

Rapport fra EnergiNorge

FORUTSETNINGER FOR KONTROLL AV
STABILITET FOR BETONG- OG
MURDAMMER

VEDLEGG E TIL HOVEDRAPPORT

RAPPORT

Prosjektnavn:

FORUTSETNINGER FOR KONTROLL AV STABILITET FOR BETONG- OG MURDAMMER

Dokumentnavn:

VEDLEGG E TIL HOVEDRAPPORT

Prosjektnr.: 12372
Dokumentnr.: 12372-OO-R-004

Dato: 08.08.2017
Revisjon: 1. versjon
Antall sider: 57

Utarbeidet av: Mathias Strand
Kontrollert av: Thomas Konow
Godkjent av: Thomas Konow

Rettigheter til prosjektmaterialet

Oppdragsgiver har rett til å bruke materialet utarbeidet av prosjekterende Dr.techn.Olav Olsen AS til gjennomføring av prosjektet, senere drift, vedlikehold, ombygging og påbygging. Hvis ikke annet er avtalt, har Dr.techn.Olav Olsen AS alle øvrige rettigheter til sine ideer og det utarbeidete materialet. Dr.techn.Olav Olsen AS kan likevel ikke bruke dette på en måte som er urimelig i forhold til oppdragsgiver. Oppdragsgiver kan ikke overdra materialet til en tredjepart uten samtykke fra Dr.techn.Olav Olsen AS.

Revisjon	Dato	Grunn for utsendelse	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. av

INNHold

1	INNLEDNING	4
1.1	Bakgrunn.....	4
1.2	Gjennomføring	4
1.3	Definisjoner	5
1.4	Forbehold	5
2	SAMMENDRAG	6
2.2	Gravitasjonsdam – Oppsummering av resultater.....	6
2.3	Murdam.....	15
2.4	Platedam	19
3	GRAVITASJONDAM I BETONG	20
3.1	Beregninger	20
3.2	Valg av tverrsnitt for beregningene	21
3.3	Presentasjon	23
3.4	Friksjon	23
3.5	Vannstand	26
3.6	Egenvekt	30
3.7	Istrykk, damhøyde 2-7 m	33
3.8	Fjellbolter, damhøyde 0-7 m	36
3.9	Poretrykk.....	38
4	MURDAM.....	43
4.1	Innledning	43
4.2	Forutsetninger.....	43
4.3	Utvelging av tverrsnitt.....	44
4.4	Presentasjon	46
4.5	Friksjon	46
4.6	Vannstand	49
4.7	Egenvekt	51
4.8	Poretrykk.....	53

1 INNLEDNING

Denne rapporten er utarbeidet av Dr.techn. Olav Olsen på oppdrag fra EnergiNorge, som en del av prosjektet «Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv».

Prosjektet "Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv" er finansiert av 30 produksjonsselskaper i bransjen og har et budsjett på kr. 8 millioner i perioden 2015 til 2018. Prosjektet har som mål å etablere og ta i bruk kunnskap som utvikler damsikkerhet i et samfunnsoptimalt perspektiv.

Rapporten inngår som et bilag til hovedrapporten med følgende tittel:

- Prosjekttittel: Evaluering av eksisterende betong- og murdammer.
- Rapporttittel: Rapport 2 – Hovedrapport med underlag

1.1 Bakgrunn

Sikkerhetsfaktoren ved beregning av stabilitet omfatter mange variabler, men hvordan disse variablene påvirker sikkerhetsfaktoren er ikke nødvendigvis kjent eller tilgjengelig. Flere eksempler ble etterspurt fra NVE og andre aktører i forbindelse med gjennomgang av høringsuttalelser til hovedrapporten.

For å undersøke dette nærmere er det utført beregninger der forutsetningene varieres for å se hvordan dette påvirker den totale sikkerheten. Beregningene gjennomføres ved at det velges et optimalt damtverrsnitt som akkurat er stabilt etter dagens regelverk. Deretter endres last eller forutsetning, og korresponderende sikkerhetsfaktorer beregnes. På denne måten er sammenheng mellom sikkerhetsfaktor og lastfaktor identifisert. Beregningene gjennomføres også for ulike damtyper, for både gravitasjonsdammer i betong og murdammer. Platedammer er ikke undersøkt i denne rapporten.

Hvordan ulike parametere påvirker beregninger av stabilitet er viktig for å vurdere hvilke grad av usikkerhet som ligger i de ulike variablene. Dette kan i sin tur gi en indikasjon på hvilke parametere som har mest betydning for stabiliteten og følsomheten ved stabilitetsberegningene etter damsikkerhetsforskriften. Beregningene i denne rapporten er derfor vurdert å være et viktig grunnlag for å evaluere sikkerhet for eksisterende dammer, samt for å vurdere avvik i forhold til dagens sikkerhetsnivå.

1.2 Gjennomføring

Beregningene er basert på regneverktøy for stabilitetskontroll, som er utarbeidet av Dr. techn. Olav Olsen.

For å effektivisere beregningene er det utarbeidet skript som kjører beregningen automatisk. Skriptet definerer hvordan endring i ulike variabler skal utføres, og utfører deretter beregninger for stabilitet med disse forutsetningene.

For hver damhøyde er tverrsnitts-parametere variert for å optimalisere tverrsnittet for beregningen. Når ønsket tverrsnitt er valgt, kjøres beregningen på nytt der hver av de undersøkte parameterne varieres hver for seg og tilhørende sikkerhetsfaktor for glidning og velting blir hentet ut.

Resultatet fra stabilitetsberegningen av hver parameter presenteres grafisk, der resulterende sikkerhetsfaktor plottes mot varierende parameter for hver damhøyde. Variasjon i sikkerhetsfaktoren er vist for både glidning og velting.

For velting er det valgt å presentere sikkerhetsfaktor i stedet for plassering av resultanten (som er stabilitetskriteriet ifølge regelverket). Dette er gjort for å få et enklere grunnlag for å sammenligne sikkerheten.

Metodikken med sammenkobling av ulike regneverktøy, har gitt et meget kraftig og fleksibelt regneverktøy for stabilitetsberegninger av alle typer betongdammer. Totalt er rapporten basert på ca. 7000 separate beregninger med ulike variabler, hvorav 5000 av beregningene omfatter gravitasjonsdam i betong. Under arbeidet med rapporten er det imidlertid utført langt flere beregninger før resultatene er hentet ut (antagelig flere 10-talls tusen beregninger).

1.3 Definisjoner

Sikkerhetsfaktorer er definert som følger:

- **Glidning – sikkerhet:**

$$SF_{glidning} \leq \frac{\sum R_{horisontal\ kapasitet}}{\sum F_{horisontal\ last}} = \frac{\sum F_{vertikal\ last} \tan(\phi + \alpha) + \sum R_{kapasitet}}{\sum F_{horisontal\ last}}$$

der ϕ er friksjonsvinkelen og α er fundamenthelning, og F er kreftene som virker på konstruksjonen, mens R er kapasiteten.

- **Velting – sikkerhet:**

$$SF_{velting} \leq \frac{\sum M_{stabiliserende}}{\sum M_{drivende}}$$

1.4 Forbehold

Ettersom prosjektet har begrensede ressurser, har det bare vært rom for en forenklet kontroll av resultatene. En grundigere kontroll og verifisering av resultatene i denne rapporten bør derfor gjennomføres.

Det understrekes at resultatene fra beregningen gjelder utelukkende for de tverrsnitt som er benyttet her. Når tverrsnittet og forutsetningene endres vil også forholdet mellom sikkerhetsfaktor og tilhørende partialfaktorer kunne endres.

Tverrsnittet som er benyttet for beregningene er optimalisert mot en sikkerhetsfaktor lik 1,0 mot glidning, jf. egen beskrivelse i kapittel 3 og kapittel 4. Med en sikkerhetsfaktor lik 1,0 er tverrsnittene tett opp mot det som er optimalt. Dette er gjort for at beregningene skal vise mest mulig korrekt variasjon i sikkerhet, uten at det er påvist at dette er tilfelle.

Det bør også undersøkes hvordan normalisering av sikkerhetsfaktoren påvirker variasjon av sikkerhetsfaktoren.

2 SAMMENDRAG

I dette kapitlet er det konklusjonene i rapporten oppsummert for de ulike damtypene og de ulike lastene/variablene.

Beskrivelse av hvordan beregningene er gjennomført er gitt i kapittel 3 og kapittel 4. For å få en fullstendig forståelse av metodikk og fremgangsmåte, anbefales å lese disse kapitlene først.

2.1.1 Generelt

Beregningene viser at det kan være problematisk å håndtere alle usikkerheter med en samlet sikkerhetsfaktor. For eksempel vil islast eller fjellbolter utgjøre en mye større del av lastbildet for lave dammer enn for høye dammer. Usikkerheter i disse variablene vil dermed ha forskjellig utslag på sikkerheten avhengig av damhøyde. Resultatet vil være at dammer i samme konsekvensklasse ikke har sammenlignbare sikkerhetsnivå.

Hvordan partialfaktorer påvirker sikkerhetsfaktoren er avhengig av beregningen og det derfor ikke nødvendigvis en entydig sammenheng mellom sikkerhets- og partialfaktorer.

2.1.2 Generering av tverrsnitt

Optimalisert tverrsnitt for betongdammer, ga en minste sikkerhet på 1,1 mot glidning og 1,5 mot velting, når det ble benyttet en friksjonsvinkel på 40°. En kontroll av beregningene viser at en friksjonsvinkelen lik 50° gir tilnærmet den samme sikkerhetsfaktoren mot velting som for glidning, når det forutsettes et lineært avtagende poretrykk.

Optimalisert tverrsnitt for murdammer, ga en litt større differanse mellom sikkerhetsfaktorene. Her ble det oppnådd en sikkerhet på 1,0 mot glidning og tilhørende sikkerhet på 1,5 mot velting, når det ble benyttet en friksjonsvinkel på 33°. En kontroll av beregningene viser at en friksjonsvinkelen lik 45° gir tilnærmet den samme sikkerhetsfaktoren mot velting som for glidning. Ved murdammer forutsettes for øvrig et redusert poretrykk.

Beregningene tyder på at glidning normalt vil være dimensjonerende for både gravitasjonsdammer og murdammer.

2.2 Gravitasjonsdam – Oppsummering av resultater

2.2.1 Sammenheng mellom laster og sikkerhet

I etterfølgende tabell er det forslag til sikkerhetsfaktor for hver enkelt variabel. Summen av disse sikkerhetsfaktorene bør i prinsippet utgjøre den samlede sikkerheten. Forslag til sikkerhetsfaktor er begrunnet ut fra beregninger i denne rapporten.

- > Tabell 2-1. Ulike variabler og forslag tilhørende sikkerhetsfaktor på bakgrunn av beregninger gjennomført i denne rapporten.

Variabel	Sikkerhetsfaktor				Kommentar
	Glidning		Velting		
	Brudd	Ulykke	Brudd	Ulykke	
Friksjon	1,0	1,0	Ikke relevant		Sikkerhet blir ivaretatt av konservative verdier for friksjonsvinkel, som i prinsippet også omfatter fortanning og kohesjon. Konservative verdier tilsier at usikkerhet er tatt høyde for ved fastsettelse av friksjonsvinkel.
Flom (Vannstand)	1,0	1,0	1,0	1,0	Usikkerheter i flomvannstander bør inkluderes i selve flomberegningen og ikke reflekteres i den generelle sikkerhetsfaktoren.
Egenvekt	1,08	1,08	1,05	1,05	Sikkerhetsfaktoren representerer en redusert egenvekten fra 24 til 23 kN/m ³ (tilsvarende en lastfaktor lik 0,96).
Istrykk	1,00	-	1,00	-	Sikkerhet blir best ivaretatt av konservative verdier for istrykket og bør ikke inkluderes i selve sikkerhetsfaktoren.
Fjellbolter	1,00	1,00	1,00	1,00	Sikkerhet blir best ivaretatt av konservative verdier for boltespenning og bør ikke inkluderes i selve sikkerhetsfaktoren.
Poretrykk	1,40	1,00	1,20	1,00	Sikkerhetsfaktoren i bruddgrense tilsvarer differensen i sikkerhet mellom maksimum tillatt poretrykk i bruddgrense og ulykkesgrense.
SUM - alle faktorer	1,51	1,08	1,26	1,05	= samlet anslag for sikkerheten = alle sikkerhetsfaktorer multiplisert sammen
Dagens stabilitetskrav	1,5	1,1	*	*	* Kriterium mot velting avhenger av plassering av resultanten, og ikke en sikkerhetsfaktor.

Tabellen viser god sammenheng mellom dagens sikkerhetsfaktor mot glidning, sammenlignet med vurderinger i denne rapporten.

Begrunnelse for valg av sikkerhetsfaktorer i tabellen er for øvrig beskrevet i etterfølgende oppsummering.

2.2.2 Friksjonsvinkel

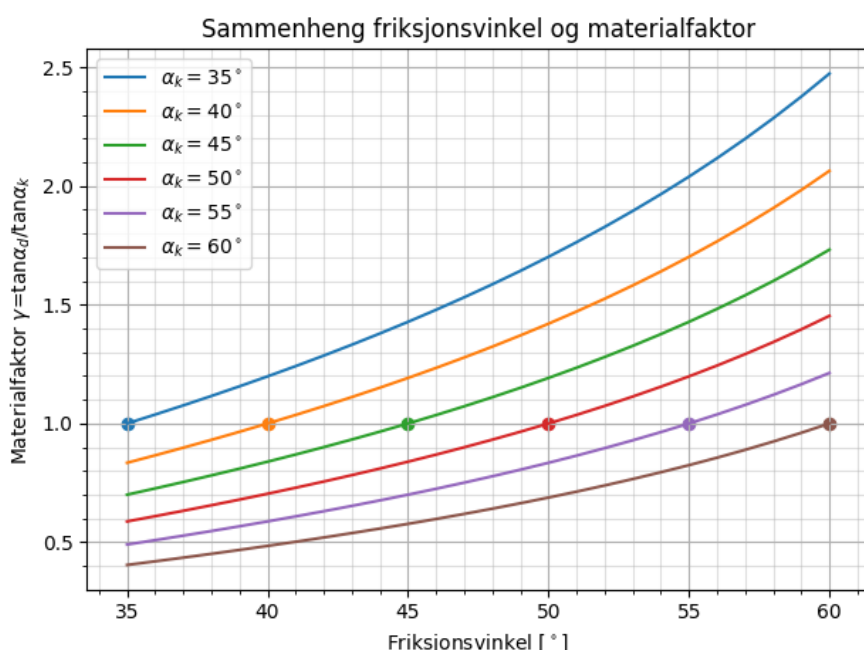
Friksjonsvinklene i retningslinjen for betongdammer vil normalt være konservative der friksjonsvinkel også omfatter fortanning mot fjell samt kohesjon, som ikke kan medregnes uten at denne er påvist.

Beregningene i rapporten viser at konservative friksjonsvinkler vil resultere i en høy sikkerhet for dammen.

Sammenhengen mellom friksjonsvinkel og materialfaktor er for øvrig vist i grafen nedenfor. Grafene har nesten samme krumning og viser at endring i friksjonsvinkelen har tilnærmet samme effekt på materialfaktoren uavhengig av utgangspunktet. Eksempelvis, vil en forskjell mellom karakteristisk friksjonsvinkel og dimensjonerende friksjonsvinkel på 5° medføre en materialfaktor på 0,83 (dvs. sikkerhetsfaktor på ca. 1,20) uavhengig av opprinnelig verdi for karakteristisk friksjonsvinkel.

For friksjonsvinkelen α_k og Sammenhengen mellom

Variasjon i friksjonsvinkel viser også hvordan usikkerhet i fundamentbelasting påvirker sikkerheten.

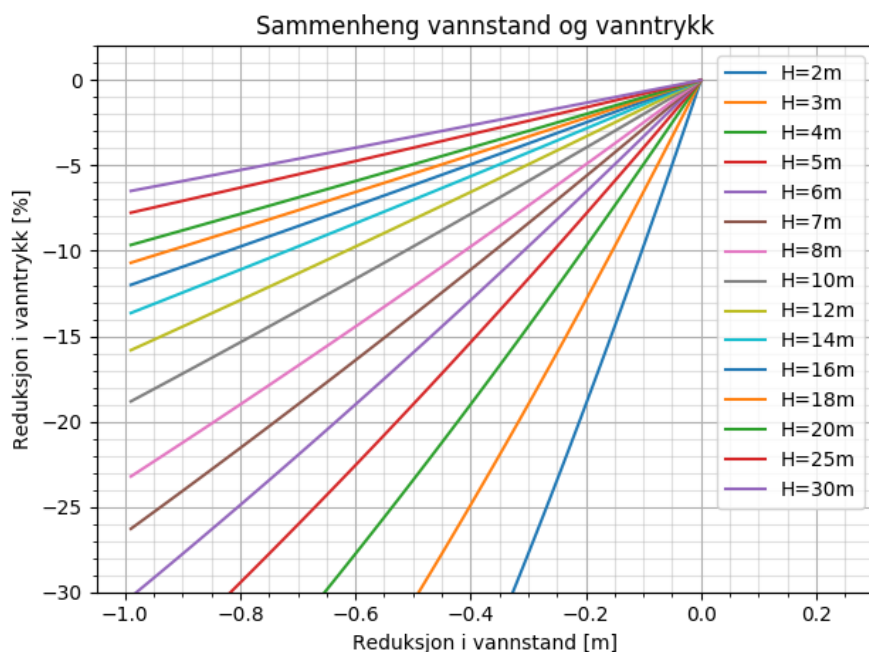


- > *Figur 2-1 Sammenheng mellom friksjonsvinkel og materialfaktor med ulike karakteristiske friksjonsvinkler.*

2.2.3 Vannstand

Damhøyde, med tilhørende statisk vanntrykk mot dammen, er avgjørende for hvordan usikkerheter i flomberegningen og flomvannstander påvirker stabiliteten. Med andre ord, når damhøyden øker har endringer i flomvannstanden mindre betydning for stabiliteten ved dammen. Det vil derfor være riktig at eventuelle usikkerheter i flomberegningene inkluderes i selve flomberegningen og ikke reflekteres i den generelle sikkerhetsfaktoren.

Statistikk av ulykker og unormale situasjoner viser for øvrig at et vel fungerende flomløp med tilstrekkelig avløpskapasitet er vesentlig for dammens sikkerhet. Dette innebærer at flomberegninger er først og fremst interessant for dimensjonering av flomløpet. Når det gjelder beregning av stabilitet, kan imidlertid en grov og konservativ vurdering av flomvannstander være tilstrekkelig.



- > *Figur 2-2: Sammenheng mellom endring i vannstand og tilhørende vanntrykk. Figuren illustrerer at lave dammer er vesentlig mer følsomme for variasjon i vannstand enn høyere dammer.*

2.2.4 Egenvekt

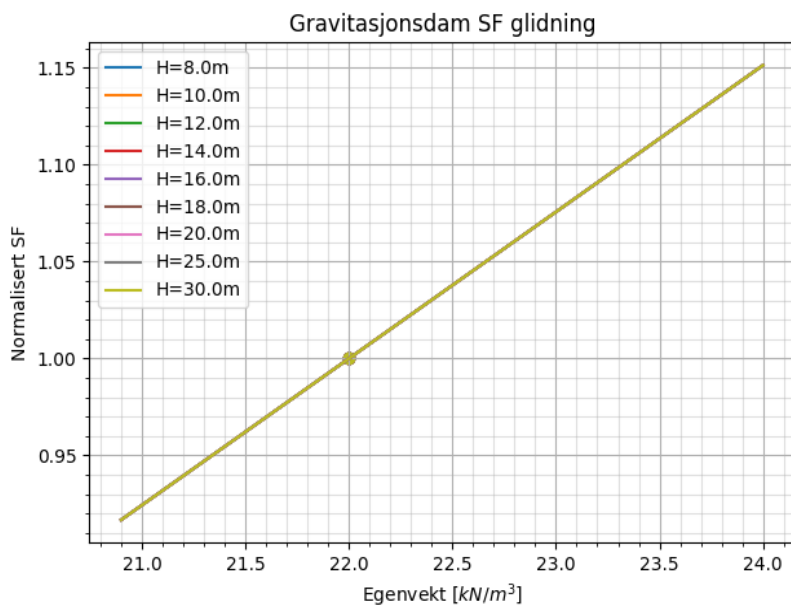
Egenvekten er naturlig nok vesentlig for stabilitet av en gravitasjonsdam.

Eurokoden benytter en lastfaktor på 0,9 for egenvekt som gir et stabiliserende bidrag. Lastfaktoren omfatter i prinsippet usikkerhet i forhold til geometri og egenvekt. Hvis egenvekten reduseres fra 24 til 23 kN/m³ utgjør dette en lastfaktor på 0,96 og kan være et rimelig anslag for usikkerhet ved egenvekt ved gravitasjonsdammer.

