



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE

Stabilitetsberegning av murdammer

Calculation of stability for masonry dams

Lena Wolff Nedberge

Lisell Rud Storstein

Bacheloroppgave i byggingeniør

Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap

Guzel Shamsutdinova

21.mai 2024

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle

kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskolen på Vestlandet, § 12-1.

Forord

Denne oppgaven er vårt avsluttende arbeid på byggingeniørstudiet ved Høgskolen på Vestlandet, avdeling Bergen. Bacheloroppgaven er utarbeidet i vårsemesteret 2024 og omfatter 20 studiepoeng.

Oppgaven er skrevet av Lisell Rud Storstein og Lena Wolff Nedberge. Begge har valgt retningen prosjekt- og byggeledelse med profil konstruksjonsteknikk. I løpet av studiet har vi begge fått interesse for konstruksjonsfagene, i tillegg til geoteknikk. Vi finner det interessant og imponerende at eldre konstruksjoner står i flere år enn det de opprinnelig er dimensjonert for. Dette la grunnlaget for valget av oppgaven vår.

Oppgaven er skrevet i samarbeid med Sweco og Bergen kommune, og omhandler stabilitetsberegninger på murdammer. Gjennom prosessen har vi utvidet vår forståelse for dampsikkerheten, denne erfaringen har vært både verdifullt og engasjerende for oss.

Vi vil rette en stor takk til Sweco, med Senka Blazevic, og Bergen kommune, med Rune Engesæter, for en spennende og utfordrende oppgave, samt for god veiledning underveis. Spesielt takk til Senka som har bidratt med kontor plass hos Sweco for tettere oppfølging, og raske svar på e-post og Teams når vi har trengt veiledning.

Til slutt ønsker vi å takke veilederen vår fra Høgskolen på Vestlandet, Guzel Shamsutdinova, for god veiledning, motiverende samtaler og hjelp til ulike utfordringer.

Takk for samarbeidet!



Lisell Rud Storstein



Lena Wolff Nedberge

Sammendrag

Denne oppgaven tar for seg stabilitetsberegning på tre ulike murdamoppbygninger: murdam med tetning lagt i mørtel, murdam med betongplate og murdam med torvtetning. Konstruksjonenes geometri er basert på tre eksempler av murdammer, gitt av Bergen kommune.

De fleste murdammer ble bygget for over 70 år siden, de eldste er over 100 år gamle, og mange av dem står den dag i dag. Det er vanlig å dimensjonere for 100 års levetid. Noen konstruksjoner opplever svikt etter få bruksår, mens andre konstruksjoner står i flere år enn det de er dimensjonert for. Det at konstruksjoner står i flere år enn forventet synes vi som gruppe er fascinerende. Av den grunn har hovedmotivasjonen for denne oppgaven vært å lage en oversikt som gjør at gamle damkonstruksjoner kan stå enda lengre. Oversikten inneholder hvilke verdier av ulike komponenter som er nødvendig for at dammen skal tilfredsstillere stabilitetskravene. Problemstillingen som har blitt utarbeidet basert på dette er som følger:

'Hvilken murdamoppbygging er mest stabil ved ulike lasttilfeller og variabler?'

I oppgaven blir det testet ulike variabler for å se hvordan de påvirker stabiliteten. De ulike variablene brukt i oppgaven er snitt av damhøyde, kronebredde, lasttilfeller og helningsvinkel på terrenget. Målet med oppgaven er å lage en oversikt over hvilke variabler som gjør det tre ulike dammene godkjente innenfor stabilitetskravene. Det blir også kommentert hvordan fribord og dekomponering av helningsvinkelen påvirker stabiliteten.

Stabilitetsberegningene er utført i Mathcad, Excel er benyttet for å gi en oversikt over resultatene og for presentasjon av resultater.

Det er mange kompliserte beregninger å gjennomgå for å se om murdammene holder stabiliteten, derfor blir noen beregninger satt til sikker side. Andre beregninger som jordskjelv blir ikke tatt hensyn til i denne oppgaven.

I analysedelen av oppgaven ble stabiliteten til damene presentert i diagrammer, hvor en observerer hvordan de ulike variablene øker eller minker stabiliteten, samt hvordan de oppfører seg i forhold til kravene.

I siste del av oppgaven vises det tydelig at murdam med tetning lagt i mørtel er den mest stabile konstruksjonen, dette skyldes konstruksjonens massive oppbygging.

Det forutsettes at leser har grunnleggende forståelse for fagemnet, mens fagterminologi og begreper vil bli beskrevet under begrepsliste.

Abstract

This task deals with stability calculations for three different masonry dam structures: a dam with mortar seal, a dam with a concrete slab, and a dam with a peat seal. The geometry of these three dams is provided by the Bergen municipality.

Most masonry dams were built over 70 years ago, with the oldest ones being over 100 years old, and many of them are still standing today. It is common practice to design lifespan for typically 100 years. Some structures experience failure after a few years of use, while others remain for longer than expected. The fact that constructions endure for longer than expected is fascinating to us as a group. For this reason, the main motivation for this task has been to create an overview that enables old dam constructions to endure even longer. The overview includes the necessary values of various components required for the dam to meet stability requirements. The research question developed based on this is as follows:

"Which masonry dam construction is most stable under different load cases and variables?"

The task tests various variables to see how they affect stability. The variables used in the task are sectioning the dam height, crest width, load cases, and slope angle of the terrain. The goal of the task is to create an overview of the variables that make the three different dams compliant with stability requirements. It will also comment on how freeboard and decomposition of the slope angle affect stability.

Stability calculations are performed using Mathcad, and Excel is used to keep track of the results and present them. There are many complex calculations to go through to assess whether the masonry dam maintains stability, so some calculations incorporate a safety factor. Other calculations such as earthquakes and floods are not considered in this task.

In the analysis section of the task, the stability of the dams is presented in diagrams, showing how the different variables increase or decrease stability, and how they behave in relation to the requirements.

In the final part of the task, it is shown that masonry dam with a mortar seal is the most stable construction. This may be due to the construction's solid structure.

It is assumed that the reader has a basic understanding of the subject matter, while technical terminology and concepts will be described in the glossary.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunninformasjon	1
1.2	Prosjektbeskrivelse	1
1.3	Problemstilling.....	1
1.4	Verktøy.....	2
2	Bakgrunnsteori	4
2.1	lover og forskrifter.....	4
2.2	Historisk utvikling av murdammer	4
2.3	Beregninger før og etter Damsikkerhetsforskriften	5
2.4	Klassifisering av dam	5
2.4.1	Klassifisering av materialet	5
2.4.2	Klassifisering av tetning	6
2.4.3	Klassifisering av konsekvensklasse	7
3	Damsikkerhet og skadeårsaker	8
3.1	Skadeårsaker	8
3.2	Skadetyper	9
3.2.1	Glidning	9
3.2.2	Velting.....	10
3.2.3	Flom.....	10
3.2.4	Vanninntrenging.....	10
3.3	Potensielle skader på murdammer i oppgaven	11
3.3.1	Murdam med tetning lagt i mørtel	11
3.3.2	Murdam med betongplate	11
3.3.3	Murdam med sentral torvtetning	12
4	Dimensjonering.....	13
4.1	Dimensjoneringsprinsipp	13
4.2	Laster	14
4.2.1	Permanente laster	14
4.2.2	Variable laster	19
4.2.3	Ulykkeslaster	20
4.3	Beregning av stabilitet	20
4.3.1	Glidestabilitet.....	20
4.3.2	Veltestabilitet	23
4.3.3	Dekomponering	25

4.4	Forenklinger.....	26
5	Analyse av beregninger	29
5.1	Glidestabilitet.....	29
5.2	Veltestabilitet	36
5.3	Resultat av glide- og veltestabilitet.....	42
5.4	Fribord	43
5.5	Resultat av godkjent damkonstruksjoner.....	46
6	Diskusjon	50
6.1	Regnemetode	50
6.2	Valg av helningsvinkler, kronebredde og damhøyde.....	50
6.3	Dekomponering	51
6.4	Fribord	52
6.5	Islast på murdam med torvtetning	59
6.6	Stabilitet og dambrudd.....	60
6.7	Resultatet sammenlignet mot krav før 1981	61
6.8	Sammenligning av de tre oppbyggingene.....	63
7	Konklusjon	64
8	Vedleggsliste	66
9	Kilder	67

Begrepsliste / Terminologi

Begrep	Forklaring	
Kronelengde	Horisontal avstand langs topp dam.	
Kronebredde	Bredden ved topp dam	
Damhøyde	Høyde på dammen, målt fra laveste punkt og opp til topp dam.	
Fribord	Avstanden mellom topp damhøyde og topp vannflaten.	
HRV	Høyeste regulerte vannstand	
DFV	Dimensjonerende flomvannstand, HRV+0.5m	
LRV	Laveste regulerte vannstand	
Oppstrømsside	Den siden av dammen som vender mot vannet som dammen demmer inne. Oppstrømsside vil være på venstre side i denne oppgaven.	
Nedstrømsside	Den siden av dammen som vender vekk fra vannet som demmes inne. Nedstrømsside vil være på høyre side i denne oppgaven.	

Resultantkraft, R	Summen av alle kreftene som virker på konstruksjonen. Er avhengig av størrelse og retning på hver enkel kraft.
Trykksone	Sone under murdammen som er et resultat av egenvekten og gir et mottrykk for poretrykket.
Nøytralakse	Delen av tverrsnittet som ikke har spenninger fra påførte laster blir kalt nøytralakse.
Nedstrømstå	Bunnpunktet på nedstrømsside
Hydrologisk trykk	Kraften fra vekten til væsken som påføres konstruksjonen.
Punktlast	En kraft som påføres på et spesifikt område på konstruksjonen
Jevnt fordelt last	En kraft som påføres et større område på konstruksjonen med like stor kraft per meter.
Trekantlast	En last på konstruksjonen som endres jevnt og gradvis langs konstruksjonen. Lasten kan enten økes eller reduseres.
Friksjonsvinkel	Den maksimale vinkelen skjærplanet kan ha før glidning oppstår i konstruksjonen.
Helningsvinkel	Vinkelen til terrenget murdammen står på.
Glideplan	Kontaktflate mellom to forskjellige geologiske lag. Lagene har ulik motstand mot påførte krefter, som kan føre til glidning.
Dekomponering	Å regne om kreftene slik at kreftene peker langs aksene.
Lastfaktor, γ	Forholdet mellom den faktiske belastningen til konstruksjonen og den maksimale kapasiteten.
Lastfrekvens	Antall lastsykluser per tidsenhet.
Egenfrekvens	Frekvensen systemet får når konstruksjonen er overlatt til seg selv (ingen laster påført annet enn egenvekt).
Forholdstall	Helningsforholdet mellom høyde og bredde i konstruksjonen.

Figurliste

Figur 1: Murdam med tetning lagt i mørtel.....	6
Figur 2: Murdam med betongplate.....	6
Figur 3: Murdam med torvtetning.....	6
Figur 4: Skjærbrudd i tørrmurt dam, tilpasset fra [13].....	9
Figur 5: Vanntrykk mot dam med skrå helning.....	16
Figur 6: Vanntrykk mot murdam uten skrå helning.....	17
Figur 7: Ikke drenerende og drenerende poretrykk.....	18
Figur 8: Visning av poretrykk.....	18
Figur 9: Snittingsprinsipp ved beregning av stabilitet for murdammer.....	20
Figur 10: Lastbilde og mulige bruddlinjer for glidning.....	21
Figur 11: Glidemotstand og helningsvinkel [15, s. 13].....	23
Figur 12: Plassering av resultant.....	24
Figur 13: lastbilde uten hensyn til helning.....	25
Figur 14: Dekomponering til vertikale og horisontale krefter.....	25
Figur 15: Illustrasjon av helningsvinkler til terreng.....	25
Figur 16: Poretrykk ved negativ helningsvinkel.....	27
Figur 17: Poretrykk ved positiv helningsvinkel.....	28
Figur 18: HRV-diagram, islast [100kN/m], b[1m].....	30
Figur 19: HRV-diagram, islast [100kN/m], b[2m].....	30
Figur 20: HRV-diagram, islast [100kN/m], b[4m].....	30
Figur 21: Diagramforklaring.....	30
Figur 22: HRV-diagram, islast [40kN/m], b[1m].....	31
Figur 23: HRV-diagram, islast [40kN/m], b[2m].....	31
Figur 24: HRV-diagram, islast [40kN/m], b[4m].....	31
Figur 25:DFV diagram b[1m].....	32
Figur 26:DFV diagram b[2m].....	32
Figur 27:DFV diagram b[4m].....	32
Figur 28: TLM, b[4m] islast [100kN/m] helning -10 og 10, dekomponering sammenligning.....	33
Figur 29: BP, b[4m] islast [100kN/m] helning -10 og 10, dekomponering sammenligning.....	33
Figur 30: TT, b[4m], islast [0kN/m], dekomponering sammenligning.....	34
Figur 31: TLM B[1m].....	37
Figur 32: TLM b[2m].....	37
Figur 33: TLM b[4m].....	37
Figur 34: BP b[1m].....	37
Figur 35: BP b[2m].....	37
Figur 36: BP b[4m].....	37
Figur 37: TT b[1m].....	37
Figur 38: TT b[2m].....	37
Figur 39: TT b[4m].....	37
Figur 40: TLM med påført [40 kN/m] islast b[4m].....	39
Figur 41: BP med påført [40kN/m] islast, b[4m].....	40
Figur 42: TT HRV [0kN/m] islast b[4m].....	40
Figur 43: TLM, endring i fribord.....	43
Figur 44: BP, endring fribord.....	44
Figur 45: TT, endring fribord.....	44

Figur 46: TLM, veltestabilitet, fribord 0, 1 og 2 [m].	45
Figur 47: BP, veltestabilitet, fribord 0, 1, 2 [m]	45
Figur 48: TT, veltestabilitet, fribord 0, 1 og 2 [m].	46
Figur 49: TT, ulikt fribord, helningsvinkel -10°.	53
Figur 50: TLM, ulikt fribord, helningsvinkel 10°	53
Figur 51: TLM, Fokus på grafer som ligg nært hverandre	54
Figur 52: BP, ulikt fribord, helningsvinkel -10° og 10°.	55
Figur 53:BP, Fokus på grafer som ligg nært.	55
Figur 54: TT, ulikt fribord, helningsvinkel -10° og 10°	56
Figur 55: TT, Fokus på grafer som ligg nær hverandre.	57
Figur 56: Sammenligning av veltestabilitet, endring i fribord og de ulike damoppbyggingene	58

Tabelliste

Tabell 1: Egenvekt murdam ut fra materialvalg [11, s. 12].	15
Tabell 2: Friksjonsvinkler [11, s. 12].	21
Tabell 3: Sammenligning av dekomponering ved glide stabilitet	35
Tabell 4: Oversikt over avstand til krav for konstruksjonene	38
Tabell 5: Sammenligning av veltestabilitet uten dekomponering og med dekomponering.	41
Tabell 6: Oversikt over godkjente dammer, bredder der ingen dammer er godkjente er utelatt.	42
Tabell 7: Godkjente dammer fra høyde 2 – 10, bredder der ingen helningsvinkler er godkjente er utelatt.	49
Tabell 8: Utsnitt av tabell 7.	58
Tabell 9: Godkjente murdammer med torvtetning ved 35kN/m islast. Bredder der ingen helningsvinkler er godkjent er utelatt.	59
Tabell 10: Sammenligning av glide stabilitetskrav.	62

1 Innledning

I dette kapitlet vil det bli gjennomgått bakgrunn og formålet med oppgaven. Basert på dette vil problemstillingen bli fremstilt.

1.1 Bakgrunninformasjon

I 1791 mistet 22 mennesker livet da Kobberdammen i Trondheim gikk til brudd. Dambruddet skjedde som en konsekvens av snøsmelting og kraftfullt regn over en lengre periode[1]. Damsikkerheten er blitt bedre siden den gang, og damforskriften ble innført i 1981 som et regelverk for nye dammer og oppgradering av allerede etablerte dammer. I tillegg er det krav om at sikkerheten på alle dammer skal revurderes hvert 15./20 .år, avhengig av konsekvensklasse [2]. Damforskriften, i dag kalt damsikkerhetsforskriften, har siden 1981 blitt jevnlig revidert [3].

I dag hører vi stadig om klimaendringer og ekstremvær. I Norge kjennetegner vi klimaendringene med blant annet økt nedbør, minkende isbreer og flere flommer [4]. Dermed er damsikkerheten igjen viktig for å unngå brudd og tap av menneskeliv. Det er viktig at dagens dammer tåler lastbilde de muligens kan bli utsatt for. I denne oppgaven vil vi ta for oss stabilitetsberegninger på murdammer, og hvilke laster som er sårbare for ulike oppbygginger.

1.2 Prosjektbeskrivelse

Opgaven tar for seg stabilitetsberegninger og sammenligning av murdammer. Det vil analysere tre ulike oppbygginger av dammene: murdam med tetning lagt i mørtel, murdam med betongplate og murdam med torvtetning.

1.3 Problemstilling

Problemstillingen er formulert til **“Hvilke murdamoppbygging er mest stabil ved ulike lasttilfeller og variabler?”**. Samarbeidspartnerne ønsket at vi ikke skulle se på en spesifikk murdam, men vurdere ut fra murdammer med ulike variabler.

Hovedoppgaven vil være å teste hvordan ulike helningsvinkler på terrenget, snitt av damhøyder, kronebredde og lasttilfeller påvirker stabiliteten. Dette vil gi et innblikk på hvilke murdammer som ligger innenfor kravene for glide- og veltestabilitet. I tillegg vil det bli sett på hvordan dekomponering av helningsvinkel og fribord endrer stabiliteten.

I oppgaven vil det undersøkes lave dammer. Lave dammer er definert som en dam med damhøyde under 15 meter, eller damhøyde mellom 5 – 15 meter som rommer mindre enn 3 millioner kubikkmeter vann [5].

For å øke leseren sin forståelse vil dataen bli presentert i diagrammer, tabeller og figurer.

