

Rapport fra EnergiNorge

Evaluering av eksisterende betong- og murdammer

Rapport 1 - Anbefalinger



RAPPORT

Dokumentnavn:

Rapport 1 - Anbefalinger

Prosjektnavn:

Evaluering av eksisterende betong- og murdammer

Prosjektnr.: 12372
Dokumentnr.: 12372-OO-R-01

Dato: 08.08.2017
Revisjon: Nr. 4.
Antall sider: 32

Utarbeidet av: Thomas Konow (Dr.techn. Olav Olsen) og
Magnus Engseth (Dr.techn. Olav Olsen)



INNHOOLD

1	INNLEDNING	4
1.1	Bruk av rapporten.....	4
1.2	Rapportstruktur i delprosjektet.....	4
1.3	Prosess for utarbeidelse av rapport	5
2	PRESISERINGER	6
2.1	Mur- og betongdammer.....	6
2.2	Forskjell på krav og anbefalinger	6
2.3	Dispensasjoner.....	6
2.4	Definisjoner	8
3	LASTER OG LASTKOMBINASJONER.....	10
3.1	Laster og grensetilstand	10
3.2	Islast	10
3.3	Poretrykk.....	11
3.4	Seismiske laster	12
3.5	Fjellbolter, eksisterende dammer.....	14
4	KRITERIER FOR STABILITET – FORSLAG	16
4.1	Generelt	16
4.2	Kriterie for sikkerhet mot glidning.....	16
4.3	Stabilitetskriterier - forslag	18
4.5	Alternative vurderinger.....	22
5	VURDERING AV BERGGRUNNEN.....	26
5.1	Klassifisering av berggrunnen.....	26
5.2	Kriterier for klassifisering	27
5.3	Vurdering av berg i forbindelse med revurdering	30
6	REFERANSSER.....	31

1 INNLEDNING

Rapporten er utarbeidet som en del av EnergiNorge prosjektet «Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv», og inngår som en av 3 rapporter i delprosjektet med tittelen «Evaluering av eksisterende betong- og murdammer».

Formålet med delprosjektet «Evaluering av eksisterende betong- og murdammer» er først og fremst å gi anbefalinger som viser hvordan krav i damsikkerhetsforskriften kan ivaretas for eksisterende betongdammer. Videre, kan innhold også benyttes av NVE som et innspill i forbindelse med pågående revisjon av NVEs veileder for betongdammer.

Alle referanser som underbygger innholdet i denne rapporten ligger i Rapport 2 – hovedrapport.

På mange områder kan Eurokoden benyttes også for dammer. En videre samordning med bestemmelsene i Eurokoden bør vurderes nærmere.

1.1 Bruk av rapporten

NVEs regelverk er utarbeidet med tanke på bygging av nye dammer. Retningslinjene viser hvordan sikkerhetsnivået i forskriftene kan oppfylles. Det er mulig å vurdere alternative løsninger, men det må da dokumenteres at denne løsningen medfører tilfredsstillende sikkerhet.

Denne rapporten viser forslag til alternative løsninger for å påvise sikkerhet ved eksisterende dammer, der utgangspunktet er at sikkerhetsnivået i damsikkerhetsforskriften skal ivaretas.

Ved bruk av alternative sikkerhetsfaktorer er det uansett viktig at det gjøres en vurdering av de ulike forutsetningene og usikkerheten i beregningen. Ved eksisterende dammer bør sikkerhetsfaktorene ikke benyttes som absolutte verdier, men brukes med et visst skjønn.

1.2 Rapportstruktur i delprosjektet

Dette delprosjektet har fått tittelen «Evaluering av eksisterende betong- og murdammer» og omfatter følgende 3 rapporter:

- Rapport 1 – Anbefalinger (**denne rapporten**)
- Rapport 2 – Hovedrapport
- Rapport 3 – Eksempler på tiltak og vurderinger

En kort oppsummering av innholdet i de ulike rapportene er gitt nedenfor.

1.2.1 Rapport 1 – Anbefalinger

Rapporten inneholder anbefalinger for evaluering av eksisterende betong- og murdammer som komplementerer NVEs regelverk og viser alternativer for å dokumentere sikkerheten ved eksisterende betong- og murdammer

1.2.2 Rapport 2 – Hovedrapport

Rapporten underbygger anbefalingene i rapport 1, med drøftinger, vurderinger, referanser og annen bakgrunnsinformasjon. Innledende kapittel gir en overordnet beskrivelse av mur- og betongdammer, herunder oppbygning av dammene, historikk, statistikk og erfaringer med denne typen dammer. Etterfølgende kapitler omfatter blant annet beskrivelse av krav til tilsyn, lastforutsetninger samt bestemmelser for vurdering av sikkerhet.

1.2.3 Rapport 3 - Eksempler på tiltak og vurderinger

Rapporten viser eksempler på alternative vurderinger av eksisterende dammer, samt alternative løsninger for rehabilitering og fornying av eksisterende betong- og murdammer. Rapporten har også en oversikt over noen dispensasjoner fra damsikkerhetsforskriften som er gitt av NVE. Eksempler i rapporten er systematisert etter tema. Om ønskelig kan rapporten bli et levende dokument som fortløpende oppdateres med nye eksempler og kan eventuelt utvikles som en databaseløsning med søkefunksjon.

1.3 Prosess for utarbeidelse av rapport

Rapportene er utarbeidet av Dr.techn.Olav Olsen på oppdrag fra EnergiNorge.

Utkast til rapport (samplerapport, datert 3. august 2016) har vært på høring i bransjen. Innspill fra høringen er samlet i et eget notat der høringsinnspill er oppsummert, samt med beskrivelse av hvordan kommentarene er håndtert i rapporten. Dette er oppsummert i vedlegg til Rapport 2 - Hovedrapport. I tillegg ble det avholdt møte for å drøfte rapporten, der alle parter som ga innspill til rapporten var invitert.

I forbindelse med høringen av rapportene ble det mottatt høringsinnspill fra følgende firma:

- NTNU v/Leif Lia og Fjola Gudrun Sigtryggisdottir
- VTF v/Vidar Bolle
- NVE v/Lars Grøttå på vegne av intern faggruppe for betongdammer
- Statkraft v/Harald Andreas Simonsen
- Eidsiva v/Håkon Haugsrud
- E-CO v/Stein Ove Helberg
- SFE v/Per Helge Eikeland
- Multiconsult v/Stig Arne Strokkenes
- Sweco v/Martin Eek Burud
- Norconsult v/Cristian Sandvik, David Moss, Olof Dahlen og Anders Søreide

2 PRESISERINGER

I det etterfølgende er gitt en overordnet beskrivelse av forhold som er viktig ved fortolkning av regelverket eller som kan være uklare og dermed krever en presisering.

2.1 Mur- og betongdammer

Betong- og murdammer omfatter følgende damtyper¹:

- Hvelvdammer
- Gravitasjonsdammer, herunder:
 - Massive betongdammer
 - Murdammer lagt i mørtel
 - Tørrmurte dammer²
- Lamelldammer, herunder³:
 - Platedammer
 - Flerbuedammer
 - Tunge lamelldammer

2.2 Forskjell på krav og anbefalinger

Det er viktig å skille mellom krav i lover/forskrifter og anbefalinger i f.eks. retningslinjer/veiledere, ettersom dette definerer hvordan eventuelle mangler skal håndteres.

Krav og anbefalinger kan beskrives som følgende:

- i. **Krav** omfatter brudd på bestemmelser gitt i eller i medhold av lov eller forskrift, herunder krav i Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften). Hvis det vurderes som urimelig at anlegget skal oppfylle kravene, må det søkes om dispensasjon.
- ii. **Anbefalinger** omfatter imidlertid forhold som ikke er et direkte avvik. Dette kan inkludere forhold som ikke samsvarer med NVEs retningslinjer eller veiledere. Anbefalinger kan også omfatte tiltak som bør vurderes gjennomført eller der det er forbedringsmulighet som kan vurderes nærmere av virksomheten, men som ikke er et spesifikt myndighetskrav.

2.3 Dispensasjoner

Hvis det avdekkes brudd på bestemmelser i lover og forskrifter, må det i prinsippet søkes om dispensasjon for å fravike kravene. NVE har myndighet til å gi dispensasjon, jf. damsikkerhetsforskriften § 8-2.

Dispensasjoner er normalt evigvarende med mindre det gis en tidsbegrensning i forbindelse med vedtaket. Myndigheten kan imidlertid oppheve en dispensasjon med et nytt vedtak.

Ved revurdering der det avdekkes avvik fra forskriftskrav, er det ikke nødvendigvis avgjørende å søke om dispensasjon selv om dameier ikke foreslår å gjennomføre tiltak for å

¹ Store Norske leksikon: Dam – demning. Internett: <https://snl.no/dam%2Fdemning>

² NVE (2005): Retningslinje for betongdammer – kapittel 1, utgave 2 oktober 2005

³ ICOLD (1994); Technical Dictionary on Dams, Annex section 4-4 "Buttress dams"

rette avviket. Ved et slikt tilfelle kan eventuelt NVE godkjenne rapporten med avvik, noe som vil innebære at avviket vurderes på ny, senest ved neste revurdering.

Ved nybygging eller rehabilitering vil det imidlertid være viktig å søke om dispensasjon hvis anlegget ikke tilfredsstillt krav i forskriftene. I motsatt fall kan for eksempel neste revurdering konkludere med at tiltak på anlegget er nødvendig, til tross for at det ikke er skjedd endringer i regelverket.