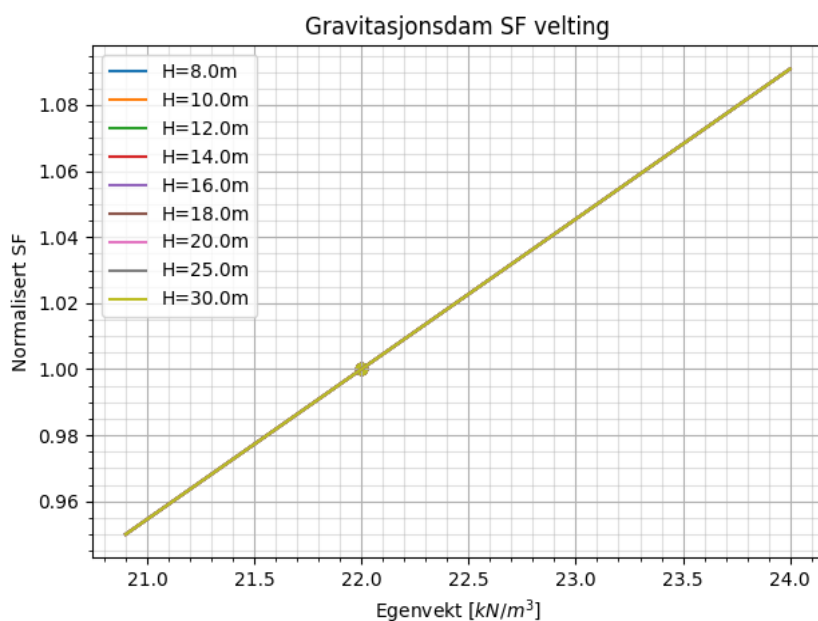
Probabilistiske beregninger utført for dam Reinoksvatn viser at geometriske variasjoner har begrenset betydning for sikkerheten. Påvisning av geometri vil selvfølgelig også redusere usikkerheten i beregningene, men hvordan dette påvirker sikkerheten er ikke undersøkt i denne rapporten.

Når en ikke regner med fjellbolter, vil sikkerhetsfaktoren for både glidning og velting øke lineært med økt egenvekt, som vist i etterfølgende grafer. Grafene viser at ved velting er sikkerhetsfaktoren og lastfaktoren identisk (dvs. at stigningstaller i ovennevnte graf er på 1).

Ved bruk av fjellbolter, vil boltene stå for en større andel av den totale lasten i forhold til andre laster (som egenvekt og vanntrykket). Endring i egenvekten vil dermed ha mindre stabiliserende effekt for lave dammer enn for høye dammer med fjellbolter.



- > *Figur 2-3: Glidning; SF mot egenvekt. Damhøyder 8 til 30 m uten fjellbolter. Grafene for alle høyder overlapper.*



- > *Figur 2-4: Velting; SF mot egenvekt. Damhøyder 8 til 30 m uten fjellbolter. Grafene for alle høyder overlapper.*

2.2.5 Geometrisk avvik

Påvisning av geometri vil selvfølgelig også redusere usikkerheten i beregningene, men hvordan dette påvirker sikkerheten er ikke undersøkt i denne rapporten.

Probabilistiske beregninger utført for dam Reinoksvatn viser at geometriske variasjoner har begrenset betydning for sikkerheten. Det er grunn for å anta at det samme vil være tilfelle for andre gravitasjonsdammer, på et generelt grunnlag.

2.2.6 Istrykk

Istrykk utgjør en betydelig større usikkerhet i lastbildet for lave dammer enn for høye dammer. En generell sikkerhetsfaktor tar ikke hensyn til dette forholdet. Bruk av sikkerhetsfaktor medfører i prinsippet at det er større usikkerhet knyttet til stabilitetsberegninger av istrykk for en lav dam enn for en høy dam. Ved bruk av lastfaktor vil usikkerheter ved islasten kunne ivaretas på en bedre måte.

For å sikre at beregningene tar hensyn til usikkerhet i islasten, kan istrykket baseres på en konservativ verdi, som for eksempel kan bestemmes ved bruk av en lastfaktor. Med andre ord, bør usikkerhet i istrykket ikke inkluderes i en samlet sikkerhetsfaktor.

Forholdet er illustrert i etterfølgende tabell.

- > *Tabell 2-2: Sammenheng mellom lastfaktor og sikkerhetsfaktor, når dimensjonerende islast er 150 kN/m og karakteristisk last er 100 kN/m.*

Damhøyde	Islast Lastfaktor	Tilsvarende sikkerhetsfaktor	
		Glidning	Velting
2 m	1,5	1,43	1,37
7 m	1,5	1,14	1,15

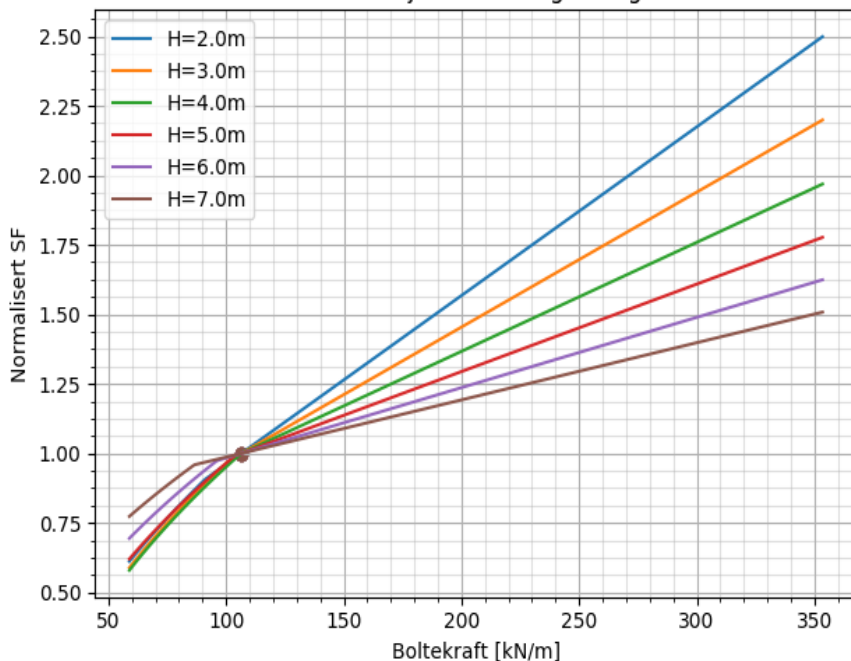
Tabellen viser at usikkerheten i istrykket vil påvirke sikkerheten i større grad ved lave damhøyder.

2.2.7 Fjellbolter

Som forventet, bidrar fjellboltene til en større sikkerhet for lave dammer enn for høye dammer, ettersom boltekraften utgjør en betydelig større andel av de samlede lastene for lave dammer.

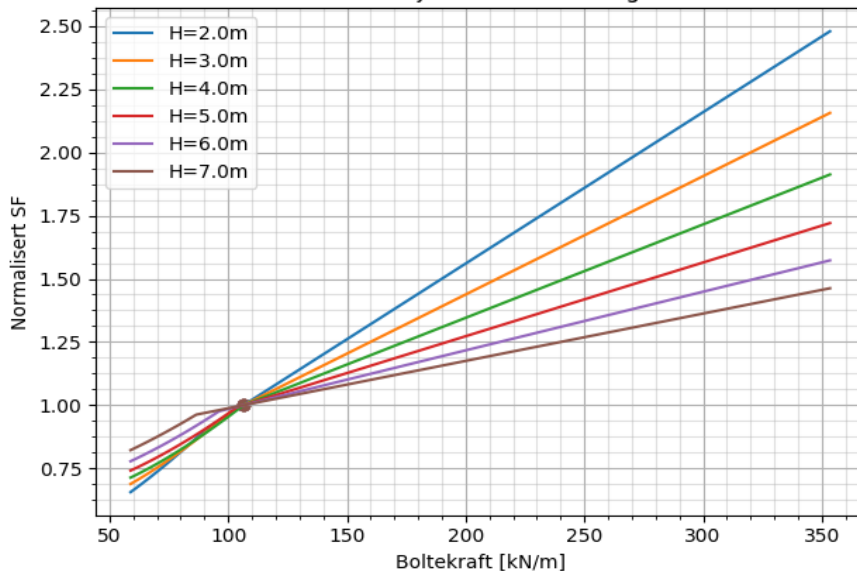
En generell sikkerhetsfaktor tar ikke hensyn til dette forholdet. Bruk av sikkerhetsfaktor medfører at usikkerhet knyttet til innfesting av bolter er større for en lav dam enn for en høy dam. Bruk av materialfaktor ivaretar dermed eventuell usikkerhet i boltekraften på en bedre måte.

Gravitasjonsdam SF glidning



- > Figur 2-5: Sikkerhetsfaktor for glidning med varierende boltekraft. Sikkerhetsfaktor lik 1 tilsvarer $\varnothing 25$ bolter c/c 0,83 m med boltespenning på 180 N/mm^2 ($=106.5 \text{ kN pr. løpemeter dam}$)

Gravitasjonsdam SF velting



- > Figur 2-6: Sikkerhetsfaktor for velting med varierende boltekraft. Sikkerhetsfaktor lik 1 tilsvarer $\varnothing 25$ bolter c/c 0,83 m med boltespenning på 180 N/mm^2 ($=106.5 \text{ kN pr. løpemeter dam}$).

2.2.8 Poretrykk

Poretrykk representerer en usikkerhet som kan være vanskelig å tallfeste i en sikkerhets- eller lastfaktor.

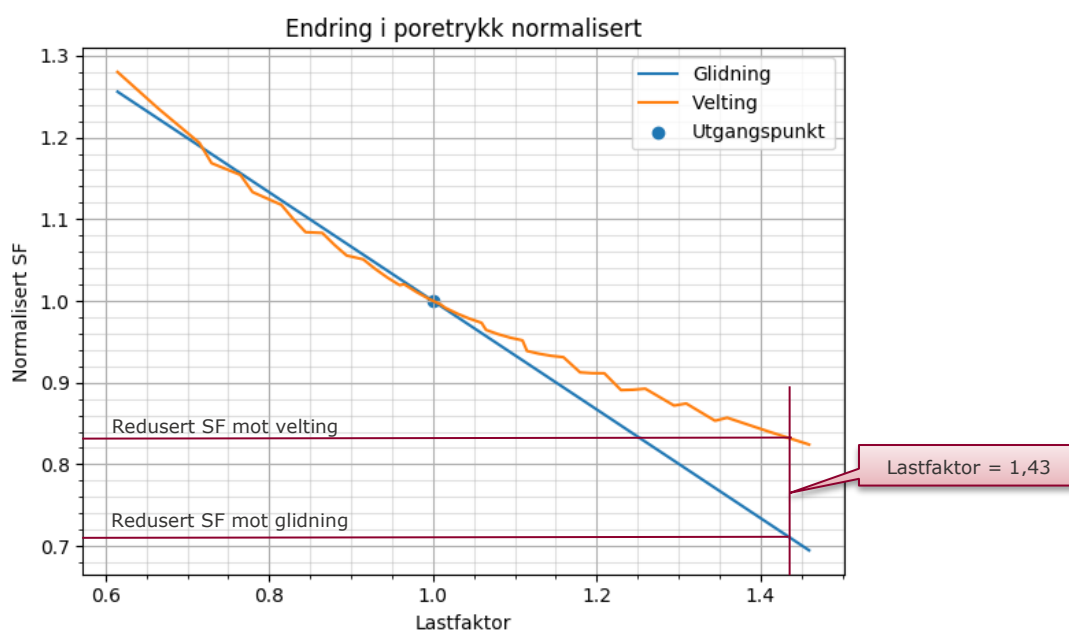
Dagens kriterier for poretrykk gir en logisk sammenheng mellom lastvirkningene fra dammen og poretrykket for kontroll av stabilitet i bruddgrense. Når det er trykk i hele fundamentet, vil det normalt ikke kunne oppstå riss som kan medføre poretrykk. Antagelse om lineært avtagende poretrykk under dammen vil da være konservativt og bidra til en god sikkerhet for anlegget.

Kontroll i ulykkesgrensetilstand ivaretar i tillegg en ekstra sikkerhet hvis poretrykket skulle være større enn antatt i bruddgrensebetraktningen. Hvis maksimum tillatt poretrykk i ulykkesgrensetilstand ivaretar eventuell usikkerhet i poretrykket, kan differansen i poretrykk mellom bruddgrense og ulykkesgrense tilsvare nødvendig «lastfaktor».

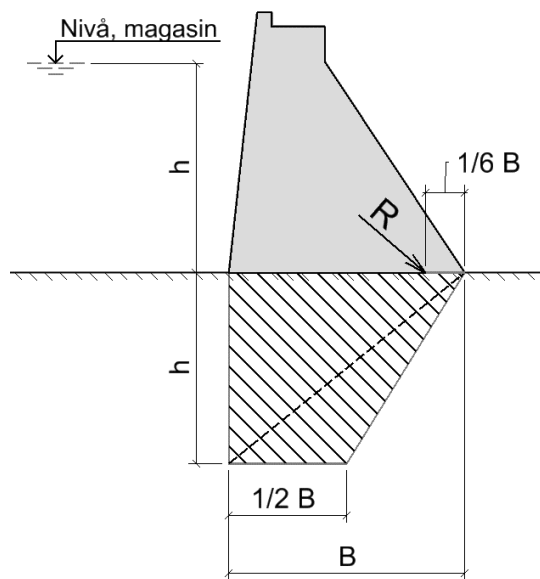
Differansen mellom poretrykk i bruddgrense og i ulykkesgrense er på 43 %, og tilsvarer med andre ord en lastfaktor på 1,43. Sammenheng mellom sikkerhetsfaktor i brudd- og ulykkesgrense kan dermed uttrykkes som vist i etterfølgende tabell og figur.

- > *Tabell 2-3. Sikkerhetsfaktor for ulykke- og bruddgrensetilstand på bakgrunn av beregningene (jf. graf Figur 2-7 og Figur 2-8).*

	Ulykkes- grense	Brudd- grense	Kommentar
Glidning	1,0	1,41	=1/0,71 jf. Figur 2-7
Velting	1,0	1,2	=1/0,83 jf. Figur 2-7



Figur 2-7: Endring i sikkerhetsfaktor ved gitt lastfaktor for poretrykk. Beregningene er gjennomført for dammer med høyde 8 - 30 m.



Figur 2-8. Poretrykk med resultanten i 1/6-dels punktet, som er nedre grense for stabilitet i ulykkesgrense. Poretrykk ved bruddgrense er vist med stiplet linje.

2.3 Murdam

2.3.1 Innledning

Erfaringer med murdammer tilsier at beregningsmodellen for stabilitetskontroll antagelig ikke gir en fullgod beskrivelse av sikkerheten ved denne typen dammer, og at beregningene er konservative.

Murdammer har en fleksibel konstruksjon. Dette kan medføre en omlagring av krefter og kan bidra til en betydelig økning i kapasitet mot glidning. Når murdammer belastes med statiske laster, vil konstruksjonen kunne ta større deformasjoner før dammen går til brudd. Med andre ord, vil dammen ha tydelige tegn på skader hvis den er utsatt for statiske laster som konstruksjonen ikke tåler. Dette kan til en viss grad sammenlignes med prinsippet som benyttes for dimensjonering av underarmerte betongkonstruksjoner. Ekstra kapasitet som følge av deformasjoner samt evnen til å tåle deformasjoner er ikke tatt hensyn til i dagens kriterier for stabilitetskontroll. Dette vil først og fremst være relevant for eksisterende dammer.

For murdammer, er det viktig å skille mellom type laster konstruksjonen er utsatt for. Ettersom murdammer er bygget opp av enkeltstein, vil dynamiske belastninger fra rennende vann kunne medføre en større usikkerhet for konstruksjonens integritet og stabilitet, enn belastning fra statiske laster som inkluderes i stabilitetsbergingene.

Det er viktig å ta hensyn til at murdammer kan være svært forskjellig når det gjelder oppbygning. I denne sammenheng vil vurderinger av stabilitet også være avhengig av en vurdering av anleggets tilstand og oppbygning.

2.3.2 Sammenheng mellom laster og sikkerhet

I etterfølgende tabell er det forslag til sikkerhetsfaktor for hver enkelt variabel. Summen av disse sikkerhetsfaktorene bør i prinsippet utgjøre den samlede sikkerheten. Forslag til sikkerhetsfaktor er begrunnet ut fra beregninger i denne rapporten.

- > *Tabell 2-4. Ulike variabler og tilhørende sikkerhetsfaktor på bakgrunn av beregninger gjennomført i denne rapporten.*

Variabel	Sikkerhetsfaktor		Sikkerhetsfaktor		Kommentar
	Glidning		Velting		
	Brudd	Ulykke	Brudd	Ulykke	
Friksjon	1,2	1,0	Ikke relevant		Det er lagt inn en ekstra sikkerhet i bruddgrense for å ta høyde for eventuell feilvurdering av friksjonsvinkelen og/eller fundamenthelning i beregningene. Sikkerhetsfaktoren representerer en feil i friksjonsvinkelen på 5°.
Flom (Vannstand)	1,0	1,0	1,0	1,0	Usikkerheter i flomvannstander bør inkluderes i selve flomberegningen og ikke reflekteres i den generelle sikkerhetsfaktoren.
Egenvekt	1,22	1,22	1,16	1,16	Valg av sikkerhetsfaktoren representerer en redusert egenvekt på 2,5 kN/m ³ og representerer en lastfaktor = 1,16 for velting og 1,22 for glidning.
Istrykk	1,00	-	1,00	-	Se vurdering under gravitasjonsdammer.
Fjellbolter	1,00	1,00	1,00	1,00	Se vurdering under gravitasjonsdammer.
Poretrykk	1,05	1,00	1,06	1,00	Det er tatt høyde for en viss usikkerhet i poretrykket i bruddgrense, der det er antatt at dreisplanet (dx) flyttes fra 1/4 H _w til 1/3 H _w . H _w er statisk vanntrykk mot konstruksjonen.
SUM - alle faktorer	1,54	1,22	1,23	1,16	= samlet anslag for sikkerheten = alle sikkerhetsfaktorer multiplisert sammen
Dagens stabilitetskrav	1,5	1,1	-	-	Kriterium mot velting avhenger av plassering av resultanten, og ikke en sikkerhetsfaktor.

Tabellen viser god sammenheng mellom dagens sikkerhetsfaktor mot glidning i bruddgrense sammenlignet med vurderinger i denne rapporten.

Når det gjelder ulykkesgrense, er normalen at det ikke benyttes lastfaktorer. Det kan derfor diskuteres om det er riktig inkludere en lastfaktor på egenvekten slik som vist i tabellen. Å benytte en sikkerhetsfaktor lik 1,1 kan være et godt kompromiss som sikrer at eventuell

usikkerhet i egenvekten til en viss grad blir tatt hensyn til sammen med andre usikkerheter som for eksempel poretrykk.

Begrunnelse for valg av sikkerhetsfaktorer i tabellen er for øvrig beskrevet i etterfølgende oppsummering.

2.3.3 Friksjonsvinkel

Friksjonsvinkel for en murdammer er forbundet med større usikkerhet enn ved betongdammer, ettersom friksjonsvinkelen er avhengig hvordan fundamentet er bearbeidet ved bygging. Ved murdammer vil fortanning i fundamentet være av stor betydning for sikkerhet mot glidning. Videre, er ikke kohesjon relevant for murdammer.

Ut fra ovennevnte betraktning, bør friksjonsvinkel for murdammer baseres på konservative verdier, og dette er tatt hensyn til i verdier oppgitt i NVEs retningslinje for murdammer.

For bruddgrense er det i tillegg lagt til en ekstra sikkerhet på 1,2 i bruddgrense for å ta høyde for eventuell feilvurdering av friksjonsvinkelen og/eller fundament i beregningene. Dette representerer en feil tilsvarende 5°.

2.3.4 Vannstand

Usikkerheter i flomvannstander bør inkluderes i selve flomberegningen og ikke reflekteres i den generelle sikkerhetsfaktoren, som diskutert under kapittelet for gravitasjonsdammer.

2.3.5 Egenvekt

Egenvekt ved murdammer er vanskelig å påvise og det er vanlig å benytte verdiene i NVEs retningslinje ut fra en skjønnsmessig vurdering. For tørrmurte dammer utgjør dette en differanse på 5 kN/m³ mellom minimums- og maksimumsverdien (dvs. 16 til 21 kN/m³).

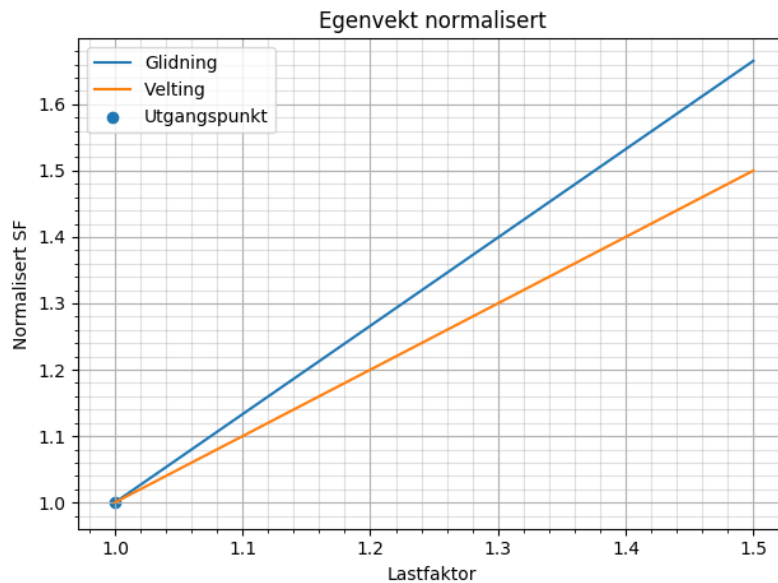
Det foreligger ingen vurdering av hvordan usikkerhet i egenvekten reflekteres i den samlede sikkerhetsfaktoren for murdammer. I denne rapporten er det derfor forutsatt at usikkerheten utgjør +/- 2,5 kN/m³. En egenvekt på 18,5 kN/m³ vil da kunne representere både øvre og nedre verdi for egenvekt 16 – 21 kN/m³.

