



NVE



EKSTERN RAPPORT NR. 15 / 2024

# Poretrykksmålinger på dammer

---

SKREVET AV NGI

# NVE Ekstern rapport nr. 15/2024

## Poretrykksmålinger på dammer

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat  
Forfatter: Norges Geotekniske Institutt (NGI) v. Arnkjell Løkke  
Omslagsbilde: Amundvatnet. Foto: Tromsø kommune

ISBN: 978-82-410-2380-4  
ISSN: 2535-8235  
Saksnummer: 202304516

**Sammendrag:** Rapporten oppsummerer relevant informasjon og kunnskap om opptrykk og poretrykk. Dette inkluderer å forstå hvordan opptrykk og poretrykk oppstår, hvordan de påvirker dammers stabilitet, hvilke faktorer påvirker lastenes størrelse og utbredelse, hvilke metoder som er mest effektive for å måle og overvåke disse lastene, og hvordan man kan sette grenseverdier for målingene. Litteraturstudien har også sett på internasjonale regelverk og praksiser for å forstå hvordan ulike land og organisasjoner håndterer disse problemene. Rapporten inneholder oppsummeringer og anbefalinger basert på relevant litteratur, og har en omfattende liste med referanser for videre lesing.

**Emneord:** Opptrykk, Poretrykk, Dam, Damsikkerhet

Norges vassdrags- og energidirektorat  
Middelthuns gate 29  
Postboks 5091 Majorstuen  
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95  
E-post: [nve@nve.no](mailto:nve@nve.no)  
Internett: [www.nve.no](http://www.nve.no)

Innholdet kan brukes videre mot kreditering.

April 2024

# Forord

Damsikkerhetsforskriften har bestemmelser om at vassdragsanlegg skal dimensjoneres og kontrolleres for naturgitte laster, blant annet poretrykk og opptrykk. Disse er laster forbundet med betydelig usikkerhet, og kunnskapen om slike laster er fortsatt utilstrekkelig.

Denne rapporten oppsummerer arbeidet i forsknings- og utviklingsprosjektet "Poretrykksmålinger på dammer" som er utført av Norges Geotekniske Institutt (NGI) på oppdrag fra Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE). Hensikten med prosjektet er å forbedre kunnskapsgrunnlaget for poretrykk og opptrykk og hvordan dette kan måles på norske dammer. Prosjektet er utført som en litteraturstudie som har gjennomgått og analysert eksisterende forskning, publikasjoner, rapporter, veiledere, retningslinjer og studier relatert til opptrykk og poretrykk for dammer. Siden det eksisterer lite norsk litteratur om poretrykk og opptrykk, er studien i hovedsak basert på internasjonal forskning og litteratur.

Oslo, april 2024

Kristian Markegård  
direktør  
Tilsyns- og beredskapsavdelingen

Lars Grøttå  
seksjonssjef  
Seksjon for damsikkerhet

*Dokumentet sendes uten underskrift. Det er godkjent i henhold til interne rutiner*



RAPPORT

# Poretrykksmålinger på dammer

SLUTTRAPPORT FOU PROSJEKT

DOK.NR. 20230226-01-R

REV.NR. 0 /

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.



## Prosjekt

Prosjekttittel: Poretrykksmålinger på dammer  
Dokumenttittel: Sluttrapport FoU prosjekt  
Dokumentnr.: 20230226-01-R  
Dato: 2024-03-25  
Rev.nr. / Rev.dato: 0

## Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)  
Kontaktperson: Goranka Grzanic  
Kontraktreferanse: FoU Prosjekt 2023-4

## for NGI

Prosjektleder: Arnkjell Løkke  
Utarbeidet av: Arnkjell Løkke  
Kontrollert av: Per Sparrevik, Goranka Grzanic (NVE),  
Kjell Molkersrød (NVE)

## Sammendrag

Damsikkerhetsforskriften har bestemmelser om at vassdragsanlegg skal dimensjoneres og kontrolleres for naturgitte laster, blant annet poretrykk og opptrykk. Disse er laster forbundet med betydelig usikkerhet, og kunnskapen om slike laster er fortsatt utilstrekkelig.

Denne rapporten oppsummerer arbeidet i forsknings- og utviklingsprosjektet "Poretrykksmålinger på dammer" som er utført av Norges Geotekniske Institutt (NGI) på oppdrag fra Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE). Hensikten med prosjektet er å forbedre kunnskapsgrunnlaget for poretrykk og opptrykk og hvordan dette kan måles på norske dammer. Prosjektet er utført som en litteraturstudie som har gjennomgått og analysert eksisterende forskning, publikasjoner, rapporter, veiledere, retningslinjer og studier relatert til opptrykk og poretrykk for dammer. Siden det eksisterer lite norsk litteratur om poretrykk og opptrykk, er studien i hovedsak basert på internasjonal forskning og litteratur.

Målet med litteraturstudien har vært å samle og oppsummere relevant informasjon og kunnskap om emnet. Dette inkluderer å forstå hvordan opptrykk og poretrykk oppstår, hvordan de påvirker dammers stabilitet, hvilke faktorer påvirker lastenes størrelse og utbredelse, hvilke metoder som er mest effektive for å måle og overvåke disse lastene, og hvordan man kan sette grenseverdier for målingene. Litteraturstudien har også sett på internasjonale regelverk og praksiser for å forstå hvordan ulike land og organisasjoner håndterer disse problemene. Rapporten inneholder oppsummeringer og anbefalinger basert på relevant litteratur, og har en omfattende liste med referanser for videre lesing.

Selv om denne rapporten dekker en rekke emner relatert til damsikkerhet, er hovedfokuset på poretrykk / opptrykk og måling av disse. Mer overordnede temaer som overvåking av dammer, stabilitetsberegninger, fundamentstabilitet, og fastsettelse av grenseverdier for sikkerhet og beredskap, er også viktige for damsikkerheten i sin egen rett, men er i denne rapporten kun omhandlet i konteksten av poretrykk og opptrykk.

## Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>4</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>9</b>
1.1 Bakgrunn og hensikt	9
1.2 Metode	9
1.3 Rapportens utforming	9
<b>2 Overvåking og instrumentering av dammer</b>	<b>11</b>
2.1 Formål med overvåking av dammer	11
2.2 Rollen av overvåking i damsikkerhetsarbeidet	12
2.3 Overvåking i ulike faser av dammens levetid	15
2.4 Observasjonsmetoden	16
<b>3 Overvåking og måling av poretrykk</b>	<b>18</b>
3.1 Poretrykk	18
3.2 Måling av poretrykk	26
3.3 Hensikt med måling av poretrykk	35
<b>4 Fundamentstabilitet og definisjon av «god berggrunn»</b>	<b>41</b>
4.1 Om begrepet «god berggrunn»	41
4.2 Stabilitet av berg og damfundament	42
4.3 Metoder for bergklassifisering	43
4.4 Nødvendige undersøkelser for å avgjøre bergkvalitet	49
4.5 Anbefalinger for vurdering av berggrunn	52
<b>5 Plan for instrumentering</b>	<b>54</b>
5.1 Overordnet	54
5.2 Identifisering av bruddmekanismer (PFM)	55
5.3 Målbare parametere	57
5.4 Viktigheten av visuelle observasjoner	58
5.5 Valg av overvåkingsprogram	59
5.6 Minimumskrav til instrumentering	68
5.7 Oppdatering og revisjon	69
<b>6 Fastsettelse av grenseverdier for sikkerhet og beredskap</b>	<b>70</b>
6.1 Overordnet	70
6.2 Relasjon til konstruktiv sikkerhet og bruddmekanismer	71
6.3 Relasjon til varsling og beredskap	72
<b>7 Konklusjoner og videre forskningsbehov</b>	<b>75</b>
7.1 Oppsummering og konklusjoner	75
7.2 Videre forskningsbehov	76
<b>8 Referanser</b>	<b>78</b>

## Kontroll- og referanseside



## Forkortelser og nøkkelbegreper

**Bruddmekanisme** (engelsk: failure mode): En spesifikk kjede med hendelser som medfører et dambrudd.

**Dambrudd:** Brudd / ødeleggelse av en dam. Som oftest definert som "ukontrollert tap av vannet i magasinet".

**Damsikkerhetsforskriften:** "Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg", populært omtalt som damsikkerhetsforskriften. Norsk forskrift som setter krav til sikkerhet ved vassdragsanlegg med formål å forebygge skade på mennesker, miljø og eiendom.

**Drenasje, drenasjesystem:** Tiltak med hensikt å kontrollere gjennomstrømning i løsmasser eller berg og redusere poretrykket. Vertikale drenasjehull bores ofte i fundamentet nær oppstrøms side av betongdammer for å redusere opptrykket i bergmassen. For fyllingsdammer plasseres ofte drenasje nedstrøms tetningskjernen (eller ved nedstrøms damtå) for å samle opp lekkasjevann.

**DMR (Dam Mass Rating):** Klassifiseringssystem for vurdering av kvalitet og stabilitet av damfundamenter (Romana, 2003).

**DQC (Data Quality Cycle):** Datakvalitetsprosessen. Rammeverk for å sikre kvaliteten på måledata gjennom ulike faser som planlegging, installasjon, drift, og analyse av måledata (Ljunggren, et. al., 2023).

**DSHP (Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv):** Prosjekt i regi av Fornybar Norge som har som mål å etablere og bruke kunnskap som utvikler damsikkerhet i et samfunnsoptimalt perspektiv.

**FERC (Federal Energy Regulatory Commission):** En av flere regulerende myndigheter for dammer i USA.

**Fully grouted method:** Metode for installasjon av piezometre der borehullet fylles helt med en homogen blanding av grout (injeksjonsmasse). Gir mulighet for installasjon av flere piezometre i samme borehull.

**Grenseverdi:** En (måle)verdi som, når overskredet, indikerer økt fare i forbindelse med drift og / eller stabilitet av dammen, og iverksetter en spesifikk handling. Omtales i damsikkerhetsforskriften § 7-2 og § 7-4.

**Grout (injeksjonsmasse):** En type tynn mørtel som brukes til å fylle borehull og sprekker i jord eller stein. Som regel en blanding av sement, bentonitt og vann.

**ICOLD (International Commission on Large Dams):** Den internasjonale damkomitéen.

**Injeksjonsskjerm:** En skjerm / barriere opprettet ved å injisere et materiale (som regel grout) i berg eller løsmasser for å redusere og forhindre vanngjennomstrømning.

**Innstillingstid:** Tiden det tar for poretrykket i grunnen å stabilisere seg etter en ytre endring.

**NGF:** Norsk Geoteknisk Forening.

**NGI:** Norges Geotekniske Institutt.

**NGU:** Norges geologiske undersøkelse.

**NVE:** Norges vassdrags- og energidirektorat.

**Observasjonsmetoden:** Designmetode som innebærer å observere og iterativt justere et design basert på faktiske forhold og målt oppførsel under bygging og drift. Først formulert av Peck (1969).

**Opptrykk** (engelsk: uplift): Trykket utøvet av porevann mot undersiden av en betongdam (eller mot et sprekkesett i betongen eller fundamentet). Opptrykk omtales som "oppdrift" i NVEs veileder.

**Overvåking** (engelsk: surveillance): Innsamling av informasjon om et objekt, i denne sammenheng en dam eller damanlegg. Omfatter visuell inspeksjon, funksjonstesting og instrumentering.

**PFMA (Potential Failure Mode Analysis):** Analysemetode for å identifisere og beskrive mulige bruddmekanismer. Se også bruddmekanisme.

**Piezometer:** Instrument for måling av poretrykk i grunnen.

**Poretrykk (porevannstrykk):** Trykket i vannet som opptrer i mellomrommet (porerommet) mellom partikler i løsmasser eller i en bergmasse.

**Q-systemet:** Et klassifiseringssystem for stabilitet av bergmasser og undergrunn (Barton, Lien og Lunde, 1974; NGI, 2015).

**Responstid:** Tiden det tar for et piezometer å reagere på en endring i poretrykket.

**RMR (Rock Mass Rating):** Et klassifiseringssystem for stabilitet av bergmasse, utviklet av Bieniawski (1973).

**RQD (Rock Quality Designation):** Et mål på kvaliteten på en bergkjerne tatt fra et borehull (Deere et. al., 1967).

**Terskelverdi:** En verdi som, når overskredet, indikerer en påbegynnende eller fortsettende trend, som kan utløse behov for ytterligere undersøkelse eller evt. en handling.

**UCS (Uniaxial Compressive Strength):** Mål på bruddstyrken til en bergprøve, definert som enaksial trykkfasthet målt på en sylindrisk prøve i en enaksial trykktest med null sideveis trykk.

**USBR (US Bureau of Reclamation):** Føderal etat og en av de største dameierne i USA.

**USACE (US Army Corps of Engineers):** Del av det amerikanske forsvaret og en av de største dameierne i USA.

# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn og hensikt

Damsikkerhetsforskriften har bestemmelser om at vassdragsanlegg skal dimensjoneres og kontrolleres for (blant annet) naturgitte laster. Det er derfor nødvendig med en analyse av hvilke laster og lastkombinasjoner som er aktuelle ved vassdragsanlegget. En av disse lastene er poretrykk / opptrykk, som oppstår som følge av vanntrykk i damkropp og damfundament, og påvirkes av klimatiske, mikroklimatiske og topografiske forhold. Poretrykk og opptrykk er laster forbundet med betydelig usikkerhet og kunnskapen om disse lastene er fortsatt utilstrekkelig.

FoU-prosjektet "Poretrykksmålinger på dammer" er utført av Norges Geotekniske Institutt (NGI) på oppdrag fra Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE). Hensikten med FoU-prosjektet er å forbedre kunnskapsgrunnlaget for poretrykk og opptrykk og hvordan dette kan måles på norske dammer. Bedre kunnskap om dette temaet vil kunne bidra til økt sikkerhet ved fornyelse av eksisterende dammer, og en optimalisert utforming av nye dammer. Dette kan videre redusere behovet for natur- og arealinngrep og redusere dammenes klimafotavtrykk.

## 1.2 Metode

Prosjektet er utført som en litteraturstudie som har gjennomgått og analysert eksisterende forskning, publikasjoner, rapporter, veiledere, retningslinjer og studier relatert til opptrykk og poretrykk for dammer. Siden det eksisterer lite norsk litteratur om poretrykk og opptrykk er studien i hovedsak basert på internasjonal forskning og litteratur.

Målet med litteraturstudien har vært å samle og oppsummere relevant informasjon og kunnskap om emnet. Dette inkluderer å forstå hvordan opptrykk og poretrykk oppstår, hvordan de påvirker dammers stabilitet, hvilke faktorer påvirker lastenes størrelse og utbredelse, hvilke metoder som er mest effektive for å måle og overvåke disse lastene, og hvordan man kan sette grenseverdier for målingene. Litteraturstudien har også sett på internasjonale regelverk og praksiser for å forstå hvordan ulike land og organisasjoner håndterer disse problemene.

## 1.3 Rapportens utforming

Rapporten er delt inn i fem hovedkapitler. Kapittel 2 diskuterer overordnet overvåking og instrumentering av dammer, og ser på formålet med overvåkingen, rollen av overvåking i damsikkerhetsarbeidet, og overvåking i ulike faser av dammens levetid. Kapittel 3 fokuserer på hvordan man kan, og i hvilke tilfeller man bør, overvåke og måle poretrykk ved dammer. Kapittel 4 diskuterer fundamentstabilitet og definisjonen av "god berggrunn". Kapittel 5 presenterer hvilke grunnprinsipper som bør følges ved

utarbeidelse av en plan for instrumentering. Kapittel 6 diskuterer kort fastsettelse av grenseverdier for poretryksmålinger i konteksten av sikkerhet og beredskap. Rapporten inneholder underveis oppsummeringer og anbefalinger basert på relevant litteratur, og har i Kapittel 8 en omfattende liste med referanser for videre lesing.

Selv om denne rapporten dekker en rekke emner relatert til damsikkerhet, er hovedfokuset på poretrykk / opptrykk og måling av disse. Overordnede temaer som overvåking av dammer, stabilitetsberegninger, fundamentstabilitet, og fastsettelse av grenseverdier for sikkerhet og beredskap, er også viktige for damsikkerheten i sin egen rett, men er i denne rapporten kun omhandlet i konteksten av poretrykk og opptrykk.

## 2 Overvåking og instrumentering av dammer

### 2.1 Formål med overvåking av dammer

Formålet med instrumentering og overvåking av dammer kan grovt sett inndeles i tre kategorier (NGI, 1994):

1. Å overvåke dammens tilstand og oppførsel av sikkerhetsmessige årsaker.
2. Å verifisere at dammens faktiske oppførsel er i tråd med de forutsetningene som ble lagt til grunn ved prosjektering.
3. Å øke den generelle forståelsen av dammers oppførsel.

For damsikkerhetsarbeidet er den første av disse, sikkerhetsbasert instrumentering og overvåking, den viktigste. Dette innebærer å innhente informasjon om dammens nåværende tilstand, samt å gi varsler om mulige fremtidige tilstander som kan ha sikkerhetsmessige og beredskapsmessige implikasjoner. Tilstander som kan medføre sikkerhetsrisiko for dammer kan være av to typer:

- En *plutselig og uforutsigbar* økning i belastninger på dammen (f.eks. flom eller jordskjelv), eller en plutselig reduksjon i dammens kapasitet (f.eks. sprekker eller hydraulisk splitting).
- En *gradvis* forringelse av damkonstruksjonen. Dette kan skyldes faktorer som ytre eller indre erosjon, økning i poretrykk, setninger, alkalireaksjoner i betong, korrosjon, utmatting, etc.

I den første gruppen er rask varsling til driftspersonell kritisk for å tidsnok kunne iverksette nødvendige tiltak. Tid er her en avgjørende faktor, og overvåkingsprogrammet må være designet for å gi øyeblikkelig alarm ved detektering av slike forhold. I den andre gruppen har man mer tid til å identifisere og analysere problemet, samt vurdere hvilke konsekvenser det kan ha for dammens integritet over tid. I slike tilfeller kan en mer metodisk tilnærming til overvåking og vedlikehold planlegges. Dette gir mulighet for detaljert analyse av langtidstrender og potensielle svakheter, slik at forebyggende vedlikehold og reparasjoner kan planlegges og gjennomføres på en effektiv måte. For eksempel kan setninger i en fyllingsdam øke sannsynligheten for overtopping; økt lekkasje eller turbiditet kan indikere indre erosjon / piping; unormal bevegelse av betongdammer kan indikere glidning eller problemer med alkali-aggregatreaksjoner. Denne forskjellen har direkte implikasjoner for valg av instrumenteringsløsning og overvåkingsprosedyrer.

Overvåkingsprogrammet må planlegges og utføres nøye i henhold til definerte mål. Grunnfilosofien er at hvert instrument i en dam skal ha et spesifikt formål. Hvis det ikke har et spesifikt formål, bør instrumentet ikke installeres, som Prof. Ralph B. Peck skriver i sin artikkel fra 2001 om instrumentering for fyllingsdammer (Peck, 2001):

*"Certainly, the fundamental rule today should be that no instrument should be installed that is not needed to answer a specific technical question pertinent to*

*the safe operation of the dam. (...) Monitoring of every dam is mandatory because dams change with age and may develop defects. There is no substitute for systematic and intelligent surveillance. But monitoring and surveillance are not synonymous with instrumentation."*

Det er videre viktig at instrumenteringen reflekterer hvilke mulige bruddmekanismer som er relevante for dammen (fra engelsk: Potential Failure Modes, PFM, se f.eks. FERC (2017, 2021) for en detaljert beskrivelse). Dette innebærer en tilpasset instrumentering basert på dammens unike egenskaper og risikoprofil. Instrumenteringen (og overvåkingen) gir data som vanligvis brukes til å:

- Bekrefte antakelser benyttet i design og analyse.
- Vurdere oppførselen av dammen under bygging, første gangs oppfylling og drift.
- Observere oppførsel av geologisk og strukturell art.
- Vurdere oppførselen med tanke på mulige bruddmekanismer for dammen.

Instrumentering og systematisk innsamling av slik måledata og målehistorikk gir også viktig bakgrunnsmateriale for gjennomføring av risikovurdering av dammer. Dette gjelder ikke bare overvåking av nåværende tilstand for dammen, men gir også en dypere forståelse av hvordan dammen har reagert på ulike belastninger og forhold over tid gjennom *trendanalyse*.

De fleste retningslinjer for instrumentering og overvåking av dammer påpeker at instrumenter og innsamling av måledata i seg selv forbedrer ikke damsikkerheten. Federal Energy Regulatory Commission (FERC, 1995), som regulerer en stor mengde dammer i USA, påpeker f.eks. i sine retningslinjer for instrumentering og overvåking at instrumenter må nøye velges, plasseres og installeres. Data må samles inn med omtanke, og nøye prosesseres, analyseres og visualiseres, og dette må skje innenfor en rimelig tidsramme for dammens sikkerhet. Et dårlig planlagt eller dårlig gjennomført overvåkingsprogram vil skape store mengder unødvendige data som dameieren vil måtte kaste bort tid og penger på å samle inn og tolke. Dette kan resultere i forvirring rundt dammens faktiske oppførsel og at man helt eller delvis gir opp overvåkingsprogrammet.

## 2.2 Rollen av overvåking i damsikkerhetsarbeidet

### 2.2.1 Internasjonal praksis

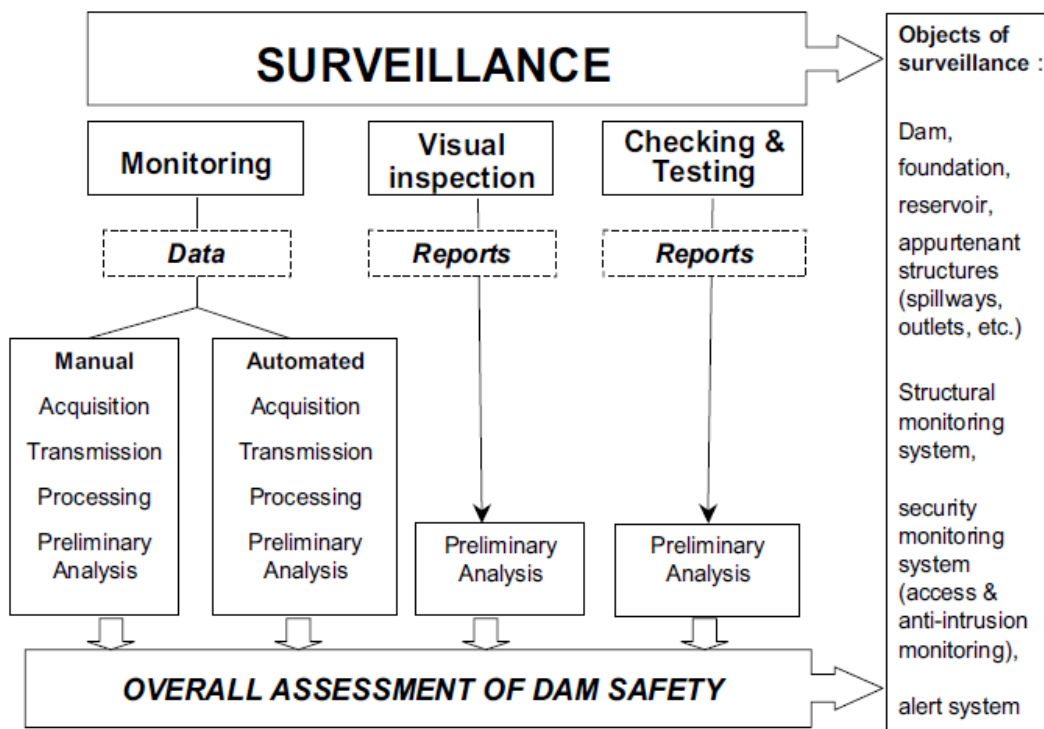
Instrumentering og overvåking av dammer spiller en viktig rolle i damsikkerhetsarbeidet internasjonalt. Den internasjonale damkomiteén for store dammer, ICOLD (International Commission on Large Dams), har en dedikert teknisk komité som fokuserer på overvåking, kalt Dam Surveillance (tidligere Dam Monitoring). Komiteén gir blant annet ut retningslinjer (bulletenger) for damovervåking som har spesifikke anbefalinger for de ulike komponentene som inngår i et overvåkingsprogram.

I bulleteng 158 om damovervåking fra ICOLD som kom ut i 2018 (ICOLD, 2018) beskrives formålet for damovervåkingen som "å gi en tidsriktig og nøyaktig diagnose av

dammens oppførsel som tillater å forebygge uønskede konsekvenser". Overvåkingsprogrammet må utformes med tanke på potensielle bruddmekanismer forbundet med dammen, og bør være i stand til å identifisere enhver unormal oppførsel som kan føre til en reduksjon av damsikkerheten. Dette inkluderer overvåking av dammens struktur, fundament, magasin, samt systemer for vurdering av sikkerhet og varslingssystemer. Bulletengen definerer tre hoveddeler av overvåkingen (Figur 2-1):

1. Instrumentering ("monitoring")
2. Visuelle observasjoner ("visual inspections")
3. Funksjonstesting ("checking and testing").

Til sammen gir disse data og rapporter bidrag til den overordnede vurderingen av damsikkerheten. Det finnes krav eller veiledere knyttet til instrumentering og overvåking av dammer i nær sagt alle land som har et nasjonalt regelverk og / eller veiledere for damsikkerhet.



Figur 2-1 Innhold i damovervåking (dam surveillance). Fra ICOLD (2018).

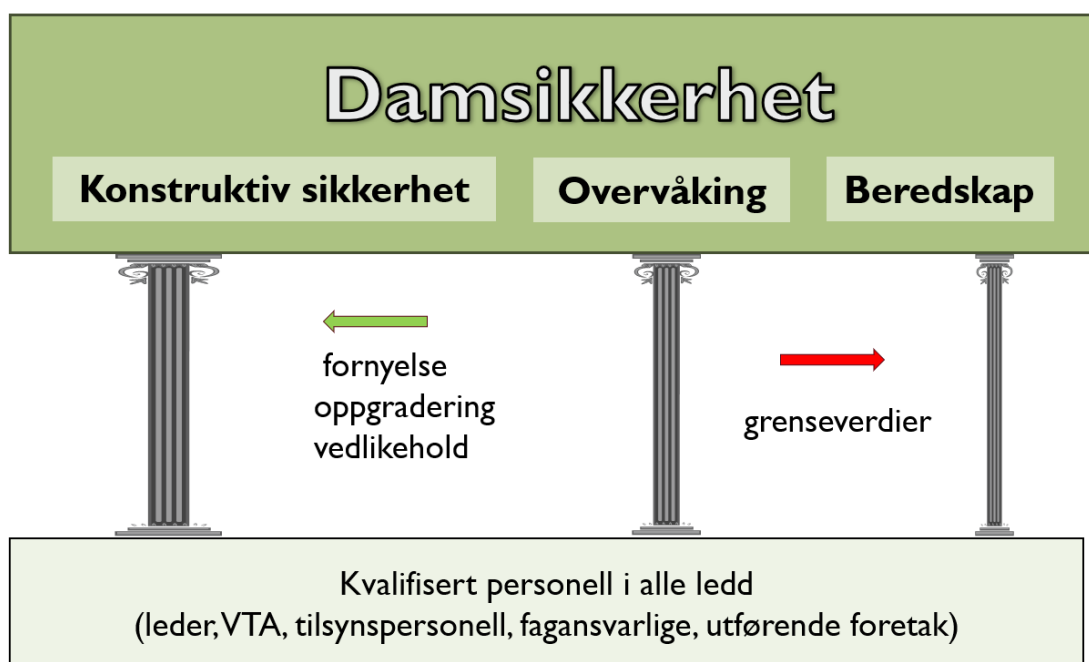
### 2.2.2 Norsk forvaltning

I Norge ivaretas sikkerheten til vassdragsanlegg gjennom et rammeverk som hviler på tre hovedpilarer (Figur 2-2): konstruktiv sikkerhet, overvåking, og beredskap. Disse er understøttet av et gjennomgående krav til faglige kvalifikasjoner for personell i alle ledd. Overvåkingen er en sentral del av damsikkerhetsarbeidet og relaterer til konstruktiv



sikkerhet ved at det fanger opp behov for fornyelse, oppgradering og vedlikehold, samt til beredskap gjennom etablering av grenseverdier for å iverksette tiltak og varsler dersom disse overskrides.