1.4 Verktøy

Ved oppstart av oppgaven fikk gruppen tilgang til måltegninger over tre dammer i Bergen kommune. Dette ble grunnlaget for oppgaven, der måltegningene er eksempler på de tre ulike murdamoppbygningene gruppen skal vurdere. Tegningene bidro til å gi en dypere forståelse av konstruksjonene og hvordan de ulike lastene opptrer.

Litteratursøk

For å oppnå mer kunnskap om murdammer har det blitt gjennomført litteratursøk. Litteratursøk handler om å identifisere og systematisere den eksisterende litteraturen om emnet [6].

Litteraturen er funnet gjennom kursmaterialer, rapporter og NVE sine databaser. Ved oppstart av oppgaven hadde gruppen begrenset forståelse om emnet og litteratursøk ble brukt som et verktøy for å utvide forståelsen og kunnskapen. Ved videre arbeid av oppgaven har innhenting av informasjon fra litteratursøket vært et godt supplement.

Forskrift om sikkerhet ved vassdrag, også kjent som damsikkerhetsforskriften, danner dimensjoneringsgrunnlaget for oppgaven. Forskriften er utarbeidet av Energidepartementet og siste utkast kom 1.juli 2023 . For å få bedre forståelse for hvordan tilfredsstillende forskriftens krav er det blitt utarbeidet veiledere til forskriften[3], [7].

Autodesk Revit

Autodesk Revit er en programvare som tillater ingeniører å modellere bygninger og infrastruktur i 3D. Revit tilbyr og tverrfaglig samarbeid mellom ulike fagområde [8].

I denne oppgaven ble Autodesk Revit benyttet til å illustrere de ulike damtypene. Dette er for å øke leseren sin forståelse av oppgaven.

PTC Mathcad

Beregninger har blitt utført i PTC Mathcad Prime. Mathcad er en avansert programvare laget for å løse, analysere og dokumentere matematiske problem. (Mathcad, u.å.).

I oppgaven ble Mathcad brukt som en digital notatbok der formler og variabler ble definert. Dette forenklet korrigeringen av beregningene. Det krevde kun å endre den ønskede variabelen, og deretter beregnet programmet automatisk en ny løsning med den endrede variabelen.

Microsoft Excel

Excel er utarbeidet av Microsoft, og er et digitalt regneark. Regnearket kan bli brukt til å utføre beregninger, og å presentere resultatene i tabeller og diagrammer [9].

I oppgaven ble Excel benyttet for å presentere resultatene fra beregningene utført i Mathcad. Ved hjelp av diagrammer og tabeller kan en tydelig se hvordan ulike variabler påvirket resultatene. Dette forenklet dataanalysen.

2 Bakgrunnsteori

I dette kapitlet vil det gis relevant teori som legger grunnlag for oppgaven.

2.1 Lover og forskrifter

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) er eid av staten, og direktoratet ligger under Energidepartementet. Departementet har utviklet Damsikkerhetsforskriften, mens det er NVE sin hovedoppgave å regulere vann- og energiresursene i Norge [10].

Damsikkerhetsforskriften sitt formål er etter §1-1 å ivareta sikkerheten ved vassdrag, og å unngå skader/ulykker på mennesker, miljø og eiendom[7, Pargr. 1–1]. Skader på mennesker, miljø og eiendom kan skje ved at dammen går til brudd. Forskriften inneholder åtte kapitler med blant annet krav til klassifisering, dimensjonering, faglige kvalifikasjoner og utførelse [7]. I tillegg til damsikkerhetsforskriften har NVE utarbeidet veiledere som utdyper kravene i forskriften og gir forslag til aksepterte løsninger [3].

Veilederne til damsikkerhetsforskriften gir eksempler på hvordan det er mulig å tilfredsstillere kravene gitt i forskriften [3]. Spesielt er veileder for laster og dimensjonering, betongdammer og murdammer hyppig brukt gjennom utarbeidelse av oppgaven.

For murdam med sentral torvtetning og tørrmurte dammer gjelder *retningslinjer for murdammer*, denne tar for seg §5 – 12 i damsikkerhetsforskriften[7, Pargr. 5–12].

Tørrmurt dammer med betongplate blir betraktet som en gravitasjonsdam i betong. *Retningslinjer for betongdammer* skal nyttes i disse tilfellene [11, s. 6].

2.2 Historisk utvikling av murdammer

De første murdammene i Norge ble bygget på 1600-tallet. Dette var tørrmurte dammer. Dammer har blitt bygd siden 1200-tallet, men disse dammene var hovedsakelig i tre. Ved oppføring av murdammer ble det tydelig at disse dammene hadde bedre levetid enn de tidligere tredammene. Etter hvert ble sement innført ved bygging av dammer, og det ble begynte å se på muligheten for å kombinere dette i forbindelse med murdammer. Ved videreutvikling ble betongdammer innført, og er de som benyttes mest av i dag [12, s. 3].

2.3 Beregninger før og etter Damsikkerhetsforskriften

Før damsikkerhetsforskriften trådte i kraft i 1981[2], ble disse verdiene for stabilitet benyttet i beregningene:

Glidestabilitet: $S = \frac{F}{\Sigma H}$, der S må være mindre eller lik 0,9 – 0,7

Veltestabilitet: $x = \frac{\Sigma \text{stabiliserende moment}}{\Sigma \text{veltende moment}}$, der x må være større eller lik 1,5 – 1,3

Etter Damsikkerhetsforskriften fra 2023 er dette dagens krav:

Glidestabilitet: $S = \frac{F}{\Sigma H}$, der S må være større enn 1,5

Veltestabilitet: $x = \frac{M_s - M_v}{V_{fuk}}$, x må være større enn $\frac{1}{3}B$, der B er bredden på bunnen av dammen.

Dagens krav vil bli utdypes videre i kapittel 4.

2.4 Klassifisering av dam

En dam, også kalt demning, er tillaget for at vannet kan sikres i et magasin. Formålet for å bygge dammen kan blant annet være vannkraft, mølledrift, drikkevann og sagbruk [13].

En dam blir klassifisert ut fra konstruksjonens materiale, tetningstype og konsekvensklasse.

2.4.1 Klassifisering av materialet

Materiellet brukt for å bygge opp dammen varierer veldig. Dette er en oversikt over de ulike type dammene som eksisterer ut fra material [14]:

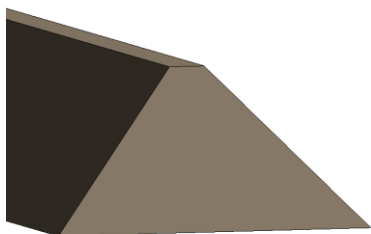
- Jorrdammer – hovedsakelig bygd opp av finmasser.
- Murdam – bygd opp av mur med varierende tetningsmaterialer.
- Steinfyllingsdam – hovedsakelig bygd opp av sprengstein.
- Betongdam – bygd opp av betong.
- Tredammer – hovedsakelig bygd opp av tre [12].

Denne oppgaven tar for seg murdammer. Murdammer er kategorisert under gravitasjonsdam, og egenvekten er viktig for å holde dammen stabil mot velting og glidning [15]. For å oppnå egenvekten som trengs for å holde dammen stabil er damkonstruksjonen relativ massiv.

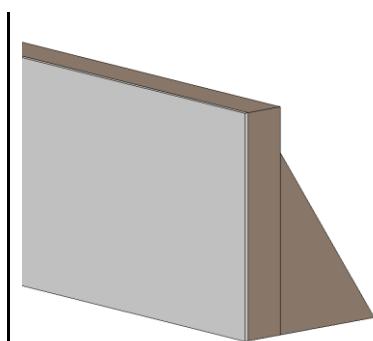
2.4.2 Klassifisering av tetning

En generell oppbygging av murdam består av steiner bygd opp på hverandre og en tetning mot vanninnstrømning [12, s. 4]. Funksjonen til tetningen er å unngå vanninntrenging i dammen og å beholde dammen sin egenvekt. Om vann trenger inn i dammen vil vannet være til hjelp for å minke egenvekten [12, s. 13]

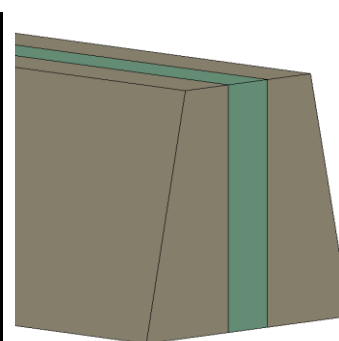
I oppgaven blir det sett på murdam med tre ulike tetninger i form av ulik plassering og materiale. De tre variantene er murdam med tetning lagt i mørtel (figur 1), murdam med betongplate (figur 2) og murdam med torvtetning (figur 3).



Figur 1: Murdam med tetning lagt i mørtel.



Figur 2: Murdam med betongplate.



Figur 3: Murdam med torvtetning.

Murdam med tetning lagt i mørtel, videre kalt TLM, er bygd opp med steinblokker, mellom steinblokkene på oppstrømside ligg det mørtel [12, s. 6]. Mørtel fungerer som bindemiddel mellom steinblokkene og som tetningsmiddel[16]. Denne typen dam er sårbare for forskyvning som et resultat av punktlast i øverste del av dammen, der stabiliteten er liten [12, s. 6, 15].

Murdam med betongplate, videre kalt BP, er bygd opp som en tørrmurt dam, på oppstrømside er det lagt en betongplate, også kalt frontal betongtetning. Plasseringen til betongplaten er med andre ord i front mot vannsiden. Fordelen med betongplaten er at den i tillegg til å holde vannet vekk fra muren, fordeler lastene. Det vil si at lastene ikke treffer som en punktlast på steinene, men fungerer mer som en jevnt fordelt last. Betongplaten bidrar til stabilitet[14, s. 6, 13].

Murdammer med torvtetning, videre kalt TT, er en tørrmurt dam, der torv blir benyttet som tetningsmateriale. Tetningsmaterialet ligger inne i damkonstruksjonen, det vil si at oppbyggingen til denne dammen er mur - tetning - mur. Torv er jordmasser neddykket i vann som ikke har tilgang på oksygen[17]. Vannet som trekkes inn i steinene på oppstrømside vil trekkes inn i torvtetningen og dermed ikke videreføre risikoen for vanninntrenging til neste steindel av dammen. Murdelen mot

oppstrømside sin funksjon er å holde torvtetningen på plass. Det er torvtetningen og murdelen mot nedstrømside som tilfører stabilitet. Torvtetning er enkel å vedlikeholde, og kan lett skiftes ut [12].

2.4.3 Klassifisering av konsekvensklasse

For å øke sikkerheten rundt dammene blir de klassifisert i konsekvensklasse fra grad 0 til 4. §4-1 i damsikkerhetsforskriften stiller krav til at «alle vassdrag skal klassifiseres i en av fem konsekvensklasser». Det er ulike krav til dammene ut fra konsekvensklassen de er i.[7, Pargr. 4–1]. Klassifisering av dammer ble innført i 1992 og hadde tre gjeldende konsekvensklasser. I 2010 ble konsekvensklassene utvidet til fem [18].

Konsekvensklasse 0 er den laveste konsekvensklassen, og konsekvensen av brudd/skader er marginale. Dammer i konsekvensklasse 4 er den klassen med størst bruddkonsekvenser. Dammene deles inn i konsekvensklassene 1 til 4 ut ifra hvor mange berørte boenheter/bygninger, offentlige områder, skade på infrastruktur, miljø og eiendom. [18].

En bolig / bygning beregnes som berørt forutsatt at vannstanden når grunnmuren. Er mer enn en boenhet berørt av brudd er konsekvensklassen 2, konsekvensklasse 1 gjelder kun midlertidig oppholdssted. For å være i konsekvensklasse 4 må over 150 boenheter være berørt av bruddet. For offentlige områder er kriteriet for å bli berørt at området er satt under vann. Eksempler på slike områder er parker, strender og lekeplasser. [18].

For valg av konsekvensklasse med skade på infrastruktur blir ikke de bestemt ut fra kvantitative målinger. Disse vurderes ut fra ordene “sterkt trafikkert ... stor betydning for liv og helse”, “middels trafikkert ... stor betydning for liv og helse” og “mindre trafikkert ... betydning for liv og helse”.

3 Damsikkerhet og skadeårsaker

I Norge er det totalt 4465 registrerte dammer. Brudd på dammer kan føre til store konsekvenser i form av skader og menneskeliv. Det er krav om at sikkerheten på alle dammer evalueres hvert 15./20. år, avhengig av konsekvensklasse. Oppdages mangler fra Damsikkerhetsforskriften skal dammen rehabiliteres. Det antas at rundt 100 dammer blir rehabilitert eller bygget nye hvert år [2].

Det er avgjørende å tilegne seg kunnskap om skademekanismer for å utføre riktige stabilitetsberegninger og unngå dambrudd. For å bedre forstå hvilke stabilitetsberegninger som er nødvendige må kunnskapen om mulige skadeårsaker og skadetyper økes.

3.1 Skadeårsaker

Skader som kan påvirke dammer er både skader på fundament og skader på selve konstruksjonen. FornybarNorge påpeker at lave dammer sjeldent har brudd i fundament [19]. Derfor vil det i oppgaven kun bli fokusert på skader på konstruksjonen.

FornybarNorge kom i 2017 med en rapport som viser at de siste bygde murdammene ble oppført mellom 1960 og 1970. De fleste murdammene ble bygget mellom 1900 og 1950. I tillegg er det rundt 200 murdammer med ukjent alder. Med andre ord er mesteparten av murdammene over 70 år gamle [19]. Karakteristisk dimensjoneres dammer for 100 års returperiode [20]. Aldring kan dermed være en skadeårsak for murdammer [21].

Feil i prosjekteringen eller utførelsen av en dam kan føre til skader. Dette kan gi feil ved valg av material og/eller lavere stabilitet enn antatt. Rapporten fra FornybarNorge påpeker at de første fem årene av betong- og murdammer sin levetid er kritiske, da mange av dammene går til brudd i løpet av denne perioden som en konsekvens av feil i prosjektering eller utførelse [19, s. 27]. Damsikkerhetsforskriften regulerer dokumentasjonskrav gjennom byggefasen for å redusere sannsynligheten for feil [7, Pargr. 6–1].

Uforutsette belastninger som jordskjelv, istrykk, poretrykk, flom og overløp er laster som kan føre til skade [21]. Dette er laster som ikke er unngåelige og oppstår plutselig, men lastene kan bli tatt hensyn til ved dimensjonering. Selv ved dimensjonering på forhånd vet man aldri hvor stor disse lastene blir før de inntreffer.

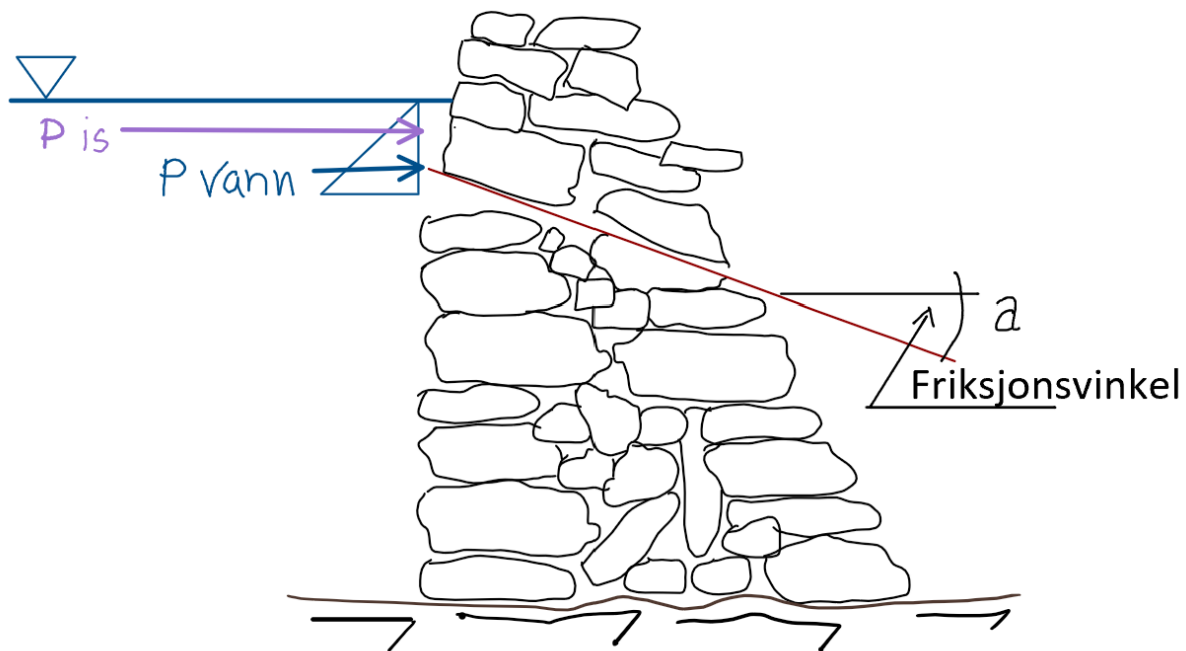
3.2 Skadetyper

3.2.1 Glidning

Er en dam utsatt for glidning vil det bety at dammen er utsatt for en skjærkraft utenfor sin egen bæreevne. Det er friksjonen mellom steinene og egenvekten i den tørrmurte dammen som holder hele konstruksjonen sammen, derfor må skjærkraften overstige egenvekten til dammen eller friksjonskraften på punktet skjærkraften virker for å danne et skjærbrudd.

For BP vil glidningen skje for hele dammen, det resulterer i en generell forskyvning av dammen. For TT og TLM kan glidningen skje for hele dammen, men og for mindre deler av dammen. Det vil oppstå friksjon mellom steinene, og utglidningen vil følge friksjonsvinkelen, slik som vist i figur 4 [12, s. 15].

Skjærbrudd i tørrmurt dam



Figur 4: Skjærbrudd i tørrmurt dam, tilpasset fra [13].

Glidning av lag gis forvarsel ved syning av lagvis forskyvning der utglidningen skjer. Skaden kan skje over lengre tid, og det kan ta flere år før man tydelig kan se at steinene har forskjøvet seg. [12, s. 15]

Ved observasjon av utglidning av enkeltsteiner anbefales det at murdammer uten betongplate vurderer instrumenter for å følge med på utglidning [21].

