrykket endres langs dammens lengdeakse. Figur 7.14 i del 7.1.3 viser poretrykksfordelingen for snitt 3 og 5 ved dam Klingenberg. Figuren viser at poretrykket i snitt 3 er en del høyere enn i snitt 5, særlig i målepunktet plassert lengst oppstrøms. Siden innvirkningen fra den korte injeksjonsskjermen antas å være liten, skyldes variasjonen i poretrykket endringer i fundamentets egenskaper. Figuren viser også at poretrykket, og dermed fundamentets egenskaper, har endret seg lite i løpet av de 3 årene mellom de analyserte periodene.

Et fundament som har høy permeabilitet i oppstrøms ende vil gi økt poretrykk i oppstrøms ende av fundamentet i forhold til et fundament med lav permeabilitet i oppstrøms ende (Strassburger, 1989). Fundamentet i snitt 3 ved dam Klingenberg er derfor sannsynligvis mer permeabelt enn fundamentet i snitt 5.

Vannstandsendringer

Resultatene presentert i del 7.1.1 viser at sammenhengen mellom oppstrøms vannstand og poretrykk er stor for målepunktene i oppstrøms ende av fundamentet. Lengre nedstrøms i fundamentet er sammenhengen mellom vannstanden og poretrykket liten.

I resultatene fra analysen av poretrykksmålingene er det ikke funnet en klar sammenheng mellom når en endring i poretrykket oppstår i forhold til endringen i vannstand i magasinet. ICOLD (2004b) anser det som usannsynlig at en tidsforsinkelse kan oppstå mellom endring av vannstanden i magasinet og en endring i poretrykket. Det stemmer ikke overens med eksemplene vist i del 2.2.6, som er basert på strømmingsteori. Eksemplene viser at vannet strømmer svært sakte ved lav permeabilitet i fundamentet og at poretrykket ikke kan endres før vannstrømmen gjennom grunnen er endret.

Ved Ringedalsdammen er det gjennomført avlesninger av poretrykket en gang i uka. Det gir et godt grunnlag for å vurdere hvordan poretrykket endres med vannstanden. Figur 7.1 viser resultatene for snitt 1 ved Ringedalsdammen. Grafen for poretrykket i oppstrøms ende av fundamentet har stort sett topp- og bunnpunktene ved samme registrering som topp- og bunnpunktene for vannstanden. Fra disse resultatene virker det dermed som at vannstanden og poretrykket endres likt i oppstrøms ende av dammen. For snitt 2 derimot, vist i figur 7.2, viser poretrykket i målepunktet lengst oppstrøms noen variasjoner som ikke er å finne i vannstanden, for eksempel rundt uke 45. Det er vanskelig å si hva som forårsaker disse endringene. Det foreligger ikke informasjon om

hvilken type måleinstrument som er benyttet i Ringedalsdammen.

Som vist i del 2.4.1 vil også måleinstrumentet som benyttes ved registrering av poretrykket ha en innvirkning på resultatet. Dersom poretrykket registreres ved bruk av standrør vil det være en tidsforsinkelse mellom endring av poretrykket i fundamentet og endring av vannstanden i standrøret. Dermed vil det oppstå en tidsforsinkelse før endret poretrykk kan registreres. Tidsforsinkelsen er størst ved fundament med lav permeabilitet (Bell, 1992).

Ved dam Klingenberg og dam Gottleuba er det benyttet standrør til å måle poretrykket. I tillegg er poretrykket kun registrert et par ganger i måneden ved dam Klingenberg og én gang i måneden ved dam Gottleuba. Endringen i poretrykket mellom måletidspunktene er ukjent. I tillegg gir standrørene en forsinkelse i poretrykksendringen som ikke skyldes fundamentets egenskaper, men instrumentets egenskaper. Dam Großer Mühlendorfer See har også kun én registrering av poretrykket i måneden. Det foreligger ikke informasjon om hvilken type måleinstrument som er benyttet. Datagrunnlaget for de tre dammene er derfor ikke godt nok til å vurdere om det er en tidsforsinkelse mellom endring vannstand og endring i poretrykk.

Som diskutert under “Fundament” er fundamentet ved dam Klingenberg sannsynligvis mer permeabelt i snitt 3 enn i snitt 5. Fra figur 7.3 og 7.4 for dam Klingenberg kan det sees at poretrykket i oppstrøms ende av fundamentet endrer seg mer direkte med vannstanden for snitt 3 enn for snitt 5. Det viser at poretrykket endrer seg mer direkte i størrelse dersom fundamentet er permeabelt.

Poretrykket er også høyere i snitt 3 enn i snitt 5 ved dam Klingenberg, som vist i figur 7.14. Dette stemmer godt med eksemplene vist i del 2.2.6. Eksemplene viser at potensialfallet er størst der permeabiliteten er lav. Dermed er potensialfallet mellom vannstanden og målepunktet lengst oppstrøms størst i snitt 5. Da blir poretrykket i oppstrøms ende av snitt 5 lavere enn i snitt 3.

Som beskrevet innledningsvis i denne delen endres poretrykket i oppstrøms ende av fundamentet mer direkte med oppstrøms vannstand enn poretrykket lengre nedstrøms i fundamentet. En forklaring på dette kan være at poretrykket i nedstrøms ende av fundamentet er lavt. Dermed vil endringen i poretrykket ved en vannstandsending, som en prosentandel av oppstrøms vannstand, være liten. Det kan medføre at endringen i poretrykket ikke kommer fram i resultatene fra analysen. En annen forklaring kan være at vannet beveger seg sakte gjennom fundamentet dersom permeabiliteten er lav. Det vil da ta lang tid før poretrykket endrer seg i nedstrøms del av fundamentet ved en vannstandsending i magasinet. Dette strider i mot resultatene i ICOLDs (2004b) studie. Sammenhengen bør derfor undersøkes nærmere i videre studier.

Temperaturendringer

Fundamentet og dammen vil trekke seg sammen og utvide seg i henholdsvis kulde og varme. Det kan påvirke trykket fra dammen mot fundamentet og dermed permeabiliteten i fundamentet.

Resultatene fra analysen av temperaturens påvirkning på poretrykket er vist i figur 7.8

til 7.11 i del 7.1.2. Resultatene viser små endringer i poretrykket mellom sesongene, fra 0 – 10 % av oppstrøms vannstand. Det er ingen sammenheng mellom hvilken sesong som gir høyest eller lavest poretrykk.

Resultatene i del 7.1.2 som ikke viser en endring i poretrykket mellom sesongene skyldes at poretrykket varierer lite løpet av den analyserte perioden. Dette kan for eksempel sees for snitt 21 i dam Großer Mühdorfer See. Figur 7.6 viser at poretrykket i målepunktet lengst nedstrøms er nokså konstant i perioden 01/2009-12/2011. I figur 7.11 er det derfor liten variasjon i poretrykket mellom sesongene for den samme perioden. Poretrykket i målepunktet lengst oppstrøms derimot, har en stor variasjon over perioden. Da er variasjonen i poretrykket mellom sesongene stor, som vist i figur 7.11.

Basert på dette er det derfor vanskelig å skille mellom endringer i poretrykket som skyldes vannstandsendringer i magasinet, og endringen i poretrykket som skyldes temperaturvariasjoner over året. I følge Strassburger (1989) kan temperaturendringer gi en variasjon i poretrykket, men sammenlignet med påvirkningen fra vannstandsendringer i magasinet er den liten. Det kan derfor konkluderes med at temperaturvariasjoner påvirker poretrykket i liten grad.

Konstruktive tiltak

Figur 7.12 for snitt 1 i dam Gottleuba viser at drenasjesystemet har en stor reduserende effekt på poretrykket i damfundamentet. I figuren kommer det tydelig fram at poretrykket minker når antall åpne drenasjerør øker. Drenasjesystemet reduserer poretrykket mest i oppstrøms ende av fundamentet. Poretrykket lengre nedstrøms i fundamentet reduseres også noe når antall åpne drenasjerør øker. Dermed er den reduserende effekten fra drenasjesystemet på den totale oppdriften stor.

Dam Großer Mühdorfer See har også drenasjesystem. Drenasjesystemet består både av borehull i oppstrøms ende av dammen og en inspeksjonsgang plassert på fundamentet, kalt boksdrenasje. Siden begge målepunktene for poretrykk ligger like ved inspeksjonsgangen for alle tverrsnittene kan ikke effekten fra drenasjesystemet med borehull skiller fra effekten av boksdrenasjen. Til sammen har begge drenasjesystemene stor reduserende effekt på poretrykket, som figur 7.15 viser.

Ved dam Gottleuba ble en injeksjonsskjerm med to rader injisert under bygging av dammen. Allerede ved første fylling ble høyt poretrykk i fundamentet registrert, som tydet på at injeksjonsskjermen ikke var tett. Figur 7.12 viser at i perioden hvor kun 4 av 12 drenasjerør er åpne, er poretrykket i målepunktet lengst oppstrøms svært høyt. Injeksjonsskjermen ligger oppstrøms dette målepunktet. Det viser at injeksjonsskjermen har svært liten innvirkning på poretrykket.

ICOLD (2004b) anbefaler at injeksjonsskjermer består av minst to rader for å bli tilstrekkelig tett. Poretrykksmålingene ved dam Gottleuba viser at selv injeksjonsskjermer med to rader kan ha liten effekt.

Ringedalsdammen har også injeksjonsskjerm. På grunn av dammens utforming er poretrykket under dammen lavt (Sweco, 2013), som vist i figur 7.13. Det er ikke

mulig å skille den poretrykksreducerende effekten av konstruksjonen fra effekten av injeksjonsskjermen.

8.2 Vurdering av regelverk

Det er gjennomført stabilitetsberegninger av en eksempeldam etter regelverket i Norge, Sverige og Sveits. Beregningene er gjennomført med bruk av teoretiske poretrykksdiagram og poretrykksdiagram basert på målte verdier. Det er gjort for å gi en vurdering av det norske regelverket for beregning og måling av poretrykk.

Ved sammenligning av regelverkene er det forutsatt at “dimensjonerende flomvannstand” i den svenske retningslinjen og “høy vannstand” i den sveitsiske retningslinjen tilsvarer omtrent samme vannstand som dimensjonerende flomvannstand etter regelverket i Norge. Det er sannsynlig at vannstandene egentlig avviker noe, men de teoretiske vannstandene etter retningslinjene i Sverige og Sveits er ikke beregnet da det faller utenfor oppgavens omfang.

Dimensjonerende flomvannstand etter regelverket i Norge er derfor benyttet i stabilitetsberegningene. En sammenligning av beregningene kan allikevel gi en indikasjon på hvordan kravene i det norske regelverk er i forhold til kravene i retningslinjene i Sverige og Sveits.

Sammenligning av regelverk

Regelverket om damsikkerhet i Norge er lovfestet gjennom Damsikkerhetsforskriften (2009). Dermed er også kravene benyttet ved stabilitetsberegninger lovfestet. I Sverige og Sveits er disse kravene kun gitt i retningslinjer, som gir anbefalte metoder ved stabilitetsberegninger (ICOLD 2004a; 2013a).

Det er gjennomført stabilitetsberegninger for to situasjoner. For situasjonen uten drenasjesystem og injeksjonsskjerm er oppdriften beregnet likt for alle landene, som vist i tabell 7.1. Sikkerheten mot glidning beregnes også likt i alle de tre landene. Regelverket i Norge har den høyeste sikkerhetsfaktoren og dermed blir den relative sikkerheten mot glidning lavest etter det norske regelverket. Ved beregning av sikkerheten mot velting benyttes ulike krav i de tre landene, som vist i tabell 7.1. Også den relative sikkerheten mot velting er lavest etter det norske regelverket. Det viser at Norge også har det strengeste kravet til veltestabilitet.

For situasjonen med drenasjesystem og injeksjonsskjerm tillater regelverket i Norge størst reduksjon av oppdriften. Allikevel blir den relative sikkerheten mot både velting og glidning lavest etter det norske regelverket, som vist i tabell 7.1. Det viser at stabilitetskravene i det norske regelverket er nokså høye.

Regelverket i Norge tillater ikke å benytte redusert poretrykk i fundamentet hvis en dam kun har injeksjonsskjerm, men tillater reduksjon i poretrykket dersom dammen kun har drenasjesystem (NVE, 2005a). I Sveits tillates det kun å benytte redusert poretrykk dersom dammen har både injeksjonsskjerm og drenasjesystem (FOWG, 2002a).

I Sverige tillates det å benytte både redusert poretrykk med kun injeksjonsskjerm og kun drenasjesystem, men for begge tilfellene må effekten kontrolleres, for eksempel ved bruk av poretrykksmålere (Svensk Energi, 2011).

Vurdering av det norske regelverket

Det er også gjennomført stabilitetsberegninger etter det norske regelverket med bruk av poretrykksdiagram fra analysen av poretrykksmålinger. Figur 7.16 viser poretrykksdiagrammet for de to dammene uten drenasjesystem, Ringedalsdammen og dam Klingenberg. Oppdriften for begge dammene er lavere enn oppdriften beregnet etter det norske regelverket for en situasjon uten drenasjesystem. Basert på resultatene fra de to dammene er beregningen av poretrykket i det norske regelverket konservativ. Eksempeldammen oppfyller ikke stabilitetskravene etter det norske regelverket, men blir stabil for de målte poretrykksdiagrammene.

Figur 7.17 viser poretrykksdiagrammet for de to dammene med drenasjesystem, dam Gottleuba og dam Großer Mühdorfer See. Oppdriften for begge dammene er større enn oppdriften beregnet etter det norske regelverket for en situasjon med drenasjesystem. Basert på resultatene fra de to dammene med drenasjesystem tillater det norske regelverket en for stor reduksjon av oppdriften for dammer med drenasjesystem.

Spesielt ved dam Gottleuba er oppdriften stor. Stor oppdrift gir lav relativ sikkerhet mot glidning, som vist i tabell 7.2. Poretrykket i snitt 1 ved dam Gottleuba er særlig stort i oppstrøms ende av fundamentet. Det gir et stort moment og dermed lav relativ sikkerhet mot velting. Dette er også vist i tabell 7.2. Resultatene fra dam Gottleuba viser at selv om en dam har drenasjesystem kan det være høyt poretrykk oppstrøms drenasjesystemet.

Det foreligger ikke informasjon om utformingen av drenasjesystemet ved dam Gottleuba. Utformingen av drenasjesystemet påvirker i stor grad effekten. I tillegg er det ikke gjennomført vedlikehold av drenasjesystemet i løpet av de 35 årene det har vært i drift. Det kan derfor ikke trekkes en konklusjon ut i fra poretrykksmålingene fra dam Gottleuba, men datagrunnlaget er ansett som godt nok til å gi innspill til det norske regelverket.

8.3 Instrumentering av poretrykk

Litteraturstudiet og resultatene som er diskutert hittil i kapittelet danner bakgrunn for en vurdering om bruk av instrumentering av poretrykk i Norge.

ICOLD (2004a) viser til at kunnskap om poretrykk i damfundament er viktig ved revurdering av dammer. Det kan hindre unødvendige ombygninger dersom det målte poretrykket er lavere enn poretrykksfordelingen som benyttes i regelverk. Spross, Johansson og Larsson (2014) er uenige og mener målte verdier av poretrykket ikke bør brukes i stabilitetsberegninger da det er sannsynlig at poretrykket ved et senere tidspunkt vil øke og dermed gjøre dammen ustabil.

Poretrykket måles kun i utvalgte punkter. Poretrykket mellom punktene er ukjent og kan variere mye (ICOLD, 2005). Et eksempel på dette er Ringedalsdammen. Dammen er 520 meter lang og poretrykket måles kun i 4 tverrsnitt. Allikevel har NVE (1999) tillatt dameier å benytte et redusert poretrykk i stabilitetsberegningene av dammen.

Poretrykksmålinger kan være nyttig selv om de målte verdiene ikke benyttes i stabilitetsberegninger. Målinger gjør at en eventuell endring i poretrykket over tid kan oppdages slik at nødvendige tiltak kan gjennomføres (Spross, Johansson og Larsson, 2014). Et eksempel er dam Gottleuba. Poretrykksmålere ble installert ved bygging av dammen og allerede ved første fylling av magasinet ble det registrert høyt poretrykk i oppstrøms ende av dammen. Det tydet på at injeksjonsskjermen ikke var tilstrekkelig tett.

Vurdering av krav i Damsikkerhetsforskriften

I tabell “7-2.2 Instrumentering og måling av dammer” i Damsikkerhetsforskriften (2009) kreves det at betongdammer i klasse 2, 3 og 4 som er fundamentert på fjell med “utpregede svakhetssoner” må ha poretrykksmålinger. For betongdammer fundamentert på “godt fjell” er det ikke krav til poretrykksmålinger. Det følger ikke en definisjon av begrepet “godt fjell”. Kravene til poretrykksmålinger i Damsikkerhetsforskriften (2009) er ikke strenge, og i tillegg vage. Det har ført til at svært få dammer i Norge har poretrykksmålere.

I stedet for strenge krav til poretrykksmålinger har det norske regelverket høye sikkerhetsfaktorer for stabilitetsberegninger. Bruk av høye sikkerhetsfaktorer ved dimensjonering av dammer gir massive konstruksjoner, som er kostbart og gir en større påkjenning på miljøet enn slankere konstruksjoner. Måling av poretrykket kan tillate bruk av lavere sikkerhetsfaktorer ved dimensjonering av dammer, men også målingene er en kostnad. Dammen må instrumenteres, målingene analyseres og instrumentene kontrolleres jevnlig. Poretrykksmålinger har også en større usikkerhet enn høye sikkerhetsfaktorer, da poretrykket kun kan måles i utvalgte punkter. Slik dagens regelverk er utformet, med høye sikkerhetsfaktorer ved stabilitetsberegninger, er det derfor ikke nødvendig å innføre strengere krav til instrumentering av poretrykk for betongdammer på fjell.

Damsikkerhetsforskriften (2009) gir ingen definisjon av begrepene “godt fjell” og “utpregede svakhetssoner”. Et fundament med få sprekker, altså uten utpregede svakhetssoner, kan være utsatt for oppbygging av høyt poretrykk dersom permeabiliteten er lavere i nedstrøms ende av fundamentet enn i oppstrøms ende. I tillegg kan egenskapene i fundamentet variere langs dammens lengde. Det bør derfor beskrives i Damsikkerhetsforskriften (2009) hvilke krav som stilles for at et damfundament skal anses som godt. Det kan for eksempel være krav til permeabilitet i fundamentet og undersøkelser på damstedet før bygging.

I retningslinjene i Sveits påpekes det at poretrykksmålinger bør gjennomføres for å bruke måledataene til forskning. Dersom det er ønskelig å øke kunnskapen om poretrykk i damfundament for norske forhold er det nødvendig å gjennomføre poretrykksmålinger ved utvalgte norske dammer.

Etterinstrumentering av poretrykk ved norske dammer

Mange eldre dammer oppfyller ikke dagens krav til sikkerhet. Dammene må derfor rehabiliteres slik at de oppfyller kravene i Damsikkerhetsforskriften (2009). En slik rehabilitering kan være kostbar for dameieren.

Et alternativ til rehabilitering, som ikke er mye benyttet i Norge, er å måle poretrykket i damfundamentet for å finne det faktiske poretrykket. Dersom det målte poretrykket er lavere enn teoretisk poretrykk og det tillates å bruke det målte poretrykket i stabilitetsberegninger, vil trolig enkelte dammer oppfylle dagens stabilitetskrav uten rehabilitering.

Etterinstrumentering av poretrykk kan være en løsning for dammer hvor en rehabilitering blir kostbar. Det kan for eksempel være lange dammer der det er kostbart å øke stabiliteten ved bruk av fjellbolter eller spennstag langs hele dammens lengdeakse, som ved Ringedalsdammen. Det kan også være ved dammer som ligger i fjellet og som ikke har anleggsvei.

Et annet godt argument for å ta i bruk etterinstrumentering av poretrykksmålere er miljøgevinsten. Dersom måling av poretrykket kan hindre unødvendige ombygninger av damanlegg sparer det miljøet både ved mindre materialbruk og mindre utslipp fra anleggsmaskiner.

Det er også en usikkerhet knyttet til etterinstrumentering av poretrykksmålere ved at poretrykket i fundamentet kan vise seg å være høyt og at dammen derfor må rehabiliteres allikevel.

I arbeidet med denne oppgaven er Ringedalsdammen den eneste dammen i Norge som er funnet som har etterinstallert poretrykksmålere. Målingene viser at poretrykket er lavere enn verdiene opprinnelig benyttet i stabilitetsberegningene. NVE (1999) tillater derfor dameier å benytte et lavere poretrykksdiagram i stabilitetsberegningene. Dette poretrykksdiagrammet er allikevel en god del høyere enn de målte verdiene.

Som diskutert tidligere i dette delkapittelet er ikke målte verdier av poretrykket representativt for hele damfundamentet. Dersom bruk av målte poretrykksverdier skal brukes ved revurdering av dammer kreves det et omfattende nettverk av poretrykkmålere. Det krever kunnskap om hvilke faktorer som påvirker poretrykket slik at det kan vurderes om de målte verdiene av poretrykket kan benyttes som et grunnlag for hele damfundamentet. Dersom målte verdier av poretrykket skal benyttes i stabilitetsberegninger bør det brukes en høy sikkerhetsfaktor ved beregning av oppdriften.

Kapittel 9

Konklusjon

I denne oppgaven er innvirkningen på poretrykket i et damfundament fra ulike parametere, og det norske regelverket om beregning og måling av poretrykk vurdert. Vurderingene er basert på et internasjonalt litteraturstudie, en analyse av poretrykksmålinger, stabilitetsberegninger og en befaring ved to dammer.

Damfundamentet påvirker i stor grad poretrykket. Et ideelt fundament har lav permeabilitet i oppstrøms ende og høyere permeabilitet i nedstrøms ende. Det vil gi en naturlig drenerende effekt i fundamentet og poretrykket blir dermed lavt. Fundamentets egenskaper varierer ofte langs dammens lengdeakse og dermed varierer også poretrykket. Selv små sprekker som er vanskelig å kartlegge kan ha en stor påvirkning på poretrykket.

Poretrykket i oppstrøms ende av damfundament endres mer direkte ved vannstandendringer enn poretrykket lengre nedstrøms i fundamentet. I analysen av poretrykksmålinger som er gjennomført er det ikke funnet en klar sammenheng mellom når en endring i poretrykket oppstår i forhold til endringen i oppstrøms vannstand. Det skyldes blant annet at poretrykket er registrert ved bruk av standrør, som har treg responstid. Fundamentets permeabilitet påvirker vannets strømningshastighet gjennom fundamentet. Det kan påvirke responstiden for poretrykksendringer ved en vannstandsendring, men tidligere studier er uenige om denne teorien. Det kreves derfor videre studier om temaet, beskrevet under “Anbefalinger til videre arbeid”.

Drenasjesystem har en stor reduserende effekt på poretrykket og er den beste metoden for å redusere poretrykk i et fundament. Inspeksjonsgangen, hvor drenasjehullene bores fra, bør plasseres i oppstrøms ende av dammen og nære fundamentet for størst reduksjon av poretrykket. Injeksjonsskjermer benyttes også til å redusere oppdriften under en dam, men effekten er svært varierende og avhenger mye av utformingen. Injeksjonsskjermer benyttes derfor mer som en ekstra sikkerhet enn som et poretrykksreduserende tiltak.

Det er flere parametere som påvirker poretrykket i et damfundament og noen av dem, som fundamentets egenskaper, kan være vanskelig å fastsette. Retningslinjene i Sverige og Sveits anbefaler derfor å måle poretrykket i damfundamentet. I Norge måles poretrykket i fundamentet ved svært få dammer. I stedet gir regelverket høye sikkerhetsfaktorer som benyttes ved beregning av velte- og glidestabilitet. Bruk av høye sikkerhetsfaktorer gir mer massive konstruksjoner, men sikkerheten er høyere enn ved

slanke konstruksjoner hvor poretrykket måles.

Slik dagens regelverk er utformet, med høye sikkerhetsfaktorer ved stabilitetsberegninger, er det derfor ikke nødvendig å innføre strengere krav til måling av poretrykk i Damsikkerhetsforskriften (2009). Allikevel kan det være nyttig å installere poretrykksmålere ved noen dammer for å benytte de målte verdiene til videre forskning om poretrykk. Et eksempel er dammer med drenasjesystem. Resultatene i denne oppgaven viser at den tillate reduserte verdien av poretrykket i et drenasjeplan er høy. Poretrykksmålinger kan gi en indikasjon på den faktiske reduserende effekten fra drenasjesystem.

I tabell “7-2.2 Instrumentering og måling av dammer” i Damsikkerhetsforskriften (2009) deles behovet for instrumentering av poretrykk i to grupper basert på om dammene er fundamentert på godt eller dårlig fjell. Det er behov for en definisjon av begrepet “godt fjell”. Det kan være spesifikke krav til egenskaper i fundamentet eller krav til undersøkelser på damstedet.

Etterinstrumentering av poretrykksmålere kan være en aktuell løsning for dammer som må rehabiliteres og hvor rehabiliteringen er kostbar. Det kan være ved lange dammer der en øking av stabiliteten ved bruk av fjellbolter eller spennstag krever mye material og tar lang tid. Det kan også være ved dammer som ligger i fjellet og som ikke har anleggsvei inn til dammen.

Dersom etterinstrumentering skal benyttes ved revurderinger kreves det et omfattende nettverk av poretrykksmålere siden poretrykket kan variere mye mellom målepunktene. Det krever også god kunnskap om fundamentets egenskaper slik at det kan vurderes om de målte verdiene kan brukes som et grunnlag for hele damfundamentet. Hvis målte verdier av poretrykket skal benyttes i stabilitetsberegninger ved en rehabilitering bør det benyttes en høy sikkerhetsfaktor ved beregning av oppdriften, siden usikkerheten er stor.

Anbefalinger til videre arbeid

Poretrykksmålingene som er benyttet i denne oppgaven ga ikke nok informasjon til å vurdere responstiden mellom endringer i oppstrøms vannstand og endringer i poretrykket. For å undersøke dette kreves det data i form av hyppige målinger av poretrykk ved vannstandsendringer. Det bør benyttes trykkipiezometre framfor standrør, da trykkipiezometre har rask responstid.

Dersom etterinstrumentering av poretrykk skal benyttes ved rehabilitering av dammer krever det retningslinjer for hvordan det skal gjennomføres. Det må undersøkes nærmere hvor mange tverrsnitt i en dam som bør instrumenteres og hvor representative målingene er for resten av fundamentet, basert på fundamentets egenskaper. Det må også fastsettes hvor stor sikkerhetsfaktor det er fornuftig å benytte ved beregning av oppdriften.

Referanser

- Adam, K. (2014) Fotografi.
- Bell, F. G. (2007) *Engineering Geology*. 2. utg. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd.
- Bell, F. G. (1992) *Engineering in Rock Masses*. 1. utg. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd.
- Casagrande, A. (1961) A control of seepage through foundations and abutments of dams. *Géotechnique* [Internett], 11 (3): 161-182. Tilgjengelig fra: <<http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/geot.1961.11.3.161>> [Nedlasta 27. februar 2014].
- Damsikkerhetsforskriften (2009) *Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg*. Fastsatt ved kgl. res. 18. desember 2009 med hjemmel i lov 24. november 2000 nr. 82 om vannressursloven. Tilgjengelig fra: <<http://www.lovdatab.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20091218-1600.html>> [Nedlasta 22. april 2014].
- Emdal, A. (2009) *Introduksjon til geoteknikk*. Trondheim, Institutt for bygg, anlegg og transport ved NTNU.
- FOWG (2002a) *Sicherheit der Stauanlagen: Basisdokument zur konstruktiven Sicherheit* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/00494/index.html?lang=en&dossier_id=00788> [Nedlasta 18. november 2013].
- FOWG (2002b) *Sicherheit der Stauanlagen: Basisdokument zu Überwachung und Unterhalt* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/00494/index.html?lang=en&dossier_id=00788> [Nedlasta 19. november 2013].
- Gimenes, E. og Fernández, G. (2006) Hydromechanical analysis of flow behavior in concrete gravity dam foundations. *Canadian Geotechnical Journal* [Internett], 43 (3): 244-259. Tilgjengelig fra: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/t05-095#.UwXdGvl5Oa8>> [Nedlasta 20. februar 2014].
- Goodman, R. E. (1999) *Karl Terzaghi: The Engineer as Artist* [Internett]. American Society of Civil Engineers. Tilgjengelig fra: <<http://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784403648>> [Nedlasta 06. juni 2014].
- Google (2014) *Google Maps* [Internett]. Tilgjengelig fra: <<http://maps.google.com>> [Nedlasta 01. mai 2014].
- Grenoble, B. A., Harris, C. W., Meisenheim, J. K. og Morris, D. I. (1995) Influence of rock joint deformations on uplift pressure in concrete gravity dam foundations. *Fractured and Jointed Rock Masses*. (Referert i Westberg, 2009; Westberg, 2010).