Påvisning av geometri vil selvfølgelig også redusere usikkerheten i beregningene, men hvordan dette påvirker sikkerheten er ikke undersøkt i denne rapporten.

> *Tabell 2-5: Sammenheng mellom lastfaktor og sikkerhetsfaktor for når egenvekten økes fra 16 til 18,5 kN/m³.*

	Lastfaktor	Sikkerhetsfaktor
Glidning	1,16	1,22
Velting	1,16	1,16

Tabellen viser at endringer i egenvekten gir større utslag for glidning enn for velting når friksjonsvinkelen settes lik 33°. Usikkerhet knyttet til egenvekt gir derfor størst utslag i forhold til sikkerhet mot glidning. Dette forholdet er også illustrert i etterfølgende graf.



> Figur 2-9: Endring i sikkerhetsfaktor ved gitt lastfaktor for egenvekt.

2.3.6 Poretrykk

Usikkerhet knyttet til poretrykket er mye mindre ved tørrmurte dammer enn ved gravitasjonsdammer i betong, ettersom damkroppen er drenert (se Figur 2-10).

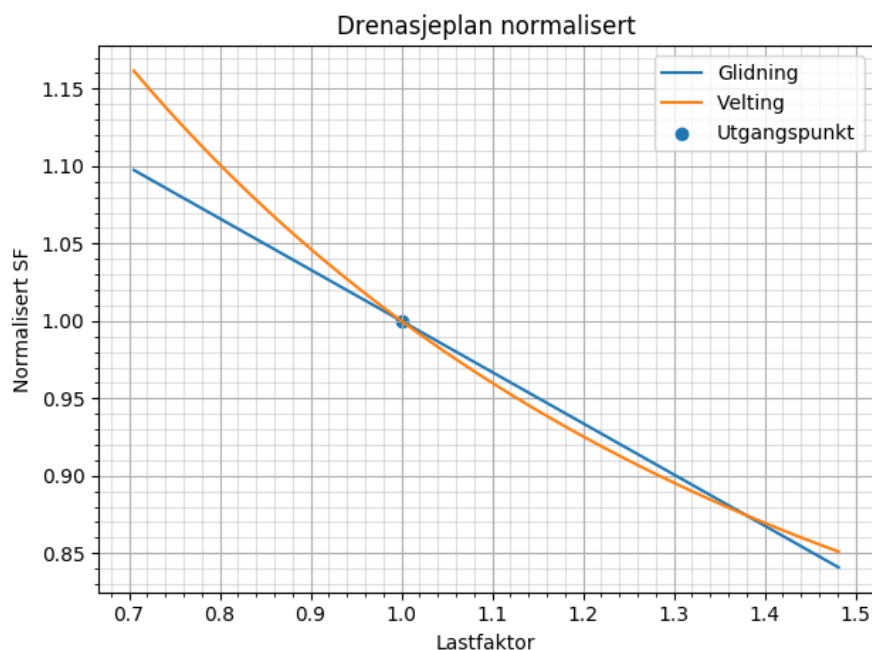
I følge NVEs retningslinje for murdammer er oppstrøms tetningssjikt definert å ha en tykkelse på $1/4 H$, der H = oppstrøms vanntrykk. Eksempelvis vil en dam med statisk vanntrykk på 5 m forutsetts å ha et tetningssjikt på 1,25 m, mens faktisk tetningssjikt ofte vil være mye mindre. Antagelse for poretrykk i murdammer vurderes derfor normalt som konservativ.

Det vil likevel være en liten usikkerhet knyttet til poretrykket, men dette kan være vanskelig å tallfeste i en sikkerhets- eller lastfaktor. For å synliggjøre denne usikkerheten er det antatt at drensplanet (dx) flyttes fra $1/4 H$ til $1/3 H$, noe som tilsvarer en lastfaktor på 1,16. Dette gir en redusert sikkerhetsfaktor på 0,95 mot glidning og 0,94 mot velting, jf. Figur 2-10. Tilhørende faktor for å ta hensyn til en slik usikkerhet er vist i etterfølgende tabell.

Tabell 2-6. Sikkerhetsfaktor i bruddgrense når drens faktoren økes fra $1/4 H_w$ til $1/3 H_w$ (jf. Figur 4-15)

	Lastfaktor	Bruddgrense	Kommentar
Glidning	1,16	1,05	= $1/0,95$ jf. graf
Velting	1,16	1,06	= $1/0,83$ jf. graf

Ettersom poretrykket i utgangspunktet er vurdert som konservativt, er det ikke lagt til ekstra sikkerhet i ulykkesgrense.



- > *Figur 2-10: Endring i sikkerhetsfaktor ved gitt lastfaktor for poretrykk variert ved å endre drenasjeplanet.*

2.4 Platedam

Rapporten omfatter ikke platedammer. Det mangler dermed dokumentasjon av hvordan ulike forutsetninger påvirker den samlede sikkerheten og det bør derfor vurderes om dette skal gjennomføres også for platedammer.

Ved denne typen dammer vil dokumentasjon av geometri og friksjonsvinkel antagelig være faktorer som kan påvirke stabilitetsberegningen. I motsetning til gravitasjonsdammer (i mur og betong) vil det være mulig å kunne dokumentere overgang mellom pilar og fundament, og dermed kunne ha en formening om fortanning og helning av fundamentet. Når det gjelder geometri er dette viktig, ettersom stabilitet er avhengig av stabiliserende effekt fra vanntrykket mot skrå oppstrøms plate. Påvisning av geometrien ved plate og pilarer kan dermed bidra til å redusere usikkerheten i beregningene.

3 GRAVITASJONDAM I BETONG

For gravitasjonsdam i betong er det valgt å gjennomføre to separate beregninger for følgende damtverrsnitt:

- Damhøyde 2-7 m med fjellbolter og istrykk
- Damhøyde 8-30 m uten fjellbolter og istrykk

For damhøyder over 7 m er det ikke tillatt å regne medvirkning fra fjellbolter. Når damhøyden og vanntrykket øker vil også istrykket utgjøre en mindre andel av den samlede belastningen og dette er årsaken til at istrykk ikke er medregnet for damhøyder over 7 m.

3.1 Beregninger

Beregningene er basert på regneverktøy for stabilitetskontroll, som er utarbeidet av Dr. techn. Olav Olsen. For å effektivisere beregningene er det utarbeidet skript som kjører beregningen automatisk. Skriptet definerer endringer av ulike variabler, og utfører deretter beregninger for stabilitet med disse forutsetningene. Variasjon av variabler er vist i Tabell 3-1.

> Tabell 3-1: Forutsetninger for beregningene

Parameter	Verdi for å lage tverrsnitt	Minste verdi	Maks verdi	Steg	Kommentar
Friksjon	40°	35°	60°	1°	
Vannstand	HRV	HRV-1 m	HRV	0.01 m	
Egenvekt: (kN/m ³)	22 kN/m ³	21 kN/m ³	24 kN/m ³	0.1 kN/m ³	
Istrykk 1 100 kN	100 kN	50 kN	200 kN		Bare for damhøyde 2-7 m
Istrykk 2 150 kN	150 kN	50 kN	200 kN		Bare for damhøyde 2-7 m
Bolter (m c/c)	0.83 m	0.25 m	1.50 m	0.01 m	Bare for damhøyde 2-7 m Kapasitet 180 N/mm ² og diameter 25 mm på bolt
Drensfaktor	1.00	0.50	1.0	0.05	Endring i poretrykk er beregnet ved å variere drensfaktor (k) og drenasjeplan (dx). Se også mer detaljert beskrivelse i eget kapittel.
Drenasjeplan	0	0.1H	0.5H	0.1H	

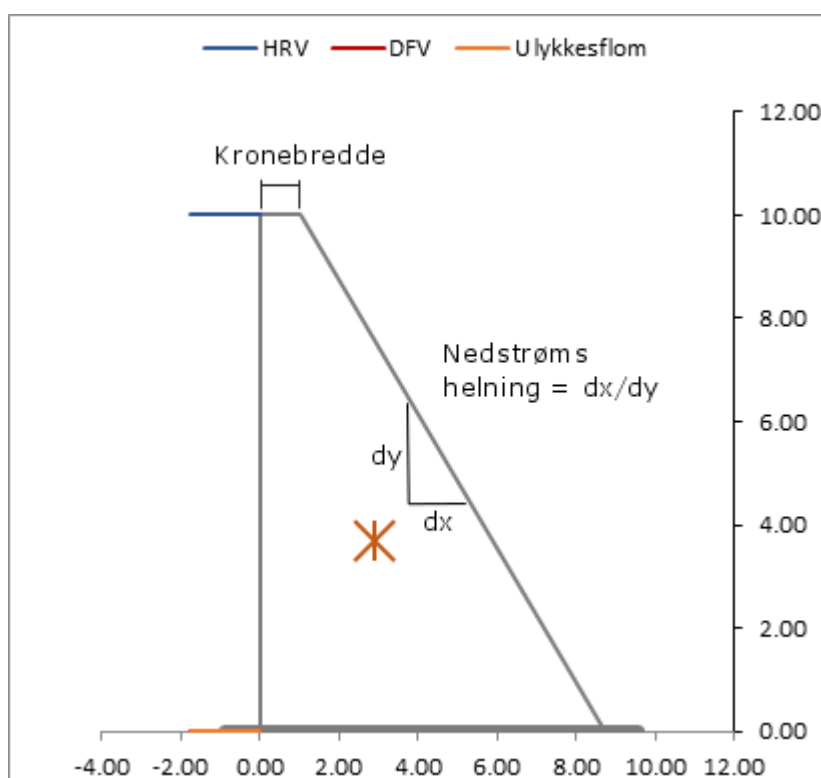
3.2 Valg av tverrsnitt for beregningene

For hver damhøyde og med forutsetningene gitt i Tabell 3-1, blir det generert et tverrsnitt som tilfredsstillte følgende krav

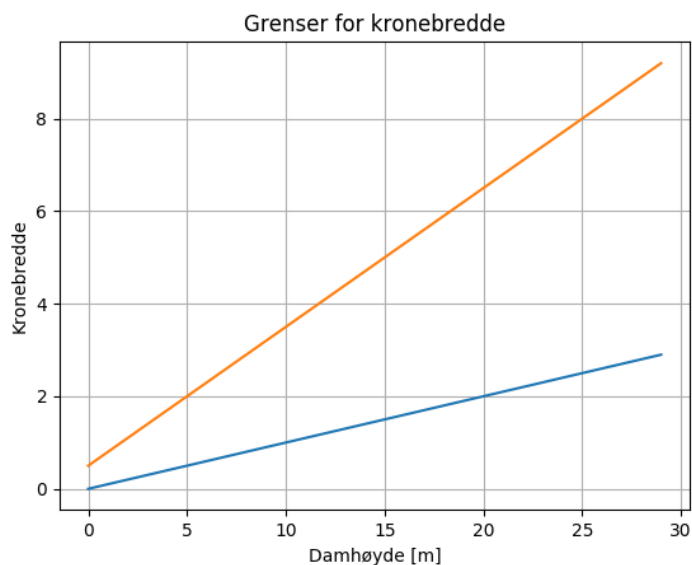
- Trykk i hele fundamentet (dvs. lineært avtagende poretrykk i under hele dammen)
- Sikkerhetsfaktor for glidning lik 1,0. Verdien økes hvis det ikke finnes egnet tverrsnitt.

Ved å variere kronebredde og nedstrøms helning (se Figur 3-1) blir det funnet et optimalt tverrsnitt som benyttes beregninger der parameterne gitt i Tabell 3-1 varieres. Kronebredden ble variert innenfor grensene som er vist i Figur 3-2. Ved generering av tverrsnitt ble nedstrøms helning variert innenfor intervallet [0,50:1 til 0,85:1].

Med nevnte forutsetninger var det ikke mulig å generere et tverrsnitt som tilfredsstilte kravene, ettersom beregnet sikkerhetsfaktoren gjennomgående var høyere enn 1. Nedre grense for sikkerhetsfaktor mot glidning ble derfor øket med skritt på 0,1 fram til kravene var innfridd. For å kunne sammenligne sammenheng mellom last og sikkerhetsfaktor for ulike damhøyder, er sikkerhetsfaktorene normalisert med sikkerhetsfaktoren for initialtverrsnittet. Dette er utgangspunktet for resultatene som blir presentert i denne rapporten. I figurene er dermed sikkerhetsfaktorene lik 1,0 for utgangsparameterne.



> Figur 3-1. Tverrsnitt for gravitasjonsdam. Valgt sikkerhetsfaktor er oppnådd ved å variere kronebredde og nedstrøms helning.



- > Figur 3-2. Område som kronebredden er variert innenfor for ulike damhøyder.
- > Tabell 3-2: Tverrsnittsparemetere og tilhørende sikkerhetsfaktorer for de ulike damhøydene.

Høyde [m]	Kronebredde [m]	Nedstrøms helning [1:x]	SF glidning	SF velting
2	1,100	0,85	1,156	1,744
3	1,030	0,85	1,199	1,576
4	0,959	0,85	1,199	1,509
5	0,957	0,85	1,199	1,499
6	0,998	0,85	1,201	1,509
7	1,049	0,85	1,199	1,518
8	0,808	0,77	1,100	1,501
10	1,010	0,77	1,100	1,501
12	1,211	0,77	1,100	1,501
14	1,414	0,77	1,100	1,501
16	1,614	0,77	1,100	1,501
18	1,816	0,77	1,100	1,501
20	2,018	0,77	1,100	1,501
25	2,521	0,77	1,100	1,501
30	3,025	0,77	1,100	1,501

Ovennevnte tabell viser at optimaliseringa av tverrsnittene, ga en minste sikkerhet på 1,1 mot glidning og 1,5 mot velting, med de forutsetningene som er benyttet. En kontroll av beregningene viser at når friksjonsvinkelen økes fra 40° til 50°, så vil sikkerhetsfaktoren mot velting og glidning være tilnærmet det samme.

3.3 Presentasjon

Resultater fra stabilitetsberegningene for hver parameter presenteres grafisk, der resulterende sikkerhetsfaktor plottes mot varierende parameter for hver damhøyde. Variasjon i sikkerhetsfaktoren er vist for både glidning og velting.

For velting er det valgt å presentere sikkerhetsfaktor i stedet for plassering av resultatanten (som er stabilitetskriteriet ifølge regelverket). Dette er gjort for å få et enklere grunnlag for å sammenligne sikkerheten.

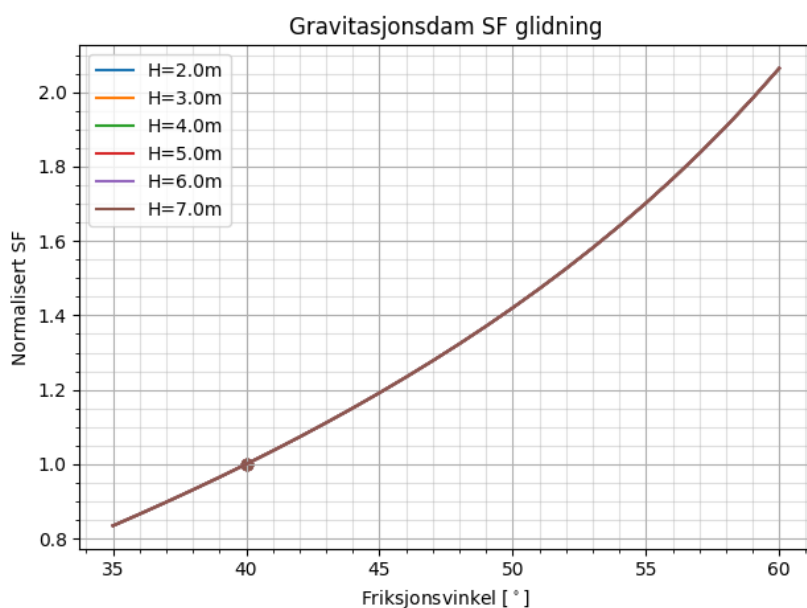
For dammene som ikke er regnet med fjellbolter eller istrykk, viser beregningene at effekten av variasjon i friksjonsvinkel, vanntrykk, egenvekt eller poretrykk er den samme når damhøyden varieres. Ved å ta utgangspunkt i resultatene for en dam med høyde 30 m, kan sammenhengen mellom endring i sikkerhetsfaktor og last- og materialfaktor anslås. De følgende sammenhengene vil derfor kun være gyldige for dammer der det ikke regnes med bolter eller istrykk.

3.4 Friksjon

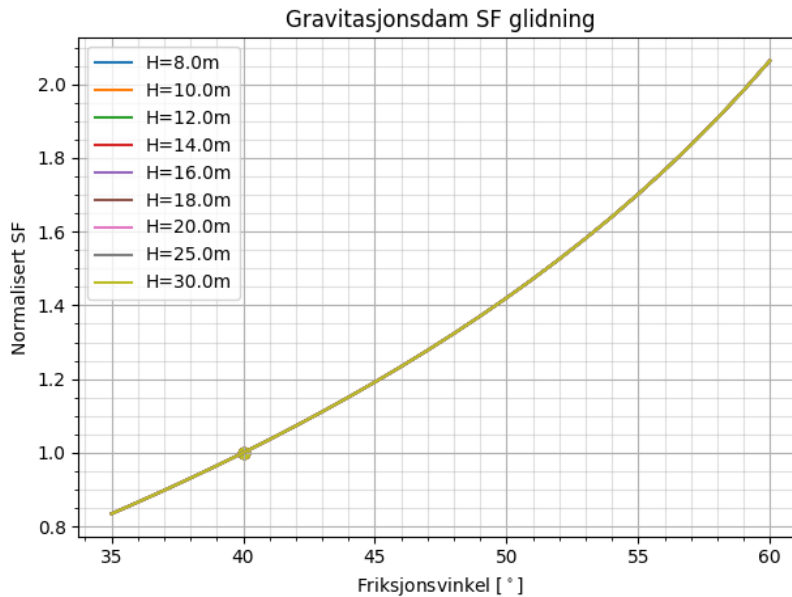
Av Figur 3-3 og Figur 3-4 fremgår at sikkerhetsfaktoren for glidning øker med økende friksjonsvinkel, mens sikkerhetsfaktoren for velting er upåvirket av endringer i friksjonsvinkel. Videre, er sammenheng mellom sikkerhetsfaktor og friksjonsvinkel den samme uavhengig av damhøyde (dvs. grafene for ulike damhøyder er overlappende).

Variasjon i friksjonsvinkel gir for øvrig også en indikasjon på hvordan fundamentbelasting kan påvirke sikkerheten.

3.4.1 Sikkerhet mot glidning



> Figur 3-3. Glidning; SF mot friksjonsvinkel. Damhøyde 2 til 7 m med fjellbolter.



> *Figur 3-4. Glidning; SF mot friksjonsvinkel. Damhøyde 8 til 30 m uten fjellbolter.*

For glidning, har valg av friksjonsvinkel stor betydning for resulterende sikkerhet. Ovennevnte figurer viser at når karakteristisk friksjonsvinkel på 40°, gir dette følgende sammenheng mellom sikkerhetsfaktor (SF) og friksjonsvinkel (α) for beregnet snitt.

Materialfaktor er her definert som:

$$\gamma_m = \frac{\tan \alpha_d}{\tan \alpha_k}$$

Der

- α_k = Karakteristisk friksjonsvinkel. Antatt friksjonsvinkel benyttet for å beregning av glistabilitet. Friksjonsvinkel hentet fra anbefalinger i NVEs retningslinje for betongdammer.
- α_d = «Dimensjonerende» friksjonsvinkel. Redusert friksjonsvinkel. Friksjonsvinkel representerer en konservativ verdi og benyttes for å definere en materialfaktor.

I beregningene er kapasitet mot glidning utelukkende avheng av friksjon. Sikkerhetsfaktoren er da gitt ved:

$$SF \leq \frac{\sum F_v \tan \alpha_k}{\sum F_h}$$

Når materialfaktor inkluderes kan kriterie for sikkerhet uttrykkes som:

$$1 \leq \gamma_m \frac{\sum F_v \tan \alpha_k}{\sum F_h}$$

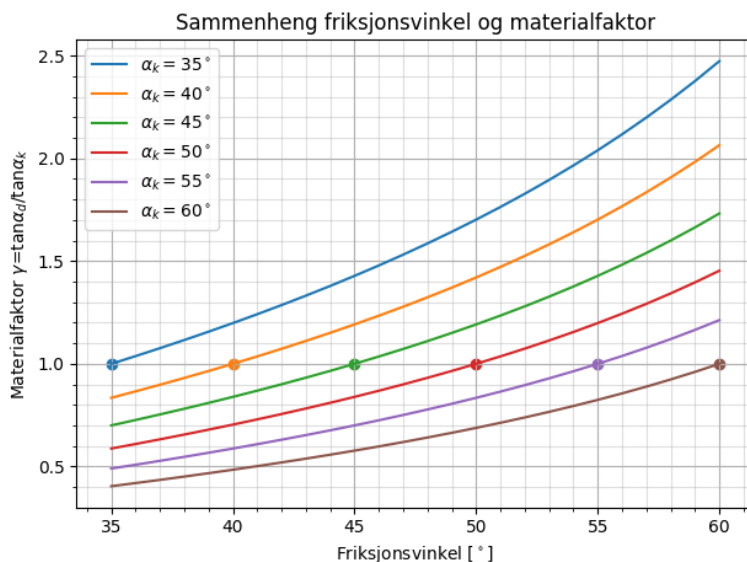
Sammenhengen mellom sikkerhetsfaktor og materialfaktor for glidning er da gitt ved:

$$1 = \gamma_m SF \Rightarrow SF = \frac{1}{\gamma_m}$$

- > Tabell 3-3: Sikkerhetsfaktor/materialfaktor for glidning ved varierende friksjonsvinkler.