Det er viktig merke seg at når retningslinjer, veiledere eller skriv fra NVE avviker fra krav i forskriftene, bør det søke om dispensasjon fra forskriftskravene. Dette vil hindre at det oppstår tvil om det må gjennomføres tiltak på anlegget på et senere tidspunkt, for eksempel ved neste revurderinger.

Nedenfor er det listet opp noen eksempler på forhold der det bør søkes om dispensasjon ved ombygging eller nybygging av dammer.

> *Tabell 2-1. Eksempler på forhold det bør søkes om dispensasjon*

Damsikkerhetsforskriften	Beskrivelse
§ 5-11	Skriv fra NVE datert 20 november 2012 avviker fra krav i damsikkerhetsforskriften på følgende områder: <ul style="list-style-type: none"> • Kontroll av stabilitet uten bolter i bruddgrensetilstand. Dette er et krav etter damsikkerhetsforskriften men er ikke beskrevet i nevnte skriv, der sikkerhetskriterier for kontroll uten bolter fremstår som ulykkesgrense. • Kontroll av stabilitet mot velting uten bolter. I følge damsikkerhetsforskriften er sikkerhet i ulykkesgrense ivaretatt når resultanten er oppstrøms 1/6 delspunktet. I nevnte skriv er kriteriet at resultanten er oppstrøms 1/12 delspunktet og avviker dermed fra damsikkerhetsforskriftens krav til kontroll i ulykkesgrensetilstand.
§ 5-9	Krav til senkning av magasinet gjelder i første omgang klasse 3 og 4 dammer og er utformet med tanke på høye dammer. Ved lave dammer i klasse 3 og 4 vil det være vanskelig å tilfredsstillt kravene til tapping og det bør derfor søkes om dispensasjon fra krav til tapping.
§ 5-10	For fyllingsdammer har NVE utarbeidet et eget skriv med tittelen «Fyllingsdammer – forvaltningspraksis for lave dammer i konsekvensklasse 3 og 4». Dette skrevet avviker på flere områder fra krav i damsikkerhetsforskriften. Ved nybygging og rehabilitering etter kriterier i skrevet, bør det søkes om dispensasjon hvis kravene avviker fra beskrivelsen i damsikkerhetsforskriften.

2.4 Definisjoner

Noen uttrykk i regelverket er ikke entydig definert. I etterfølgende er forslag til noen definisjoner gitt som grunnlag for evaluering av eksisterende dammer. Tekst i **kursiv** er beskrivelse fra NVE, enten fra veiledere, retningslinjer eller NVEs nettsider.

Dam⁴

En dam er et byggverk som demmer opp vann i en innsjø eller elv. Dammens eksistens fører til at vann kan lagres i et magasin.

Flomvoll

Byggverk som skal forhindre skade som følge av flom. Mot vederlag kan dammer ha flomvoll, men denne er fundament over HRV og har derfor ingen funksjon for oppdemming.

Damhøyde

Forslag til ny definisjon av damhøyde:

Damhøyde måles vertikalt fra laveste punkt på tetningen mot fundament og opp til HRV. Injeksjonsskjerm i fundamentet skal ikke regnes som en del av damhøyden.

Begrunnelse: Forslag til ny definisjon av damhøyde medfører at definisjonen er mer entydig og dermed enklere å benytte. Definisjonen samsvarer også med definisjon i «Forskrifter for dammer» (OED, 1981).

Definisjon, (ref. www.nve.no)⁵

Høydeforskjellen mellom laveste punkt på damfundamentet og topp av dam.

Med damfundament forstås kontaktflaten mellom selve damlegemet og de underliggende masser. Med damlegeme menes en noenlunde sammenhengende konstruksjon eller fylling.

Injeksjonsskjermer og spuntvegger regnes ikke som en del av damlegemet. Det gjør heller ikke plombering av sprekker og sleppesoner i fundamentet. En mer monolittisk utstøping av åpne kløfter og større slepper regnes derimot som en del av damlegemet. Det samme gjør selvsagt massive betongfundamenter og bunnhvelv under dammer av forskjellig type.

Med topp av dam menes vanlig damkrone, topp av pilarer, gangbane eller gangbru. Ved en ren overløpsdam er overløpsterskelen å regne som topp av dam.

Brytning, forbygninger ved landfestene eller lignende, regnes ikke som topp av dam.

- Kommentar: Det kan være uklart å hva som er å regnes som «topp dam» og i mange tilfeller vil nivå av «topp dam» variere langs damaksen. Ovennevnte definisjonen medfører at fribord ved dammen er av betydning for krav i regelverket knyttet til damhøyden. Eksempelvis, vil en 3 m høy dam med fribord på 1 m måtte kontrolleres for lastsituasjonen «DFV uten bolter», mens en slik kontroll ikke er nødvendig for en 2 m høy overløpsterskel, selv om begge anleggene er utsatt for det samme statiske vanntrykket.

⁴ NVE (2014): Veileder for klassifisering, kapittel 2.1. Veileder nr. 3/2014 datert juni 2014.

⁵ Internett: <https://www.nve.no/damsikkerhet-og-energiforsyningsberedskap/damsikkerhet/dammer-og-vassdragsanlegg-definisjoner/>

Lamelldammer (ref. ICOLD technical dictionary for dams):

Forslag: Lamelldammer omfatter følgende undertyper.

- Platedammer (Flat slab buttress dam)
- Tung lamelldam (Solid head buttress dam)
- Flerbuedammer (Multiple-arch dam)

Grunnleggende fellestrekk for lamelldammer, er at området mellom pilarene (nedstrøms av tetningsplata) kan regnes som fritt drenert og bidrar til et redusert poretrykk under dammen.

Tung lamelldam

Lamelldam bestående av flere frittstående lameller (pilarer), der hver enkelt lamell er stabil uten bidrag fra tilstøtende lameller. Hver lamell (pilar) bør utgjøre minst 1/3-del av bredden til platefeltet for at dammen skal kunne defineres som en tung lamelldam.

Ulykkesflom

Flomstørrelse for kontroll av dammens sikkerhet mot brudd i ulykkesgrensetilstand (NVE, 2011)⁶.

Forslag tillegg:

Ulykkesflom er den flommen som gir høyeste vannstand ved følgende flomsituasjoner:

- Klasse 1 og 2: $1,5 \cdot Q_{DIM}$ (Q_{DIM} = Dimensjonerende flom)
- Klasse 3 og 4: PMF
- Alle klasser: Lukesvikt ved dimensjonerende flom.

Maksimal flomvannstand (MFV)

Flomvannstand ved ulykkesflom, dvs. $1,5 \cdot Q_{DIM}$ (Q_{DIM} = Dimensjonerende flom), PMF (Påregnelig maksimal flom) samt lukesvikt ved dimensjonerende flom.

Maksimal flom (MF):

Flomstørrelse ved PMF eller $1,5 \cdot Q_{DIM}$.

⁶ NVE (2011): Retningslinjer for flomberegninger, tabell 1.1. Retningslinjer nr. 4/2011, datert oktober 2011.

3 LASTER OG LASTKOMBINASJONER

Dette kapittelet inneholder forslag til laster og lastkombinasjoner som et supplement til beskrivelse gitt i forskrift eller retningslinjer/veiledere.

3.1 Laster og grensetilstand

Tabellen nedenfor viser ulike laster og lastkombinasjoner som normalt skal benyttes for kontroll av stabilitet i de ulike grensetilstandene for eksisterende dammer.

Lastkombinasjoner	Vann-stand	Grensetilstand			Forskrifts-krav
		Bruk	Brudd	Ulykke	
1. Islast	HRV	X		X*	Nei
2. Dimensjonerende flom (inkl. tilstopping)	DFV		X		Ja
3. Ulykkesflom	MF			X	Ja
4. Jordskjelv – klasse 3 og 4 Gjentaksintervall: 475 års	HRV			X	Ja
5. Kontroll av sikkerhet uten bolter	DFV			X	Ja
6. Fullt poretrykk (Gravitasjonsdam med drenasje)	HRV			X	Nei

* Kontroll gjennomføres for gravitasjonsdammer i betong med øket poretrykk. Det er foreslått at lastkombinasjon 5 «Kontroll av sikkerhet uten bolter» legges til grunn for kontrollen.

3.2 Islast

Anbefaling om stabilitet mot islast er ikke et forskriftskrav, og krever derfor ikke dispensasjon hvis anbefalinger fravikes.

NVE legger til grunn et istrykk på mellom 100 kN og 150 kN pr. løpemeter dam, jf. NVEs retningslinje for laster og dimensjonering (NVE, 2003). Lavere verdier enn 100 kN kan benyttes dersom det begrunnes.

I følge NVEs retningslinje for laster og dimensjonering (NVE, 2003), kapittel 1.3.5, omfatter bruksgrense for dammer «..oppsprekking og deformasjoner som kan redusere konstruksjonens funksjonsdyktighet og/eller bestandighet». Dette er en meget presis beskrivelse av skader fra istrykk. Dette innebærer at last og materialfaktorer settes lik 1,0 slik at samlet sikkerhet > 1,0.

På murdammer vil en skade fra istrykk påvises ved tilsyn, enten i form av en deformasjon eller som en økning i lekkasjen. Eventuelle skader fra istrykk vil utvikle seg gradvis og tiltak kan dermed iverksettes før det er fare for sikkerheten. Vurdering av om tiltak iverksettes kan dermed være basert på en kombinasjon av resultater fra stabilitetsberegningene og en fortløpende tilstandsvurdering.