- Grøner (2000) *Notat Ringedalsdammen, nr. 1/2000*. Oppdrag 141751, Grøner AS.
- Grøner (1999a) *Dam Ringedalsvatn – Revurdering – Stabilitet*. Oppdrag 141751, Grøner AS.
- Grøner (1999b) *Notat: Dam Ringedalsvatn, Installering av poretrykksmålere*. Oppdrag 141751, Grøner AS.
- Grøner (1984) *Ringedalsdam, tegn. 3131-1011A (Arbeidstegning)*. Ingeniør Chr. F. Grøner AS.
- Guidicini, G. og Andrade, R.M. (1988) Seasonal uplift pressure in hydraulic structure foundation due to environmental thermal variations. *Rock Mechanics and Power Plants*. (Referert i Westberg, 2010).
- Gunleiksrud, S. (2013) *Ny dam Skarsfoss. Planlegging og bygging* [Internett]. Presentasjon på NNCOLDS fagseminar 15.10.2013. Tilgjengelig fra: <http://jarle.nve.no/nncold/index.php?option=com_content&task=view&id=104&Itemid=5> [Nedlasta 19. mai 2014].
- Guttormsen, O. (2006) *TVM4165 Vannkraftverk og vassdragsteknikk. Vassdragsteknikk I*. Trondheim, Tapir akademisk forlag.
- ICOLD (2013a) *Dam Legislation* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://cnpgb.inag.pt/IcoldClub/documents/Legislation_2013/ICOLD%20EurClub%20-Dam%20Legislation%20Report%20-%20March%202013.pdf> [Nedlasta 20. januar 2014].
- ICOLD (2013b) *Dam Surveillance Guide. Bulletin 158 (Preprint)*. International Commission on Large Dams (ICOLD) (utgivelsesdato ukjent, mottatt i 2013).
- ICOLD (2005) *Dam Foundations. Bulletin 129*. International Commission on Large Dams (ICOLD).
- ICOLD (2004a). *Working Group on Sliding Safety of Existing Gravity Dams – Final Report* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://cnpgb.inag.pt/IcoldClub/documents/Sliding_safety_FinalReport.pdf> [Nedlasta 11. februar 2014].
- ICOLD (2004b) *Working Group on Uplift Pressure under Concrete Dams – Final Report* [Internett]. Tilgjengelig fra: <<http://cnpgb.inag.pt/IcoldClub/documents/Uplift%20Pressures%20Final%20Report.pdf>> [Nedlasta 19. november 2013].
- Kittler, J. (2014) Personlig kommunikasjon.
- Leliavsky, L. (1959) Uplift in Gravity Dams, Part 2. *Water Power*. Nov: 419-424.
- LTV (2014) *Talsperre Klingenberg, Plan-Nr.: B-35-72122 (Arbeidstegning)*. Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) (utgivelsesdato ukjent, mottatt i 2014).
- LTV (2011) *Talsperre Klingenberg, Plan-Nr.: Anlage 4.5 (Arbeidstegning)*. Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV).
- LTV (2010). *Talsperre Gottleuba, Plan-Nr.: 1.6.18 (Arbeidstegning)*. Oppdrag 2010D046, Landestalsperrenverwaltung des freistaates Sachsen (LTV).

- LTV (2006). *Vertieft Überprüfung, Talsperre Gottleuba*. Landestalsperrenverwaltung des freistaates Sachsen (LTV).
- MET (2014) *Været som var. Gottleuba, Sachsen (Tyskland)* [Internett]. Meteorologisk institutt (MET) og Norsk rikskringkasting AS (NRK). Tilgjengelig fra: <<http://www.yr.no/sted/Tyskland/Sachsen/Gottleuba/statistikk.html>> [Nedlasta 08. mai 2014].
- Mouvet, L., Müller, R. W. og Pougatsch, H. (2011) *Structural safety of dams, according to the new Swiss legislation* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://infoscience.epfl.ch/record/103481/files/2001-325-GEIRANGER_Paper_Mouvet-M%C3%BCller-Pougatsch.pdf> [Nedlasta 18. november 2013].
- Nilsen, B. og Broch, E. (2011) *Ingeniørgeologi-Berg Grunnkurskompendium*. Trondheim, Institutt for geologi og bergteknikk ved NTNU.
- NVE (7. januar 2010) *Damsikkerhet* [Internett]. Tilgjengelig fra: <<http://www.nve.no/no/Sikkerhet-og-tilsyn1/Damsikkerhet>> [Nedlasta 17. september 2013].
- NVE (2005a) *Retningslinjer for betongdammer til §§ 4.8 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg* [Internett]. Tilgjengelig fra: <<http://www.nve.no/Global/Sikkerhet%20og%20tilsyn/Damsikkerhet/Retningslinjer/Retningslinjer%20for%20betongdammer%20-%20utgave%202.pdf?epslanguage=no>> [Nedlasta 10. september 2013].
- NVE (2005b) *Retningslinjer for overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg til §§ 2-6 og 2-7 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg* [Internett]. Tilgjengelig fra: <<http://www.nve.no/Global/Sikkerhet%20og%20tilsyn/Damsikkerhet/Retningslinjer/Retningslinjer%20for%20overv%C3%A5king%20og%20instrumentering%20-%20utgave%20%E2%80%A6.pdf?epslanguage=no>> [Nedlasta 10. september 2013].
- NVE (2003) *Retningslinjer for laster og dimensjonering til §§ 4-1 og 4-2 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg* [Internett]. Tilgjengelig fra: <<http://www.nve.no/Global/Sikkerhet%20og%20tilsyn/Damsikkerhet/Retningslinjer/Retningslinjer%20for%20laster%20og%20dimensjonering%20-%20utgave%201.pdf?epslanguage=no>> [Nedlasta 10. september 2013].
- NVE (1999) *Dam Ringedalsvatn, Poretrykk i fundament*. Referanse NVE 9903575-2, Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).
- Nynäs, H. (2013) *Dammer som kulturminne* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://webby.nve.no/publikasjoner/rapport/2013/rapport2013_64.pdf> [Nedlasta 16. november 2013].
- Sigmond, E. (2012) *Berggrunnen i Norge*. Trondheim, Norges geologiske undersøkelse.
- Spross, J., Johansson, F. og Larsson, S. (2014) On the use of pore pressure measurements in safety reassessments of concrete dams founded on rock. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* [Internett], 8 (2): 117-128. Tilgjengelig fra: <<http://dx.doi.org/10.1080/17499518.2013.864172>> [Nedlasta 14. februar 2014].

- Statkraft Grøner (2003) *Notat Ringedalsdammen, okt. 2003*. Oppdrag 122340, Statkraft Grøner AS.
- Strassburger, A. G. (1989) *Uplift Pressure in Existing Concrete Dams*. Final report, research project 1745-27 for Electric Power Research Institute.
- Svensk Energi (2011) *RIDAS, Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, Avsnitt 7.3: Betongdammar, tillämpningsvägledning*. Svensk Energi.
- Sweco (2013) *Notat Ringedalsdammen, nr. 1/2013*. Oppdrag 166170, Sweco Norge AS.
- Sweco (2011) *Kjårdadammen, revurdering 2007, rapport nr.: 157000-02*. Oppdrag 157000, Sweco Norge AS.
- Verbund (2013) *Großer Mühdorfer See. Bericht über das Verhalten der Sperre. Berichtszeitraum 1.1.2012 – 31.12.2012*. Verbund Hydro Power AG.
- Verruijt, A. (1982) *Theory of Groundwater Flow*. 2. utg. London, The Macmillan Press Ltd.
- Westberg, M. (2010) *Reliability-based Assessment of Concrete Dam Stability* [Internett]. Akademisk avhandling, Lund Universitet. Tilgjengelig fra: <<http://www.lu.se/lup/publication/1566775>> [Nedlasta 14. februar 2014]
- Westberg, M. (2009) Geostatistical approach for statistical description of uplift pressures, Part I. *Dam Engineering*, 19 (3).
- Westby, L. K. (2014) Personlig kommunikasjon.

Vedlegg

Vedlegg A

Befaringsrapport

Marie Rognes

Dam Klingenberg og Dam Gottleuba

Befaring 31. mars 2014

Trondheim, 05.14.2014

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi

Institutt for vann- og miljøteknikk



Innhold

1 Innledning	3
1.1 Beliggenhet	4
2 Dam Klingenberg	5
2.1 Beskrivelse av dammen	5
2.2 Poretrykksmålinger	7
2.3 Bilder fra befaringen	7
3 Dam Gottleuba	11
3.1 Beskrivelse av dammen	11
3.2 Poretrykksmålinger	13
3.3 Bilder fra befaringen	13
Referanser	18

Kapittel 1

Innledning

Den 31. mars 2014 ble det gjennomført en befaring av dammer i Sachsen i Tyskland. Flere dammer ble besøkt i løpet av befaringen, men kun dam Klingenberg og dam Gottleuba hadde en mer omfattende omvisning. Derfor er kun befaringen ved disse dammene beskrevet videre i rapporten, i henholdsvis kapittel 2 og 3. Kapitlene tar for seg informasjon om dammene som ble innhentet i løpet av befaringen og et møte i ettertid (1. april 2014), samt bilder fra befaringen.

Befaringen er gjennomført i forbindelse med masteroppgaven “Poretrykk under betongdammer fundamentert på fjell” for Institutt for vann- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Reisekostnader er dekket av stipend fra Den norske damkomité.

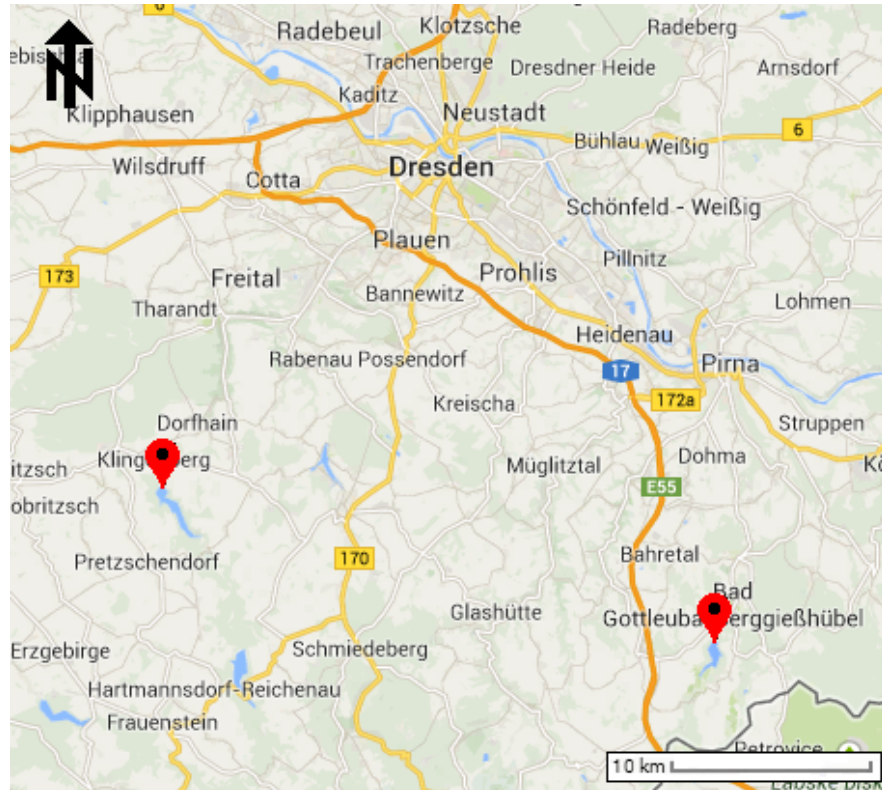
Befaringen ble arrangert og ledet av Jan Kittler i enheten for teknisk tilsyn i Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV), som er Sachsens statlige administrasjon av demningene i delstaten.

Følgende personer deltok på befaringen:

- Jan Kittler, LTV
- Karel Adam, doktorgradsstudent ved Brno University of Technology
- Marie Rognes, masterstudent ved NTNU

1.1 Beliggenhet

Dam Klingenberg og Dam Gottleuba ligger i Sachsen i Tyskland. Plasseringen er vist på kartet i figur 1.1. Dam Klingenberg er vest på kartet og Dam Gottleuba øst på kartet.



Figur 1.1: Plassering av Dam Klingenberg og Dam Gottleuba (Google, 2014)

Kapittel 2

Dam Klingenberg

Dam Klingenberg er en gravitasjonsdam bygget i 1908-1914. I 2005-2013 ble dammen rehabilitert som følge av skader fra en storflom i 2002.

Hovedformålet med dammen er drikkevannsforsyning og flombeskyttelse. Magasinet er nesten alltid fullt for å kunne brukes til drikkevann. En mindre dam er plassert noen kilometer oppstrøms dam Klingenberg. Den har nesten alltid tomt magasin og kan dermed ta unna flomhendelser uten at drikkevannet i magasinet til dam Klingenberg forurenses med flomvann.

2.1 Beskrivelse av dammen

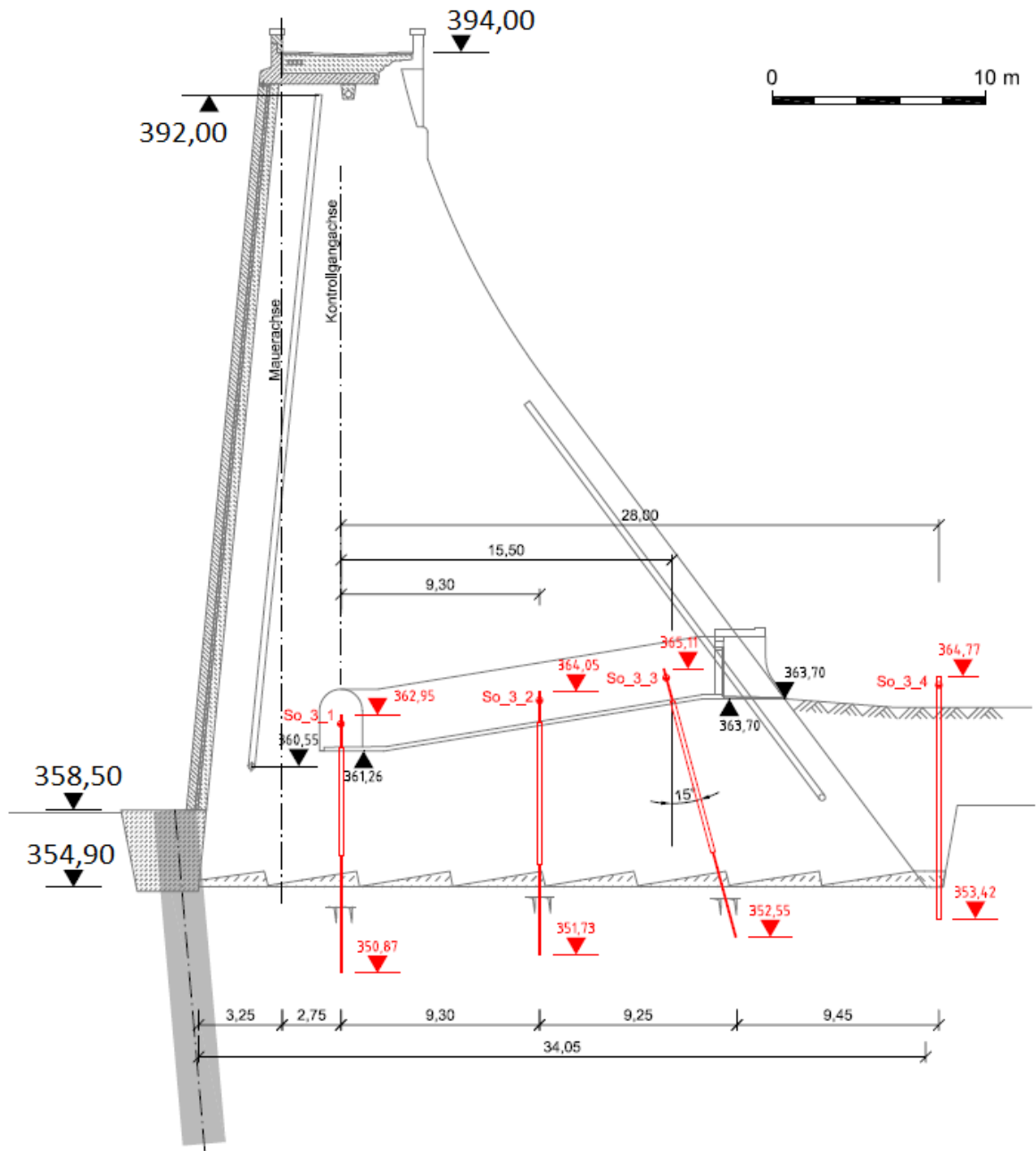
Dam Klingenberg har en maksimal høyde på 40 m og en lengde på 310 m. Det er en gravitasjonsdam av naturstein. Dammens tverrsnitt med tilhørende måleinstrument for poretrykket er vist i figur 2.1.

Ved rehabiliteringen har dammen fått en ny oppstrøms vegg utenpå den opprinnelige konstruksjonen. Veggen består først av et lag murstein utenpå den opprinnelige konstruksjonen. Dette laget er ment til å drenere oppstrøms damside, slik at alt vann som siger inn i dammen føres ned gjennom drenasjelaget og ut via inspeksjonsgangen. Utenpå det drenerende laget er det et vanntett sjikt, bl.a. av vanntett betong.

En ny inspeksjonsgang ble sprengt ut i dammen under rehabiliteringen. Sprengingen ble gjennomført med full vannstand i magasinet. Inspeksjonsgangen er nokså stor, ca. 6 m² i tverrsnitt. Inspeksjonsgangen ble sprengt ut for å kunne installere poretrykksmålere i fundamentet. En annen grunn var også muligheten til å kunne injisere fundamentet dersom det viser seg å være nødvendig. På grunn av godt materiale i dammen er det ikke gjort noe med overflaten i inspeksjonsgangen.

Dammen har ingen injeksjonsskjerm for å minke lekkasje gjennom fundamentet. Det er kun en kort injeksjonsskjerm i oppstrøms ende av dammen. Denne er installert av konstruksjonsmessige årsaker for å feste den nye oppstrøms veggen til fundamentet.

Dammen er drenert ved den nye oppstrøms veggen. Fundamentet er ikke drenert.



Figur 2.1: Tverrsnitt av dam Klingenberg med plassering av måleinstrument for poretrykk (LTV, 2011)

Fundamentet består hovedsakelig av gneis, og er ansett som godt. Under den midterste delen av dammen var fundamentet noe mer oppsprukket enn på resten av damstedet. Ved bygging av dammen måtte det derfor graves ca. 7 meter dypere enn planlagt i 20 meters lengde langs dammens akse.

2.2 Poretrykksmålinger

I 1970 ble det installert én rad med poretrykksmålere i midten av dammen. Ved rehabiliteringen ble det installert flere rader, boret ned fra inspeksjonsgangen. Hullene er boret et par meter ned i fundamentet for å øke sannsynligheten for at en sprekk i fundamentet er truffet av borehullet.

Poretrykksmålinger foregår manuelt en gang i måneden ved 19 målepunkt. I noen kortere perioder har det også vært gjennomført automatiske avlesninger. Avlesningene har en nøyaktighet på 2 cm.

Poretrykksmålerne består av et standrør i metall installert i et borehull fra inspeksjonsgangen ned gjennom dammen og noen meter ned i fundamentet. Vannstanden i røret endrer seg etter poretrykket i grunnen. Dersom trykkehøyden fra poretrykket i fundamentet på målepunktet er lavere enn lengden på standrøret kan poretrykket beregnes ut fra vannstanden i standrøret. Dersom trykkehøyden er større enn lengden på standrøret er det installert trykkmålere i standrøret og et meter øverst på standrøret som viser trykkehøyden over standrøret. Trykket måles i bar, hvor 1 bar tilsvarer omtrent 10 meter i trykkehøyde. Meterne kan enkelt flyttes fra standrør til standrør. Kun i standrørene hvor det er fare for at poretrykket gir en trykkehøyde større enn standrørets lengde er det installert trykkmålere i standrøret og meter i standrørets ende.

2.3 Bilder fra befaringen

Videre følger noen bilder fra befaringen.



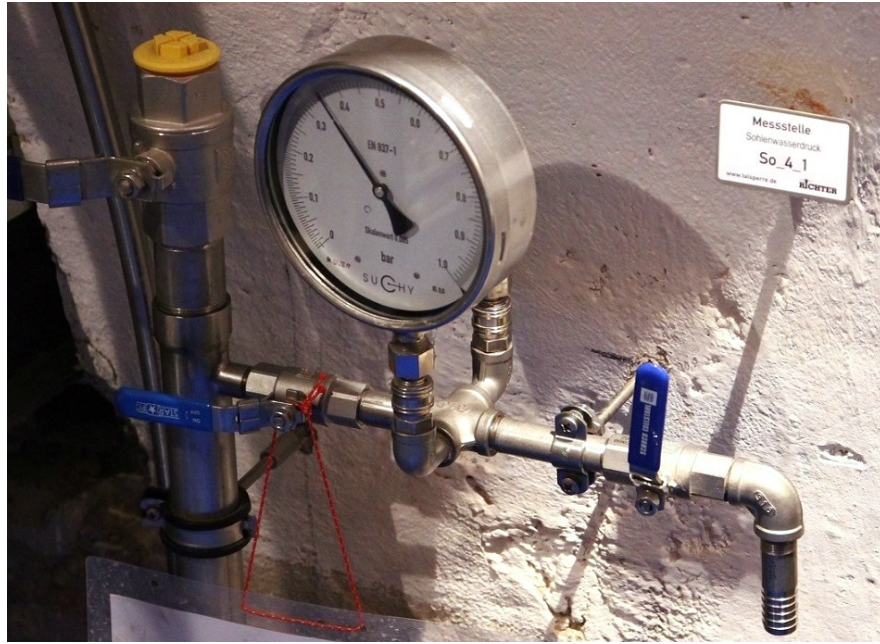
Figur 2.2: Nedstrøms side av dam Klingenberg sett fra venstre vederlag (Adam, 2014)



Figur 2.3: Modell av ny oppstrøms vegg



Figur 2.4: Inspeksjonsgang (Adam, 2014)



Figur 2.5: Topp av standrør med meter plassert i inspeksjonsgangen (Adam, 2014)



Figur 2.6: Topp av standrør uten meter plassert nedstrøms dammen

Kapittel 3

Dam Gottleuba

Dam Gottleuba er en gravitasjonsdam av betong bygget i 1965-1974.

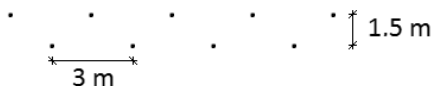
Dammen brukes hovedsakelig til flombeskyttelse. Den har kun én turbin som produserer ca. 7,5 kW til enhver tid. Vannføringen gjennom turbinen er en pålagt minstevannføring.

3.1 Beskrivelse av dammen

Dam Gottleuba har en maksimal høyde på ca. 57 m og en lengde på ca. 330 m. Det er en gravitasjonsdam av betong. Dammens tverrsnitt med tilhørende måleinstrument for poretrykket er vist i figur 3.2.

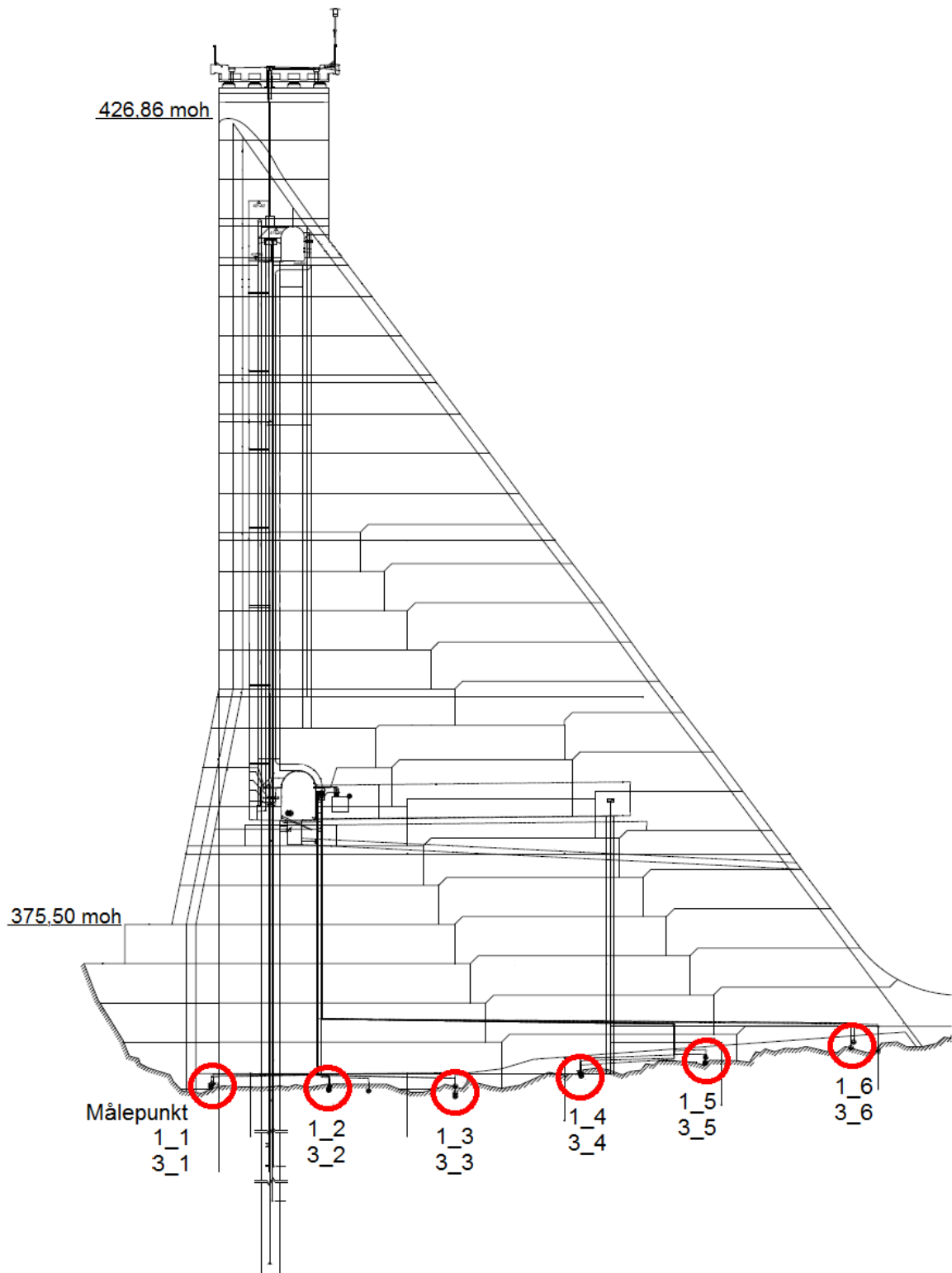
Dammen har en inspeksjonsgang fra byggingen av dammen. Inspeksjonsgangen fortsetter et par meter inn i dammens vederlag slik at det er mulig å se fjellet dammen er fundamentert på.