Friksjonsvinkel (α_k)	Materialfaktor γ_m ($\alpha_d = 40^\circ$)	Sikkerhetsfaktor glidning (SF)
40°	1.00	1.00
45°	0.83	1.20
50°	0.70	1.42
55°	0.59	1.70

Sammenhengen mellom friksjonsvinkel og materialfaktor er for øvrig vist i grafen nedenfor. Grafene har nesten samme krumning og viser at endring i friksjonsvinkelen har tilnærmet samme effekt på materialfaktoren uavhengig av utgangspunktet. Eksempelvis, vil en forskjell mellom karakteristisk friksjonsvinkel og dimensjonerende friksjonsvinkel på 5° medfører en material faktor på 0,83 (som tilsvarer en sikkerhetsfaktor på ca. 1,20) uavhengig av opprinnelig verdi for karakteristisk friksjonsvinkel.



- > Figur 3-5: Sammenheng mellom friksjonsvinkel og materialfaktor med ulike karakteristiske friksjonsvinkler, α_k .

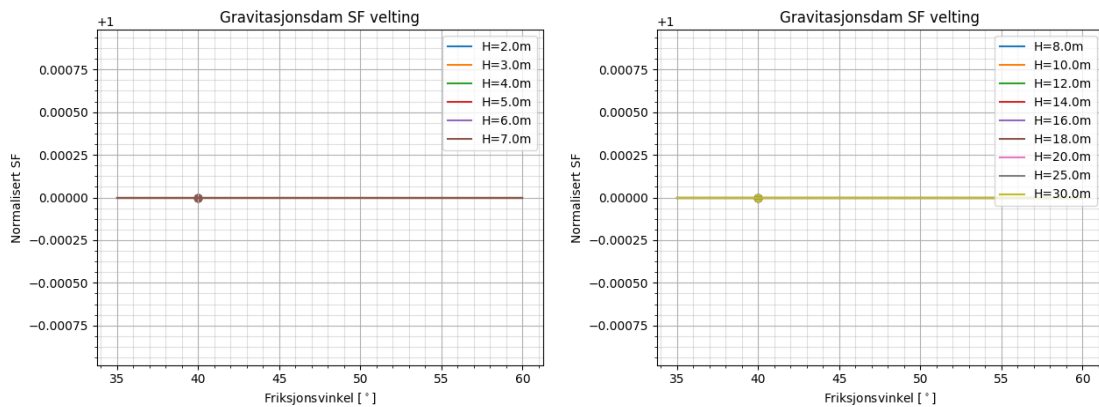
Grafen viser at endring i friksjonsvinkelen gir samme utslag på materialfaktoren, uavhengig av opprinnelig friksjonsvinkel.

Materialfaktorer > 1 er ikke relevant. Beregning av sikkerhetsfaktor medfører imidlertid at materialfaktorer > 1 samsvarer med sikkerhetsfaktoren. Med andre ord, hvis faktisk friksjonsvinkel er 50°, men det benyttes en friksjonsvinkel lik 45°, så tilsvarer dette en sikkerhetsfaktor på 1,2.

Friksjonsvinkelen i retningslinjen for betongdammer er antagelig konservative der friksjonsvinkel også omfatter fortanning mot fjell, samt bidraget fra kohesjon når ikke dette er tatt hensyn til i beregningene. Beregningen gjennomført her viser dermed at konservative friksjonsvinkler vil resultere i en høy sikkerhet mot glidning.

3.4.2 Sikkerhet mot velting

Gjennomførte beregninger viser at friksjonsvinkelen har ingen betydning for sikkerheten mot velting. Dette er en selvfølge ettersom friksjonsvinkelen ikke inngår som en parameter ved beregning av moment/velting.

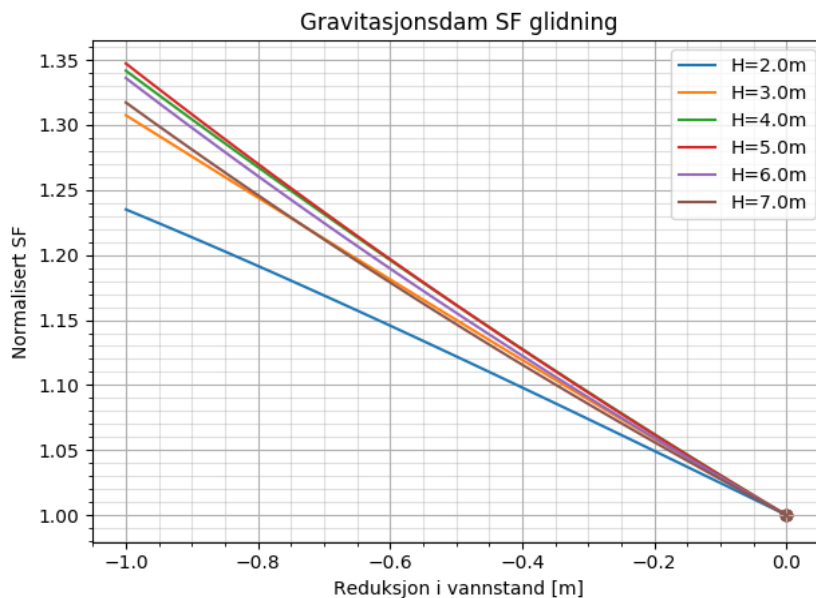


> *Figur 3-6: Velting; SF mot friksjonsvinkel. Damhøyde 2-7 m (til venstre) og 8-30 m (til høyre). Varierende friksjonsvinkelen har ingen betydning for velting.*

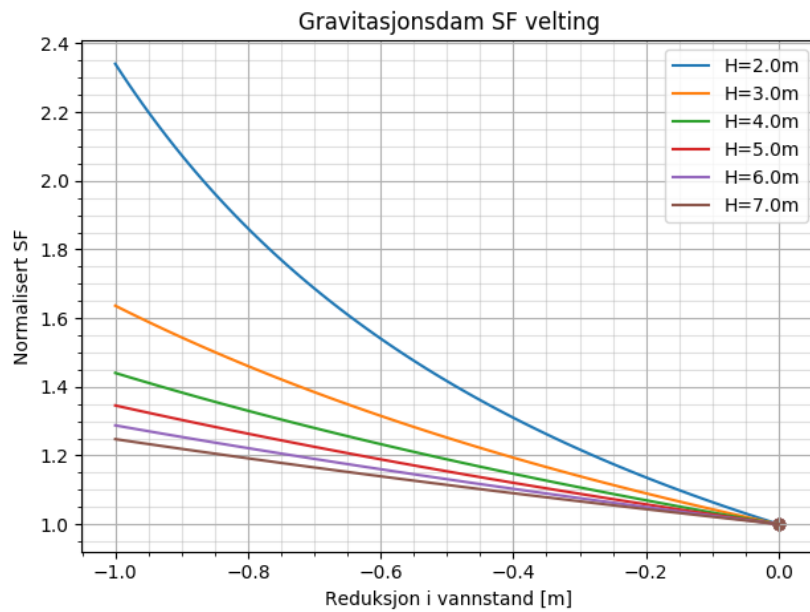
3.5 Vannstand

Hvordan stabiliteten påvirkes som følge av endringer i vannstanden sier noe om hvor følsom dammen er i forhold til endringer i flomvannstanden. Høye dammer vil nødvendigvis være mindre følsomme for endringer i vannstanden enn lavere dammer. Hvor mye dette påvirker sikkerheten for ulike damhøyder er beregnet og presentert grafisk i etterfølgende figurer.

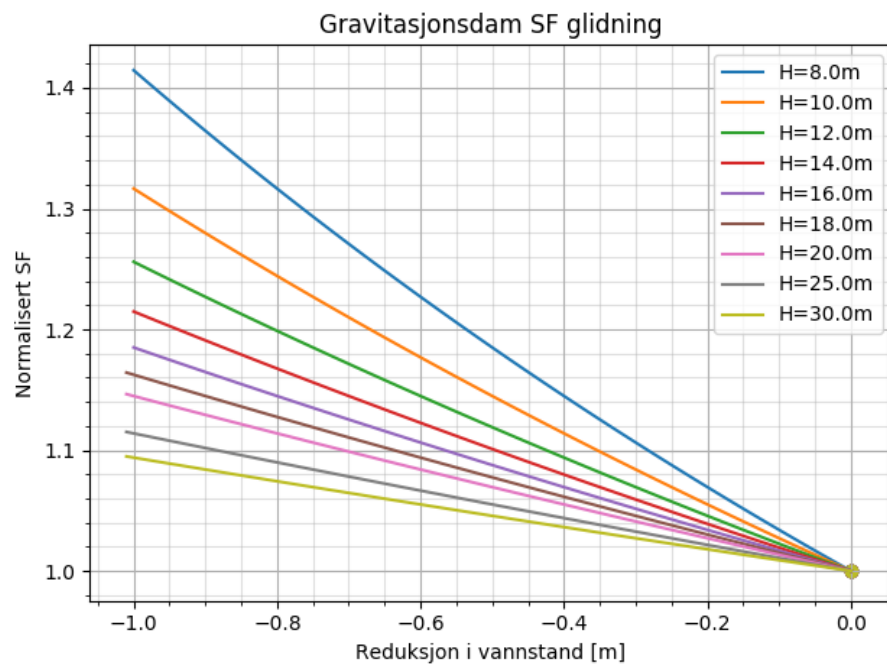
Som utgangspunkt for beregningene, er det benyttet et tverrsnitt med sikkerhet mot glidning lik 1,0 for en gitt vannstand. For ordens skyld, er denne vannstanden angitt som høyeste regulerte vannstand (HRV). Deretter er vannstanden redusert i steg på 0,01 m og tilhørende sikkerhetsfaktor er beregnet som følge av redusert vanntrykk mot dammen.



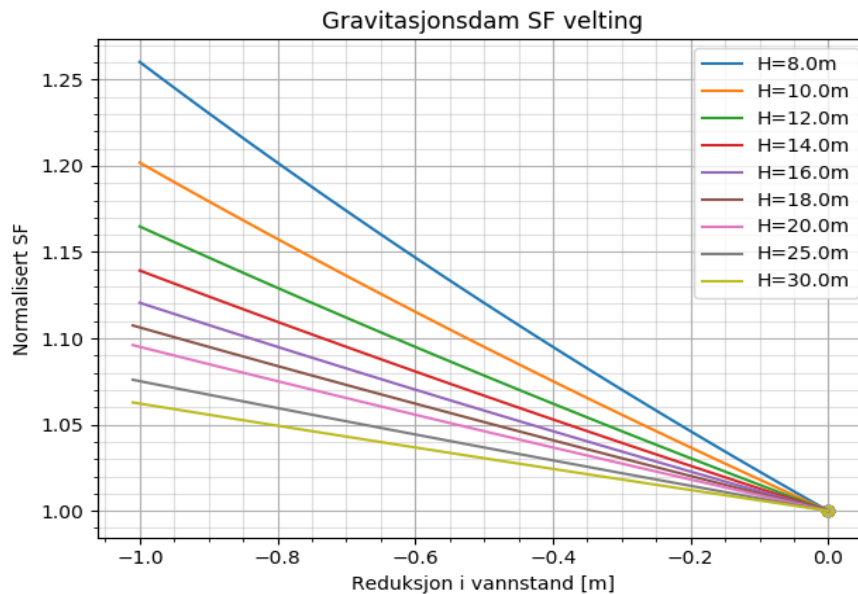
Figur 3-7: Glidning; SF mot vannstand. Damhøyder 2 til 7 m inkl. fjellbolter.



Figur 3-8: Velting; SF mot vannstand. Damhøyder 2 til 7 m inkl. fjellbolter.



> Figur 3-9: Glidning; SF mot vannstand. Damhøyder 8 til 30 m uten fjellbolter.



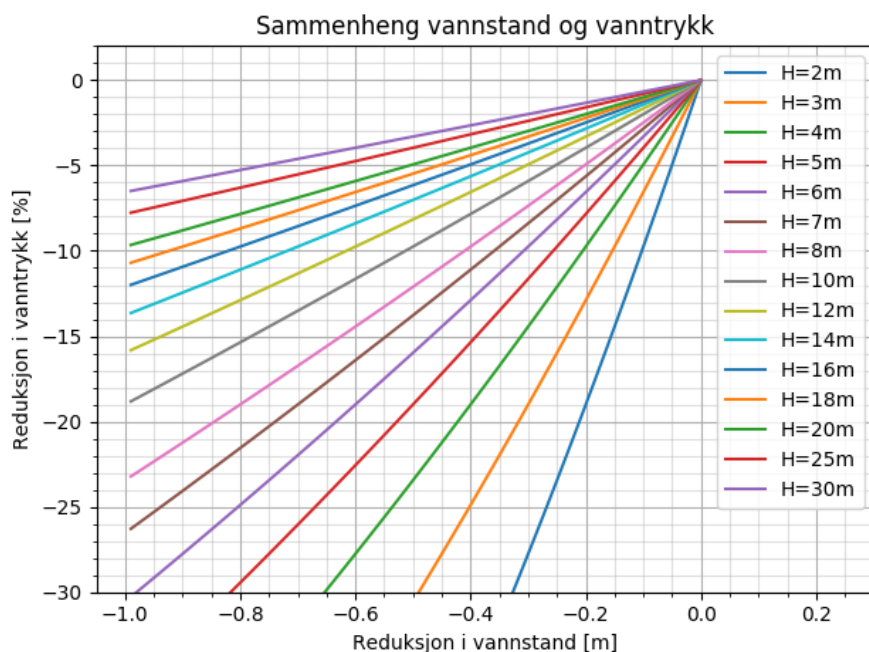
> *Figur 3-10. Velting; SF mot vannstand. Damhøyder 8 til 30 m uten fjellbolter.*

Beregningene presentert i ovennevnte grafer viser at endring i sikkerhetsfaktoren ikke er lineær i forhold til endring i vannstanden. Når fjellbolter medregnes, viser beregningen at forholdet mellom vannstand og tilhørende sikkerhetsfaktor ikke nødvendigvis er forutsigbar.

Ved en redusert vannstand på 0.5 m øker sikkerheten fra 1 til ca. 1.15 for damhøyde på 2 m mens den øker til ca. 1.20 for damhøyde på 5 m. Sikkerheten vs. vannstand øker mest for en dam på 5 m. Når dammen blir høyere enn 5 m vil etterhvert boltene ha mindre betydning og dermed vil relativ økning av sikkerheten bli mindre når damhøyden øker. Beregningen viser dermed at når bolter benyttes er de lavere dammene minst sensitive for endringer i vannstanden.

For dammer der fjellbolter ikke er medregnet, er imidlertid sammenhengen mellom vannstand og sikkerhetsfaktor mer forutsigbar, jf. etterfølgende grafer. Ved en redusert vannstand på 0.5 m øker sikkerheten til kun ca. 1.05 for damhøyde på 30 m mens den øker til ca. 1.18 for damhøyde på 8 m.

Resultatene viser i prinsippet at høye dammer er mindre sensitive for vannstandsvariasjoner enn lavere dammer. Dette er godt illustrert i Figur 3-11. En endring i vannstanden på 0.2 m gir en endring i vanntrykket på 19 % for en 2 m høy dam, mens for en 30 m høy dam er endringen på ca. 1 %.



- *Figur 3-11: Sammenheng mellom endring i vannstand og tilhørende vanntrykk for ulike damhøyder. Figuren illustrerer at lave dammer er vesentlig mer følsomme for variasjon i vannstand enn høyere dammer.*

Damhøyde og tilhørende vanntrykk påvirker selvfølgelig sikkerheten, og er illustrert i etterfølgende tabell.

- *Tabell 3-4. Sikkerhetsfaktor i forhold til endring av vannstand for ulike damhøyder (ref. Figur 3-9 og Figur 3-10).*

Endring i vannstand (dh)	Glidning Sikkerhetsfaktor		Velting Sikkerhetsfaktor	
	Damhøyde 8 m	Damhøyde 30 m	Damhøyde 8 m	Damhøyde 30 m
0,2 m	1,07	1,02	1,05	1,01
0,5 m	1,18	1,04	1,12	1,03
1,0 m	1,41	1,09	1,26	1,06

Tabellen viser at endringer i vannstanden har større betydning for sikkerheten mot glidning enn mot velting.

Damhøyde (dvs. statisk vanntrykk) er avgjørende for hvordan usikkerheter i flomberegningen og flomvannstander påvirker stabiliteten, og når damhøyden øker har endringer i flomvannstanden liten betydning for stabiliteten ved dammen. Det vil derfor være riktig at eventuelle usikkerheter i flomberegningen inkluderes i selve beregningen og ikke reflekteres i den generelle sikkerhetsfaktoren.

Usikkerhet i forhold stabilitet ved flom, vil avhenge av følgende:

- Statisk vanntrykk (damhøyde)
- Hvordan flomløpet og tilhørende flomvannstand responderer på endringer i avløpsflommen.

Når damhøyden øker, har usikkerhet i flomberegningene mindre betydning. For kontroll av stabilitet kan dermed en grov og konservativ vurdering av flomvannstanden være tilstrekkelig.

3.6 Egenvekt

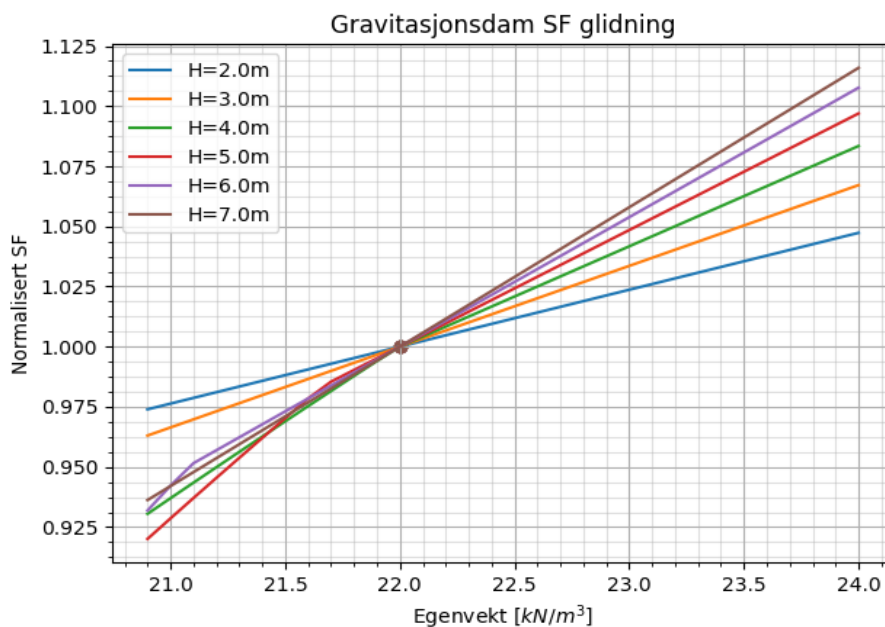
Egenvekten er naturlig nok vesentlig for stabilitet av en gravitasjonsdam.

Eurokoden benytter en lastfaktor på 0,9 for egenvekt som gir et stabiliserende bidrag, for å ta hensyn til usikkerhet i geometri og egenvekt. Hvis egenvekten reduseres fra 24 til 23 kN/m³ ved en gravitasjonsdam, utgjør dette en lastfaktor på 0,96. Dette samsvarer med en variasjonskoeffisient på 0,04 som anbefalt av JCSS, "Probabilistic model code," Joint Committee on Structural Safety, 2015, tabell 2.1.1. Dette tilsvarer i omtrent et standardavvik, (dvs. at det er ca. 84 % sannsynlighet for at verdien er høyere enn 23 kN/m³).

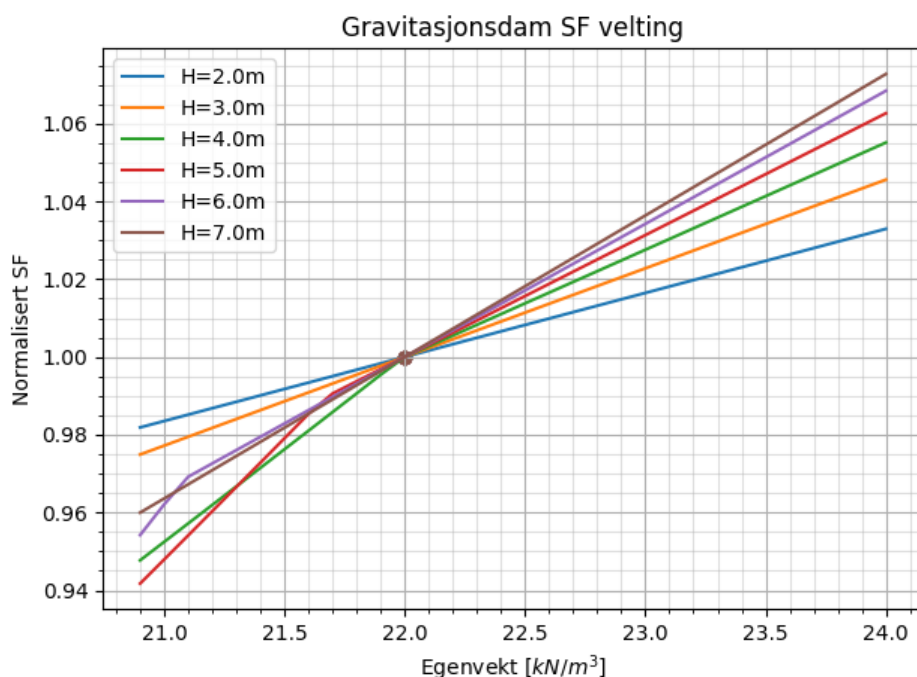
I det etterfølgende er det vist hvordan sikkerhetsfaktoren varierer med endret egenvekt for ulike damhøyder. Beregningene gir sammenheng mellom egenvekt, lastfaktor og tilhørende sikkerhetsfaktor for glidning og velting.