Disse pilarene forholder seg direkte til de lovfestede kravene for sikkerhet nedfelt i "Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg", populært omtalt som damsikkerhetsforskriften. Dette gjelder især forskriftskrav for overvåking, som beskrevet i damsikkerhetsforskriften § 7-2, og for beredskap som beskrevet i § 7-4. Damsikkerhetsforskriften definerer begrepet overvåking til å omfatte visuell inspeksjon, funksjonstesting, og instrumentering.



Figur 2-2 Illustrasjon av rammeverk for damsikkerhetsarbeidet i Norge. Figur: NVE.

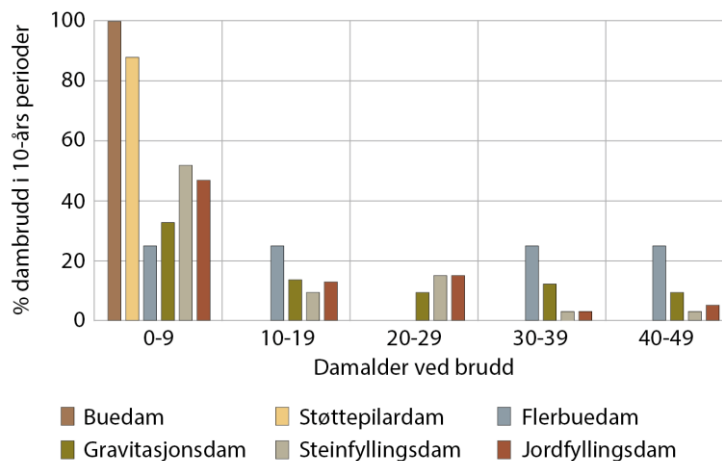
Det er lang tradisjon med bruk av overvåking i norsk damsikkerhetsarbeid. Vassdragsvesenets kontrollavdeling (senere Vassdragstilsynet, nå seksjon for damsikkerhet i NVE), ble opprettet allerede i 1909, og det ble satt vilkår om at vassdragsanlegg og tilhørende dammer skulle bygges på en solid måte (NVE, 2009). Instrumentering og overvåking av dammer var en sentral del under byggingen av store dammer og vannkraftverk i Norge i "storhetstiden" for dambygging fra ca. 1960-tallet til ca. tidlig 1990-tallet. Første forskrift for dammer i Norge trådte i kraft i 1981 og innførte flere krav til overvåking av dammer under drift og program for tilsyn, drift og vedlikehold. I senere revisjoner er disse kravene opprettholdt og videreutviklet. Senere har det også kommet retningslinjer for overvåking i 2005, som ble erstattet av veileder for overvåking av vassdragsanlegg i 2019 (NVE, 2019).

I senere tid kan det virke som at den norske vassdragsbransjen har lagt mer vekt på konstruktiv sikkerhet som hovedpilaren i damsikkerhetsarbeidet. Det kan spekuleres i

hva dette kan skyldes, men noen forhold som antagelig har medvirket er den (relativt sett) lavere interessen for instrumentering og overvåking under normal drift sammenlignet med første oppfylling og dammens første leveår, mindre kompetanse om instrumentering og overvåking hos dameier og rådgivere etter at de største damutbyggingene var ferdige, og en gradvis overgang til et mer deskriptivt og deterministisk regelverk for konstruktiv sikkerhet. Allikevel må det påpekes at det i nåværende forskrifter og veiledere er satt klare krav til overvåking og hvordan dette skal planlegges, utføres og følges opp som en viktig del av damsikkerhetsarbeidet.

### 2.3 Overvåking i ulike faser av dammens levetid

Internasjonal dambruddsstatistikk (ICOLD, 2020) viser at de aller fleste dambrudd skjer i løpet av første gangs oppfylling av magasinet, eller i løpet av de første 10 årene etter dette (Figur 2-3). Dette er derfor den mest kritiske fasen i dammens levetid. For etablerte dammer har man mer data og erfaring med drift, som kan bidra til en mer informert tilnærming til overvåking og vedlikehold. Det er derfor fornuftig å ha forskjellige anbefalinger og krav til instrumentering for eksisterende dammer sammenlignet med nye dammer. Men, etter hvert som dammene eldes, kan behovet for forbedret eller utvidet overvåking og instrumentering oppstå på grunn av aldringsprosesser og slitasje. Det kan også være forhold som tilsier behov for økt overvåking og instrumentering i driftsfasen, slik som ombygging av dammen, endret virkemåte, eller hvis magasinet tømmes og skal fylles på nytt.



Figur 2-3 Antall dambrudd for ulike damtyper pr. 10-års intervall av dammens levetid (ICOLD, 2020). De aller fleste dambrudd skjer i løpet av dammens 10 første leveår.

De ulike behovene gjennom dammens levetid reflekteres i de fleste internasjonale anbefalinger for overvåking. FERC sine retningslinjer har f.eks. lavere omfang av minimumsinstrumentering for eksisterende dammer sammenlignet med nye dammer (FERC, 1995). Dette skyldes at instrumenteringen som er spesifikt rettet mot å overvåke bygging og første gangs oppfylling ikke er like relevant i driftsfasen, at ettermontering

av instrumenter kan være vanskelig og kostbart (og er i mange tilfeller umulig), og at hovedtrekkene til dammens oppførsel allerede er kjent. Eksisterende instrumenter bør fortsatt avleses i driftsfasen så langt de gir nyttig informasjon, men dersom eksisterende instrumentering ikke lenger gir nyttig eller pålitelig informasjon, og dataene ikke er kritiske for damsikkerheten, bør det avvikles. Det påpekes allikevel i retningslinjene at et minimumsnivå for instrumentering må bestå også i driftsfasen, og at det bør etableres dersom det ikke allerede eksisterer.

Det kan også være ulike situasjoner som medfører behov for rehabilitering eller oppgradering av instrumenteringen for eksisterende dammer. Dette kan f.eks. være (Choquet, 2024):

- Utdaterte, upålitelige eller havarte instrumenter, kabler eller andre deler av instrumenteringssystemet.
- Økt informasjonsbehov og ønske om automatisering av datainnhenting.
- Begrenset omfang av opprinnelig instrumentering.
- Informasjon om nye bruddmekanismer som tidligere ikke var kjent.
- Endring i operasjonelle forhold eller laster (f.eks. som følge av klimaendringer).
- Aldringsprosesser i dammen, f.eks. alkalireaksjoner eller erosjon.
- Økt risiko for dammen pga. endringer i nedstrøms konsekvenser.
- Strengere krav fra myndighetene.

I Norge fastsetter damsikkerhetsforskriften § 7-2 minimumskrav til instrumentering for fyllingsdammer og betongdammer i driftsfasen. Ytterligere instrumentering kan være nødvendig under bygging eller første gangs oppfylling av nye dammer, eller ombygging av eksisterende dammer.

## 2.4 Observasjonsmetoden

Observasjonsmetoden (fra engelsk: The Observational Method) er en designmetode som innebærer å observere og iterativt justere et design basert på faktiske forhold og målt oppførsel under bygging og drift. Denne metoden ble først formulert av Ralph B. Peck i hans Rankine-forelesning i 1969 (Peck, 1969). Peck sin observasjonsmetode tillater en fleksibel tilnærming til design og bygging, der man først etablerer et design basert på tilgjengelig informasjon og en arbeidshypotese om forventet oppførsel. Deretter velger man parametere som skal måles under bygging med bakgrunn i arbeidshypotesen, etablerer en handlingsplan for endring av design basert på observasjonene, observerer valgte parametere under bygging, og gjør endringer basert på faktiske observasjoner av systemets oppførsel. Dette kan være spesielt nyttig i geoteknisk design av damfundamenter, der jord- og bergforholdene ofte er komplekse, usikre, og vanskelig å karakterisere på forhånd.

Observasjonsmetoden brukes hovedsakelig under bygging, men metoden kan under visse forutsetninger også anvendes i driftsfasen for eksisterende dammer. Bruk av observasjonsmetoden krever omfattende overvåking av viktige måleparametere og

handlingsplaner / beredskapsplaner for å gjøre endringer i design eller drift med bakgrunn i målt oppførsel, og må kunne håndtere potensielle problemer som kan oppstå. Et omfattende case-studie som viser bruk av observasjonsmetoden for dammer er Zelazny Most gruedam i Polen (Jamiolkowski, 2014; Lacasse og Høeg, 2019). Observasjonsmetoden ble her benyttet til bygging og drift av gruedammen i forbindelse med vedvarende problemer med store deformasjoner i damfundamentene. Observasjonsmetoden er også anerkjent som en av fire prosjekteringsmåter i Eurokode 7 for geoteknisk prosjektering (Eurokode 7, 2016).

Et annet eksempel på bruk av observasjonsmetoden kan være prosjektering av en ny gravitasjonsdam (eller ombygging av en eksisterende platedam til gravitasjonsdam). Før dammen er bygget kan man ikke med sikkerhet vite det resulterende opptrykket mot undersiden av dammen som følge av endrede poretrykk i berggrunnen. Dersom man ikke har informasjon om opptrykket, må designet som hovedregel baseres på konservative antagelser. Ved bruk av observasjonsmetoden kan man prosjektere dammen med mer realistiske antagelser om opptrykk, men under forutsetning av at dette måles under bygging, oppfylling og drift, og at man har mulighet til å gjøre tiltak (f.eks. ytterligere drenasje eller injisering) dersom målingene indikerer problematisk oppførsel.

Observasjonsmetoden er allikevel ikke uten fallgruver og begrensninger (Peck, 1969; Frank et. al., 2004):

- Metoden bør ikke brukes der en plutselig kollaps av konstruksjonen kan skje uten forvarsel.
- De valgte kontrollparameterne må være målbare, observasjonene må være pålitelige og evne å identifisere de viktigste fenomenene, og må rapporteres slik at det er mulig å sette i gang eventuelle tiltak raskt nok.
- Det kreves i de fleste tilfeller også godt faglig skjønn av de involverte i prosjektering, bygging og drift.

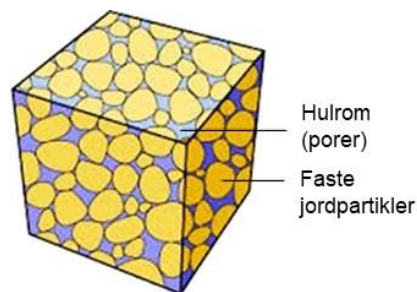
I eksempelet med gravitasjonsdammen ovenfor er det f.eks. viktig med gode vurderinger rundt hva en utforutsatt økning i opptrykk vil bety for dammens stabilitet og sikkerhet. I tillegg må det alltid sees kritisk på resultatene fra observasjonsmetoden pga. usikkerheter; f.eks. at poretrykket kun måles i utvalgte punkter og størrelsen kan variere mellom punktene. Forutsatte områder med trykkspenninger kan avvike fra virkeligheten, det kan oppstå delvis tetting av drenasjesystemet, injeksjonsskjermer kan ha varierende effekt, eller det kan være lokale uregelmessigheter i fundamentet.

Når det regnes med redusert opptrykk, skal det i norske dammer være anordnet et drenasjesystem utført etter anbefalinger i NVEs veiledere. Kontrollplan / målinger under bygging av drenasje må være fulgt opp, og plan for overvåking / instrumentering må være godt nok og fulgt opp og være tilpasset beredskapsplanen.

## 3 Overvåking og måling av poretrykk

### 3.1 Poretrykk

Poretrykk, eller porevannstrykk, defineres som trykket i vannet som opptrer i mellomrommet (porerom) mellom partikler i løsmasser eller i en bergmasse (Figur 3-1). Trykket i porevannet oppgis som oftest som kraft pr. overflate (Pa, eller kPa), eller som trykkehøyden oppgitt i meter vannsøyle. I en porøs bergart eller løsmasser med åpne porer og høy permeabilitet der porevannet kan flyte fritt til overflaten, vil poretrykket vanligvis være likt det hydrostatiske trykket (vekten av vannsøylen per flateareal).



Figur 3-1 Illustrasjon av løsmasse med faste jordpartikler og hulrom (porer). Dersom hulrommene er vannfylt representerer poretrykket trykket i dette vannet. Figur fra Sparrevik (2022).

Ved en dam varierer vanligvis poretrykket fra magasin vannstanden på oppstrøms side av dammen, til vannstanden til bakvannet eller atmosfærisk trykk på nedstrøms side. Denne forskjellen i vannivået skaper en gradient i poretrykket gjennom damkroppen og i berget / løsmassene i damfundamentet, der trykket er høyest ved magasinet og avtar gradvis i nedstrøms retning (Figur 3-2). Denne forskjellen i poretrykk fra oppstrøms side til nedstrøms side skaper krefter på dammen som må tas hensyn til i stabilitetsanalysene.

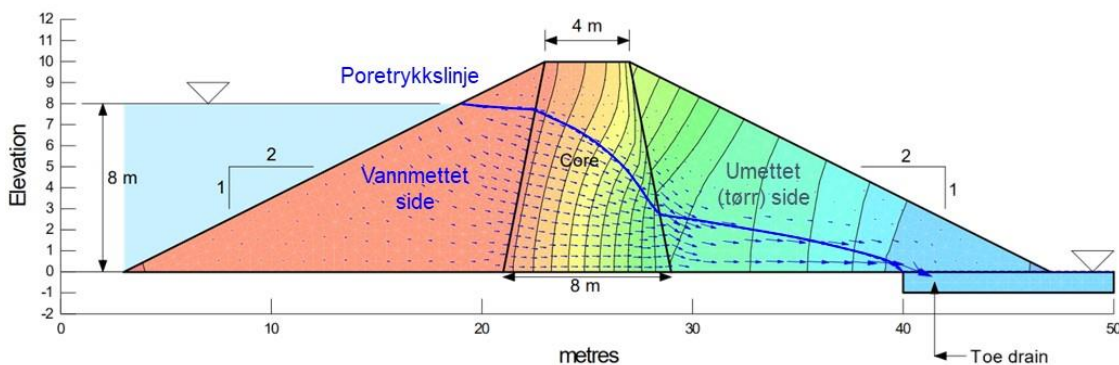
Formen til poretrykkslinjen i en fyllingsdam avhenger av flere faktorer, mest viktigst er: vannhøyden i magasinet, permeabiliteten og porøsiteten til materialene, forskjellen mellom horisontal og vertikal permeabilitet, og lokale forskjeller i permeabilitet innad i de ulike sonene i dammen (f.eks. mellom kjerne, filter og støttefylling). For poretrykk i en bergmasse er de viktigste faktorene permeabiliteten i sprekker samt variasjonen i permeabiliteten som følger av orientering, avstand, friksjon, sammenkobling, og åpning av sprekke i bergmassen. Andre forhold som påvirker er om det er utført injisering av berg / løsmasser og eventuell drenering av poretrykket. I tillegg kan faktorer som nedbør og snøsmelting påvirke poretrykket.

### 3.1.1 Poretrykk i fyllingsdammer

I en fyllingsdam vil poretrykket avgjøre effektivspenningene i de ulike materialene i damkroppen:

$$\sigma' = \sigma - u$$

der  $\sigma'$  er effektivspenningene,  $\sigma$  er totalspenningene, og  $u$  er poretrykket. Siden skjærstyrken – og dermed stabiliteten til fyllingsdammen – er avhengig av effektivspenningene i massene vil poretrykkslinjen være avgjørende for opptredende stabilitet for fyllingsdammen. Høyt poretrykk reduserer stabiliteten til fyllingsdammen eller løsmassefundamentet. På samme måte kan poretrykk i geologiske formasjoner utøve trykk mot sprekkeseett som negativt påvirker stabiliteten til bergmassen eller en dam bygget på disse formasjonene.



Figur 3-2 Illustrasjon av variasjon i poretrykkslinje gjennom en fyllingsdam med sentral tetningskjerne. Figur fra Sparrevik (2022).

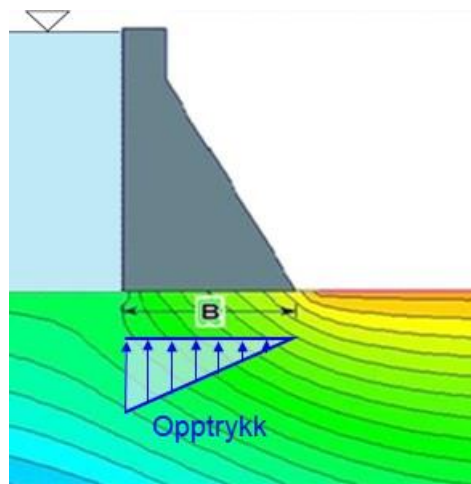
Under antagelse om stabile strømningsforhold finner man vanligvis formen og plasseringen til poretrykkslinjen fra teoretiske beregninger ved hjelp av strømningsnett og / eller ved bruk av finite element eller finite difference beregningsprogrammer. I materialer med svært lav permeabilitet kan det ta flere måneder for å oppnå stabile strømningsforhold.

For fyllingsdammer fundamentert på løsmasser vil stabiliteten i grunnen under og nedstrøms dammen kunne endre seg på sikt, f.eks. som følge av indre erosjon og utvasking. Måling av-, og kontroll på, poretrykket i løsmassene er da av vesentlig betydning for vurdering av dammens stabilitet (se også avsnitt 3.3.3).

### 3.1.2 Optrykk under betongdammer

For betongdammer refererer *optrykk* til trykket som utøves av porevann i enten (i) horisontale sprekker i betongen, (ii) grensesjiktet mellom betong og fundament, eller (iii) sprekker i fundamentet under dammen. Dette poretrykket utøver en kraft mot

undersiden av dammen som reduserer dens effektive vekt og negativt påvirker dens stabilitet mot velting og glidning. Opptrykk er en viktig faktor for design av betongdammer, og det finnes flere eksempler i historien der gravitasjonsdammer har gått til brudd som følge av manglende kontroll på opptrykket i fundamentet (f.eks. Dam Malpasset, se avsnitt 4.1). Stabilitetsanalyser av dammer for ulike grensetilstander forsøker å identifisere kreftene på dammen som vil opptre under den aktuelle grensetilstanden / bruddmekanismen, f.eks. flom, jordskjelv, eller islaster. For stabilitetsberegninger er det derfor viktig å bestemme hva opptrykket vil være under utvikling av en bruddmekanisme, f.eks. glidning eller velting, i tillegg til det opptrykket man vil ha under normal drift (dvs. det man kan måle for øyeblikket).



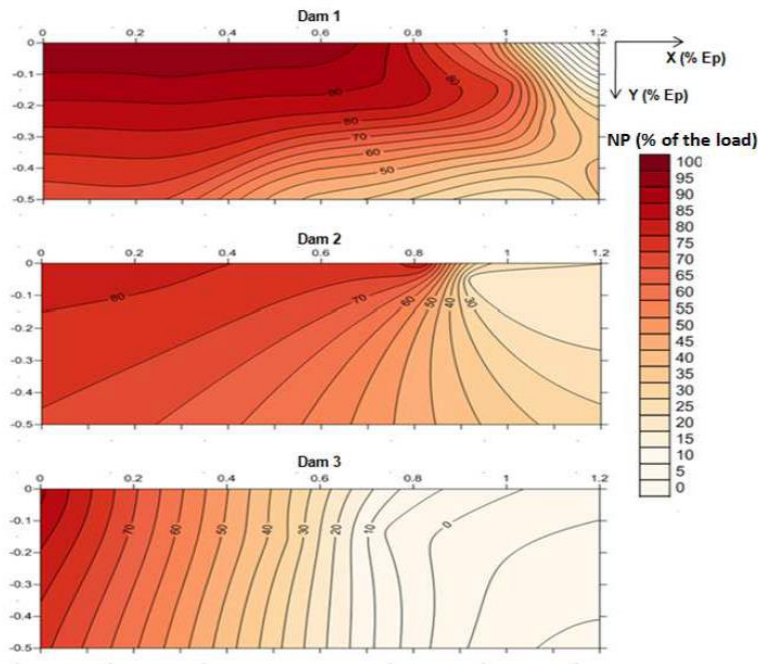
Figur 3-3 Illustrasjon av lineært varierende opptrykk mot undersiden av en gravitasjonsdam. Figur fra Sparrevik (2022).

Uten spesifikke målinger eller utførte tiltak antas ofte opptrykket å variere lineært over dambredden fra fullt opptrykk (magasin vannstanden) på oppstrøms side til null opptrykk (eller evt. bakvann) på nedstrøms side. Denne lineære poretrykkslinjen vil teoretisk sett stemme for en dam uten drenasje på et perfekt homogent fundament. Erfaring viser derimot at opptrykksforholdene under betongdammer ofte er svært kompliserte, og at ideelle forhold med perfekt homogen berggrunn er sjeldne.

Electricité de France (EDF) utfører poretrykksmålinger på de fleste av sine betongdammer som en del av sitt damsikkerhetsarbeid. Resultatene avdekker komplekse forhold, som indikert i de tre eksemplene presentert i Figur 3-4 (Mauris et. al., 2015):

- Dam 1 er fundamentert på granitt av god kvalitet. Målingene indikerer at berget er oppsprukket fra oppstrøms side til ca. 80 % av dammens bredde, men at sprekkeene ikke er dype. Det er derfor nær horisontale isolinjer for opptrykk.
- Dam 2 er fundamentert på lag av kalkstein (dolomitt). Over 80 % av dambredden er oppsprukket, og sprekkeene er nær horisontale ved overgangen mellom betong og berg og dreier mer vertikalt dypere i fundamentet.

- Dam 3 er fundamentert på skifer av god kvalitet, men med høy anisotropi der vertikal permeabilitet er langt høyere enn horisontal permeabilitet. Opptrykket er her mindre dominert av sprekkeseff sammenlignet med de to andre dammene. Isolinjene er nær vertikale, og viser en nær lineær reduksjon av opptrykket over dammens bredde.



Figur 3-4 Eksempler på fordeling av opptrykk under bunnen av tre hvelvdammer i Frankrike. Figur fra Mauris et. al. (2015).

Eksempelet fra EDF illustrerer viktigheten av geologien på fordelingen av opptrykk under betongdammer, og at det er vanskelig å forutsi fordelingen av opptrykkene basert på antagelser om bergkvalitet alene. Orienteringen til lokale diskontinuiteter i berggrunnen, grad av anisotropi, og variasjon i permeabilitet, styrer i stor grad fordelingen av opptrykket for hver enkelt dam.

Electric Power Research Institute (EPRI) har i sin rapport om opptrykk og skjærstyrke for bruk i stabilitetsanalyse av betongdammer (EPRI, 1992) en omfattende gjennomgang av opptrykk under betongdammer og hvilke faktorer som påvirker disse. Blant konklusjonene de identifiserer er (EPRI, 1992):

- Opptrykk under betongdammer er påvirket av en rekke faktorer, især ingeniørgeologiske forhold og utforming og virkemåte av eventuell drenasje av opptrykket.
- En antagelse om lineær variasjon i poretrykk mellom oppstrøms og nedstrøms vannstand er ikke alltid konservativ.



- For å vurdere opptrykk mot en betongdam må disse måles med piezometer. Dette krever en grunnleggende forståelse av ingeniørgeologien i fundamentet for å kunne hensiktsmessig plassere piezometrene.
- Målinger av opptrykk kombinert med en grundig forståelse av ingeniørgeologien er nødvendig for å kunne estimere fordelinger av opptrykk for bruk i stabilitetsanalyser.

Prof. Arthur Casagrande skrev i sin artikkel fra den første Rankine Lecture i 1961 om kompleksiteten av å bestemme poretrykksfordelingen under betongdammer, og viktigheten av gode målinger (Casagrande, 1961):

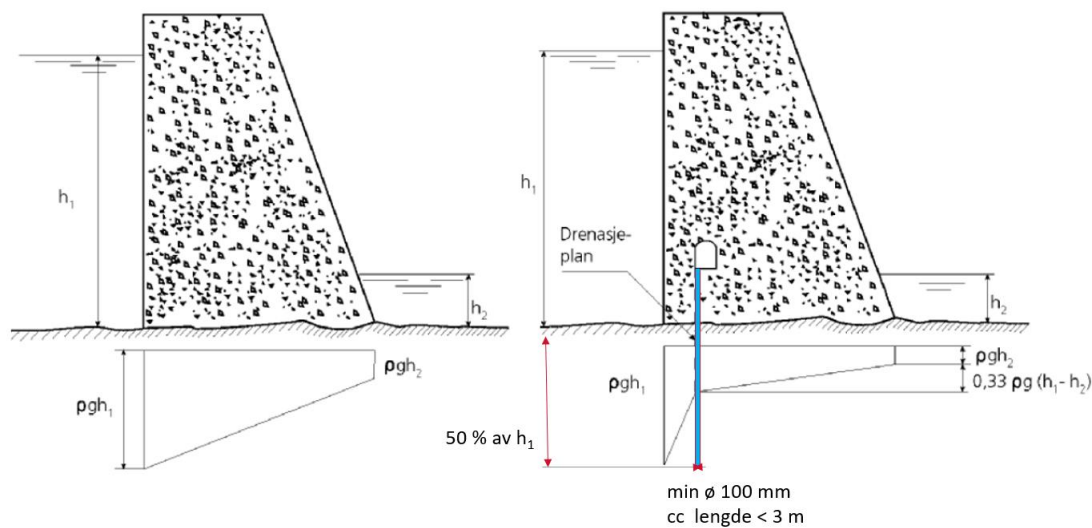
*“Where the geologic conditions create the slightest doubt as to the control of hydrostatic pressures in various rock zones below the dam and in the abutments, not only uplift measurements along the base, but piezometer observations at many locations in the rock are needed. For anyone with a good knowledge of engineering geology and of solving seepage problems by means of plotting flow nets, it is easy to invent combinations of geological details which can cause serious pressures in the rock foundation and abutments downstream of a dam. I consider it such an instructive exercise that I encourage my students to indulge in this pastime.”*

Disse eksemplene viser at poretrykk og opptrykk er blant de mest usikre lastene på en betongdam da det er mange parametere som påvirker deres størrelse. Antagelsene som benyttes i prosjektering av dammer bør derfor verifiseres ved målinger der det er mulig, som et minimum der det benyttes lastantagelser som avviker fra hva en kan forvente ut fra en konservativ fordeling.

### 3.1.3 Spesielt om redusert opptrykk under betongdammer

Det er vanlig i design av betongdammer at man forsøker å redusere opptrykket ved hjelp av drenering, injiseringstiltak eller en kombinasjon av disse. Dreneringsystem vurderes som den desidert mest effektive måten for å redusere opptrykket i et damfundament (ICOLD, 2004). Man kan da som regel anta en redusert opptrykksfordeling, som i stor grad avhenger av plasseringen og effektiviteten til dreneringsystemet.

Reduksjon av opptrykk på grunn av drenering antar at dreneringsystemet reduserer de høye opptrykkene under dammen til et nivå som tilsvarer bakvannet, multiplisert med en reduksjonsfaktor. Reduksjonsfaktoren tar hensyn til at dreneringsystemet ikke drenerer 100% av bergvolumet, og at det kan være andre faktorer som reduserer dets effektivitet. Verdien på denne faktoren varierer mellom ulike retningslinjer, men ligger ofte rundt 0.33, dvs. dreneringsystemet antas å kunne drenere bort 67% av trykkforskjellen mellom magasinet og bakvannet. Dette er også antagelsen i NVEs retningslinje for betongdammer (NVE, 2005), som vist i Figur 3-5.



Figur 3-5 Antagelser om opptrykk under gravitasjonsdammer med resultanten innenfor kjernetverrsnittet. Figur fra NVE (2005).