Dammens fundament er injisert i oppstrøms ende av dammen. Injiseringen ble gjennomført ved bygging av dammen og det har ikke vært utført etterinjisering. Injiseringen består av to rader med 1,5 meters avstand. Det er 3 meter mellom hvert injeksjonshull. De to radene er forskjøvet i forhold til hverandre som vist i figur 3.1. I den høyeste delen av dammen er dammens fot på rundt 365 moh. De to injeksjonsskjermene går ned til 348 moh. og 338 moh., som tilsvarer en lengde på ca. 17 og 27 meter. Allerede ved første fylling av dammen var det mistanke om en feil ved injeksjonsskjermen i den høyeste delen av dammen da høye poretrykk ble registrert her.



Figur 3.1: Skisse av injeksjonsskjermen

I 1981 ble det boret 12 drenasjehull i den høyeste delen av dammen. Dette ble gjennomført på grunn av mistanke om feil i injeksjonsskjermen. Hullene ble boret fra inspeksjonsgangen og omtrent 10 meter ned i fundamentet. De er boret på skrå mot



Figur 3.2: Tverrsnitt av dam Gottleuba med plassering av måleinstrument for poretrykk (LTV, 2010)

oppstrøms side av dammen. I 2000 ble ytterligere 5 hull boret i samme del av dammen på grunn av høyt poretrykk. I løpet av dammens driftstid har drenasjehullene blitt holdt både åpne og lukket, slik at påvirkningen på poretrykket kan vurderes.

Det er ikke utført vedlikehold av drenasjesystemet. Dameier mener det ikke er nødvendig da systemet er utformet slik at luft ikke slipper til i drenasjerørene og dermed er ikke sedimentering i rørene et problem. Mengden vann som kommer ut av drenasjesystemet blir målt, og dette vannet luktet tydelig av svovel som kan tyde på at oppløste stoffer i vannet ikke sedimenteres i drenasjerørene.

Fundamentet på damsteder består hovedsakelig av gneis, og det er ikke ansett som et særlig godt fundament da det har noen store sprekker. På dammens venstre vederlag måtte det graves ut dypere enn planlagt i ca. 20 meters lengde langs dammens akse på grunn av dårlig fjell.

3.2 Poretrykksmålinger

Poretrykksmålere ble installert ved bygging av dammen. Poretrykket er målt i flata mellom dammen og fundamentet. Stedene som ble valgt for måling hadde tydelige sprekker i fundamentet.

Dammen er utstyrt med 51 målepunkt med automatisk avlesning og 218 målepunkt for manuell avlesning av poretrykket. De manuelle målingene blir foretatt omtrent en gang i måneden. De automatiske avlesningene har en nøyaktighet på 1 cm og de manuelle en nøyaktighet på 5 cm.

Poretrykksmålerne ble bygget som vist i figur 3.3 og 3.4. En slags “potte” er satt opp ned med rør gående fra potta til inspeksjonsgangen. Rørene er bøyd helt nede ved fundamentet og dermed ført vertikalt opp i inspeksjonsgangen slik at flere rør fra ulike målepunkt kommer opp på samme sted i inspeksjonsgangen. Rørene er bøyd helt nede ved fundamentet for at vannstanden i rørene skal kunne måles manuelt fra inspeksjonsgangen ved å bruke en målestav ned i rørene.

3.3 Bilder fra befaringen

Videre følger noen bilder fra befaringen.



Figur 3.3: Opp ned “potte” over målepunkt (LTV, 2006)



Figur 3.4: Avbøyning av rør ved fundamentet slik at flere rør går samlet vertikalt opp til inspeksjonsgangen (LTV, 2006)



Figur 3.5: Nedstrøms side av dam Gottleuba sett fra høyre vederlag (Adam, 2014)



Figur 3.6: Drenasjerør (Adam, 2014)



Figur 3.7: Topp av standrør med meter plassert i inspeksjonsgangen



Figur 3.8: Inspeksjonsgang med drenasjesystem (Adam, 2014)

Referanser

Adam, K. (2014) Fotografi.

Google (2014). *Google Maps* [Internett]. Tilgjengelig fra: <<http://maps.google.com>> [Nedlasta 03. april 2014].

LTV (2010). *Detailplan Feld 17 (Arbeidstegning)*. Landestalsperrenverwaltung des freistaates Sachsen (LTV).

LTV (2006). *Vertiefte Überprüfung, Talsperre Gottleuba*. Landestalsperrenverwaltung des freistaates Sachsen (LTV).

LTV (2001). *Bauwerksüberwachung weitere Messquerschnitte SWD (Arbeidstegning)*. Landestalsperrenverwaltung des freistaates Sachsen (LTV).

Vedlegg B

Håndtering av poretrykk



Figur B.1: Plassering av dam Großmühlbacher See (Google, 2014)

Dato: 14. februar 2014 kl. 13.10

Emne: Masteroppgave om poretrykk. Dam Skarsfoss.

Fra: Westby, Lars Kristian <Lars.Kristian.Westby@norconsult.com>

Til: Rognes, Marie <mar.rognes@gmail.com>

Kopi: Gunleiksrud, Stein <Stein.Gunleiksrud@hydro.com>

Hei Marie

Her kommer svarene på dine spørsmål vedr. dam Skarsfoss:

1) Det ble ikke vurdert å gjennomføre poretrykksmålinger ved dam Skarsfoss, pga det er godt berg i damfundamentet og utført injeksjonsskjerm langs dammen. Dammen er plassert 20-25 m nedstrøms eksisterende dam. Berget i damfundamentet består av metabasalt og metatuff.

Bergoverflaten ble rensket for alt løst berg og bommepartier før støp. Langs oppstrøms del av dammen ble det utført systematisk dypinjeksjon av fundamentet i hele damlengden, samt kontaktinjeksjon mellom berg og betong.

2) Vi har beregnet poretrykket iht. retningslinjene for betongdammer. Det er beregnet fullt oppstrøms poretrykk i strekksonen. I trykksonen regnes poretrykket lineært avtagende til nedstrøms vanntrykk.

Dam Skarsfoss

HRV: 857,10

Q1000: 858,57

PMF: 859,61

Du kan bruke denne mail som referanse.

Om du har flere spørsmål eller om noe er uklart så ta gjerne kontakt.

God helg og lykke til med oppgaven.

Lars Kristian Westby

Sivilingeniør Vannkraft

Dir: +47 67 57 14 63 | Mob: +47 45 40 14 63

lars.kristian.westby@norconsult.com

Norconsult AS, Postboks 626, 1303 Sandvika

Vestfjordgaten 4, 1338 Sandvika

Tel: +47 67 57 10 00 | Fax: +47 67 54 45 76

www.norconsult.no

CONFIDENTIALITY AND DISCLAIMER NOTICE: This message is for the sole use of the intended recipients and may contain confidential information. If you are not an intended recipient, you are requested to notify the sender by reply e-mail and destroy all copies of the original message. Any unauthorized review, use, disclosure or distribution is prohibited. While the sender has taken reasonable precautions to minimize the risk of viruses, we cannot warrant the absence of, or accept liability for, any such viruses in this message or any attachment.

Vedlegg C

Analyse av poretrykksmålinger

I dette vedlegget finnes alle verdier og perioder benyttet ved analysen av poretrykksmålinger samt alle de analyserte tverrsnittene.

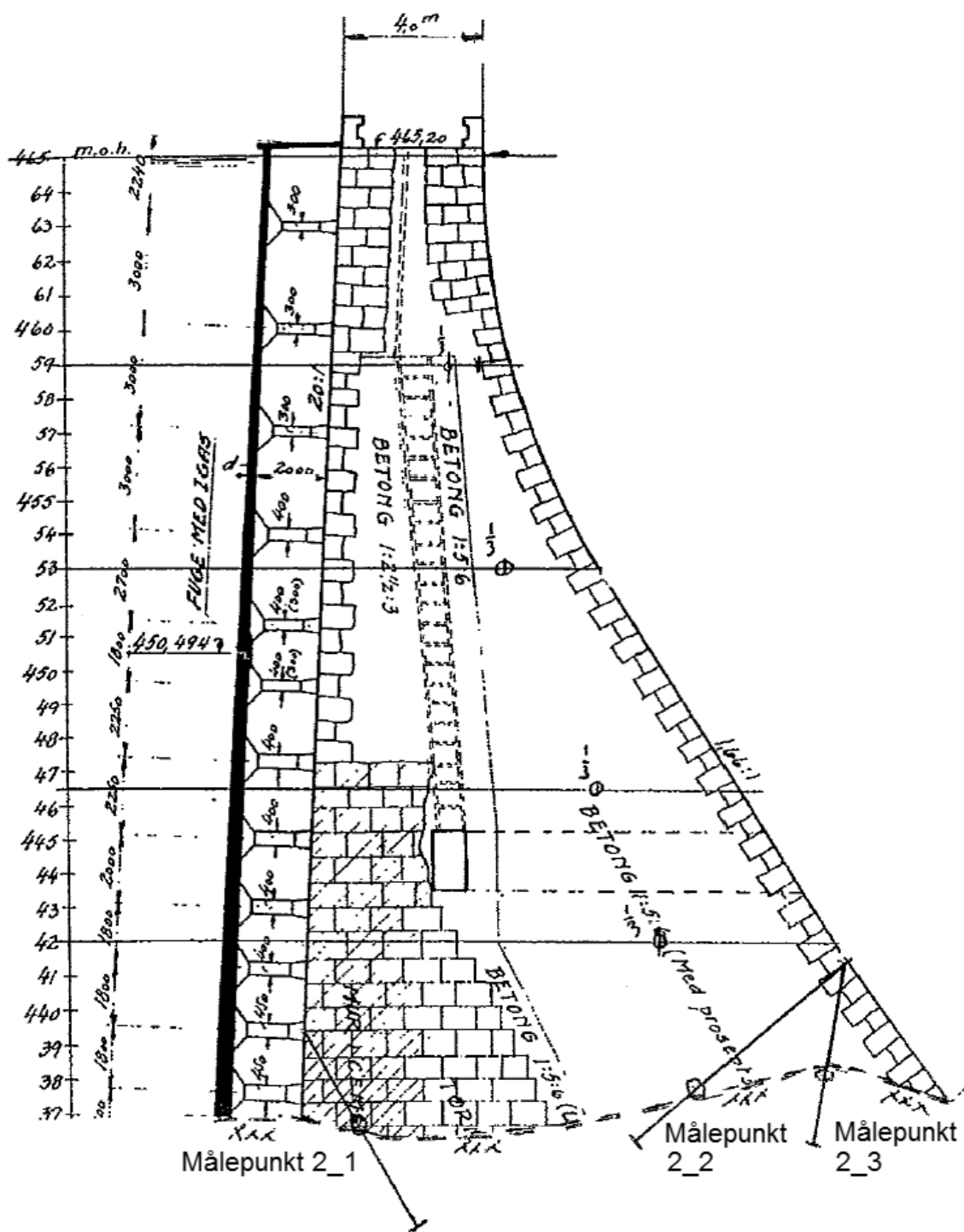
C.1 Ringedalsdammen

Tabell C.1: Plassering av målepunkter og oppstrøms/nedstrøms damtå (Statkraft Grøner, 2003)

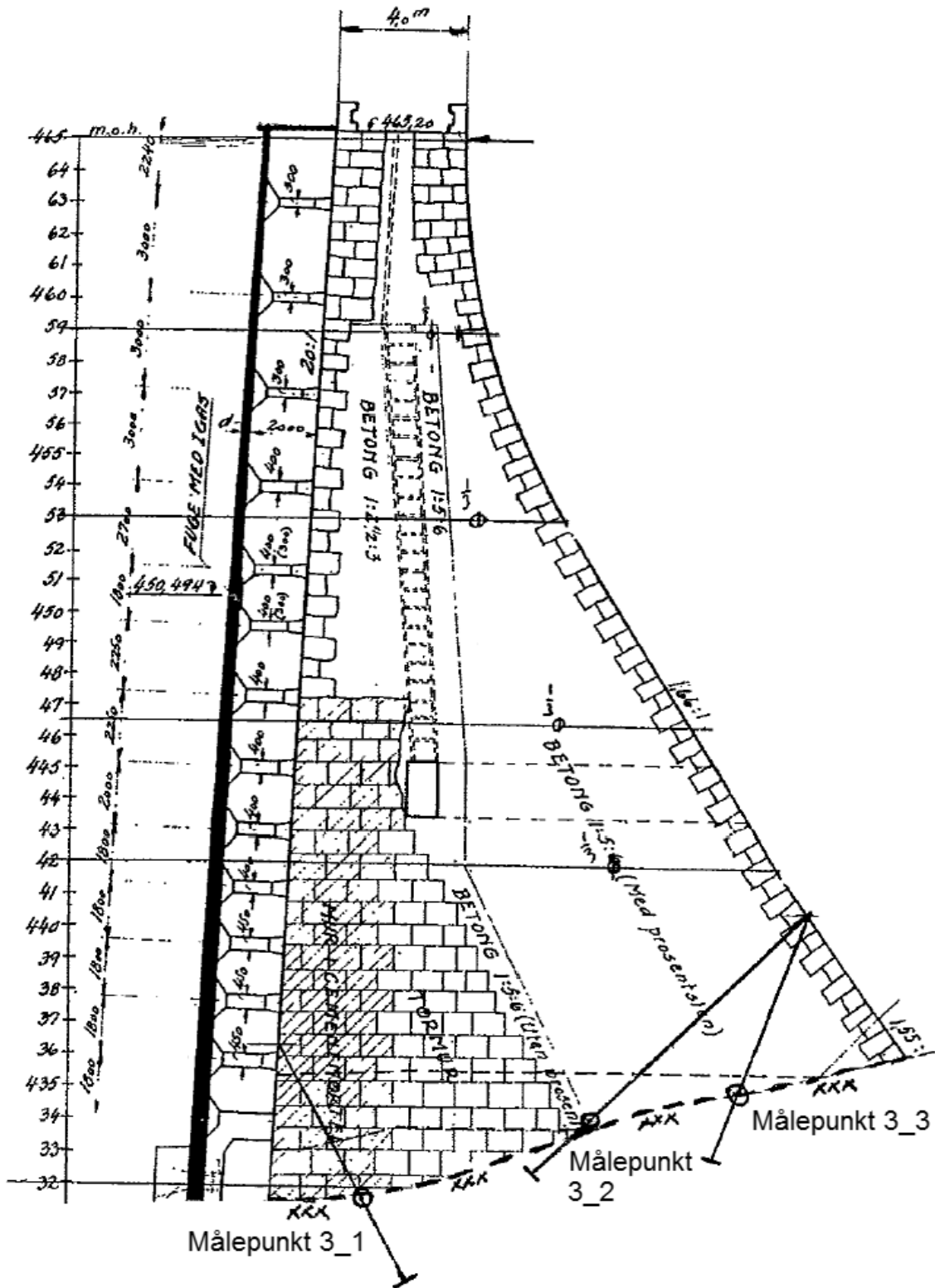
	Målepunkt	Avstand oppstrøms damtå [m]	Avstand oppstrøms damtå [%]	Høyde [moh.]
Snitt 1	Oppstrøms	0,0	0 %	438,0
	1_1	1,8	12 %	437,5
	1_2	7,9	51 %	441,0
	1_3	12,2	79 %	440,5
	Nedstrøms	15,4	100 %	442,0
Snitt 2	Oppstrøms	0,0	0 %	437,0
	2_1	1,7	9 %	437,0
	2_2	11,3	60 %	437,5
	2_3	15,1	80 %	438,0
	Nedstrøms	18,8	100 %	437,0
Snitt 3	Oppstrøms	0,0	0 %	431,5
	3_1	2,9	15 %	432,0
	3_2	9,7	50 %	434,0
	3_3	14,3	74 %	435,0
	Nedstrøms	19,4	100 %	436,0

Tabell C.2: Perioder benyttet i analysen av poretrykksmålinger

Analyse	Periode
Vannstandsending	01/2012-12/2012
Temperaturendring	-
Konstruktive tiltak	Uke 30-50/2012



Figur C.2: Snitt 2 med poretrykksmålere (Statkraft Grøner, 2003)



Figur C.3: Snitt 3 med poretrykksmålere (Statkraft Grøner, 2003)

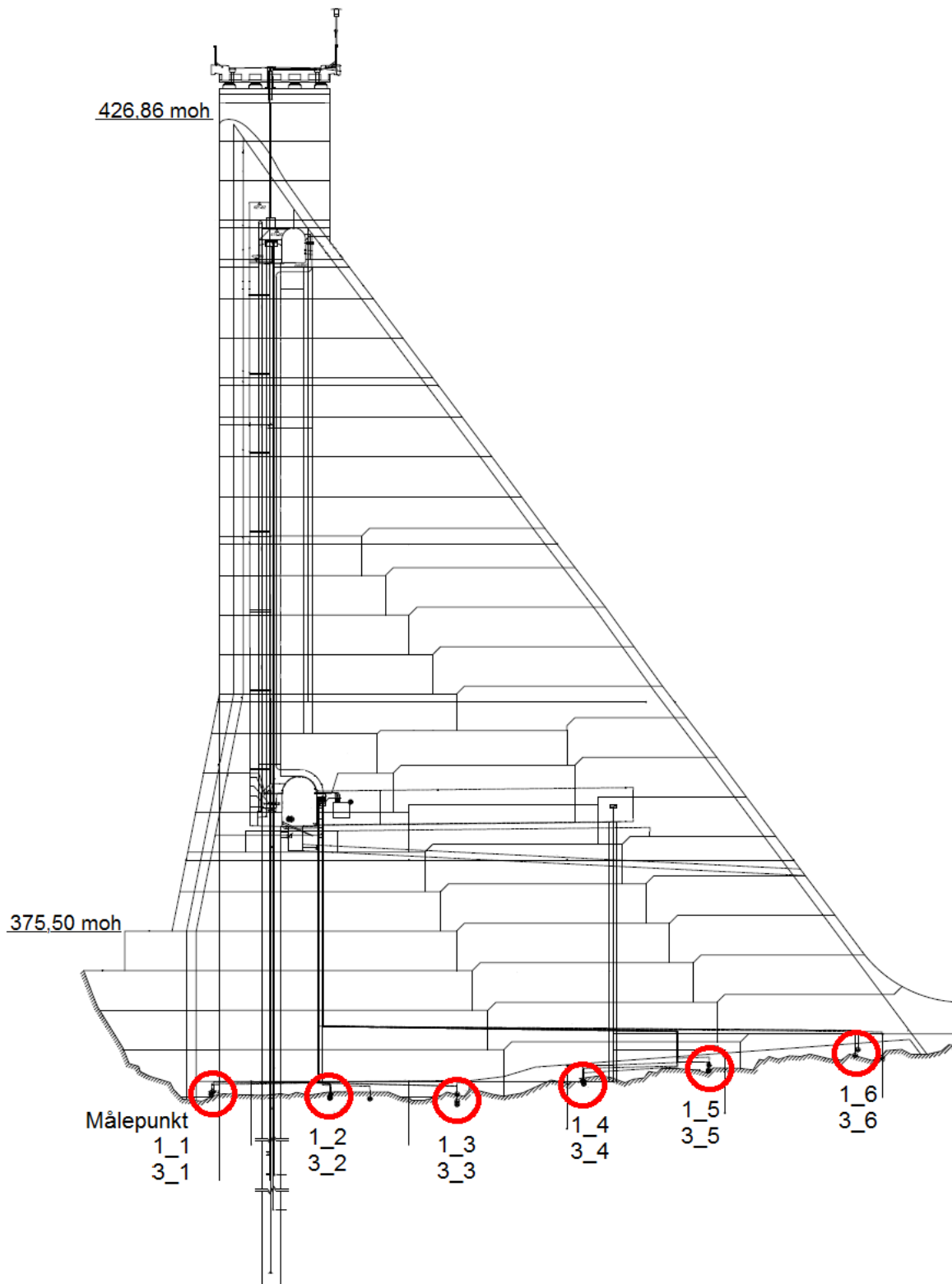
C.2 Dam Gottleuba

Tabell C.3: Plassering av målepunkter for blokk 17 for begge snitt og oppstrøms/nedstrøms damtå (LTV, 2010)

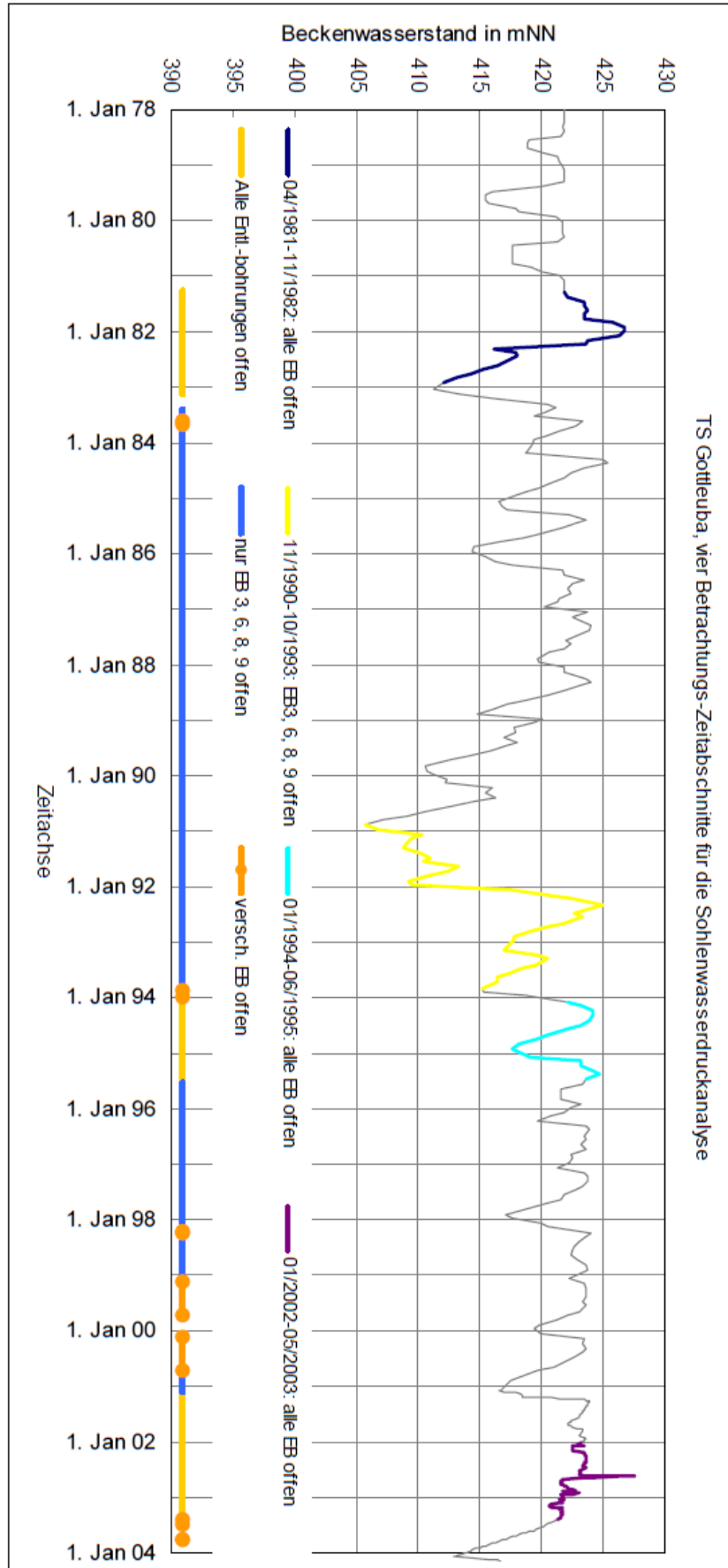
	Målepunkt	Avstand oppstrøms damtå [m]	Avstand oppstrøms damtå [%]	Høyde [moh.]
Snitt 1	Oppstrøms	0,0	0 %	373,0
	1_1	8,2	15 %	365,3
	1_2	15,9	29 %	365,0
	1_3	24,0	44 %	365,2
	1_4	32,1	59 %	366,0
	1_5	40,2	73 %	366,7
	1_6	49,8	91 %	368,0
	Nedstrøms	54,9	100 %	368,0
Snitt 3	Oppstrøms	0	0,0 %	373,0
	3_1	8,4	15 %	365,4
	3_2	15,9	29 %	365,2
	3_3	24,0	44 %	364,5
	3_4	32,2	59 %	366,0
	3_5	40,2	73 %	366,7
	3_6	49,6	90 %	367,6
	Nedstrøms	54,9	100 %	368,0

Tabell C.4: Perioder benyttet i analysen av poretrykksmålinger

Analyse	Periode
Vannstandsending	12/1981-02/1983
	11/1990-05/1992
Temperaturlending	01/1981-12/1983
	01/2011-12/2013
Konstruktive tiltak	01/1981-12/1983
	01/2011-12/2013
Drenasjesystem	04/1981-11/1982: Alle 12 drenasjerørene er åpne
	04/1981-11/1982: Alle 12 drenasjerørene er åpne
	01/2011-12/2013: Alle 17 drenasjerør er antatt åpne



Figur C.4: Tverrsnitt av blokk 17 (LTV, 2010)



Figur C.5: Oversikt over åpning/lukking av dreneriserør (LTV, 2006)

C.3 Dam Klingenberg

Tabell C.5 viser plasseringene av målepunktene ved dam Klingenberg. Tabell C.6 viser plasseringen av punktene på flata mellom dam og fundament. Poretrykket er omregnet fra verdier i målepunktene til punktene i kontaktflata.