For gravitasjonsdammer i betong kan istrykk medføre en liten forskyvning eller åpne et riss i/under dammen, som igjen kan føre til et økt poretrykk. For en slik situasjon, vil stabilitetskontroll for ulykkeslaster (Ulykkesflom og DFV uten bolter) også gi en kontroll med økt poretrykk som følge av en liten deformasjon fra istrykket. Dette medfører at følgende kontroll gjennomføres for å påvise stabilitet mot istrykk:

1. **Kontroll i bruksgrense.** Dette innebærer at sikkerhet mot glidning må være $> 1,0$ mens sikkerhet mot velting er ivarett når resultanten ligger oppstrøms nedstrøms tå ($R > 0,0$).
2. **Kontroll i ulykkesgrense med økt poretrykk.** Ved manglende stabilitet i bruksgrense er det foreslått en kontrollen av stabilitet med samme forutsetninger som lastsituasjonen «DFV uten bolter». Dette vil medføre en kontroll av sikkerheten hvis istrykk har medført en svekkelse av dammen som følge av en liten deformasjon fra istrykket.

3.3 Poretrykk

Hvis poretrykk viser seg å være utslagsgivende for at dammen ikke er beregningsmessig stabil, anbefales ytterligere undersøkelser og vurderinger.

3.3.1 Poretrykk ved lamelldammer/platedammer

Ved stabilitetskontroll av eksisterende platedammer kan det antas at dammen er fritt drenert på luftsiden av plata. Det forutsettes lineært avtagende poretrykk, der poretrykket virker over et område som tilsvarer 2 ganger platetykkelsen mot fundament.

3.3.2 Gravitasjonsdam med drenasje

Dammer med drenasje skal kontrolleres i ulykkesgrense for lasttilfelle med poretrykk som for dam uten drenasje. Kontrollen gjennomføres med vannstand ved HRV.

Det må dokumenteres at drenasje er virksom for å kunne regne med redusert poretrykk ved stabilitetskontroll. Drenasje må være utformet slik at det er mulig å inspisere. Ved tvil om drenasjen er virksom bør drenshull kunne borres opp.

3.4 Seismiske laster

Eksisterende mur- og betongdammer i klasse 3 og 4 kontrolleres etter følgende forutsetninger, jf. NS-EN 1998:

Tabell 3-1. Forutsetninger for kontroll av jordskjelvlaster i klasse 3 og 4 (NS-EN 1998)

Beskrivelse		Faktor	Kommentar
Duktilitetsklasse (DCL)	Konstruksjonsfaktor	$q < 1,5$	Tradisjonelt har q vært satt lik 1,0. Det bør vurderes om Q skal settes lik 1,5.
Seismisk faktor		$\gamma_I = 2,0$	
Akselerasjon Returperiode: 475 år	a_{gR}ⁱ⁾	$a_{gR} = 0,8 a_{g40Hz}$	Referansespissverdien for grunnforhold type A (fjell). a_{g40Hz} hentes fra figur NA.3(901) og (902)
	a_gⁱⁱⁱ⁾	$a_g = \gamma_I a_{gR}$ ⁱⁱ⁾	Dimensjonerende grunnakselerasjon for grunnforhold type A
Sikkerhet	Generelt	$S > 1,0$	
	Velting, gravitasjonsdam	$R > 0$	Resultant i damtverrsnittet
Lastfaktor	Alle laster	$\gamma_G = 1,0$	
Materialfaktor	Stål	$\gamma_s = 1,0$	
	Betong	$\gamma_b = 1,2$	

- i. Ifølge tillegg til Retningslinje for laster og dimensjonering (2003), datert 27.06.2014.
- ii. For annen berggrunn en grunntype A, henvises det til NS-EN 1998/NA:2014
- iii. Til informasjon: ICOLD (bulletin 148)⁷ anbefaler å bruke en maksimum påregnelig jordskjelv (Maximum Credible Earthquake (MCE)) for vurderinger av store dammer i høy konsekvensklasse. Ifølge ICOLD (bulletin 148) kan en MCE erstattes med et jordskjelv med lang returperiode. ICOLD gir 10.000 år som en eksempel på lang returperiode. Når seismisk faktor (γ_I) settes lik 2,0 kan akselerasjonen anses å ha en returperiode på omkring 4000 år.

3.4.1 Seismiske beregninger

Beregninger gjennomføres med følgende antagelser:

- Beregninger gjennomføres for vannstand ved HRV uten istrykk. Ved is i magasinet antas at denne sprekker opp slik at istrykk ikke er relevant.
- Poretrykk endres ikke under jordskjelv ettersom sjokkbølgene antas å forplante seg raskere enn et eventuelt poretrykk. Normal frekvens for jordskjelv er i området 1 - 10 Hz.
- Massekrefter fra jord og vertikal vannlast beregnes på samme måte som for massekrefter i dammen.

⁷ Selecting Seismic Parameters for Large Dams, Guidelines; ICOLD Bulletin 148; 2016.

Damsikkerhetsforskriften, gjør krav om kontroll av veltstabilitet og glidestabilitet med beregning av sikkerhetsfaktor og/eller plassering av resultant. Dette medfører at statiske beregninger må gjennomføres med pseudostatikk (kvasistatisk) analyse. Laster og lastkombinasjoner for en slik analyse er beskrevet nedenfor.

Kontroll av stabilitet med seismisk påvirkning beregnes med følgende kombinasjoner:

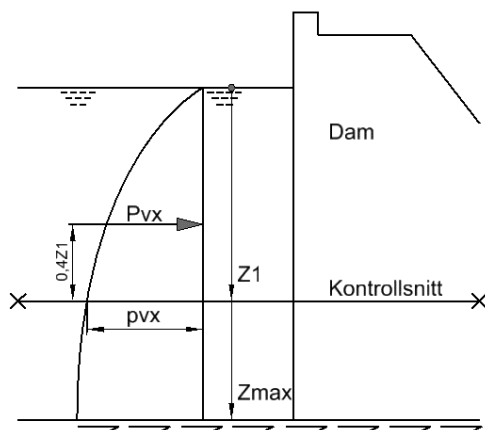
- **Kombinasjon A:** $E_{dx} + 0,3E_{dz}$
- **Kombinasjon B:** $0,3E_{dx} + E_{dz}$

Der E_{dx} og E_{dz} er lastvirkning fra seismisk akselerasjon i følgende retninger:

- dx – horisontalt normalt på damaksen
- dz – vertikalt

E_{dx} vil blant annet omfatte seismisk tilleggslast fra vanntrykk og dammen, mens E_{dz} vil omfatte redusert egenvekt fra dammen som følge av seismisk belastning. E_{dz} vil også omfatte vekt av vann over skrå vannside, der stabiliserende effekt av vannet vil reduseres tilsvarende som for egenvekten av dammen.

Seismisk last fra vanntrykk kan baseres på en parabolisk tilnærming til en teoretisk trykkfordeling etter Westgaard (1933)⁸.



> *Figur 3-1: Seismisk last fra vanntrykk.*

Tilleggstrykk fra vannet i ved dybde z_{max} er gitt ved følgende ligning:

$$p_{vx} = C_e * \rho * z_{max} * \frac{S_{vd}(T)}{g} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

der

C_e = Seismisk trykkfaktor avhengig av helning på dammens vannside (se nedenfor).

ρ = Egenvekt av vann, $\rho=9,81 \text{ kN/m}^3$.

z_{max} = maksimum vanndybde i meter

S_{vd} = Dimensjonerende horisontal seismisk akselerasjon ($a_g = \chi_I a_{gR}$ (for grunntype A))

g = Tyngdens akselerasjon, $g=9,81 \text{ m/s}^2$

⁸ Westergaard, H.M. (1933): Water pressures on dams during earthquakes. Transactions of Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 98, Issue 2, page 418-433.

Resulterende seismisk tilleggslast mot dammen i snitt z_{max} er da gitt ved følgende ligning (Novak et al., 2007)⁹:

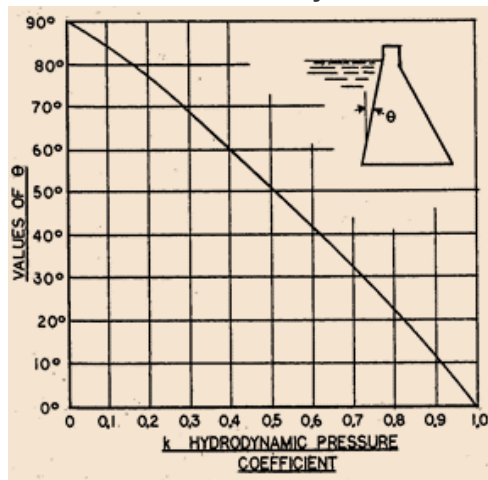
$$P_{vx} = 0,66 * C_e * \rho * z_{max}^2 * \frac{S_d(T)}{g} \text{ [kN]}$$

Kraften angriper $0,40 * z_1$ over kontrollsnittet

Som nevnt er C_e en seismisk trykkfaktor som settes lik 0,73 ved vertikal vannside. Når dammens vannside er skrå, er C_e gitt ved følgende sammenheng:

$$C_e = 0,73 k$$

Der k er en korreksjonsfaktor for fronthelning og hentes fra etterfølgende figur.



- > Figur 3-2. Sammenheng mellom fronthelning og korreksjonsfaktoren, k (Robert B. Jansen, 1988; Figur 16-11)¹⁰.