3.2.2 Velting

Velting av en dam oppstår når den totale summen av horisontale og vertikale krefter på dammen er større enn dammens egenvekt. Dammens egenvekt er avgjørende for å oppnå stabilitet mot velting [23].

Grunnet det arbeides med tørrmurt murdam som er drenerende og dermed ikke monolittiske, vil ikke belastning over egen bæreevne resultere i velting om egen geometri, men heller resultere i skjærbrudd eller utrasning, hel- eller delvis [24].

BP derimot er mer tilnærmet en monolittisk konstruksjon. Dersom dammen går til brudd, vil det gi en begynnende veltebevegelse og deretter få utrasning fra nedstrømssiden. Det er derfor viktig å sjekke veltestabilitet, selv om det ikke er registrert noen dambrudd på grunn av velting, da resultatet vil se ut som en utrasning [24].

For å finne dammens veltestabilitet regnes plassering av resultantkraften, R . Damsikkerhetsforskriften gir krav til maksimal plassering av resultanten [7, Pargr. 5–11]. Resultanten er illustrert i figur 12 i kapittel 4.3.2.

3.2.3 Flom

Flom skjer når store mengder vann oversvømmer landområder som til vanlig er tørre. [25]. For gravitasjonsdammer er flom den naturkatastrofen som gir flest dambrudd [22, s. 32].

Et resultat av flom er overtopping. Overtopping skjer når vannstanden renner over høyeste kant på damkonstruksjonen. Da lager vannet egne vannveier, som ikke er planlagt av fagfolk. Vannet strømmer ned på nedstrømsside og kan forårsake erosjon og utrivning av steinblokkene. Overtopping skjer typisk ved økt vannstand, for eksempel ved ekstremvær [12, s. 18].

3.2.4 Vanninntrenging

Murdammer som ikke har tetning mot oppstrømsside, eller murdammer der tetningen mot oppstrømsside er ødelagt er utsatt for vanninntrenging. Dersom tetningen blir ødelagt og vannet begynner å lekke inn, er dammen utsatt for lekkasje. Lekkasje i dammen vil føre til oppdrift, og stabiliteten blir redusert. Dette gjør dammen sårbar for ulike belastninger. Oppstår lekkasje i konstruksjonen kan frostsprengning og erosjon skje inne i selve dammen [12, s. 17]. Erosjon oppstår når steinene blir transportert vekk av naturkrefter [26].

Ved frost vil vannet fryse og utvide ledig plass mellom steinene. Istrykket kan over lengre tid føre til løsriving av steinene, som gjør murdammen svært sårbar [21, s. 29]. I tillegg til løsriving av steiner er en annen fare ved vanninntrenging at steinene sprekker opp. Dette skjer ved at vannet kommer inn i hulrom i steinene, fryser og utvider hulrommet.

For å unngå lekkasje i dammen er det viktig at dammen er godt drenert. Dammene blir laget med drenasjeveier som leder vannet ut av dammen [12, s. 14].

3.3 Potensielle skader på murdammer i oppgaven

Videre blir det sett på skader spesifikk for de ulike tetningene brukt i denne oppgaven.

3.3.1 Murdam med tetning lagt i mørtel

Ved skader på tetningen kan det føre til lekkasjer, løsrivning og/eller forskyvning av muren. Tetningen kan bli ødelagt ved bølgeslag eller av andre påkjenninger som skyver mot konstruksjonen [12].

Betong og mørtel er like komposittmaterialer, forskjellen er at mørtel ikke har grove tilslag. Derfor vil lignende nedbrytningsmekanismer beskrevet for betong i kapittel 3.2.2 også være aktuelle for TLM [27].

3.3.2 Murdam med betongplate

Veileder for overvåking av vassdrag presenterer en matrise for betongdammer som viser skadeårsaker og skadetyper, denne er hentet fra ENFO si håndbok *Tilstandsbeskrivelse av betong og fyllingsdammer* [21, s. 28].

Uønsket åpninger i betongplaten, også kalt riss eller sprekker, kan skape problemer for dammen. Det er flere skadeårsaker som kan føre til riss i betongplaten, dette er bare et par eksempler på skadeårsaker:

- Plastisk svinn. Plastisk svinn skjer når fersk betong begynner å herde. Om betongen er seig og tett vil ikke vann få mulighet til å trekke seg oppover i betongen. Samtidig vil vann fra overflaten fordampe. Dette fører til strekkspenninger i overflaten [28].
- Frost. Sprekker i betongen kan føre til skader da vann kan krype inn i kapillære porer og fryse til. Ved frysing av vann vil volumet utvide seg, sprekkene blir større og betongen blir utsatt for avskalling [28].
- Avskalling. Om avskalling av betongplaten skjer over lengre tid uten å bli oppdaget er det fare for at vannet til slutt vil trekke inn i muren og lekkasjer kan oppstå [28].

3.3.3 Murdam med sentral torvtetning

TT er sårbare for nedpressing av torven. Dette er en konsekvens av at muren på en eller begge sider av torvtetningen ikke er sterk nok eller at tetningen ikke er komprimert godt nok. Nedpressingen kan føre til at muren vil bule ut.

Steinene mot oppstrømsside har ingen tetning, de ligger med andre ord stabilt grunnet trykk fra steinene rundt og egenlast. Dermed er denne typen murdam utsatt for vanninntrenging.

Utvasking av torvtetning kan føre til lekkasjer inn i muren mot nedstrømsside. Ved utvasking menes det at torvtetningen trekker til seg så mye vann at den blir flytende og forsvinner ut i vassdraget [21, s. 30].

4 Dimensjonering

I dette kapitlet vil dimensjoneringsprinsipp, laster og formler for beregning av stabilitet presenteres. Det vil bli presentert alle dimensjoneringsprinsippene, men oppgaven vil kun ta for seg beregning i bruddgrensetilstand. Forenklinger innad dimensjoneringen blir gjennomgått i siste delkapittel, 4.4.

4.1 Dimensjoneringsprinsipp

Ved dimensjonering skal laster og lastvirkninger bli kontrollert mot relevante grenseverdier for deformasjoner, rissvidde, kapasitet, krafttretning, materialspenning og vibrasjon. Kontrollene gjennomføres i samsvar med følgende grensetilstander, så langt de er relevante for de ulike vassdragsanlegg[20, s. 9]:

- Bruddgrensetilstand
- Ulykkesgrensetilstand
- Bruksgrensetilstand
- Utmattingsgrensetilstand

Bruddgrensetilstand er en kontroll som gjennomføres for dimensjonerende laster med aktuelle lastkombinasjoner. Kombinasjonene som skal kontrolleres i bruddgrensetilstand er [11]:

- $HRV + \text{islast} + \text{poretrykk} + \text{egenlast}$
- $DFV + \text{poretrykk} + \text{egenvekt}$

I de fleste tilfeller er det kontrollen for høyeste regulerte vannstanden, HRV, som prioriteres grunnet islast. Her beregnes det kun fribord som avstand fra topp høyde på murdam og ned til HRV [20, s. 10].

Dimensjonerende flomvannstand (DFV) skal legges til grunn ved kontroll i bruddgrensetilstand. Her skal fribord tas i betraktning dersom det har en innvirkning på konstruksjonens stabilitet og/eller kapasitetsutnyttelse [20, s. 11].

Fribord, også kjent som vannstandsvariasjoner, er differansen mellom konstruksjonens topphøyde og dimensjonerende flomvannstand. Denne kan være med på å kompensere for usikkerheten i beregningene, derav kan vannstanden senkes for å øke stabilitet til konstruksjonen. Resultatet av dette vil være variasjon av flomvannstander og vanntrykket [29].

Ulykkesgrensetilstand er en viktig kontroll som tar hensyn til ulykkeslaster som flom, jordskjelv og skred. Grenseverdiene i kontrollen kan avvike fra tilsvarende verdier som gitt for bruddgrensetilstand. Ulykkeslastene skal kontrolleres med en kombinasjon av andre laster der det er relevant. Derimot kan

det ses bort ifra at det vil opptre flere ulykkeslaster samtidig. Skader på murdammen kan aksepteres dersom skaden ikke videreutvikles og resulterer i alvorlige konsekvenser [20, s. 10].

I **bruksgrensetilstand** kontrolleres konstruksjonen for mulige deformasjoner ved tetting, bevegelighet og opplagringsbetingelser. Det skal settes grenser som gir hensyn til de aktuelle egenskapene murdammen har som deformasjonene ikke må overskrides. Resultatet er oppsprekking og deformasjoner som gir reduksjon i konstruksjonen sin bestandighet og/eller funksjonsdyktighet. [20, s. 10]

Utmattelsesgrensetilstand er dynamisk påkjente konstruksjoner. Det brukes en utmattingskurve for materialet under kontrollen som gir resultat om spenningsvariasjoner. Dersom konstruksjonen utsettes for varierende last som gir utslag for skadelige svingninger, skal det dokumenteres at lastfrekvensen ikke samsvarer med konstruksjonens egenfrekvens, dette vil blant annet skyldes enten overlast eller underutnyttelse. Dette utføres i henhold til anerkjente metoder [20, s. 11].

Alt som dimensjoneres skal dokumenteres i henhold til NVEs forskrifter og retningslinjer. Dimensjoneringsstandard fra Norsk Standard (NS) kan benyttes om forskrifter og retningslinjer fra NVE ikke er tilstrekkelige [20, s. 8].

4.2 Laster

Laster er definert som «enhver påvirkning som medfører bevegelse, deformasjon, spenninger eller tøyninger i konstruksjonen» [20, s. 4]. Det er avgjørende å ta hensyn til laster gjennom dammens levetid, dette inkluderer byggefase, første gangs belastning og driftsfase. Dei ulike lastene kan deles inn i tre hovedgrupper: permanente laster, variable laster og ulykkeslaster.

4.2.1 Permanente laster

Permanente laster er laster som opptre i store deler av konstruksjonens levetid og som ikke endrer seg. Vanntrykk mellom lavest regulert vannstand (LRV) og HRV, oppdrift og poretrykk i damkropp og i damfundament, egenlast og jordtrykk defineres som permanente laster hos dammer [20, s. 5].

Ved permanente laster er det inkludert en lastfaktor. Denne varierer normalt etter egenvekt, dimensjonerende last og andre laster. Ved beregning av murdammer settes lastfaktoren til 1,0 konstant.

Egenlast

Egenlasten til dammen varierer basert på murens oppbygning og materialvalg. Tabell 1 viser til ulike varianter som kan påvirke tyngdetettheten til murdammene. For å få eksakte resultater ved beregning, er det gunstig å ta prøver av muren, men det er en krevende prosess[11].

Damtype	Tyngdetetthet [kN/m ³]
Naturstein (granitt), [5]	27
Mørtel, [5]	18
Murdam med stein lagt i mørtel	25
Tørrmurte dammer med tilpasset stein i hele tverrsnittet	21
Røysfylling, tørrmurte dammer	16
Leire og silt – vannmettet	20
Torv – vannmettet* (se merknad nedenfor)	13-20

* Torv er i utgangspunktet et porøst materiale, men strukturen i torven kan brytes ned over tid. Egenvekten kan derfor variere med grad av nedbrytning og grad av komprimering. Hvis det ikke er utført prøver, kan det for stabiliserende masser, forutsettes en vannmettet tyngdetetthet på 13 kN/m³. Der vekten av massene er destabiliserende kan en vannmettet tyngdetetthet på 20 kN/m³ benyttes.

Tabell 1: Egenvekt murdam ut fra materialvalg [11, s. 12].

Egenlast, definert som G , beregnes slik:

$$G = \gamma_s * h * b * \gamma$$

Der

$$\gamma_s = \text{Tyngetetthet materiale [kN/m}^3\text{]}$$

h = damhøyde

b = kronebredde

γ = lastfaktor

Ettersom det beregnes på tverrsnittet til murdammen per meter, vil kronelengden konstant være 1 meter. Ved trekantlast vil egenlasten deles på 2.

Vanntrykk

Vanntrykket vil oppstå langs hele oppstrømssiden som en trekantlast. Trykket er lik 0 ved vannoverflaten og øker lineært til dammens bunnpunkt, av prinsippet om hydrostatisk trykk.

Punktlasten av vanntrykket, definert som V_h , er gitt ved formelen:

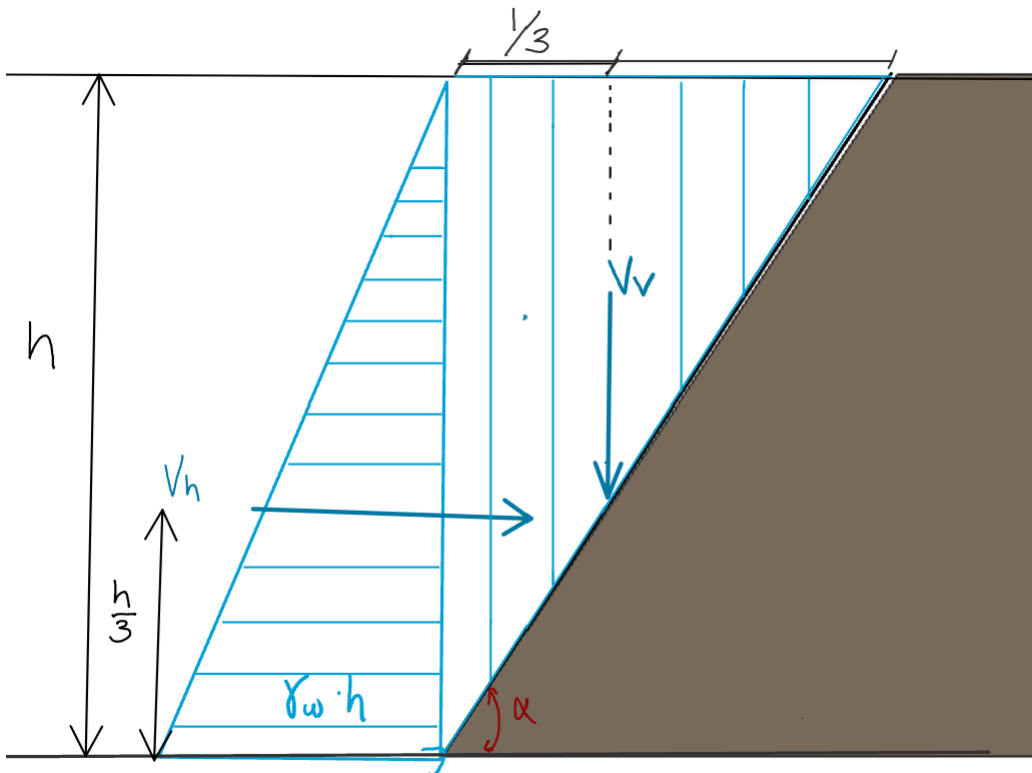
$$V_h = \frac{1}{2} \gamma_w h^2$$

Der

$\gamma =$ tyngtetetthet vann [kN/m^3]

$h =$ vannhøyden

Punktlasten vil ligge $1/3$ av høyden til vannstanden, se figur 5.



Figur 5: Vanntrykk mot dam med skrå helning.

Dersom dammen har en skrå helning med vinkel α , vil det oppstå et ekstra vertikalt vanntrykk (V_v) på konstruksjonen, se figur 5. For å beregne denne er formelen under brukt:

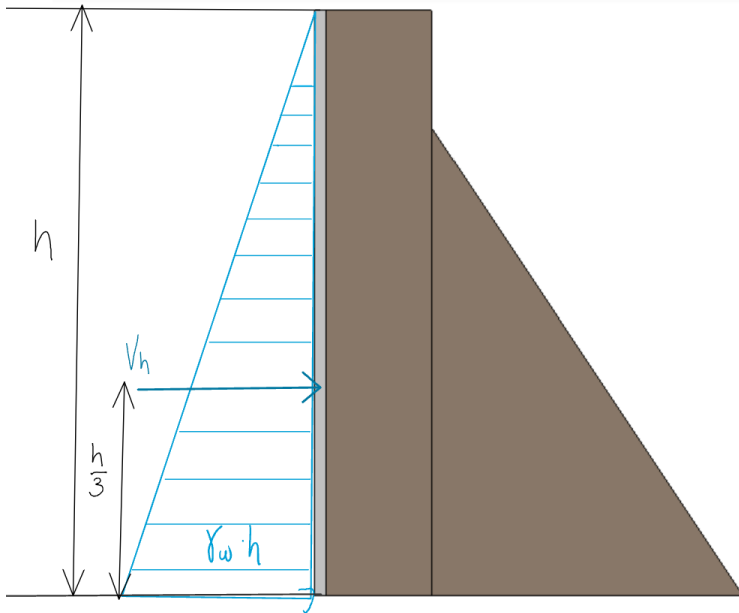
$$V_v = V_h * n$$

Der

$$n = \frac{1}{\text{forholdstall}}$$

Plassering av punktlast til den vertikale vannlasten vil virke $1/3$ av bredden til trekantlasten inn på konstruksjonen (figur 5).

Ved konstruksjoner uten helning mot oppstrømsside vil det kun oppstå en horisontal vannlast slik som vist på figur 6.

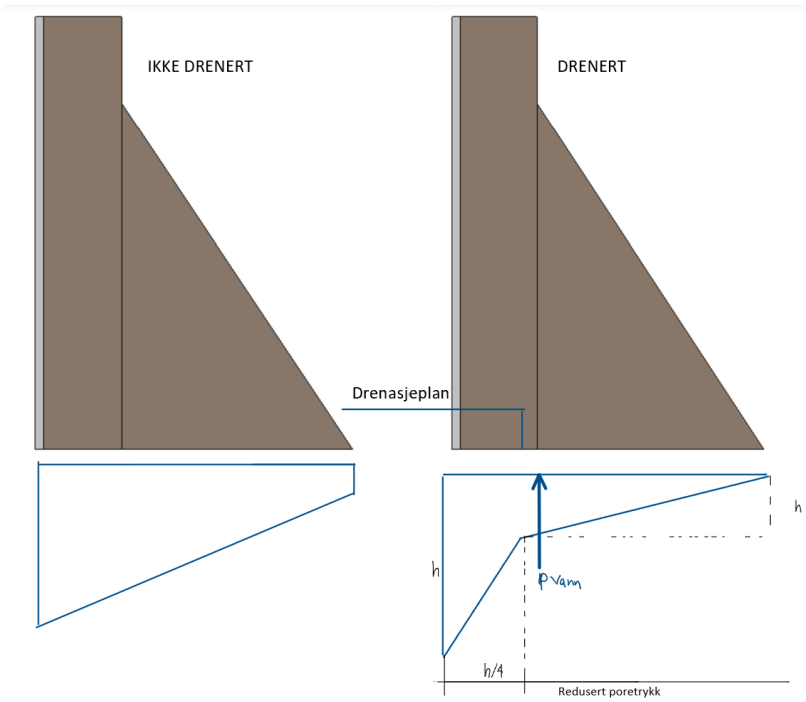


Figur 6: Vanntrykk mot murdam uten skrå helning.