Tabell C.5: Plassering av målepunkter for begge snitt og oppstrøms damtå. Målepunkt So_X_4 er ved nedstrøms damtå (LTV, 2011)

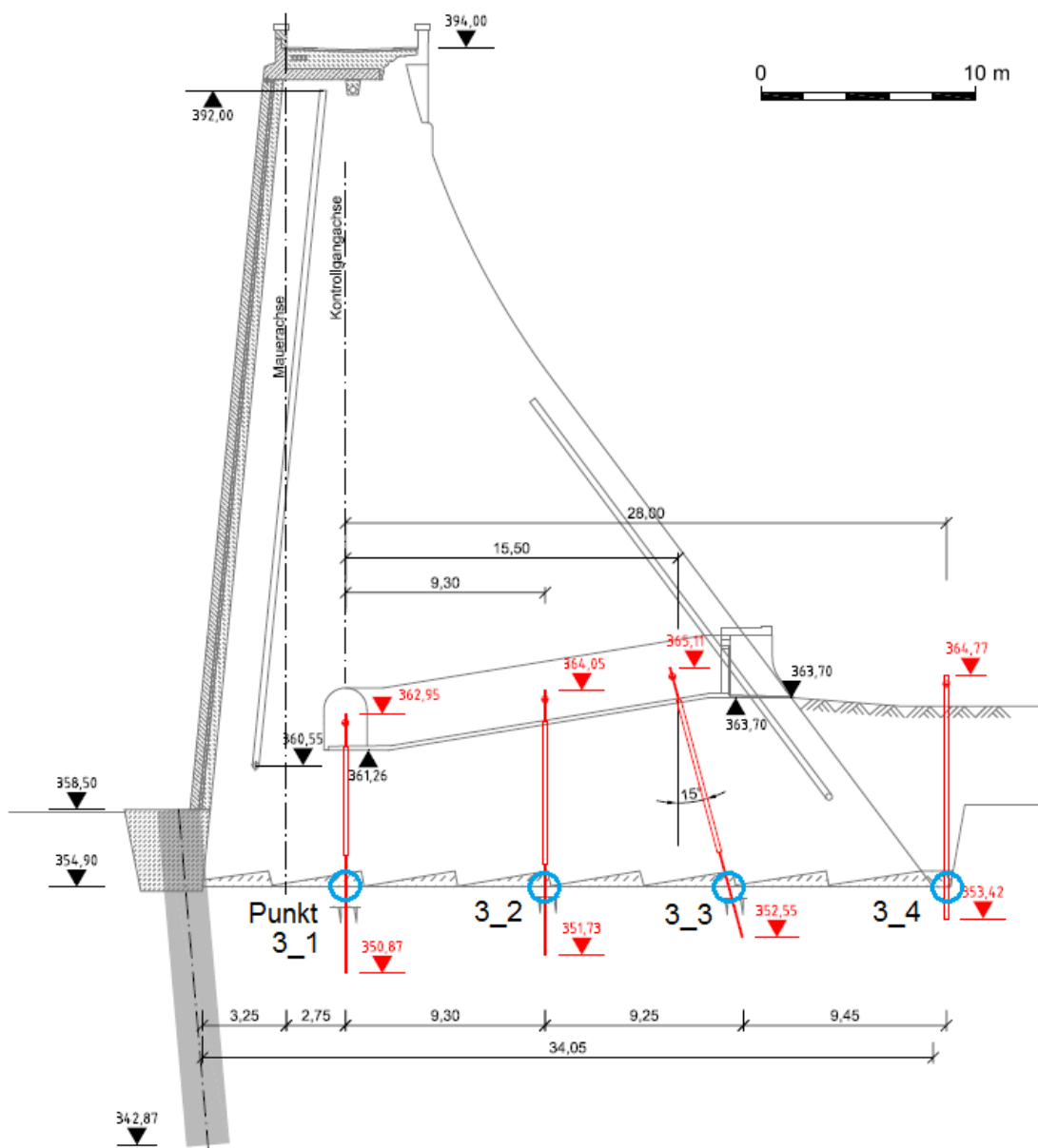
	Målepunkt	Avstand oppstrøms damtå [m]	Avstand oppstrøms damtå [%]	Høyde [moh.]
Snitt 3	Oppstrøms	0,0	0 %	358,5
	So_3_1	8,8	24 %	350,9
	So_3_2	18,1	49 %	351,7
	So_3_3	27,3	74 %	352,6
	So_3_4	36,8	100 %	353,4
Snitt 5	Oppstrøms	0,0	0 %	358,5
	So_5_1	8,8	24 %	352,8
	So_5_2	18,1	49 %	351,7
	So_5_3	27,2	74 %	352,9
	So_5_4	36,8	100 %	353,5

Tabell C.6: Plassering av punkter i kontaktflata for begge snitt. Målepunkt X_4 er ved nedstrøms damtå

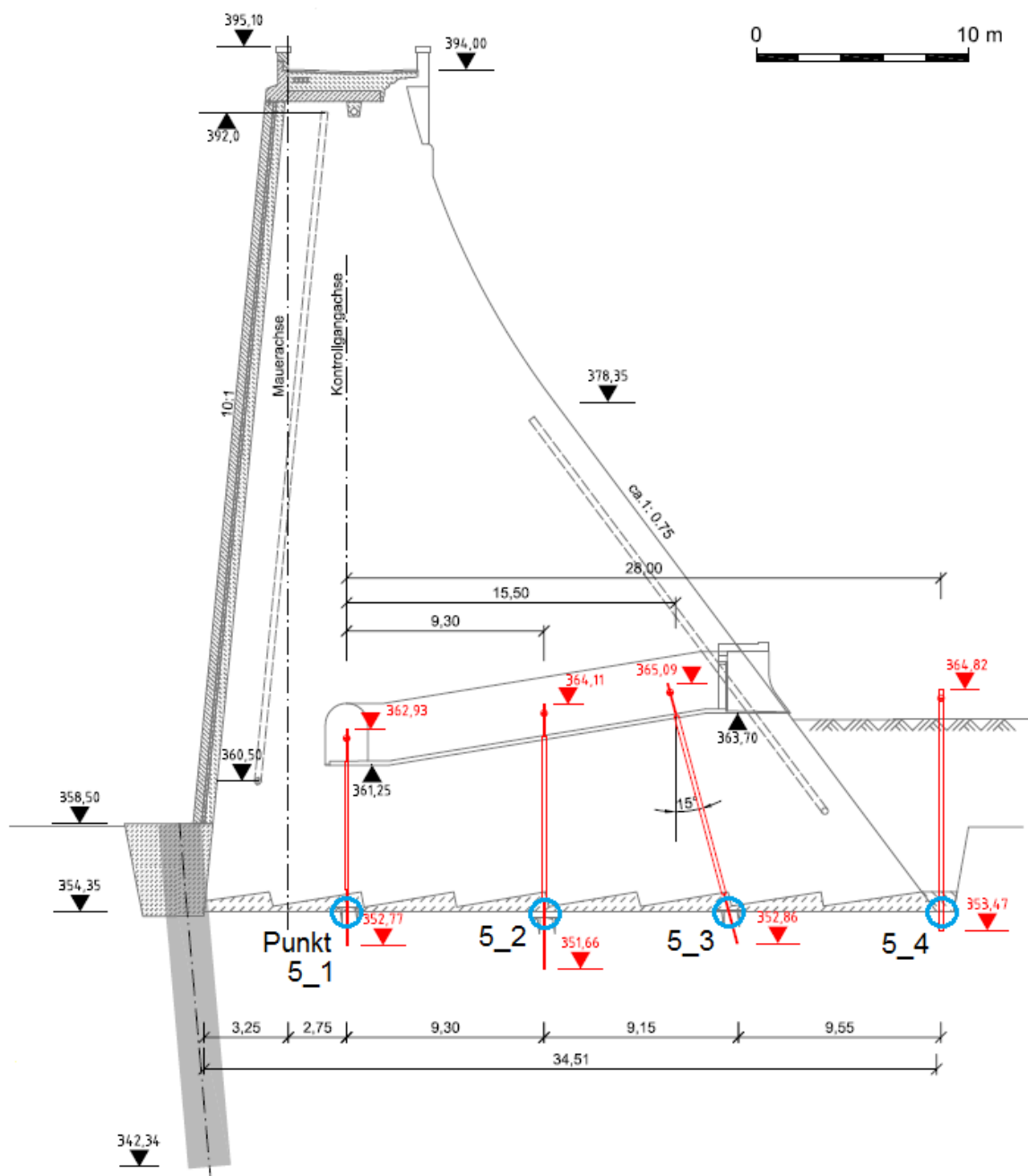
	Punkt	Avstand oppstrøms damtå [m]	Avstand oppstrøms damtå [%]	Høyde [moh.]
Snitt 3	Oppstrøms	0,0	0 %	354,9
	3_1	8,8	24 %	354,9
	3_2	18,1	49 %	354,9
	3_3	27,3	74 %	354,9
	3_4	36,8	100 %	354,9
Snitt 5	Oppstrøms	0,0	0 %	354,4
	5_1	8,8	24 %	354,4
	5_2	18,1	49 %	354,4
	5_3	27,2	74 %	354,4
	5_4	36,8	100 %	354,4

Tabell C.7: Perioder benyttet i analysen av poretrykksmålinger

Analyse	Periode
Vannstandsending	06/2009-12/2009 12/2011-03/2012
Temperaturendring	07/2007-02/2009 04/2012-01/2014
Konstruktive tiltak	07/2007-02/2009 04/2012-01/2014



Figur C.6: Tverrsnitt 3 (LTV, 2011)



Figur C.7: Tverrsnitt 5 (LTV, 2011)

C.3.1 Omregning av poretrykksmålinger

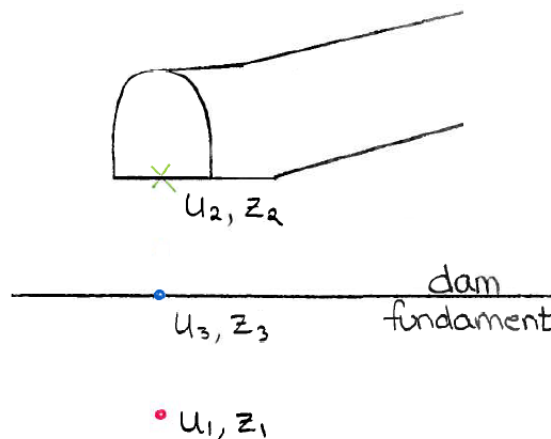
I 2005-2013 ble dam Klingenberg rehabilitert. Det ble installert poretrykksmålere i dammens fundament. Fra inspeksjonsgangen ble det boret hull gjennom dammen og ned i fundamentet. For å øke sannsynligheten for å treffe en sprekk i fundamentet ble borehullene ført et par meter ned i fundamentet (Kittler, 2014). Dataene fra poretrykksmålingene må derfor omregnes til poretrykksverdier for flata mellom dammen og fundamentet.

Det er sett på to alternativ for å omregne poretrykksmålingene.

Alternativ 1

I det første alternativet forutsettes det at permeabiliteten i dammen og fundamentet er lik. Poretrykket i målepunktet, u_1 , er kjent og poretrykket i inspeksjonsgangen, $u_2 = 0$, er kjent. Siden permeabiliteten er lik hele veien mellom de to punktene vil poretrykket avta lineært. Poretrykket i flata mellom dammen og fundamentet, u_3 , blir derfor som vist i ligning (C.1). Figur C.8 illustrerer eksempelet.

$$u_3 = \frac{z_2 - z_3}{z_2 - z_1} * (u_1 - u_2) \quad (\text{C.1})$$



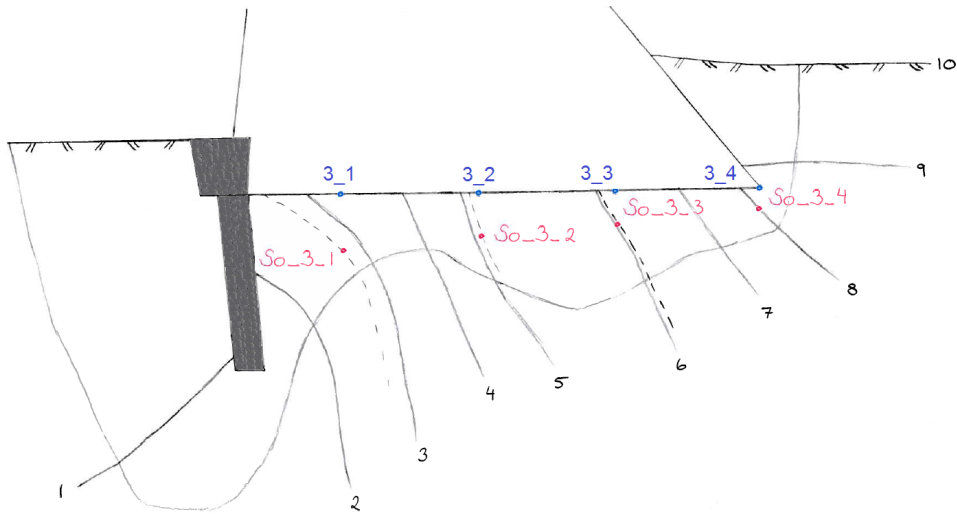
Figur C.8: Illustrasjon av alternativ 1

Verdiene benyttet i alternativ 1 er vist i tabell C.8.

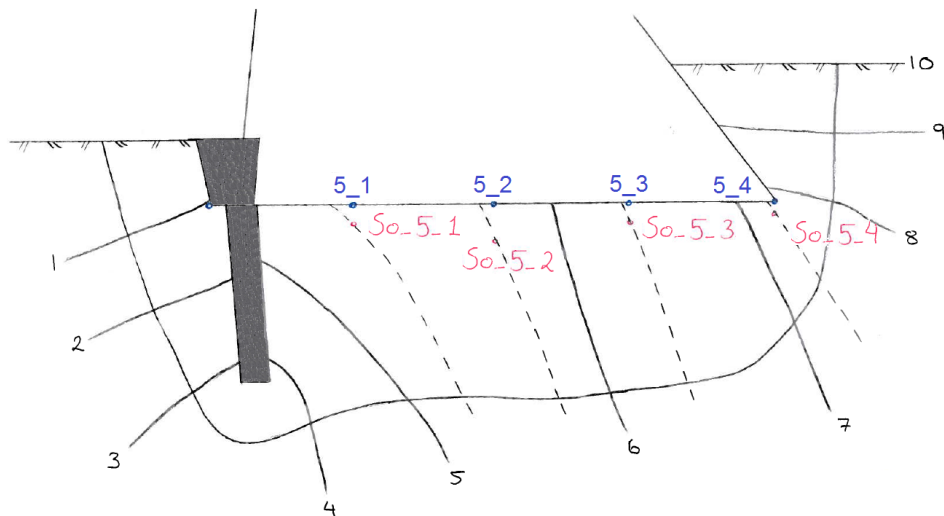
Alternativ 2

I det andre alternativet forutsettes det lav permeabilitet i dammen i forhold til fundamentet, og jevn permeabilitet i fundamentet. Da vil vannstrømmen fra magasinet til nedstrøms dammen hovedsakelig gå gjennom fundamentet. Dermed kan et strømnett tegnes opp ved at poretrykket i målepunktene er kjent. Poretrykket i målepunktet er

beregnet som et gjennomsnitt over en lengre måleperiode. Strømnettet for snitt 3 og snitt 5 er vist i figur C.9 og C.10.



Figur C.9: Strømnett for snitt 3



Figur C.10: Strømnett for snitt 5

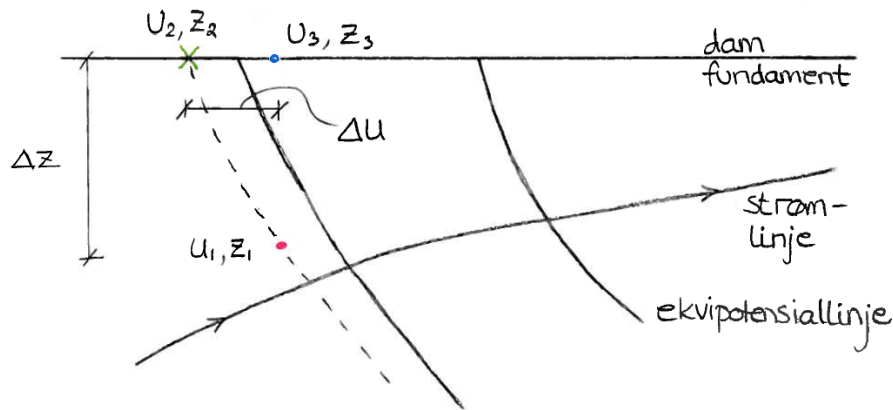
Figur C.11 viser videre hvordan poretrykket vertikalt over målepunktet i flata mellom dammen og fundamentet, u_3 , kan beregnes. Den stiplede linja gjennom punkt 1 viser at punkt 2 har samme potensial som punkt 1. Dermed kan poretrykket i punkt 2, u_2 , beregnes som vist i ligning (C.2).

$$u_2 = u_1 - \Delta z \quad (\text{C.2})$$

Deretter kan poretrykket i punkt 3, u_3 , beregnes som vist i ligning (C.3).

$$u_3 = u_2 - \Delta u \quad (\text{C.3})$$

Endringen i poretrykket, Δu , kan beregnes ut fra strømnnettene. Strømnnettene er tegnet med 10 potensialfall av lik størrelse, og de 10 potensialfallene utgjør til sammen høydeforskjellen i vannstand i magasinet og nedstrøms dammen.



Figur C.11: Illustrasjon av alternativ 2

Verdiene benyttet i alternativ 2 er vist i tabell C.9.

Vurdering av alternativene

Alternativ 1 forutsetter at dammen er like permeabel som fundamentet mens alternativ 2 forutsetter at dammen har lav permeabilitet sammenlignet med fundamentet. Sannsynligvis ligger dammens permeabilitet et sted i mellom disse to tilfellene.

I alternativ 1 er det forutsatt at fundamentet har jevn permeabilitet. Dette er lite sannsynlig da sprekker og porer trolig gjør fundamentet anisotrop. Siden grunnforholdene på damstedet ikke er kjent kan ikke en annen permeabilitet begrunnes. Ved videre bruk forutsettes derfor fundamentet som isotropt.

Valg av metode

Det er valgt å bruke gjennomsnittsverdien av poretrykket fra de to alternativene gir videre analyse av poretrykksmålingene.

Tabell C.8: Verdier benyttet i alternativ 1 for begge snitt

	Punkt	Avstand oppstrøms damtå	z_1	z_2	z_3
		[%]	[moh]	[moh]	[moh]
Snitt 3	3_1	24 %	350,9	361,3	354,9
	3_2	49 %	351,7	362,4	354,9
	3_3	74 %	352,6	363,7	354,9
	3_4	100 %	353,4	363,2	354,9
Snitt 5	5_1	24 %	352,8	361,3	354,4
	5_2	49 %	351,7	362,4	354,4
	5_3	74 %	352,9	363,4	354,4
	5_4	100 %	353,5	363,3	354,4

Tabell C.9: Verdier benyttet i alternativ 2 for begge snitt

	Punkt	Avstand oppstrøms damtå	Δz	$\Delta u / \Delta h$
		[%]	[m]	[kN/m ³]
	3_1	24 %	4,0	0,06
	3_2	49 %	3,2	0,01
	3_3	74 %	2,4	0,02
	3_4	100 %	1,5	0,04
	5_1	24 %	1,6	0,01
	5_2	49 %	2,7	0,00
	5_3	74 %	1,5	0,00
	5_4	100 %	0,9	0,01

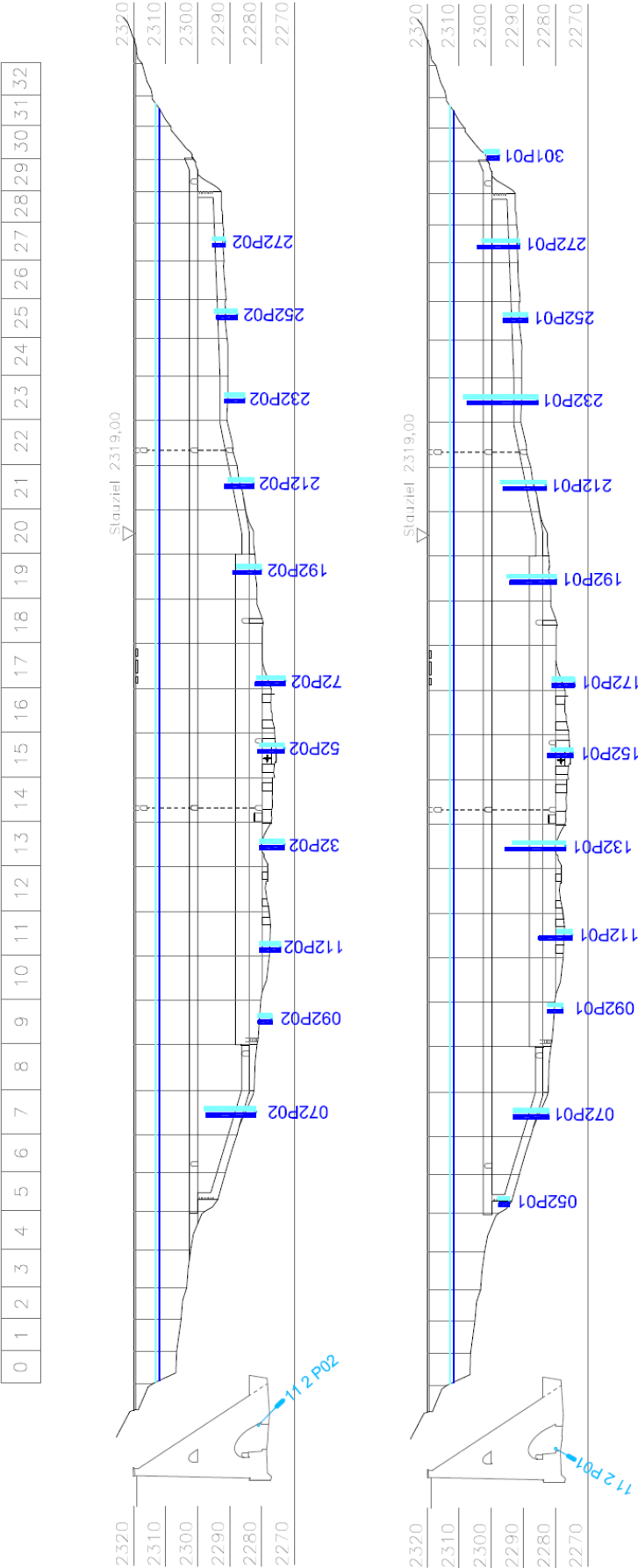
C.4 Dam Großer Mühdorfer See

Tabell C.10: Plassering av målepunkter for alle snitt og oppstrøms/nedstrøms damtå (Verbund, 2013)

	Målepunkt	Avstand oppstrøms damtå [m]	Avstand oppstrøms damtå [%]	Høyde [moh.]
Snitt 7	Oppstrøms	0,0	0 %	2285,8
	7_1	3,1	18 %	2286,5
	7_2	3,9	23 %	2286,4
	Nedstrøms	17,2	100 %	2293,0
Snitt 15	Oppstrøms	0,0	0 %	2275,5
	15_1	9,9	31 %	2278,4
	15_2	14,4	45 %	2278,3
	Nedstrøms	31,7	100 %	2275,4
Snitt 19	Oppstrøms	0,0	0 %	2282,1
	19_1	10,2	36 %	2284,9
	19_2	13,9	49 %	2284,3
	Nedstrøms	28,6	100 %	2282,9
Snitt 21	Oppstrøms	0,0	0 %	2286,6
	21_1	8,3	34 %	2286,6
	21_2	9,0	37 %	2286,5
	Nedstrøms	24,2	100 %	2288,3

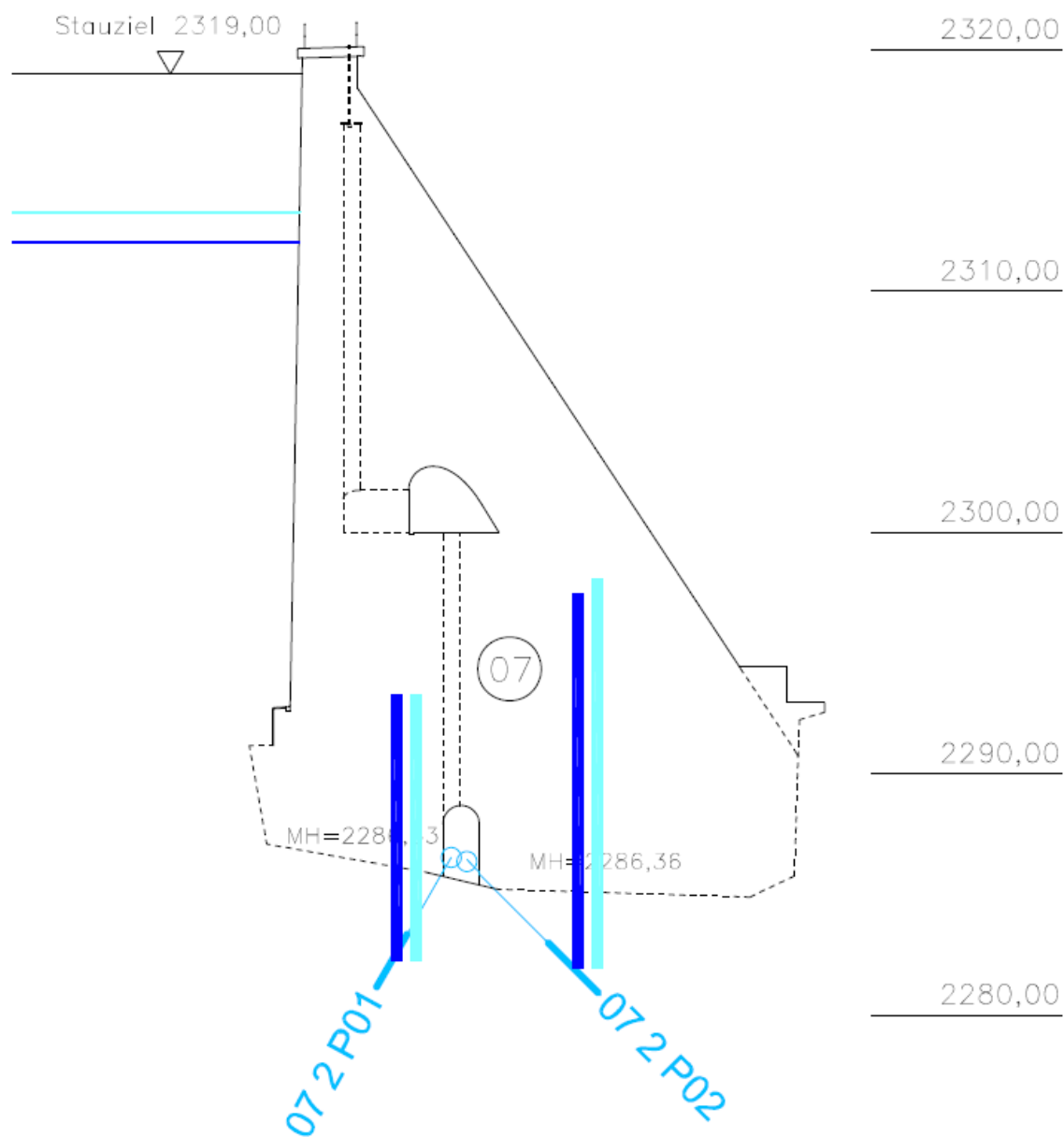
Tabell C.11: Perioder benyttet i analysen av poretrykksmåliger

Analyse	Periode
Vannstandsending	01/2009-12/2012
Temperaturendring	01/2009-12/2011, med oppstrøms vannstand mer enn 8 meter over damfot
Konstruktive tiltak	01/2009-12/2012, med oppstrøms vannstand over 2300 moh.