Denne antagelsen er kun gyldig i stabilitetsberegninger dersom det ikke er åpne horisontale sprekker langs bruddflaten. Som oftest forenkles en slik vurdering til å si at det skal være trykkspenninger i tverrsnittet i grensetilstanden. Dersom det er langsgående sprekker som går opp til – eller forbi – drenasjesystemet, vil opptrykket øke betydelig. Det er i flere lands retningslinjer også satt krav til at reduksjonsfaktoren må baseres på faktisk *målte verdier* for opptrykk i dammen. Dette ivaretar også viktigheten av regelmessig inspeksjon og vedlikehold av drenasjesystemet: effekten av systemet vil være høyest når systemet er nytt og vil deretter gradvis reduseres etter hvert som drenasjehullene kan tettes med utfelling eller avsetninger.

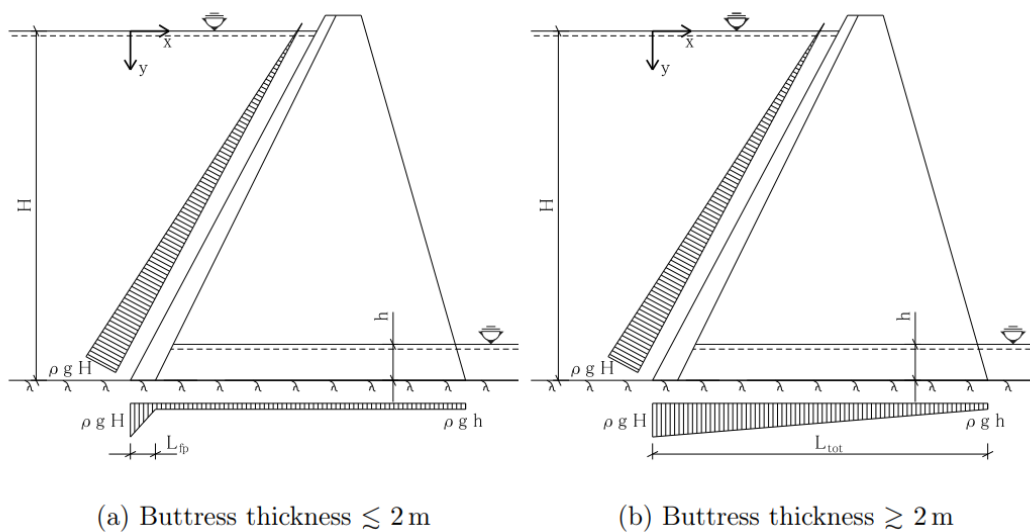
For platedammer, der pilarene er mye smalere enn er tilfelle for en massiv gravitasjonsdam, vil opptrykket ved bergoverflaten på hver side av pilaren være null (eller trykkehøyden til bakvannet). Dette gir en begrensning på hvor mye opptrykk (i denne sammenhengen opptrykk integrert over arealet av kontaktflaten mellom betong og berg) som kan oppstå under selve pilaren dersom den er smal. Dette er tatt hensyn til i enkelte retningslinjer, f.eks. har svenske retningslinjer (RIDAS, 2019) delt opptrykksfordelingen for platedammer i to tilfeller:

1. Der pilaren er tykkere enn 2 m, og "vanlige" antagelser med lineært avtagende opptrykk gjelder.
2. Der pilaren er tynnere enn 2 m og opptrykket under pilaren kan antas neglisjerbart og opptrykket antas å kun virke mot frontplaten (Figur 3-6). Hvis det er bakvann så antas bakvannet å gjelde også under pilaren.

Antagelsen om redusert opptrykk basert på en slik vurdering vil kun gjelde i selve grensesjiktet mellom betong og berg, det kan fortsatt oppstå høyere opptrykk mot

glideplan som går dypere i fundamentet. Andre retningslinjer benytter andre antagelser, f.eks. krever FERC sine retningslinjer at det benyttes fullt opptrykk langs hele bredden av seksjonen / pilaren uavhengig av tykkelsen til denne (FERC, 2016).

Gitt den store usikkerheten knyttet til opptrykk for betongdammer, bør det som hovedregel alltid måles opptrykk dersom det regnes med reduserte antagelser.



Figur 3-6 Ulike antagelser om opptrykk benyttet i svenske retningslinjer for platedammer avhengig av bredden av pilarer. Figur fra Fu og Hafliðason (2015).

### 3.1.4 Drenasje av opptrykk

For at drenasjen av opptrykk skal fungere etter hensikten må den være utformet på en god måte. Som regel innebærer dette boring av vertikale drenasjehull til tilstrekkelig dybde i fundamentet med en passende senteravstand imellom seg. NVEs retningslinjer for betongdammer (NVE, 2005) krever f.eks.:

*“Benyttes en utforming med drenasje av fundament og dam for å lette oppdriften, bores drenasjehull i fjellfundamentet med utløp i en inspeksjonsgang i damkroppen. Det forutsettes at lekkasjevann fra hvert enkelt drenasjehull er synlig i inspeksjonsgangen og at vannet dreneres frostfritt ut av dammen ved selvføll. Inspeksjonsgangen skal legges slik at den ligger over normal nedstrøms vannstand. Drenasjehullene bores nedstrøms en eventuell tetningssskjerm og ikke nærmere oppstrøms side enn ca. 1m pluss 5 % av damhøyden.*

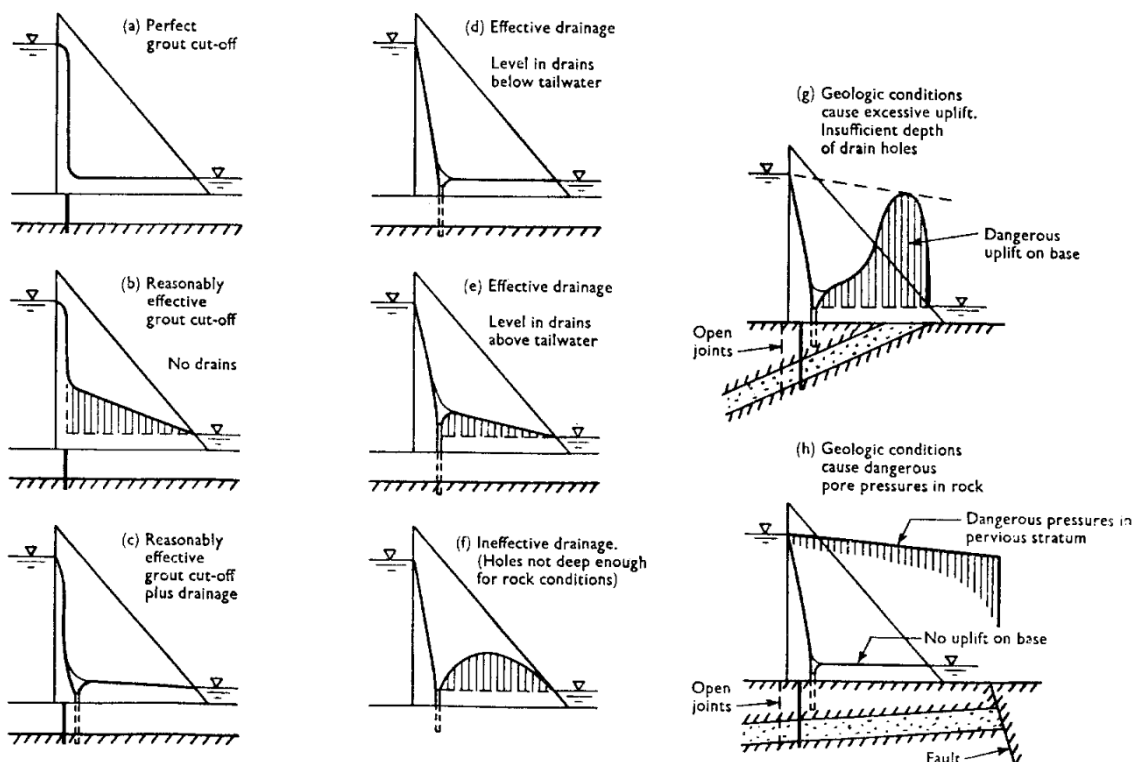
*Drenasjehull bør være hull med minst 100 mm diameter med senteravstand ikke over 3 m, boret minst til en dybde tilsvarende 50 % av vanntrykket.*

*Når det regnes med redusert poretrykk med oppdrift i snitt i dammen, skal det i dammen være anordnet et drenasjesystem. Dersom stabiliteten i snitt over inspeksjonsgangen er*

*basert på drenasje, må det være drenasjehull også oppover i dammen over inspeksjonsgangen.”*

Lignende krav for utforming finnes i veiledere og retningslinjer i andre land.

I mange tilfeller blir den vertikale drenasjen supplert med horisontal drenasje av deler av bergoverflaten, ofte kalt "boksdrenasje". Dette er et drenasjesystem uten borede hull, som kun består av en åpning i konstruksjonen som avleder overflatevann. Som oftest utføres dette som et hulrom langs dammens lengdeakse, enten via inspeksjonsganger eller gallerier, eller ved å sette inn en eller flere mindre halvsirkelformede åpninger på damfundamentet i forkant av betongstøpingen. Teoretisk sett vil boksdrenasje være effektivt i å redusere opptrykk i et perfekt homogent damfundament (de Mello, 1984). Men på grunn av den manglende evnen av boksdrenasje til å drenere poretrykk under selve bergoverflaten, regnes dette ikke som et fullgodt drenasjesystem i seg selv (Casagrande, 1961; ICOLD, 2004).



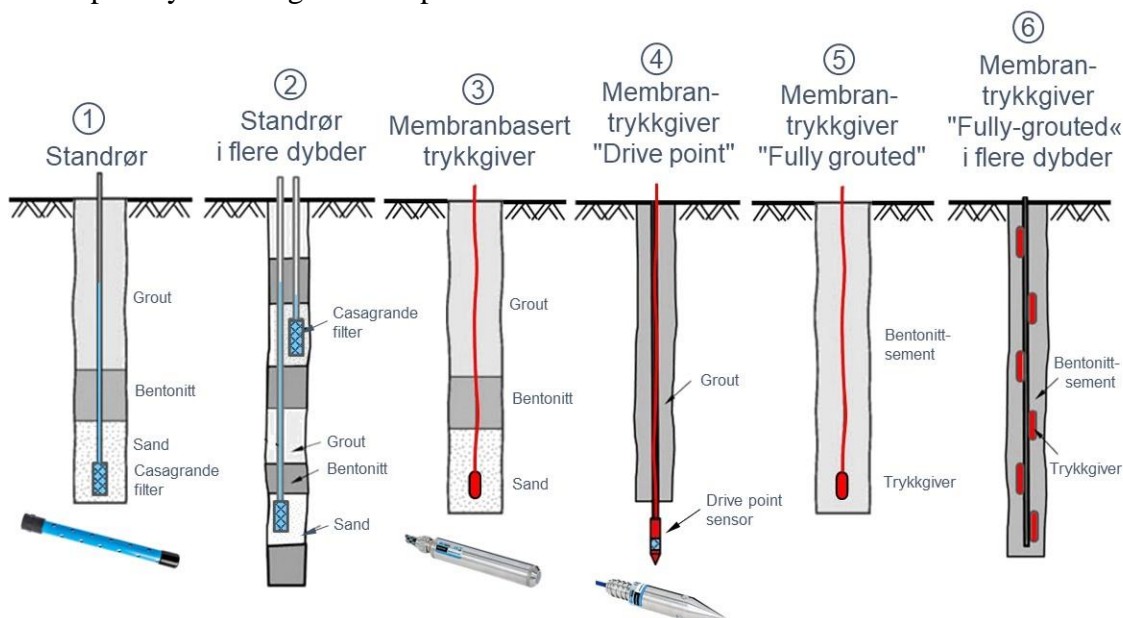
Figur 3-7 Eksempler på resulterende opptrykk for gravitasjonsdam med ulike kombinasjoner av geologiske forhold, injeksjonsskjerm (grout cut-off) og drenasje (drainage). Figur fra Casagrande (1961).

Mange betongdammer er utført med både injisering av bergmassen og drenasje av opptrykk fra et galleri inne i dammen. Begge disse medvirker til redusert opptrykk, og selv med måling av opptrykket er det ikke mulig å direkte tilskrive om de målte

opptrykkene skyldes injeksjonsskjerm, drenasje, eller en kombinasjon av begge. Dette er illustrert med eksempler i Figur 3-7, hentet fra Casagrande (1961). NVEs retningslinje for betongdammer åpner ikke for å regne med redusert poretrykk som følge av injeksjonsskjerm alene (NVE, 2005).

## 3.2 Måling av poretrykk

For å måle poretrykk i grunnen benyttes *piezometre* (fra *piezo*: trykk, og *meter*: måler). De vanligste typene av poretrykksmålere i dammer er standrør og membranbaserte piezometre (Figur 3-8). Den enkleste typen av piezometre er basert på åpne standrør som når ned til grunnvannsnivået, der vannstanden i standrøret kan leses av manuelt med en peiling av vannstanden eller automatisk med en trykkmåler i bunnen av standrøret. En annen type åpen hydraulisk piezometer er basert på et filter koblet til slanger / rør med mindre tverrsnitt som går opp til overflaten (Figur 3-8, bilde 1). Den andre hovedkategorien av piezometre består av membranbaserte trykkgivere med innebygget filter som installeres i direkte hydraulisk kontakt med grunnen / massene. Disse piezometrene installeres enten i selve dammen eller i borehull som tettes, alternativt kan de presses direkte ned i bløte grunnforhold. Ved bruk av piezometre med trykksensorer måles vanligvis total trykk, det vil si også variasjoner i barometrisk trykk. For nøyaktig bestemmelse av poretrykket kan målinger fra piezometret trykk-kompenseres med separate barometermålinger. For å bestemme poretrykksforholdene ved en dam må man foreta poretrykkmålinger i flere punkter.



Figur 3-8 Eksempler på ulike typer piezometre og installasjonsmåter for måling av poretrykk. Figur fra Sparrevik (2022).

### 3.2.1 Åpne standrør

Den enkleste typen av piezometer er et åpent standrør. Det finnes ulike typer av disse, fra en enkel målebrønn (vertikalt rør ofte med stor indre diameter) til Casagrande piezometer som bruker et spesielt filter og et plastrør til overflaten (Figur 3-8, bilde 1). Felles for åpne systemer er at vannstanden enkelt og direkte kan avleses til enhver tid, men de fungerer kun i relativt permeable materialer pga. den lange responstiden (røret må fylles / tømmes med vann). Man kan installere åpne standrør i flere nivåer i samme borehull. Poretrykket avleses ved å måle vannstanden i standrøret. For automatisk avlesning kan en tynn trykkgiver henges av i bunn av standrøret (forutsatt at røret aldri går tørt). Toppen av standrøret må beskyttes, og det er viktig at ikke vann fra nedbør eller snøsmelting kan renne ned i standrøret.

Tabell 3-1 Fordeler og ulemper ved bruk av åpne standrør (FERC, 1995; Sparrevik, 2022).

Fordeler	Ulemper
Enkel enhet, rimelig og pålitelig.	Lang responstid (stigerøret må fylles og tømmes). Best egnet for permeable lag.
Enkel å overvåke og vedlikeholde.	Frostutsatt – krever isolering / frostvæske.
Er standarden som alle andre piezometre måles mot.	Ikke egnet ved store setninger (pga. påhengskrefter i standrøret).
Vannstanden (nullpunktet) kan sjekkes til enhver tid.	Kan tettes på grunn av repeterende inn- og utstrømning.
Lang levetid - trykkgiveren kan skiftes ut.	Ikke egnet for artesiske forhold.
	Kun en måledybde per standrør (men kan være flere per borehull).

### 3.2.2 Lukkede standrør (hydraulisk system)

Lukkede standrør kan oppnås ved å montere et manometer eller elektrisk trykkmåler på enden av slangen, derved oppnår man et lukket hydraulisk system (Figur 3-9). Disse har i hovedtrekk de samme fordelene og ulempene som åpne standrør, men kan også brukes i situasjoner der vanntrykket er høyere enn terrengnivået (artesiske trykkforhold). De må også luftes periodisk.

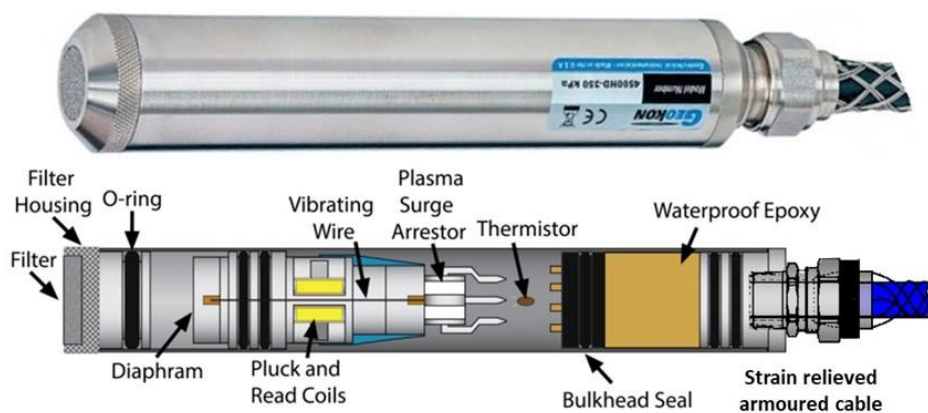
Hydrauliske løsninger er ikke veldig vanlig i dag siden elektriske poretrykksmålere normalt er å foretrekke (NGF, 2017). Hydrauliske løsninger kan dog anbefales i gallerier med enkel adkomst og begrenset lengde på standrøret da de har den store fordelen at både trykkgiver og manometer enkelt kan skiftes ut.



Figur 3-9 Eksempel på lukket hydraulisk piezometer med manometer og trykk giver. Bilde: Geosense. Ved artesisk trykk bør det monteres lukkeventil på koblingen til standrøret slik at trykk giveren enkelt kan skiftes ut.

### 3.2.3 Membranbaserte trykkgivere

Membranbaserte piezometre (Figur 3-8 bilde 3-6 og Figur 3-10) er utstyrt med et filter som tillater vann å tre inn i et kammer og presse mot en stålmembran som deformerer seg i varierende grad avhengig av trykket. Membranens deformasjon avleses ved hjelp av strekklapper, vibrerende streng eller fiberoptikk. Mest vanlig er vibrerende streng (engelsk: Vibrating Wire, VW). Deformasjonen av membranen gjør at strengen forandrer egenfrekvens, og måling av denne egenfrekvensen (kalt "plucking") kan omregnes til poretrykk ved hjelp av ligninger fra målerens kalibreringsskjema.



Figur 3-10 Eksempel på vibrerende streng piezometer. Figur fra Geokon.

Membranbaserte systemer fjernavleses via en signalkabel, og data kan distribueres direkte til kontrollsentraler og andre interessenter via internett. Uten behov for feltbesøk samles data inn kontinuerlig i alle årstider, som gir vesentlige tidsbesparelser spesielt for avsidesliggende lokaliteter. Den største ulempen er at måleenheten har begrenset levetid og ikke kan byttes ut etter ferdig installasjon. De vanligste årsakene som begrenser levetiden for disse instrumentene er vanninntrenging og / eller korrosjon (spesielt på membran). Design og kvalitet for tettingsløsninger samt materialvalg skiller seg vesentlig mellom ulike produsenter i markedet. Kvalitetsenheter kan ha en forventet levetid på 20-40 år, men dette kan variere betydelig mellom ulike produsenter og forholdene der piezometret installeres.

Tabell 3-2 Fordeler og ulemper ved bruk av membranbaserte systemer som vibrerende streng piezometer (FERC, 1995; Sparrevik, 2022).

Fordeler	Ulemper
Relativt enkel sensor.	Mer kostbar måler og avlesningsenhet.
Enkel å overvåke og automatisere.	Følsom for temperatur- og barometertrykkendringer.
Kort responstid.	Risiko for drift i nullpunkt, kan vanligvis ikke sjekkes.
Ikke frostutsatt.	Overspenningsvern er nødvendig mot lyn, med mindre fiberoptisk trykk giver benyttes.
Kan installere flere sensorer i samme borehull (fully grouted method).	Levetiden er begrenset, og enheten kan ikke skiftes ut.
Egnet også der store setninger er forventet.	
Frekvensutgangssignal eller fiberoptisk signal kan overføres over lange avstander	

Det porøse filteret foran sensormembranen er vanligvis lagt av syrefast metall som er mer mekanisk robust enn keramiske filtre eller filter av plast. Valg av egnet filtertype avhenger av hva som er viktig med tanke på installasjonsmetode og omgivelser (robusthet / korrosjonsmotstand). Finheten på filteret avgjør størrelsen på partikler som kan passere inn i kammeret foran membranen, med hensikten er at væsketrykk skal overføres til membranen samtidig som kammeret ikke må fylles med faste partikler. Normalt brukes Low Air Entry (LAE) filter, som har en finhet på ~50 micron og lav motstand for luft å passere (Figur 3-11). High Air Entry (HAE) filter er finere (~1-3 micron og vanskelige å mette), men brukes kun i sjeldne tilfeller som umettet jord eller tett leire der negative poretrykk kan forventes.

Metting av membranbaserte piezometre før installasjon er viktig slik at filterkammeret blir væskefylt og responstiden ikke forringes. De fleste produsenter har gode beskrivelser av hvordan deres piezometre bør mettes før installasjon (Figur 3-12).





Figur 3-11 LAE og HAE filter for membran baserte piezometre (bilde: Geosense).



Figur 3-12 Metting av piezometre før installasjon (bilder: Sisgeo).

### 3.2.4 Installasjon av piezometre

Installasjon av piezometre kan utføres på flere måter avhengig av grunnforhold og krav til prosjektet, for eksempel installasjon under bygging av dammen eller ettermontering. I mange tilfeller innebærer installasjon av poretrykksmålere boring av borehull, og dette er som regel langt mer kostbart enn selve instrumentet. Generelt er det viktig å sikre at borehullet er tett for å unngå lekkasje som kan påvirke målingene, spesielt i vertikal retning. Installasjonen må heller ikke påvirke selve målingen eller vannstanden i området. Installasjonen kan også påvirke responstiden til måleren, for eksempel dersom man fyller rundt måleren med en masse som har lengre responstid enn grunnen. For enhver installasjon i borehull er det viktig å ta barometriske avlesninger og justere nullpunktet til piezometret før instrumentet installeres i borehullet.

Nedenfor følger en kort oppsummering av ulike installasjonsmetoder. Mer detaljerte beskrivelser finnes i ISO (2020) og NGF (2017) samt i veiledninger fra ulike produsenter piezometre.

### **Tradisjonell installasjon**

Den tradisjonelle (og historisk sett mest benyttede) metoden for installasjon innebærer å plassere sensoren i et forhåndsbores hull, fylle rundt med en passende filtermasse (som regel sand), tette over med en plugg av bentonitt eller tilsvarende impermeabel masse, og deretter fylle opp resten av borehullet med en passende grout-blanding (Figur 3-8, bilde 1-3) for å sikre stabilitet av borehullet. For membranbaserte lukkede systemer er det viktig å mette filteret med vann og utføre funksjonstest av sensoren før man lukker borehullet. Tradisjonell installasjonsmetode er fortsatt det mest benyttede i dag.

### **Push-in-metode**

Denne metoden innebærer å trykke måleren direkte inn i jorden (Figur 3-8, bilde 4). Dette kan være en rask og effektiv metode for installasjon i myke jordtyper, men det krever at jorden er tilstrekkelig myk til å ikke ødelegge måleren og at jorden tetter seg rundt og over piezometret / kabelen etter installasjon. En vanlig installasjonsmetode er å først lage (bore eller presse) et pilohull og deretter trykke piezometret videre inn i bunnen av hullet. Så sant ikke jorden består av myk leie bør hullet over sensoren fylles med grout / bentonitt for å unngå hydraulisk kommunikasjon til overflaten. Spesielle piezometer som har en robust "drive point tip" må benyttes.

### **Innstøping**

I denne metoden legges måleren direkte inn i en betongstruktur i forkant av betongstøping. Dette er egnet for måling av poretrykk i betongkonstruksjoner og for måling av opptrykk mellom betong og berg (man plasserer da sensoren direkte på berget før betongstøping). Det krever nøye planlegging for å sikre at måleren er riktig plassert og beskyttet under betongstøpingen.

### **Fully grouted method**

I denne metoden installeres måleren direkte i borehullet som deretter fylles helt med en passende grout, som regel en blanding av sement og bentonitt (Figur 3-8, bilde 5-6). Dette gir en kontinuerlig masse av grout rundt måleren og fjerner behovet for et tradisjonelt sandfilter og bentonittforsegling.

Metoden tillater relativt enkel installasjon av flere sensorer i samme borehull (og kombinasjon med inklinometer), noe som reduserer risikoen og kostnadene forbundet med boring. Installasjonen er enklere og raskere da det kun brukes én type masse (grout). Metoden reduserer også risikoen for hydraulisk kommunikasjon mellom ulike soner, og minimerer risikoen for infiltrasjon eller tilstopping av piezometret.

De viktigste egenskapene til groutblandingen er permeabilitet, viskositet og styrke; disse må vurderes nøye før installasjon. Det er viktig at groutblandingen har en permeabilitet som er tilpasset den omkringliggende grunnen, slik at den forhindrer en strøm av vann vertikalt gjennom borehullet, men tillater horisontal strømming fra omkringliggende masser til måleren. I ISO standarden for måling av poretrykk (ISO, 2020) anbefales det at permeabiliteten til grouten ligger innenfor 1000 ganger permeabiliteten til de omkringliggende massene (dette inkluderer både høyere og lavere permeabilitet). For høy permeabilitet kan føre til vertikal lekkasje, mens for lav permeabilitet kan føre til en

langsommere responstid på grunn av den ekstra tiden det tar for vanntrykket å utlignes gjennom grouten. Nyere forskning antyder at forholdet helst bør ligge mellom 10-100 ganger permeabiliteten til omkringliggende masser for å unngå unøyaktige målinger (Choquet, 2022).

Ytterligere detaljer og anbefalinger ved bruk av fully grouted method finnes i ISO (2020). Det finnes også mye faglitteratur om emnet med case-historier og eksempler.

### 3.2.5 Kalibrering av målere

Nøye kalibrering av poretrykksmålere, spesielt lukkede membranbaserte piezometre, er viktig for å sikre nøyaktige og pålitelige målinger. Alle data fra installasjonen ("som bygget") og kalibreringen må dokumenteres for fremtidig referanse og kvalitetskontroll. Dette er spesielt viktig ved dammer, hvor poretrykksmålerne er utilgjengelige for kalibrering eller sjekk etter installasjon. Ved mistanke om feil, må målerne som regel erstattes, noe som kan være både tidkrevende og kostbart.

Kalibrering av måleren utføres som regel av leverandør og bør dekke hele målerens måleområde, helst med en nøyaktighet lik eller bedre enn 0,1 % av fullt måleområde (NGF, 2017). Et eksempel på kalibreringsark er vist i Figur 3-13. Målere som er i bruk over lengre tid bør om mulig kalibreres regelmessig, men dette er ikke mulig i de fleste tilfeller for dammer siden sensorene ikke er tilgjengelige og det ikke finnes et kjent nullpunkt.

For membranbaserte systemer, måles poretrykket indirekte ved å måle spenninger, f.eks. ved å måle egenfrekvensen i en vibrerende stålstring. Endringer i disse spenningene over tid vil føre til endring (drift) i målerens nullpunkt. Dette omtales som nullpunktdrift. Nullpunktdrift kan skje av flere grunner, inkludert endringer i temperatur, mekanisk belastning, kryp / avlastning, eller aldring av målerens komponenter. Nullpunktdrift kan føre til unøyaktige målinger, så det er viktig å se etter tegn til dette når man tolker data fra poretrykksmålere. For membranbaserte systemer har man ikke mulighet til å foreta en ny kalibrering av måleren med mindre man vet det eksakte poretrykksnivået på et gitt sted og tid (som sjelden er tilfelle).