Poretrykk

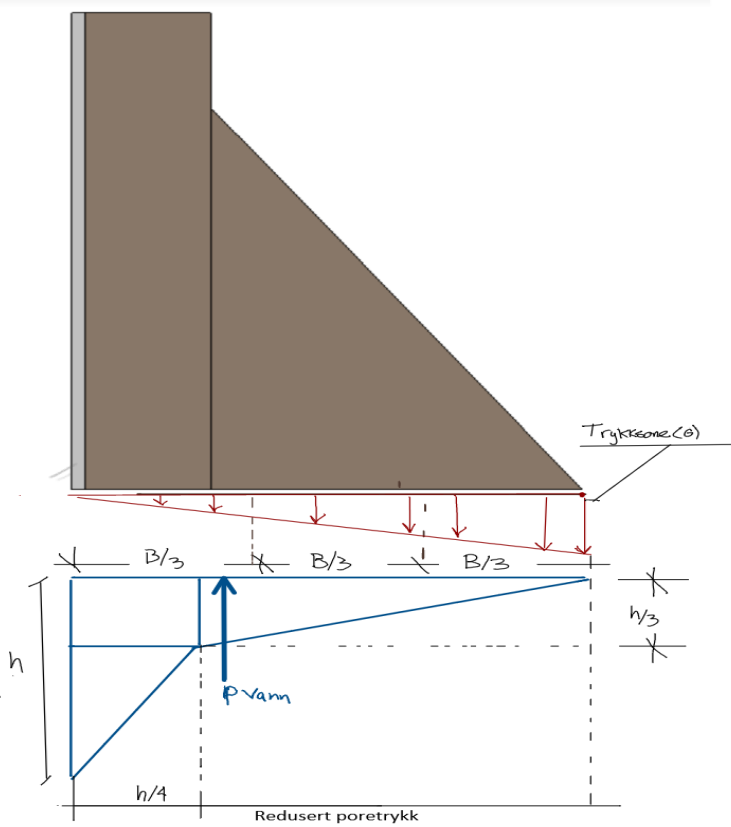
Poretrykk er det hydrostatistiske trykket som er til stede i porerom i undergrunnen. Dette er et resultat av vannets evne til å fylle porene og skaper et vertikalt mottrykk som resulterer i at den effektive egenvekten blir redusert. Dette er destabiliserende for dammen og kan resultere i at dammen får oppdrift [30].

Dersom damkroppen er drenerende, vil poretrykket reduseres mot nedstrømssiden. Om damkroppen ikke skulle være drenerende vil poretrykket reduseres jevnt mot nedstrømsstå, se figur 7 [15].



Figur 7: Ikke drenerende og drenerende poretrykk.

For å regne ut kraften til poretrykket er det nødvendig å dele opp lasten. Det blir brukt grunnleggende mekanikk for å beregne punktlasten som oppstår, se figur 8.



Figur 8: Visning av poretrykk.

Poretrykket avhenger også av grunnlaget murdammen er bygget på. Berggrunnen i Norge er generelt av god kvalitet med lav porøsitet (ofte under 1%), som gjør at mesteparten av vannstrømmingene går langs sprekke i bergmassene [31]. Dette vil og tilsi at poretrykket i Norge generelt er lavere enn andre steder i verden, selv om det selvsagt finnes variasjoner i landet [20]. Ettersom poretrykket er destabiliserende, gir dette en god sikkerhetsmargin for beregning av stabilitet.

Jordtrykk

Murdammer lagt på fjell vil ikke ha et jordtrykk fra grunn. TT vil derimot ha et jordtrykk fra torvtettingen som må tas i betraktning. Ved beregning av jordtrykk fra torvtetting, blir denne formelen benyttet:

$$T_{orv} = k_0 * d * \gamma'_{torv}$$

Der

K_0 = sidetrykkskoeffisient

D = høyde nedstrømsmur

$$\gamma'_{torv} = (\gamma_{torv} - \gamma_w)$$

γ_w = vann tyngdetetthet, konstant 10kN/m³

γ_{torv} = Torvtetting tyngdetetthet

Kraften fra torvtettingen vil ha en destabiliserende effekt på nedstrømsmuren.

4.2.2 Variable laster

Variable laster deles inn i tre kategorier: bruksavhengige laster, deformasjonslaster og miljølaster. Bruksavhengige laster er et resultat av aktivitet og bruk på og rundt konstruksjonen. Deformasjonslaster er laster som skaper deformasjon i konstruksjonen, for eksempel setninger. Miljølaster kommer fra værforhold som for eksempel islast, og geografisk plassering. Disse lastene opptrer midlertidig [20, s. 6].

Av variable laster vil det i denne oppgaven bli sett på islast, da dette kun beregnes i bruddgrensetilstand, som gir lastbilde nevnt i kapittel 4.1.

Islast

Islast er en last mot konstruksjonen som oppstår som følger av frysing av vann i lukkede systemer. Størrelsen på istrykket forutsettes å ligge mellom 100-150 kN/m i Norge. For dammer i laveste konsekvensklasse kan lasten settes til 100kN/m. Verdier lavere enn dette kan aksepteres i spesielle

tilfeller og at det foreligger en begrunnelse bak valget. Islasten opptrer 0.25m under HRV med istykkelse på 0.5m [20].

4.2.3 Ulykkeslaster

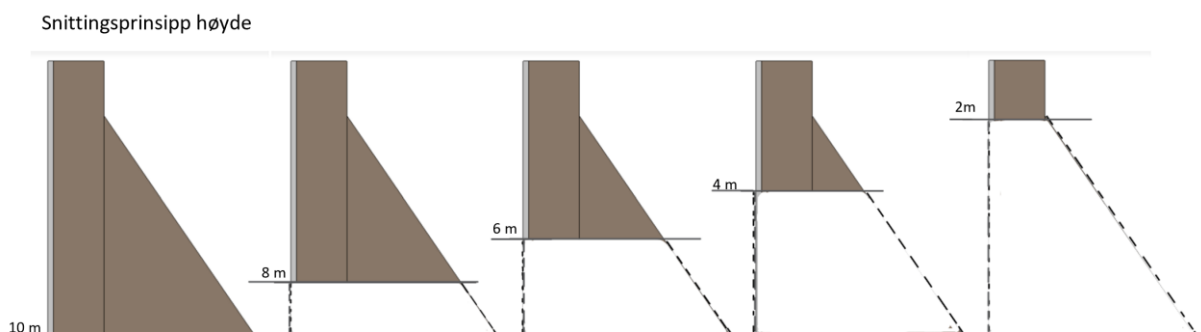
Ulykkelaster er definert som «laster som opptrer ved unormale tilstander, ulykker eller naturkatastrofer». Eksempler på ulykkelaster er maksimal flomvannstand, overtopping, jordskjelv, ekspansjonslast og skred[7, Pargr. 5–3c].

Vassdragsanlegg skal dimensjoneres for flomstørrelser som er beregnet i henhold til retningslinje for flomberegninger. Flomstørrelser avhenger av konsekvensklassen til anlegget. [20] [32]

Ettersom det ikke skal beregnes på ulykkeslaster i oppgaven, vil det ikke bli skrevet mer utdypende om temaet og de ulike ulykkeslastene.

4.3 Beregning av stabilitet

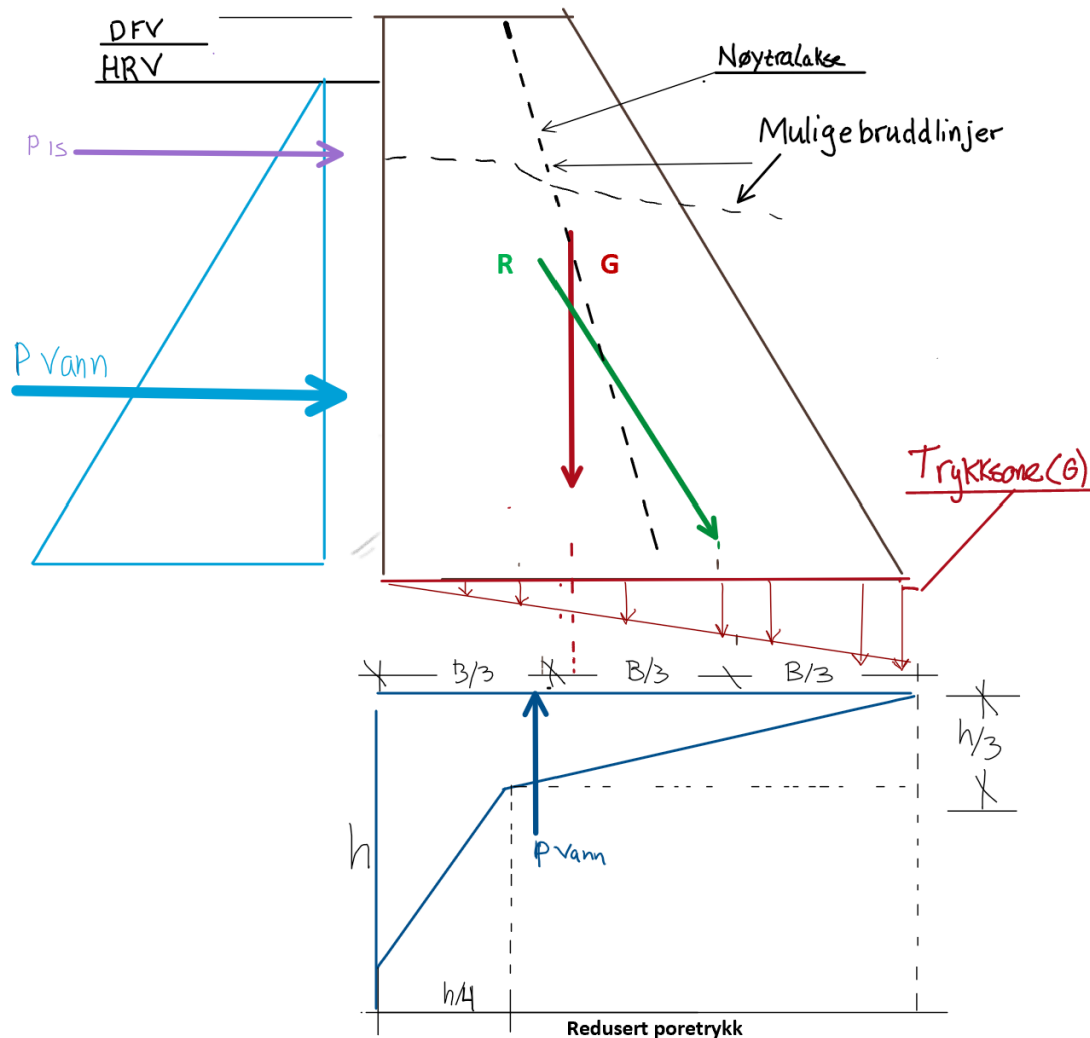
Ved beregning av stabilitet for murdammer blir det kontrollert i to forekomster: glidning og veltning. Beregningene blir gjort i hvert snitt som illustrert i figur 9, for å se at konstruksjonene holder i alle punkt. Beregningene er tatt for tverrsnittet og gjelder per meter kronelengde.



Figur 9: Snittingsprinsipp ved beregning av stabilitet for murdammer.

4.3.1 Glidestabilitet

Kontroll av glidestabilitet utføres ved å se på forholdet mellom de horisontale og vertikale kreftene. Dette er for å sjekke om det er potensiale for at de destabiliserende kreftene er større enn de stabiliserende. Som oftest vil en slik glidningsmekanisme skje i øvre del av dammen, da det er liten egenvekt og stor belastning fra iskraft. Figur 10 indikerer lastbildet og mulige bruddlinjer.



Figur 10: Lastbilde og mulige bruddlinjer for glidning.

Ved skjærbrudd er det friksjonsvinkelen bruddet vil følge. I *Damsikkerhet II* er det blitt gjort en del forsøk som antyder at friksjonsvinkelen vil ligge i størrelse på mellom 32°-38° grader [24, s. 11]. *Retningslinjer for murdammer* har utgitt en tabell på friksjonsvinkler basert på bergart, vist i tabell 2. Ved tørrmurt dam er det oppgitt 33° som friksjonsvinkel [11, s. 12].

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

Tabell 2: Friksjonsvinkler [11, s. 12].

Skjærbrudd skal kontrolleres i ulike snitt på dammen, og ved ulike helningsvinkler for glideplanet. Sikkerhetsfaktoren S , er den totale sikkerhetsfaktoren for glidning og har et krav på $S > 1.5$ [15].

S er gitt ved:

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

der:

ΣH = resultanten av horisontale krefter i glideplanet.

F = bruddkapasiteten til snittet som testes. For et tilfeldig skråplan med en vinkel α fra horisontalplanet, vil formelen være:

$$F = \frac{cA}{\cos\alpha (1 - \tan\varphi * \tan\alpha)} + V_{fuk} * \tan(\varphi + \alpha)$$

Der:

S = sikkerhetsfaktor

φ = friksjonsvinkel

$\tan\varphi$ = friksjonskoeffisient

$\tan(\varphi + \alpha)$ = totale helning for konstruksjonen

α = Glideplanets helning med horisontalplanet

c = kohesjon

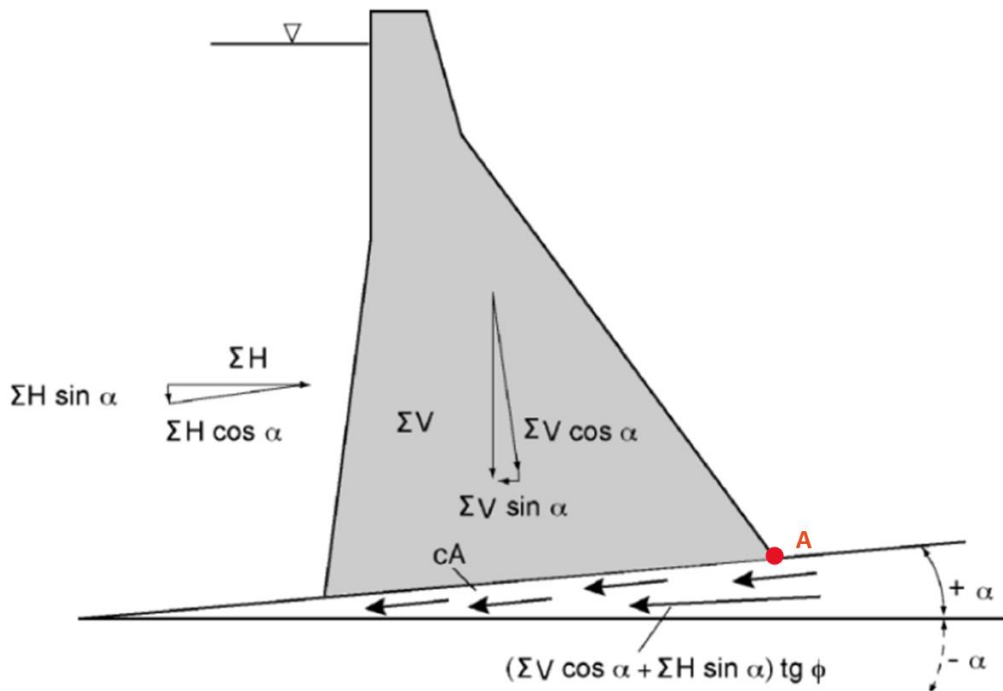
A = Arealet som gir trykk i kontaktflaten

V_{fuk} = Resultanten av vertikale krefter

I *retningslinjer for betongdammer* er det oppgitt at kohesjon (c) ikke skal tas med i beregning, dersom kohesjonen ikke er bestemt gjennom et forsøk. Derfor er F blitt forenklet til:

$$F = V_{fuk} \times \tan(\alpha + \varphi)$$

Figur 11 viser glidemotstand på et plan med helningsvinkel α [15] .

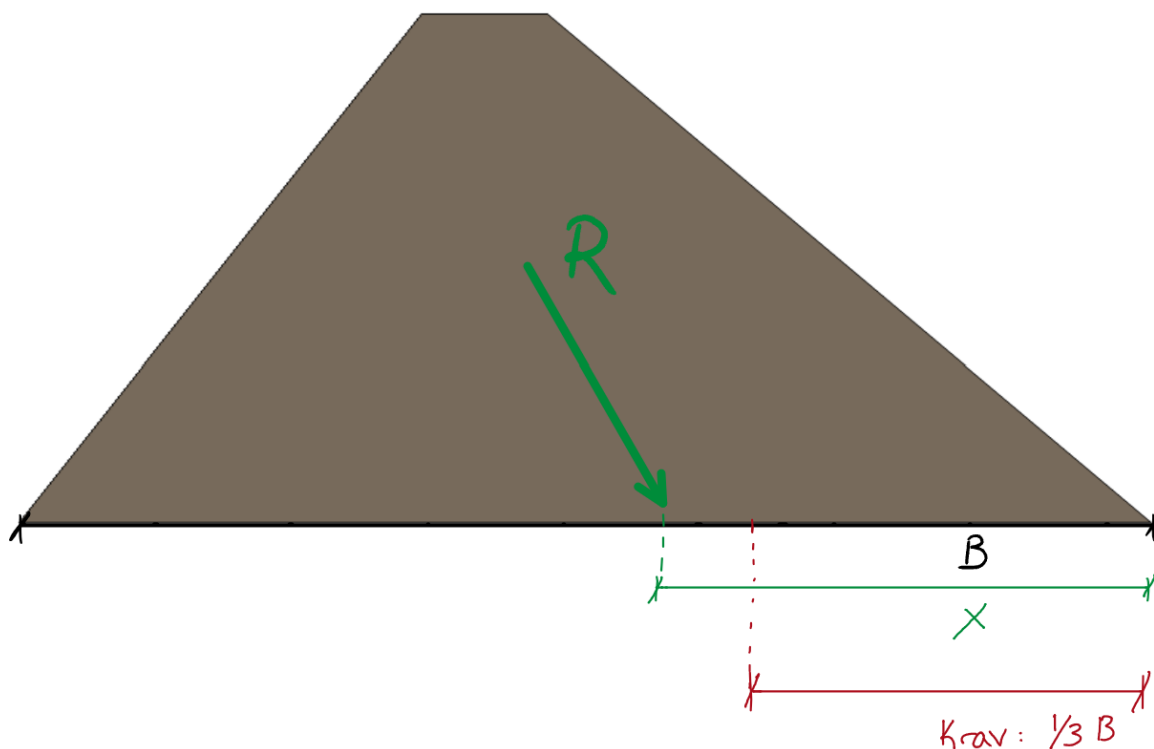


Figur 11: Glidemotstand og helningsvinkel [15, s. 13].