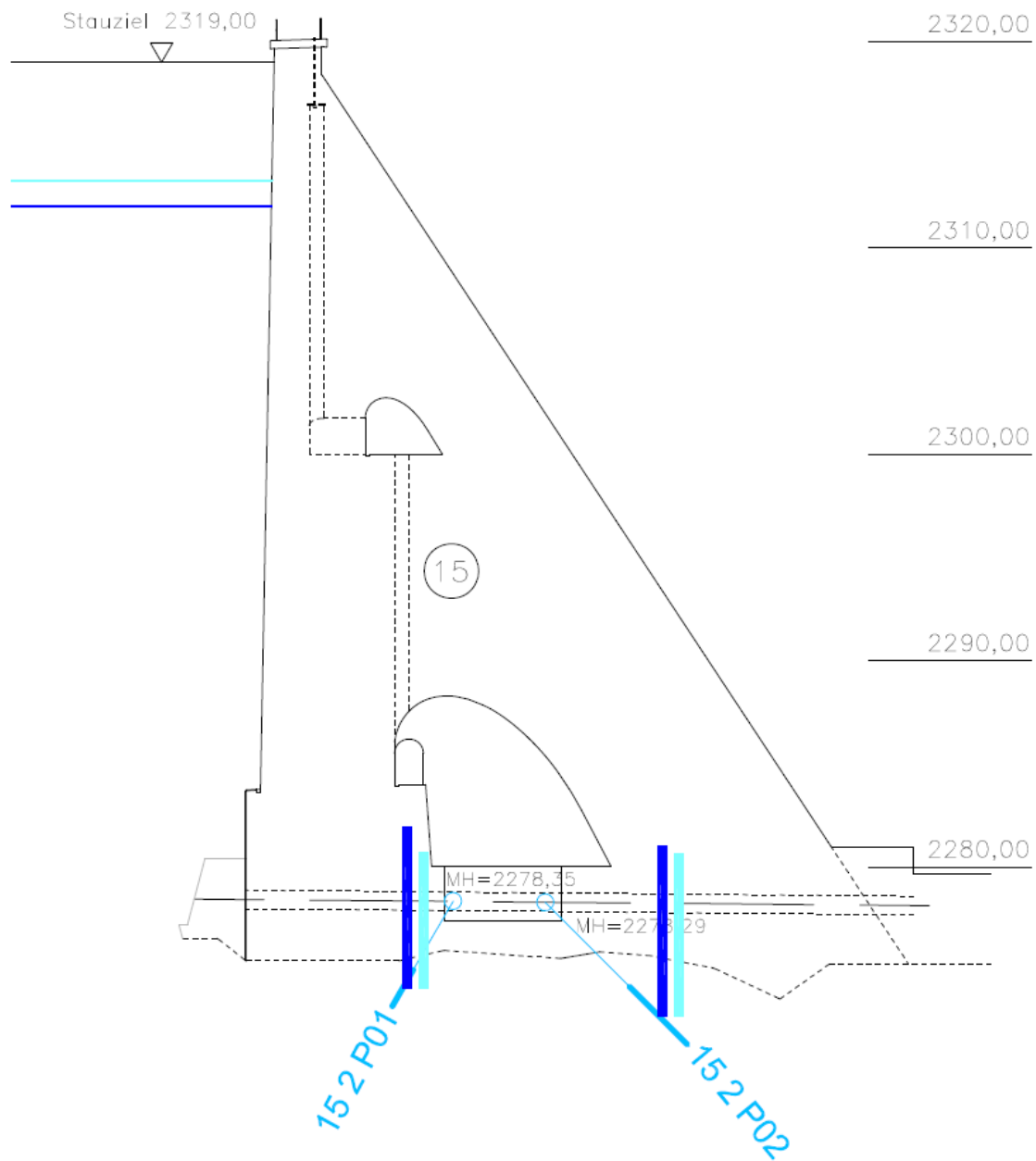


Figur C.12: Oversikt over plassering av poretrykkmålere ved dam Mühldorfer See (Verbund, 2013)

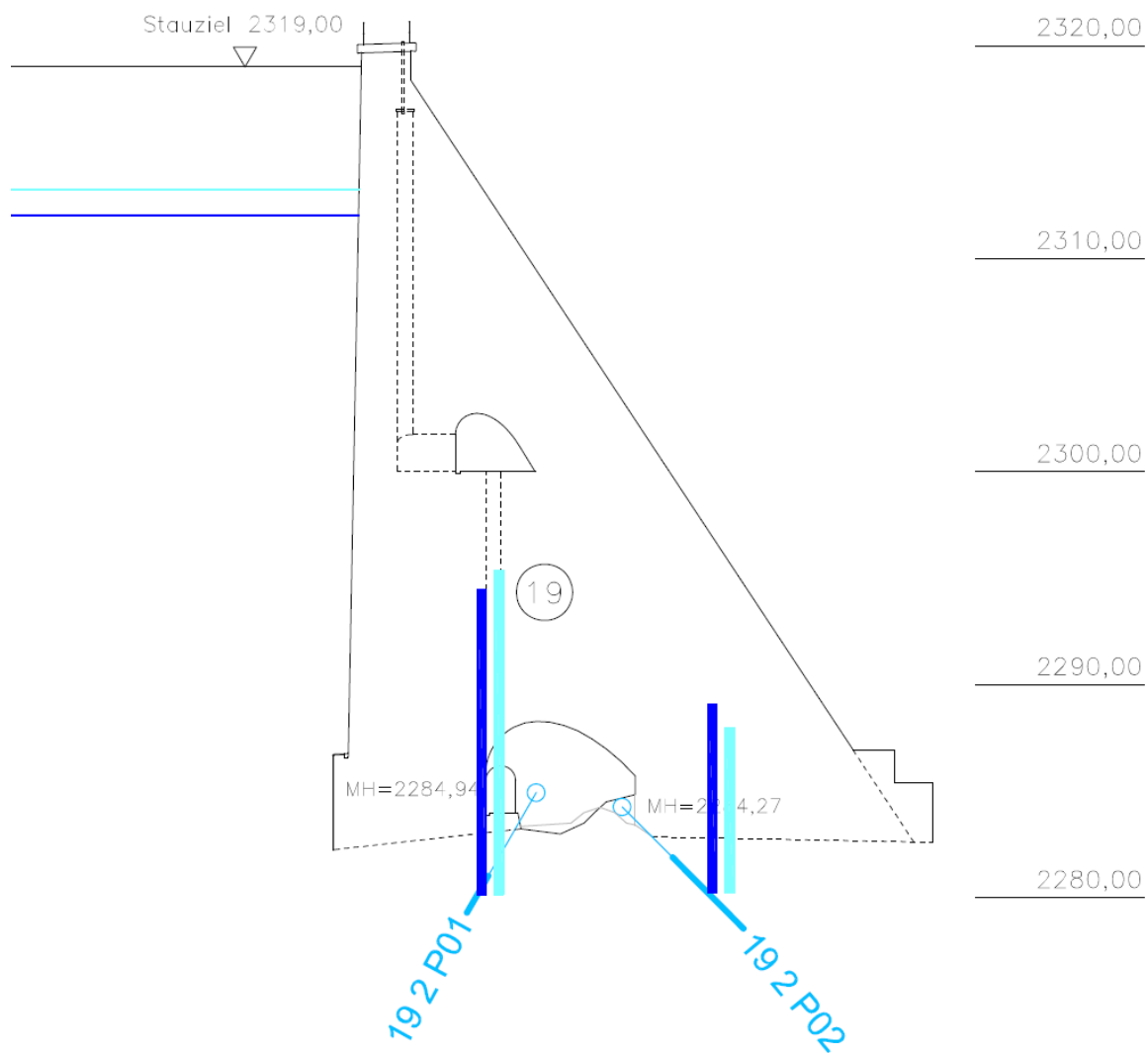
I alle tverrsnittene for dam Großer Mühlendorfer See, vist i figur C.13 til C.16, er det forutsatt at målepunktets plassering er beskrevet av teksten “MH” i figurene. “MH” står for det tyske ordet “manometerhöhe”, som kan oversettes til “piezometerhøyde”.



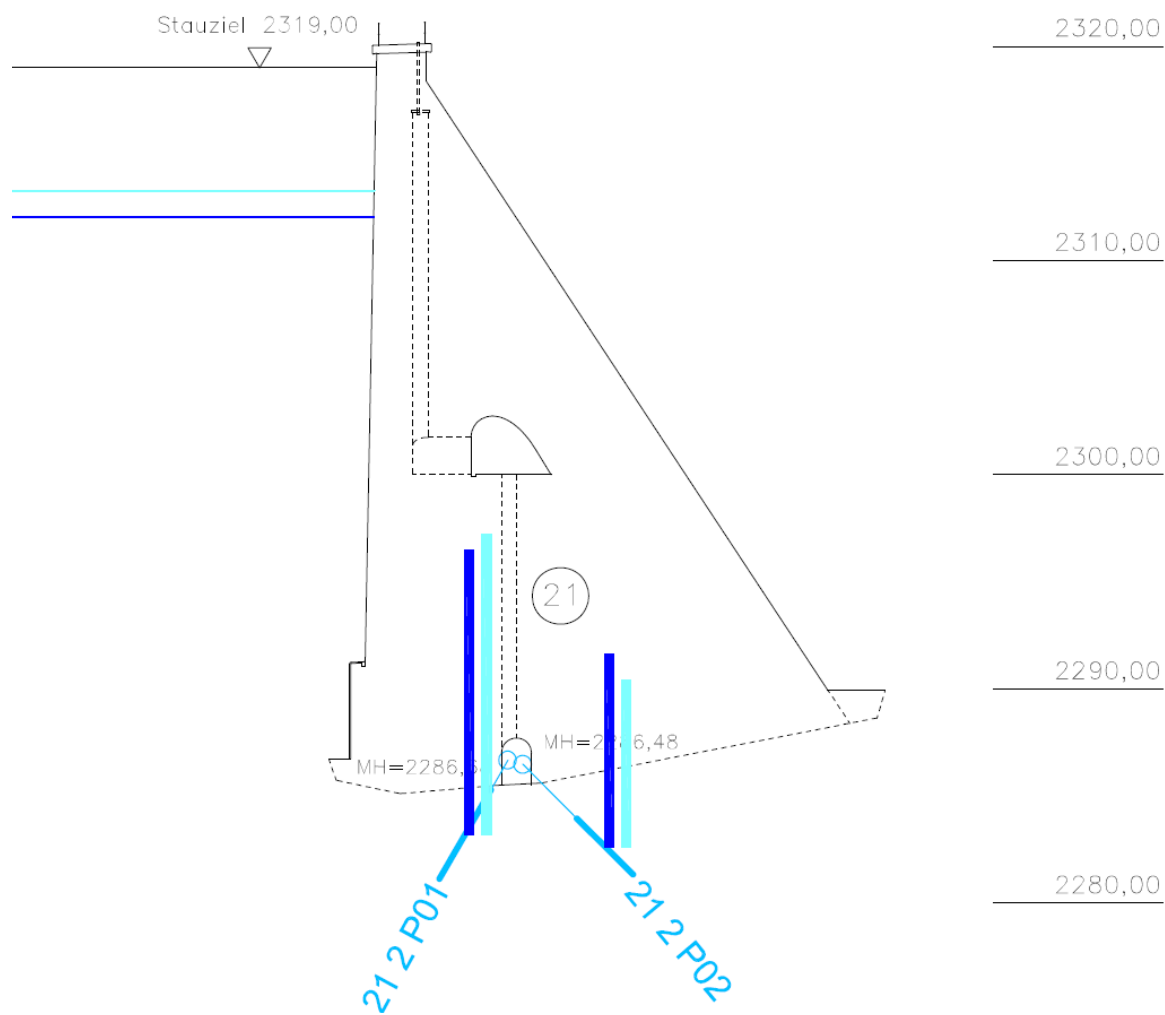
Figur C.13: Snitt 7 med poretrykksmålere (Verbund, 2013)



Figur C.14: Snitt 15 med poretrykksmålere (Verbund, 2013)



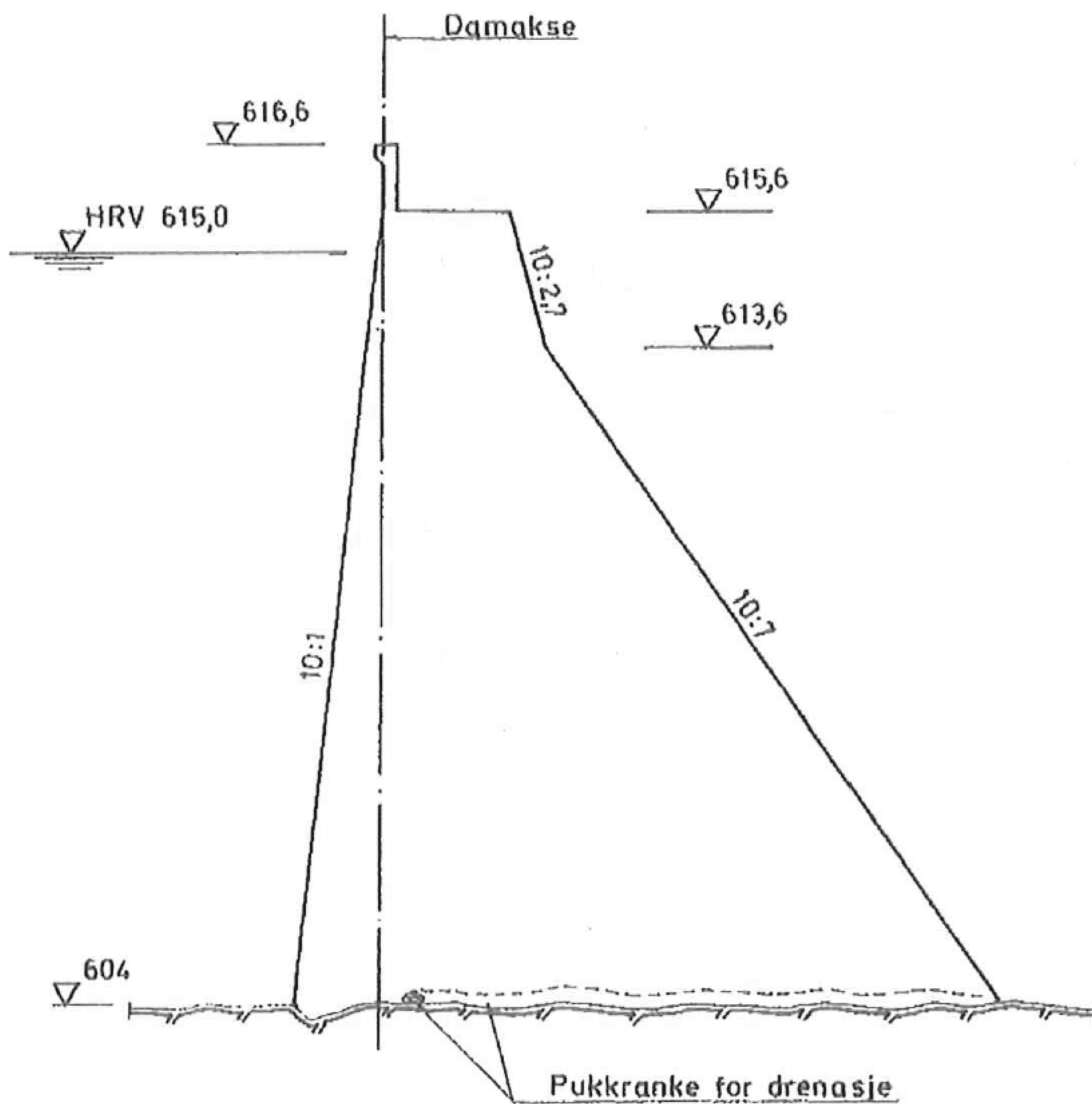
Figur C.15: Snitt 19 med poretrykkmålere (Verbund, 2013)



Figur C.16: Snitt 21 med poretrykksmålere (Verbund, 2013)

Vedlegg D

Stabilitetsberegninger



Figur D.1: Tverrsnitt av dam Kjårdavatn (Sweco, 2011)

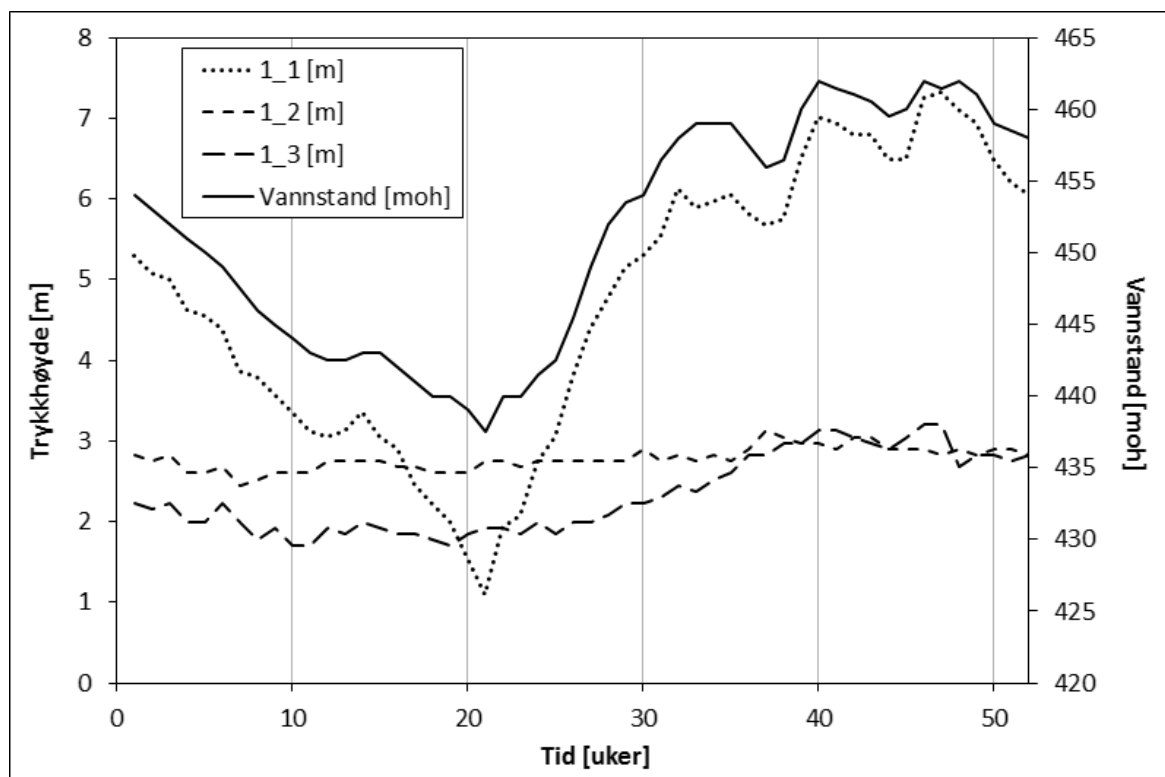
Vedlegg E

Resultater fra poretrykksanalyse

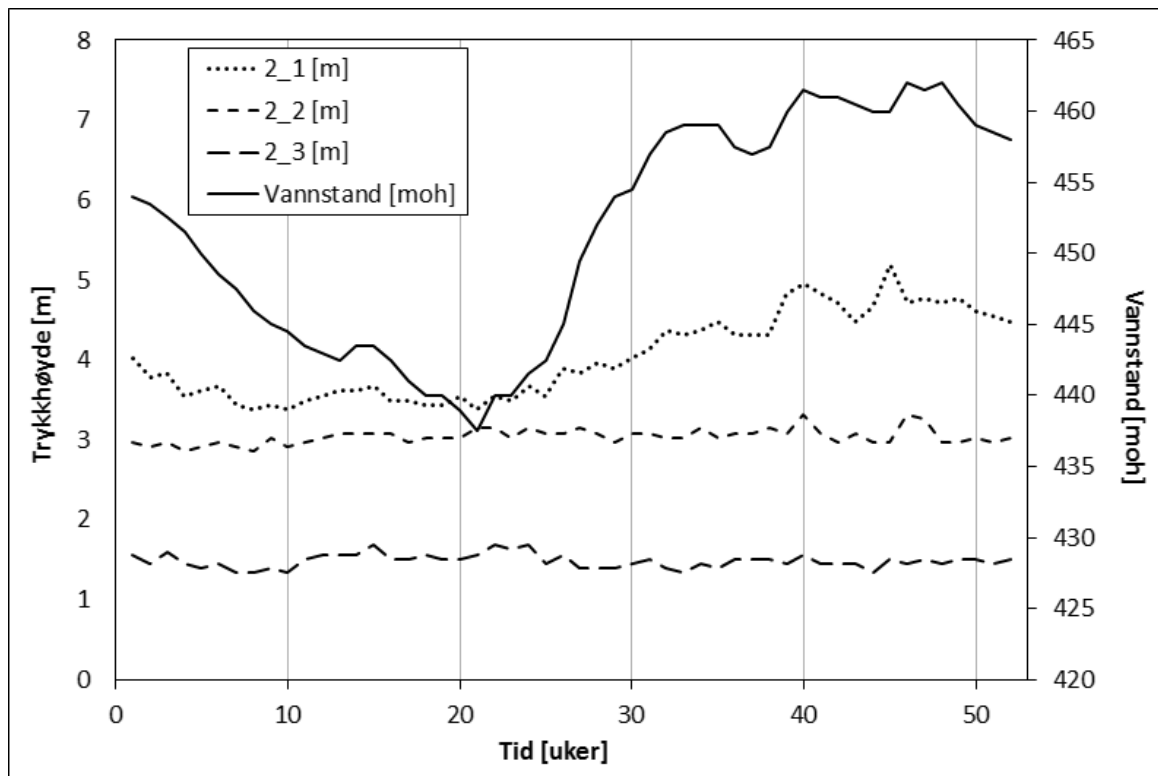
I dette vedlegget er alle resultatene fra analysen av poretrykksmålingene presentert. Analysen er beskrevet i kapittel 5.

E.1 Ringedalsdammen

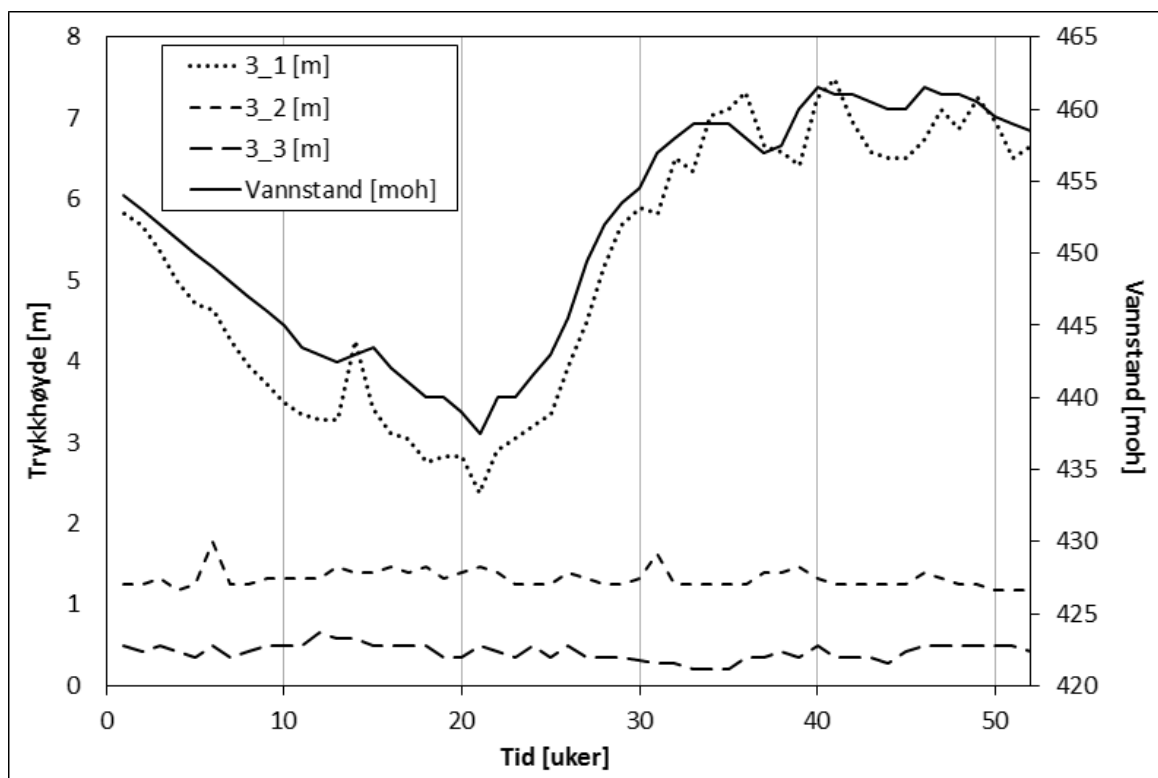
Videre følger alle resultatene fra analysen av poretrykksmålingene fra Ringedalsdammen.



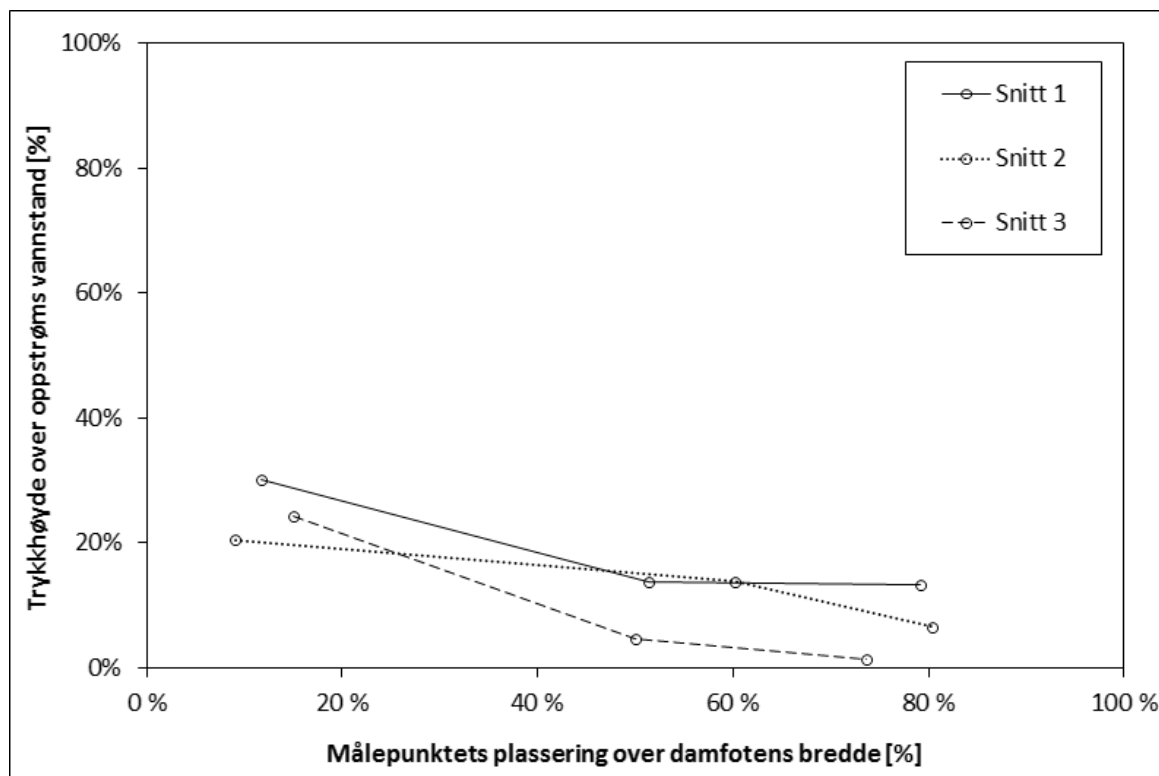
Figur E.1: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 1): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2012-12/2012



Figur E.2: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 2): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2012-12/2012



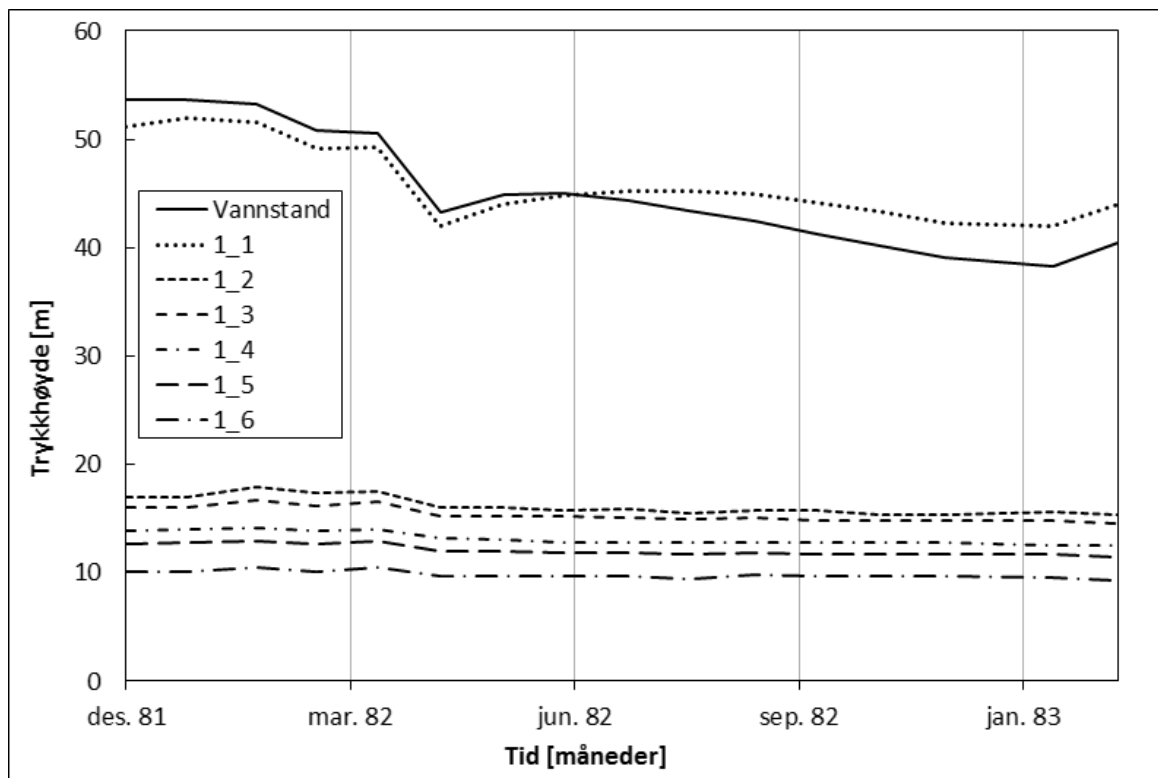
Figur E.3: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 3): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2012-12/2012