Påvisning av geometri vil selvfølgelig også redusere usikkerheten i beregningene, men hvordan dette påvirker sikkerheten er ikke undersøkt i denne rapporten.

3.6.1 Damhøyde 2-7 m (med fjellbolter)



> Figur 3-12: Glidning; SF mot egenvekt. Damhøyder 2 til 7 m inkl. fjellbolter.



> *Figur 3-13: Velting; SF mot egenvekt. Damhøyder 2 til 7 m inkl. fjellbolter.*

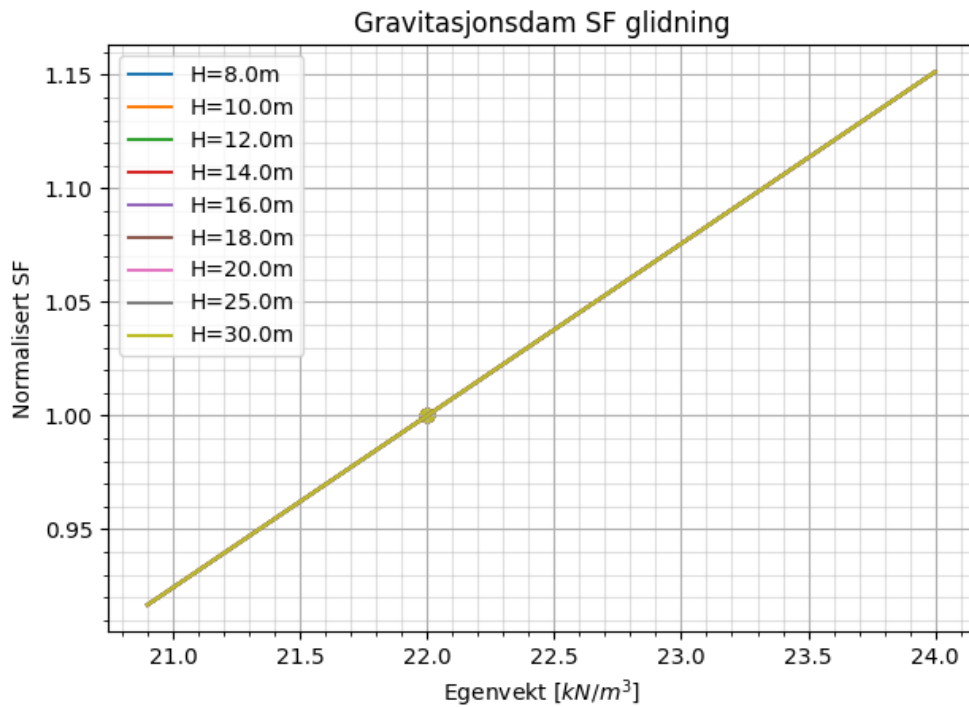
Når bolter medregnes for damhøyder 2-7 m, er sammenhengen mellom egenvekt og sikkerhetsfaktor tilnærmet lineære, men har ulike stigningstall for varierende damhøyde. Desto høyere dam, desto høyere stigningstall.

For høydene 4, 5, 6 og 7 meter viser grafene en knekk i området for egenvekt under 22 kN/m^3 . Disse knekkpunktene kan forklares med at det oppstår «strekk» i damfundamentet, og dermed økt poretrykk.

Boltkraften er lik for alle damhøydene, men siden egenvekt og vanntrykket er betydelig mindre for lavere dammer, vil boltene stå for en større del av det totale lastbildet. Endring i egenvekten vil dermed ha mindre stabiliserende effekt for lave dammer enn for høye dammer med fjellbolter.

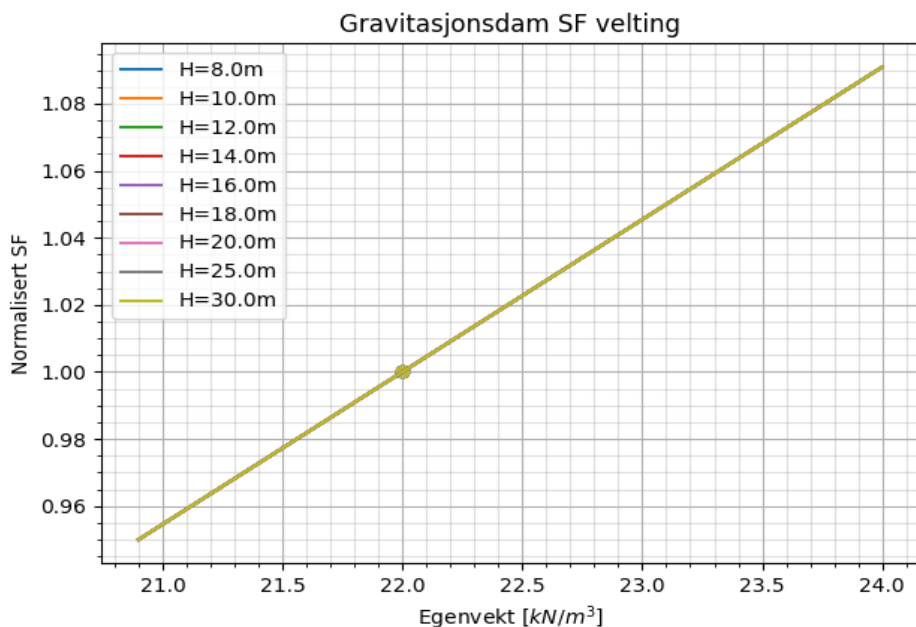
3.6.2 Damhøyde 8 – 30 m (uten fjellbolter)

For dammer som er høyere enn 8 meter er det ikke regnet med bolter. Grafene for alle damhøyder er helt overlappende og er lineære i hele intervallet. Når en ikke regner med bolter, vil sikkerhetsfaktoren for både glidning og velting øke lineært med økt egenvekt.



> *Figur 3-14: Glidning; SF mot egenvekt. Damhøyder 8 til 30 m uten fjellbolter.*

For beregning av sikkerhet mot glidning er det benyttet en friksjonsvinkel lik 40° . Hvis det benyttes en høyere friksjonsvinkel, vil bidraget fra egenvekten være noe større slik at differansen mellom sikkerhetsfaktor og lastfaktor vil være noe mindre.



> *Figur 3-15: Velting; SF mot egenvekt. Damhøyder 8 til 30 m uten fjellbolter.*

For velting er sikkerhetsfaktoren og lastfaktoren det samme (dvs. at stigningstallet i ovennevnte graf er på 1).

Når egenvekten reduseres fra 24 til 23 kN/m³ utgjør dette en lastfaktor på 0,96. Tilhørende variasjon i sikkerhet er vist i etterfølgende tabell.

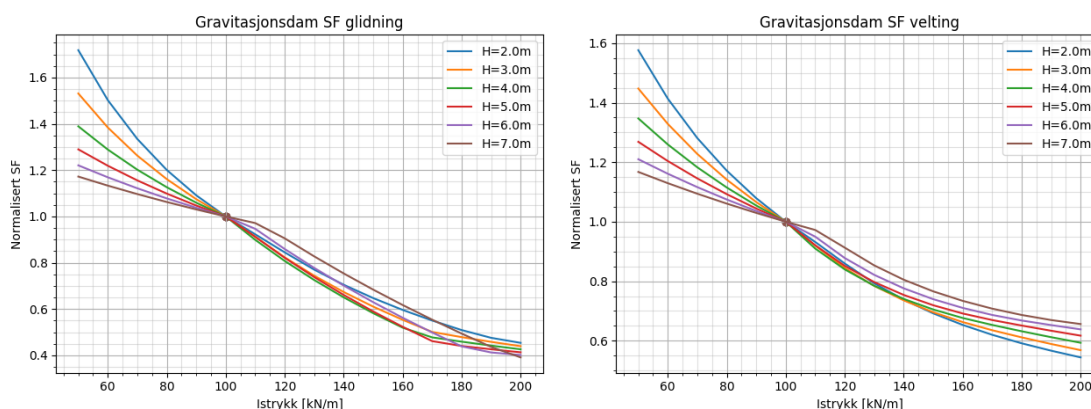
- > *Tabell 3-5: Sammenheng mellom lastfaktor og sikkerhetsfaktor når egenvekten reduseres fra 24 til 23 kN/m³.*

	Lastfaktor	Sikkerhetsfaktor
Glidning	0,96	1,08
Velting	0,96	1,05

3.7 Istrykk, damhøyde 2-7 m

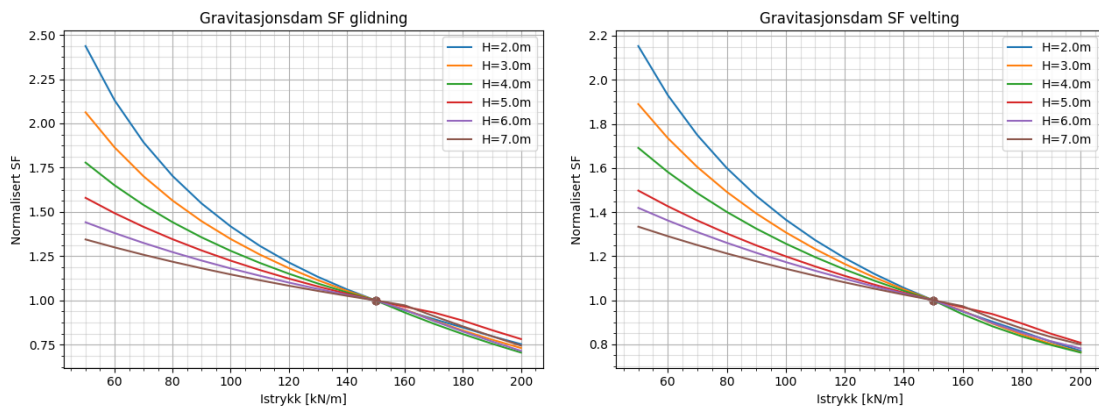
Figur 3-16 viser sikkerhetsfaktoren når istrykket varieres. Som forventet har variasjon av istrykket et større utslag på sikkerhetsfaktoren for lavere dammer enn høyere dammer, der istrykket blir mindre dominerende sammenlignet med øvrige laster (dvs. egenvekt, vanntrykk og poretrykk).

Når istrykket økes, er sammenhengen mindre klar. Grafene for alle damhøyder viser knekkpunkter for istrykk i området 100-110 kN/m. Knekkpunktene kan forklares med at det oppstår «strekk» i damfundamentet, noe som medføre økt poretrykk. Med de gitte beregningsforutsetningene gir økt istrykk en ustabil dam slik at korrelasjonen med minket sikkerhetsfaktor er uklar.



- > *Figur 3-16: Variasjon i sikkerhetsfaktor for glidning og velting med varierende istrykk, der 100 kN/m istrykk er benyttet for å optimalisere tverrsnittet.*

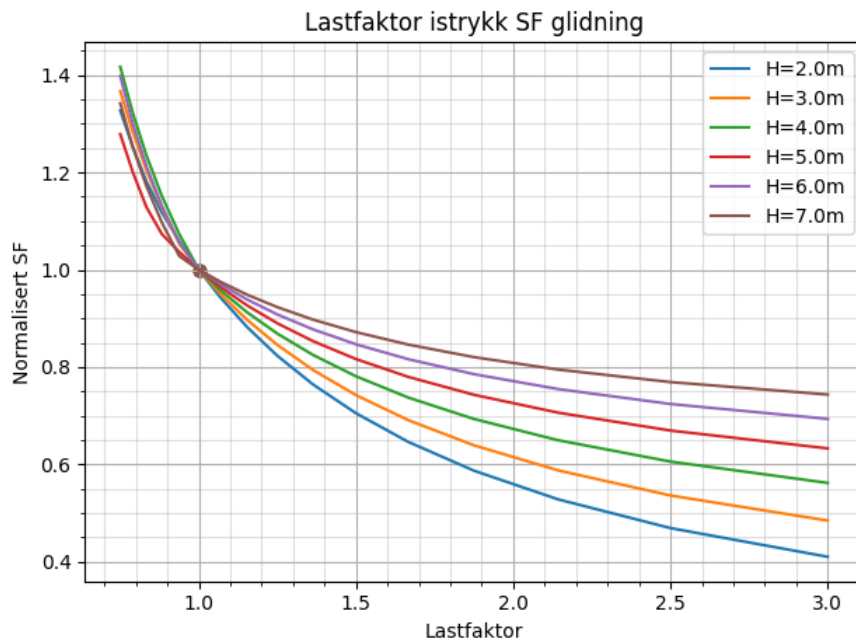
Figur 3-17 viser variasjon i sikkerhetsfaktor når utgangspunktet er et istrykk på 150 kN/m. For å oppnå stabilitet med samme damtverrsnitt, er mengden fjellbolter økt sammenlignet med når istrykket var satt lik 100 kN.



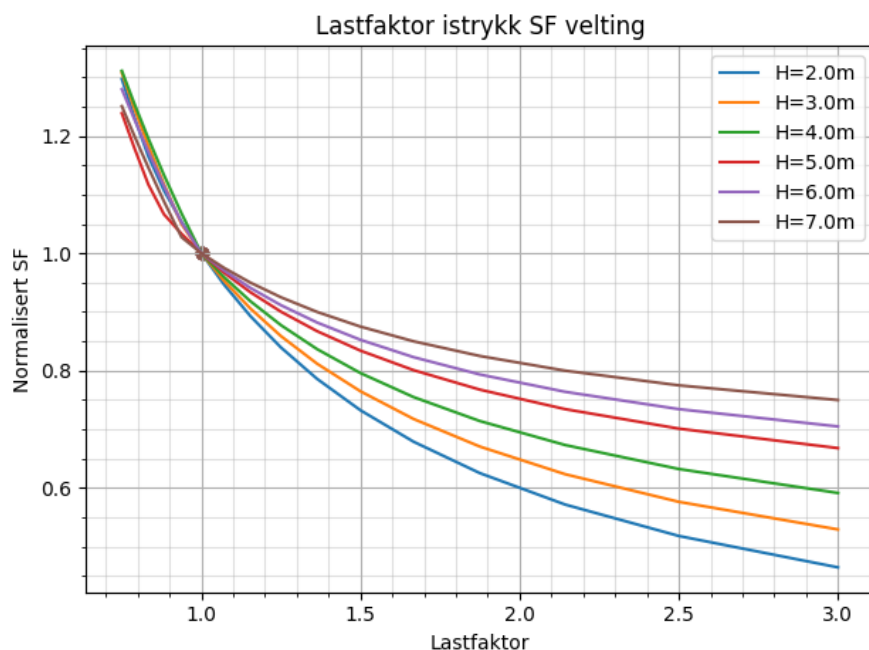
- > *Figur 3-17: Variasjon i sikkerhetsfaktor for glidning og velting med varierende istrykk, der 150 kN/m istrykk er benyttet for å optimalisere tverrsnittet. Senteravstand for bolter er endret til 0.5 m. Andre utgangsparametere er gitt av Tabell 3-1.*

Lastfaktoren for istrykk er definert som $\gamma = p/p_0$ der p er dimensjonerende istrykk, og p_0 er den karakteristiske verdien av istrykket. Ved en karakteristisk verdi på 50 kN/m blir lastfaktoren 3,0 for dimensjonerende verdi lik 150 kN/m.

Når dimensjonerende istrykk settes lik 150 kN/m er sammenhengen mellom lastfaktor og endring i sikkerhetsfaktor for glidning vist i Figur 3-18, mens velting er vist i Figur 3-19.



- > *Figur 3-18: Variasjon av sikkerhetsfaktor for glidning ved ulike lastfaktor for istrykk. Grafen er basert på data fra Figur 3-17 med utgangspunkt i lastfaktor 1,0 for 150 kN/m istrykk.*



- > *Figur 3-19: Variasjon av sikkerhetsfaktor for velting ved ulike lastfaktorer for istrykk. Grafen er basert på data fra Figur 3-17 med utgangspunkt i lastfaktor 1,0 for 150 kN/m istrykk.*

Ikke uventet, gir lastfaktorer over 1,0 et større utslag på sikkerhetsfaktoren når damhøyden reduseres, som vist i foregående grafer. Med lastfaktor på 3,0 og damhøyde på 2 og 7 m er tilsvarende reduksjon i sikkerhetsfaktorene vist i etterfølgende tabell.

- > *Tabell 3-6: Sammenheng mellom lastfaktor og sikkerhetsfaktor, når dimensjonerende islast er 150 kN/m og karakteristisk last er 100 kN/m.*

Damhøyde	Islast Lastfaktor	Redusert sikkerhet		Tilhørende sikkerhetsfaktor		Kommentar
		Glidning	Velting	Glidning	Velting	
2 m	1,5	0,70	0,73	1,43	1,37	Sikkerhetsfaktor = 1/sikkerhet
7 m	1,5	0,88	0,87	1,14	1,15	

Grafene og tabellen over viser at istrykk utgjør en betydelig større usikkerhet i lastbildet for lave dammer enn for høye dammer. En generell sikkerhetsfaktor tar ikke hensyn til dette forholdet. Bruk av sikkerhetsfaktor medfører i prinsippet at det er større usikkerhet knyttet til stabilitetsberegninger av istrykk for en lav dam enn for en høy dam. Bruk av lastfaktor vil ivareta usikkerheter ved islasten på en bedre måte.

For å sikre at usikkerhet i istrykk omfattes av beregningene, kan istrykket baseres på en konservativ verdi. Med andre ord, bør usikkerhet i istrykket ikke reflekteres i sikkerhetsfaktoren, men i selve lasten for å kunne oppnå en homogen sikkerhet for ulike damhøyder.

3.8 Fjellbolter, damhøyde 0-7 m

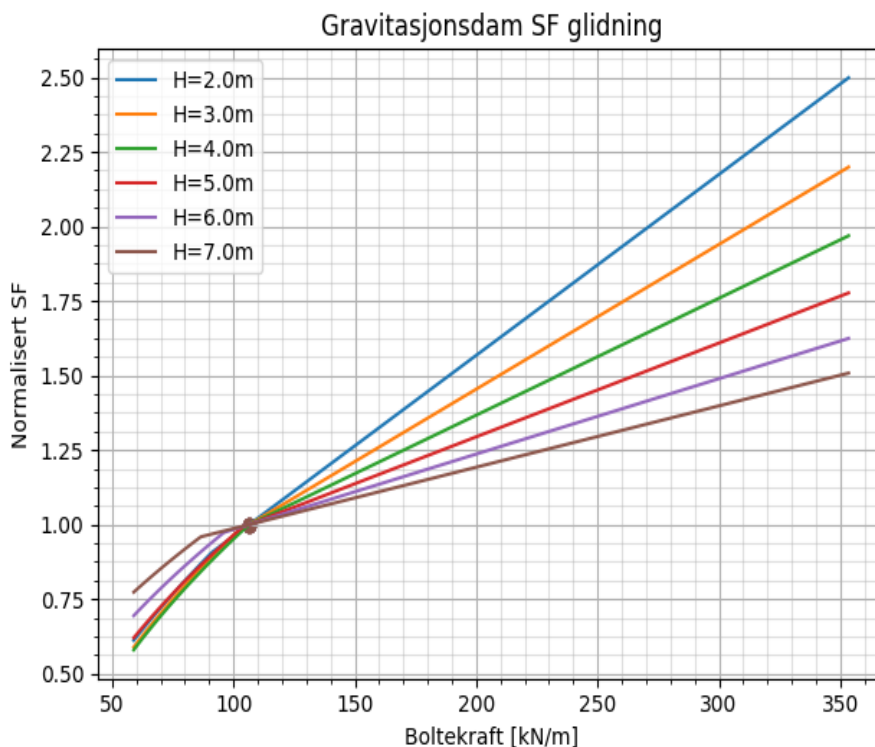
Alle damtverrsnitt benyttet for beregningene har samme omfang med fjellbolter. Dimensjonerende spenning er satt til $\sigma_d = 180 \text{ N/mm}^2$, bolt diameteren er satt til $D = 25 \text{ mm}$ og senteravstanden er satt til $c = 0.83 \text{ m}$.