Dekomponering vil spesifiseres lenger ned i kapittelet, der det vil komme tydelige figurer med hvordan helningsvinkelen påvirker konstruksjonen.

4.3.2 Veltestabilitet

Ved beregning for velting, skal alle krefter dekomponeres i vertikale og horisontale komponenter, for å kunne gjennomføre beregning av momentlikevekt. Ved beregning skal momentene tas om tverrsnittet sin nedstrømskant, A (se figur 12). Sikkerheten mot velting baseres på forholdet mellom stabiliserende og veltende moment, der sikkerhetskravet i bruddgrensetilstand er $x > B/3$ fra nedstrømssiden [15, s. 9].



Figur 12: Plassering av resultant.

Figur 12 illustrerer plassering av resultanten ved bruk av formelen over. Vinkelen på resultanten beregnes ved å benytte lengden av H_{fuk} og V_{fuk} , som er samlebegrepene for alle horisontale og vertikale krefter.

For å bestemme avstanden fra resultanten til nedstrømsside, beregnes armen på følgende måte:

$$x = \frac{M_s - M_v}{V_{fuk}}$$

Der:

x = avstand fra nedstrømsside til resultant

M_s = Stabiliserende moment

M_v = Veltende moment

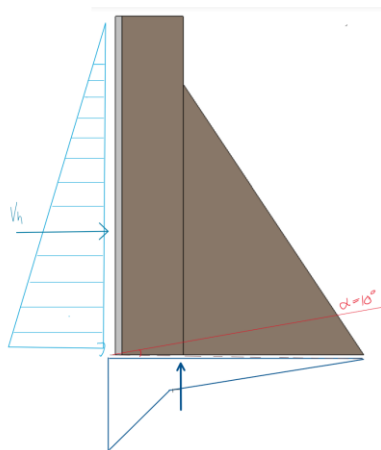
Vekt av muren vil spille en viktig rolle, da tyngden vil gi muren stabilitet. Selve geometrien vil og kunne påvirke, høyere og smalere murer vil ha større sannsynlighet for velting enn bredere og kortere. Bolter og stag kan gi et stabiliserende moment, dette er ikke tatt med i betraktning, men plasseres ofte i snitt der det er høyest sannsynlighet for velting for å stabilisere muren.

4.3.3 Dekomponering

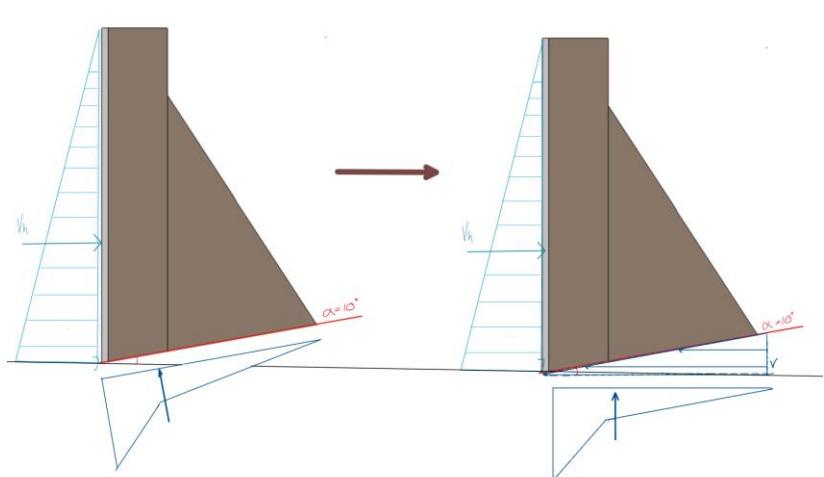
Ved positiv eller negativ helningsvinkel på glidningsplanet, vil det oppstå endringer i lastbildet. Dette gjelder hovedsakelig poretrykket og egenvekten. Uten dekomponering vil det fortsatt bli tatt noe hensyn til helningsvinkel, grunnet den er medberegnet i formelen for sikkerhetsfaktoren til glidestabilitet. Derimot er det ikke tatt hensyn til endringer i vertikale krefter. Ettersom dette ikke er tatt hensyn til, vil ikke helningen påvirke veltestabiliteten. Se figur 13 for lastbildet.

Ved en fullstendig beregning skal alle laster dekomponeres etter helningsvinkel α , vist som på figur 14.

Dette resulterer i et ulikt lastbilde som er betydelig mer utfordrende å arbeide med, det er blitt valgt å lage to Mathcadark, som er lagt som vedlegg. Vedlegg A.1 og A.2 er beregninger lignende figur 13, og vedlegg B.1 og B.2 i henhold til figur 14. Dette vil vise hvor stor forskjell det utgjør i stabiliseringseffekt.

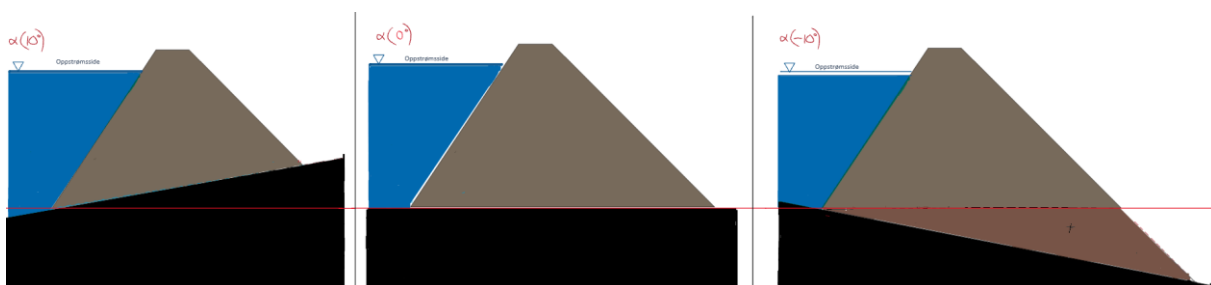


Figur 13: lastbilde uten hensyn til helning.



Figur 14: Dekomponering til vertikale og horisontale krefter.

Ved dekomponering, vil det komme endring i egenvekt i tillegg til det ekstra poretrykket. Dette er vist ved figur 15.



Figur 15: Illustrasjon av helningsvinkler til terreng.

4.4 Forenklinger

Det er utført forenklinger i beregningene for å kunne arbeide med temaet på kompetansenivået gruppen har.

TLM er en bred konstruksjon, og ved bestemmelse av tyngdetetthet til stein i konstruksjonen er det blitt antatt at det ikke er 100% «tørrmurt dam med tilpasset stein» eller «røysfylling», som vist i tabell 1. Det er derfor satt en kombinasjon av disse verdiene, til sikker side. Egenvekten er satt til 18kN/m^3 .

BP har bolter og fjellbolter som ikke vil bli regnet med, dette er til sikker side ettersom det gir økt stabilitet.

TT vil ikke ha et like stort islast som TLM og BP, da det er oppstrømsmuren og torvtetning som vil ta opp kreftene før det treffer nedstrømsmuren. Derimot er det mulig at det blir et overførbart istrykk opp til 35kN/m , noe er ikke tatt med i hovedanalysen. Dette er valgt å teste der konstruksjonen er godkjent uten islast.

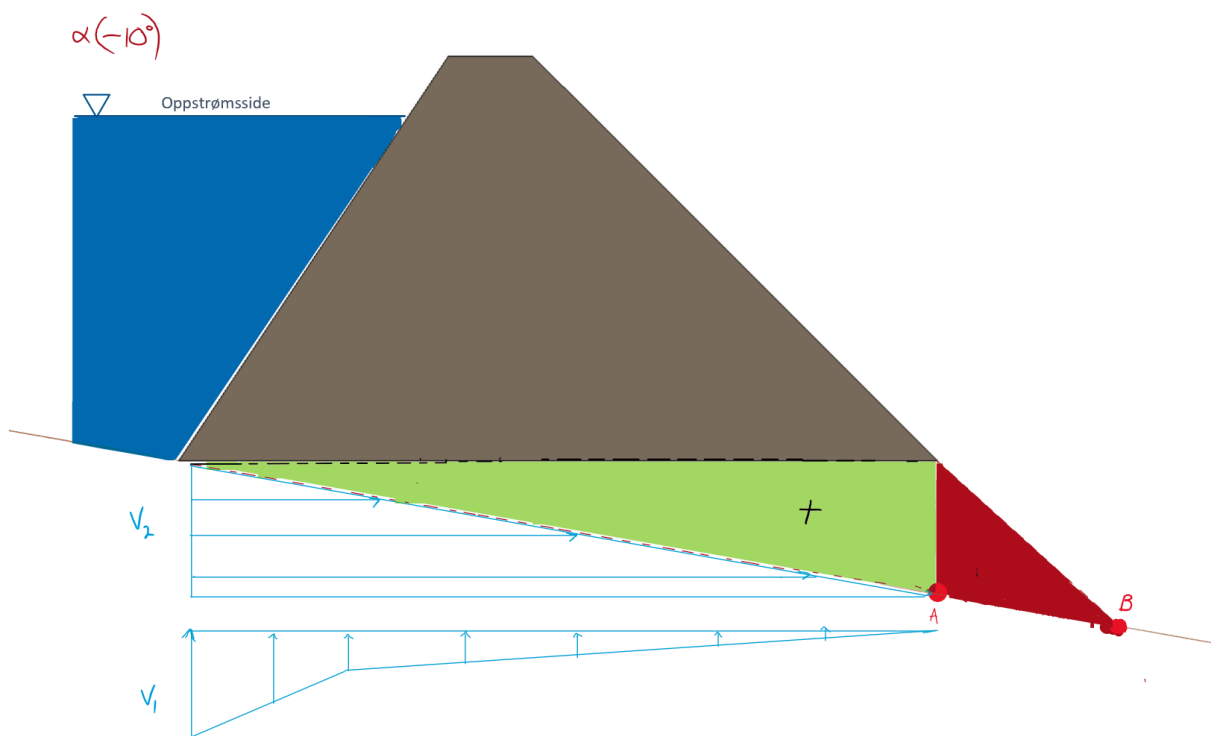
Poretrykket som er beregnet på vil skape et indre poretrykk. Det har ikke blitt tatt hensyn til eller gjort beregninger på, til tross for at det er en destabiliserende kraft. Det indre poretrykket er krevende å regne på, og det er derfor blitt neglisjert.

Fribord kan endres ettersom hva NVE tilsier for hver enkel dam. Dette er en beregningsmessig metode som gruppen ikke har kompetanse til. Derfor vil det ikke beregnes hva som er minimum fribordshøyde, men heller bruke 1 meter som fast for alle tilfeller som testes i hovedanalysen. Deretter vil det sjekkes for hvordan endringen mellom 0-2 meter fribord vil påvirke murdammene. Ved fribord høyere enn 1 meter, vil dette påvirke oppstrømsmuren til TT. Det må derfor beregnes om øvre delen av oppstrømsmuren vil være stabil uten vanntrykk.

Siden oppgaven er i samarbeid med Bergen kommune, har gruppen valgt å se på islast som er realistisk for Bergen. Etter samtaler med veileder i Sweco er islast på 40kN/m valgt, da dette er en passende islast for regionen. Det vil og bli sett på islast på 100kN/m , i tråd med kravene til NVE.

Jordskjelvberegninger må gjennomføres for dammer i klasse 3 og 4. Jordskjelvberegninger vil ikke bli tatt med i beregningene i oppgaven.

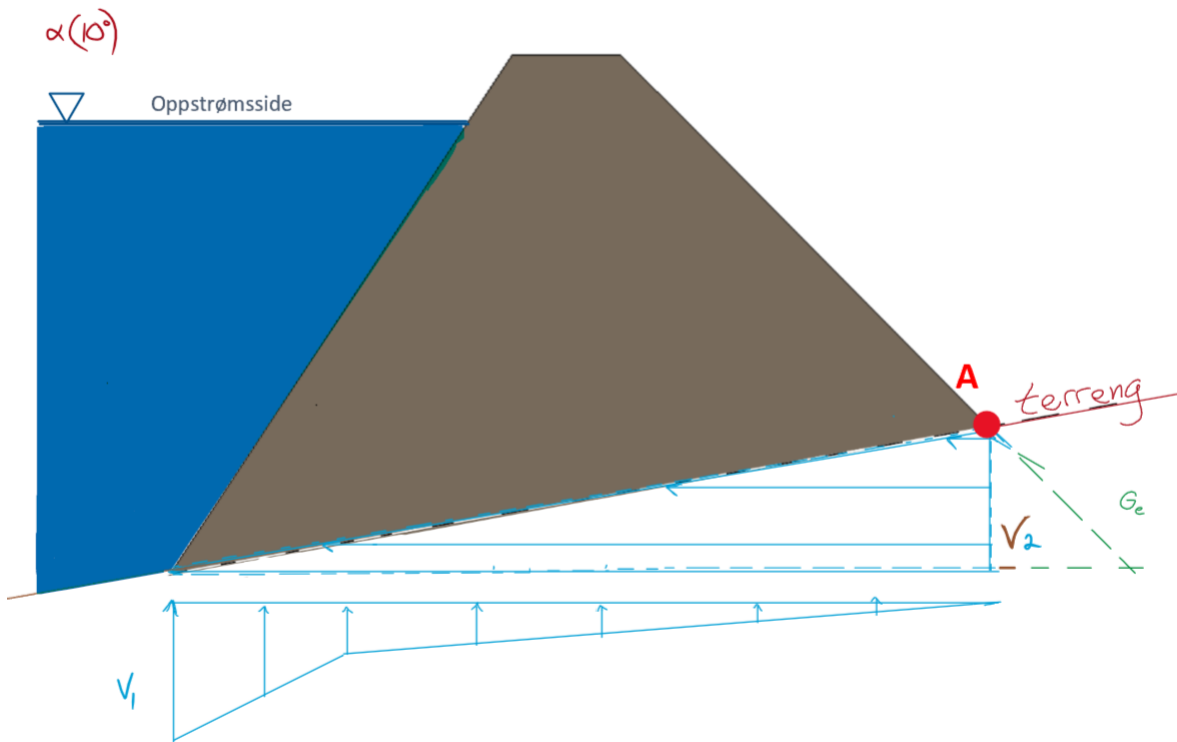
Ved dekomponering vil endringen til en negativ helningsvinkel føre til at momentpunktet A flyttes ned til punkt B, se figur 16. For å forenkle beregningene tas momentberegningen likevel om punkt A, da det er mer beregningsmessig krevende å bruke punkt B. I utgangspunktet innebærer egenvekten av det brune, grønne og røde arealet, illustrert i figur 16. Derimot vil resultatet av forenklingen være at egenvekten kun beregnes for det brune og grønne området ved negativ helning.



Figur 16: Poretrykk ved negativ helningsvinkel

Poretrykket vil ikke ha riktig bredde i forhold til konstruksjonens faktiske lengde, ettersom poretrykket i utgangspunktet virker over hele konstruksjonen.

Ved positiv helningsvinkel skal deler av egenlasten fjernes, og lastbildet vil dermed se ut som i figur 17.



Figur 17: Poretrykk ved positiv helningsvinkel

Etter alle forenklingene som er gjort i beregningen, øker risiko for at murdammene ikke oppfyller sikkerhetskravene, da mange faktorer er satt til sikker side. I **kapittel 6** vil det diskuteres om mulige dårlige resultater er et produkt av forenklinger, eller om det er et reelt lastbilde.

5 Analyse av beregninger

I dette kapitlet vil vi undersøke hvordan følgende variabler påvirker stabiliteten til de ulike damtypene:

- Ulike snitt for damhøyder: 10m, 8m, 6m, 4m og 2m.
- Ulike kronebredder: 1m, 2m og 4m.
- Ulike helningsvinkler for glideplanet: -20° , -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° og 20°

Endring av disse variablene er hovedanalysen i oppgaven. I tillegg har gruppen videre sett på hvordan dekomponering av helningsvinkler og endring av fribordhøyde påvirker stabiliteten. For endring av helningsvinkler og fribord er det valgt å kun se på helningsvinkel -10° til 10° med intervall på 5° , hvorfor dette er valgt vil bli diskutert videre i kapittel 6.2.

Videre i dette kapitlet vil det bli presentert diagrammer for glide- og veltestabilitet. Diagrammene vil kun ta hensyn til helningsvinkel -10° til 10° med intervall på 5° , dette for å minke mengde data per diagram. Vedlegg C.1, C.2 og C.3 er grunnlaget for diagrammene i hovedanalysen, vedleggene legger også grunnlag for tabellen over godkjente dammer som vil blir presentert i kapittel 5.5.

Diagrammene vil bli presentert for et lasttilfelle med alle murdammene, for å kunne se hvordan de ulike konstruksjonene responderer for likt lastbilde.