19 Spencer St. Lebanon, NH 03756 USA

### Vibrating Wire Pressure Transducer Calibration Report

Model Number: 4500C-350 kPa

Serial Number: 1734801

Calibration Instruction: VW Pressure Transducers

Cable Length: 37 meters

Date of Calibration: October 18, 2017

This calibration has been verified/validated as of 11/30/2017

Temperature: 22.70 °C

Barometric Pressure: 1002.6 mbar

Technician: \_\_\_\_\_

Applied Pressure (kPa)	Gage Reading 1st Cycle	Gage Reading 2nd Cycle	Average Gage Reading	Calculated Pressure (Linear)	Error Linear (%FS)	Calculated Pressure (Polynomial)	Error Polynomial (%FS)
0.0	8400	8400	8400	0.458	0.13	-0.032	-0.01
70.0	7490	7489	7490	69.91	-0.03	70.02	0.00
140.0	6576	6575	6576	139.6	-0.10	140.0	0.02
210.0	5658	5658	5658	209.6	-0.12	210.0	0.00
280.1	4737	4737	4737	279.9	-0.06	280.0	-0.03
349.9	3811	3812	3812	350.5	0.15	350.0	0.01

(kPa) Linear Gage Factor (G): -0.07628 (kPa/ digit)

Polynomial Gage factors: A: -1.787E-07 B: -0.07409 C: \_\_\_\_\_

Thermal Factor (K): 0.08022 (kPa/ °C)

Calculate C by setting P=0 and R<sub>1</sub> = initial field zero reading into the polynomial equation

---

(psi) Linear Gage Factor (G): -0.01106 (psi/ digit)

Polynomial Gage Factors: A: -2.592E-08 B: -0.01075 C: \_\_\_\_\_

Thermal Factor (K): 0.01163 (psi/ °C)

Calculate C by setting P=0 and R<sub>1</sub> = initial field zero reading into the polynomial equation

---

Calculated Pressures:

Linear,  $P = G(R_1 - R_0) + K(T_1 - T_0) - (S_1 - S_0)^k$

Polynomial,  $P = AR_1^2 + BR_1 + C + K(T_1 - T_0) - (S_1 - S_0)^k$

\*Barometric pressures expressed in kPa or psi. Barometric compensation is not required with vented transducers.

---

Factory Zero Reading: 8384      Temperature: 23.4 °C      Barometer: 1008.3 mbar

---

The above instrument was found to be in tolerance in all operating ranges.  
 This above named instrument has been calibrated by comparison with standards traceable to the NIST, in compliance with ANSI Z540-1.

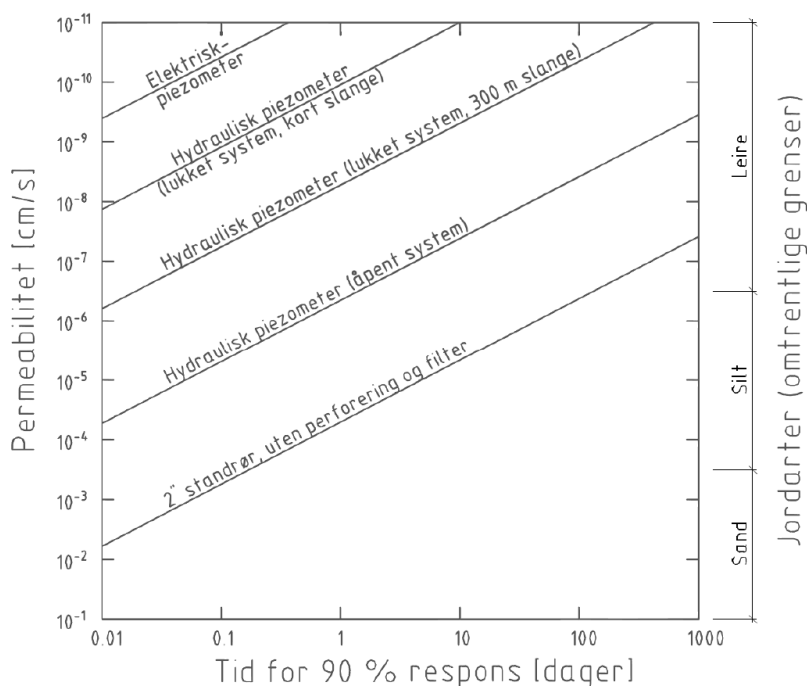
This report shall not be reproduced except in full without written permission of Geokon Inc.

Figur 3-13 Eksempel på kalibreringsark for vibrerende streng piezometer fra Geokon.

### 3.2.6 Responstid

Piezometre er ikke fullstendig inkompressible eller lukkede systemer. Derfor må noe vann flyte inntil / gjennom systemet for at en trykkending skal måles. Tiden som kreves for at denne vannflyten skal skje kalles *responstiden* og defineres som tiden som kreves for å oppnå en viss prosentvis utligning (f.eks. 90 %) mellom målt og reelt poretrykk, etter at den faktiske poretrykksendingen er inntruffet (NGF, 2017). Begrepet *innstillingstid* benyttes tilsvarende for å beskrive tiden før poretrykket i grunnen har innstilt seg på et stabilt nivå.

Responstiden påvirkes av permeabiliteten og graden av metning til filter- eller groutmaterialene rundt piezometret, type og design av instrumentet, og størrelsen på trykkendringen. Åpne standrør krever et relativt stort volum av vann for å fylle røret, og i materialer med lav permeabilitet kan responstiden være opp til flere måneder. Membranbaserte piezometre installert i forseglede og mettede soner med høy permeabilitet krever derimot kun en ubetydelig mengde vann, og responstiden er generelt kort. For membranbaserte elektriske piezometre er responstiden vanligvis svært lav. Figur 3-14 viser responstiden i ulike jordarter for ulike typer piezometre.



Figur 3-14 Responstid for ulike poretryksmålere i ulike jordarter. Figur fra NGF (2017).

### 3.2.7 Valg av måleløsning for poretrykk

Valg av optimal løsning for måling av poretrykk avhenger av flere faktorer, inkludert jordtype / bergtype, plassering, tilkomst, og behov for kontinuerlig overvåking.

Vibrerende streng piezometre benyttes i dag i de aller fleste situasjoner både i løsmasser og fast berg / fjell. Disse gir mulighet for kontinuerlig overvåking når de kobles til datainnsamlingssystemer for automatisk avlesning, men kan imidlertid være mer kostbare og krever en mer kompleks installasjon. Standrør kan benyttes i enkelte tilfeller og er enkle å installere og krever minimalt med utstyr, men de krever manuell avlesning og har langt responstid. Åpne standrør bør pga. den lange responstiden ikke benyttes ved dammer der det er rask endring i vannstand eller situasjoner der fundamentet det skal måles i har svært lav permeabilitet. Hydrauliske eller pneumatiske målesystemer

benyttes i dag kun i mindre grad, men hydrauliske systemer kan være aktuelt om man har artesiske grunnvannsforhold.

For installasjon av poretrykksmålere er tradisjonell metode den mest vanlige for installasjon av piezometer i borehull både i løsmasser og fast berg. I senere år har det derimot vært flere eksempler på suksessfull bruk av fully grouted method for stort antall piezometre (f.eks. har USACE godt dokumentert sin bruk av metoden ved Mosul Dam), og metoden ser ut til å bli mer populær bl.a. pga. muligheten til å relativt enkelt kunne installere flere målere i samme borehull. Men det er viktig å ha god kunnskap til hvordan man utfører metoden, spesielt hvordan man oppnår riktig egenskaper for groutblandingen. For poretrykksmålinger i betong eller i grensesjiktet mellom betong og berggrunn, benytter man (i forkant av betongstøping) direkte innstøping av sensorene.

Når det gjelder valget mellom manuell og automatisk / elektronisk avlesning, avhenger dette i stor grad av behovene til prosjektet. Manuell avlesning er enkelt, og i de fleste tilfeller er det mindre kostbart og krever mindre utstyr, men gir kun periodiske målinger og krever regelmessige besøk på damstedet. Automatisk avlesning gir kontinuerlig overvåking og kan gi mer detaljerte data over tid, men er mer kostbart og krever mer avanserte systemer for datainnsamling og overføring. I dag benyttes i stor grad automatisk avlesning. I noen tilfeller kan det være fordelaktig å ha begge muligheter, for eksempel ved å plassere et elektronisk vibrerende streng piezometer for kontinuerlig overvåking, og samtidig ha et standrør for periodisk manuell avlesning som en kontroll og kalibrering av den elektroniske målingen.

For utformingen av målesystemet anbefales det minst en linje med poretrykinstrumenter plassert langs et tverrsnitt gjennom den høyeste seksjonen for langtids overvåking under drift. Flere tverrsnitt med instrumenter kan være passende for lange dammer og / eller dammer med komplekse fundamenter. Tre eller fire piezometre per snitt er vanligvis tilstrekkelig for å definere poretrykkslinjen gjennom en fyllingsdam og i fundamentet (tilsvarende gjelder for opptrykk). Hvis drenasje benyttes, bør linjen med piezometre strekke seg nedstrøms denne for å måle effekten av drenasjen.

For etterinstrumentering av eksisterende dammer er man ofte mer begrenset i valg av løsning. Som regel innebærer etterinstrumentering med poretrykksmålere boring av hull fra et inspeksjonsgalleri i dammen, eller fra oppstrøms eller nedstrøms side av dammen. Deretter installeres instrumentene i borehullene. Boring i eksisterende dammer medfører risiko for skade på dammen (spesielt for fyllingsdammer), og må generelt gjøres med stor forsiktighet. Det finnes flere veiledere om boring i eksisterende dammer, f.eks. USACE (2014) og USBR (2014a).

### 3.3 Hensikt med måling av poretrykk

Måling av poretrykk og opptrykk for dammer gjøres generelt med flere hensikter:

- Bekrefte antagelser gjort i design.

- Overvåke fordelingen av poretrykk over tid i damfundament, damvederlag, og / eller nedstrøms områder.
- Overvåke virkemåten til injeksjonsskjermer og drenasjesystemer.
- For fyllingsdammer:
  - Vurdere oppbyggingen av poretrykk i masser og fundament under bygging og kompaktering (byggek kontroll).
  - Bestemme og verifisere form og plassering av poretrykkslinjen gjennom ulike soner i dammen, og bruke dette til å beregne effektivspenninger.
- For betongdammer:
  - Bestemme og verifisere størrelse og fordeling av opptrykk mot undersiden av dammen.

I damsikkerhetsforskriften § 7-2 er det definert minimumskrav til måling av poretrykk for dammer som er fundamentert på "løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner". Disse er gjengitt i Tabell 3-3. Dette er videre spesifisert i NVE (2019) som utdyper krav til poretrykksmålinger for følgende tilfeller:

- For alle dammer i klasse 2 – 4 som er fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner (Tabell 7-2.2 i damsikkerhetsforskriften).
- Dersom det regnes med redusert poretrykk i forhold til anvisninger gitt i retningslinjer / veiledere for fyllingsdammer, betongdammer og murdammer.
- Dersom dammens stabilitet er avhengig av injeksjonsskjermer og / eller drenasjesystemer.

Disse kravene gjelder generelt for alle dammer i driftsfasen – det kan være nødvendig med ytterligere målinger for dammer under bygging eller under første gangs oppfylling.

Tabell 3-3 Krav til instrumentering og måling av dammer (fra damsikkerhetsforskriften § 7-2).

Damtype	Klasse	Vannstand	Lekkasje	Deforma- sjoner	Poretrykk
Fyllingsdam fundamentert på god berggrunn	2, 3, 4	x	x	x	
Fyllingsdam fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner	2, 3, 4	x	x	x	x
Betong- og murdam fundamentert på god berggrunn	3, 4	x	x	x	
Betong- og murdam fundamentert på god berggrunn	2	x	x		
Betong- og murdam på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner	3, 4	x	x	x	x
Betong- og murdam på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner	2	x	x		x

Flere eksempler på ulike situasjoner der det er hensiktsmessig med måling av poretrykk følger i de neste avsnittene.

### 3.3.1 Dammer fundamentert på god berggrunn

For fyllingsdammer fundamentert på god berggrunn er måling av poretrykk i kjernen og tilstøtende materialer under bygging og kompaktering av masser et viktig ledd i damkontrollen. Selv om det også kan være av interesse å følge opp disse målingene i en tid etter at dammen er ferdig og magasinet er fylt opp, vil de vanligvis ikke utgjøre et essensielt ledd i overvåkingen av dammen med tanke på damsikkerheten (NGI, 1994). Men instrumenteringen bør planlegges slik at noen av instrumentene brukt under bygging og første oppfylling også vil bli brukt for langtids overvåking under normal drift. Selv om en fyllingsdam fundamentert på god berggrunn anses som stabil, kan endringer i poretrykk være et tidlig varsel om mulige problemer. For eksempel kan en uventet økning i poretrykket indikere vanninntrengning gjennom sprekker i kjernen eller i fundamentet, noe som kan kreve umiddelbar oppmerksomhet og mulige tiltak. Kontinuerlig eller regelmessig overvåking av poretrykket i viktige snitt kan hjelpe til å oppdage slike forhold tidlig slik at man kan utføre nødvendige tiltak for å opprettholde dammens sikkerhet.

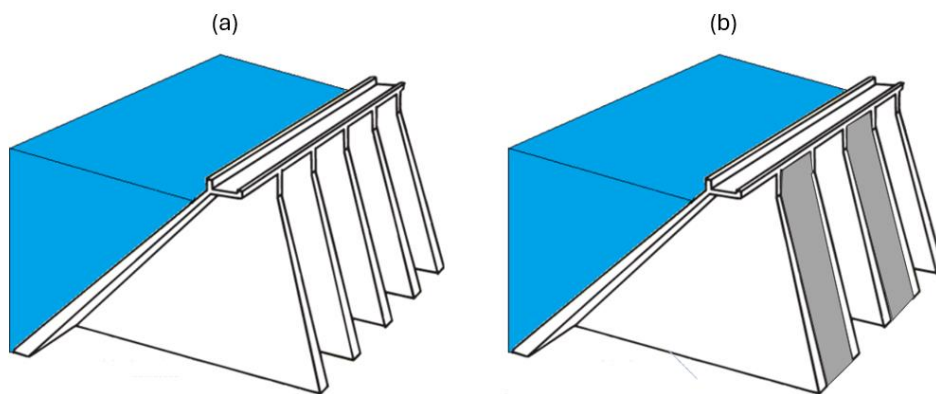
Opptrykk under betongdammer er som nevnt i avsnitt 3.1.2 en usikker parameter, og "god berggrunn" er ikke en garanti for at lokale forhold ikke kan medføre ugunstige opptrykk mot dammen. Betongdammer som er dimensjonert med antagelser om redusert opptrykk i forhold til en lineær opptrykkslinje har vanligvis drenasjesystem og / eller injeksjonsskjerm for å redusere dette opptrykket. I slike tilfeller bør man måle opptrykket for å kontrollere virkemåten til drenasjen og at antagelsene om opptrykk i dimensjoneringen er korrekte. Dette kravet om måling gjelder uavhengig av kvaliteten på berggrunnen, og gjelder for både for nye og eksisterende dammer. Dersom eksisterende instrumentering ikke er tilstrekkelig til å bekrefte og kontrollere en slik opptrykksreduksjon, bør ytterligere instrumenter installeres.

Rognes (2014) viser gjennom en litteraturstudie og grundig analyse av poretrykksmålinger fra fire dammer viktigheten av opptrykket for stabiliteten til gravitasjonsdammer, og hvilke faktorer som har størst påvirkning på opptrykket. Gjennom flere case-studier vises nytten av poretrykksmålinger, selv om de målte verdiene ikke kan brukes direkte til å benytte redusert poretrykk i stabilitetsberegninger. Det diskuteres i arbeidet at damsikkerhetsforskriften i Norge, som kun stiller krav til måling av poretrykk for "dammer fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner", men ikke til "dammer fundamentert på god berggrunn", og ikke inneholder en definisjon av disse begrepene, fører til krav som er vage, og ikke er særlig strenge. Dette må sees som en medvirkende årsak til at svært få betongdammer i Norge har poretrykksmålinger. Det anbefales videre i Rognes (2014) at det konkret spesifiseres i damsikkerhetsforskriften eller tilhørende veiledere hvilke krav som bør stilles til damfundamentet (f.eks. krav til gjennomføring av undersøkelser) for at man kan utelate måling av poretrykk.



### 3.3.2 Ombygging av platedammer

Fra ca. 1920-tallet og utover ble det bygget mange platedammer i Norge, bl.a., siden damtypen krever langt mindre betong enn en tilsvarende massivdam. Det er i skrivende stund planlagt med ombygging av et betydelig antall av disse platedammene for å imøtekomme krav til stabilitet ved økte flommer og svekkede materialegenskaper, samt krav til beredskapsmessig sikring. En ofte akseptert løsning for disse er å forsterke oppstrøms plate og bygge om platedammen til en delvis gravitasjonsdam ved å støpe igjen annethvert platefelt (Figur 3-15). En slik ombygging endrer betingelsene for opptrykk, fra en antagelse om neglisjerbart opptrykk under de slanke pilarene, til en antagelse om langt høyere opptrykk under de mer massive gravitasjonsdamseksjonene. Siden det er begrenset mulighet til å endre på selve tverrsnittet av dammen, er en slik dam ofte ikke beregningsmessig stabil etter norske retningslinjer med antagelser om fullt opptrykk etter ombyggingen. Dette gjør at ombyggingen kan måtte innebære særlig kostbare tiltak for å øke stabiliteten.



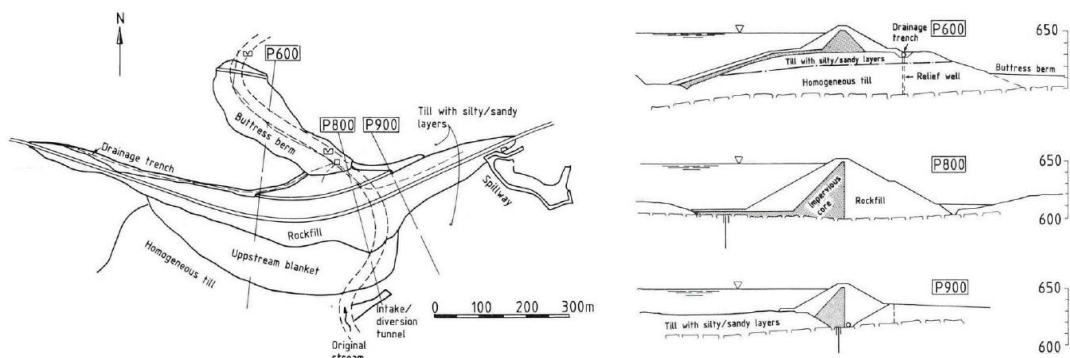
Figur 3-15 Prinsippkisse for ombygging av platedamm til delvis gravitasjonsdam ved gjenstøping av annethvert platefelt. (a) opprinnelig platedam, (b) delvis gravitasjonsdam. Figuren er tilpasset fra Queiroz (2018).

En alternativ løsning til dette er å installere et dreneringssystem sammen med måling av opptrykket under massivdamseksjonene og bruk av prinsippene i observasjonsmetoden. Sammen kan dette medføre at man kan benytte antagelser om redusert opptrykk i stabilitetsberegningene, og man har kontroll på opptrykkene under oppfylling og drift av dammen. Det er flere nylige eksempler i Norge der man ved bruk av dreneringssystem og overvåking av poretrykk kan unngå mer kostbare ombygginger dersom man kan verifisere de reduserte lastforutsetningene på en pålitelig måte.

### 3.3.3 Fyllingsdammer fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner

Der fyllingsdammer er bygd på løsmasser (Figur 3-16) vil strømnings- og poretrykksforholdene i grunnen under og nedstrøms dammen kunne endre seg på sikt. Måling av poretrykk i grunnen vil i slike tilfeller være viktig for å kunne observere at

forholdene er som forutsatt, og vurdere dammens stabilitet. Poretrykksmålinger av denne type vil vanligvis bli foretatt i hull som er boret fra terreng ned til den dybde hvor poretrykket ønskes målt. I henhold til damsikkerhetsforskriften er det krav om måling av poretrykk for fyllingsdammer fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner. Dette kravet tolkes i de fleste tilfeller til å gjelde måling av poretrykk i løsmassefundamentet, ikke i selve damkroppen.



Figur 3-16 Eksempel på utforming av fyllingsdam fundamentert på løsmasser, Dam Nerskogen. Dammen er utført med et tetningsteppe i oppstrøms retning, drenasjegrøft på nedstrøms side, og poretrykksmålinger i løsmassefundamentet for kontroll av poretrykk (poretrykksmålerne er ikke vist på tegningen). Venstre side: plan; Høyre side: tverrsnitt. Figur fra Tveit, et. al. (1986).

Det er særlig følgende typer skade- eller bruddmekanismer som bør overvåkes, kontrolleres og forhindres (Høeg, 2022):

1. Ustabilitet langs kritiske glideflater som skjærer ned i fundamentet under nedstrøms støttefylling. Høye poretrykk og / eller svake lag i fundamentet kan føre til stabilitetsproblemer og utglidning.
2. Indre erosjon med bakovergripende rørdannelse (piping) mot oppstrøms side, med svekkelse av fundamentet og innsynkning av nedstrøms støttefylling. Når poretrykkene er målt og kartlagt, kan skade- eller bruddutviklingen forhindres ved å installere avlastningsbrønner eller benytte terrengbelastning.
3. Utglidning av ustabil damtå. Overvåke beliggenheten av øvre strømningslinje der den strømmer ut gjennom nedstrøms damskråning.

I tillegg kan det ha forekommet feil i forutsetninger eller stabilitetsberegninger, feil under bygging, feil i materialene benyttet, eller feil / skadet tetning eller drenasje i dammen og damfundamentet som overvåkingen vil kunne avdekke.

Man kan skille mellom viktigheten av måling av poretrykk i selve fyllingsdammen, og måling av poretrykk i løsmassefundamentet. Endring av strømningsforhold gjennom selve dammen kan i de fleste tilfeller avdekkes gjennom et godt utført system for måling av lekkasje, samt måling / inspeksjon av turbiditet i lekkasjevannet. For løsmassefundamentet er det derimot i mange tilfeller vanskelig å samle opp alt lekkasjevannet som går under dammen på en god måte (avhengig av topografi og dybde

til fjell). I slike tilfeller er måling av poretrykk i grunnen under og nedstrøms dammen av vesentlig betydning for å vurdere fundamentets stabilitet. Poretrykkmålingene kan sammenstilles med analyser av strømningsnett for å vurdere strømningsforholdene. Det bør måles poretrykk langs flere tverrsnitt og i flere punkter for hvert tverrsnitt for å kunne oppnå en helhetlig forståelse av poretrykksforholdene i løsmassene.

Det påpekes at måling av poretrykk alene generelt sett ikke er en dekkende måte å oppdage indre erosjon eller lekkasje i en fyllingsdam eller løsmassefundament, fordi poretrykkmålerne kun gir data for et fåtall bestemte beliggenheter i dammen. Det er derfor viktig å se poretrykkmålingene i sammenheng med resultater fra målinger av lekkasje og eventuelt også data fra andre målemetoder (kort omtalt i avsnitt 5.5.4). Disse målingene supplerer hverandre og gir en bedre analyse av dammens oppførsel og eventuelle påbegynnende feil eller bruddmekanismer.

### 3.3.4 Betongdammer fundamentert på berggrunn med utpregede svakhetssoner

For betongdammer fundamentert på berggrunn med utpregede svakhetssoner er det som regel betydelig usikkerhet knyttet til egenskapene til damfundamentet som sprekker og sprekkesett, strømningsforhold, permeabilitet, og stabilitet. I de fleste tilfeller vil det ha blitt utført tiltak i form av drenasje og / eller injisering av berget for å redusere opptrykket, redusere vanngjennomstrømningen, og oppnå tilfredsstillende tetthet. For å dokumentere virkemåten av disse over tid er måling av poretrykk i grunnen viktig.

Norske bergarter er i hovedsak lite permeable, og hoveddelen av gjennomstrømning vil forekomme gjennom sprekkesett i bergmassen. Permeabiliteten gjennom et sprekkesett i et damfundament kan variere betydelig, og vil bli påvirket av faktorer som spenningsforhold, magasin vannstand og temperatur. For å estimere strømningen og det resulterende poretrykket i berggrunnen benyttes i dag som regel en strømningsnettanalyse, der man tegner strømningslinjer og linjer med likt strømningspotensial, eller 2D eller 3D elementmetodeberegninger.

I henhold til damsikkerhetsforskriften er det krav om måling av poretrykk for betongdammer fundamentert på berg med utpregede svakhetssoner (og på løsmasser, men det er få betongdammer i Norge som er fundamentert på løsmasser). Slike målinger bidrar til å bekrefte strømnings- og opptrykksantagelsene fra prosjekteringen, samt til å dokumentere effekten av eventuelle drenasje og / eller injiseringstiltak.

## 4 Fundamentstabilitet og definisjon av «god berggrunn»

### 4.1 Om begrepet «god berggrunn»

Begrepene "god berggrunn" og "berg med utpregede svakhetssoner" er ikke definert i NVEs veiledere, og det finnes ingen allment akseptert definisjon av begrepene i annen faglitteratur. Dette medfører usikkerhet for hvilke krav til instrumentering som skal gjelde for dammer i konsekvensklasse 2, 3 eller 4. Det fremgår av veilederen at der det forutsettes "god berggrunn" må dette dokumenteres (NVE, 2019), men det er ikke satt krav til hva slik dokumentasjon må inneholde.

Bakgrunnen for å ha ulike krav til poretrykk for dammer fundamentert på god og "dårlig" berggrunn stammer antagelig fra et ønske om å fokusere resursene der det er mest hensiktsmessig. Der det kan dokumenteres berggrunn av en slik kvalitet at det er *helt utenkelig* at det vil kunne utvikle seg bruddmekanismer gjennom fundamentet er det rimelig å heller fokusere overvåkingen på parameterne som har større bidrag til bruddsannsynligheten. Utfordringen er at det kan være vanskelig å fastslå kvaliteten på berggrunnen på en objektiv måte siden geologiske forhold kan være komplekse og er ofte dårlig kartlagt. Utilstrekkelig forståelse av berggrunnen kan medføre risiko for at bruddmekanismer utvikler seg i fundamentet, selv om det opprinnelig ble vurdert som "god" berggrunn.

Dette gjenspeiles i internasjonal statistikk for dambrudd. ICOLD (2020) viser at ca. halvparten av alle dambrudd i betongdammer skyldes problemer med fundamentet, enten i form av utvikling av (indre) erosjon i fundamentet, ustabiliteter pga. høyt opptrykk, eller ved at det har forekommet skjærbrudd (glidning) gjennom fundamentet.

Et eksempel på dette er dam Malpasset i Frankrike, som gikk til brudd 2. desember 1959 og krevde over 400 menneskeliv. I dag tilskrives dambruddet i stor grad en uoppdaget eller ikke hensyntatt foliasjon (parallellstruktur i en metamorf omdannet bergart) og en uoppdaget forkastning i det ellers svært lite permeable damfundamentet, som i hovedsak bestod av gneis som var oppfattet av "god kvalitet" (Duffaut and Larouzeé, 2019). Økende vannstand i forbindelse med kraftig nedbør under oppfylling av magasinet medførte økende opptrykk mot undersiden av dammen fra oppstrøms side. Under dammen går fundamentet over til kompakt gneis med langt lavere permeabilitet og liten mulighet for drenasje. Opptrykket ble til slutt så stort at venstre vederlag gav etter og medførte et momentant og nært komplett dambrudd (Figur 4-1).