Forankringskraften F_B er beregningsmessig variert med å endre senteravstanden, men når det gjelder materialfaktor, er det spenningsnivået som er interessant. Boltkraften i utgangskonfigurasjonen er gitt ved:

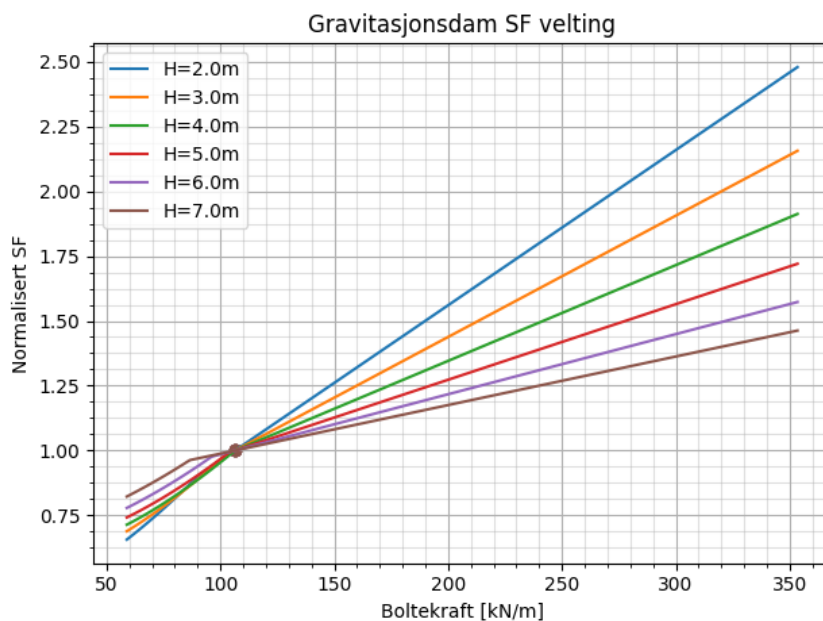
$$F_{Bd} = \sigma_d \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{1}{c} = 106.5 \text{ kN/m}$$

Sammenhengen mellom boltkraft og sikkerhetsfaktor er vist i Figur 3-20 for glidning og velting.

For økende boltkraft øker kapasiteten til dammen, og grafene viser at sikkerhetsfaktoren øker lineært både for glidning og velting. Det er sterkest økning i sikkerhetsfaktor for damhøyde 2 m, og synkende stigningstall ved økende damhøyde. Denne forskjellen for ulike damhøyder henger sammen med at de drivende lastene er større for høyere dammer mens boltkraften er lik for alle damhøydene i disse beregningene. Dermed utgjør boltkraften en ulik andel av kapasiteten slik at en lik endring av boltkraften får ulikt utslag på sikkerhetsfaktoren.



- > *Figur 3-20: Sikkerhetsfaktor for glidning med varierende boltkraft. Sikkerhetsfaktor lik 1 tilsvarer Ø25 bolter c/c 0,83 m med boltspenning på 180 N/mm² (=106.5 kN pr. løpemeter dam)*



- > *Figur 3-21: Sikkerhetsfaktor for velting med varierende boltekraft. Sikkerhetsfaktor lik 1 tilsvarer Ø25 bolter c/c 0,83 m med boltespenning på 180 N/mm² (=106.5 kN pr. løpemeter dam)*

Ved eksisterende dammer kan det ofte forutsettes en karakteristisk spenning på 400 N/mm², som gir en materialfaktor på 0,45 (=180/400). Dette tilsvarer en boltekraft lik 237 kN pr. løpemeter i ovennevnte grafer. For damhøyder på 2 m og 7 m blir da tilhørende sikkerhetsfaktor som vist i etterfølgende tabell.

- > *Tabell 3-7: Sammenheng mellom lastfaktor og sikkerhetsfaktor, når dimensjonerende islast er 150 kN/m.*

Damhøyde (m)	Boltekraft (kN)		Lastfaktor	Sikkerhetsfaktor	
	Dimensjonerende (180 N/mm ²)	Karakteristisk (f _v =400 N/mm ²)		Glidning	Velting
7	106	237	0,45	1,27	1,25
2	106	237	0,45	1,80	1,80

Som forventet, bidrar fjellboltene til en større sikkerhet for lave dammer enn for høye dammer, ettersom boltekraften utgjør en betydelig større andel av de samlede lastene.

En generell sikkerhetsfaktor tar ikke hensyn til dette forholdet. Bruk av sikkerhetsfaktor medfører at usikkerhet knyttet til innfesting av bolter er større for en lav dam enn for en høy dam. Bruk av materialfaktor vil derimot kunne ivareta usikkerheten i boltekraften på en bedre måte.

3.8.1 Usikkerhet knyttet til effekt av fjellbolter

Usikkerhet ved boltekraften er først og fremst knyttet til korrosjon av bolten samt eventuelt feil ved utførelse og innfesting av bolten. Feil utførelse er vanskelig å påvise med mindre enkeltbolter avdekkes og prøvetrekkes. Korrosjon ved fjellbolter kan være forårsaket av

dårlig rensk og kan være knyttet til enkeltbolter som kan være vanskelig å påvise på et generelt grunnlag. Korrosjon vil imidlertid normalt ikke være noe problem så lenge det ikke påvises karbonatisering i dammen. Eventuell korrosjon vil uansett være synlig som rustsprengning og eventuell misfarging av betongen for bolter som er godt innstøpt.

Ved bruk av fjellbolter forutsetter NVEs retningslinje for betongdammer at det benyttes en boltespenning tilsvarende 180 N/mm². Med dagens kapasitet ved fjellbolter medfører dette en sikkerhet på 2,8 (= 500 / 180 = faktisk kapasitet/utnyttet kapasitet). I tillegg gjennomføres en kontroll av stabilitet for vannstanden ved DFV uten at fjellbolter medregnes.

Når dimensjonerende boltespenning er satt så lavt som 180 N/mm² kan dette forklares ut fra at det ikke skal oppstå riss mot fundamentet som medfører økt poretrykk. I en tenkt situasjon der det oppstår riss mot fundamentet, vil likevel kontroll av lastsituasjonen «DFV UTEN bolter» sikre at et minimumsnivå for sikkerhet ivaretas, hvis det er mangler ved boltene.

Samlet sett, vurderes krav til bolter å være konservative. For eksisterende dammer kan det være usikkerhet knyttet til tilstand og innfesting av eksisterende bolter. Denne usikkerheten ivaretas ved at det også gjennomføres en kontroll av stabilitet uten medvirkning fra bolter.

Eventuell dokumentasjon av eksisterende bolter kan bidra til å redusere usikkerheten. Det vil imidlertid være vanskelig å forsvare at en slik dokumentasjon kan rettferdiggjøre en lavere sikkerhetsfaktor enn for nye dammer.

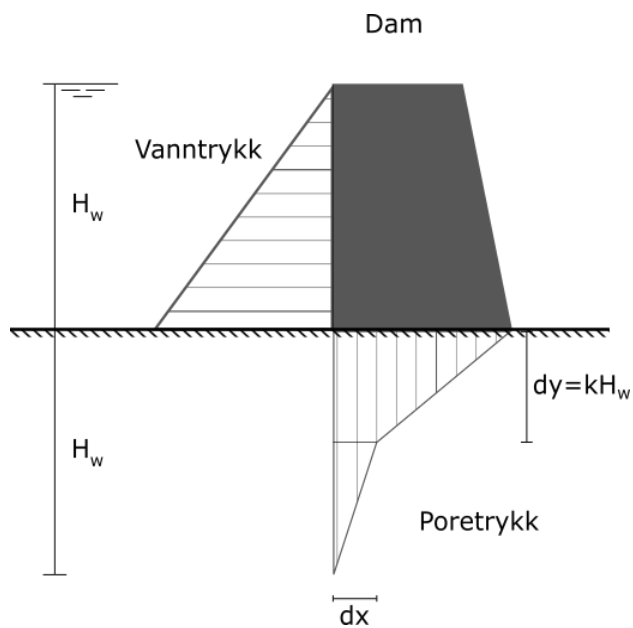
3.9 Poretrykk

Opprinnelig tverrsnitt for beregningene forutsetter trykk i hele fundamentet og lineært avtagende poretrykk. For å vurdere hvordan endringer i poretrykket påvirker den samlede sikkerheten ved dammen, er poretrykket både økt og redusert sammenlignet med utgangspunktet.

Variasjon i poretrykksfordelingen er modellert for damhøyder over 8 m ved å variere dremsfaktor k og drenasjeplan dx som vist i etterfølgende tabell og figur. For hver kombinasjon er resulterende poretrykk beregnet og tilhørende sikkerhetsfaktor for glidning og velting beregnet. Sikkerhetsfaktorene er plottet mot endring av poretrykk i prosent, jf. etterfølgende figurer. Plott av sikkerhetsfaktor mot velting tar hensyn til at momentarmen er forskjellig når poretrykket varieres.

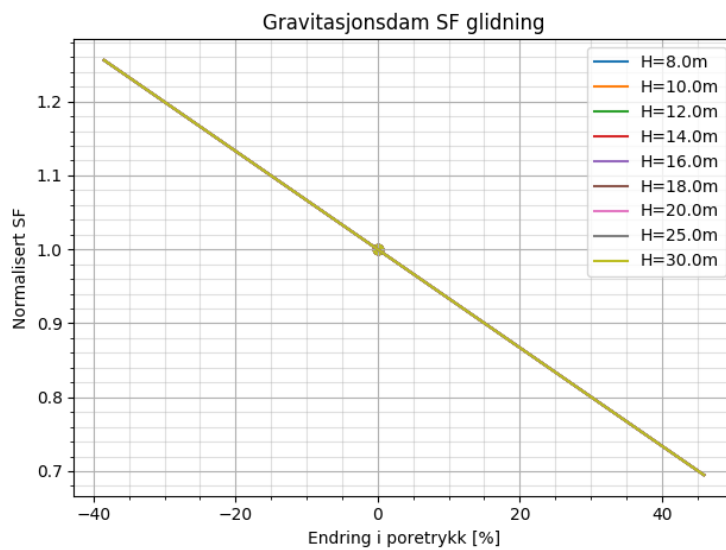
- > *Tabell 3-8. Forutsetninger for å variere poretrykket. Poretrykk er beregnet ved å variere dremsfaktor og drenasjeplan (se figur nedenfor).*

Parameter	Verdi for å generere tverrsnitt	Minste verdi	Maks verdi	Steg	Kommentar
Dremsfaktor (k – jf. fig.)	1.00	0.50	1.0	0.05	Både dx og k er variert samtidig. (dvs. $6 \cdot 11 = 66$ ulike iterasjoner der resulterende poretrykk er hentet ut for hver damhøyde)
Drenasjeplan (dx – jf. fig.)	0	0	0.5H	0.1H	

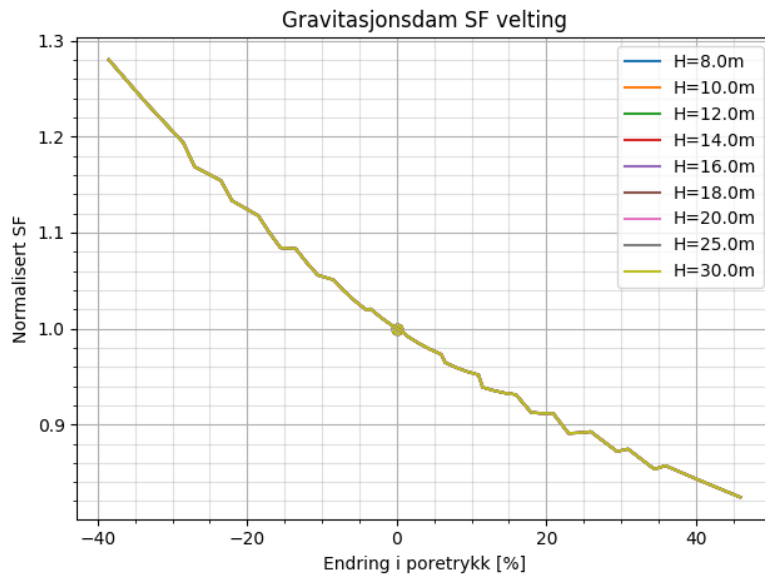


Figur 3-22: Illustrasjon av hvordan dx og k definerer poretrykket.

Resultater fra beregninger som viser hvordan et varierende poretrykk påvirker sikkerhetsfaktoren er presentert grafisk nedenfor.



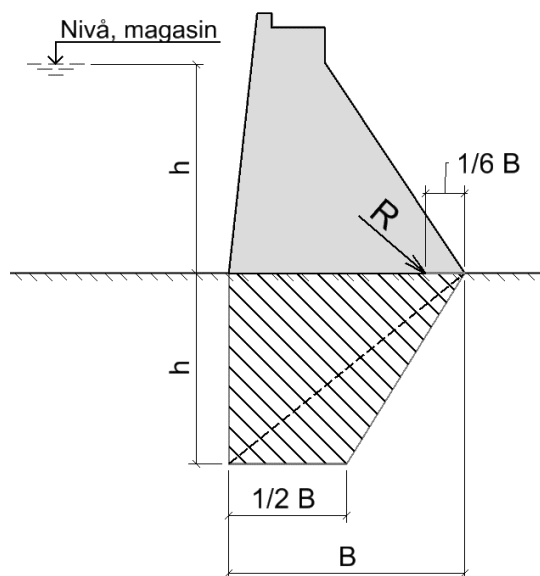
> Figur 3-23: Glidning; SF mot endringer i poretrykk. Damhøyder 8 til 30 m uten fjellbolter.



- > *Figur 3-24: Velting; SF mot endringer i poretrykk. Damhøyder 8 til 30 m uten fjellbolter. Ujevnheten i grafen skyldes at beregningene er gjennomført med å variere 2 variabler samtidig (både dx og k).*

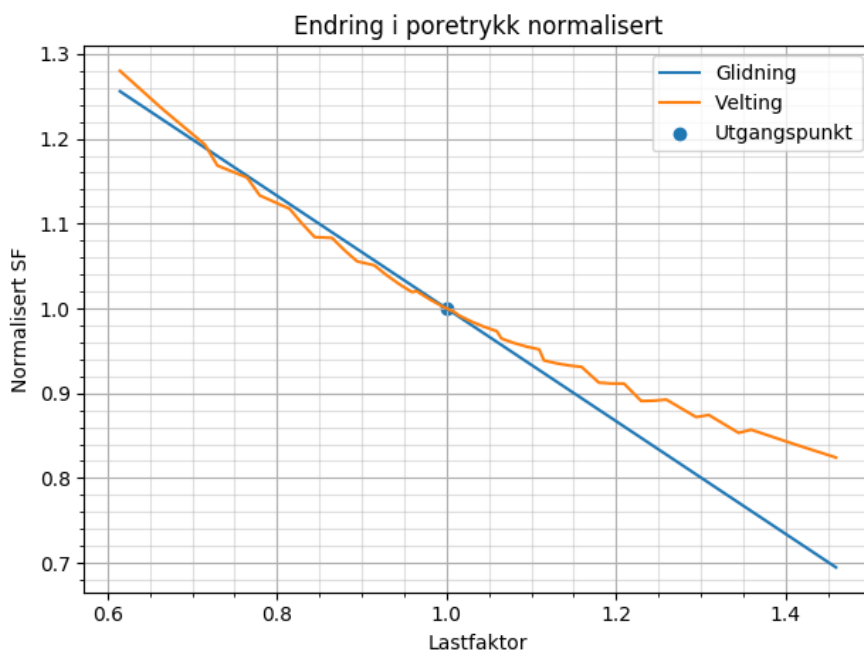
Både for velting og glidning er sammenhengen mellom sikkerhetsfaktorene og endring i poretrykk overlappende for alle damhøyder. For glidning er sammenhengen lineær mens sammenhengen for velting har økende stigningstall for minkende endring i poretrykket.

Kriteriet for stabilitet i ulykkesgrensetilstand er at resultatene er i 1/6-delspunktet. Dette innebærer at det er trykk i halve fundamentet og med et tilhørende poretrykk som vist nedenfor. Dette gir en økning i poretrykket på 43% sammenlignet med lineært poretrykk under hele fundamentet.



- > *Figur 3-25. Poretrykk med resultanten i 1/6-dels punkt, som er nedre grense for stabilitet i ulykkesgrense. Poretrykk i bruddgrense er vist som stiplet linje.*

Ovennevnte grafer er sammenfattet i etterfølgende figur, der endring i poretrykket er vist som en lastfaktor. Lastfaktoren for poretrykk er definert som $\gamma = p_d/p_k$ der p_d er det dimensjonerende poretrykket og p_k er det karakteristiske poretrykket. Karakteristisk poretrykket tilsvarer lineært avtagende poretrykk fra oppstrøms til nedstrøms side. Endring i sikkerhetsfaktor for glidning og velting er plottet mot lastfaktor for poretrykk i Figur 3-26. Formen på grafene er identiske som i Figur 3-23.



> *Figur 3-26: Endring i sikkerhetsfaktor ved gitt lastfaktor for poretrykk. Beregningene er gjennomført for dammer med høyde 8 - 30 m.*

I ovennevnte graf er lastfaktoren gitt som en økning i %-vis poretrykket for både velting og glidning. Lastfaktoren tar ikke hensyn til at momentarmen kan variere ved sammen %-vise endring i poretrykket. Dette er årsaken grafen for velting er ujevn.

Figur 3-26 viser at et redusert poretrykk (dvs. lastfaktor < 1,0), medfører omtrent samme endring i sikkerhetsfaktoren for både glidning og velting. Eksempelvis gir en lastfaktor på ca. 0,7 en økning i sikkerheten på ca. 1,2 for både glidning og velting.

Et øket poretrykk (dvs. lastfaktor > 1,0), har derimot mindre effekt på sikkerhetsfaktoren mot velting enn mot glidning. Eksempelvis gir en lastfaktor på ca. 1,45 en redusert sikkerhet mot glidning på 0,7 mens sikkerheten mot velting er 0,83. For å ivareta en usikkerhet som benyttet i eksemplet bør tilhørende sikkerhetsfaktor være på 1,43 (=1/0,7) mot glidning og 1,2 (=1/0,83) mot velting.

Grunnen til at økning i poretrykket har mindre betydning for sikkerhetsfaktoren mot velting, kan forklares med at når poretrykket øker reduseres tilhørende momentarm. Ved et redusert poretrykk vil imidlertid momentarmen være den samme ettersom poretrykket er linjert avtagende gjennom hele tverrsnittet.

3.9.1 Generell betraktning om poretrykk

Poretrykk representerer en usikkerhet som kan være vanskelig å tallfeste i en sikkerhets- eller lastfaktor.

Dagens kriterier for poretrykket gir en logisk sammenheng mellom lastvirkningene fra dammen og poretrykket for kontroll av stabilitet i bruddgrense. Når det er trykk i hele fundamentet, vil det normalt ikke kunne oppstå vannførende riss som gir grunnlag for poretrykk i fundamentet og antagelse om lineært avtagende poretrykk under dammen vil da være konservativt og dermed bidra til en god sikkerhet for anlegget.

Kontroll i ulykkesgrensetilstand ivaretar i tillegg en ekstra sikkerhet hvis poretrykket skulle være større enn antatt i bruddgrensebetraktningen. Dette eksempelvis forkomme ved mangelfull rennsk, frossent fjell ved utstøping, vannførende slepper i fundamentet ved manglende injeksjon eller mangelfull utførelse av støpeskjøter.

Ved gravitasjonsdammer med høyt statisk vanntrykk kan det for øvrig forekomme hydraulisk splitting av betongen som følge av poretrykk i riss. Dette er observert i dammer høyere enn 100 m, og avhenger selvfølgelig også av de totale trykkspenningene i betongen. Ved høye betongdammer bør dette vurderes spesielt og bør ikke være en del av generelle dimensjoneringskriterier for gravitasjonsdammer i Norge.

Hvis usikkerheten i poretrykket i ulykkesgrensetilstand er ivaretatt gjennom forutsetninger for poretrykket, kan det forutsettes en lastfaktor lik 1,0 for i ulykkesgrensetilstand.

Differansen mellom poretrykk i bruddgrense og i ulykkesgrense er på 43 % og tilsvarer en lastfaktor på 1,43. Sammenheng mellom sikkerhetsfaktor i brudd- og ulykkesgrense kan dermed uttrykkes som vist i etterfølgende tabell.

> *Tabell 3-9. Differanse mellom sikkerhetsfaktor for ulykke- og bruddgrensetilstand (jf. graf Figur 3-26)*

	Ulykkesgrense	Bruddgrense	Kommentar
Glidning	1,0	1,41	=1/0,71 jf. Figur 3-26
Velting	1,0	1,2	=1/0,83 jf. Figur 3-26

4 MURDAM

4.1 Innledning

Erfaringer med murdammer tilsier at beregningsmodellen for stabilitetskontroll antagelig ikke gir en fullgod beskrivelse av sikkerheten ved denne typen dammer, og at beregningene er konservative.

Murdammer har en fleksibel konstruksjon. Dette kan medføre en omlagring av krefter og kan bidra til en betydelig økning i kapasitet mot glidning. Når murdammer belastes med statiske laster, vil konstruksjonen kunne ta større deformasjoner før dammen går til brudd. Med andre ord, vil dammen ha tydelige tegn på skader hvis den er utsatt for statiske laster i nærheten av dammens bruddkapasitet. Dette kan til en viss grad sammenlignes med prinsippet som benyttes for dimensjonering av underarmerte betongkonstruksjoner. Ekstra kapasitet som følge av deformasjoner samt evnen til å tåle deformasjoner er ikke tatt hensyn til i dagens kriterier for stabilitetskontroll. Dette vil først og fremst være relevant for eksisterende dammer.

For murdammer, er det viktig å skille mellom type laster konstruksjonen er utsatt for. Ettersom murdammer er bygget opp av enkeltstein, vil dynamiske belastninger fra rennende vann kunne medføre en større usikkerhet for konstruksjonens integritet og stabilitet, enn belastning fra statiske laster som inkluderes i stabilitetsberegningene.

Det er viktig å ta hensyn til at murdammer kan være svært forskjellig når det gjelder oppbygning. I denne sammenheng vil vurderinger av stabilitet også være avhengig av en vurdering av anlegges tilstand og oppbygning.