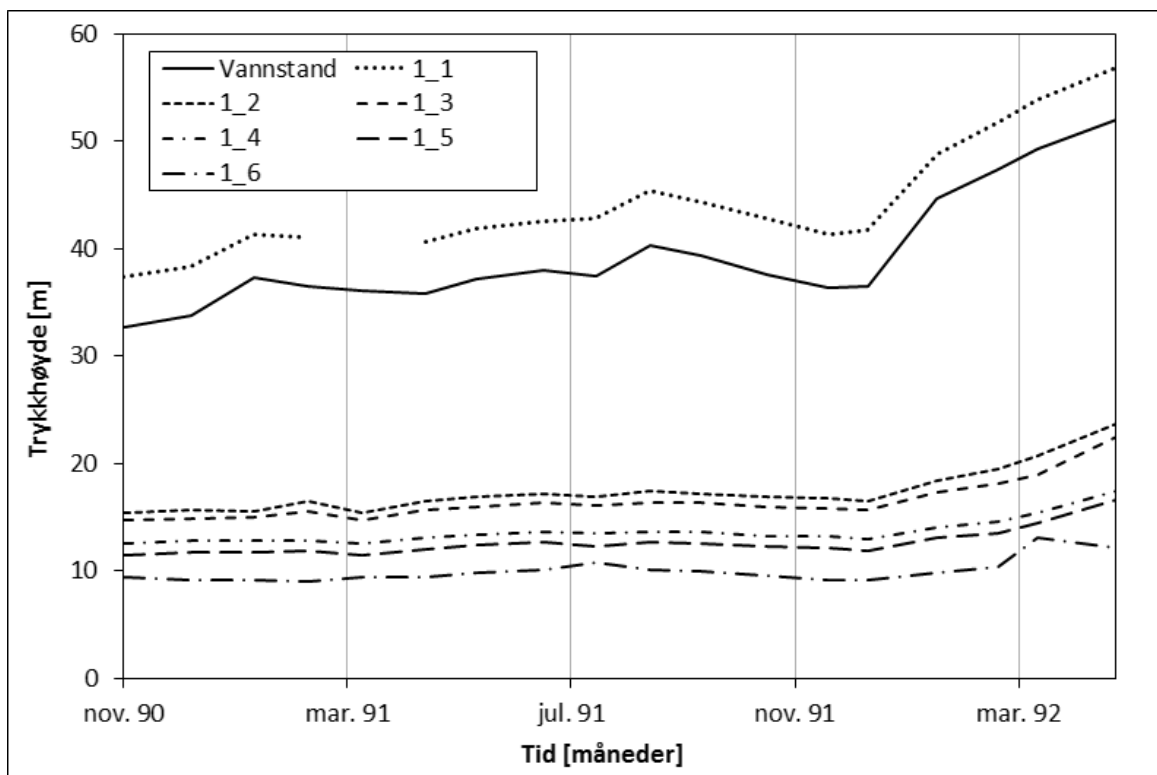
Figur E.4: Generelt poretrykksdiagram (alle snitt): Gjennomsnittsmålinger for hvert målepunkt i perioden uke 30-52/2012

E.2 Dam Gottleuba

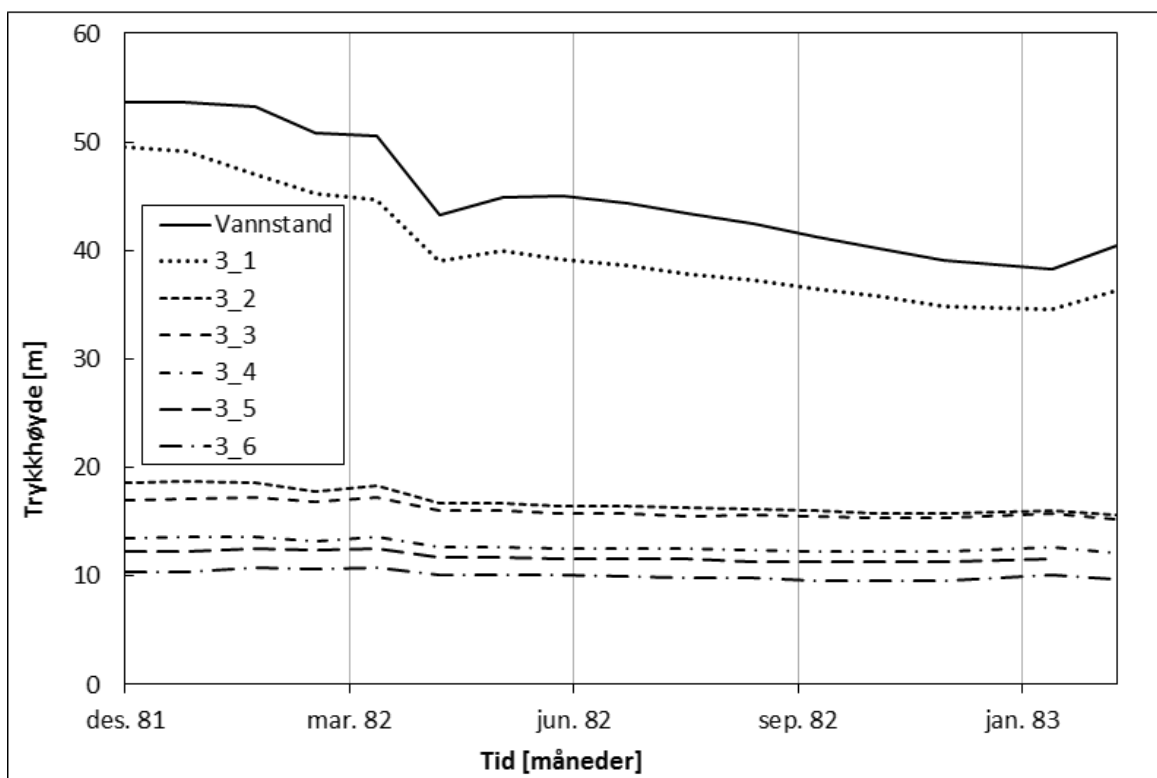
Videre følger alle resultatene fra analysen av poretrykksmålingene fra dam Gottleuba.



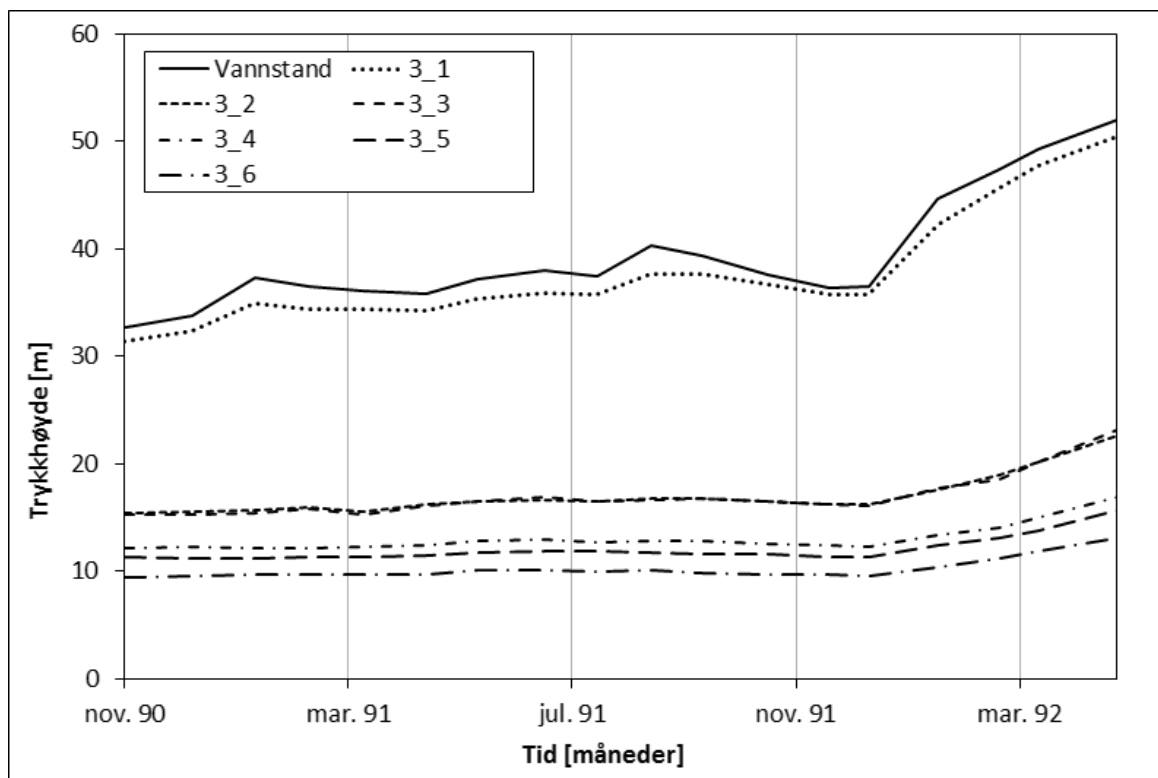
Figur E.5: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 1): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 12/1981-02/1983



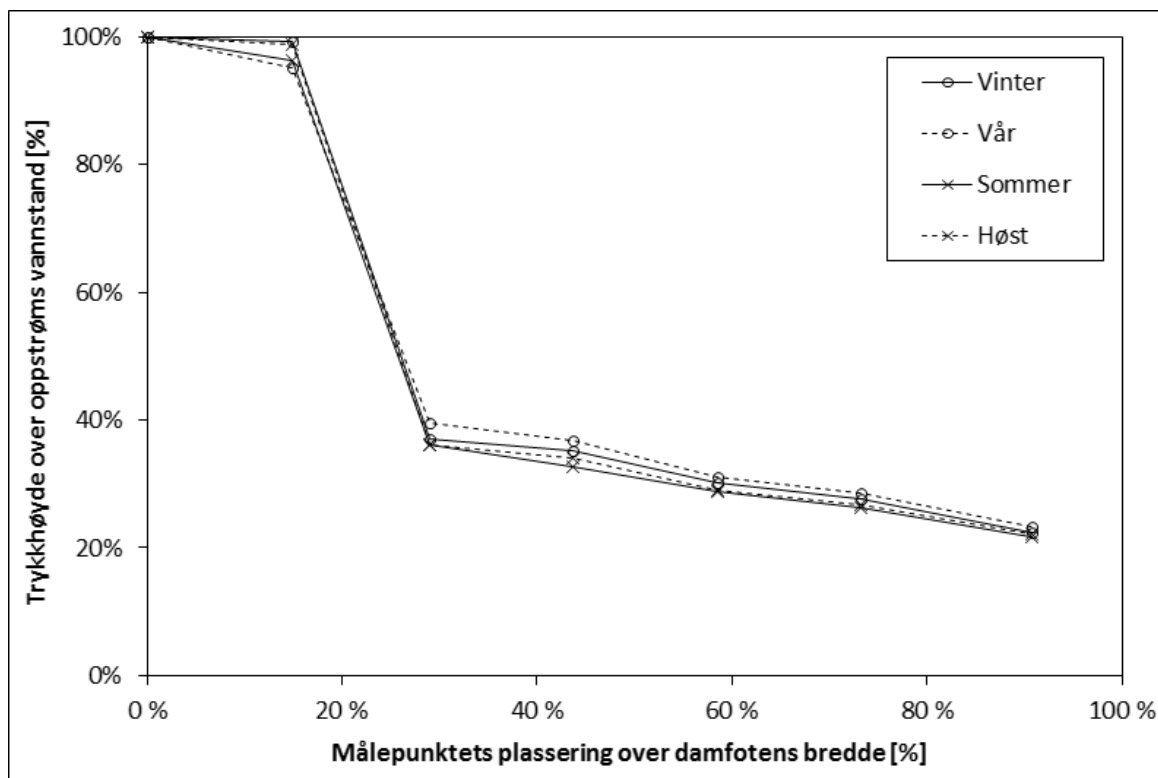
Figur E.6: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 1): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 11/1990-04/1992



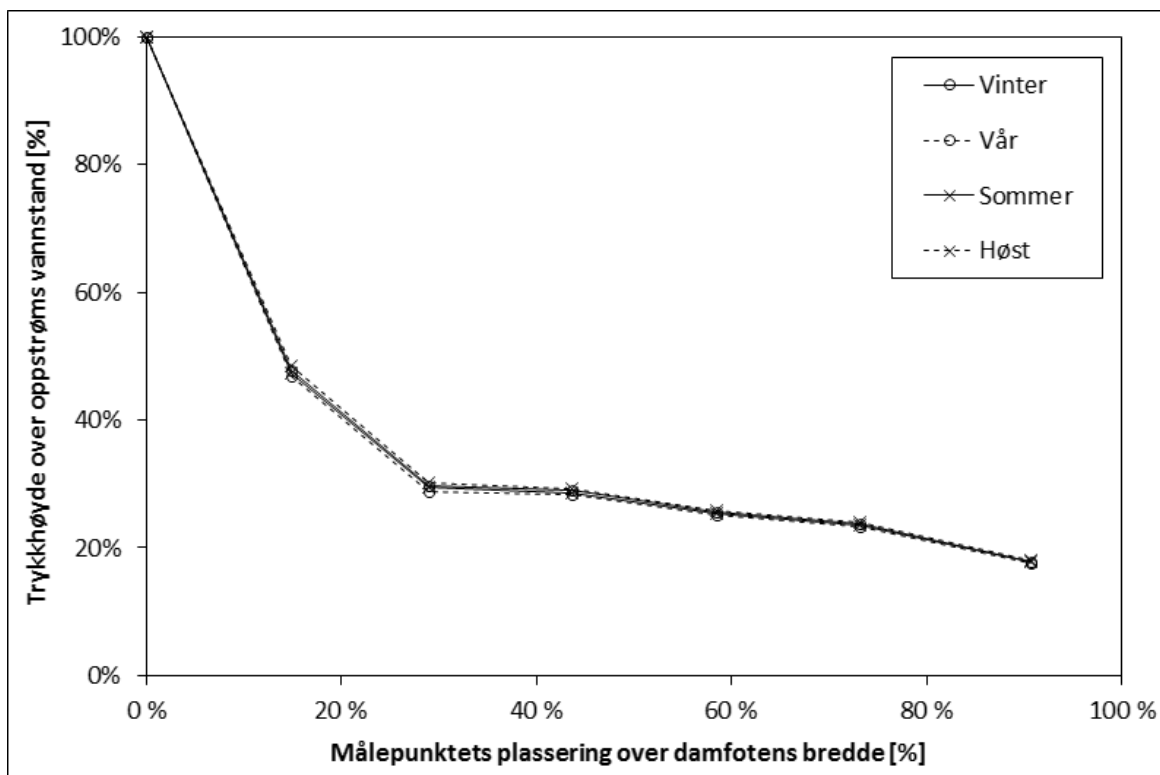
Figur E.7: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 3): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 12/1981-02/1983



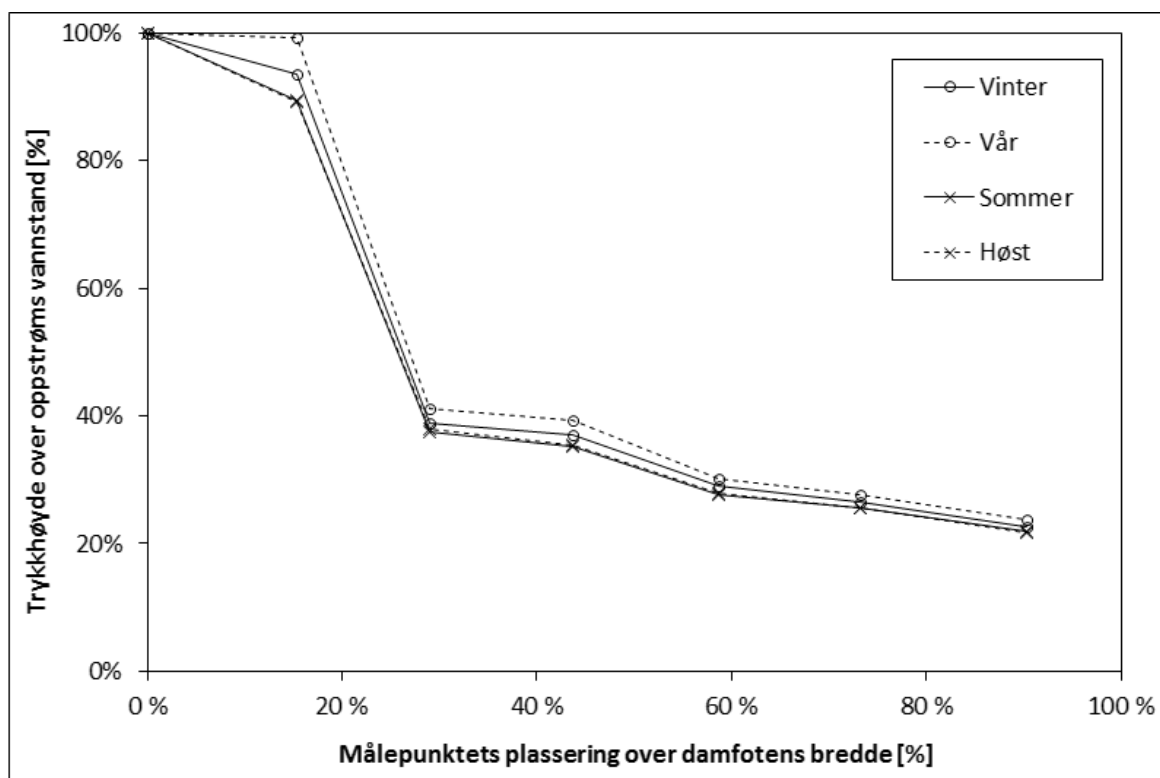
Figur E.8: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 3): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 11/1990-04/1992



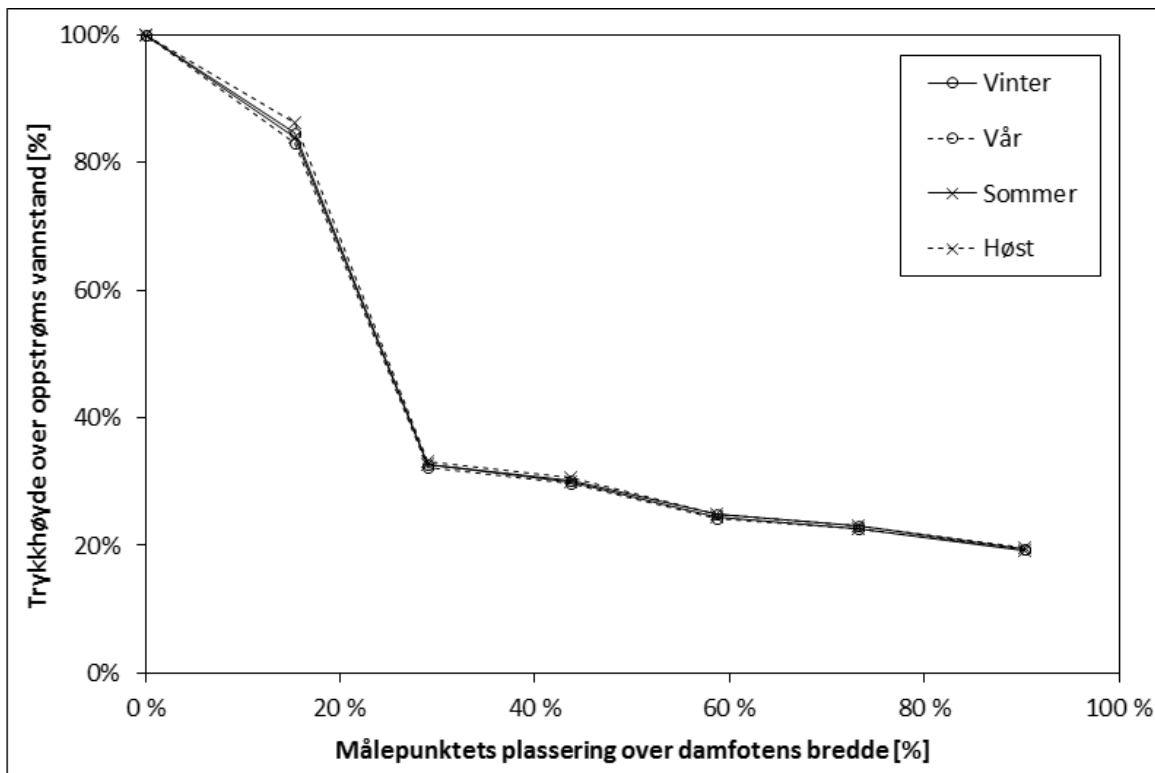
Figur E.9: Poretrykk og temperaturendring (snitt 1): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 01/1981-12/1983



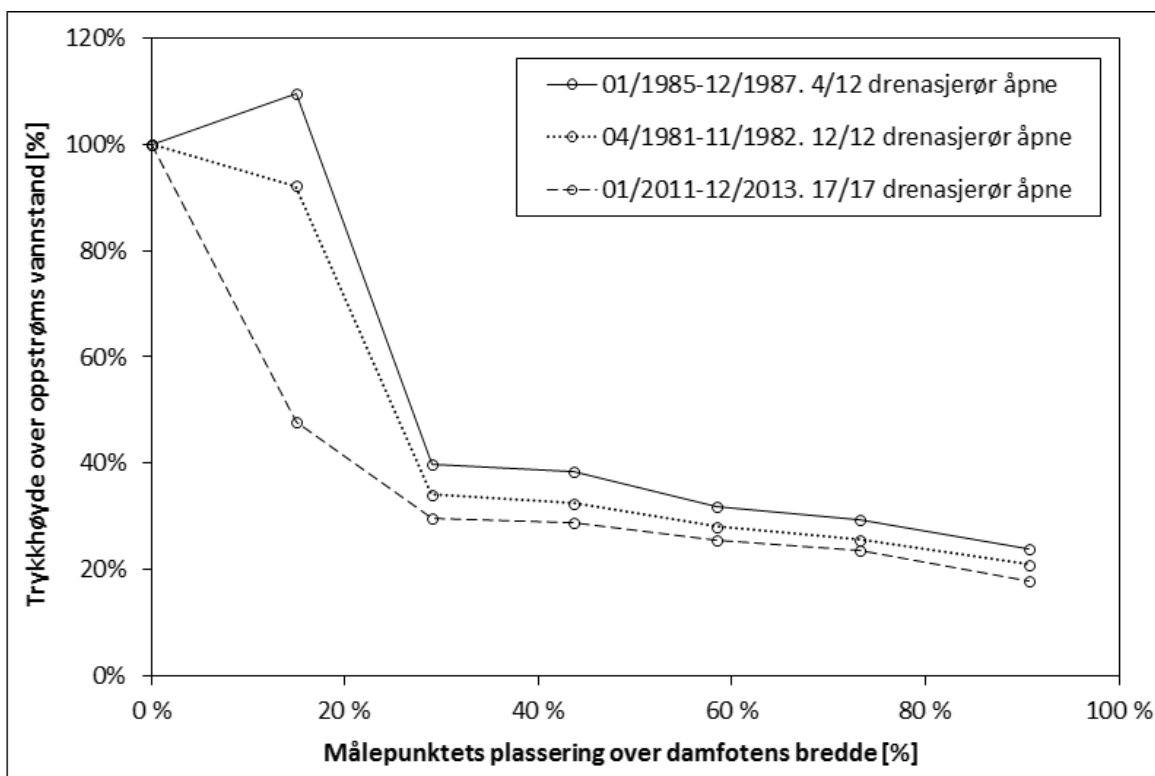
Figur E.10: Poretrykk og temperaturendring (snitt 1): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 01/2011-12/2013



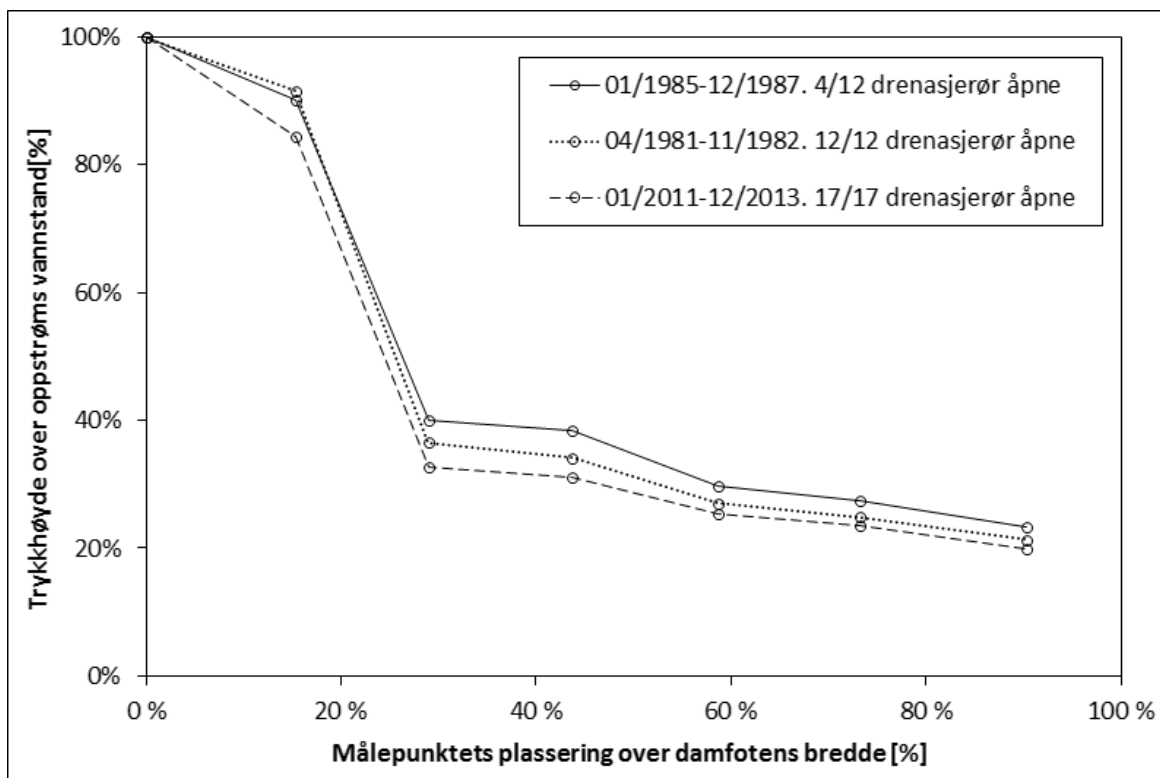
Figur E.11: Poretrykk og temperaturendring (snitt 3): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 01/1981-12/1983