Dambruddet ved Malpasset medførte økt fokus på ingeniørgeologi og viktigheten av å gjennomføre detaljerte undersøkelser for å kartlegge de viktige egenskapene til fundamentet og berggrunnen. Opptrykk mot betongdammer, som frem til da var kjent, men ikke godt nok forstått og hensyntatt blant damingeniører, ble en standard last å inkludere i stabilitetsberegninger, og dammer ble i langt større grad bygget med drenasjesystemer og injeksjonsskjermer for å redusere opptrykket. Instrumentering og overvåking av poretrykk / opptrykk i berggrunnen ble også langt mer vanlig, spesielt i forbindelse med første gangs oppfylling og de første leveårene til dammen.

Ser man dette i sammenheng med den store usikkerheten som alltid er til stede for vurdering av egenskapene til store bergvolumer under bakken tilsier det at man må ha svært godt datagrunnlag for å kunne konkludere at man har tilstrekkelig "god berggrunn" til å utelate poretrykksmålinger.

Resten av dette kapittelet fokuserer på ulike metoder for klassifisering av bergmasser og hvilke undersøkelser som er nødvendig for å avgjøre bergkvalitet.



Figur 4-1 Dam Malpasset i dag. Dammen gikk til brudd 2. desember 1959. Foto: NVE.

## 4.2 Stabilitet av berg og damfundament

Bergmassens og fundamentets stabilitet påvirkes av mange parametere. Følgende faktorer er blant de viktigste (NGI, 2015; Hoek, 2023):

- Bergets oppsprekkingsgrad.
- Friksjonsforhold langs sprekker.
- Styrke og deformasjonsegenskaper til bergmaterialet.
- Spenningsforhold i bergmassen.
- Vanntrykk og vannstrømning i sprekkenes.

Oppsprekkingsgraden, eller blokkstørrelsen, bestemmes av sprekke mønsteret, dvs. sprekkenes orientering og avstand (NGI, 2015). Nær parallelle sprekker danner sprekkesett og sprekkeavstanden innenfor hvert sett vil vanligvis ha en karakteristisk fordeling. Sprekkeavstanden kan være betydelig redusert langs noen soner i nærliggende

berg, slike soner betegnes som *sprekkesoner*. Stabiliteten blir vanligvis dårligere når sprekkeavstanden minsker og antallet sprekkesett øker. Orienteringen til sprekkene i forhold til påførte spenninger er også avgjørende. I svake bergarter har oppsprekkingsgraden mindre betydning for stabiliteten enn i harde bergarter.

I harde bergarter vil deformasjon i hovedsak oppstå som forskyvninger langs sprekkeflater. Friksjonsforholdene langs sprekkeflaten vil derfor være avgjørende for bergmassens stabilitet. Friksjonen avhenger av ruheten på sprekkeflaten, samt tykkelse og egenskaper til eventuell sprekkfylling. I svakt berg er friksjonsfaktoren på sprekkeflaten av mindre betydning.

Styrke og deformasjonsegenskaper til bergmaterialet er viktig for å avgjøre om det vil kunne forekomme brudd gjennom selve bergmaterialet. Disse egenskapene måles typisk gjennom enaksiale trykkstyrketester (Uniaxial Compression Strength, UCS) eller triaksiale trykkstyrketester i laboratorier.

Spenningene i bergmassen avhenger av dybde under overflaten, tektoniske forhold, og ytre laster (f.eks. trykk fra et damvederlag). Stabiliteten av bergmassen avhenger av størrelsen og retningen på de påførte spenningene i forhold til bergartens styrke. Moderate spenninger er normalt gunstig for stabiliteten til en bergmasse, mens manglende innspenning kan gi ustabile forhold. Ulike damtyper påfører også laster i ulike retninger og størrelser. F.eks. vil en hvelvdam påføre svært konsentrerte laster i vederlagene, mens en gravitasjonsdam (og i enda større grad fyllingsdam) fordeler kreftene over et langt større areal.

Vann og vannstrømning langs bergsprekker vil kunne bløte opp og vaske ut mineralfyllinger slik at friksjonen langs sprekkeflatene reduseres. Vanntrykk (poretrykk) i sprekkeflaten vil også redusere normalspenningen på sprekkeflatene slik at blokker lettere kan gli ut.

I praksis er det sjelden mulig å gi nøyaktige tallverdier for alle disse parameterne. Dette medfører at de i varierende grad må baseres på erfaring og faglig skjønn.

### 4.3 Metoder for bergklassifisering

Det finnes i litteraturen et stort antall metoder for *bergklassifisering*. Disse metodene tar hensyn til forskjellige aspekter av bergmassens fysiske og mekaniske egenskaper, som regel en kombinasjon av to eller flere av faktorene listet ovenfor. Mange av metodene er utviklet for tunnelvirksomhet eller gruvedrift. Utviklingen av disse metodene har i stor grad fulgt utviklingen av bergmekanikk og ingeniørgeologi som fagfelt fra ca. 1950-tallet til i dag. En god gjennomgang av denne historikken kan finnes i Hoek (2023).

Av velkjente metoder for bergklassifisering kan det nevnes:

- Terzaghi Rock Load Classification (Terzaghi, 1946).
- Rock Quality Designation, RQD (Deere et. al. 1967).

- Rock Structure Rating, RSR (Wickham et. al., 1972).
- New Austrian Tunneling Method (NATM).
- Rock Mass Rating, RMR (Bieniawski, 1973).
- Q-systemet (Barton, Lien og Lunde, 1974; NGI, 2015).
- Size-Strength Classification (Franklin, 1986).
- Unified Rock Classification System, URCS (Williamson, 1988).
- Geological Strength Index, GSI (Hoek, 1994).
- Dam Mass Rating, DMR (Romana, 2003).
- Krav og anbefalinger i publiserte standarder, som f.eks. Eurokode 7 som omfatter geoteknisk prosjektering.

De fleste klassifiseringsmetodene er i hovedsak kvantitative, dvs. at de bestemmer en tallverdi eller et tallområde for bergkvaliteten. Allikevel kan de som regel ikke direkte benyttes til å kvantitativt vurdere bergstabiliteten for gitte laster, f.eks. avgjøre hvor høy last bergmassen i et damvederlag tåler. For slike stabilitetsberegninger er det nødvendig med egne analyser.

#### 4.3.1 Rock Mass Rating (RMR)

Rock Mass Rating (RMR) ble utviklet av Bieniawski på 1970-tallet (Bieniawski, 1973), men har gjennomgått flere revisjoner gjennom årene. Systemet klassifiserer kvaliteten på bergmasser og benyttes i ingeniørgeologi og bergmekanikk, spesielt i forbindelse med tunnelbygging og gruvearbeid. RMR-systemet tar i betraktning seks hovedparametere:

1. Styrken på bergmaterialet (UCS).
2. Måling av borekjernens kvalitet, Rock Quality Designation (RQD).
3. Avstanden mellom bergsprekker / diskontinuiteter.
4. Tilstanden til disse sprekke.
5. Grunnvannsforhold.
6. Orientering av bergsprekker i forhold til konstruksjonen.

Ved bruk av systemet deles bergmassen inn i et antall regioner, med grenser som vanligvis sammenfaller med forkastninger eller annen endring i bergtype, og hver region klassifiseres separat. Hver av de seks faktorene tildeles en poengsum, og den samlede poengsummen brukes til å bestemme en samlet RMR-verdi. Denne kan deretter brukes til å vurdere bergmassens kvalitet og stabilitet (del C-F i systemet vist i Figur 4-2).

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter		Range of values							
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	2% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge 5 mm thick or Separation 1 - 5 mm Continuou	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal $\sigma$ )	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
		Rating		15	10	7	4	0	
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable			
Ratings	Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12			
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25			
	Slopes	0	-5	-25	-50				
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating		100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21			
Class number		I	II	III	IV	V			
Description		Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock			
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number		I	II	III	IV	V			
Average stand-up time		20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span			
Cohesion of rock mass (kPa)		> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100			
Friction angle of rock mass (deg)		> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15			
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
Rating		6	4	2	1	0			
Separation (aperture)		None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
Rating		6	5	4	1	0			
Roughness		Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided			
Rating		6	5	3	1	0			
Infilling (gouge)		None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm			
Rating		6	4	2	2	0			
Weathering		Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed			
Rating		6	5	3	1	0			
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis					
Drive with dip - Dip 45 - 90°		Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°			
Very favourable		Favourable		Very unfavourable		Fair			
Drive against dip - Dip 45-90°		Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike°					
Fair		Unfavourable		Fair					

\* Some conditions are mutually exclusive. For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.  
 \*\* Modified after Wickham et al (1972).

Figur 4-2 Rock Mass Rating (RMR) klassifiseringssystem. Figur fra Hoek (2023).

### 4.3.2 Q-systemet

Q-systemet, først utviklet på 1970-tallet av Barton, Lien, og Lunde ved NGI (Barton, Lien og Lunde, 1974), er en metode for å klassifisere bergmasser, primært for tunnelbygging og underjordiske konstruksjoner. Systemet gir en kvantifiserbar tilnærming for å bedømme bergmassens stabilitet behov for bergforsterkning. Systemet er blitt revidert flere ganger gjennom årene, senest i NGI (2015), og er i dag et standardverktøy i mange land for klassifisering av bergmasser i geotekniske og bergmekaniske prosjekter.



Høye Q-verdier indikerer god stabilitet, mens lave verdier signaliserer dårlig stabilitet. Q-verdien beregnes ut fra 6 parametere ved hjelp av:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

hvor

*RQD* = Rock Quality Designation. Måler oppsprekkingsgraden.

*J<sub>n</sub>* = Tall for sprekkesett.

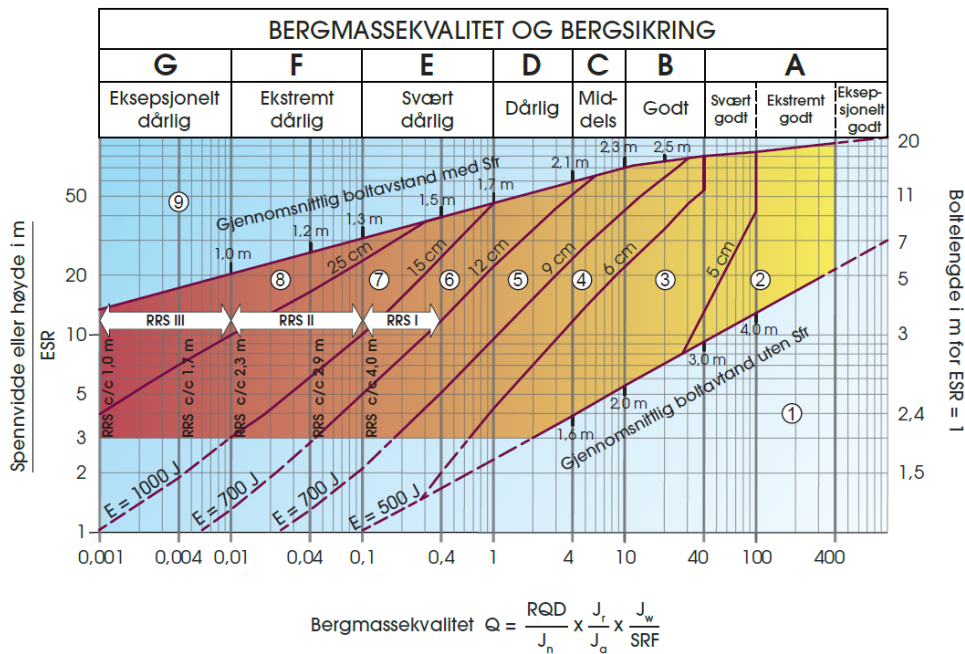
*J<sub>r</sub>* = Sprekkeruhetstall.

*J<sub>a</sub>* = Tall for sprekkefylling.

*J<sub>w</sub>* = Sprekkevannstall.

*SRF* = Stress Reduotion Factor. Spenningsfaktor.

Disse parameterne fastsettes gjennom geologisk kartlegging, der tabeller brukes for å gi numeriske verdier basert på den beskrevne situasjonen. Q-verdien kan også benyttes til å vurdere behovet for bergsikring i f.eks. tunneler eller fjellhaller, som vist i Figur 4-3.



Figur 4-3 Bruk av Q-systemet til å vurdere behov for bergsikring. Figur fra NGI (2015).

### 4.3.3 Dam Mass Rating (DMR)

Dam Mass Rating, DMR (Romana, 2003) er en klassifiseringsmetode for bergmasse som spesielt er tilpasset for vurdering av fundamentene til dammer. Det er avledet fra RMR-systemet, men tilpasser parameterne fra RMR til å spesielt adressere utfordringene og kravene i vurdering av damfundamenter. Dette inkluderer å ta hensyn til faktorer som er særlig relevante for damfundamenter, som vannstrømning, erosjonspotensial og orientering av sprekkesett relativt til damaksen.

Ligningen for DMR er gitt ved:

$$DMR_{STA} = RMR_{BD} + CF \cdot R_{STA}$$

hvor

$DMR_{STA}$  = DMR-verdien for vurdering av damstabilitet.

$RMR_{BD}$  = Verdien for RMR for tørr fjellmasse.

$CF = (1 - \sin |\alpha_d - \alpha_j|)^2$  = Korreksjonsfaktor som tar hensyn til den relative orienteringen til det viktigste sprekkesettet i bergmassen ( $\alpha_j$ ) relativt til oppstrøms-nedstrøms retning av damaksen ( $\alpha_d$ ).

$R_{STA}$  = Justeringsfaktor for damstabilitet basert på orienteringen til det viktigste sprekkesettet. Tar hensyn til damtype.

Høyere  $DMR_{STA}$  verdier indikerer mer gunstige forhold for stabiliteten av dammen, mens lavere verdier signaliserer potensielle risikoer som trenger nærmere undersøkelse. Det er ikke gitt konkrete grenser eller korrelasjoner mellom  $DMR_{STA}$  og sikkerhetsfaktor for damstabiliteten. Men generelt anbefaler Romana (2004):

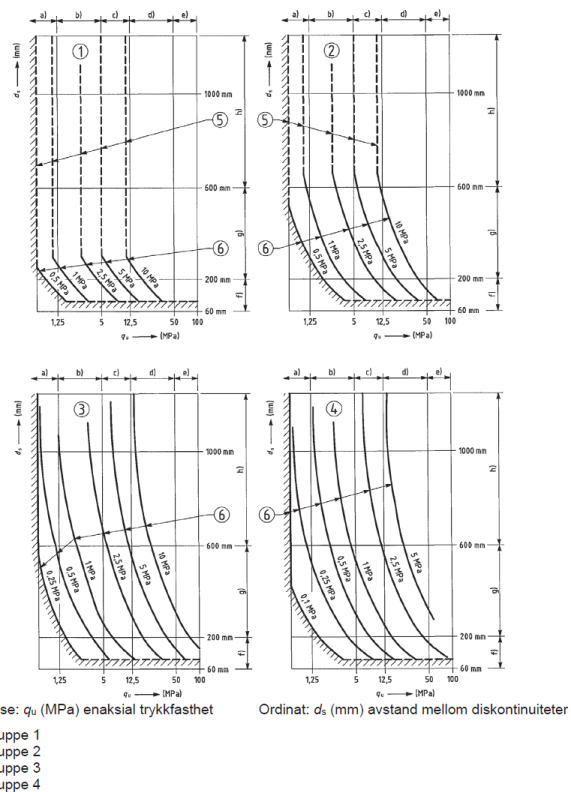
- $DMR_{STA} > 60$ : Det er ingen åpenbar grunn til bekymring for stabiliteten. Dette betyr at risikoen for stabilitetsproblemer anses som lav, men behovet for ytterligere evalueringer og / eller overvåking kan ikke utelukkes helt.
- $60 > DMR_{STA} > 30$ : Det kan være grunn til bekymring for stabiliteten. Det anbefales å gjennomføre mer detaljerte analyser og / eller overvåking for å vurdere mulige risikoer og vurdere nødvendige forsterkningstiltak eller endringer i driften.
- $DMR_{STA} < 30$ : Det er alvorlig grunn til bekymring for stabiliteten. Det bør iverksettes grundige undersøkelser og umiddelbar forsterkning eller rehabilitering av dammen. Det kan også være nødvendig med driftsrestriksjoner eller andre midlertidige tiltak for å sikre dammens og omgivelsenes sikkerhet.

Selv om DRM er ett av de få klassifiseringssystemene utviklet direkte for vurdering av damfundamenter, er metoden ikke blitt særlig utbredt blant damingeniører.

### 4.3.4 Eurokode 7

I Eurokode 7 (2016) for geoteknisk prosjektering er det beskrevet et system for beregning av tillatt såletrykk for et fundament. I stor grad baserer dette seg på klassifisering av berget inn i "type berg", og deretter vurderer man tillatt såletrykk med bakgrunn i bergtype, enaksial trykkfasthet (UCS) og avstand mellom sprekker.

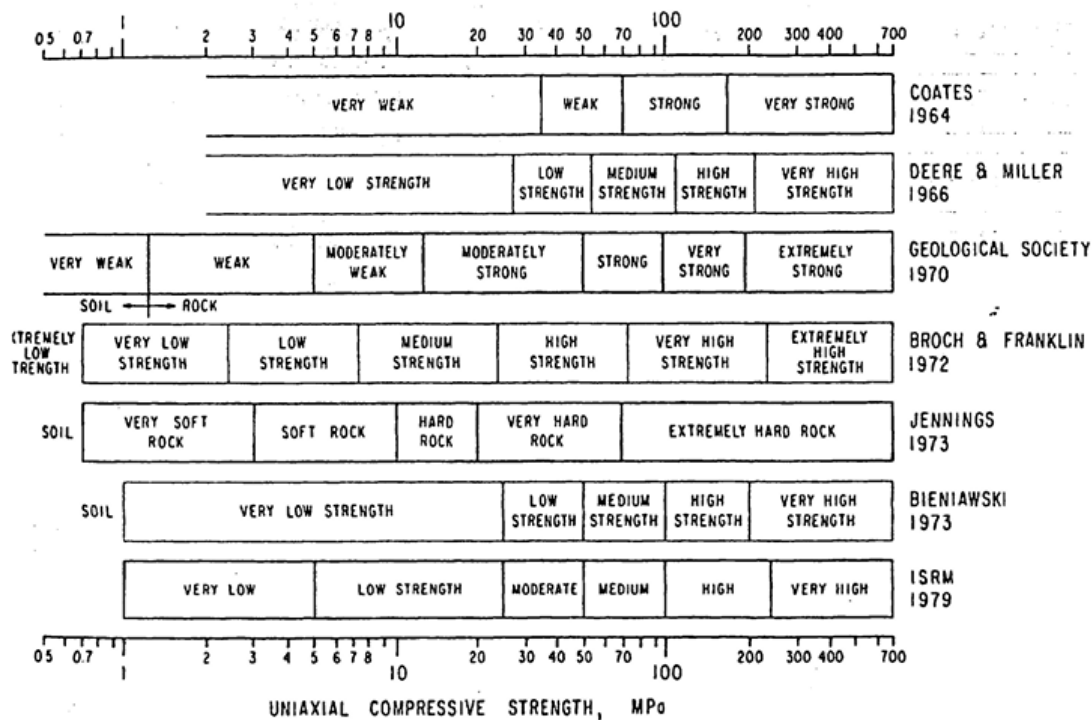
Gruppe	Type berg
1	Ren kalkstein og dolomitt Karbonatsandstein med lav porøsitet
2	Størkningsbergarter Oolittisk og mergelholdig kalkstein Velsementert sandstein Herdnet karbonat-leirstein Metamorfe bergarter, inklusive skifer (flattliggende kløyv/foliasjon)
3	Sterkt mergelholdig kalkstein Svakt sementert sandstein Skifer (steiltstående kløyv/foliasjon)
4	Usementert leirstein og leirskifer



Figur 4-4 Rammeverk for å bestemme tillatt såletrykk i Eurokode 7 (2016).

### 4.3.5 Andre metoder

Det finnes et stort antall metoder som klassifiserer berg med bakgrunn i resultater fra styrketester alene. De fleste baserer seg på enaksial trykkfasthet (UCS), som er bergstyrken målt på en sylindrisk prøve i en enaksial trykktest med null sideveis trykk. Dette er en av de viktigste parameterne som benyttes i geoteknikk for å vurdere bergmassens styrke. UCS-tester utføres i laboratoriet på bergprøver, hvor en gradvis økende belastning påføres til prøven svikter. Høy UCS indikerer en sterkere bergmasse / bergart. En sammenstilling av tidlige klassifiseringssystemer basert på UCS styrke er vist i Figur 4-5 (Bieniawski, 1989).



Figur 4-5 Ulike klassifiseringer av bergkvalitet basert på UCS styrke. Figur fra Bieniawski (1989).

### 4.3.6 Bruk av klassifiseringsmetodene

Med unntak av DMR er ingen av de nevnte klassifiseringssystemene spesifikt utviklet for dammer. De fleste er heller ikke spesielt tilpasset norske forhold og bergarter. Det er derfor nødvendig med en viss tilpasning av metodene for å sikre at de er relevante og nyttige for bruk for norske dammer.

Klassifiseringsmetodene er generelt nyttige til å vurdere overordnet kvaliteten og stabiliteten til berggrunnen der dammen er / skal bygges, til å støtte prosjektering eller revurdering av dammen, og til å identifisere og håndtere mulige problemer (f.eks. høy lekkasje gjennom berggrunnen). Men klassifiseringssystemene gir bare en indikasjon på bergkvaliteten, og de kan ikke erstatte detaljerte geotekniske og geologiske undersøkelser, tester, og analyser som er nødvendige for prosjektering av nye dammer og revurdering av eksisterende dammer.

## 4.4 Nødvendige undersøkelser for å avgjøre bergkvalitet

For å bestemme inngangsparametere for metodene for vurdering av bergkvalitet, er det nødvendig å gjennomføre geologiske og geotekniske undersøkelser. Slike metoder inkluderer:

- **Geologisk kartlegging og befaring.** Skrivebords- og feltundersøkelser for å kartlegge topografi, geologiske strukturer, bergarter, sprekkesett, og andre viktige egenskaper ved bergmassen. Dette inkluderer identifisering av sprekkeretninger, sprekkeavstand, og sprekkeforhold. De nasjonale berggrunnkartene fra NGU er en god ressurs i dette arbeidet (<https://geo.ngu.no/kart/berggrunn>).
- **Kjerneboring.** Borekjerner gir informasjon om bergartstype, oppsprekkingsgrad, og bergmassens kvalitet som er nødvendig for å bestemme bl.a. RQD og andre egenskaper ved bergmassen.
- **Labororientester.** For å bestemme fysiske og mekaniske egenskaper av bergartene på stedet, inkludert ulike styrkeparametere som UCS-styrke og skjærstyrke, deformasjonsmodul, og annen materialkarakteristikk.
- **Hydrogeologiske undersøkelser.** Hydrogeologiske undersøkelser og analyse av grunnvannsnivå, vanntrykk / poretrykk, og strømningsforhold i bergmassen. Vanntrykkstester (f.eks. Lugeon-tester) er aktuelt for å evaluere bergmassens permeabilitet og potensiale for gjennomstrømning og lekkasje.
- **Geofysiske undersøkelser.** Metoder som seismiske undersøkelser, elektrisk resistivitet, og grunnpenetrerende radar kan brukes for å få innsikt i bergmassens struktur og fysiske egenskaper under overflaten.

#### 4.4.1 Anbefalinger i FERC sine retningslinjer

FERC anbefaler i sine retningslinjer at minimum følgende egenskaper etableres for berggrunnen for bruk i stabilitetsanalyser av gravitasjonsdammer (FERC, 2016):

- Skjærstyrker langs sprekkesett og gjennom intakt berg.
- Trykkfasthet (UCS styrke).
- Deformasjonsmodul til bergmassen.
- Hydrostatisk vanntrykk i dominerende sprekkesett.
- Bergets permeabilitet.

Styrke- og deformasjonsparametere blir vanligvis etablert ved laboriorientester på prøver som er innhentet på damstedet, men i noen tilfeller må det utføres in-situ testing. Kartlegging av fundamentets permeabilitet er nødvendig for å etablere parametere for vurdering av opptrykk, samt å designe et passende drenasjesystem og / eller injeksjonsskjerm. Permeabilitetstesting bør utføres in-situ på bergmassen og ikke på en isolert prøve. Vanntrykk på dominerende sprekkesett kan måles med piezometre.

Før valg av egenskaper for fundamentet og bergmassen, bør all tilgjengelig geologisk informasjon gjennomgås for å beskrive type materiale geologiske strukturer. Videre undersøkelser bør gjennomføres hvis de tilgjengelige resultatene indikerer dårlige fundamentforhold, f.eks. betydelig oppsprukket, skifrig eller foliert berg, sprekkesett som har ugunstig retning, tegn på huler eller synkehull i berget, høyt vannopptak under vanntrykkstester, eller høyt forbruk av injeksjonsmasse ved injeksjon.

FERC anbefaler videre i sine retningslinjer for geotekniske undersøkelser (FERC, 1991) at omfanget av undersøkelsene vurderes ut fra dammens konsekvensklasse, damtype, og type og mengde data som allerede er tilgjengelig. Undersøkelsene kan overordnet deles inn i tre separate faser (for nye dammer):

- Forundersøkelser / konseptstudie. Denne fasen skal gi et generelt inntrykk av ingeniørgeologiske aspekter ved damstedet. Feltarbeidet vil som regel inkludere en forenklet geologisk kartlegging, noen begrensede borehull / kjerneboringer, og muligens geofysiske undersøkelser. Dataene vil også bli brukt til å planlegge videre undersøkelser og program for laboratorietesting.
- Undersøkelser for skisseprosjekt. Disse undersøkelsene skal gi mer detaljert informasjon om geologien og gi data for foreløpige vurderinger av design og byggemetode. Dette bør inkludere mer detaljert utforskning av overflate- og berggrunn, og tas prøver gjennom boringer, testgroper / grøfter, materialtesting, geologisk kartlegging og ytterligere geofysiske undersøkelser.
- Undersøkelser for detaljprosjektering. Disse undersøkelsene supplerer informasjonen som allerede er tilgjengelig, og vil hovedsakelig bestå av mer detaljert boring, prøvetaking og testing konsentrert om spesifikke spørsmål eller usikkerheter på damstedet. De må være spesielt planlagt for å gi nødvendig informasjon til å designe dammen og supplerende tiltak, estimere mengder og byggemetoder, og utvikle kostnadsestimater.

For eksisterende dammer kan omfanget av slik data være relativt begrenset, avhengig av kvaliteten på eksisterende data og dokumentasjon fra bygging. Revurdering og evaluering av en eksisterende dam krever generelt detaljerte grunnlagsdata om fundamentet som kun kan oppnås ved ingeniørgeologiske vurderinger, og evt. kjerneboring, prøvetaking og testing. Et grunnprinsipp bør være at eksisterende dammer bør vurderes ut fra samme krav til informasjon som nye dammer. FERC argumenterer at det faktisk at dammen allerede er bygget ikke er god nok grunn til å unnlate å gjennomføre nødvendige undersøkelser dersom dette ikke er tilgjengelig fra prosjektering eller bygging.

#### 4.4.2 Anbefalinger i Eurokode 7

Eurokode 7 (2016) anbefaler at berggrunnen klassifiseres etter kvaliteten av det faste materialet (intakt berg) og oppsprekking. Det anbefales at man benytter et bergklassifiseringssystem til å vurdere bergmassens egenskaper som:

- Fasthet og stivhet.
- Oppsprekking, særlig i sprekkesoner.
- Permeabilitet i sprekkesett.
- Deformasjonsegenskaper til forvitret berg.

Kvaliteten av berggrunnen beskrives ved forvitring, kornstruktur, mineralkornstørrelse, og hardhet og seighet av intakt berg. Oppsprekkingen karakteriseres ved sprekkestype,

åpning, samt avstand og kvalitet på sprekkefyllingen. I tillegg bør det bestemmes (ved prøver) bl.a. mineralogi, vanninnhold, porøsitet, deformasjonsmodul og enaksial trykkfasthet.