4.2 Forutsetninger

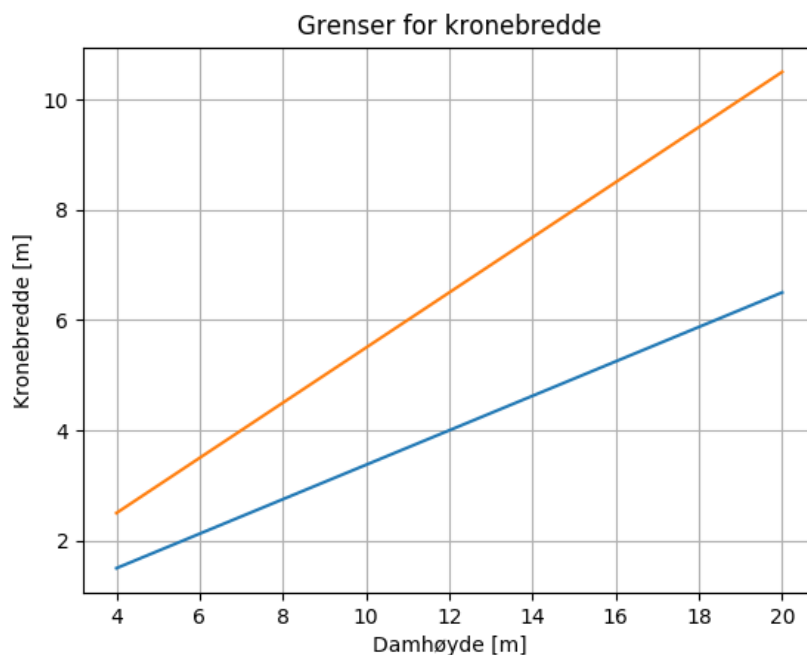
Beregningene er basert på regneverktøy for stabilitetskontroll, som er utarbeidet av Dr. techn. Olav Olsen. For å effektivisere beregningene er det utarbeidet skript som kjører beregningen automatisk. Skriptet definerer endring i ulike variabler, og utfører deretter beregninger for stabilitet med disse forutsetningene. Variasjon av variabler er vist i *Tabell 4-1*.

For tørrmurte murdammer er det valgt å gjennomføre beregninger for damtverrsnitt med damhøyde 4-20 m.

Tabell 4-1: Forutsetninger for beregningene

Parameter	Verdi for å generere tverrsnitt	Minste verdi	Maks verdi	Steg	Kommentar
Friksjon	33°	28°	40°	1°	
Vannstand	HRV	HRV-1m	HRV	0.01m	
Egenvekt	16 kN/m ³	16 kN/m ³	24 kN/m ³	0.1 kN/m ³	
Drenasjeplan	0.25H	0.1H	0.5H	0.1H	

Drens faktoren er satt konstant til $k=1/3$. Det er ikke regnet med istrykk eller fjellbolter.



- > *Figur 4-2: Område som kronebredden er variert innenfor for ulike damhøyder.*
- > *Tabell 4-2: Tverrsnitts parametere og tilhørende sikkerhetsfaktorer for de ulike damhøydene.*

Høyde [m]	Kronebredde [m]	Nedstrøms helning [-]	SF glidning [-]	SF velting [-]
4	1,97	0,3	1,00	1,514
6	2,87	0,3	1,00	1,514
8	3,82	0,3	0,999	1,513
10	4,78	0,3	1,001	1,515
12	5,73	0,3	1,001	1,515
14	6,69	0,3	1,001	1,513
16	7,64	0,3	1,00	1,513
18	8,59	0,3	1,00	1,513
20	9,55	0,3	1,00	1,513

Ovennevnte tabell viser at optimaliseringa av tverrsnittene, ga en minste sikkerhet på 1,0 mot glidning og 1,5 mot velting, med de forutsetningene som er benyttet. En kontroll av beregningene viser at når friksjonsvinkelen økes fra 33° til 45°, så vil sikkerhetsfaktoren mot velting og glidning være tilnærmet det samme.

4.4 Presentasjon

Resultatet fra stabilitetsberegninger av hver parameter er presentert grafisk, der resulterende sikkerhetsfaktor plottes mot varierende parameter for hver damhøyde. Sikkerhetsfaktor for både glidning og velting er vist med varierende variabler.

Det viser seg at endring i friksjonsvinkel, vanntrykk, egenvekt eller poretrykk er tilsvarende for alle damhøyder. Ved å ta utgangspunkt i resultatene for dammen med høyde 20 m, kan sammenhengen mellom endring i sikkerhetsfaktor og last- og materialfaktor antagelig også overføres til andre damhøyder.

4.5 Friksjon

Av Figur 4-3 fremgår det at sikkerhet mot glidning øker med økende friksjonsvinkel mens sikkerhet mot velting er upåvirket av endring i friksjonsvinkel. Videre, er sammenheng mellom sikkerhetsfaktor og friksjonsvinkel den samme uavhengig av damhøyden (dvs. at grafene for ulike damhøyder er overlappende).

Variasjon i friksjonsvinkel gir for øvrig også en indikasjon på hvordan fundamenthelning kan påvirke sikkerheten.

Friksjonsvinkel for murdammer er forbundet med større usikkerhet enn ved betongdammer, ettersom friksjonsvinkelen er avhengig av hvordan fundamentet er bearbeidet ved bygging. Ved murdammer vil fortanning i fundamentet være av stor betydning for sikkerhet mot glidning.

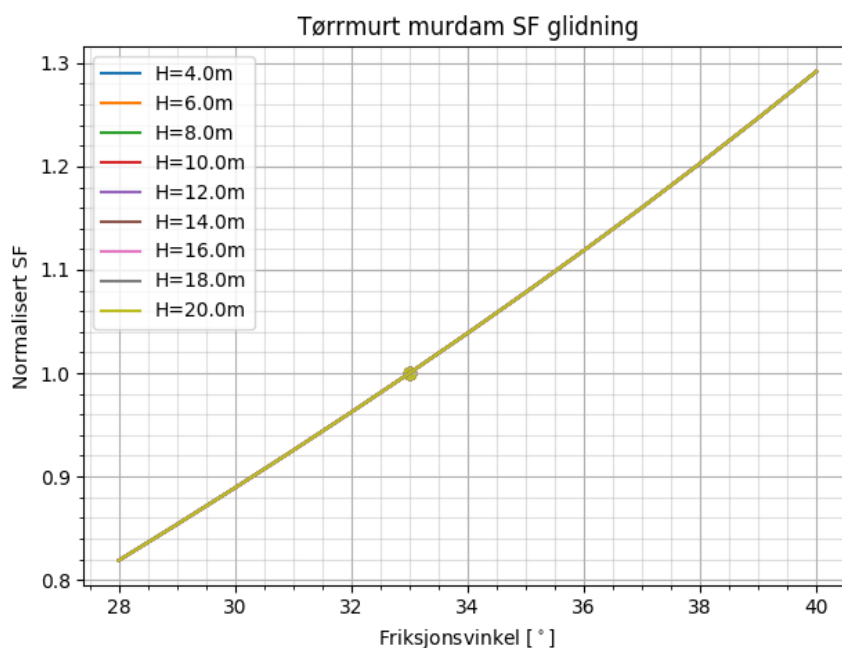
Friksjonsvinkler i NVEs retningslinje er delvis basert på forsøk utført av NGI. Forsøkene omfattet påvisning av friksjonsvinkel mellom enkeltsteiner. Verdiene i retningslinjen er lavere enn verdiene som ble påvist ved forsøk. Friksjonsvinklene kan betegnes som konservative og representerer antagelig en nedre grense i forhold til hva som kan forventes av friksjonsvinkler.

Verdiene som er oppgitt i NVEs retningslinje for murdammer er vist i etterfølgende tabell. I tillegg oppgir retningslinjen en øvre grense for friksjonsvinkelen, der det ikke skal benyttes en friksjonsvinkel som er større enn 36°.

> *Tabell 4-3. Friksjonsvinkler jf. NVEs retningslinje for murdammer.*

Bergart	Friksjonsvinkel
Granitt, bearbeidede bruddflater	33°
Skifer, flater som følger skifrihetsplan	27°
Mørtel mot fjell	40°

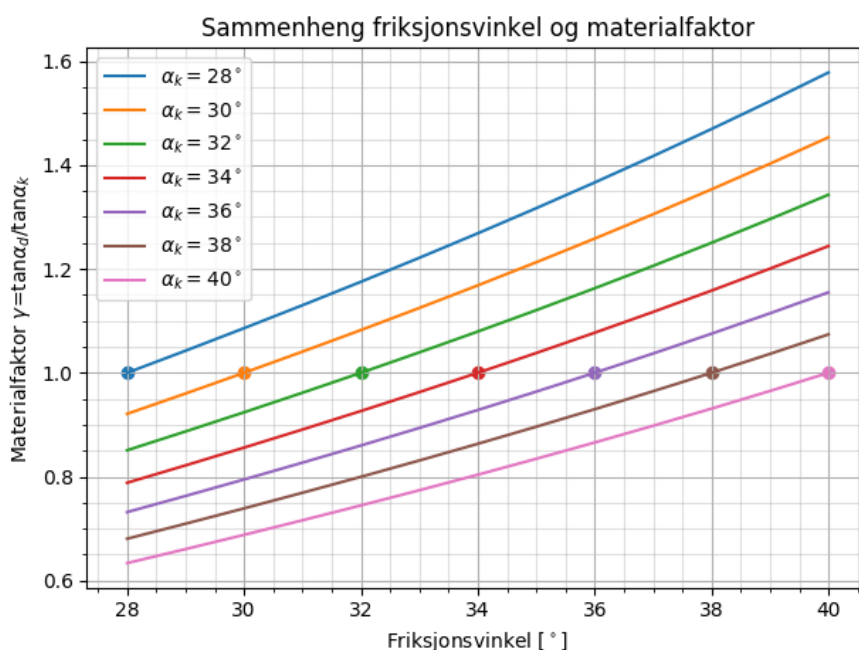
4.5.1 Sikkerhet mot glidning



> Figur 4-3. Glidning; SF mot friksjonsvinkel. Damhøyde 4 til 20 m uten fjellbolter.

For glidning, har valg av friksjonsvinkel relativt stor betydning for resulterende sikkerhet.

Ovennevnte figurer viser sammenheng mellom sikkerhetsfaktor (SF) og friksjonsvinkel (α) når det benyttes en friksjonsvinkel på 33° . Sammenhengen mellom sikkerhetsfaktor for andre friksjonsvinkler er vist i grafen nedenfor.



> Figur 4-4: Sammenheng mellom friksjonsvinkel og materialfaktor med ulike karakteristiske friksjonsvinkler α_k .

Grafen viser hvordan materialfaktoren påvirker friksjonsvinkelen. Materialfaktorer > 1 er i prinsippet ikke relevant.

Metodikk for beregning av materialfaktor og sikkerhetsfaktor medfører imidlertid at Figur 4-4 også kan benyttes for å lese av sammenheng mellom friksjonsvinkel og sikkerhetsfaktor, jf. beskrivelse i kapittel 3.4. Med andre ord, hvis faktisk friksjonsvinkel er 40° , men det forutsettes en friksjonsvinkel lik 34° i beregningene, så tilsvarer dette en sikkerhetsfaktor på 1,25.

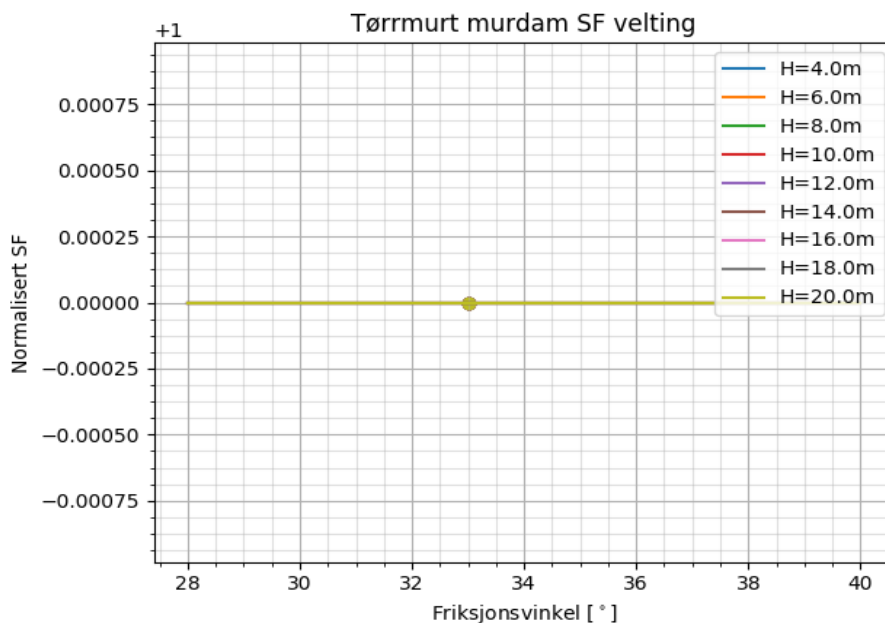
Grafene viser at endring i friksjonsvinkelen har noe større effekt på sikkerhetsfaktoren ved lave friksjonsvinkler som utgangspunkt. Dette er oppsummert i etterfølgende tabell der differansen mellom karakteristisk og dimensjonerende friksjonsvinkel er satt lik 5° .

> *Tabell 4-4: Sikkerhetsfaktor for glidning ved varierende friksjonsvinkler.*

Friksjonsvinkel ($d\alpha = 5^\circ$)		Sikkerhetsfaktor glidning (SF)
Dimensjonerende	Karakteristisk	
28°	33°	~ 1.23
30°	35°	~ 1.22
32°	37°	~ 1.21
34°	39°	~ 1.20

4.5.2 Sikkerhet mot velting

Gjennomførte beregninger viser at friksjonsvinkelen har ingen betydning for sikkerheten mot velting. Dette er en selvfølge, ettersom friksjonsvinkelen ikke inngår som en parameter ved beregning av moment.

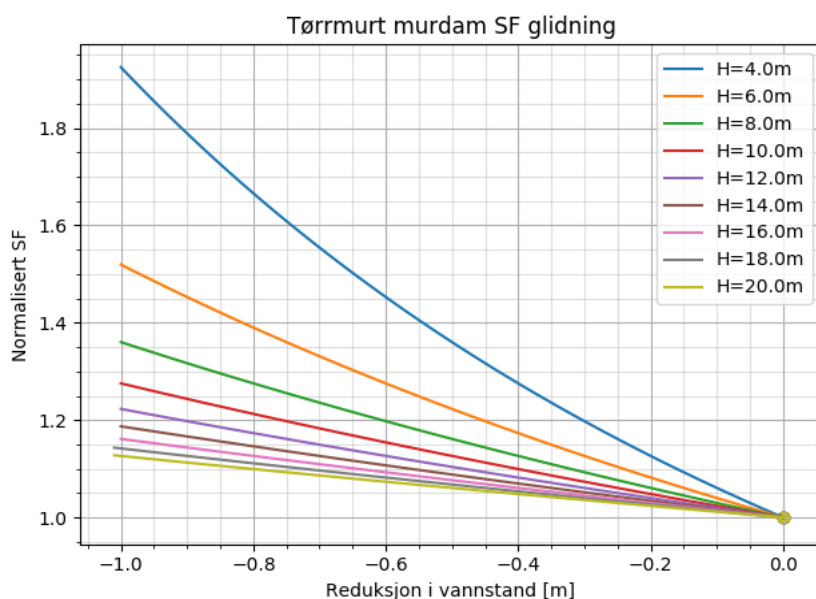


> *Figur 4-5. Velting; SF mot friksjonsvinkel. Damhøyde 4 til 20 m uten fjellbolter. Varierende friksjonsvinkelen har ingen betydning for velting.*

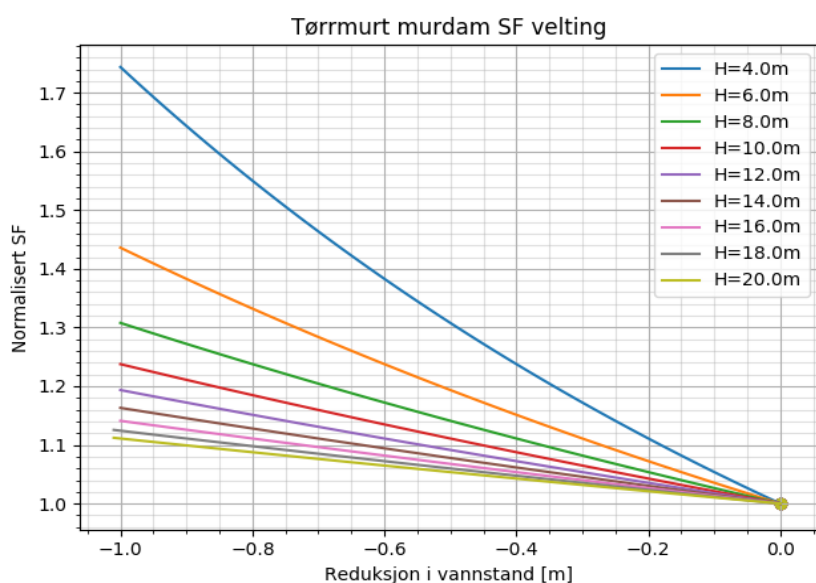
4.6 Vannstand

Hvordan stabiliteten påvirkes som følge av endringer i vannstanden sier noe om hvor følsom dammen er i forhold til endringer i flomvannstanden. Høye dammer vil nødvendigvis være mindre følsomme for endringer i vannstanden enn lavere dammer. Hvor mye dette påvirker sikkerheten for ulike damhøyder er beregnet og presentert grafisk som vist i etterfølgende figurer.

Som utgangspunkt for beregningene, det funnet et tverrsnitt med sikkerhet mot glidning lik 1,0 for en gitt vannstand. For ordens skyld, er denne vannstanden angitt som høyeste regulerte vannstand (HRV). Deretter er vannstanden redusert i steg på 0,01 m og tilhørende sikkerhetsfaktor er beregnet som følge av redusert vanntrykk mot dammen.



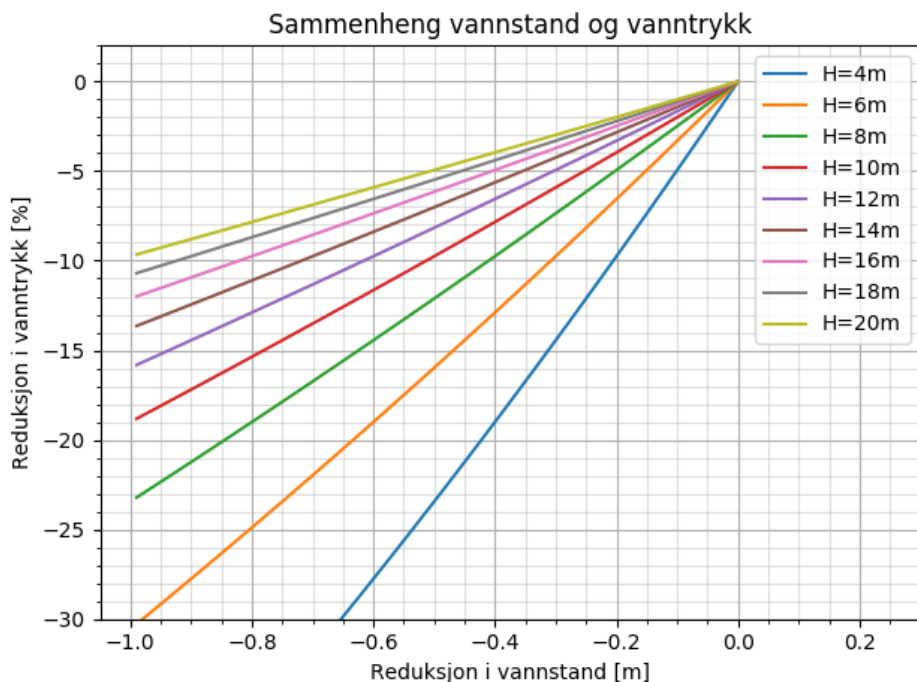
> Figur 4-6: Glidning; SF mot vannstand. Damhøyder 4 til 20 m uten fjellbolter.



> Figur 4-7: Velting; SF mot vannstand. Damhøyder 4 til 20 m uten fjellbolter.