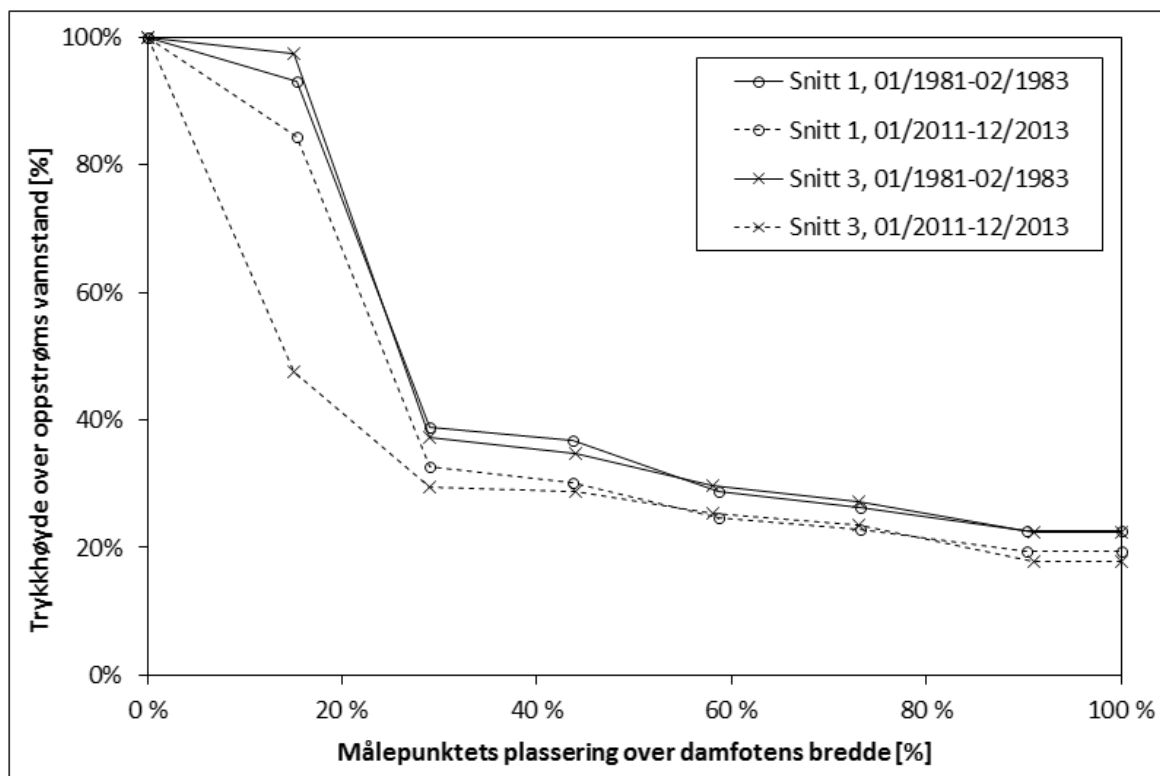
Figur E.12: Poretrykk og temperaturendring (snitt 3): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 01/2011-12/2013



Figur E.13: Innvirkningen av drenasjesystem (snitt 1): Gjennomsnittsmålinger for hvert målepunkt i hver periode



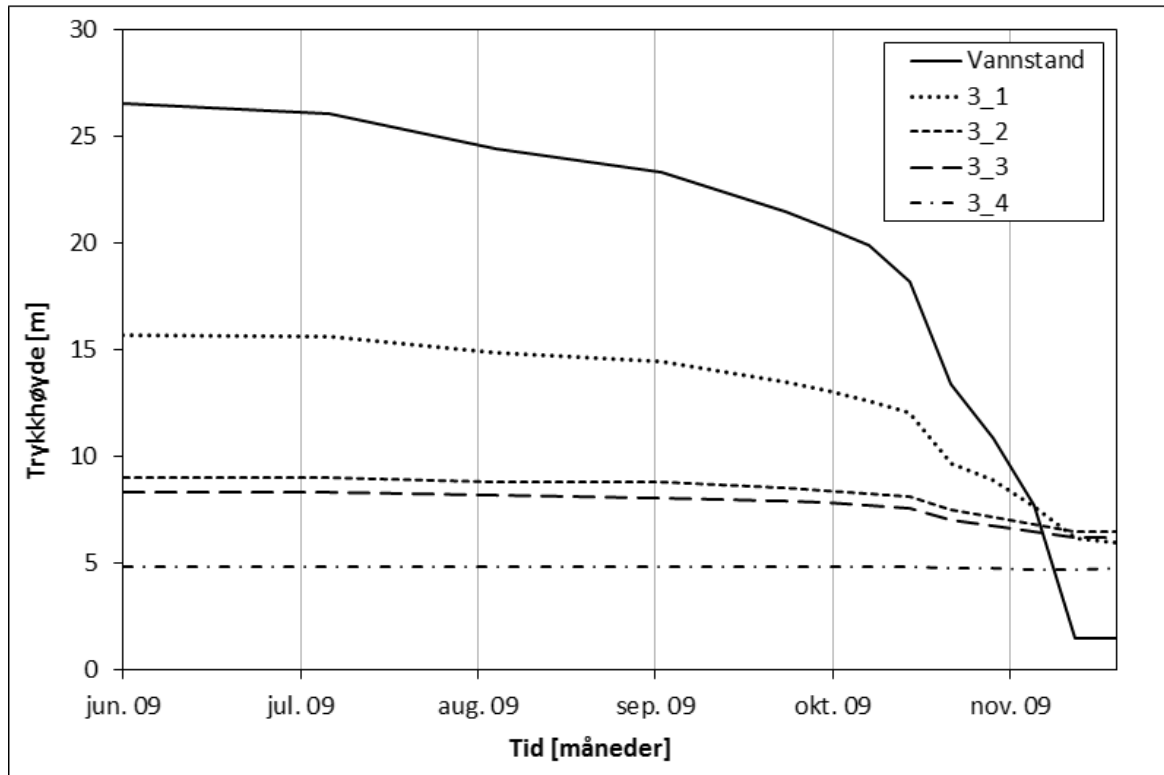
Figur E.14: Innvirkningen av drenasjesystem (snitt 3): Gjennomsnittsmålinger for hvert målepunkt i hver periode



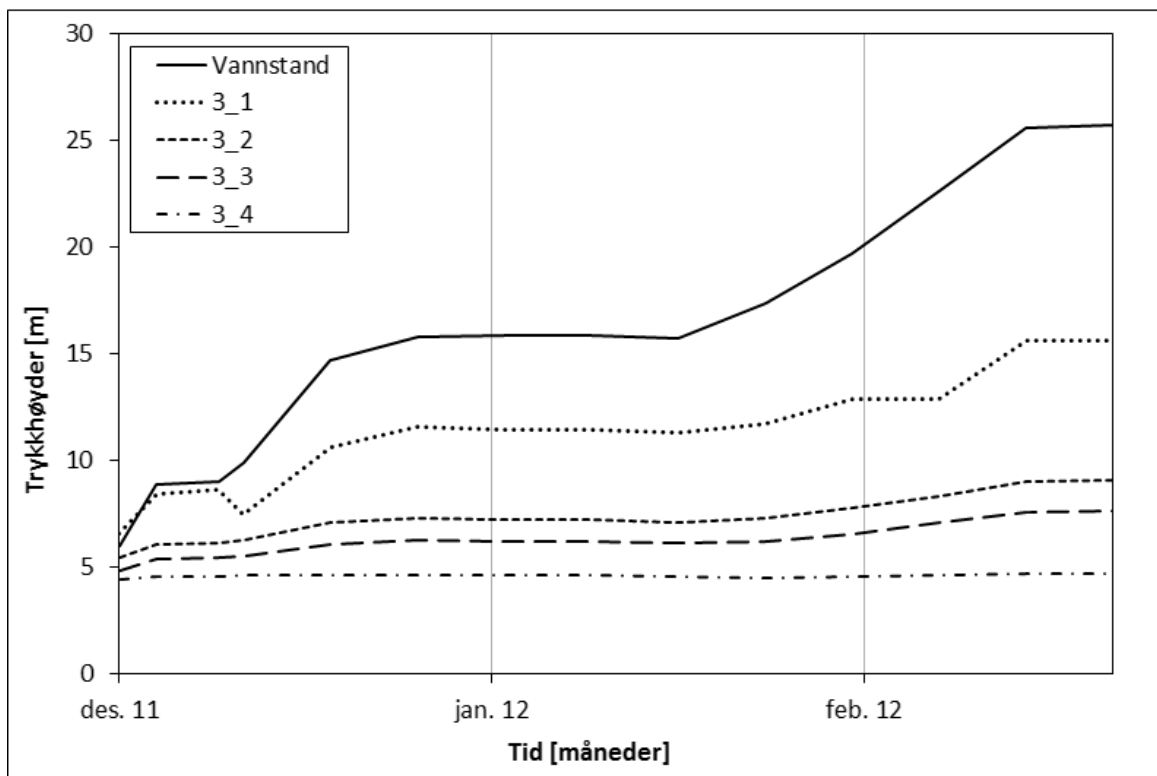
Figur E.15: Generelt poretrykksdiagram (alle snitt): Gjennomsnittsmålinger for hvert målepunkt i hver periode

E.3 Dam Klingenberg

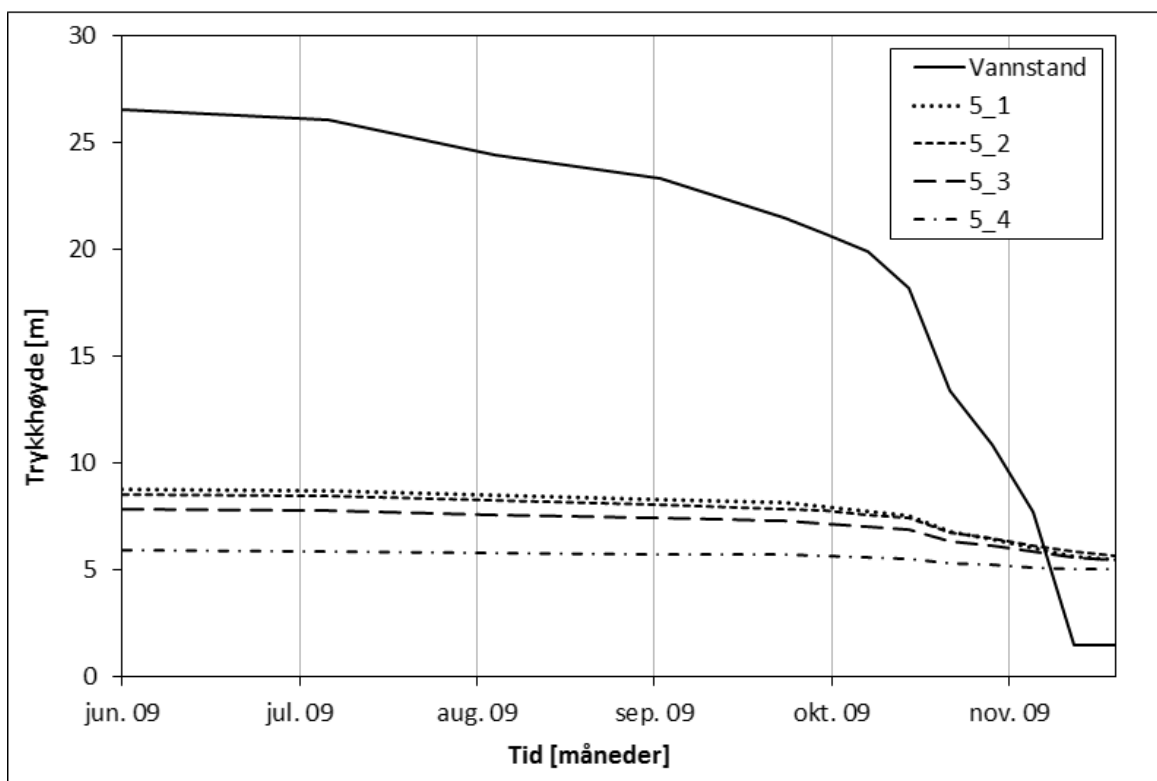
Videre følger alle resultatene fra analysen av poretrykksmålingene fra dam Klingenberg.



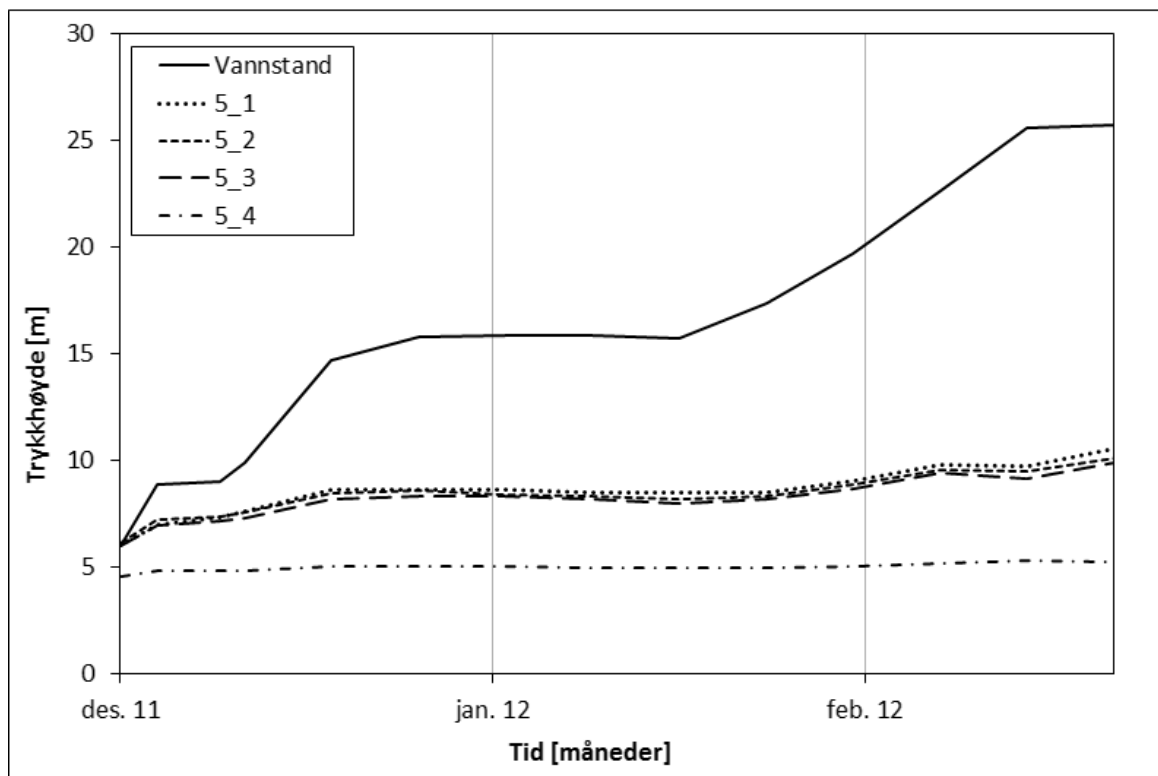
Figur E.16: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 3): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 06/2009-12/2009



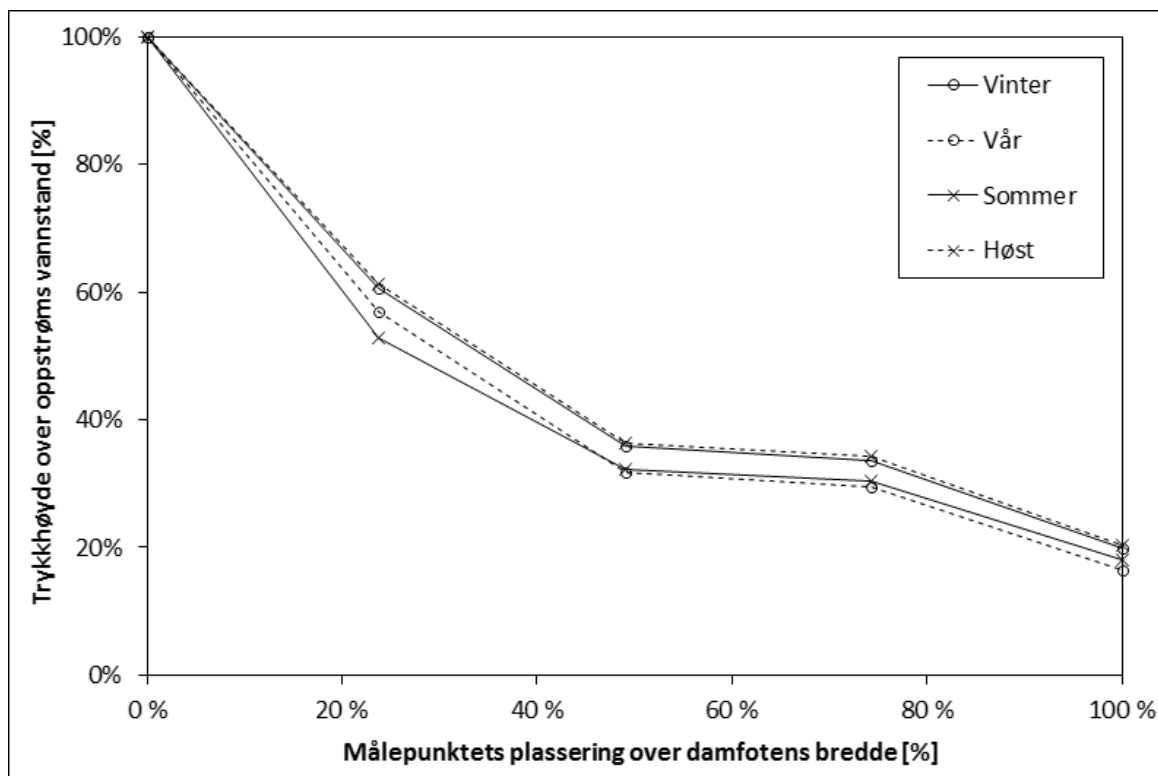
Figur E.17: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 3): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 12/2011-03/2012



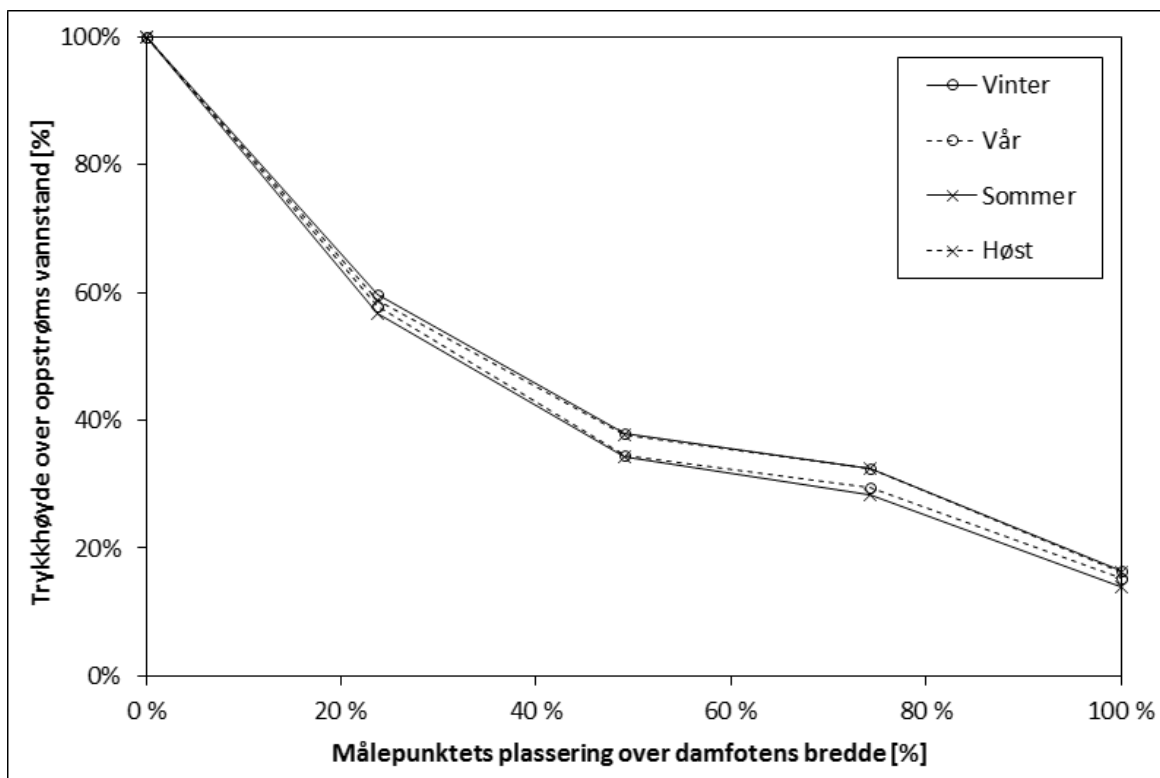
Figur E.18: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 5): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 06/2009-12/2009



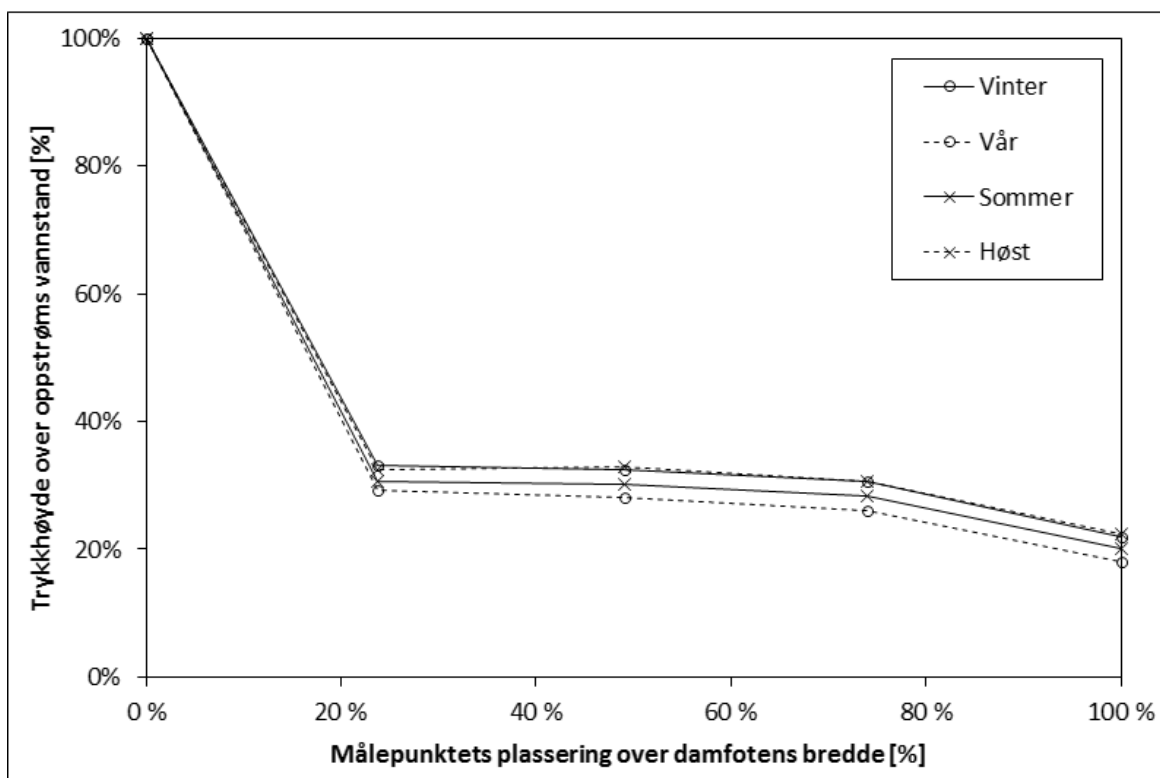
Figur E.19: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 5): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 12/2011-03/2012



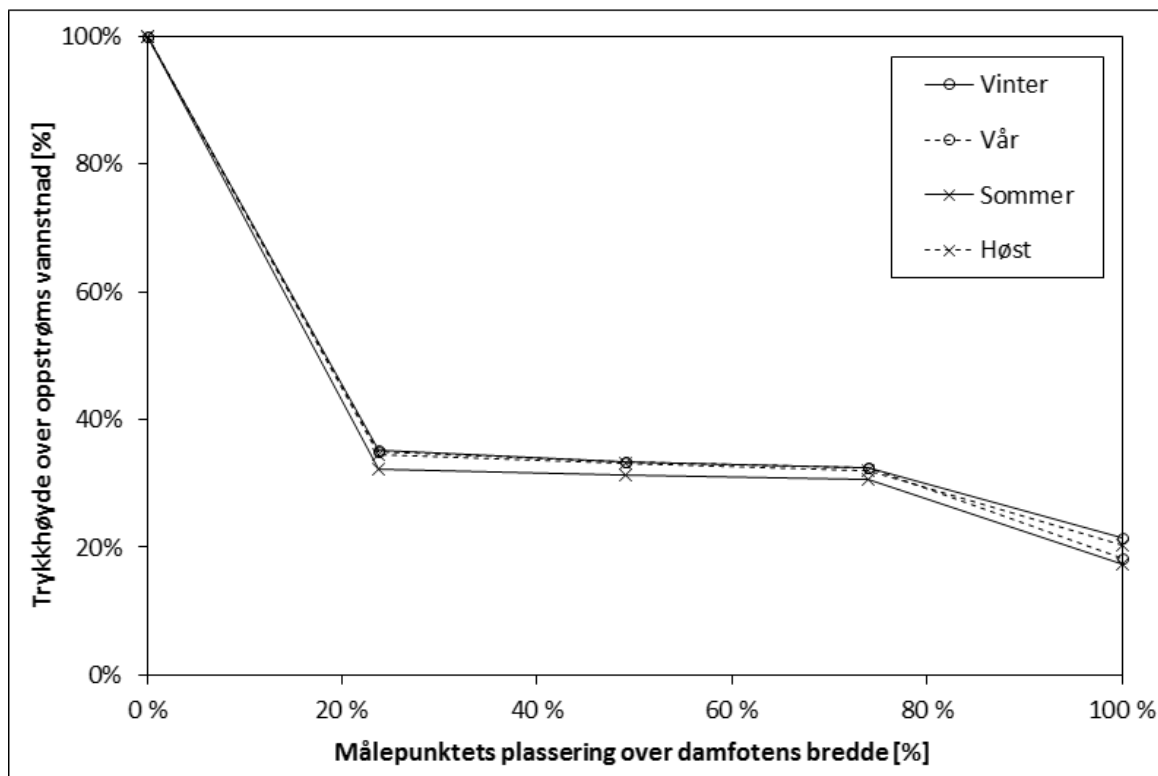
Figur E.20: Poretrykk og temperaturendring (snitt 3): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 07/2007-02/2009



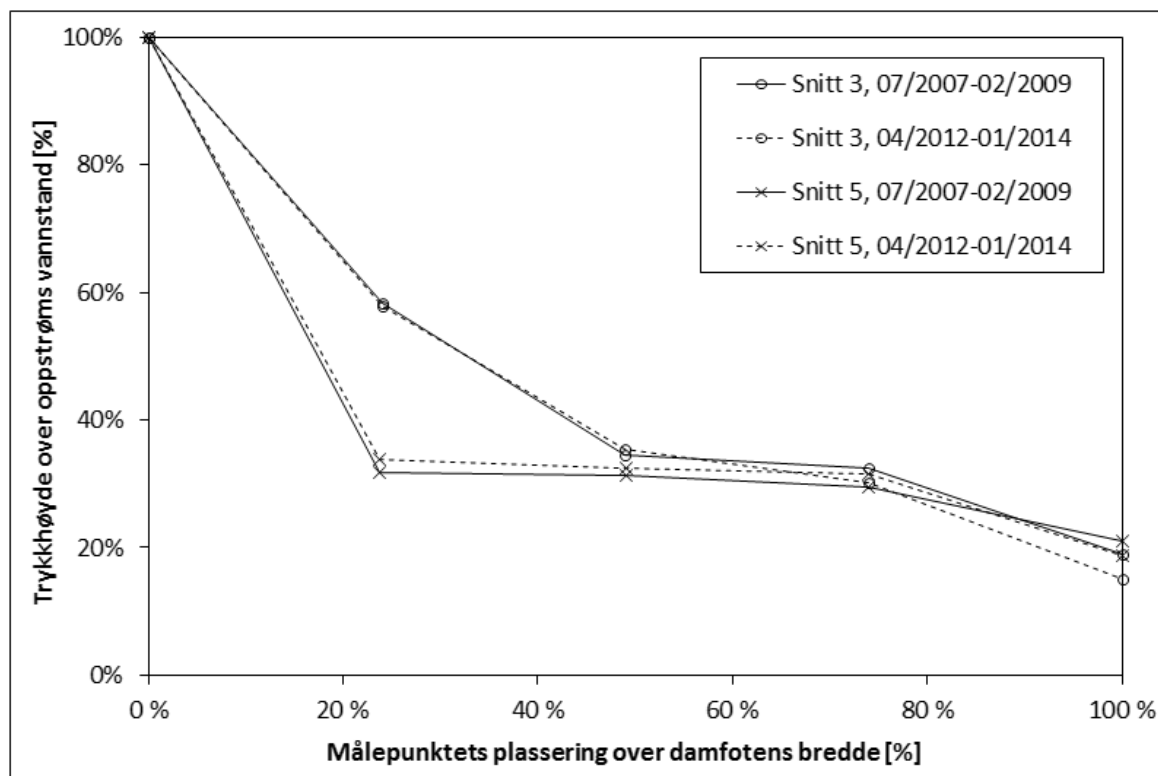
Figur E.21: Poretrykk og temperaturendring (snitt 3): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 04/2012-01/2014