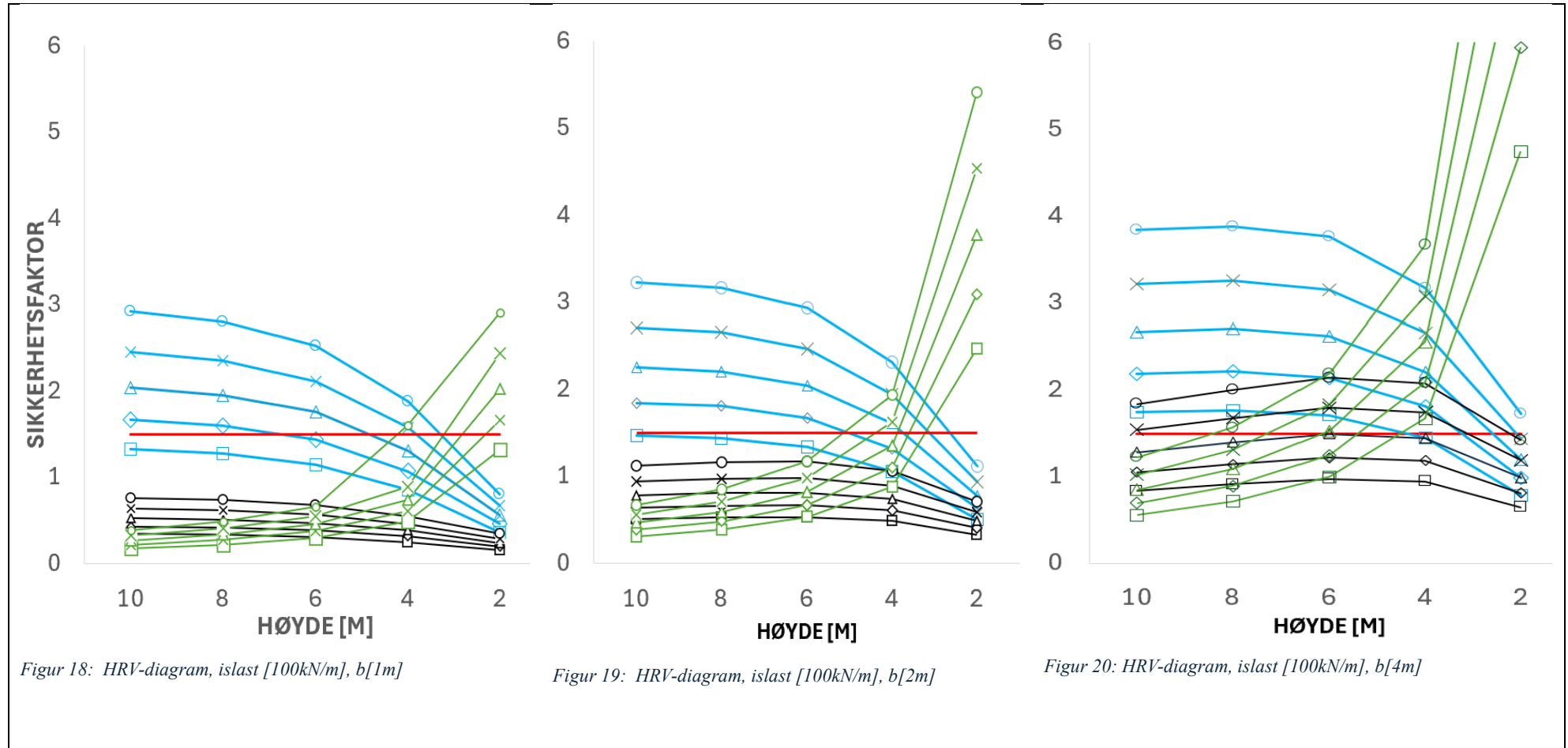
5.1 Glidestabilitet

For glidestabilitet er hvert diagram laget med variasjon i helning og høyde, mens lasttilfellene og bredde vil være konstant. Til slutt vil de mest relevante diagrammene sammenlignes med resultatene fra vedlegg E.1 og E.2 der kreftene er dekomponert, for å se hvor stor differanse det utgjør.

Figurene er skalert likt i alle diagrammene, slik at det er enklere å se hvordan endring av variablene påvirker konstruksjonene. Dette resulterer i at ikke alle detaljer kommer frem og at høye stabilitetsverdier ikke vil synes i diagrammene. Dette er fordi det mest relevante for oppgaven er resultatene som ligger rundt sikkerhetskravet. Dersom det er ønskelig å se flere detaljer av resultat, se vedlegg D.1 – D.4.

HRV uten dekomponering

Diagramforklaring er gitt ved figur 21. Glidestabilitet for HRV [100kN/m] islast, kan en se i figur 18 og 19 at ingen av murdamoppbygningene er godkjent for glidning. Figur 20 viser at TLM er godkjent for helningsvinkel 10° med kronebredde 4 meter. Utenom dette er ingen andre murdammer godkjent for glidestabilitet for hele tverrsnittet.



Figur 18: HRV-diagram, islast [100kN/m], b[1m]

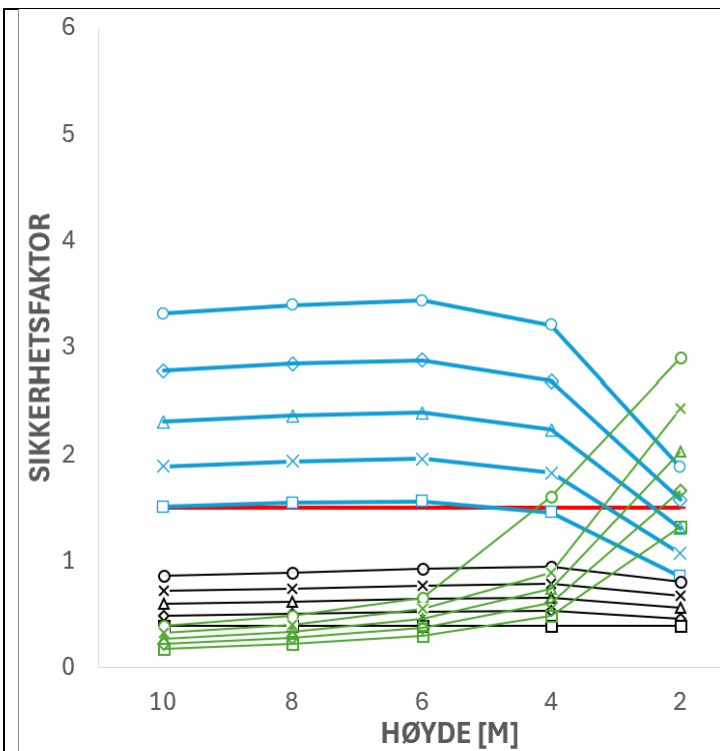
Figur 19: HRV-diagram, islast [100kN/m], b[2m]

Figur 20: HRV-diagram, islast [100kN/m], b[4m]

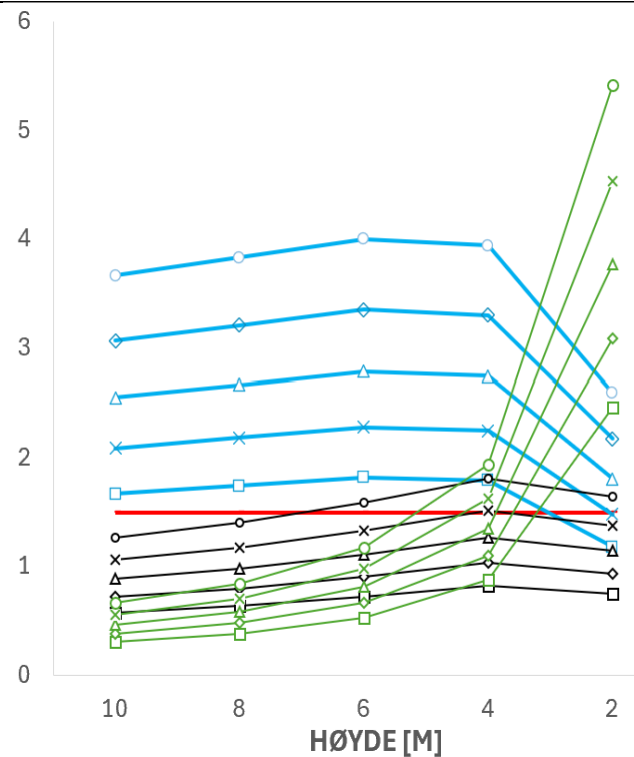
—Krav ○TLM 10 ◐TLM 5 ▲TLM 0 ×TLM -5 ◑TLM -10 ◒BP 10 ×BP 5 ▲BP 0 ◑BP -5 ◒BP -10 ○TT 10 ×TT 5 ▲TT 0 ◑TT -5 ◒TT -10

Figur 21: Diagramforklaring

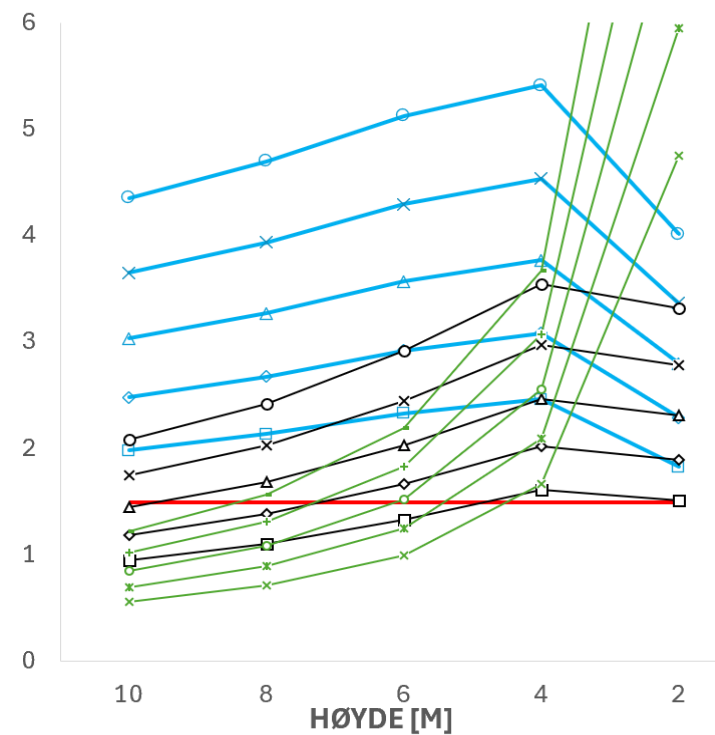
Ved lasttilfelle HRV [40kN/m] islast, viser figur 22 at TLM blir godkjent for helningsvinkel 5° og 10° ved kronebredde 1 meter. Figur 23 gir flere godkjente helningsvinkler for TLM, men stadig ingen godkjente variasjoner BP og TT. Derimot ved figur 24 med kronebredde på 4 meter, vises det til at alle variasjonene til TLM er godkjent, det samme er BP for helningsvinkel 5° og 10°. Helningsvinkel 0° for BP ligger rett under sikkerhetskravet.



Figur 22: HRV-diagram, islast [40kN/m], b[1m]



Figur 23: HRV-diagram, islast [40kN/m], b[2m]

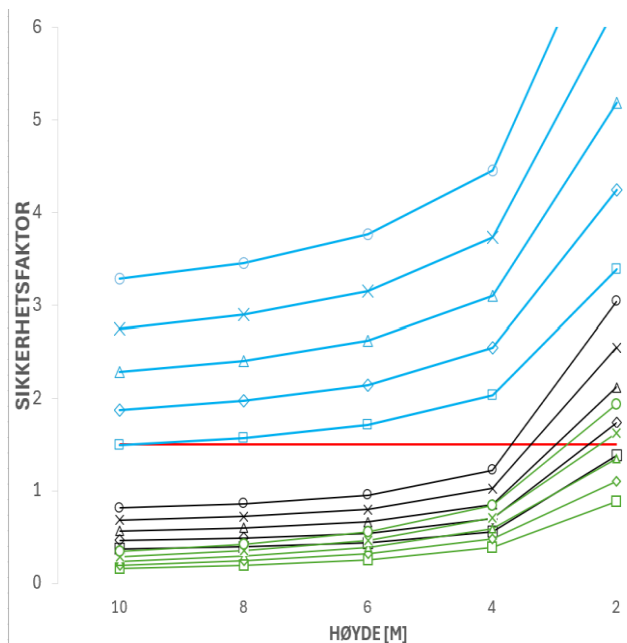


Figur 24: HRV-diagram, islast [40kN/m], b[4m]

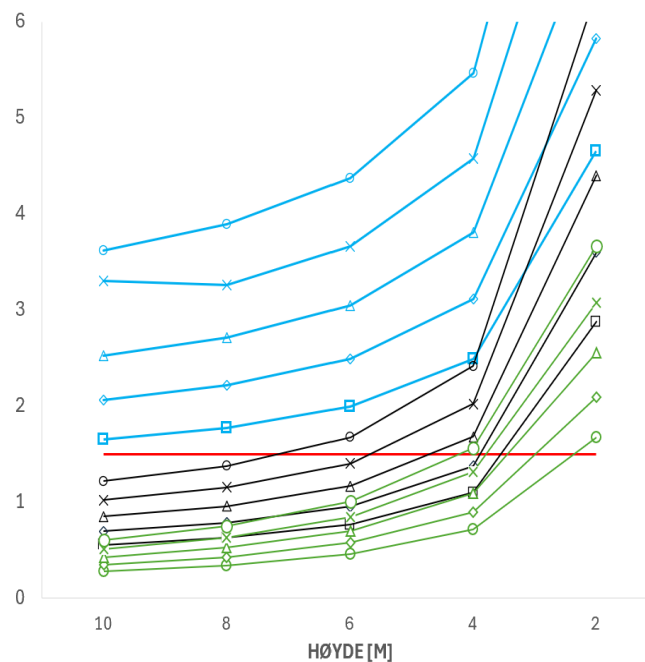
—Krav ○TLM 10 ◆TLM 5 ▲TLM 0 ×TLM - 5 □TLM - 10 ○BP 10 ×BP 5 ▲BP 0 ◆BP - 5 □BP - 10 ○TT 10 ×TT 5 ▲TT 0 ◆TT - 5 ■TT - 10

DFV

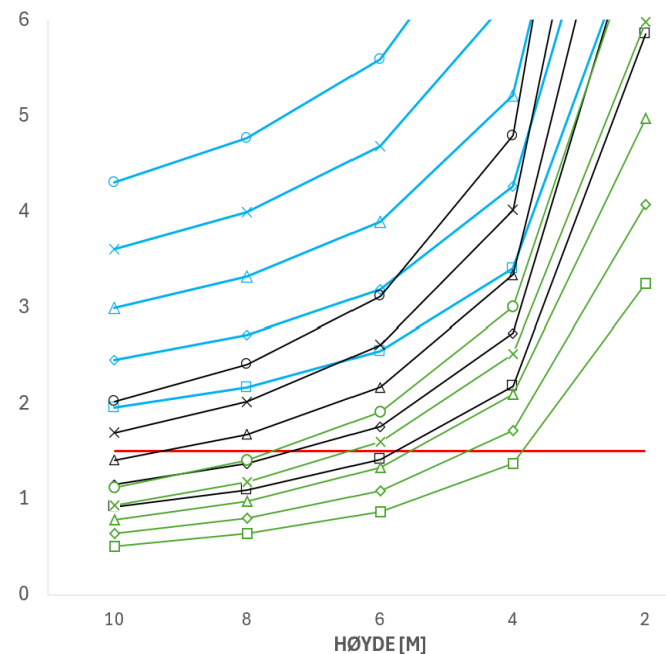
Ved tilstand DFV er det ikke islast til stede, resultatene vises i figur 25, 26 og 27. Dette gir en tydelig endring i resultat, spesielt for TLM. Allerede for 1 meter kronebredde, er TLM godkjent for alle helningsvinkler unntatt -10° . BP blir godkjent for helningsvinkel 5° og 10° ved kronebredde 4 meter, slik som ved figur 28.



Figur 25:DFV diagram b[1m]



Figur 26:DFV diagram b[2m]



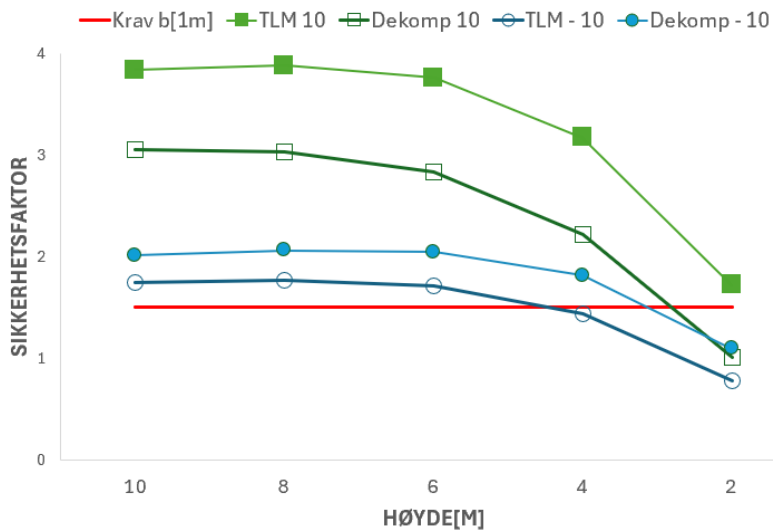
Figur 27:DFV diagram b[4m]

—Krav ○TLM 10 ◐TLM 5 ▲TLM 0 ✕TLM -5 ◑TLM -10 ○BP 10 ✕BP 5 ▲BP 0 ◐BP -5 ◑BP -10 ○TT 10 ✕TT 5 ▲TT 0 ◐TT -5 ◑TT -10

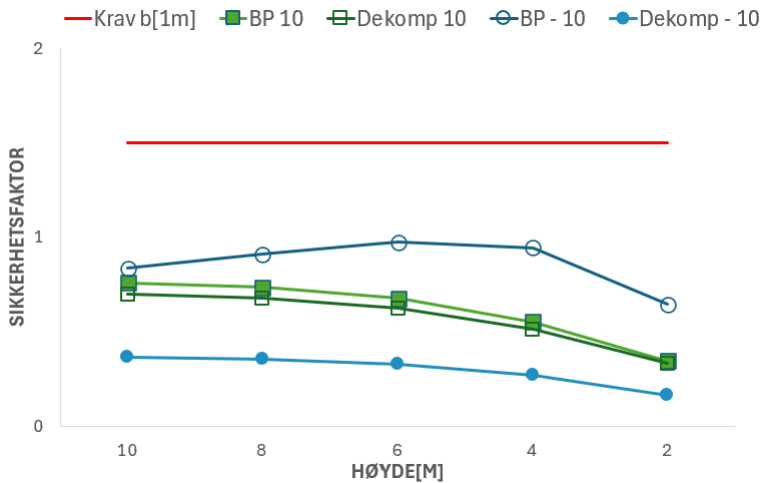
Største kontrasten fra lasttilfellet HRV til DFV for TLM og BP er at toppunktet endres fra 10 meter til 2 meter. Dette er naturlig da islasten fjernes, og de vil ligne mer på TT. Derimot får TT et betydelig dårligere resultat ved DFV enn HRV.