3.5 Fjellbolter, eksisterende dammer

Hvis det foreligger «som bygget-tegninger» som viser bolter, vil dette normalt være tilstrekkelig som dokumentasjon ved eksisterende dammer. Hvis det er usikkerhet om omfang av bolter, kan det vurderes å påvise et begrenset antall bolter.

Gamle bolter innfestet med «splitt og kile» (ikke gyste) kan ikke medregnes.

Ved eksisterende dammer regnes aktivert spenning i boltene som den minste av følgende formler:

$$f_{sk} = \frac{4 L f_{bb}}{d_b} (\leq 180 \text{ N/mm}^2)$$

Eller

$$f_{sk} = \frac{4 L f_{bf} d_h}{d_b^2} (\leq 180 \text{ N/mm}^2)$$

Der

⁹ Novak et al (2007): Novak, P. et al; Hydraulic Structures, 4th edition; Taylor and Francis Group, London; 2007.

¹⁰ Robert B. Jansen (1988): Advanced dam engineering – For design, construction and rehabilitation. Bok utgitt av Van Nostrand Reinhold, ISBN-13:978-1-4612-8205-1

- f_{sk} = dimensjonerende boltespenning (settes ikke høyere enn 180 N/mm²)
- d_b = boltediameter
- d_h = borhulldiameter (minimum boltediameter + 10 mm)
- f_{bb} = Dimensjonerende heftstyrke stål/mørtel.
 - Karakteristisk heftstyrke mellom stål/mørtel settes lik trykkstyrken i mørtelen og deles med en materialfaktor på 2,0.
 - f_{bb} settes lik 1 N/mm² når heftstyrke til mørtelen ikke er kjent.
- f_{bf} = Dimensjonerende heftstyrke mørtel/fjell
 - Hentes fra tabell i vedlegg til retningslinjer for betongdammer (NVE, 2005).
 - Verdiene i tabellen reduseres med en materialfaktor på 2,0.

Ovennevnte beregninger omfatter fjellbolter i fjell klassifisert i kategori 0 – 3. Hvis fjellet under dammen kategoriseres i klasse 3 eller lavere, bør det også vurderes å inkludere påhengt fjellvekt ved beregning av kapasitet fra fjellboltene, jf. vedlegg til NVEs retningslinje for betongdammer (NVE, 2005).

Hvis det er utført rensk ned til godt fjell vil, kan det forutsettes at fjellet har tilfredsstillende kapasitet til å ta opp spenningene fra boltene uten å medregne påhengt fjellvekt.

3.5.1 Skrå fjellbolter

Horisontale og vertikale krefter fra skrå fjellbolter kan medregnes. Alternativ metodikk for beregning av kapasitet til skrå bolter etter NS-EN 1992 er vist i etterfølgende kapittel «Kriterium for sikkerhet mot glidning».

3.5.2 Alternativ beregning av forankringslengde

Det henvises til notat datert 1. oktober 2013 fra NTNU til EnergiNorge med tittelen «Fjellbolter i betongdammer – oppsummering prosjekt B3-A».

Her er det gitt følgende anbefaling for forankringslengde av fjellbolter:

> *Tabell 3-2. Anbefalte forankringslengder for fjellbolter (NTNU, 2013)*

Situasjon	Forankringslengde
Generelt:	$L = \frac{d_b}{4} \times \frac{f_{sk}}{f_{bb}}$
Når dimensjonerende heft til mørtelen ikke er kjent:	$L = 50 d_b$
For eksisterende konstruksjoner:	$L = 40 d_b$

Kravene forutsetter rensk til godt fjell og en god kontroll av inngysning av boltene.

4 KRITERIER FOR STABILITET – FORSLAG

4.1 Generelt

I dette kapitlet er det gitt forslag for alternativ evaluering av eksisterende betong- og murdammer med utgangspunkt i bestemmelser i damsikkerhetsforskriften og tilhørende retningslinjer. Det understrekes at dette kapitlet omhandler kontroll av eksisterende dammer. Ved ombygging eller nybygging anbefales det å ta utgangspunkt i bestemmelsene i damsikkerhetsforskriften.

4.2 Kriterie for sikkerhet mot glidning

I følge NVEs retningslinjer for betongdammer (NVE, 2005), kapittel 2.6.2, skal sikkerheten mot glidning påvises ved følgende kontroll:

$$S = \frac{F}{\sum H}$$

Der:

S = Sikkerhetsfaktor

F = Snittets bruddkapasitet, og kan omfatte friksjon, kohesjon og fjellbolter.

$\sum H$ = Summen av horisontalkreftene mot dammen

Snittets bruddkapasitet (F) vil normalt være friksjonen i den aktuelle bruddflaten, med mindre fortanning, fjellbolter og armering eller lignende også er virksomme i bruddflaten. Eventuell fortanning i fundamentet inkluderes normalt ikke når det benyttes friksjonsvinkler fra NVEs Retningslinjer for betongdammer (NVE, 2005).

4.2.1 Alternativ metode ved sammensatte glideplan

Metodikken i NVEs retningslinjer for betongdammer (NVE, 2005) er basert på «Shear friction method».

Hvis glideplanet ikke er plant, men sammensatt av flere glideplan vil «Limit equilibrium method» være mer egnet for å beregne sikkerhet mot glidning. Denne metoden gir normalt en lavere sikkerhetsfaktor enn sammenlignbare beregninger med «Shear friction method».

Ved bruk av «Limit equilibrium method» vil ikke sikkerhetsfaktoren i NVEs retningslinje nødvendigvis definere riktig sikkerhetsnivå og sikkerhetsfaktoren fra beregningene må derfor vurderes på et selvstendig grunnlag.

4.2.2 Kapasitet mot glidning etter Eurokoden (inkl. skrå bolter)

En alternativ beregning av kapasitet (F) i bruddflaten er gitt i NS-EN 1992, kapittel 6.2.5 med tittelen «Skjærkrefter i støpeskjøter mellom betongstøp på ulike tidspunkt».

Her er dimensjonerende skjærkapasitet gitt ved:

$$V_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd}$$

Der

c = kohesjonsfaktor. Settes lik 0,4 ved ru overflater (ru overflate f.eks. utført med rive)

f_{ctd} = (jf. NS-EN 1992, kapittel 3.1.6)

μ = friksjonskoeffisient. Settes lik 0,7 ved ru overflater (dvs. c = 0,4). Når μ = 0,7 tilsvarer en friksjonsvinkel på 35°.

- $\rho = A_s / A_i$ = Armeringsareal som krysser skjøten (A_s) / Areal av støpeskjøten (A_i)
 f_{yd} = Armeringens dimensjonerende flytgrense. $f_{yd} \leq 180$ N/mm² for fjellbolter, se kapittel 3.5. I Eurokoden tillates høyere spenning for armering opp til flytespenning, forutsatt fullforankring.
 α = vinkel av bolten mot bruddflaten, og bør begrenses til $\geq 45^\circ$.
 v = fasthetsreduksjonsfaktor = $0,6 (1 - f_{ck}/250)$

Det kan eventuelt regnes med karakteristisk strekkfasthet når dette benyttes i NVEs regelverk der last og materialfaktorer settes lik 1,0. Dette innebærer at karakteristisk strekkfasthet i betong ($f_{ctk, 0,05}$) kan benyttes i stedet for dimensjonerende strekkfasthet til betongen (f_{ctd}). Dette er gitt i tabell 3.1 i NS-EN 1992, se tabell nedenfor.

Fasthetsklasser for betong												
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6
$f_{ctk, 0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2
$f_{ctk, 0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0

> *Figur 4-1. Utdrag fra NS-EN 1992, tabell 3.1.*

Formelen antar et konservativt anslag for kohesjon, sammen med en redusert friksjonsvinkel på 35° . Til sammenligning kan friksjonsvinkelen for glideplan i betong settes lik 45° etter NVEs retningslinje for betongdammer, kapittel 2.6.2.

Når skjærkapasitet beregnes etter ovennevnte formel vil dette erstatte bruddkapasitet og kohesjonsleddet i ovennevnte formel. Kapasitet fra eventuelle fjellbolter medregnes i tverrsnittets bruddkapasitet, der både vertikal og horisontal komponent fra skrå bolter inkluderes. Dette kan uttrykkes som følgende:

$$F = (N-U) \mu + c f_{ctd} + F_{bolt} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)$$

Der

N = Normalkraft på bruddflaten

U = Forutsatt poretrykk i bruddflaten

F_{bolt} = kapasitet til fjellbolter i snittet, der maks spenning i fjellbolten settes lik $f_{yd} \leq 180$ N/mm², jf. NVEs retningslinje for betongdammer (NVE, 2005). I Eurokoden tillates høyere spenning for armering opp til flytespenning, forutsatt fullforankring.

Formel for glidestabilitet etter NVEs retningslinje for betongdammer (NVE, 2005) kan dermed uttrykkes som følgende:

$$S = \frac{F}{\Sigma H} = \frac{(N - U) \mu + C \text{ fctd} + F_{\text{bolt}} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)}{\Sigma H}$$

4.3 Stabilitetskriterier - forslag

Forslag til kriterier for stabilitet er basert på drøfting og dokumentasjon i «Rapport 2 – Hovedrapport med underlag».