For bestemmelse av permeabilitetsparametere skal det benyttes in-situ prøver siden bergmassens permeabilitet vanligvis er høyere på grunn av sprekker og riss. Dette kan bestemmes f.eks. ved hjelp av pumpeprøvinger kombinert med en strømningslogg der det tas hensyn til strømningsforholdene.

For planlegging av undersøkelsene skiller det mellom to faser av prosjektet:

- Forundersøkelser, som benyttes i en tidlig fase til å vurdere stedets generelle egnethet og sammenligne ulike alternativer.
- Prosjekteringsundersøkelser, som utføres for å gi tilstrekkelig informasjon for prosjektering, planlegging av bygging og identifisere eventuelle problemer som kan oppstå under bygging. Dette inkluderer pålitelige verdier for alle viktige designparametere.

De geologiske og geotekniske resultatene presenteres i en grunnundersøkelserapport. Denne skal inneholde dokumentasjon av benyttede metoder, prosedyrer og resultater, inkludert all relevante informasjon fra skrivebordstudier, feltundersøkelser og prøvetaking, og laboratorietester.

## 4.5 Anbefalinger for vurdering av berggrunn

Det er generelt viktig å ha god kontroll på egenskapene til fundamentet og berggrunnen ved dammer. Som et minimum av informasjon bør det foreligge en ingeniørgeologisk vurdering av fundamentet og dets stabilitet. Dette er nødvendig for å vurdere generelle trekk for fundamentet, som bergtype, sprekkesett og sprekkeorientering, vurdere risiko for utvikling av høy vanngjennomstrømning, lekkasje og ugunstige poretrykk i fundamentet, og fastsette verdier for inngangsparametere som er nødvendig i stabilitetsberegninger. Dette inkluderer representativ friksjonsvinkel for bergmassen og trykkfasthet og deformasjonsegenskaper til bergmaterialet.

I tilfeller der det er usikkerhet rundt fundamentets stabilitet eller permeabilitet, eller er identifisert tegn på forhold som kan medføre problemer, bør det utføres videre undersøkelser. Dette kan innebære en mer omfattende ingeniørgeologisk vurdering, og videre kjerneboring, prøvetaking og laboratorietesting, hydrogeologiske undersøkelser, og eventuelt bruk av geofysiske undersøkelser.

Det bør generelt stilles tilsvarende krav til informasjon om fundamentet for eksisterende dammer som det gjøres til nye dammer. Man bør også vurdere tilstrekkeligheten av informasjonen med jevne mellomrom, f.eks. i forbindelse med revurderinger. Dersom det er andre usikkerheter av stor betydning (f.eks. dersom man benytter observasjonsmetoden til å regne med reduserte antagelser om opptrykk i

stabilitetsberegninger), kan dette medføre behov for mer omfattende undersøkelser og kartlegging. Allikevel bør krav til informasjon om fundamentet for eksisterende dammer sees i forhold til risikobildet for dammen – det bør forventes at en dam med høy risiko foretar mer omfattende undersøkelser enn en dam med lav eller ubetydelig risiko. Faktorer som påvirker risikobildet til dammen inkluderer bruddkonsekvenser / konsekvensklasse, type konstruksjon, fundamentforhold, hydrologiske forhold, dammens historikk, og om det er kjente feil eller mangler.

Det finnes en rekke klassifiseringssystemer for vurdering av bergkvalitet og bergstabilitet. Med unntak av Dam Mass Rating (DMR) er de fleste av disse utviklet for tunneler og annet undergrunnsarbeid. Dersom man skal gå inn for å benytte et slikt system for klassifisering av berggrunnen ved norske dammer, anbefales det at det først foretas en grundigere gjennomgang av de ulike systemene, og at vassdragsbransjen deretter enes om et felles system som skal benyttes. Dette bør også omfatte en gjennomgang av nødvendig informasjonsgrunnlag som bør foreligge.



## 5 Plan for instrumentering

### 5.1 Overordnet

I henhold til damsikkerhetsforskriften § 5-2 skal alle vassdragsanlegg i Norge ha tekniske planer som dokumenterer at kravene i damsikkerhetsforskriften blir fulgt. Disse skal inneholde *plan for instrumentering* av vassdragsanlegget. Overvåking med instrumentering skal etableres for tre faser: bygging, idriftsettelse, og driftsfase, jfr. damsikkerhetsforskriften § 6-1d, § 6-2c og § 7-2. Veilederen for planlegging og bygging (NVE, 2012) inkluderer et punkt om beskrivelse av instrumentering, men er ikke spesifikk på nødvendig omfang av hva en plan for instrumentering bør inneholde.

For dammer i driftsfasen er overvåking og tilsyn med dammen angitt i damsikkerhetsforskriften § 7-2 som angir at det skal foreligge en *plan for overvåking*. Ytterligere detaljer om hva en plan for overvåking skal inneholde er spesifisert i veileder for overvåking av vassdragsanlegg (NVE, 2019).

For instrumenteringen spesielt spesifiserer (NVE, 2019) at en plan for instrumentering må angi alle måleparametere og for hver parameter må planen beskrive og helst begrunne:

- Grenseverdier fastsatt i henhold til § 7-4 og eventuelt andre varslingsverdier.
- Måleområde som skal dekke både forventede verdier og grenseverdier, det bør normalt instrumenteres for å måle noe høyere verdier enn grenseverdiene.
- Instrumenter / måleutstyr / måleteknikk.
- Referansesystem / måleenhet.
- Målenøyaktighet.
- Hyppighet av målinger og avlesninger.
- Plasseringen av instrumenter og andre måleinnretninger, vist på tegning.
- Hvordan målinger (avlesning / innsamling) gjennomføres.
- Når og hvordan måleverdiene skal bearbeides, analyseres og dokumenteres (tabell / grafer).
- Når og hvordan instrumentene og andre måleinnretninger skal kontrolleres / kalibreres.
- Hvordan det skal oppnås tilfredsstillende driftssikkerhet og pålitelighet av instrumenter, andre måleinnretninger og system for overføring av måleverdier.

Det er i NVE (2019) også gitt anbefalinger for hvilke parametere som bør måles, hvordan de bør måles, og hvor ofte målinger bør foretas.

Visuelle inspeksjoner (og evt. funksjonstesting) er sammen med instrumentering og måledata den primære kilden for å bekrefte at vassdragsanlegget responderer og fungerer som forventet. Siden mange mulige bruddforløp for dammer er langsomme, gradvise prosesser, spiller måledata en viktig rolle i å oppdage tidlige tegn på forhold som kan redusere damsikkerheten. Vassdragsanlegg skal overvåkes slik at forhold som kan føre

til reduksjon av anleggets sikkerhet kan avdekkes så tidlig som mulig. Dataene og funnene fra overvåkingen er viktig for beredskap og eventuell nødrespon.

En plan for instrumentering omfatter alle måleparametere som er av interesse for dammens drift og sikkerhet. Siden denne rapporten omhandler poretrykkmålinger spesifikt, har påfølgende avsnitt fokus på poretrykk og måling av poretrykk, og andre måleparametere er kun kort behandlet.

## 5.2 Identifisering av bruddmekanismer (PFM)

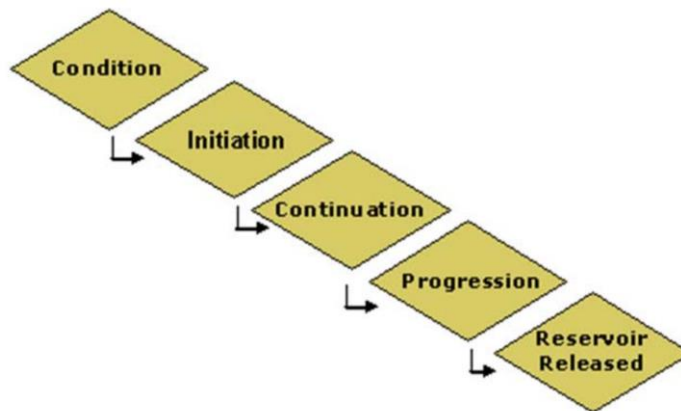
Identifisering og analyse av potensielle bruddmekanismer for dammer (Potential Failure Mode Analysis, PFMA) er en internasjonalt anerkjent metode som systematisk gjennomgår ulike scenarioer for en dam for å identifisere og beskrive de hendelsene som kan utvikle seg til å medføre et dambrudd. Metoden er i stor grad utviklet og gjort kjent av Federal Energy Regulatory Commission (FERC) i USA.

PFMA-prosessen inkluderer gjennomgang av tilgjengelig bakgrunnsinformasjon, befaring på damstedet, og en eller flere workshoper som har til hensikt å identifisere og evaluere potensielle bruddmekanismer, konsekvenser og mulige tiltak (FERC, 2021). Dette benyttes videre til å forstå og håndtere risiko ved dammen ved å identifisere hvilke potensielle bruddmekanismer som krever spesiell oppmerksomhet, overvåking og vedlikehold for å opprettholde dammens funksjonalitet og sikkerhet. FERC har publisert omfattende retningslinjer for hvordan planlegge og gjennomføre en PFMA, og hvordan analysene skal benyttes i arbeidet med utarbeiding av plan for instrumentering (FERC 2017, 2021).

Førløpet til en mulig bruddmekanisme beskrives i følgende trinn (Figur 5-1):

- "Condition": De innledende forholdene ved initiering av bruddmekanismen, f.eks. ytre laster, magasinnivå, strukturell tilstand til dammen, etc.
- "Initiation": Selve initieringen av hendelsen (f.eks. at en lekkasje oppstår eller et jordskjelv inntreffer).
- "Continuation" og "progression": Trinnene som er nødvendige for at bruddmekanismen skal fortsette å utvikle seg til et dambrudd.
- "Reservoir released": Dammen går til brudd og medfører ukontrollert tap av magasinet. Dette steget inkluderer beskrivelse av type bruddutvikling (raskt, langsomt, fullt eller delvis dambrudd, etc.).

Det er viktig at bruddmekanismene er beskrevet så godt og nøyaktig som mulig. Utilstrekkelige beskrivelser kan medføre at man ikke har den nødvendige informasjonen for å utvikle og iverksette et overvåkingsprogram, eller tilstrekkelig vurdere risikoen for damsikkerheten.



Figur 5-1 Fem steg i beskrivelse av en mulig bruddmekanisme. Figur fra FERC (2021).

I planleggingen av instrumentering for dammer, bruker man PFMA for å støtte beslutninger om hvilke typer instrumenter som skal brukes, hvor de skal plasseres, og hvor ofte data skal samles inn. F.eks. kan det for en rask bruddmekanisme være nødvendig med kontinuerlig målinger, mens det for en mer saktegående bruddmekanisme kanskje holder med årlige målinger. Det overordnede formålet med målingene er å oppdage tegn på problemer tidlig og gi grunnlag for å ta gode beslutninger om drift, vedlikehold og beredskap for dammen. De identifiserte bruddmekanismene bør oppdateres regelmessig for å ta hensyn til endringer i dammens tilstand eller nye observasjoner, slik at overvåkingsprogrammet forblir relevant og tilpasset de aktuelle risikoene.

Eksempler på bruddmekanismer som relaterer til poretrykk og opptrykk, og mulige overvåkingstiltak for å kontrollere bruddmekanismene, er vist i Tabell 5-1.

Selv om hovedfokus for overvåkingsprogrammet bør knyttes tett opp mot de spesifikke bruddmekanismene som er relevant for den dammen, er det allikevel også et behov for å ha et minimumsnivå av "generell instrumentering og overvåking". Slik overvåking gir grunnleggende data om dammens tilstand og oppførsel som kan gi informasjon om mulige forhold som ikke allerede har blitt identifisert som mulige bruddmekanismer. Å bestemme hva som bør være et passende nivå for en slik generell overvåking kan være utfordrende siden alle dammer er forskjellige, og meninger om hva som er nødvendig eller ikke endrer seg over tid. Generelt velges som oftest slik instrumentering ut fra et grunnprinsipp om hva som vil gi mest mulig verdifull data til lavest mulig kostnad (USBR, 2014b). Ordet "overvåking" benyttes her til å mene både instrumentering og visuell inspeksjon.

Tabell 5-1 Eksempler på identifiserte bruddmekanismer for Notur Dam, USA. Dammen er en fyllingsdam med overløp i betong. Fra FERC (2021).

Bekrivelse av bruddmekanisme	Mulige overvåkingstiltak
<b>Skråningsstabilitet:</b> Drenasjen ved damtå tetter seg / blir ineffektiv, dette fører til en økning i poretrykkslinjen som resulterer i progressiv utglidning, bruddet griper bakover til damkronen, dammen overtoppes og medfører ukontrollert tap av magasinet.	Inspeksjon av drenasje ved damtå; se etter endring i målt lekkasje; se etter endring i målt poretrykk i nedstrøms piezometre.
<b>Skråningsstabilitet:</b> Høy poretrykkslinje i fyllingsdammen fører til utglidning i nedstrøms skråning, overtopping av dammen, og ukontrollert tap av magasinet.	Inspeksjon av nedstrøms skråning for tegn til ustabilitet; måling av poretrykk i nedstrøms skråning; måling av deformasjoner i nedstrøms skråning.
<b>Indre erosjon i fundament:</b> Bakoverrettet erosjon (piping) i materialene i et gjennomgående sandlag i fundamentet under venstre vederlag. Erosjonen fortsetter og fører til synkehull, overtopping, og ukontrollert tap av magasinet.	Inspeksjon av nedre del av vederlag for tegn til lekkasje eller blakket vann; installere piezometer ned til sandlag for å måle endringer i poretrykkslinje.
<b>Opptrykk / betongsvikt:</b> Tetting av drenasjen til betongoverløpet fører til økt opptrykk som resulterer i svikt i betongplaten. Den sviktende platen fører til erosjon av damfundamentet og bakovergripende erosjon mot toppen av overløpet. Erosjonen fortsetter og undergraver overløpsseksjonen, noe som resulterer i glidning eller velting av seksjonen og ukontrollert tap av magasinet.	Inspeksjon av betongoverløp og drenasje; måle opptrykk under betongplaten i overløpet.

### 5.3 Målbare parametere

Instrumenteringen har generelt til hensikt å måle belastningene på dammen (i den grad det er mulig), samt dammens respons til disse belastningene. Avvik fra "normal" oppførsel kan opptre enten som følge av endrede ytre laster, eller som følge av en endring i respons til en konstant ytre last (NGI, 1994). Eksempler på målbare ytre belastninger er magasin vannstand, temperatur og nedbør / snø. Eksempler på målbare responsparametere er: lekkasje, turbiditet, deformasjoner, og tøyninger. I denne sammenhengen kan poretrykk (i damkropp eller damfundament) og opptrykk sees på både som en ytre last, og som en responsparameter.

For å kunne analysere og treffe tiltak i en unormal situasjon er det viktig at man kjenner både ytre belastning og respons. I praksis kan disse derimot være vanskelig å skille fra hverandre. Det finnes ytre belastninger som er vanskelige å måle på en god måte (f.eks. jordskjelvrystelser og islaster), og selv om man har måling av både laster og respons,

kan det være krevende å etablere hva som er "normal" respons for de målte lastene, spesielt om de er laster som ikke tidligere er observert.

Av de ovennevnte målbare parameterne er det flere som har særlig betydning for måling og vurdering av poretrykk og opptrykk på en god måte:

- **Vannstand:** Magasin vannstanden er den primære driveren for poretrykket og opptrykket i og nær en dam. Med tomt magasin bør det være neglisjerbare poretrykk og opptrykk (tilsvarende naturlig grunnvannstand). For å kunne tolke og analysere måledata for poretrykk og opptrykk er det derfor viktig å etablere en korrelasjon mellom vannstand og poretrykk, slik at man forstår i hvilken grad endringer i magasin vannstanden fører til endringer i poretrykket. Dette påvirker også valg av grenseverdier og terskelverdier for beredskap.
- **Temperatur:** Ofte observeres det sesongvariasjoner i det målte poretrykket. I tillegg til sesongmessige endringer i magasin nivå tilskrives dette i stor grad temperaturendringer, som medfører små deformasjoner i betongdammer og fundamenter som igjen påvirker sprekkeåpning og permeabilitet til bergmassen og dermed de målte poretrykkene.
- **Lekkasje og gjennomstrømning<sup>1</sup>:** De samme forholdene som påvirker poretrykk påvirker også lekkasje og gjennomstrømning. Vanligvis er den primære driveren magasin vannstanden, og gjennomstrømningen i dammen bestemmes i stor grad av permeabiliteten til materialene i dam, fundament og vederlag. Det er derfor en direkte sammenheng mellom gjennomstrømning og poretrykk, og begge kan estimeres ved en strømningsanalyse. Når en stabil strømmingssituasjon har inntruffet (som kan ta flere år etter første oppfylling), vil et avvik fra "normal" lekkasje / gjennomstrømning ofte være et tegn på mulige problemer: økt lekkasje kan indikere sprekkdannelse eller påbegynnelse av indre erosjon, mens redusert lekkasje kan indikere at drenasjen har blitt tilstoppet.
- **Deformasjoner:** Deformasjoner, særlig i betongdammer, er i stor grad sesongavhengig og varierer med vannstand og temperatur. Det er derfor ofte korrelasjon mellom målte poretrykk, lekkasje og deformasjoner. Irreversible deformasjoner er derimot ofte et tegn på mulige problemer.

## 5.4 Viktigheten av visuelle observasjoner

Flere av måleparameterne ovenfor kan ikke overvåkes effektivt kun ved bruk av instrumenter. Rutinemessig visuell overvåking kreves i tillegg til instrumentert overvåking. Som eksempler kan det nevnes (USBR, 2014b):

---

<sup>1</sup> På norsk benyttes ofte ordet *lekkasjemåling* om målinger som omfatter både lekkasje og normal gjennomstrømning. På engelsk derimot skiller det ofte mellom *seepage*, som defineres som den normale gjennomstrømningen gjennom en dam, fundament og vederlag som følge av magasinet; og *leakage*, som defineres som en vannstrøm gjennom hull eller sprekker, og er et avvik fra normal oppførsel.

- Måledata fra instrumentering av vannstand, poretrykk, lekkasje og deformasjoner (f.eks. inklinometerdata eller innmåling av setningsbolter) vil være viktige for å identifisere en mulig ustabil nedstrøms skråning i en fyllingsdam. Men samtidig viser tilgjengelige case-historier at visuelle inspeksjoner av nedstrøms skråning med tanke på sprekker, utbulinger, etc. har identifisert flere pågående bruddmekanismer.
- Deformasjonsmålinger i betong og fuger kan (forutsatt at dataene tolkes korrekt og i tide) identifisere mulige pågående deformasjoner av en slik art at de kan føre til et dambrudd. Imidlertid er som regel en kombinasjon av både instrumentert og visuell overvåking nødvendig for å se etter store deformasjoner, sprekker og riss som gir grunn til bekymring. Visuelle inspeksjoner kan identifisere områder med mulige problemer, som deretter kan overvåkes med instrumenter.

For visuelle observasjoner er det viktig å se sammenhengen mellom skadetyper (som kan observeres og identifiseres) og skadeårsaker (som ikke kan direkte måles eller observeres). Dette kan variere for ulike damtyper og type fundament. NVE (2019) gir detaljer om skadeårsaker og skadetyper for ulike typer dammer, og har også eksempler på sjekklister for visuell inspeksjon.

## 5.5 Valg av overvåkingsprogram

Som tidligere nevnt er første steg i å etablere et godt overvåkingsprogram for en dam å identifisere de mulige bruddmekanismene som overvåkingsprogrammet skal adressere. I USBR (2014b) gjøres dette ved å først utføre en omfattende gjennomgang av de potensielle bruddmekanismene (PFMA), og foreta en risikovurdering av dammen sammen med alle parter som er involvert i damsikkerhetsarbeidet (bl.a. dameier, rådgivere og myndigheter). Med bakgrunn i denne informasjonen etableres deretter et passende overvåkingsprogram for å ivareta damsikkerheten. Prosessen består av (USBR, 2014b):

- Identifikasjon av de viktigste parameterne å overvåke for hver mulige bruddmekanisme som medfører en risiko for damsikkerheten.
- For hvert element i overvåkingsprogrammet vurderes verdien av dataene for å bestemme om målingene er tilstrekkelige og har passende nøyaktighet, pålitelighet og målefrekvens.
- For overvåkingsprogrammet som helhet, gjøres en vurdering for å bestemme om programmet gir tilstrekkelig informasjon og om det finnes unødvendig redundans. Dette inkluderer å vurdere hva som er et passende nivå for "generell instrumentering og overvåking".
- For hver måleparameter bestemmes området for forventet oppførsel (i samsvar med tilfredsstillende damsikkerhet) og det fastsettes grenseverdier.

Den samme prosessen som benyttes for nye dammer kan som hovedprinsipp også benyttes for revurdering eller ombygging av eksisterende dammer. For eksisterende dammer har man i tillegg fordelen av å ha tilgjengelig historikk om dammens oppførsel,

som kan gjøre det enklere å bestemme områder for forventet oppførsel. Ved revurdering av eksisterende dammer kan man finne at overvåkingsprogrammet krever justeringer. For eksempel at nye instrumenter er nødvendige eller at noen eksisterende instrumenter er unødvendige for dammens nåværende behov.

I valg av overvåkingsprogram må man ta hensyn til dammens fase siden behovene for overvåking er forskjellige gjennom dammens levetid. For poretrykk vil man typisk før en dam er bygget installere piezometre eller observasjonsbrønner i forbindelse med grunnundersøkelser for å etablere et grunnvannsnivå. Under bygging av dammen er poretrykksmålinger en viktig del av damkontrollen i forbindelse med kompaktering av masser i fyllingsdammer. Under første oppfylling får man de første dataene som kan bekrefte eller avkrefte antagelser gjort i prosjekteringen om gjennomstrømning, lekkasje, poretrykk, opptrykk, deformasjoner og setninger. Dette er typisk perioden der den mest intensive overvåkingen foregår. Når man deretter har (årevis med) data fra normal drift vil man som regel kunne redusere omfanget av overvåkingen til å tilpasses behovene for generell langtidsovervåking, samt overvåke mulige bruddmekanismer og eventuelle risikoer som har blitt oppdaget i løpet av de første driftsårene. Etter hvert som dammen blir eldre kan det igjen oppstå behov for økt overvåking, f.eks. dersom det oppstår problemer eller uønskede hendelser, eller man skal foreta en ombygging av dammen.

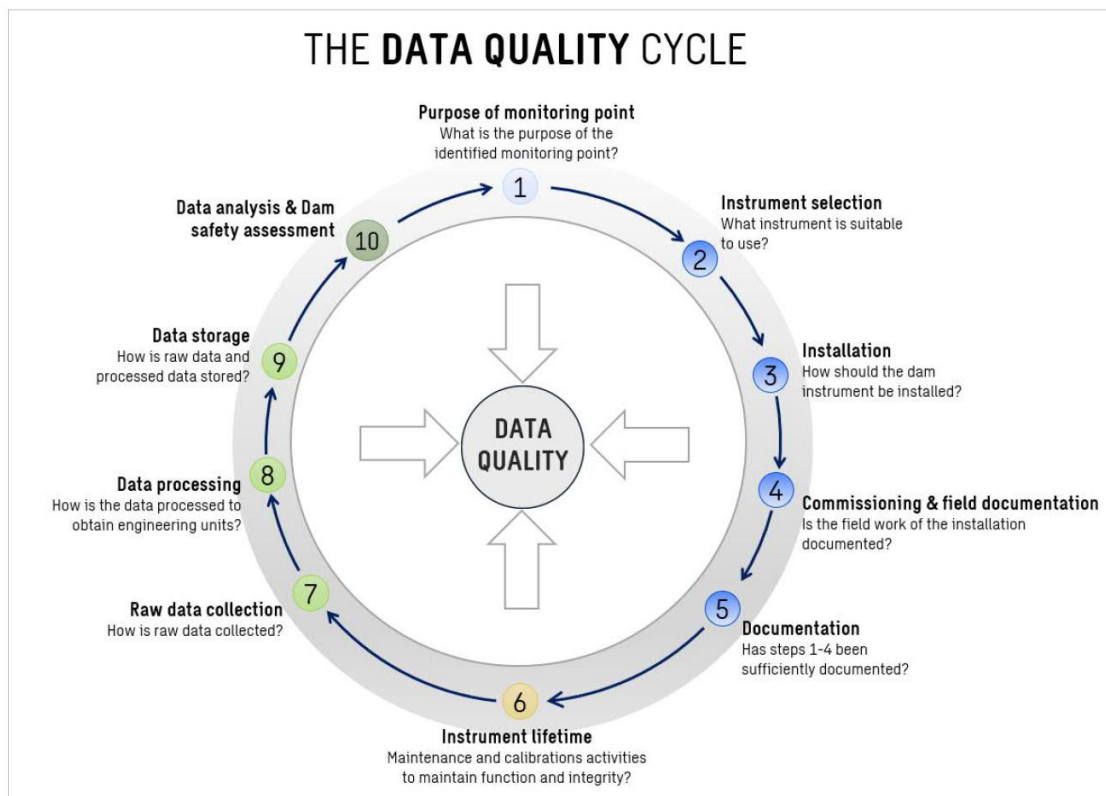
Av praktiske og økonomiske grunner må antall målepunkter i en dam begrenses. Instrumenter blir derfor som regel konsentrert i ett eller et beskjedent antall profiler, og disse velges med tanke på at måleresultatene skal gi et representativt bilde av de generelle forholdene i dammen. Siden poretrykk og opptrykk er parametere som kan variere betydelig både over dammens lengde og over damfotens / fundamentets bredde, bør det foretas målinger i flere tverrsnitt, og for hvert tverrsnitt bør det være flere målepunkter langs damfotens bredde (ICOLD, 2004; FERC, 1995). For måling av opptrykk under betongdammer bør det foretas målinger både i grensesjiktet mellom betong og fundament, og nede i selve fundamentet (ICOLD, 2018). Dersom man har for få målinger (f.eks. kun ett målepunkt for opptrykk) vil det være vanskelig å etablere fordelingen av opptrykk under dammen, og det er langt vanskeligere å identifisere og korrigere feilmålinger.

### 5.5.1 Datakvalitetsprosessen

Datakvalitetsprosessen (engelsk: The Data Quality Cycle, DQC), først presentert i Ljunggren et. al. (2013) og videreutviklet i Ljunggren et. al. (2023), er et rammeverk som systematisk gjennomgår prosessen med utvikling av et overvåkingsprogram. Prosessen starter med å definere hensikten med målingene, og går gjennom alle steg frem til måldata fra instrumentene er innhentet og klar til å bli brukt i analyser og vurderinger av damsikkerheten. DQC-rammeverket består av 10 trinn (Figur 5-2):

1. Beskrive hensikten med målingene.
2. Valg av instrumenter.
3. Installasjon.

4. Idriftsettelse.
5. Dokumentasjon.
6. Vurdering av levetid.
7. Innhenting av rådata.
8. Databehandling.
9. Datalagring.
10. Dataanalyse og vurdering av damsikkerhet.



Figur 5-2 De 10 stegene i datakvalitetsprosessen. Figur fra Ljunggren et. al. (2023).

I påfølgende avsnitt er rammeverket benyttet til å gjennomgå hovedtrekkene i utformingen av et instrumenteringsprogram.

### 5.5.2 Hensikt med instrumenteringsprogrammet

Å beskrive og dokumentere hensikten med instrumenteringsprogrammet er viktig siden dette i stor grad setter kravene til antall målepunkter, datanøyaktighet, oppløsning, målefrekvens, etc., som må vurderes i påfølgende trinn. For eksisterende dammer, særlig eldre dammer, er det ofte mangelfull dokumentasjon på hva den faktiske hensikten med målingene er. Dette medfører usikkerhet om hvorfor og hvordan dataene skal samles inn og hvordan det skal brukes til å tolke og evaluere dammens oppførsel. Det er vanskelig



å vurdere måledata på en god måte uten å ha en god forståelse av hvorfor dataene er blitt samlet inn. Hensikten med programmet bør i stor grad knyttes opp mot de mulige bruddmekanismene identifisert for dammen.