Sammenligning av dekomponering

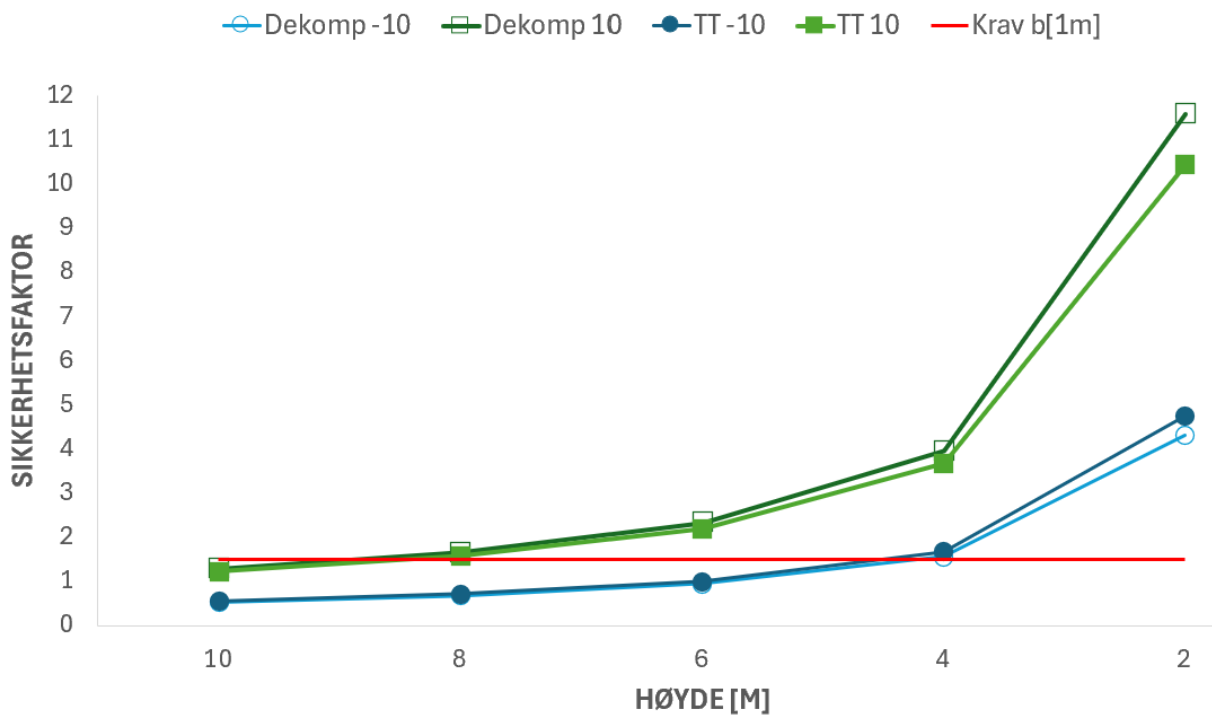
For å presentere hvordan dekomponering fungerer for glidestabilitet, er det valgt å presentere -10° og 10° i helningsvinkler i figur 28, 29 og 30 med og uten dekomponering. Her vises det at ved negativ helningsvinkel vil dekomponeringen forbedre stabiliteten, mens ved positiv helningsvinkel vil dekomponeringen ha en negativ påvirkning for TLM og BP. Dekomponering vil ha motsatt virkning for TT. Diagrammene er ikke skalert i forhold til hverandre, da det er for stor variasjon i resultatene.



Figur 28: TLM, b[4m] islast [100kN/m] helning -10 og 10, dekomponering sammenligning.



Figur 29: BP, b[4m] islast [100kN/m] helning -10 og 10, dekomponering sammenligning.



Figur 30: TT, b[4m], islast [0kN/m], dekomponering sammenligning.

Under vises tabell 3 som sammenligner resultatene fra delkapittel 5.1 med dekomponering. Ved ønske om flere detaljer rundt dekomponering, se vedlegg E.1 og E.2.

Murdam	Tilstand	Bredde [m]	Godkjente helningsvinkler [°]									
			Uten dekomponering					Med dekomponering				
			-10	-5	0	5	10	-10	-5	0	5	10
Tetning lagt i mørtel	HRV, [100kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		4	x	x	x	x	✓	x	x	x	x	x
	HRV, [40kN/m] islast	1	x	x	x	✓	✓	x	x	x	x	x
		2	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Betongplate	HRV, [100kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	HRV, [40kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		4	x	x	x	✓	✓	x	x	x	✓	✓

Torvtetning	HRV, [0kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabell 3: Sammenligning av dekomponering ved glide stabilitet

Den generelle observasjonen for sammenligning er at det er noen avvik som skiller mellom med- og uten dekomponering, men ellers er mye av resultatene de samme.

Ved dekomponering av negativ helningsvinkel får TLM og BP bedre verdier, mens ved positiv helningsvinkel vil dekomponering gir dårligere verdier enn uten dekomponering. For TT er det motsatt, den vil få bedre verdier ved dekomponering av positiv helningsvinkel og dårligere verdier ved negativ helningsvinkel, dette kommer tydeligere frem i vedlegg C.3.

Dekomponering av helningsvinkelen vil gi mer reelle verdier, da den tar hensyn til de faktiske situasjonsbilde. Dekomponering vil dermed være dominerende for de helningsvinklene som får dårligere verdier med dekomponering. De helningsvinklene som får bedre verdier ved dekomponering, vil bli beregnet til sikker side ved å ikke ta hensyn til dekomponering.

5.2 Veltestabilitet

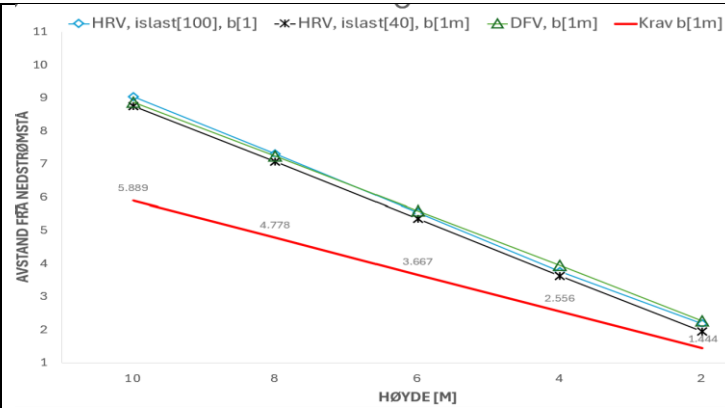
Veltestabilitet vil bli presentert i tre diagram per murdamoppbygging som gir oversikt over hvor stor påvirkning lasttilfellet, kronebredde og damhøyde har. Kravet for veltestabilitet påvirkes av bunnbredden til dammen, og derfor blir dammene presenter hver for seg. Grunnet kreftene ikke er dekomponert i Mathcad, vedlegg A.1 og A.2, vil ikke helning utspille seg i resultatene. Resultatene fra dette vil sammenlignes med resultatene fra Mathcad, vedlegg B.1 og B.2, som inneholder dekomponerte krefter..

Ettersom resultatene ikke påvirkes av helningsvinkelen, er det kun vist en graf per bruddgrensetilstand.

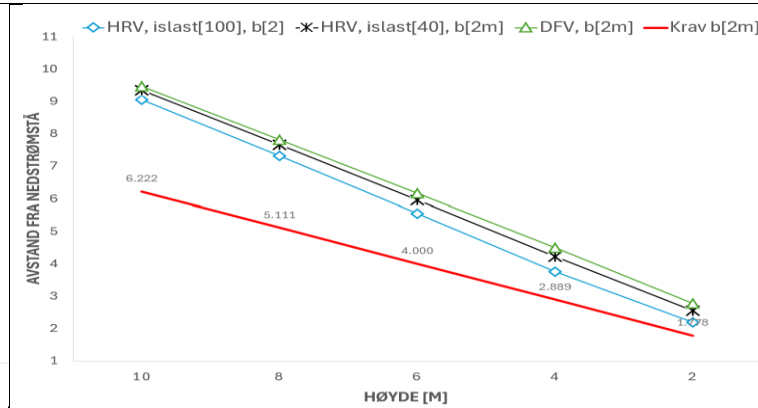
For TLM kan en se ved figur 31, 32 og 33 at uavhengig av tilstand og kronebredde vil konstruksjonen alltid være over kravene.

For BP presentert i figur 34 og 35 er ingen av lastbildene godkjente for noen av kronebreddene, selv om stabiliteten øker med økningen av kronebredden. I figur 36 er dammen godkjent for høyde 2, 4 og 6 meter ved DFV med kronebredde på 2, og er godkjent for alle tilstander ved kronebredde 4 meter. Derimot kan en observere at det er kommet en knekk for HRV [100kN/m] islast som kan skyldes en svakhet i formel eller lignende, da tilstanden ikke følger forventet mønster.

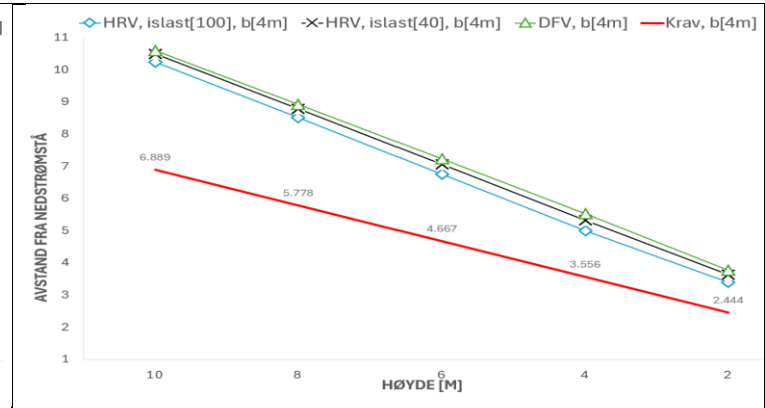
For TT vist på figur 37, 38 og 39 er ingen av lasttilstandene godkjente for noen av kronebreddene, som ved BP. Ved kronebredde 2 meter er HRV og DFV godkjent for damhøyde 2 meter. Damhøyde 2, 4 og 6 meter er godkjente ved kronebredde 4.



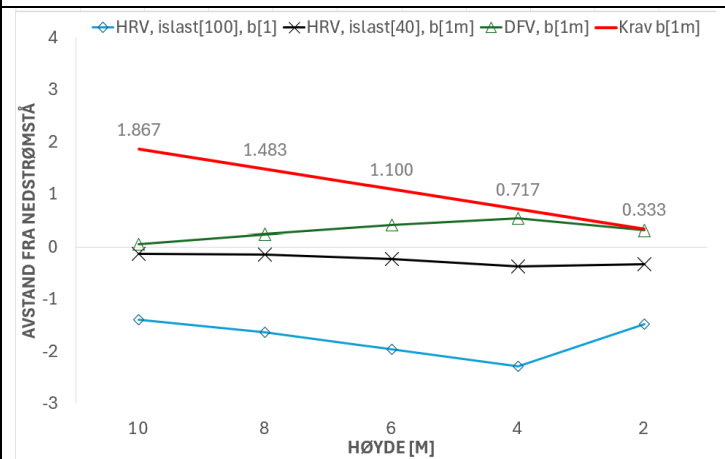
Figur 31: TLM B[1m]



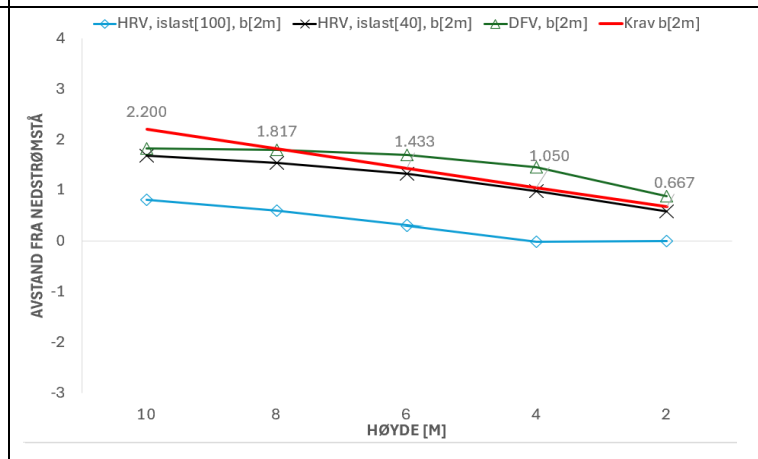
Figur 32: TLM b[2m]



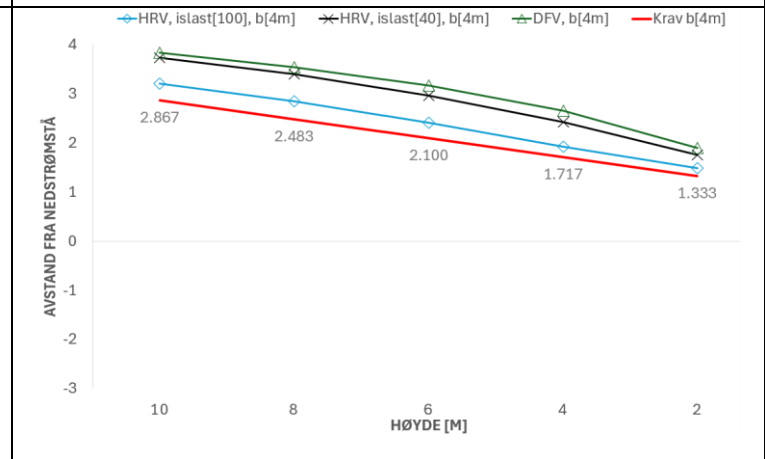
Figur 33: TLM b[4m]



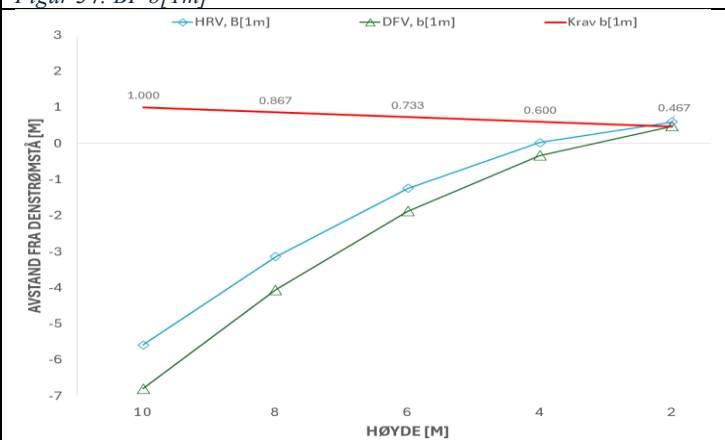
Figur 34: BP b[1m]



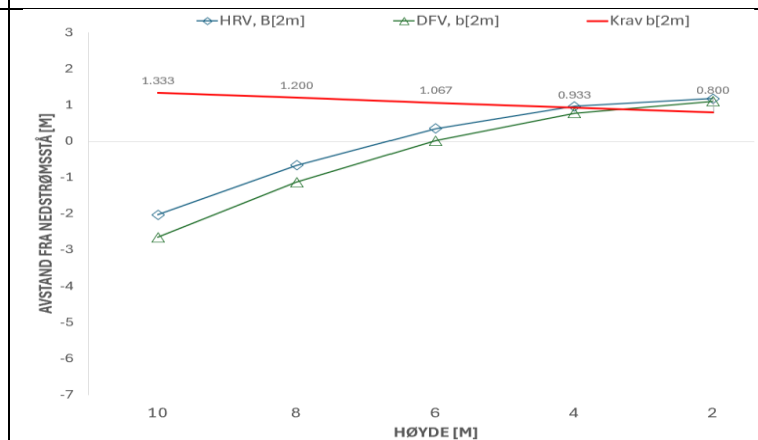
Figur 35: BP b[2m]



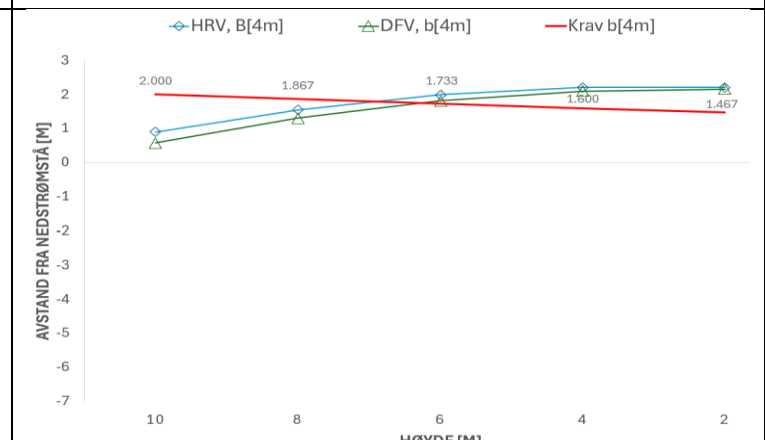
Figur 36: BP b[4m]



Figur 37: TT b[1m]



Figur 38: TT b[2m]



Figur 39: TT b[4m]

For å se eksakt hvor langt konstruksjonene er fra nødvendig krav, er tabell 3 utarbeidet. Dette er for å få en mer detaljert oversikt over veltestabiliteten. Avstanden fra kravet er referert til figur 12 i kapittel 4.3.2, som tilsier at resultatene må være innenfor 1/3 av bredden til konstruksjonen.