Følgende generelle forutsetninger legges til grunn for forslaget:

- Forslag om en større differensiering av krav etter klassifisering ved bruk av multiplikasjonsfaktor for dammer i klasse 1. Multiplikasjonsfaktor, KFI, er hentet fra NS-EN 1990, Tabell B3, der pålitelighetsklasse RC1 lekkes til grunn. Dette innebærer at sikkerhetsfaktoren reduseres med en faktor på 0,9 i klasse 1. Det henvises for øvrig til drøfting i kapittel 7.
- Beregninger i «Rapport 2 – Hovedrapport med underlag», vedlegg E benyttes som grunnlag for sammenhengen mellom sikkerhetsfaktor og usikkerheter i de ulike forutsetningene.

Ved bruk av alternative sikkerhetsfaktorer er det uansett viktig at det gjøres en vurdering av de ulike forutsetningene og usikkerheten i beregningen. Ved eksisterende dammer bør sikkerhetsfaktorene ikke benyttes som absolutte verdier, men brukes med et visst skjønn.

4.3.1 Gravitasjonsdammer i betong

> *Tabell 4-1. Forslag til stabilitetskriterier for eksisterende gravitasjonsdammer i betong.*

Klasse	Kontroll	Bruddgrense		Ulykkesgrense	
		Velting	Glidning	Velting	Glidning
2, 3 og 4	Generelt	R > 1/3 B	S > 1,5	R > 1/6 B	S > 1,1
	DFV uten bolter			R > 1/12 B	S > 1,1
1	Generelt	R > 1/3 B	S > 1,35	R > 1/6 B	S > 1,0
	DFV uten bolter			R > 1/12 B	S > 1,0
Når egenvekt er dokumentert:					
2, 3 og 4	Generelt	R > 1/3 B	S > 1,4	R > 1/6 B	S > 1,0
	DFV uten bolter			R > 1/12 B	S > 1,0
1	Generelt	R > 1/3 B	S > 1,25	R > 1/6 B	S > 1,0
	DFV uten bolter			R > 1/12 B	S > 1,0

Forslaget innebærer ingen endringer i det generelle stabilitetskriteriet for dammer i klasse 2, 3 og 4 når det ikke foreligger dokumentasjon av egenvekten til betongen. Videre er det ingen endringer i de generelle kriteriene for velting for dammer i alle klasser.

Forslag er til endringer omfatter følgende:

- **Gravitasjonsdammer i betong, klasse 2, 3 og 4:** Forslag til stabilitetskriterier omfatter kun glidning. Kriterier for velting samsvarer med stabilitetskriterier i regelverket.
- **Klasse 1 dammer:** Differensiering av krav for dammer i klasse 1 er gitt med referanse i NS-EN 1990, Tabell B3. Stabilitetskrav mot glidning er dermed redusert med en faktor på 0,9. Kriterier for velting samsvarer med stabilitetskriterier i regelverket.
- **Dokumentasjon av egenvekt:** Når egenvekt av betong er dokumentert kan sikkerhetsfaktoren reduseres med en faktor på 1/1,08 mot glidning, jf. vedlegg E i Rapport 2 – «Hovedrapport med underlag». For dammer i klasse 1 kommer dette i tillegg til reduksjon i sikkerhetsfaktoren som følge av differensiering i forhold til konsekvensklassene.

Det anbefales at dokumentasjon av egenvekt også suppleres med en geometrisk kontroll av anlegget.

4.3.2 Murdammer

> *Tabell 4-2 Forslag til stabilitetskriterier for eksisterende murdammer.*

Klasse	Kontroll	Bruddgrense		Ulykkesgrense	
		Velting	Glidning	Velting	Glidning
2, 3 og 4	Generelt	$S > 1,3$	$S > 1,5$	$S > 1,1$	$S > 1,1$
	DFV uten bolter			$S > 1,1$	$S > 1,1$
1	Generelt	$S > 1,2$	$S > 1,35$	$S > 1,0$	$S > 1,0$
	DFV uten bolter			$S > 1,0$	$S > 1,0$

Forslaget innebærer ingen endringer i det generelle stabilitetskriteriet mot glidning for dammer i klasse 2, 3 og 4.

Forslag er begrunnet ut fra følgende momenter:

- **Velting:** Kriterie for velting ved påvisning av resultatens plassering, er ikke relevant for en tørrmurt dam ettersom poretrykket ikke avhenger av trykk i fundamentet. Det vil heller ikke kunne oppstå «strek» i en murdam med mindre det er en armert betongplate på vannsiden. Det er for øvrig vanskelig å se for seg at en murdam i det hele tatt skal velte. Se for øvrig Rapport 2 – «Hovedrapport med underlag», kapittel 8.
- **Bruddgrense, velting:** Lavere sikkerhet mot velting enn mot glidning, tar hensyn til at friksjonsvinkelen ikke har betydning for stabilitet mot velting. Usikkerhet i friksjonsvinkel kan dermed elimineres og sikkerhetsfaktoren kan reduseres sammenlignet med sikkerhetsfaktor mot glidning. Se for øvrig Rapport 2 – «Hovedrapport med underlag», kapittel 8.
- **Ulykkesgrense, velting og glidning, klasse 2, 3 og 4:** I ulykkesgrense er sikkerhetsfaktoren satt lik 1,1 for til en viss grad ta hensyn til usikkerheter i egenvekt. I ulykkesgrense er usikkerhet i friksjonsvinkelen ikke tatt hensyn, slik at sikkerhet mot glidning og velting bør være identiske. Se for øvrig Rapport 2 – «Hovedrapport med underlag», kapittel 8.
- **Klasse 1 dammer:** Differensiering av krav for dammer i klasse 1 er gitt med referanse i NS-EN 1990, Tabell B3. Stabilitetskrav mot velting er dermed redusert med en faktor på 0,9.

Det anbefales at beregninger av stabilitet baseres på en geometrisk kontroll av anlegget.

Når det gjelder kriteriet for velting av murdammer, er det mulig at dette bør fjernes som et bruddkriterie. Beregninger utført i dette prosjektet kan indikerer at dette velting normalt ikke vil være dimensjonerende for murdammer, som drøftet i hovedrapporten, kapittel 8.

4.3.3 Platedammer – Stabilitetskriterier

> *Tabell 4-3. Forslag til stabilitetskriterier for eksisterende lamell- og platedammer.*

Klasse	Kontroll	Bruddgrense		Ulykkesgrense	
		Velting	Glidning	Velting	Glidning
2, 3 og 4	Generelt	$S > 1,4$	$S > 1,4$	$S > 1,3$	$S > 1,1$
	DFV uten bolter			$S > 1,1$	$S > 1,1$
Klasse 1	Generelt	$S > 1,3$	$S > 1,3$	$S > 1,2$	$S > 1,0$
	DFV uten bolter			$S > 1,0$	$S > 1,0$

Forslag til alternative stabilitetskriterier gjelder kun platedammer i klasse 1. Forslaget er omfatter en differensiering av krav for dammer i klasse 1, og er gitt med referanse til NS-EN 1990, Tabell B3. Stabilitetskrav mot velting er dermed redusert med en faktor på 0,9.

Forslaget innebærer ingen endringer i det generelle stabilitetskriteriet for dammer i klasse 2, 3 og 4.

«Rapport 2 – Hovedrapport med underlag», vedlegg E, omfatter ikke platedammer slik at det mangler dokumentasjon av hvordan ulike forutsetninger påvirker den samlede sikkerheten. Det bør derfor vurderes om dette skal gjennomføres.

4.3.4 Dokumentasjon av forutsetninger

Ved å påvise forutsetninger for beregningene vil nøyaktigheten i beregningene øke. Nødvendig sikkerhet kan dermed reduseres uten at sikkerhetsnivået reduseres.

Påvisning av parametere ved testing vil være viktig for å dokumentere riktig sikkerhetsnivå. Standardisert metodikk vil være nyttig i denne sammenheng og bør vurderes nærmere.

4.4 Last og materialfaktorer

4.4.1 Lastfaktorer

Forslag til lastfaktorer for kontroll av spenninger i damkonstruksjonen, jf. retningslinje for betongdammer, kapittel 2.1 (NVE, 2005):

> *Tabell 4-4. Lastfaktorer for beregning av spenninger og kapasitet (ikke stabilitet)*

Beskrivelse	Kontroll	Bruddgrense	Ulykkesgrense
Vanntrykk, istrykk og egenvekt ¹¹	Stabiliserende	$\gamma_l = 1,0$	$\gamma_l = 1,0$
	Destabiliserende	$\gamma_l = 1,2$	$\gamma_l = 1,0$
Øvrige laster (ref. NS-EN 1990)¹²			
Permanente laster	Stabiliserende	$\gamma_l = 1,0$	$\gamma_l = 1,0$
	Destabiliserende	$\gamma_l = 1,2$	$\gamma_l = 1,0$
Variable laster	Dominerende	$\gamma_l = 1,5$	$\gamma_l = 1,0$
	Øvrige	$\gamma_l = 1,05$	$\gamma_l = 1,0$
	Gunstige	0	$\gamma_l = 1,0$

Lastfaktorene gitt i Retningslinje for betongdammer (NVE, 2005) for dammer samsvarer for øvrig med lastfaktorene for NS-EN 1990 permanente laster for STR kontroll, alternativ 2. For øvrige laster er det derfor nærliggende å henvise til denne grensetilstanden.

De fleste laster som virker på dammer er permanente. Det er usikkert hvilke laster som kan defineres som variable laster og dette må vurderes i hvert enkelt tilfelle.