### 5.5.3 Valg av instrumenter

Noen generelle kriterier som kan påvirke hvilken instrumenttype som bør velges i en gitt situasjon er (USBR, 2014b): langsiktighet, pålitelighet og robusthet; lite behov for vedlikehold; mulighet for vedlikehold og utskiftning; kompatibilitet med damtype og byggeteknikker som skal benyttes; og lav kostnad. Mer spesifikt bør instrumenter velges med tanke på (Ljunggren et. al., 2023):

- Hensikt.
- Plassering i dam eller fundament.
- Forhold under og etter installasjon.
- Forventet måleområde.
- Nøyaktighet.
- Responstid.
- Manuell eller automatisk avlesning.
- Levetid.
- Vedlikehold og behov / mulighet for kalibrering.

Det finnes mye litteratur og informasjon om valg av instrumenter for ulike måleformål. Dette temaet er derfor ikke videre dekket i denne rapporten (utover diskusjonen i avsnitt 3.2). Anbefalt videre lesning om emnet inkluderer er vist i Tabell 5-3.

Tabell 5-2 Anbefalt videre lesning for valg av instrumenter.

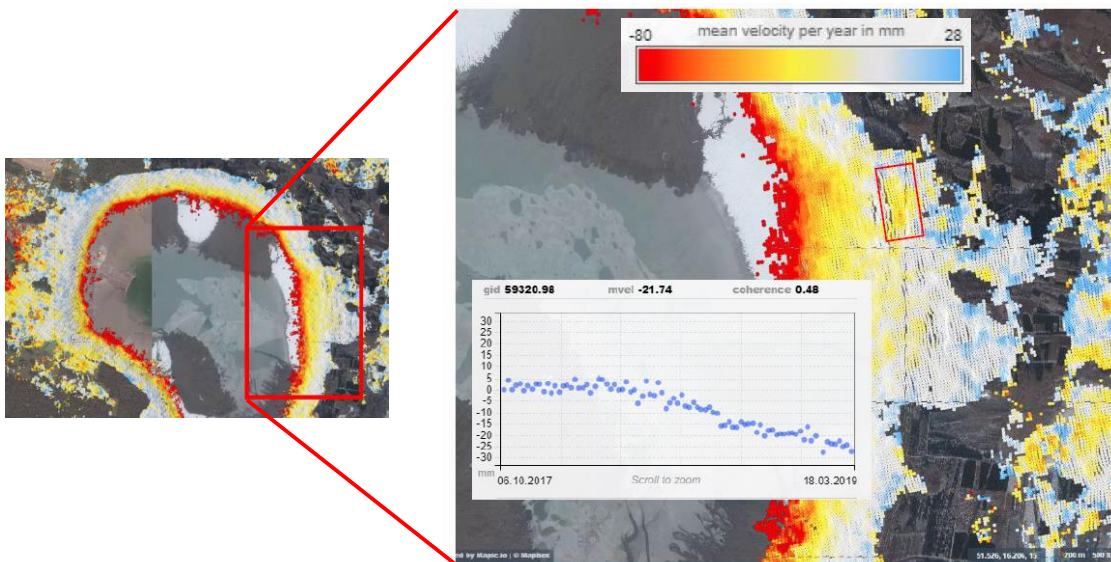
Referanse	Omfatter
NVE sin veileder for overvåking av vassdragsanlegg (NVE, 2019)	Alle måleparametere.
NGF sin veileder for måling av poretrykk (NGF, 2017).	Poretrykk.
ISO standarden for måling av poretrykk (ISO, 2020).	Poretrykk.
USBR sin veileder for instrumentering av fyllingsdammer (USBR, 2014b).	Alle måleparametere for fyllingsdammer.
FERC sin veileder for instrumentering (FERC, 1995).	Alle måleparametere.
Rapporter fra DSHP prosjektet som omhandler instrumentering (Sweco, 2017; Multiconsult, 2020).	Alle måleparametere.

### 5.5.4 Bruk av ny teknologi

Det er rask utvikling av teknologien for instrumenter, sensorer og datainnsamling og dataoverføring. Moderne metoder som kan være aktuelle, men som til nå ikke er benyttet i stor grad for norske dammer, inkluderer:

- Fjernmålinger via satellitt (InSAR)
- Målinger med fiberoptiske kabler som distribuert temperaturmåling (DTS), distribuert tøyningmåling (DSS) og distribuert akustikkmåling (DAS)
- Geofysiske og akustiske metoder, samt måling av resistivitet og magnetfelt (f.eks. ved geofoner, DAS, Willowstick eller selvpotensial)
- Georadar
- Bruk av droner med ulike sensorer (kamera, infrarød sensor, termometer, ++), f.eks. structure-from-motion fotogrammetri.

Mange av disse teknologiene virker lovende for bruk på dammer. F.eks. vil optiske fibre som måler temperatur langs damfoten raskt kunne lokalisere unormal gjennomstrømning eller punktlekkasjer med god oppløsning (Johansson, et. al., 2023). Tilsvarende kan Willowstick eller andre geofysiske undersøkelser benyttes til å avdekke lekkasjer i et løsmassefundament hvor det er begrenset med poretrykkssensorer i dammen. Allikevel har høy kostnad og kompleksitet til nå hindret utstrakt bruk av slik teknologi. En god gjennomgang av flere av disse teknologiene kan finnes i DSHP-rapporten om damhistorikk og instrumentering (Sweco, 2017).



Figur 5-3 Eksempel på bruk av InSar satellittdata til måling av deformasjoner ved Zelazny Most gruedam i Polen. Figur fra NGI.

### 5.5.5 Installasjon, idriftsettelse og dokumentasjon

Kompleksiteten i installasjon av instrumenter kan variere betydelig, fra relativt enkel til svært kompleks. Ofte har ikke utførende entreprenører spesialkompetanse på instrumentering, og det er derfor nødvendig med ekstra oppfølging.

Installasjon av instrumenter i eksisterende dammer skiller seg fra instrumentering utført under bygging av en dam på to viktige måter: (1) installasjon av instrumenter i dammens indre er begrenset til eksisterende åpninger eller nye borehull, og (2) installasjon av instrumenter på oppstrøms side under laveste magasinnivå er begrenset til det som kan utføres av dykkere eller ROV (fjernstyrt undervannsfartøy).

Begrensningene i adkomst er størst for fyllingsdammer og minst for lette betongdammer. I en platedam kan ethvert punkt nås med et borehull på noen få meter. I en fyllingsdam er det bare via gallerier at man kan komme til det indre av dammen, og slike gallerier finnes kun i et fåtall norske fyllingsdammer. Adkomstforholdene vil ofte være avgjørende for valg av instrumenteringsteknikk. Installasjon av piezometre i eksisterende dammer involverer som regel alltid boring i dammen eller fundamentet. Det er viktig at slik boring ikke gjøres på bekostning av dammens integritet (USBR, 2014a).

Etter installasjon skal instrumentene testes, kalibreres, settes i drift, og dokumenteres. Dokumentasjonen inkluderer "som bygget" tegninger, kalibreringsark, instruksjoner for vedlikehold, og bilder og logger fra installasjonen. Det er viktig at denne informasjonen blir registrert og lagret underveis i prosessen. Det finnes utallige eksempler på instrumenter som har blitt installert korrekt, men returnerer måledata som ikke kan benyttes pga. feil / manglende kalibrering eller ukjent posisjon av instrumentet.

### 5.5.6 Innhenting, behandling og lagring av data

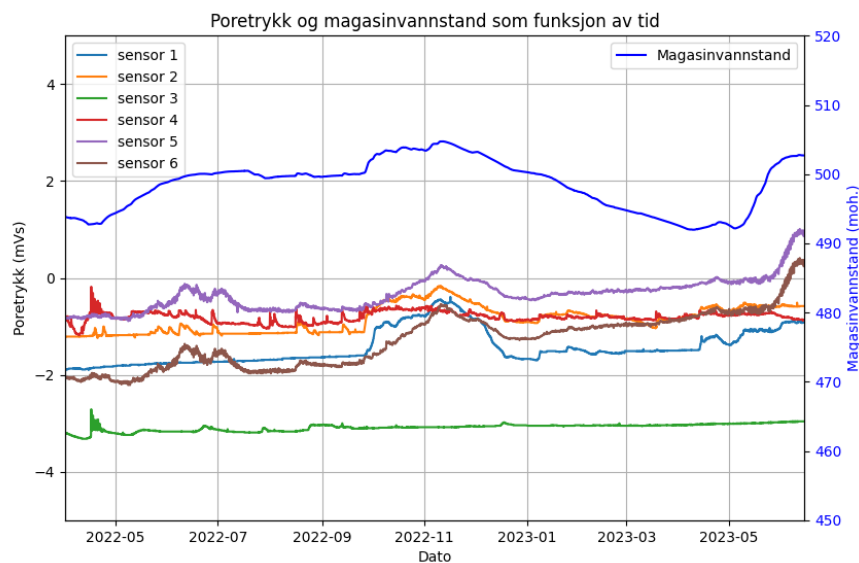
Innsamling, behandling og lagring av data har for dammer som regel blitt gjort "manuelt" ved bruk av Excel. Men med økt bruk av moderne målemetoder, kontinuerlig avlesning, og store mengder data er det nå i større grad enn tidligere behov for mer profesjonelle systemer for datainnsamling, behandling og lagring. De fleste store leverandører av instrumenter har sine egne systemer for dette, og det finnes også mange selvstående systemer på markedet.

DSHP rapporten "Mulighetsstudie: Instrumentering og overvåking av damanlegg" (Multiconsult, 2020) har en grundig gjennomgang av beste praksis for datahåndtering, databehandling, tolkning, og visualisering, og anbefales for videre lesning om emnet. NVE (2019) gir også eksempler på tolkning og visualisering av måledata.

Det er først når dataene er innhentet, behandlet og tolket at man har mulighet til å identifisere om noe har gått feil i prosessen. Blant de vanligste feilkildene for poretrykksmålinger kan det nevnes:

- Kalibreringsfeil. Feil kan oppstå når rådata konverteres til trykk eller vannstands nivå. F.eks. om en feil har skjedd i selve kalibreringen, eller feil formler eller konstanter er benyttet i databehandlingen.
- Tidsetterslep. Det kan ta tid før piezometret stabiliserer seg med det omkringliggende poretrykket, noe som kan påvirke målingenes nøyaktighet. Dersom måleren er tørrlagt etter installasjon vil den returnere upålitelige verdier.
- Instrumentfeil. Feil eller skade på selve måleinstrumentet kan føre til avvik i målingene.
- Ukjent dybde. Dersom eksakt dybde av piezometret ikke er kjent, eller borehullet avviker fra vertikalen (om det er antatt vertikalt), vil dette resultere i en uventet installasjonsdybde, og dermed forskjellig poretrykk fra det som er forventet.
- Hydrogeologiske forhold. Lokale variasjoner i naturlige poretrykk på grunn av hydrogeologiske forhold kan også føre til at man måler noe annet enn det man tror.

Dersom man identifiserer feil i måledataene vil muligheten til å korrigere for feilen avhenge av type sensor, plassering og tilgang til sensoren. For poretrykksmålinger med elektroniske vibrerende streng piezometre (som er standarden for dammer i de fleste tilfeller) er det generelt ikke mulig å komme til sensoren siden den står dypt nede i et gjenfylt borehull. Det er derfor liten mulighet til kontroll og re-kalibrering av sensoren. Dette setter ekstra høye krav til gjennomføring av testing, kalibrering og dokumentasjon av instrumentet *før* man lukker borehullet. Et eksempel på feilmålinger er vist i Figur 5-4, der det er installert et stort antall piezometre under en betongdam for måling av opptrykk. Målerne ser ut til å respondere ok på endringer i vannstand, men alle sensorene returnerer *negative* verdier for opptrykket. En slik tilstand under denne dammen er fysisk umulig, så det indikerer at noe har gått feil i kalibreringen. Men siden sensorene ikke er tilgjengelig, og man ikke kan vite nøyaktig hva det korrekte poretrykket skal være på de ulike målepunktene (annet enn at det ikke kan være negativt), er det begrenset mulighet for re-kalibrering.



Figur 5-4 Eksempel på måling av opptrykk under en betongdam der det har skjedd feil i kalibreringen slik at returnerte opptrykket har negative verdier (målt i meter vannsøyle, mVs). Dataene er anonymisert. Figur fra NGI.

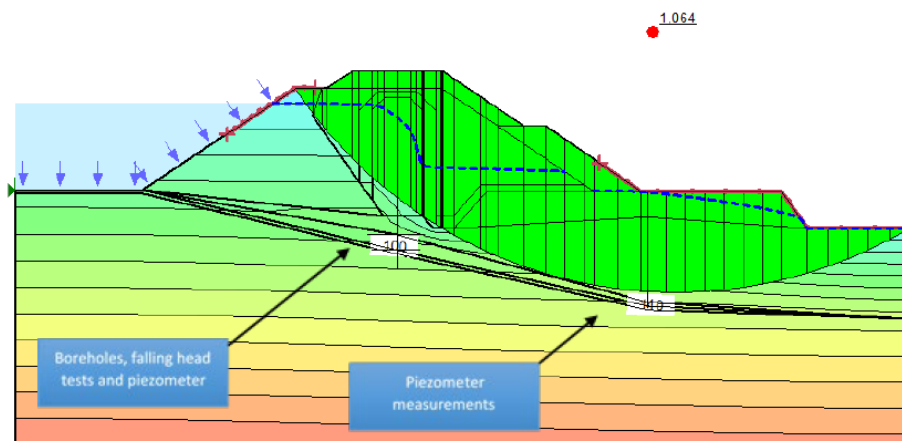
### 5.5.7 Analyse og presentasjon av måledata

Analyse av måledata for dammer faller som regel i en av to kategorier: (i) kontinuerlig analyse og bruk av data for drift og beredskapsformål, (ii) periodisk gjennomgang av data for kartlegging av dammens oppførsel. Slik analyse krever generelt (Ljunggren, et al., 2023):

- God kjennskap til dammen og dens design, forventet oppførsel, mulige bruddmekanismer, viktige måleparametere og eventuelle kjente problemer som kan redusere damsikkerheten.
- Kjennskap til forventede laster og operasjonelle forhold (f.eks. lukedrift) som påvirker oppførselen til dammen og fundamentet.
- Kunnskap om instrumenteringen og faktorene som kan påvirke måledataene.
- Evne til å fortløpende vurdere informasjon og måledataene i sammenheng med dammen og formålet med instrumentene.
- Visualisering og undersøkelse av måledata i form av tidsserieplott, tabeller, og romlige plot for identifisering trender og unormal data eller oppførsel.
- Kjennskap til vedlikehold eller andre aktiviteter som kan ha påvirket dataene.
- Kjennskap til mulige feil i instrumenteringen som kan påvirke datakvaliteten.
- At eventuelle alarmer oppdages, forstås, og følges opp.

Tolkning av måledata innebærer som regel alltid å sammenligne målte verdier mot forventede normalverdier og akseptable verdier. Disse bestemmes ved hjelp av statistisk analyse / trendanalyse på eksisterende måledata (for å etablere normalnivåer) og deterministiske beregninger av dammens kapasitet (for å etablere grenseverdier). For

poretrykk og opptrykk innebærer dette at man må analysere historiske data for å bestemme hva som er "normal" nivå for målingene og hva som er normal respons av poretrykket / opptrykket til endringer i laster (f.eks. endring i magasin vannstand). Man må også utføre stabilitetsberegninger av dammen i ulike grensetilstander (f.eks. flom eller islast) for å etablere grenseverdier for når dammens kapasitet er i fare for å bli overskredet. Et eksempel er vist i Figur 5-5.



Figur 5-5 Eksempel på kombinert stabilitets- og strømningsanalyse for å etablere kritiske verdier for poretrykk målinger. Figur fra Multiconsult (2020).

Først når disse verdiene er kartlagt kan man tolke resultatene fra målingene på en fullgod måte. En omfattende gjennomgang av beste praksis for tolkning, analyse og visualisering av måledata, med gode illustrative eksempler, finnes i Multiconsult (2020).

### 5.5.8 Hyppighet av målinger

For at måledataene skal kunne brukes til å ivareta dammens sikkerhet er det nødvendig med tidsriktig innsamling av data. Hva som er nødvendig hyppighet, avhenger av hva som måles og hvilken bruddmekanisme som er aktuell. Sett fra et sikkerhets- og beredskapsperspektiv er det viktigste ikke hvor ofte dataene samles inn, men hvor ofte de blir tolket / analysert og om man har mulighet til å iverksette tiltak. Det er f.eks. mindre verdi i å ha kontinuerlige målinger dersom dataene bare vurderes en gang hvert år i forbindelse med tilsyn.

I veileder for overvåking av vassdragsanlegg (NVE, 2019) er det anbefalt hyppighet av målinger for ulike måleparametere og ulike damtyper i normal driftssituasjon. Disse er gjengitt i Tabell 5-3. For måling av poretrykk ved dammer fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner anbefales det kontinuerlige<sup>2</sup> målinger. Moderne elektroniske piezometre gir god mulighet til kontinuerlig måling.

<sup>2</sup> Kontinuerlig måling defineres i NVE (2019) som regelmessig måling med hensiktsmessig tidsintervall for å avdekke forhold som kan føre til reduksjon av anleggets konstruktive sikkerhet så tidlig som mulig og for å dekke

Tabell 5-3 Anbefalt hyppighet av målinger i NVEs veileder for overvåking av vassdragsanlegg. K = Kontinuerlig måling; HT = Hovedtilsyn (minst hvert 5. år); PT = Periodisk tilsyn (minst årlig). Fra NVE (2019).

Damtype	Konsekvensklasse	Vannstand	Lekkasje	Deformasjoner	Poretrykk
Fyllingsdam fundamentert på god berggrunn	2, 3,4	K	K	HT	
Fyllingsdam fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner	2, 3,4	K	K	HT	K
Betong- og murdam fundamentert på god berggrunn	3, 4	K	PT*	HT	
	2				
Betong- og murdam fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner	3, 4	K	K	HT	K
	2				

## 5.6 Minimumskrav til instrumentering

Selv om det kun er svært få dammer som utvikler problemer i løpet av sin levetid, er det generelt ikke mulig å forutsi hvilke disse er pga. de mange usikkerhetene involvert i forhold som påvirker damsikkerheten. Derfor er det i de fleste lands retningslinjer et grunnprinsipp at enhver dam som kan ha negative konsekvenser for mennesker, miljø eller eiendom bør ha et minimumsnivå av instrumentering og overvåking med hensikt å gi nyttig informasjon for å vurdere damsikkerheten.

Internasjonalt varierer kravene til minimumsinstrumentering fra land til land, men de legger som regel opp til løsninger som er relativt enkle å installere og overvåke, og som inkluderer en kombinasjon av visuell observasjon og instrumenter. Ofte innebærer dette målinger av vannstand, deformasjoner i dam og fundament, lekkasje, og poretrykk / opptrykk. Minimumsinstrumenteringen bør generelt plasseres der den vil gi data som er mest mulig representativ for hele dammen. Minimumskrav er i enkelte veiledere ulike for nye dammer og eksisterende dammer (f.eks. FERC, 1995). Dette tar hensyn til at man for eksisterende dammer har lengre historikk med dammens oppførsel og at det kan være vanskelig eller umulig å installere enkelte typer instrumenter etter at en dam er bygget (f.eks. setningsmålinger i kjernen av en eksisterende fyllingsdam). Det påpekes i FERC (1995) at selv om de anbefalte minimumskravene anses å være bredt

---

behov i henhold til beredskapsplan. Dette innebærer normalt direkte overføring av måleverdier til driftssentral eller lignende.

anvendelige for de fleste dammer, må de anvendes med faglig skjønn og sunn fornuft siden hver dam er unik.

Noen retningslinjer opererer uten spesifikke minimumskrav. F.eks. har USBR ikke publiserte minimumskrav til hvilke parametere som skal måles, men de har i stedet retningslinjer som beskriver grunnprinsippene for hvordan overvåkingsprogrammet skal utvikles (USBR, 2014b). I praksis innebærer dette at det for så å si alle dammer vil være nødvendig med instrumentering.

I Norge fastsetter damsikkerhetsforskriften § 7-2 minimumskrav til instrumentering for fyllingsdammer og betong- og murdammer i driftsfasen (eksisterende og nye). Disse er nærmere omtalt i avsnitt 3.3.

## 5.7 Oppdatering og revisjon

Risikobildet til en dam endres i løpet av dammens levetid. Dette kan f.eks. skyldes at befolkningsøkning fører til at flere personer vil bli påvirket ved et dambrudd, at lastbildet endres (f.eks. som følge av klimaendringer), eller at dammen i seg selv opplever aldring og slitasje. For at overvåkingsprogrammet skal kunne ivareta behovene for overvåking av dammens tilstand og kontroll av damsikkerheten må overvåkingsprogrammet og plan for instrumentering holdes ved like og oppdateres / revideres med jevne mellomrom.

Det foreligger ikke spesifikke krav i Norge til hvor ofte man bør foreta en slik revisjon. Men det anbefales at plan for instrumentering og data fra instrumenteringen som minimum sees på i forbindelse med hovedtilsyn hvert 5. år, og at planene gjennomgås mer grundig i forbindelse med revurdering av dammen. Dersom man ser behov for endring i planene og / eller overvåkingsprogrammet bør dette iverksettes i løpet av rimelig tid. Eventuelle større endringer på dammen, f.eks. som følge av en ombygging, vil også medføre behov for revisjon av plan for instrumentering i tekniske planer, samt revisjon av overvåkingsprogrammet.



## 6 Fastsettelse av grenseverdier for sikkerhet og beredskap

### 6.1 Overordnet

Grenseverdier (eller grensenivåer) spiller en viktig rolle innenfor damsikkerhetsarbeidet. Det er disse verdiene som knytter sammen overvåkingsprogrammet med beredskaps- og responsplanene. Overvåkingsprogrammet innebærer regelmessig overvåking og inspeksjon av dammen og dens komponenter, og dataene som samles inn sammenstilles med fastsatte grenseverdier for å vurdere dammens tilstand og sikkerhet. Når grenseverdier overskrides indikerer det at noe er unormalt, og handlinger (og evt. beredskapsplaner) iverksettes. Slike planer gir informasjon om hvilke tiltak som må tas for å håndtere situasjonen, og kan omfatte ytterligere undersøkelser, reparasjoner, eller i alvorlige tilfeller, prosedyrer for beredskap og evakuering.

Grenseverdier kan også brukes til å identifisere unormale / feil avlesninger, avlesninger som faller utenfor instrumentenes målegrenser, eller avlesninger som krever videre sjekk eller vurdering.

#### 6.1.1 Grenseverdier og terskelverdier

*Grensenivåer / grenseverdier* defineres ofte som et nivå for målinger som utløser spesifikke handlinger når de nås eller overskrides. Disse handlingene kan variere fra økt overvåking og inspeksjoner til implementering av beredskapsplaner og evakuering.

*Terskelnivåer / terskelverdier* defineres ofte som verdier som signaliserer et mulig problem eller at noe er unormalt, og som kan kreve videre undersøkelse eller oppmerksomhet når de overskrides. De fungerer som et tidlig varslingsystem, slik at driftspersonell og ansvarlige for dammen kan planlegge forebyggende tiltak før situasjonen eskalerer til et kritisk nivå. Det legges som regel flere terskelnivåer før man når et kritisk nivå der det er fare for damsikkerheten.

I NVEs veileder for overvåking av vassdragsanlegg brukes grenseverdi likt som definisjonen ovenfor, men det opereres i tillegg med følgende begreper (NVE, 2019):

- *Varslingsverdier*, som er verdier som utløser behov for varsling, og kan være fastsatt for flere beredskapsnivåer.
- *Aktsomhetsnivåer / beredskapsnivåer*, som for eksempel medfører:
  - Økt aktsomhet: intensivert eller utvidet overvåking og forberedelse til beredskap.
  - Beredskap: iverksett beredskap og eventuelt farereduserende tiltak.

I praksis benyttes ofte disse begrepene om hverandre. I denne teksten benyttes for enkelhets skyld *grenseverdi* til å omtale alle verdier som indikerer unormal oppførsel.

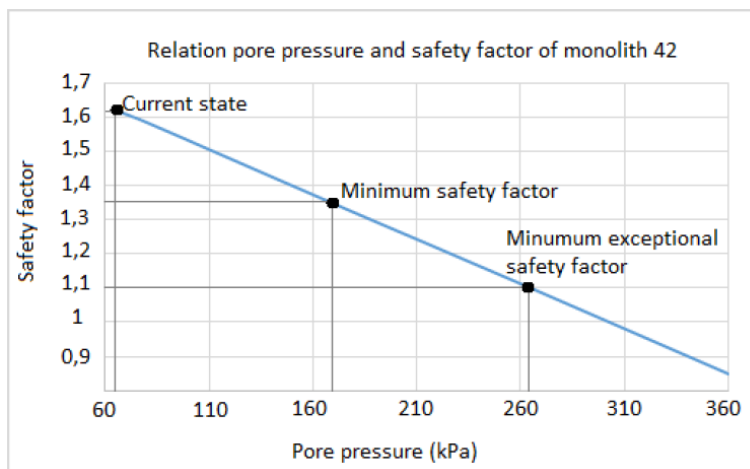
Det kan såfremt være flere grenseverdier som må nås og overskrides før det er fare for dammens stabilitet og sikkerhet, og før eventuelle beredskapstiltak må iverksettes.

## 6.2 Relasjon til konstruktiv sikkerhet og bruddmekanismer

Hensikten med etablering av grenseverdier er å avdekke overskridelse av laster, konstruktive feil eller mangler eller annen unormal oppførsel som kan medføre redusert dam sikkerhet. Grenseverdiene bør etableres basert på de spesifikke omstendighetene og knyttes til mulige bruddmekanismer for hver dam.

I mange tilfeller kan grenseverdiene baseres på numeriske eller analytiske beregninger, f.eks. kan grenseverdier for opptrykk under en betongdam knyttes til spesifikke stabilitetskriterier, eller grenseverdier for poretrykk i en fyllingsdam knyttes til verdier som medfører en for lav sikkerhetsfaktor. I andre tilfeller må de baseres på målt historisk oppførsel og det må først etableres hva som betegnes som normal og unormal oppførsel. Det er f.eks. vanskelig å beregne hva som er kritisk nivå for gjennomstrømming gjennom en fyllingsdam, derfor baseres som oftest grenseverdier for lekkasje på observert "normal" oppførsel. Avvik fra normal oppførsel indikerer at noe er galt, f.eks. at det har oppstått en lekkasje.

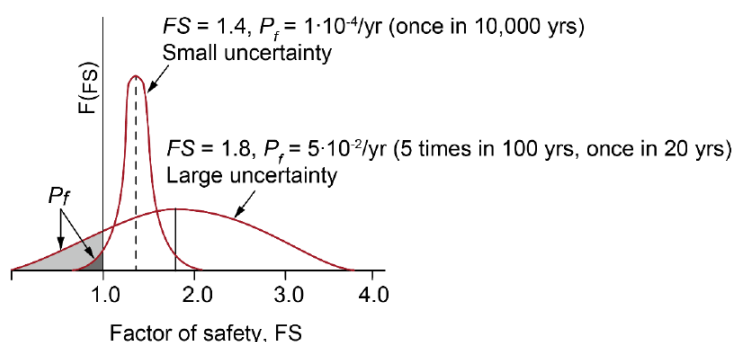
Det anbefales generelt at det fastsettes flere nivåer for grenseverdier før det er umiddelbar fare for dammens sikkerhet. I eksempelet med opptrykk under en betongdam kan det utføres numeriske stabilitetsberegninger med ulike antagelser om opptrykk, og man kan knytte ulike verdier av målt opptrykk til en korresponderende sikkerhetsfaktor. Et eksempel er vist i Figur 6-1. Man kan deretter definere ulike grenseverdier for målt opptrykk basert på verdier for sikkerhetsfaktoren, f.eks. at man setter grenseverdier ved sikkerhetsfaktorer = 1.35 (minimum normal verdi) og 1.10 (minimumsverdi under spesielle forhold).