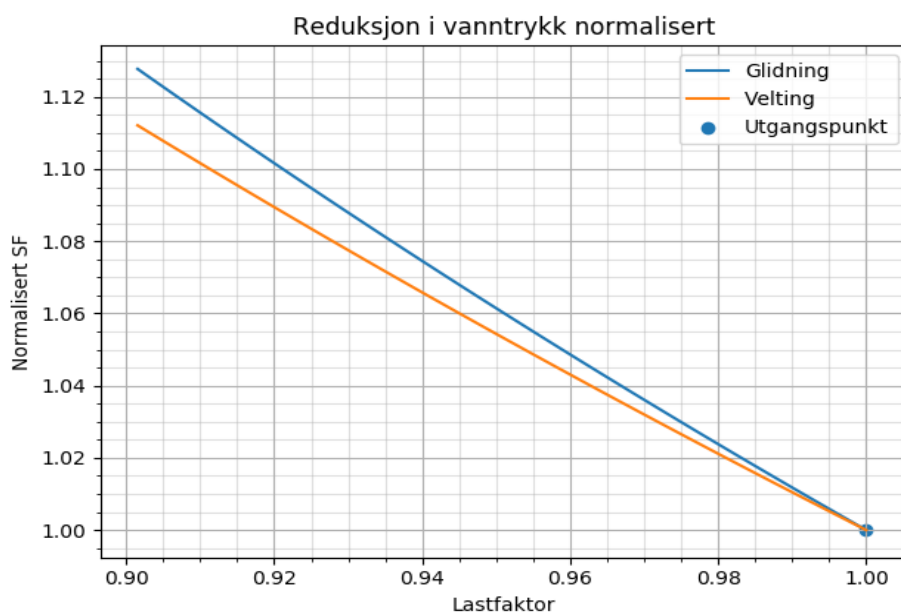
I Figur 4-6 og Figur 4-7 er resulterende sikkerhetsfaktor for glidning og velting tegnet mot reduksjon i meter. Graf for glidning viser at senket vannstand slår ut ulikt for ulike damhøyder. Ved en redusert vannstand på 0,5 m øker sikkerheten mot glidning fra 1 til ca. 1,35 for damhøyde på 4 m mens den øker til ca. 1,06 for damhøyde på 20 m. Tilnærmet samme forholdet gjelder for sikkerhetsfaktoren mot glidning, men differansen er marginalt høyere for dette tilfellet.

Resultatene viser i prinsippet at høye dammer er mindre sensitive for vannstandsvariasjoner enn lavere dammer. Dette er godt illustrert i etterfølgende figur. En endring i vannstanden på 0,2 m gir en endring i vanntrykket på 10 % (dvs. en lastfaktor ca. 0,9) for en 4 m høy dam, mens for en 20 m høy dam er endringen på ca. 2 % (dvs. lastfaktor på ca. 0,98).



- > *Figur 4-8: Sammenheng mellom endring i vannstand og tilhørende vanntrykk for ulike damhøyder. Figuren illustrerer at lave dammer er vesentlig mer følsomme for variasjon i vannstand enn høyere dammer.*

Sammenheng mellom sikkerhetsfaktor og lastfaktor er vist etterfølgende graf. Grafen viser at endringer i vannstanden har større betydning for sikkerheten mot glidning enn mot velting.



- > *Figur 4-9: Endring i sikkerhetsfaktor ved gitt lastfaktor for vanntrykk. Sikkerheten for glidning øker raskest.*

Damhøyde (dvs. statisk vanntrykk) er avgjørende for hvordan usikkerheter i flomberegningen og flomvannstander påvirker stabiliteten. Når damhøyden øker, har endringer i flomvannstanden mindre betydning for stabiliteten ved dammen. Det vil derfor være riktig at eventuelle usikkerheter i flomberegningen inkluderes i selve flomberegningen og ikke reflekteres i den generelle sikkerhetsfaktoren ettersom usikkerhet i flomvannstand vil gi forskjellig utslag på sikkerhetsfaktoren ved forskjellig damhøyde.

4.7 Egenvekt

Murdammer er i prinsippet en gravitasjonsdam der egenvekten naturlig nok er vesentlig for stabiliteten.

NVEs retningslinje for murdammer, tabell 2.1, antyder følgende egenvekter for murdammer:

- > *Tabell 4-5: Egenvekt for murdammer (ref. NVEs retningslinje for murdammer, tabell 2.1)*

Damtype	Egenvekt (kN/m ³)
Naturstein, granitt	27
Mørtel	18
Murdam med stein lagt i mørtel	25
Tørrmurte dammer med tilpasset stein i hele tverrsnittet	21
Tørrmurte dammer, Røysfylling	16
Leire og silt, vannmettet	20
Torv - vannmettet	13-20

Egenvekt ved murdammer er imidlertid vanskelig å påvise, og verdiene i NVEs retningslinje benyttes derfor i stor grad med utgangspunkt i en skjønsmessig vurdering for hver enkelt murdam. For tørrmurte dammer utgjør dette et spenn fra 16 – 21 kN/m³ eller 5 kN/m³.

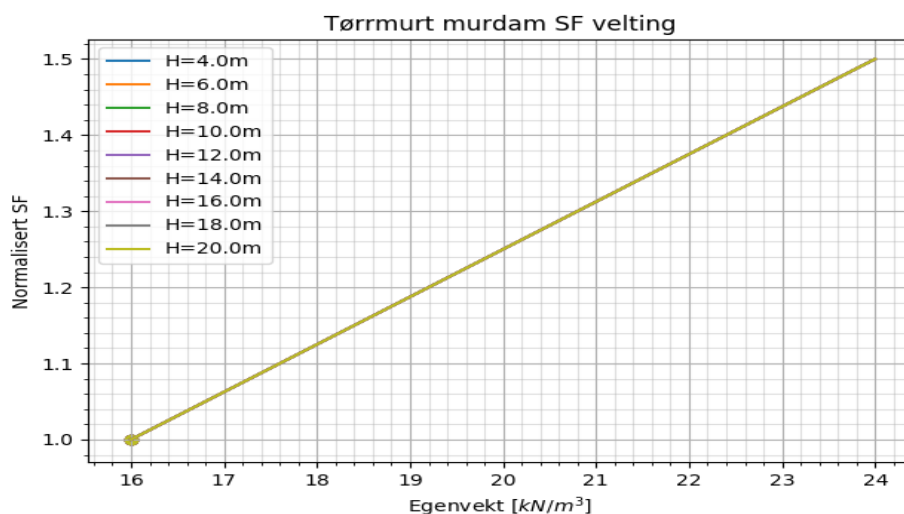
Det foreligger ingen vurdering av hvordan usikkerhet i egenvekten, reflekteres i den samlede sikkerhetsfaktoren for dammen. I denne rapporten er det derfor forutsatt at usikkerheten utgjør +/- 2,5 kN/m³ – tilsvarende intervallet gitt av NVE. En egenvekt på 18,5 kN/m³ vil da kunne representere både øvre og nedre verdi for egenvekt 16 – 21 kN/m³.

I det etterfølgende er det vist hvordan sikkerhetsfaktoren varierer med endret egenvekt for ulike damhøyder. Beregningene gir sammenheng mellom egenvekt, lastfaktor og tilhørende sikkerhetsfaktor for glidning og velting.

I Figur 4-10 fremgår det at sikkerheten for både glidning og velting øker lineært med økende egenvekt. Dessuten er grafene for alle damhøyder like.



> Figur 4-10: Glidning: SF mot egenvekt.



> Tabell 4-6: Velting: SF mot egenvekt.

For velting er sikkerhetsfaktoren og lastfaktoren den samme (dvs. at stigningstallet i ovennevnte graf er på 1).

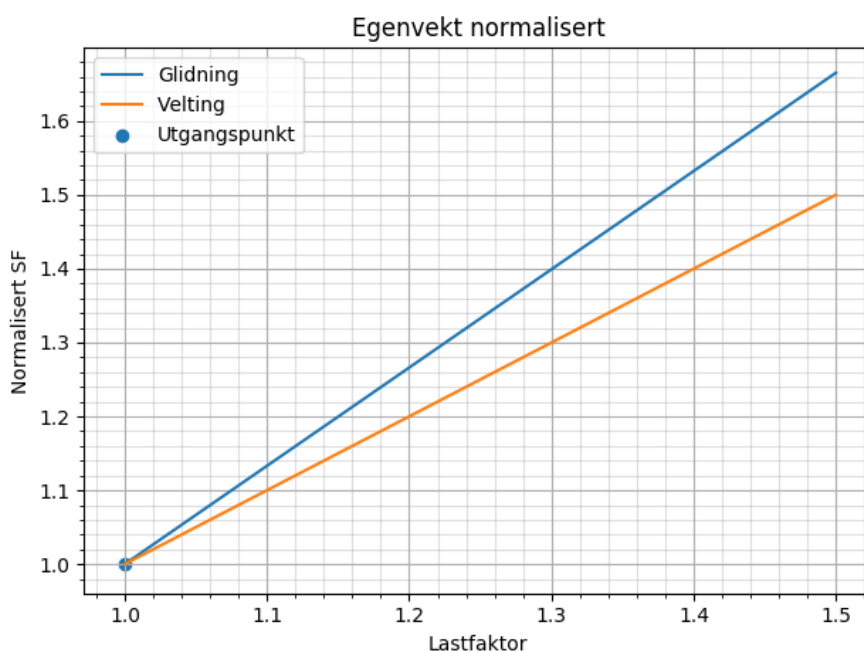
For beregning av sikkerhet mot glidning er det benyttet en friksjonsvinkel lik 33° . Hvis det benyttes en høyere friksjonsvinkel, vil bidraget fra egenvekten være noe større slik at differansen mellom sikkerhetsfaktor og lastfaktor vil være noe mindre.

Når egenvekten økes fra 16 til $18,5 \text{ kN/m}^3$ utgjør dette en lastfaktor på 1,16. Tilhørende variasjon i sikkerhet er vist i etterfølgende tabell.

- > *Tabell 4-7: Sammenheng mellom lastfaktor og sikkerhetsfaktor når egenvekten økes fra 16 til $18,5 \text{ kN/m}^3$.*

	Lastfaktor	Sikkerhetsfaktor
Glidning	1,16	1,22
Velting	1,16	1,16

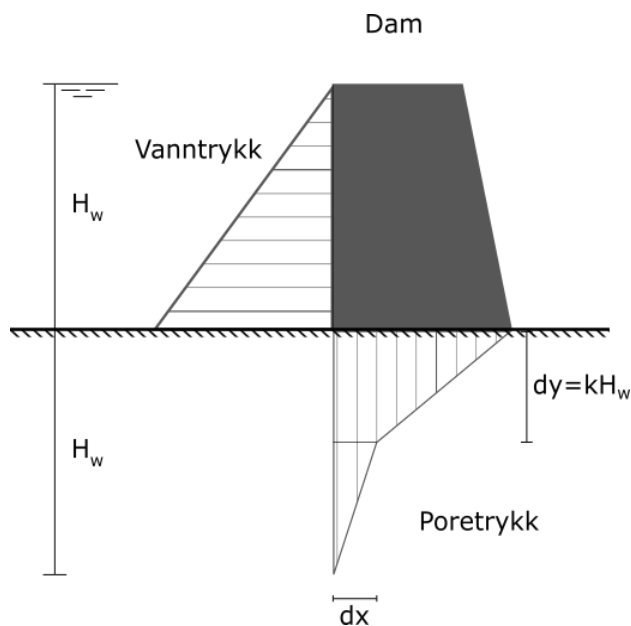
Tabellen viser at endringer i egenvekten gir større utslag for glidning enn for velting, når friksjonsvinkelen settes lik 33° . Usikkerhet knyttet til egenvekt gir derfor størst utslag i forhold til sikkerhet mot velting. Dette forholdet er også illustrert i etterfølgende graf.



- > *Figur 4-11: Endring i sikkerhetsfaktor ved gitt lastfaktor for egenvekt.*

4.8 Poretrykk

Opprinnelig tverrsnitt for beregningene forutsetter et redusert poretrykk som vist i Figur 4-12, der drengplanet (dx) er satt lik $0,25 H$ og k er satt lik $0,33H$. Det benyttes samme distribusjon av poretrykk for beregning av stabilitet i både brudd- og ulykkesgrensetilstand.



> Figur 4-12: Beskrivelse av poretrykksfordeling under damfundamentet.

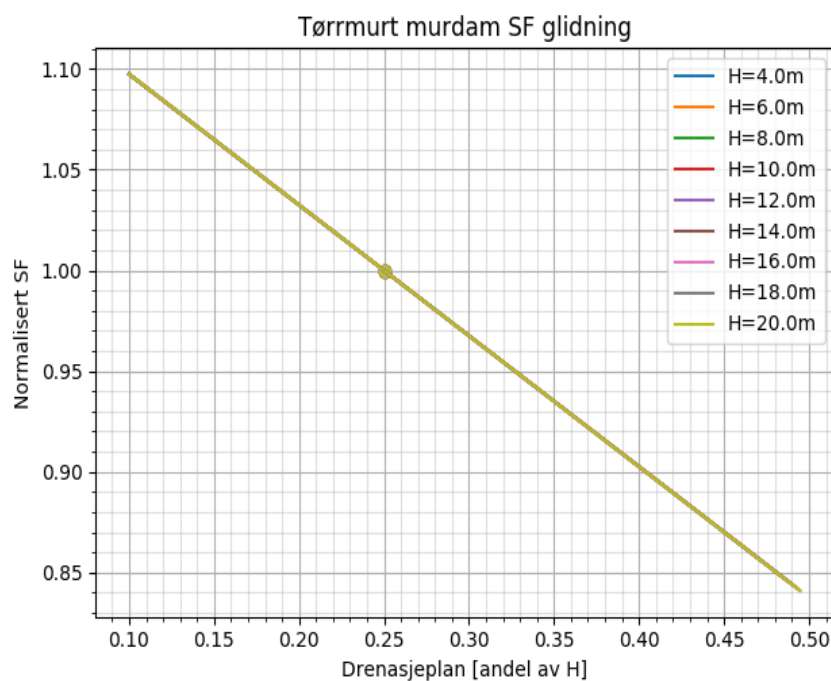
For å vurdere hvordan endringer i poretrykket påvirker den samlede sikkerheten ved dammen, er poretrykket både økt og redusert sammenlignet med utgangspunktet.

Endring i poretrykket er modellert ved å variere drenasjeplan dx som vist i etterfølgende figur. For hver kombinasjon er resulterende poretrykk beregnet og tilhørende sikkerhetsfaktor for glidning og velting er beregnet. Sikkerhetsfaktorene er plottet mot endring i drensplenet. Dette er vist i etterfølgende figurer.

> Tabell 4-8. Forutsetninger for å variere poretrykket.

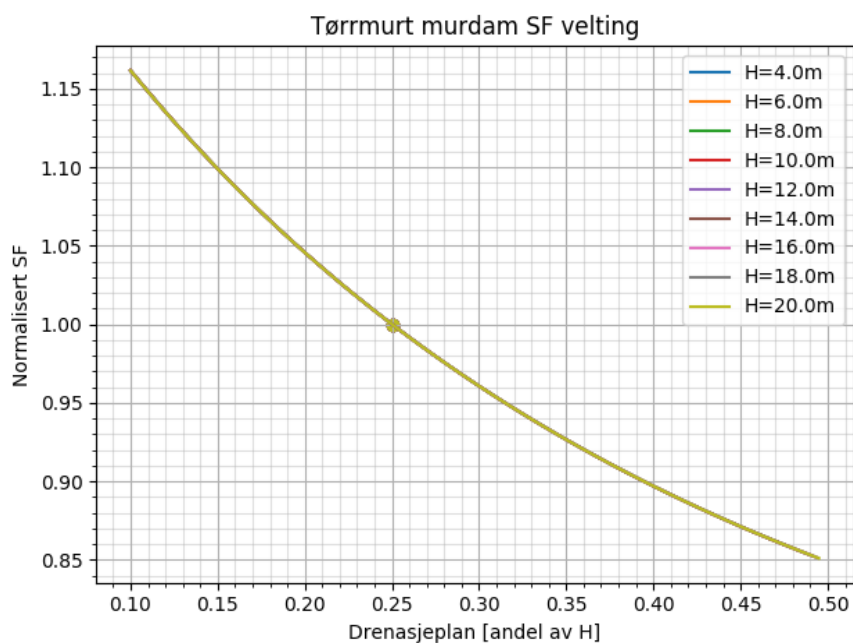
Parameter	Verdi for å generere tverrsnitt	Minste verdi	Maks verdi	Steg	Kommentar
Drensfaktor (k – jf. fig.)	0.33		Endres ikke		Resulterende poretrykk er beregnet ved å variere drenasjeplanet (se figur nedenfor).
Drenasjeplan (dx – jf. fig.)	0.25H	0.1H	0.5H	0.1H	

Sikkerhet mot glidning henger sammen med variasjon i friksjonskraften. Variasjon i kraftresultanten fra poretrykket bidrar direkte til variasjon i friksjonskraften, og sikkerhetsfaktoren varierer lineært med de gitte forutsetningene.



> *Figur 4-13. Glidning: SF mot endring i poretrykk.*

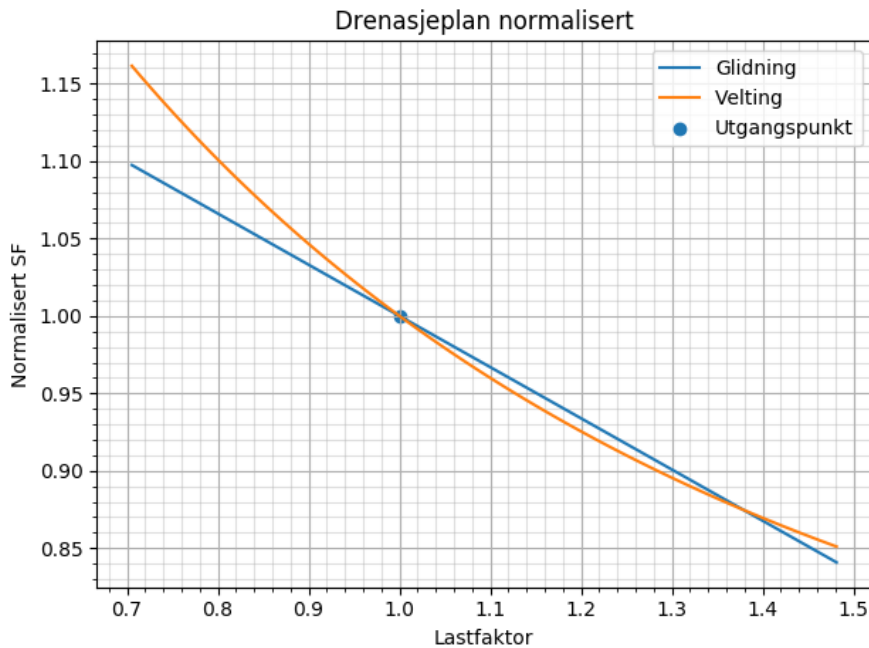
Sikkerhet mot velting henger sammen med momentbidraget fra poretrykket. Når drenasjeplanet varierer, endres både kraftresultanten og momentarmen. Dette gir en ikke-lineært kurve for sikkerhet mot velting.



> *Figur 4-14. Velting: SF mot endring i poretrykk.*

Lastfaktoren for poretrykk er definert som $\gamma = p_d/p_k$ der p_d er det dimensjonerende poretrykket og p_k er det karakteristiske poretrykket. 50% økning i poretrykket representerer dermed en lastfaktor tilsvarende 1,5.

Endring i sikkerhetsfaktor for glidning og velting er plottet mot lastfaktor for poretrykk, og er vist i Figur 4-15.



> *Figur 4-15: Endring i sikkerhetsfaktor ved gitt lastfaktor for poretrykk variert ved å endre drenasjeplanet.*

Et økt poretrykk (dvs. lastfaktor > 1,0), medfører omtrent samme endring i sikkerhetsfaktoren for både glidning og velting. Eksempelvis gir en lastfaktor på ca. 1,3 en redusert sikkerhet på mellom 0,90 for både glidning og velting.

Et redusert poretrykk (dvs. lastfaktor < 1,0), har derimot mindre effekt på sikkerhetsfaktoren mot glidning enn mot velting. Eksempelvis gir en lastfaktor på ca. 0,8 en økt sikkerhet mot glidning på 1,07 mens sikkerheten mot velting øker til 1,10.

4.8.1 Generell betraktning om poretrykk

Usikkerhet knyttet til poretrykket er mye mindre ved tørrmurte dammer enn ved gravitasjonsdammer i betong, ettersom damkroppen er drenert. Dette er også illustrert i Figur 4-15.

Tetningssjiktet i murdammer er ofte bygget opp av følgende:

- Oppstrøms plankedekke eller betongplate
- Oppstrøms løsmasse- eller torvtetning
- Tetning med mørtel i fugene

I følge NVEs retningslinje for murdammer er oppstrøms tetningssjikt definert å ha en tykkelse på $0,25 \cdot H$, der H er trykkhøyden til oppstrøms vanntrykk. Eksempelvis vil en dam med statisk vanntrykk på 5 m forutsettes å ha et tetningssjikt på 1,25 m, mens faktisk tetningssjikt ofte vil være mye mindre. I tillegg forutsettes et redusert poretrykk i deler av

dammen som er drenert. Sum av antagelse for poretrykk i murdammer vurderes derfor normalt å være på den konservative siden.

Det vil likevel være en liten usikkerhet knyttet til poretrykket, men dette kan være vanskelig å tallfeste i en sikkerhets- eller lastfaktor. For å synliggjøre denne usikkerheten er det antatt at drensplanet (dx) flyttes fra $1/4 H$ til $1/3 H$, noe som tilsvarer en økning i poretrykket på 16 %, dvs. lastfaktor på 1,16. Dette gir en redusert sikkerhetsfaktor på 0,95 mot glidning og 0,94 mot velting, jf. Figur 4-15. Tilhørende sikkerhet for å ta hensyn til en slik usikkerhet er vist i etterfølgende tabell.

Tabell 4-9. Sikkerhetsfaktor i bruddgrense når drens faktoren økes fra $1/4 H$ til $1/3 H$ (jf. f Figur 4-15)

	Lastfaktor	Bruddgrense	Kommentar
Glidning	1,16	1,05	=1/0,95 jf. graf
Velting	1,16	1,06	=1/0,83 jf. graf

Ettersom poretrykket i utgangspunktet er vurdert som konservativt, er det ikke lagt til en ekstra sikkerhet i ulykkesgrense.