4.4.2 Materialfaktorer

Forslag til materialfaktorer for kontroll av spenninger i damkonstruksjonen, jf. retningslinje for betongdammer, kapittel 2.1 (NVE, 2005):

> *Tabell 4-5. Materialfaktorer for beregning av kapasitet (jf. NVEs retningslinje for betongdammer, kap. 1 og kap. 3.11 (NVE, 2005))*

Material-faktorer	Bruddgrense		Ulykkesgrense	
	Betong	Armering	Betong	Armering
NVEs retningslinje for betongdammer (NS 3473)	1,40 1,75*	1,25 1,40**	1,2 1,5*	1,1
NS-EN 1992 ¹³	1,50	1,15	1,2	1,0

* Gjelder for uarmert betong.
** Benyttes hvis materialparametere ikke kan dokumenteres

¹¹ NVE (2005); Retningslinje for betongdammer, kapittel 2.1. Omfatter vanntrykk, istrykk og egenvekt

¹² Lastfaktorer for bruddgrensetilstander er gitt i NS-EN 1990, tabell NA.A1.2(A) og tabell NA.A1.2(B).

¹³ NS-EN 1992-1-1: 2004 + NA:2008, Tabell 2.1N og Tabell NA.2.1N

Beregning og kapasitet til fjellbolter er for øvrig beskrevet i kapittel 3.5.

4.4.3 Beregning av skjærkapasitet i plater

Skjærkontroll av oppstrøms plate ved eksisterende platedammer kan utføres etter NS 3473 i forbindelse med kontroll i revurdering. Dette gjelder som alternativ til beregninger etter krav i Eurokoden, jf. skriv fra NVE datert 07.01.2015 med tittelen «Tillegg til retningslinjer for betongdammer, utgave 2 (okt. 2005)».

Ved introduksjon av NS 3473 i 1973, distribuerte NVE et brev/notat, datert 14. desember 1975, vedrørende tilleggsbestemmelser til standarden. Dette notatet inneholdt følgende momenter:

- Ved kontroll i bruddgrensetilstanden hvor konsekvenser ved sammenbrudd er store skal det regnes med $\gamma_m = 1,4$ i stedet for 1,25
- Plater med tilnærmet jevnt fordelt last, overveiende statisk last, kan regnes å ha 20% høyere kapasitet for skjærkraft enn angitt i NS 3473 pkt. 5,2 hvis det ikke regnes med kapasitetsbidrag fra skjærarmering.
- Beregnet strekkspenning i armering i bruksgrensetilstanden bør ikke være høyere enn 180 N/mm².

Det er ikke kjent at NVE har trukket ovennevnte bestemmelser, som innebærer at bestemmelsene kan legges til grunn for eksisterende platedammer.

4.5 Alternative vurderinger

Alternative metodikker/vurderinger kan være aktuelt for å påvise ekstra kapasitet ved anlegg med spesielle utfordringer knyttet til for eksempel utførelse, laster eller randbetingelser. Metodene kan også benyttes for å kalibrere og validere inndata i opprinnelige beregninger.

4.5.1 Dokumentasjon av forutsetninger

Effekt fra for eksempel kohesjon og fortanning kan gi et betydelig bidrag til stabilitet mot glidning. Påvisning poretrykk er en annen faktor som kan bidra til mer nøyaktige beregninger av sikkerhet mot glidning og velting.

Glidestabiliteten til en betongdam er imidlertid komplekst og påvirkes av mange faktorer som kan være vanskelig å dokumentere. Det finnes heller ingen god beskrivelse av fremgangsmåte for å dokumentere disse faktorene. Slike undersøkelser er derfor i liten grad utført.

Ved å gjennomføre tester og prøving, kan det utvikles en metodikk for å påvise ulike forutsetninger som er av betydning for stabilitet. Dette vil senke terskelen for å gjennomføre slike undersøkelser og vil samtidig kunne bidra til å bedre den generelle kunnskapen om hvordan disse faktorene påvirker sikkerheten.

4.5.2 FEM analyser (FERC, 2016)

«Finite Element Method» (FEM) gjør det mulig å modellerer faktisk geometri av dammen, samvirke mellom dam og fundament, samt selve fundamentet under dammen. Muligheter for å skanne fundamentet før utstøping av nye dammer medfører nye muligheter for denne typen analyser.

2-dimensjonale elementanalyser gjør det mulig å beregne en mer nøyaktig distribusjon av trykkspenninger i bruddflaten. Spenningene i bruddflaten er ofte ikke-lineært fordelt, slik som det er forutsatt i enkle stabilitetsbetraktninger. Spenningene under dammen vil variere og kan dermed også påvirke poretrykket. 2 dimensjonale FEM-beregninger vil også kunne inkludere effekt fra fortanning og ujevnheter mot fjell, og dermed gi et mer nøyaktig bilde av hvordan dette påvirker stabiliteten ved dammen. Gjennom elementberginger vil det også være mulig å re-distribuere spenningen i dammen gjennom ikke-lineære beregninger. På denne måten kan ekstra kapasitet i konstruksjonen påvises.

3-dimensjonale analyser kan benyttes når det skjer en lastfordeling parallelt med damaksen, som for eksempel ved buede gravitasjonsdammer, eller gravitasjonsdammer i trange kløfter der det kan oppstå en buvirkning.

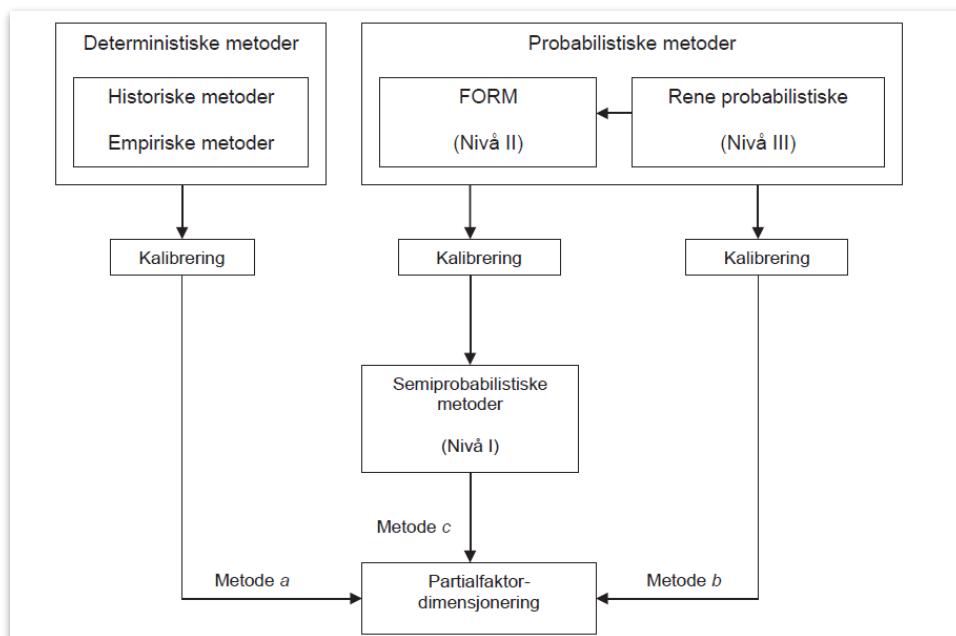
4.5.3 Probabilistisk design (Energiforsk, 2016)

I hovedsak er det følgende to metoder for å dokumentere påliteligheten til en struktur:

- Deterministiske metoder
- Probabilistiske metoder

Deterministiske metoder baserer seg kalibrering tuftet på byggeskikk over lang tid (historiske/empiriske metoder). Eurokoden og damsikkerhetsforskriften baserer seg i hovedsak på slike metoder. Ulempen med metodikken er at det er vanskelig å kvantifisere usikkerheten og knytte den opp mot kilden til usikkerhet.

Probabilistiske metoder baserer seg på statistisk evaluering av forsøksdata og feltmålinger. Man benytter ikke partialfaktorer og/eller sikkerhetsfaktorer, men spesifiserer en statistisk fordeling for de forskjellige lastene og kapasitetene. Deretter må man definere ett eller flere bruddkriterier og på grunnlag av dette beregne en sannsynlighet for brudd.



> *Figur 4-2. Skjematisk oversikt over forskjellige metoder for kalibrering av dimensjoneringsformler med partialfaktorer (grensetilstander) og sammenheng mellom dem, jf. NS-EN 1990, figur C1.*

Den beregnede sannsynligheten for brudd kan deretter måles opp mot en akseptabel risiko definert i regelverk. Eurokoden plasserer dammer i konsekvensklasse/pålitelighetsklasse 3 (Tabell NA.A1(901), NS-EN 1990). For en referanseperiode på 1 år krever dermed Eurokoden at dammer har en pålitelighetsindeks på minst 5,2 som vist i etterfølgende tabell. Dette tilsvarer en sannsynlighet for brudd på 10^{-7} per år, eller en returperiode på 10 millioner år, jf. tabell 4-5.

- > *Tabell 4-6. Anbefalte minsteverdier for pålitelighetsindeksen β i bruddgrensetilstand. (NS-EN 1990, Tabell B2,)*

Pålitelighetsklasse	Minsteverdier for β	
	Referanseperiode 1 år	Referanseperiode 50 år
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Forholdet mellom pålitelighetsindeksen og sannsynligheten for brudd er gitt av uttrykket nedenfor, der $\phi(x)$ er fordelingsfunksjonen for en standard normalfordeling. Pålitelighetsindeksen for forskjellige sannsynligheter er gitt ved:

$$\beta = -\phi^{-1}(p_f)$$

- > *Tabell 4-7. Forholdet mellom sannsynlighet for brudd og pålitelighetsindeksen. (NS-EN 1990, Tabell C1)*

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Probabilistiske metoder er svært godt egnet for vurdering av sikkerheten til eksisterende konstruksjoner da all geometri er gitt og ved hjelp av målinger og data fra instrumentering er det mulig å kvantifisere spredningen til de fleste variable (vanntrykk, poretrykk, betongfasthet, friksjonsvinkel etc...). Eurokoden åpner i NS-EN 1990, Tillegg B og C, for bruk av slike metoder til dokumentasjon av sikkerhet. Metoden kan også benyttes ved design av nye konstruksjoner, men har størst potensiale for eksisterende der kostnaden for endringer er store.