Figur 6-1 Eksempel på fastsettelse av grenseverdier basert på stabilitetsanalyser med ulike verdier av opptrykk under en betongdampilar. Figur fra Queiroz (2018).

Med tanke på opptrykk er den viktigste faktoren som påvirker stabiliteten til dammen det totale opptrykket mot undersiden av dammen. Siden alle målinger av opptrykk er punktmålinger, vil det måtte gjøres en vurdering for å sette grenseverdier for slike punktmålinger som knyttes til estimert totalt opptrykk mot undersiden av dammen. Dersom ett enkelt instrument indikerer verdier over normalt nivå, mens de resterende indikerer normal oppførsel, tilsier dette ikke nødvendigvis at det er en pågående prosess som kan medføre ustabilitet og dambrudd. Slike vurderinger er med på å redusere mengden av falske alarmer basert på målingene, og kan også benyttes til å identifisere feilmålinger eller feil på instrumenter.

Ved bruk av beregninger (numeriske og analytiske) til å fastsette grenseverdier må man være klar over at en beregnet sikkerhetsfaktor alene ikke er et fullgodt mål på sikkerheten til dammen. Dersom det er betydelige usikkerheter i viktige inngangsparametere til analysen (f.eks. friksjonsvinkel, kohesjon og ruhet for grensesjiktet mellom betong og fundament) kan en feilvurdering av disse gi inntrykk av en for høy sikkerhet som ikke er reell. Usikkerheten i seg selv har også stor påvirkning på den faktiske sikkerheten til dammen, som illustrert i Figur 6-2.



Figur 6-2 Eksempel på ulik årlig bruddsannsynlighet ( $P_f$ ) for to dammer med høy og lav usikkerhet i inngangsparametere til analysen. I dette tilfellet har dammen med sikkerhetsfaktor = 1.8 betydelig høyere bruddsannsynlighet enn dammen med sikkerhetsfaktor = 1.4 siden usikkerheten er mye større. Figur fra NGI.

Det finnes i dag gode verktøy for å utføre probabilistiske stabilitetsanalyser som tar hensyn til forventet usikkerhet i alle nøkkelparametere i analysen. En god gjennomgang av slike analyser kan finnes i DSHP rapportene om probabilistiske analyser av dammer (Energi Norge, 2020; 2021). Slike analyseverktøy kan med fordel benyttes til å hjelpe med fastsettelsen av grenseverdier for målt poretrykk / opptrykk.

### 6.3 Relasjon til varsling og beredskap

Beredskapsplaner beskriver hvordan man skal respondere på forskjellige unormale signaler, hendelser eller ulykker ved vassdragsanlegget og har en viktig rolle i arbeidet med damsikkerheten. Beredskapsplanen skal blant annet vise hva som defineres som

normal og unormal oppførsel (basert på beregninger, observasjoner og målte verdier), hvordan man skal handle i ulike situasjoner, og hvordan informasjon skal eskaleres og overføres til riktig personell i en beredskapssituasjon. Damsikkerhetsforskriften § 7-4 krever at alle vassdragsanlegg i konsekvensklasse 2-4 skal ha beredskapsplan:

*"For vassdragsanlegg i konsekvensklasse 2, 3 og 4 skal det foreligge beredskapsplan for situasjoner i vassdraget tilknyttet vassdragsanlegget som kan volde betydelig fare for mennesker, miljø eller eiendom. (...)*

*Beredskapsplanen skal minimum omfatte grenseverdier som utløser beredskap, varslingsrutiner, innsatsplaner og oversikt over tilgjengelig personell og materielle ressurser. Grenseverdier skal fastsettes for aktuelle måleparametere, jf. § 7-2, og baseres på teoretiske beregninger av vassdragsanleggets kapasitet. Innsatsplaner skal baseres på analyser av mulige forhold og situasjoner som avviker fra det normale. Utvidet overvåking ved beredskap skal beskrives."*

Beredskapsplaner fungerer som en bro mellom det preventive arbeidet med konstruktiv sikkerhet (prosjektering og utførelse) og overvåking, til det reaktive arbeidet med nødrespons, evakuering og begrensning av konsekvenser ved en hendelse. Planen bør som et minimum ta hensyn til de viktigste mulige bruddmekanismene for dammen som vil medføre alvorlige konsekvenser. God forståelse av mulige bruddmekanismer og god forståelse av konsekvenser for disse er viktig for utarbeidelse av beredskapsplanen.

Grenseverdiene knytter beredskapsplanen sammen med målinger og inspeksjoner foretatt i overvåkingsprogrammet. Det bør etableres flere nivåer / terskler for disse, og avlesninger som overstiger en gitt grense betyr ikke nødvendigvis at omfattende tiltak må gjennomføres, bare at *noe* må gjøres (f.eks. økt overvåking). Et eksempel er vist i Tabell 6-1, der grønn indikerer normal drift, gul at man har observert tegn på unormal oppførsel, oransje at man har forhøyet risiko for dambrudd, og rød der dambrudd er nært forestående.

Tiltak som kan iverksettes ved overskridelse av en grenseverdi avhenger av de spesifikke omstendighetene, men inkluderer generelt en kombinasjon av følgende (FERC, 2017):

- Varsle tilsynspersonell, driftspersonell, og / eller vassdragsteknisk ansvarlig.
- Bekrefte at avlesningen er korrekt.
- Inspisere dammen.
- Øke overvåkingen for å gi bedre data for videre evaluering, f.eks. øke frekvensen av måleavlesninger eller sette inn flere instrumenter.
- Evaluere situasjonen og eventuelt revidere grenseverdien.
- Iverksette utbedringstiltak eller stabiliserende tiltak.
- Iverksette evakuering.
- Iverksette nødtiltak som å senke magasinet.

Tabell 6-1 Eksempel på bruk av grenseverdier for å definere ulike nivåer for dammens tilstand.

Operasjonelle forhold	Status	Beskrivelse / handling	Iverksettelse av nødresponspan
Nivå 1 - Grønn (normal drift)	Normal	Dammens oppførsel og målinger er innenfor grenseverdiene for normal oppførsel.	Nei
Nivå 2 - Gul (unormal oppførsel)	Normal til kritisk	Dammens oppførsel er fortsatt innenfor kritiske grenseverdier, men alvorlighetsgraden øker og/eller tilstanden endrer seg. Det er tegn på forhold som krever overvåking for å vurdere om det er utvikling av en bruddmekanisme. Eksempler kan være tegn på sprekkdannelse eller setninger, økt poretrykk, eller økt lekkasje. Overvåkningsfrekvensen økes.	Nei
Nivå 3 - Oransje (økt risiko for dambrudd)	Kritisk	Dammens oppførsel er fortsatt innenfor kritiske grenseverdier og damstrukturen er intakt. Imidlertid øker alvorlighetsgraden eller tilstanden ytterligere og kan utvikle seg videre mot dambrudd. Eksempler kan være mer betydelig sprekkdannelse eller setninger, svært høyt poretrykk og/eller lekkasje, og blakket vann. Mer intens overvåking, og mulig iverksettelse av andre risikoreduserende tiltak.	Vurderes
Nivå 4 - Rød (dambrudd er nært forestående)	Nødsituasjon	Dammens oppførsel er utenfor kritiske grenseverdier. Dambrudd er påbegynt eller nært forestående dersom risikoreduserende tiltak mislykkes. Situasjonen er per definisjon en nødssituasjon.	Ja

## 7 Konklusjoner og videre forskningsbehov

### 7.1 Oppsummering og konklusjoner

- Poretrykk, eller porevannstrykk, defineres som trykket i vannet som opptrer i mellomrommet (porerommet) mellom partikler i løsmasser eller i en bergmasse.
- Poretrykk og opptrykk er viktige faktorer for stabiliteten og sikkerheten til dammer. De er også blant de mest usikre lastene for en dam, og er avhengige av mange faktorer. Blant de viktigste er vannhøyden i magasinet, permeabiliteten til materialene og om permeabiliteten er homogen eller varierer, grad av sprekker i en bergmasse, spenningsforhold, temperatur, og ytre miljøfaktorer som nedbør eller snøsmelting.
- Måling av poretrykk skjer i dag som oftest med elektroniske vibrerende streng piezometre. Disse har flere fordeler i at de er rimelige, robuste, nøyaktige, har kort responstid, og kan fjernavleses kontinuerlig; men hovedutfordringen er at de ikke er tilgjengelige etter installasjon så man har begrenset mulighet til å korrigere feil, utføre vedlikehold, eller erstatte gamle instrumenter.
- Måling av poretrykk og opptrykk for dammer gjøres med flere hensikter, blant annet: bekrefte antagelser og forutsetninger gjort i prosjektering; overvåke fordeling av poretrykk / opptrykk i dammen, damfundamentet, vederlag, og nedstrøms områder; og overvåke effekten av injeksjonsskjermer og drenasjesystemer.
- Reduksjon av opptrykk under betongdammer som følge av drenasje antar som regel at drenasjesystemet reduserer opptrykkene under dammen til et lavere nivå som avhenger av en reduksjonsfaktor. For at drenasjen skal fungere etter hensikten må den være utformet på en god måte. Det bør som hovedregel alltid måles opptrykk dersom det regnes med reduserte opptrykksantagelser.
- For å oppnå pålitelige poretrykksmålinger må man ha fokus på datakvalitet gjennom hele prosessen. Siden poretrykksmålerne som regel ikke er tilgjengelige etter installasjon har man begrenset mulighet til å korrigere feil etter borehullet er fylt igjen. Rammeverket datakvalitetsprosessen (DQC, Ljunggren, et. al., 2023) er et godt verktøy i dette arbeidet.
- Poretrykk og opptrykk i damfundamentet er avhengig av mange faktorer, blant de viktigste er egenskapene til løsmassene / bergmassen. Siden disse er usikre parametere bør man ha svært godt datagrunnlag for å konkludere med at fundamentet består av "god berggrunn".
- Det finnes mange klassifiseringsmetoder for å vurdere kvalitet og stabilitet av bergmasser. Disse kan benyttes til å støtte prosjektering eller revurdering av dammen, og til å identifisere og håndtere mulige problemer. Men klassifiseringssystemene gir bare en indikasjon på bergkvaliteten, og de kan ikke erstatte detaljerte geotekniske og geologiske undersøkelser, tester, og analyser.
- Som et minimum av informasjon om damfundamentet bør det foreligge en ingeniørgeologisk vurdering som inkluderer generelle trekk som bergtype, sprekkesett og sprekkeorientering, vurderer risikoen for utvikling av høy vanngjennomstrømning, lekkasje og ugunstige poretrykk, og fastsetter verdier for inngangsparametere til stabilitetsberegninger. I tilfeller der det er stor

usikkerhet rundt fundamentets stabilitet eller permeabilitet bør det utføres mer omfattende undersøkelser. Det bør generelt stilles tilsvarende krav til informasjon om fundamentet for eksisterende dammer som det gjøres til nye dammer. Man bør også vurdere tilstrekkeligheten av informasjonen med jevne mellomrom, f.eks. i forbindelse med revurderinger.

- Plan for instrumentering er et viktig dokument i damsikkerhetsarbeidet, og skal inneholde all nødvendig informasjon for å forstå hva som måles, hvor det skal måles, hvorfor det måles, hvordan det måles, hvor ofte det skal måles, og hvordan måledataene skal benyttes i damsikkerhetsarbeidet.
- Et instrumentering- og overvåkingsprogram bør reflektere hvilke mulige bruddmekanismer som er relevante for dammen. Dette innebærer at instrumenteringen tilpasses dammens unike egenskaper, forhold, og risikoprofil.
- Grenseverdier knytter sammen overvåkingsprogrammet med beredskaps- og responsplaner. Disse baseres vanligvis på numeriske eller analytiske beregninger, eller på målt historisk oppførsel av dammen. God forståelse av mulige bruddmekanismer for dammen og god forståelse av konsekvensene av disse er viktig for utarbeidelse av grenseverdier og beredskapsplaner.

## 7.2 Videre forskningsbehov

Gjennom dette arbeidet er det identifisert flere behov for videre forskning og studier. Disse er kort oppsummert i det følgende:

### 1. Klarere definisjon av begrepene "god berggrunn" og "berggrunn med utpregede svakhetssoner" for damfundamenter.

Det bør undersøkes nærmere om det er hensiktsmessig med inndeling i slike begreper, og i så fall hva som bør settes som kriterier og hva som bør kreves av nødvendig dokumentasjon og undersøkelser for å avgjøre bergkvaliteten. Dersom man skal gå inn for å benytte et standard system for klassifisering av berggrunnen ved norske dammer, bør det foretas en grundig gjennomgang av de ulike systemene, og den norske vassdragsbransjen bør enes om et felles system som skal benyttes. En slik studie vil være nyttig også for overordnet vurdering av fundamentstabiliteten for norske dammer, og vil ha implikasjoner for damsikkerhetsarbeidet utover kun måling av poretrykk.

### 2. Øke forståelsen av opptrykk under norske betongdammer og hvordan dette påvirker damstabiliteten.

Hvilke lastforutsetninger som skal benyttes i ulike situasjoner (f.eks. platedammer, gravitasjonsdammer, lukepilarer, ulike typer flomløp, etc.) er ikke entydig i dagens regelverk og veiledere. Bruk av måledata for opptrykk under norske dammer kan benyttes til å informere om hvordan, og i hvilken grad, målinger kan verifisere antagelser fra prosjekteringen. Det bør gjennomføres en nærmere studie av måledata fra flere norske dammer med bruk av moderne dataanalyse. Spesielt for platedammer bør det vurderes om det finnes en minste pilarbredde for når opptrykket kan neglisjeres (ref. anbefalinger i RIDAS, 2019).

### 3. Studie av fastsettelse av grenseverdier basert på numeriske beregninger.

Grenseverdier må i stor grad knyttes til numeriske beregninger, men hva slags beregninger skal benyttes? Er likevektsbetraktninger og en beregnet sikkerhetsfaktor (som i dag er standarden for stabilitetsberegninger for de fleste dammer) tilstrekkelig, eller bør man i større grad benytte probabilistiske analyser? Hva er implikasjonene av dette for damsikkerheten?

### 4. Case studie for analyse av mulige bruddmekanismer (Potential Failure Mode Analysis, PFMA).

PFMA er et verktøy som i økende grad benyttes i utlandet, men som ikke i like stor grad brukes i Norge. Det foreslås å gjennomføre en case-studie som setter lys på verdien av å utføre slike analyser for norske dammer i forbindelse med en revurdering eller ved ombygging av en platedam. Med bakgrunn i case-studien kan det foreslås anbefalinger for utførelse av målesystem ved ombygging av platedammer.

### 5. Kartlegging av status for instrumentering og overvåking for norske dammer.

Det er en oppfatning i vassdragsbransjen at mange norske dammer i dag har mangelfull eller havarent instrumentering, som ikke lenger er i henhold til krav i forskriftene og hva som er nødvendig for å overvåke dammens oppførsel og sikkerhet. Det foreslås å gjennomføre en undersøkelse av hvor stort dette omfanget er, og hva som skal til for å heve nivået. Det kan undersøkes om det finnes robuste og kostnadseffektive standardløsninger for etterinstrumentering som kan benyttes på norske dammer.



## 8 Referanser

- Barton N., Lien R. and Lunde J., (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
- Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Transactions of the South African Institution of Civil Engineers*, 15(12), 335–344.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley and Sons.
- Casagrande, A. (1961). Control of seepage through foundations and abutments of dams. *Geotechnique*, Vol. 11, No. 3, pp. 161-182.
- Choquet, et. al. (2022). Grout permeability requirements for the fully grouted piezometer installation method. In *Proc. of the 11th International Symposium on Field Monitoring in Geomechanics (ISFMG2022)*. London, September, 2022
- Choquet, P. (2024). Retrofitting and upgrading existing instruments. Presentation in webinar organized by CDA (Canadian Dam Association) on “Instrumentation Challenges for Existing Dams”, January 2024.
- de Mello, V.F.B (1984). *Concrete Gravity Dam Foundations: An Open Case of Geomechanical Interaction, Structure-Foundation and Theory-Practice*. Fourth Australia – New Zealand Conference on Geomechanics. Perth, May, 1984
- Deere, D.U., et. al. (1967). *Design of Surface and Near-Surface Construction in Rock, in Failure and Breakage of Rock*, Society of Mining Engineers of AIME, New York, pp. 237–302.
- Duffaut, P., and Larouzée, J. (2019). Geology, Engineering and Humanities: three sciences behind the Malpasset dam failure (France, 2 December 1959). *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 52(4), 445-458.
- Energi Norge (2020). *Probabilistic analyses of dams – Experience and recommendations – Phase II. Revisjon C01, 2020-01-15*.
- Energi Norge (2021). *Probabilistiske analyser av betongdammer – Fase 3. Versjon 02, 2021-02-01*.
- EPRI (1992). *Uplift Pressures, Shear Strengths, and Tensile Strengths for Stability Analysis of Concrete Gravity Dams, Volume I*, EPRI TR-100345. Electric Power Research Institute.
- Eurokode 7 (2016). *Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering. Del 1: Allmenne regler*. NS-EN 1997-1:2004+NA:2016.
- FERC (1991). *Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects. Chapter 5 Geotechnical Investigations and Studies*. April 2016.
- FERC (1995). *Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects. Chapter 9 Instrumentation and Monitoring*.

- FERC (2016). Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects. Chapter 3 Gravity Dams. March 2016.
- FERC (2017). Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects. Chapter 14 Dam Safety Monitoring Program. Revision 3 May 2017.
- FERC (2021). Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects. Chapter 17 Potential Failure Mode Analysis. December 2021.
- Frank et. al. (2004). Designer's Guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical Design – General Rules. Thomas Telford, London.
- Franklin, J.A. (1986). Size-strength system for rock characterization. In Proc. Symp. Applications of Rock Characterization Techniques to Mine Design, American Society of Mineral Eng. Annual Meeting. New Orleans, USA, pp 11-16.
- Fu og Haflidason (2015). Progressive failure analyses of concrete buttress dams. Masteroppgave KTH, juni 2015.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. News J ISRM Vol. 2 No. 2, pp. 4–16. Tilgjengelig for nedlastning fra: <https://www.roscience.com/learning/>
- Hoek, E. (2023). Practical Rock Engineering. Rocscience, 2023.
- Høeg, K. (2022). Måling av poretrykk på fyllingsdammer fundamentert på løsmasser, e-post datert 2022-12-19.
- ICOLD (2004). ICOLD European Club Working Group on Uplift Pressures under Concrete Dams. Final Report.
- ICOLD (2018). Bulletin 158: Dam Surveillance Guide.
- ICOLD (2020). Bulletin 188. Statistical Analysis of Dam Failures.
- ISO (2020). ISO 18674-4:2020. Geotekniske felt- og laboratorieundersøkelser – Geoteknisk overvåking ved feltinstrumentering. Del 4: Måling av porevanntrykk. Piezometre. Publisert 2020-07-30.
- Jamiolkowski, M. (2014). Soil mechanics and the observational method: challenges at the Zelazny Most copper tailings disposal facility. Geotechnique, Vol 64, No. 8, pp. 590–619.
- Johansson, S. et. al. (2023). Distributed fibre optic sensing in Swedish dams and tailing storage facilities. Hydropower & Dams, Issue 2, 2023.
- Lacasse & Høeg (2019). In praise of monitoring and the Observational Method for increased dam safety. Proc. Of the ICOLD 2019 Symposium, June 9-14, 2019, Ottawa, Canada.
- Ljunggren, M., Logan, T., & Campbell, P. (2013). Is your dam as safe as your data suggest? In Proceedings of the NZSOLD/ANCOLD Conference: Multiple Use of Dams and Reservoirs, Rotorua, New Zealand.

- Ljungren, M., Logan, T. & Fløystad, A. (2023). The instrument data quality cycle (DQC). In Proc. Of the 91<sup>st</sup> Annual ICOLD Meeting. June 2023. Gothenburg, Sweden.
- Mauris et. al. (2014). Synthesis of hydraulic structures behaviour: lessons learned from monitored dams of EDF in France. In Proc. of 3rd International Workshop on Long-Term Behaviour and Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies of Dams. 17-19 October 2015. Nanjing, China.
- Multiconsult (2020). Mulighetsstudie instrumentering og overvåking av damanlegg. Dokumentnummer 10211223-RIEn-RAP-0001. Revisjon 03, 2020-02-03.
- NGF (2017). Veiledning for måling av grunnvannstand og poretrykk. Melding nr. 6, rev. nr. 2, 2017.
- NGI (1994). Retningslinjer for instrumentering av norske dammer. Etterinstrumentering og tilstandsovervåking av eksisterende dammer. NGI Rapport 935058-1 datert 1994-09-07.
- NGI (2015). Bruk av Q-systemet. Bergmasseklassifisering og bergforsterkning. Datert november 2015.
- NVE (2005). Retningslinjer for betongdammer. Utgave 2, oktober 2005.
- NVE (2009). Autoritet, tillit, ansvar: Norsk vassdragstilsyn 1909-2009. ISBN 82-410-0701-9. Utgiver NVE
- NVE (2012). Planlegging og bygging. Veileder til damsikkerhetsforskriften. Veileder nr. 8/2012.
- NVE (2019). Overvåking av vassdragsanlegg. Veileder til damsikkerhetsforskriften. Veileder nr. 3/2019.
- Peck, R.B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Ninth Rankine Lecture, Geotechnique, Vol. 19, No. 2, pp. 171–187.
- Peck R.B. (2001). Embankment Dams – Instrumentation versus Monitoring, Geotechnical Instrumentation News, September 2001.
- Queiroz, D. (2018). An alarm system for pore pressure measurements in the foundation of concrete dams – a case study of Storfinnforsen buttress dam. Masteroppgave KTH, juni 2018.
- RIDAS (2019). Energiföretagen Sverige. RIDAS – Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet. Versjon 2019-01.
- Rognes M. (2014). Poretrykk under betongdammer fundamentert på fjell. Masteroppgave bygg- og miljøteknikk NTNU, juni 2014.
- Romana, M. (2003). DMR (Dam Mass Rating). An adaptation of RMR geomechanics classification for use in dam foundations. Int. Cong. On Rock Mechanics, South African Inst, Of Min, and Meta, 977, 980.

- Romana, M. (2004). DMR (an adaptation of RMR), a new geomechanics classification for use in dam foundations. In Proc. of 9th Congresso Luso de Geotecnia, Aveiro, Portugal, 2004.
- Sparrevik, P. (2022). Poretrykk og lekkasjemåling på dammer. Presentasjon på Energi Norge sin temadag instrumentering i vassdrag, 10. mai 2022.
- Sweco (2017). Damhistorikk og instrumentering, Evaluering og dokumentering av eksisterende dammers sikkerhet, Rapport i DSHP-prosjektet, 2017.
- Terzaghi, K. (1946). Rock defects and loads on tunnel supports, in Proctor, R.V., and White, T.L., eds., Rock tunneling with steel support, Volume 1: Youngstown, Ohio, Commercial Shearing and Stamping Company p. 17-99.
- Tveit, et. al. (1986). Foundation Treatment at Nerskogen Dam. Publication No. 165 – Norwegian Geotechnical Institute. 1986, pp 1-6.
- USACE (2014). US Army Corps of Engineers. Drilling in Earth Embankments and Levees. ER 1110-1-1807, December 2014.
- USBR (2014a). US Bureau of Reclamation. Guidelines for Drilling and Sampling in Embankment Dams. Denver, CO.
- USBR (2014b). US Bureau of Reclamation. Design Standards No. 13: Embankment Dams. Chapter 11: Instrumentation and Monitoring. March 2014.
- Wickham, G.E, et. al. (1972). Support determination based on geologic predictions. In Proc. 1st North American Rapid Excavation & Tunnelling Conference (RETC), Chicago, pp. 43–64.
- Williamson, D.A. (1984). Unified rock classification system. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 21(3), 345-354.



# Kontroll- og referanseside/ Review and reference page

<b>Dokumentinformasjon/Document information</b>		
<b>Dokumenttittel/Document title</b> Sluttrapport FoU prosjekt poretrykksmåling på dammer		<b>Dokumentnr./Document no.</b> 20230226-01-R
<b>Dokumenttype/Type of document</b> Rapport / Report	<b>Oppdragsgiver/Client</b> Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)	<b>Dato/Date</b> 2024-03-15
<b>Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract</b> Oppdragsgiver		<b>Rev.nr.&amp;dato/Rev.no.&amp;date</b> 0 /
<b>Distribusjon/Distribution</b> BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
<b>Emneord/Keywords</b> Poretrykksmålinger, dammer, berggrunn, fundament		

<b>Stedfesting/Geographical information</b>	
<b>Land, fylke/Country</b>	<b>Havområde/Offshore area</b>
<b>Kommune/Municipality</b>	<b>Felt navn/Field name</b>
<b>Sted/Location</b>	<b>Sted/Location</b>
<b>Kartblad/Map</b>	<b>Felt, blokknr./Field, Block No.</b>
<b>UTM-koordinater/UTM-coordinates</b> Sone: Øst: Nord:	<b>Koordinater/Coordinates</b> Projeksjon, datum: Øst: Nord:

<b>Dokumentkontroll/Document control</b> Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
<b>Rev/ Rev.</b>	<b>Revisjonsgrunnlag/Reason for revision</b>	<b>Egenkontroll av/ Self review by:</b>	<b>Sidemanns- kontroll av/ Colleague review by:</b>	<b>Uavhengig kontroll av/ Independent review by:</b>	<b>Tverrfaglig kontroll av/ Inter- disciplinary review by:</b>
0	Originaldokument	2024-03-13 / 2024-03-25 Arnkjell Løkke	2024-03-22 Per Sparrevik	2024-03-07 NVE	

<b>Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release</b>	<b>Dato/Date</b> 25. mars 2024	<b>Prosjektleder/Project Manager</b> Arnkjell Løkke
--	-----------------------------------	--

NGI – Norges Geotekniske Institutt - er et uavhengig forskningsinstitutt innen geoteknikk og andre ingeniørrettede geofag.

Vi kombinerer geokunnskap og teknologi for å utvikle smarte og bærekraftige løsninger innen infrastruktur på land og til havs, innen miljøteknologi, forurenset grunn og naturfarer som jord- og snøskred. Forskningen vår leverer kunnskap som bidrar til å løse noen av de viktigste utfordringene verden står overfor innenfor klima, miljø, energi og samfunnsikkerhet.

Samfunnsoppgaven vår er å utvikle geofagene og fremskaffe kunnskapsgrunnlaget for å bygge, bo og ferdes på sikker grunn. Dette løser vi ved å la forskning og rådgivning gå "hånd i hånd" og være brobygger mellom akademia, næringsliv og det offentlige.

Vi har kontorer i Norge, USA og Australia og vi har internasjonalt anerkjente laboratorier.

[www.ngi.no](http://www.ngi.no)

NGI – The Norwegian Geotechnical Institute – is an independent research centre in the field of geotechnical engineering and the engineering geosciences.

We combine geotechnical knowledge and technology to develop smart and sustainable solutions in infrastructure on land and at sea, in environmental technology, contaminated soil and natural hazards such as landslides and avalanches. Our research provides knowledge that contributes to solve some of the most important challenges the world faces with regards to climate, the environment, energy and societal security.

Our societal mission is to develop the geosciences and produce the knowledge basis to build, live and travel on safe ground. We solve this by combining research and consulting hand-in-hand and being a bridge-builder between academia, industry and the public sector.

We have offices in Norway, the US and Australia, including internationally recognised laboratories.

[www.ngi.no](http://www.ngi.no)





NVE

## Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthuns gate 29  
Postboks 5091 Majorstuen  
0301 Oslo  
Telefon: (+47) 22 95 95 95