Figur E.22: Poretrykk og temperaturendring (snitt 5): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 07/2007-02/2009



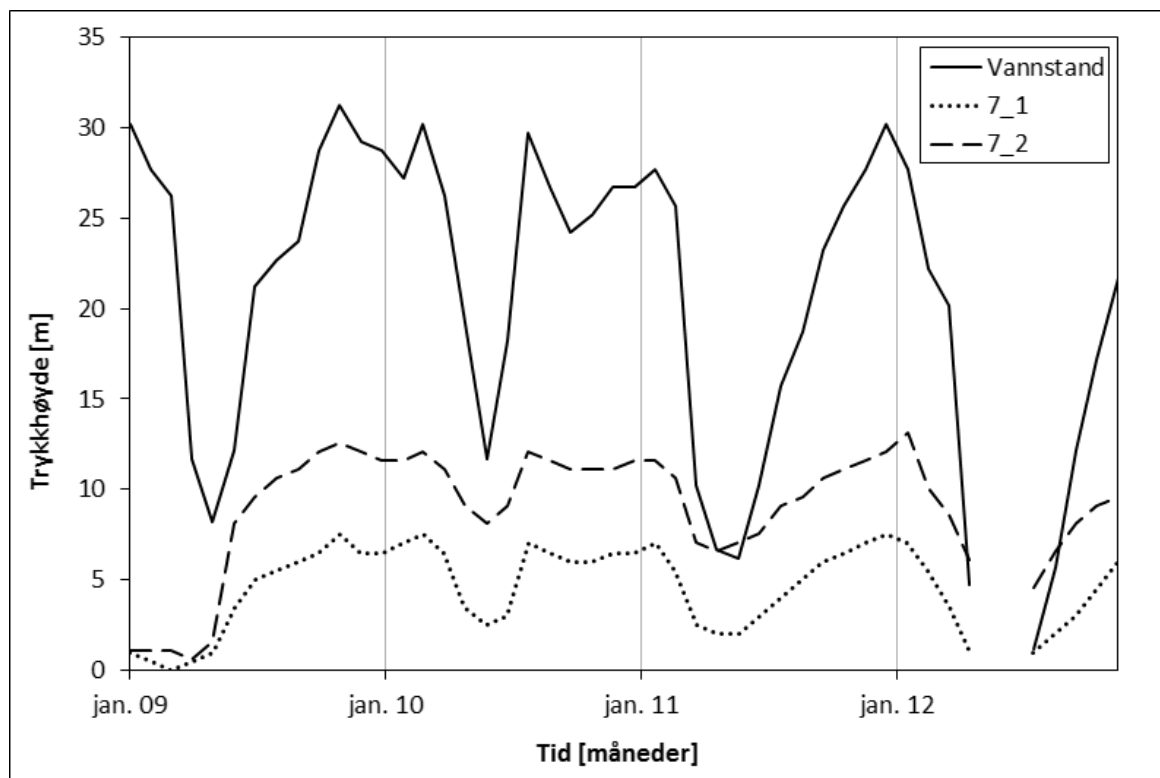
Figur E.23: Poretrykk og temperaturendring (snitt 5): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 04/2012-01/2014



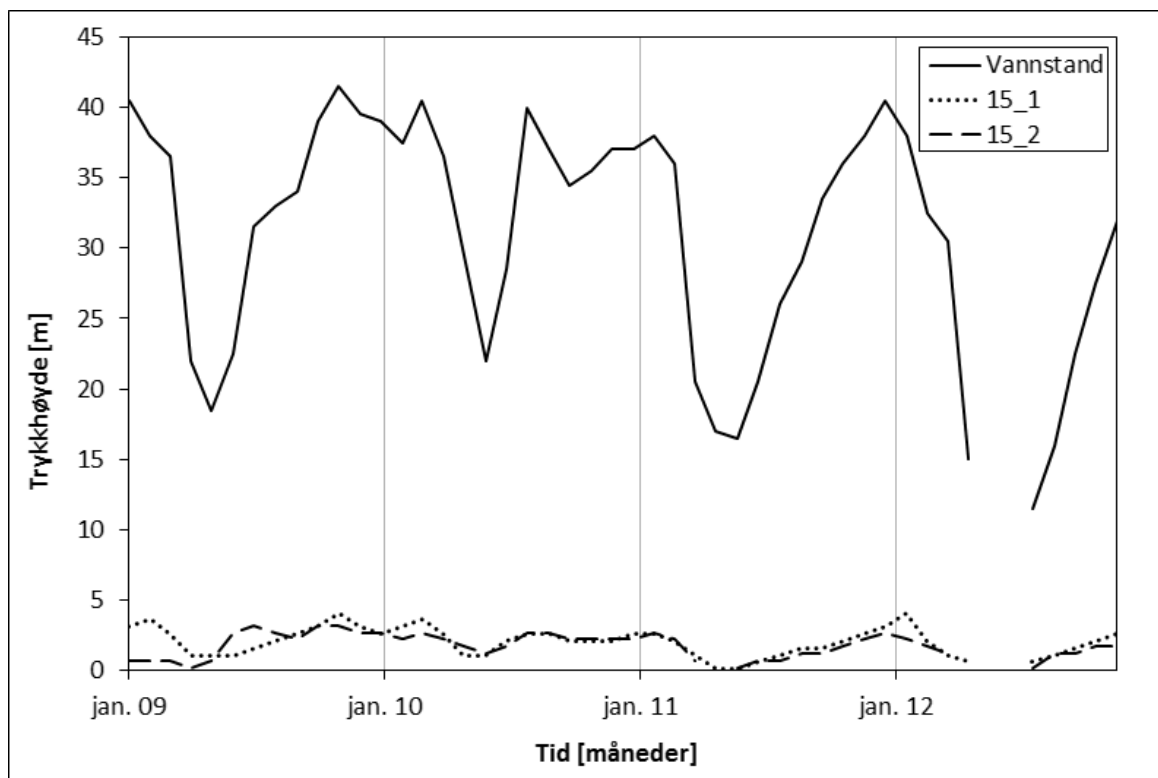
Figur E.24: Generelt poretrykksdiagram, begge snitt: Gjennomsnittsmålinger for hvert målepunkt i periodene 07/2007-02/2009 og 04/2012-01/2014

E.4 Dam Großer Mühdorfer See

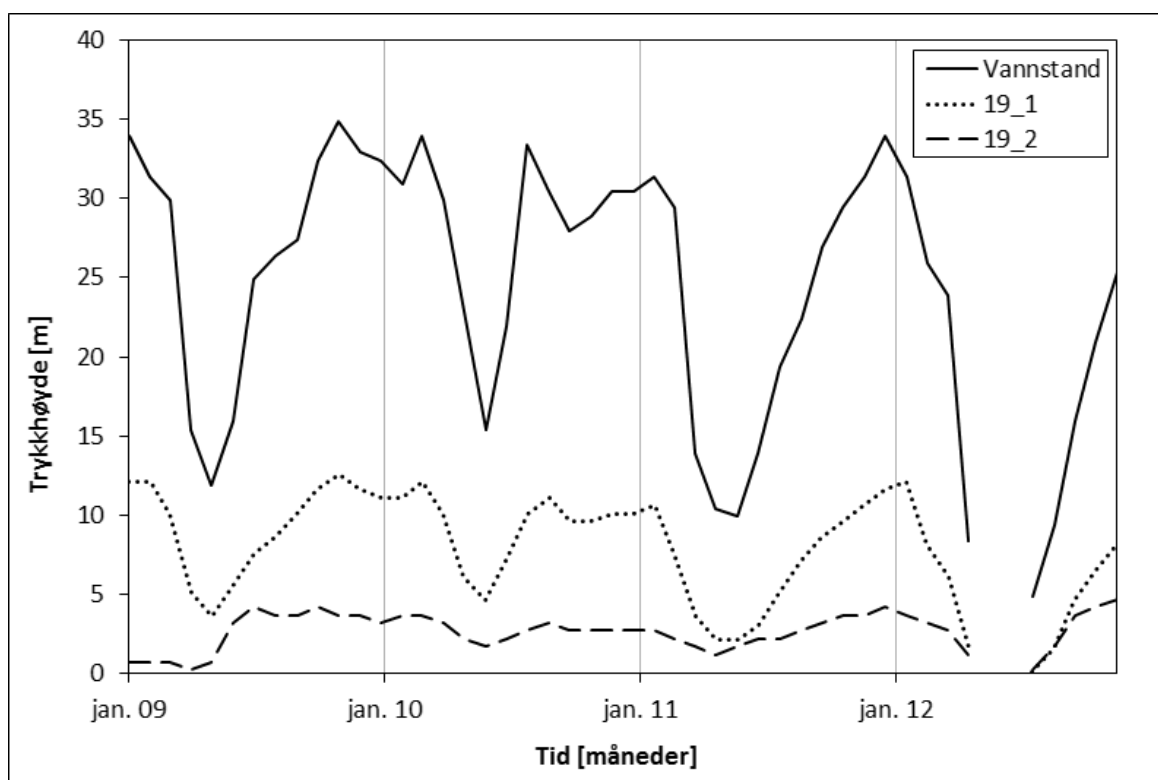
Videre følger alle resultatene fra analysen av poretrykksmålingene fra dam Großer Mühdorfer See.



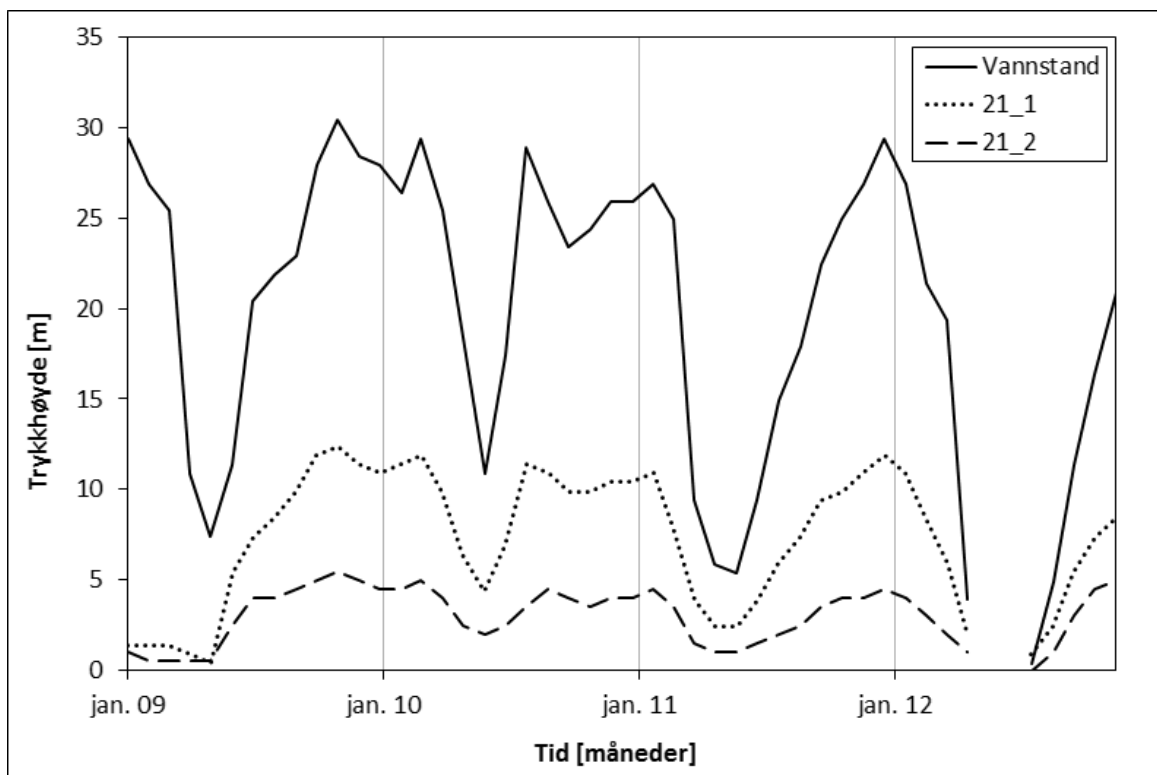
Figur E.25: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 7): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2009-12/2011



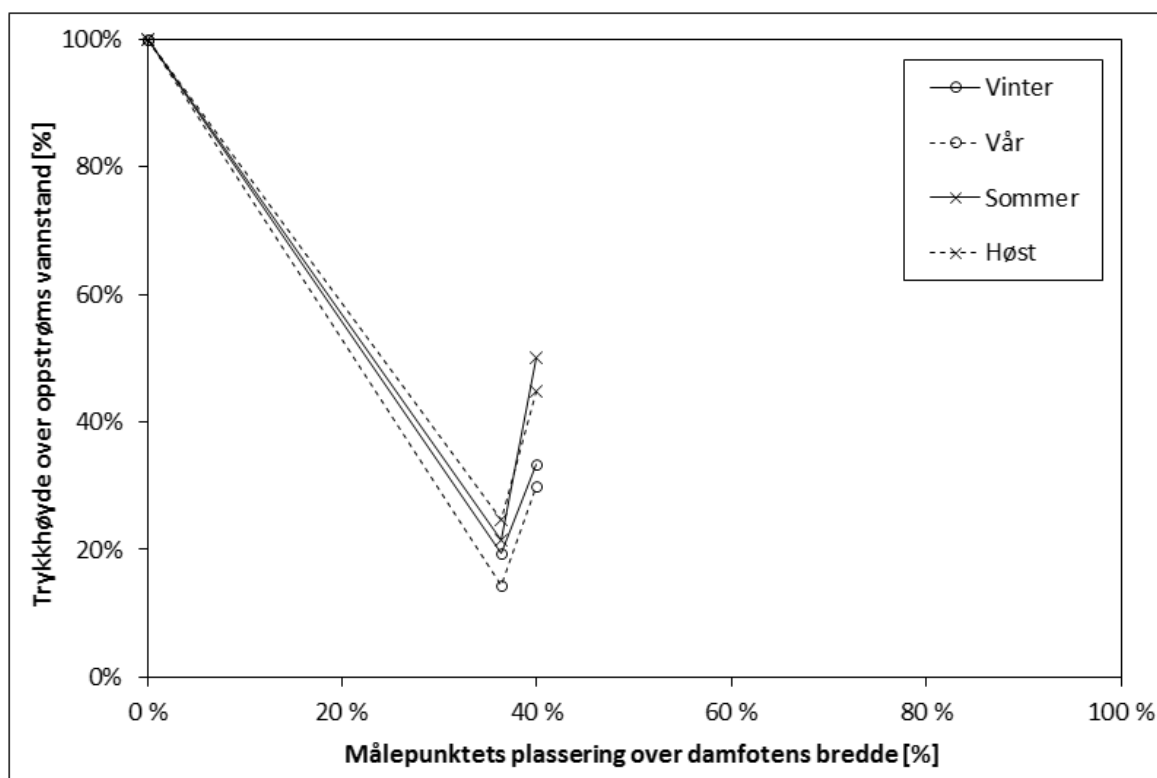
Figur E.26: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 15): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2009-12/2011



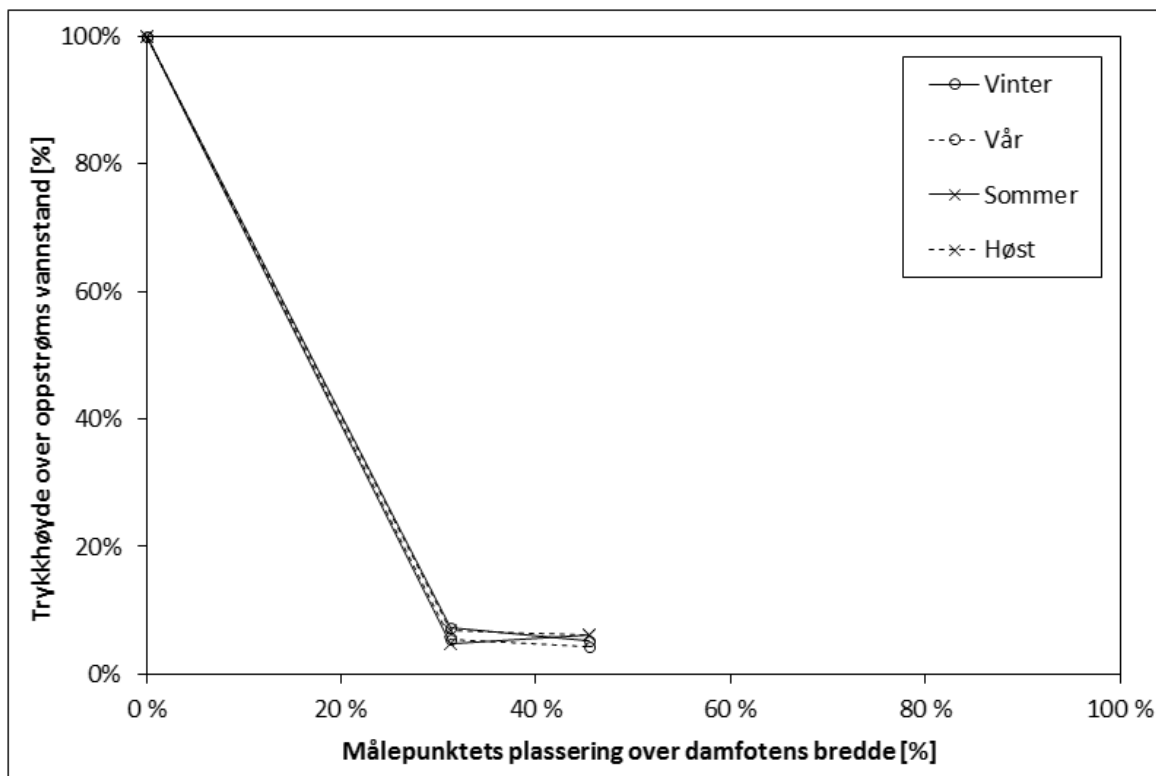
Figur E.27: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 19): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2009-12/2011



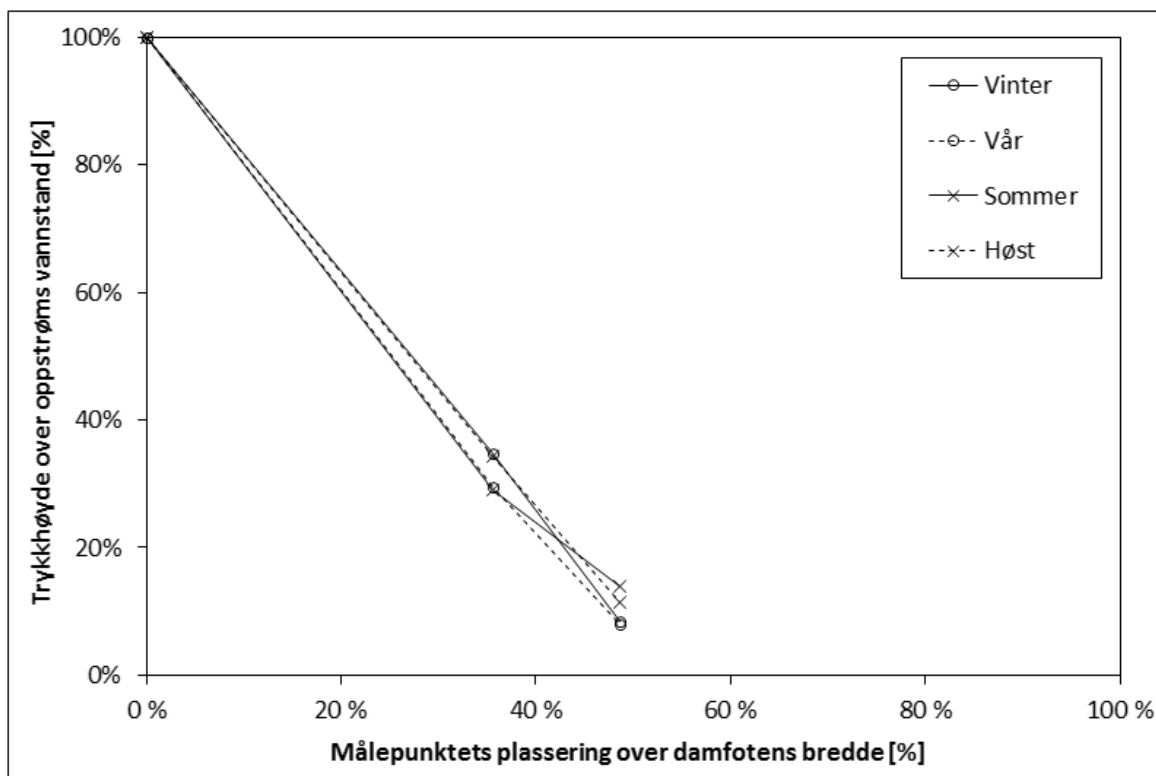
Figur E.28: Poretrykk og vannstandsendringer (snitt 21): Vannstand i magasin og trykkehøyder for poretrykket i perioden 01/2009-12/2011



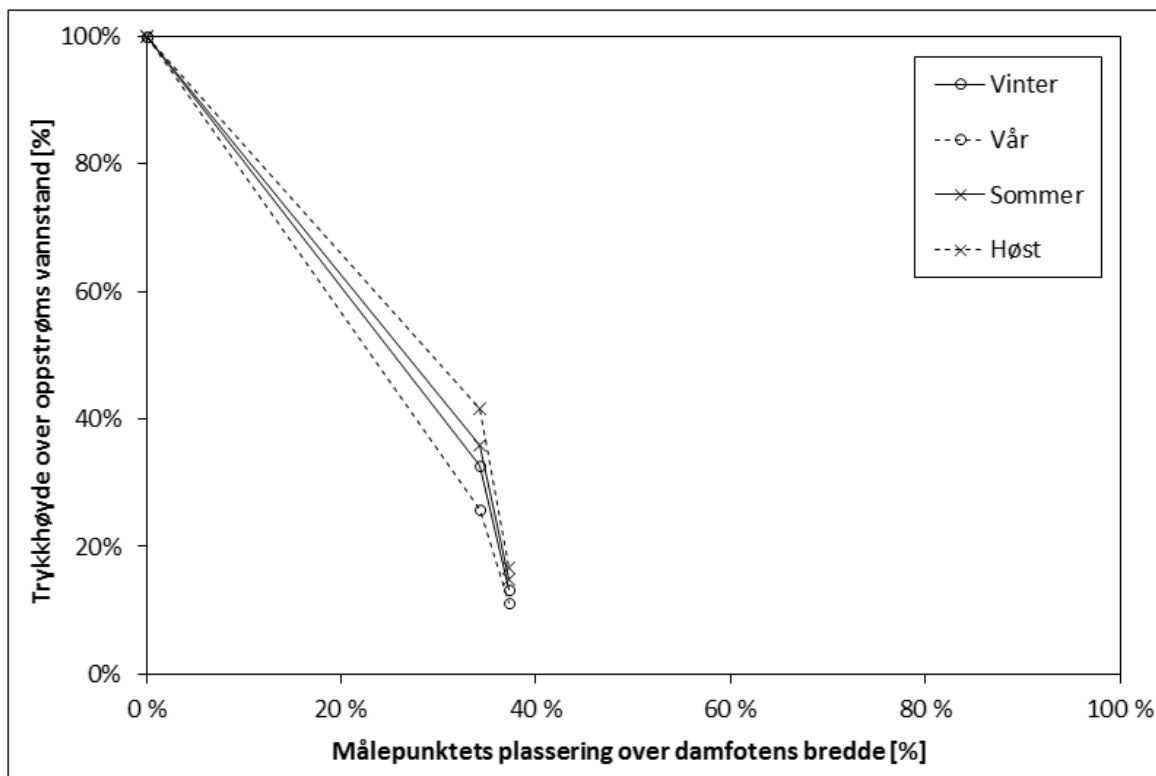
Figur E.29: Poretrykk og temperaturendring (snitt 7): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 01/2009-12/2011



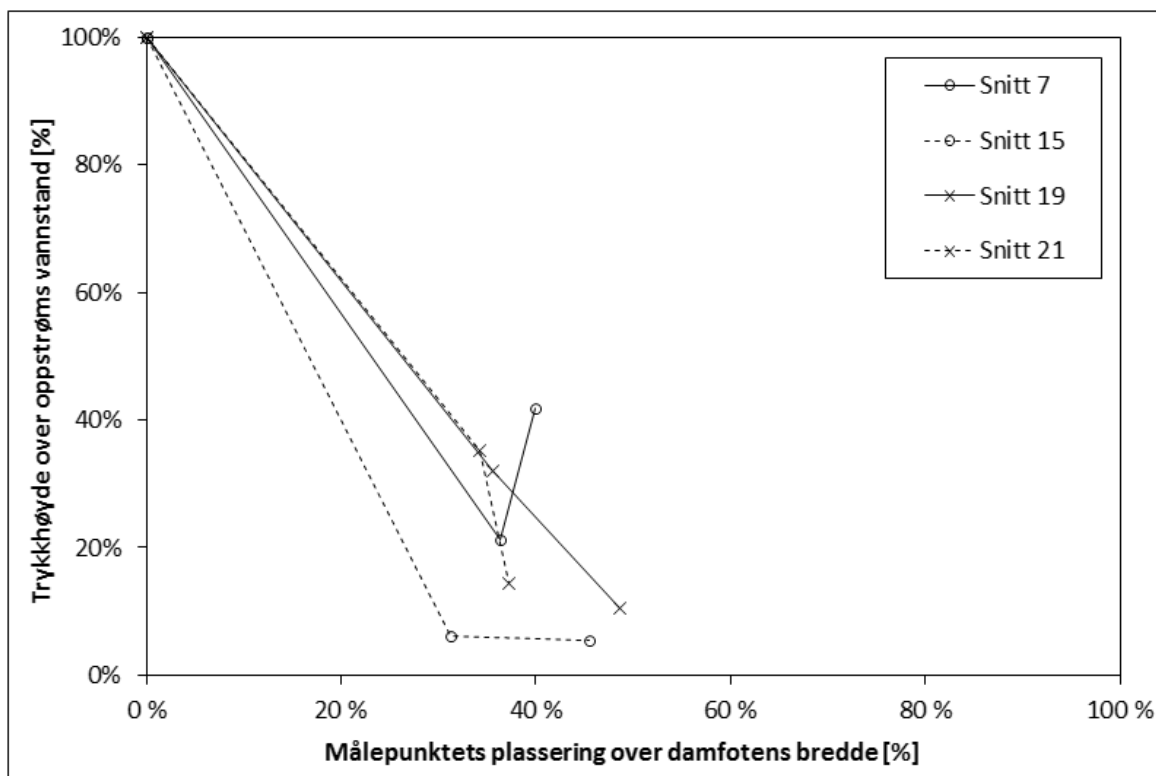
Figur E.30: Poretrykk og temperaturendring (snitt 15): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 01/2009-12/2011



Figur E.31: Poretrykk og temperaturendring (snitt 19): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 01/2009-12/2011



Figur E.32: Poretrykk og temperaturendring (snitt 21): Gjennomsnittsmålinger over sesonger i perioden 01/2009-12/2011



Figur E.33: Generelt poretrykksdiagram (alle snitt): Gjennomsnittsmålinger for hvert målepunkt i perioden 01/2009-12/2012