Energiforsk i Sverige har gitt ut en fylldig rapport som sammenstiller regler, retningslinjer og forklaringer for dimensjonering og revurdering av betongdammer med probabilistiske metoder (Probabilistic model code for concrete dams). Her er det gjort et arbeid med å kalibrere pålitelighetsindeksen opp mot krav for å tilfredsstille sikkerhetsforskrifter for eksisterende dammer. Basert på dette kan vi gi et pålitelighetskrav for dammer i konsekvensklasse 0 til 4.

- > Tabell 4-8. Minsteverdier for pålitelighetsindeks, β , ved referanseperiode 1. år (Energiforsk, 2016, Rapport 2016:292, Tabell 6.1 og 6.2, Probabilistic Model Code for Concrete Dams).

Damklasse	Minste akseptable pålitelighetsindeks, β
3 og 4	5,2
2	4,8
1	4,2
0	3,8

5 VURDERING AV BERGGRUNNEN

Evaluering av fundamentet er nødvendig for å vurdere følgende forhold:

- Lokal og global stabilitet til fundamentet i forhold til potensiell utglidning og oppbygning av poretrykk.
- Bestandighet i forhold til forvitring og nedbrytning samt eventuell erosjon og skader i flomløpet
- Innfesting av fjellbolter i fjell.

Forslag for klassifisering av berg tar utgangspunkt i teknisk standard utarbeidet for Statnett i samarbeid med NGI (Statnett, 2016). Standarden har et godt detaljeringsnivå og vil også være egent for å klassifisere kvalitet av fundament og vederlag ved dammer. Det kan imidlertid vurderes å modifisere innholdet med tanke på spesielle utfordringer i forbindelse med dammer og poretrykk i fundamentet.

5.1 Klassifisering av berggrunnen

Berggrunnsforholdene defineres i en av fem klasser, som vist i etterfølgende tabell.

> *Tabell 5-1. Klassifisering av berg (Statnett, 2016)*

Klasse	Benevning	Beskrivelse
0	Massivt berg	Intakt berg eller massivt berg med noen få sprekker med stor sprekkeavstand. Sprekkeflatene er uforvitret og ru.
1	Noe oppsprukket berg	Bergmassen er gjennomskåret av et eller to sprekkesett. Sprekkeflatene er godt fortannet og uforvitret. Sprekkeflatene er fra ru til plane.
2	Grovblokkig berg	Bergmassen er gjennomskåret av to eller tre, sprekkesett som danner kubiske blokker. Sprekkeflatene er godt fortannet og uforvitret. Sprekkeflatene er fra ru til plane.
3	Småblokkig berg	Bergmassen er gjennomskåret av fire eller flere sprekkesett. Sprekkeflatene er noe fortannet eller litt forvitret. Sprekkeflatene er plane eller med noe fylling av sleppemateriale.
4	Oppsprukket eller nedknust berg	Bergmassen med flere sprekkesett. Sprekkeflatene er dårlig fortannet, gjennomsettende eller skifrige. Sprekkeflatene kan være plane eller fylt med sleppemateriale.

Kommentar:

- **Uttrykket «sprekk»** brukes her som en felles beskrivelse av diskontinuiteter i berg, som sprekk, stikk, skjærsone, sleppe, lagdeling, osv.
- **Uttrykket «sprekkesett»** er nærmere beskrevet i etterfølgende tekst.

5.2 Kriterier for klassifisering

For klassifisering benyttes følgende 7 hovedparametere:

1. Forvittringsgrad og mineralstabilitet
2. Enaksial trykkfasthet
3. Antall sprekkesett
4. Sprekkeorientering
5. Sprekkeavstand
6. Sprekkeruhet
7. Sprekkeåpning

Klassifiseringen forutsetter at bergmaterialet er stabilt mot oppløsning i vann, jf. NS-EN ISO 14689-1:2000. Bergarter som kritt, steinsalt, gips, anhydritt er derfor ikke egnet for klassifisering etter kriteriene beskrevet her.

Kriteriene for de ulike klassene er oppsummert i etterfølgende tabell. For å oppfylle kriteriene i en bestemt klasse, skal alle kriteriene i den spesifikke bergklassen være tilfredsstillt.

> *Tabell 5-2. Kriterier for klassifisering av berg (Statnett, 2016)*

Egenskap	Bergklasse				
	0	1	2	3	4
	Massiv	Noe oppsprukket	Grovblokkig	Småblokkig	Oppsprukket eller nedkjust
1. Forvitring	Frisk til noe forvitret				Moderat til fullstendig forvitret
2. Enaksial trykkfasthet	>100 MPa	> 50 MPa	>25 MPa	> 25 MPa	< 25 MPa
3. Antall sprekkesett	≤ 1 + tilfeldige	≤ 2	≤ 3	≤ 3 + tilfeldige	≥ 4
4. Sprekkavstand	≥ 2 m	≥ 0,6 m	≥ 0,2 m	≥ 60 mm	< 60 mm
5. Sprekk-ruhet	Liten skala	Ru	Ru	Ru	Ru eller glatt
	Midlere skala	Trinn eller undulerende	Trinn eller undulerende	Trinn, undulerende eller plan	Trinn undulerende eller plan
6. Sprekkeåpning	≤ 0,25 mm	≤ 0,5 mm	≤ 2,5 mm	≤ 10 mm	≥ 10 mm
7. Sprekkefylling	Ingen	Ingen	Granulær materiale	Granulær materiale	Leirig materiale

Nedenfor følger forklaring til kriteriene i ovennevnte tabell:

5.2.1 Grad av forvitring:

- **Frisk berg** har ingen synlige tegn til forvitring
- **Noe forvitret** omfatter noe misfarging av berget som indikerer forvitring.
- **Moderat forvitring** omfatter mindre enn halvparten av bergmaterialet er omdannet eller desintegrert. Friskt eller misfarget forvitret berg er til stede enten som et sammenhengende rammeverk eller som kjernesteiner
- **Fullstendig forvitret** innebærer at alt bergmaterialet er omdannet og/eller desintegrert til jord. Den opprinnelige massestruktur er fortsatt i stor grad intakt.

5.2.2 Trykkfasthet:

> Tabell 5-3. Enaksial trykkfasthet; verdier for noen vanlige bergarter (Statnett, 2016)

Enaksial trykkfasthet	Bergart	Feltvurdering
>250 MPa	Frisk basalt, chert, diabas, gneiss, granitt, kvartsitt	Kan bare slå av fliser med en geologhammer
100-250 MPa	Amfibolitt, sandstein, basalt, gabbro, gneiss, granodioritt, kalkstein, marmor, ryolitt	Krever mange slag med en geologhammer for å brette
50-100 MPa	Kalkstein, marmor, fyllitt, sandstein, skifer	Krever mer enn ett slag av en geologhammer for å brette
25-50 MPa	Leirstein, kull, betong, skifer, siltstein	Kan ikke skjæres eller skrapes med en lommekniv; Kan brette med ett enkelt slag av en geologhammer
< 25 MPa	Kritt, mergel, steinsalt, gips, fast sleppemateriale	Kan skjæres eller skrapes av en lommekniv med vanskelighet; Et hardt slag med en geologhammer lager grunne groper.

5.2.3 Antall sprekksett:

Ett sprekksett har samme orientering. Antallet sprekksett bestemmes ved kartlegging av fall og orientering/retning av ulike sprekksett. Hvis det er mer to sett, er det ofte nødvendig å plote observasjoner av fall og fall retning.

5.2.4 Sprekkavstand:

Sprekkeavstanden refererer til avstanden vinkelrett mellom tilstøtende sprekker i et sprekksett og skal bestemmes uavhengig for hvert sprekksett. Avstanden skal måles og angis som statistiske verdier, aritmetisk middel eller modal (mest hyppigste) verdi, der det er mulig.

5.2.5 Sprekkruehet:

Ruheten av sprekker skal beskrives i to skalaer med følgende definisjoner:

- **Liten skala** (inntil en centimeter): ru, glatt eller glidespeil.
- **Midlere skala** (inntil noen få desimeter): plan, trinn, undulerende.

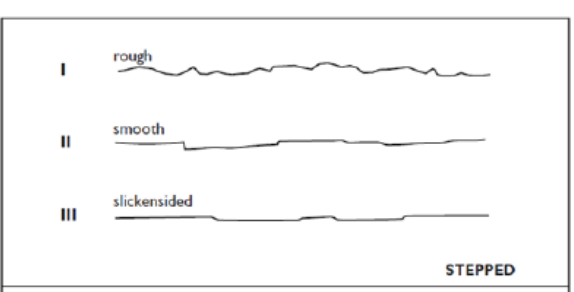
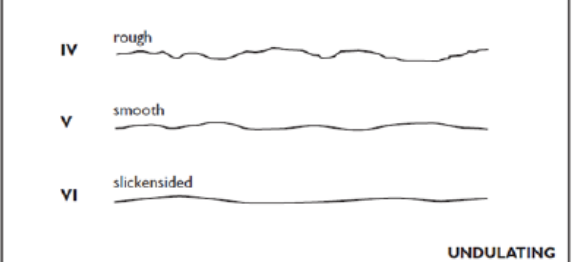
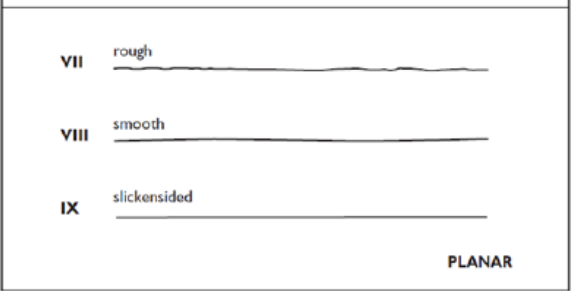
Eksempler på beskrivelse av sprekkeprofiler i liten og midlere skala er gitt i etterfølgende figur.

5.2.6 Sprekkeåpning:

Sprekkeåpningen refererer til den vinkelrette avstand eller separasjon mellom de to flatene av en sprekke. Sprekkeåpningen gis som statistiske verdier, der det er mulig, aritmetisk gjennomsnitt eller modal (hyppigste) verdi.

5.2.7 Sprekkefylling:

Sprekkefyllingsmaterialet mellom de to overflatene av en sprekke skal beskrives med kornstørrelse og plastisitet. Kornstørrelse skal bedømmes visuelt i form av leirig, siltig, sandig eller grovkornet. Plastisiteten skal bedømmes ved klemming eller rulling og angis som plastisk eller ikke-plastisk.

I TRAPPET - ru II TRAPPET – glatt III TRAPPET - glidepeil	
IV UNDULERENDE - ru V UNDULERENDE - glatt VI UNDULERENDE - glidespeil	
VII PLAN – ru VIII PLAN – glatt IX PLAN - glidespeil	

- > *Figur 5-1. Beskrivelse av ruhetsprofiler på sprekker i liten og midlere skala – Kriterium nr. 5 (Statnett, 2016 - figur 1)*

5.3 Vurdering av berg i forbindelse med revurdering

Fagansvarlig for revurdering av dammen vil også være ansvarlig for å vurdere fundamentforholdene ved anlegget og klassifiseringskriterier kan være nyttig som referanse og for å sikre en god og enhetlig vurdering.

Fagansvarlig vil også være ansvarlig for å vurdere om det er behov for å innhente ekstra ekspertise fra ingeniørgeologer eller lignende. Dette vil normalt være avhengig av følgende forhold:

- Fagansvarlige sin kompetanse
- Berget sin beskaffenhet og tilstand (Klassifisering av berget)
- Observasjoner av unormale forhold fra befaringen (for eksempel lekkasjer, erosjon, deformasjoner)
- Statisk vanntrykk mot dammen/fundamentet

Ved fundament for dammer er det spesielt viktig å vurdere fare for oppbygning av poretrykk og potensielle glidesjikt. Tydelig lagdeling med horisontale glidesjikt der sprekkesettet er orientert parallelt med damaksen kan være kritisk, spesielt i kombinasjon med et høyt poretrykk.

Samtidig kan dårlig fjell med mye oppsprekking medføre drenasje av fjellet, slik at det ikke er fare for oppbygning av poretrykk i fundamentet under dammen. Eksempelvis kan en svak bergart som fyllitt være godt egnet som fundament ettersom bergarten er fleksibel slik at horisontale sprekker tettes ved belastning fra dammen, mens vertikale sprekker kan drenere berget.

6 REFERANSER

- DIBK (2010); Veileder; «Levetider i praksis - prinsipper og bruksområde», Forfattere; Anette Kampesæter, Svein Bjørberg og Christian A. Listerud. Utgiver: Multiconsult. Internett: https://www.dibk.no/globalassets/eksisterende-bygg/publikasjoner/levetider_i_praksis.pdf
- Douglas, Kurt John (2002); The Shear Strength of Rock Masses, doktoravhandling ved The University of New South Wales, Australia.
- Store Norske leksikon: Dam – demning. Internett: <https://snl.no/dam%2Fdemning>
- Energiforsk (2015): Betongdammars Brottförlopp – Literaturstudie och utvecklingspotential, Rapport 2015:122.
- Energiforsk (2016): Probabilistic Model Code for Concrete Dams, Rapport 2016:292
- EnergiNorge (2014): «Forsterking av platedammer, Utfordringer og løsninger, Fase 1 – Foreløpige resultater». Rapport datert 24. januar 2014 og utført av Norconsult. Forfattere: Thomas Konow (prosjektleder), Morten Berntsen og Olof Dahlen (fagkontroll).
- EnergiNorge (2012): Optimal og sikker rehabilitering av betongdammer, Glidestabilitet betongdammer. Rapport datert 15. januar 2015 og utarbeidet av Norconsult på vegne av EnergiNorge.
- Federal Energy Regulatory Commission (FERC), 2016: Engineering guidelines, Revised chapter 3 – Gravity dams, USA. Internett: <https://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/eng-guide/chap3.asp>
- ICOLD (2016); ICOLD bulletin 148, Selecting Seismic Parameters for Large Dams, Guidelines.
- ICOLD (1997); ICOLD Bulletin 109, Dams less than 30 meters high.
- ICOLD (1995); ICOLD Bulletin 99, Dam Failures, Statistical analysis.
- ICOLD (1994); Technical Dictionary on Dams
- ICOLD European Club, Ruggeri, Govianni (2014); Working Group on Sliding Safety of existing Gravity Dams, Final Report.
- Norut (2013): Målset dam – Finite element analysis assisted by tests, Technical report no. 2013/32013-06-12, datert 18. April 2013.
- Novak et al (2007): Novak, P. et al; Hydraulic Structures, 4th edition; Taylor and Francis Group, London; 2007.
- NTNU (2013): «Fjellbolter i betongdammer – oppsummering prosjekt B3-A». Notat datert 1. oktober 2013 fra NTNU til EnergiNorge.
- NTNU (2016): Kompendium til kurs - «Damsikkerhets kurs II»
- NVE (2014): Veileder for klassifisering, kapittel 2.1. Veileder nr. 3/2014 datert juni 2014.
- NVE (2013): Dammer som kulturminner. NVE rapport 64 – 2013.
- NVE (2011): Retningslinjer for flomberegninger. Retningslinjer nr. 4/2011, datert oktober 2011.
- NVE (2009): Autoritet, tillit, ansvar: Norsk vassdragstilsyn 1909-2009.
- NVE (2005): Retningslinje for betongdammer, utgave 2 fra oktober 2005
- NVE (2005): Retningslinje for overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg, utgave 2 fra oktober 2005
- NVE (2003): Retningslinje for laster og dimensjonering, datert 15.12 2003.
- NVE (2002): Retningslinje for tilsyn og revurdering, datert 01.05 2002.
- OED (2014): Rapport, «NVEs virksomhet for tilsyn med dammer, Evaluering av tilsynet – Vurderinger og anbefalinger». Utført av Norconsult. Se her: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/evaluering-av-nves-damsikkerhetstilsyn/id2403432/>

- OED (2010): Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (Damsikkerhetsforskriften), fastsatt ved kgl. res. 18.12 2009. Gjeldende fra 1. januar 2010.
- OED (2001); Forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg, fastsatt ved kgl. res. 15.12 2000. Gjeldende fra 1. januar 2001.
- OED (1981); Forskrift for dammer (Damforskriftene), fastsatt ved kgl. res. 14.11. 1980. Gjeldende fra 1. januar 1981.
- Robert B. Jansen (1988): Advanced dam engineering – For design, construction and rehabilitation. Bok utgitt av Van Nostrand Reinhold, ISBN-13:978-1-4612-8205-1
- Sintef NHL (1992): Tilstopping av flomløp, Prosjekt damsikkerhet, rapport nr. 4 datert februar 1992
- Standard Norge, NS3424:2012. Tilstandsanalyse av byggverk – Innhold og gjennomføring
- Standard Norge, NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016. Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner
- Standard Norge, NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2008. Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-1: Allmenne laster - Tetthet, egenvekt og nyttelaster i bygninger
- Standard Norge, NS-EN 1992-1-1: 2004 + NA:2008. Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger.
- Statnett (2016); Teknisk standard, Spesifikasjon for fundamentering av mastestabber på berg, Klassifisering av berggrunnen, revisjon 2, datert 16. mars 2016
- Statens vegvesen (2015): Korrosjonsbeskyttelse i tunneller, rapport nr. 410, datert september 2015
- Statens vegvesen (2015). Bolter og ankre (stag), Forankringslengde i berg. Presentasjon fra Arild Neby 16. mars 2015.
- USSD (2012), Larry K. Nuss, Norihisa Matsumoto, og Kenth D Hansen: Shaken, but not stirred – Earthquake performance of Concrete dams. Proceedings fra USSD Annual Conference 23-27 april 2012, New Orleans, Louisiana, USA.
- USSD (2009), Patric J. Reagan: An examination of dam Failures vs. age of dams. Proceedings fra USSD Annual Conference 20-24 april 2009, Nashville, Tennessee, USA.
- Westergaard, H.M. (1933): Water pressures on dams during earthquakes. Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 98, Issue 2, page 418-433.

Internett:

- NVE: <https://www.nve.no/damsikkerhet-og-energiforsyningsberedskap/damsikkerhet/>
- Norut: <http://norut.no/nb/prosjekter/istrykk-mot-dammer>