Murdam	Tilstand	Bredde [m]	Høyde [m]					Avstand fra krav [m]
			10	8	6	4	2	
Tetning lagt i mørtel	HRV, [100kN/m] islast	1	2.527	1.895	1.221	0.500	0.010	
		2	2.822	2.200	1.547	0.870	0.407	
		4	3.342	2.724	2.084	1.434	0.950	
	HRV, [40kN/m] islast	1	2.858	2.285	1.689	1.064	0.505	
		2	3.122	2.546	1.950	1.329	0.767	
		4	3.595	3.006	2.398	1.769	1.182	
	DFV	1	2.987	2.46	1.929	1.388	0.818	
		2	3.241	2.705	2.16	1.597	0.996	
		4	3.701	3.142	2.568	1.969	1.328	
Betongplate	HRV, [100kN/m] islast	1	-3.267	-3.113	-3.062	-3.003	-1.812	
		2	-1.386	-1.219	-1.123	-1.062	-0,657	
		4	0.347	0.369	0.318	0.201	0.149	
	HRV, [40kN/m] islast	1	-1.990	-1.625	-1.323	-1.088	-0.66	
		2	-0.52	-0.273	-0.111	-0.063	-0.091	
		4	0.874	0.916	0.869	0.712	0.430	
	DFV	1	-1.807	-1.247	-0.689	-0.183	-0.018	
		2	-0.347	-0.015	0.270	0.409	0.213	
		4	0.966	1.064	1.07	0.941	0.562	
Torvtetning	HRV, [0kN/m] islast	1	-6.58	4.00	-1.97	-0.57	0.13	
		2	-3.37	-1.86	-0.72	0.03	0.38	
		4	-1.11	-0.32	0.25	0.61	0.74	
	DFV	1	-7.79	-4.92	-2.61	-0.93	0.02	
		2	-3.98	-2.33	-1.05	-0.16	0.3	
		4	-1.42	-0.57	0.08	0.50	0.69	

Tabell 4: Oversikt over avstand til krav for konstruksjonene

For TLM er det ingen sannsynlighet for velting. Det samme gjelder for BP kronebredde 4 meter. For kronebredde 1 og 2 meter er ingen godkjent for hele tverrsnittet. DFV vil være den dimensjonerende tilstanden for TT, da HRV [0 kN/m] islast gir best resultat for velting. Dette skyldes at TT får en høyere vannstand ved DFV, uten endring i islast. TT har ingen kronebredder med godkjente verdier for velting i hele tverrsnittet.

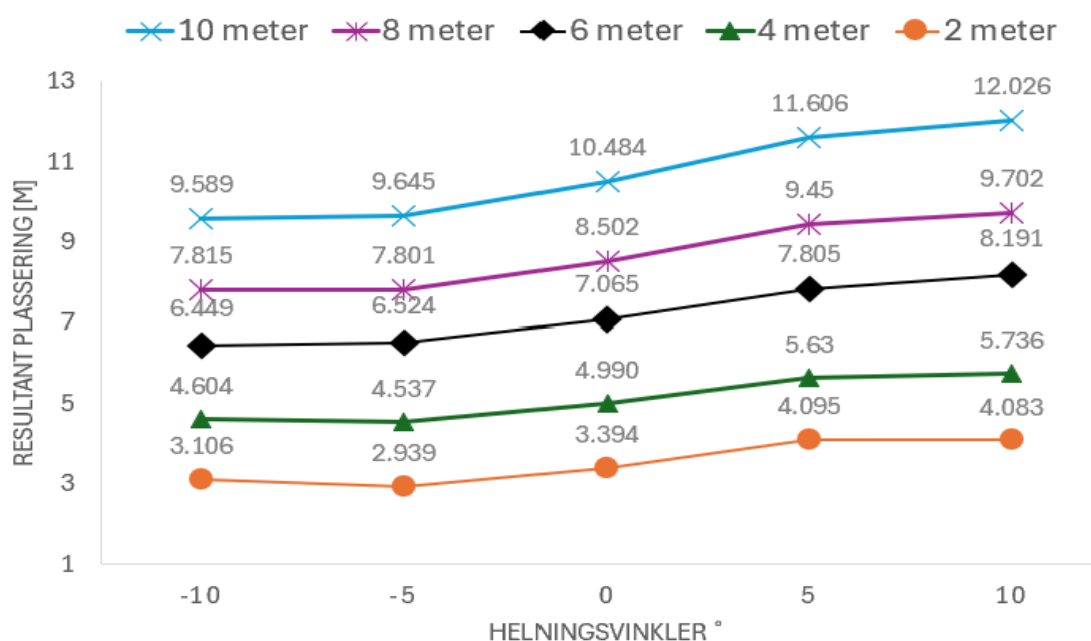
Dekomponering

Ved dekomponering vil man kunne se resultatet av bidraget til helningsvinkelen. Helningsvinkel 0° vil representere resultatet fra tidligere funn uten dekomponering. Det er valgt å se på lasttilfellet HRV [40kN/m] islast.

For å se hvordan helningsvinkelen påvirker konstruksjonene vil det bli presentert et diagram per murdam med kun fokus på dette. Diagrammene er ikke skalert i forhold til hverandre og det er ikke inkludert krav, da det kun er ønskelig å se hvordan stabiliteten ligger i forhold til konstruksjonen som ikke er dekomponert.

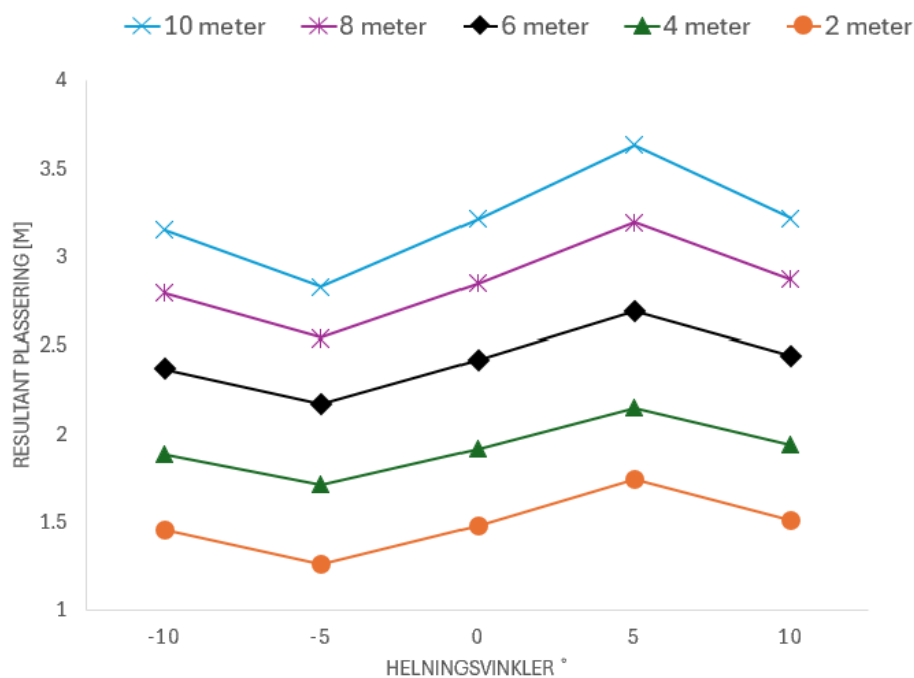
Deretter blir det presentert en sammenligningstabell for å se hvilke tilfeller som vil få forskjellig resultat med og uten dekomponering. Se vedlegg E.1 for mer detaljerte resultater.

For TLM, kan man se på figur 40 at stabiliteten overordnet øker gradvis ved økning av helningsvinkel. Det er et lite bunnpunkt ved -5° for høyde 2 og 4 meter og et toppunkt i 5° ved høyde 2 meter. For de andre høydene er bunnpunktet i helningsvinkel -10° og toppunkt i helningsvinkel 10°.



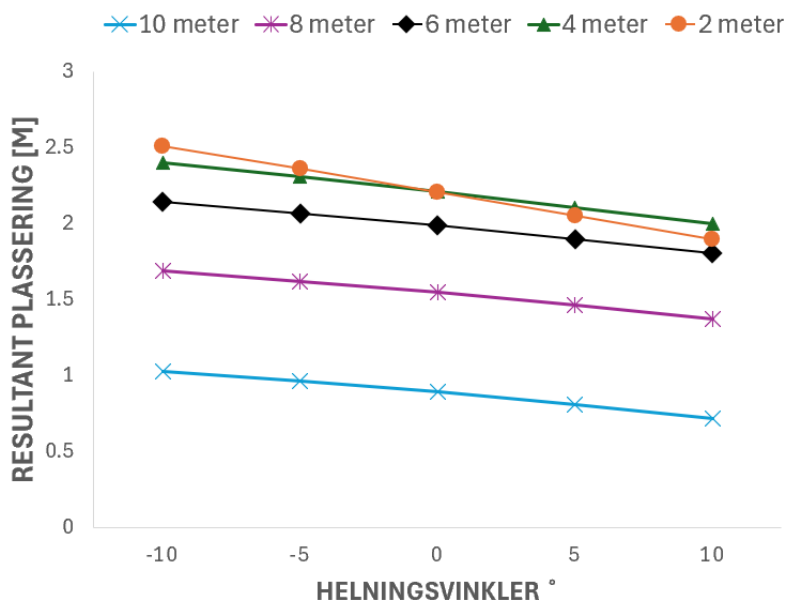
Figur 40: TLM med påført [40 kN/m] islast b[4m]

For BP, figur 41, har alle høydene bunnpunkt i -5° , toppunktet er her endret til 5° . Ved helning -10° og 10° er stabiliteten neste helt lik som ved 0° . Dermed er det kun -5° og 5° som er relevant for dekomponering for denne type murdam.



Figur 41: BP med påført [40kN/m] islast, b[4m]

Ved TT, figur 42, vil konstruksjonen respondere annerledes på helningsvinkelen og derav få dårligere resultat ved økning av helningsvinkel. TT har, som observert tidligere, dårliges stabilitet ved 10 meter damhøyde.



Figur 42: TT HRV [0kN/m] islast b[4m]

Diagrammene viser at murdammer med påført islast responderer annerledes på dekomponering enn de uten. Dette gjelder for alle testede resultater. Se vedlegg E.2 for nærmere detaljer og diagram for alle tilfeller.

Tabell 5 viser at det er noen forskjeller med og uten dekomponering.

Murdam	Tilstand	Bredde [m]	Godkjente helningsvinkler [°]					
			Uten dekomponering	Med dekomponering				
			0	-10	-5	0	5	10
Tetning lagt i mørtel	HRV [100kN/m] islast	1	✓	✓	x	✓	✓	✓
		2	✓	✓	✓	✓	✓	
		4	✓	✓	✓	✓	✓	
	HRV [40kN/m] islast	1	✓	✓	✓	✓	✓	
		2	✓	✓	✓	✓	✓	
		4	✓	✓	✓	✓	✓	
Betongplate	HRV [100kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	
		2	x	x	x	x	x	
		4	✓	✓	x	✓	✓	
	HRV [40kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	
		2	x	x	x	x	x	
		4	✓	✓	✓	✓	✓	
Torvtetning	HRV [0kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	
		2	x	x	x	x	x	
		4	x	x	x	x	x	

Tabell 5: Sammenligning av veltestabilitet uten dekomponering og med dekomponering.

Tabell 5 viser at ved dekomponering av helningsvinkel i forhold til veltestabilitet får TLM og BP lite forskjell i resultatene, men begge har utslag på helningsvinkel -5°. TT vil ikke ha godkjent veltestabilitet med eller uten dekomponering.

5.3 Resultat av glide- og veltestabilitet

Tabell 6 viser en oversikt over godkjente dammer i forhold til glide- og veltestabilitet.

Høyde 10 meter, uten dekomponering:

Murdam	Tilstand	Bredde [m]	Helningsvinkel [°]									
			-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	
Tetning lagt i mørtel	HRV, [100kN/m] islast	2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
		4	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓
	HRV, [40kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
		2	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		4	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	DFV	1	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		2	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		4	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Betongplate	HRV, [100kN/m] islast	4	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓
HRV, [40kN/m] islast		4	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	
DFV		4	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Torvtetning	Ingen godkjente for noen av lasttilfellene.											

Tabell 6: Oversikt over godkjente dammer; bredder der ingen dammer er godkjente er utelatt.

Tabellen indikerer at alle godkjente dammer, utenom TLM bredde 2 meter [100kN/m] islast, er godkjente for både helningsvinkel 15° og 20°. Videre viser tabellen at helningsvinkel -15° og -20° aldri er godkjente. Dette understøtter begrunnelsen for å kun ta med -10° - 10° i diagrammene.

5.4 Fribord

For fribord er det testet for helningsvinkel -10° til 10° med intervall på 5° , kronebredde 2 meter og fullt islast. Det er valgt å analysere tilstand HRV [100kN/m] islast. For TT vil islasten da være 0kN/m.

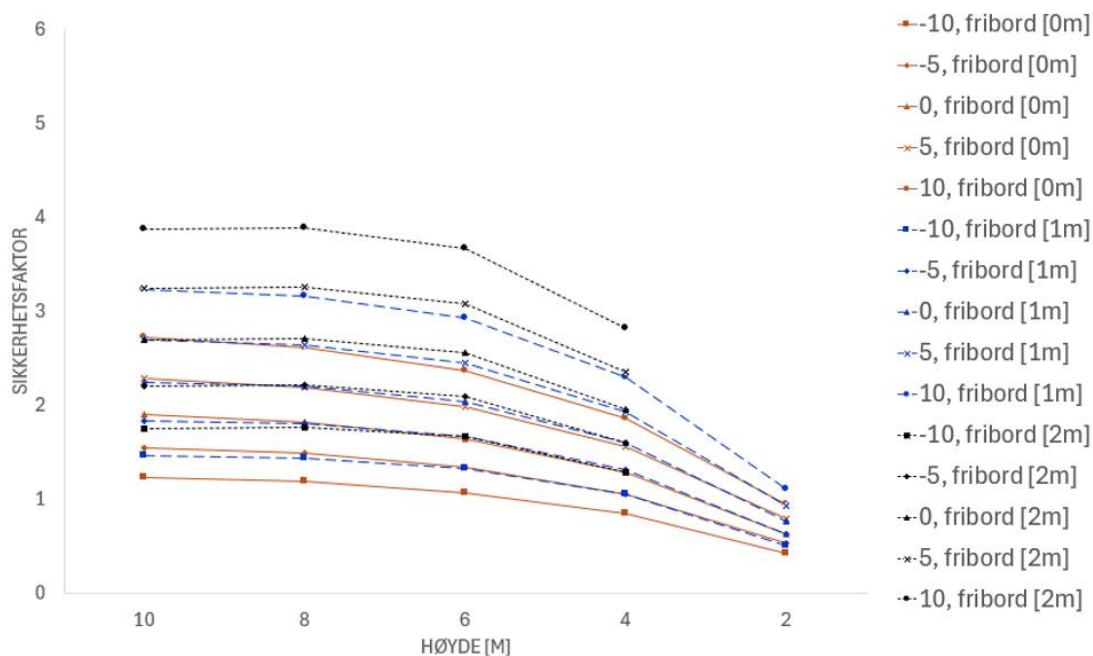
For fribord 2 meter vil det ved damhøyde 2 meter ikke oppstå krefter. Dette er fordi en 2 meter høy dam med 2 meter fribord vil være tom, dammen vil da ikke ha vanntrykk og være godkjent for høyde 2 meter. Diagrammene til dammene med fribord 2 meter vil stoppe på 4 meter.

Glidning har et konstant krav på 1.5, mens kravet på velting vil variere ut fra bunnbredden til dammen. Da det bare blir testet dammer med lik bredde, vil kravet være likt for alle dammene innenfor den samme damoppbyggingen. Kravene for velting og glidning vil ikke bli tatt hensyn til i analysen, da fokuset vil være å se hvordan stabiliteten til dammen forandrer seg ut fra endring i fribord.

I dette kapitlet vil hver dam presenteres med en graf, resultatene vil videre bli diskutert i kapittel 6.4. Grafene er her skalert likt. De prikkete grafene er fribord 2 meter, de stripete grafene er fribord 1 meter og linjefrafene er fribord 0 meter.

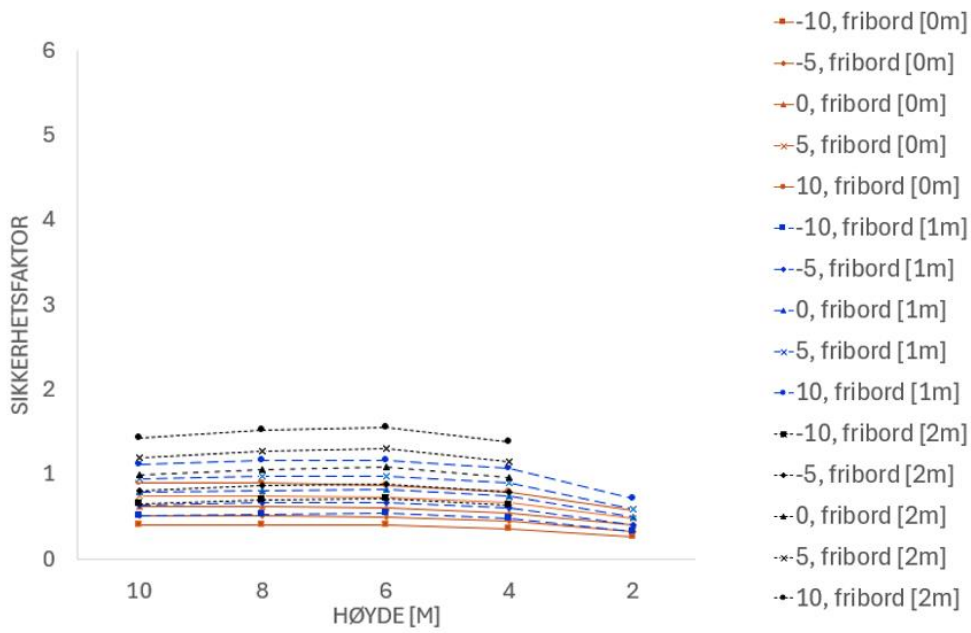
Glidestabilitet

Figur 43 viser resultatene for helningsvinkel -10 til 10, ved fribord 0, 1 og 2 meter for TLM.



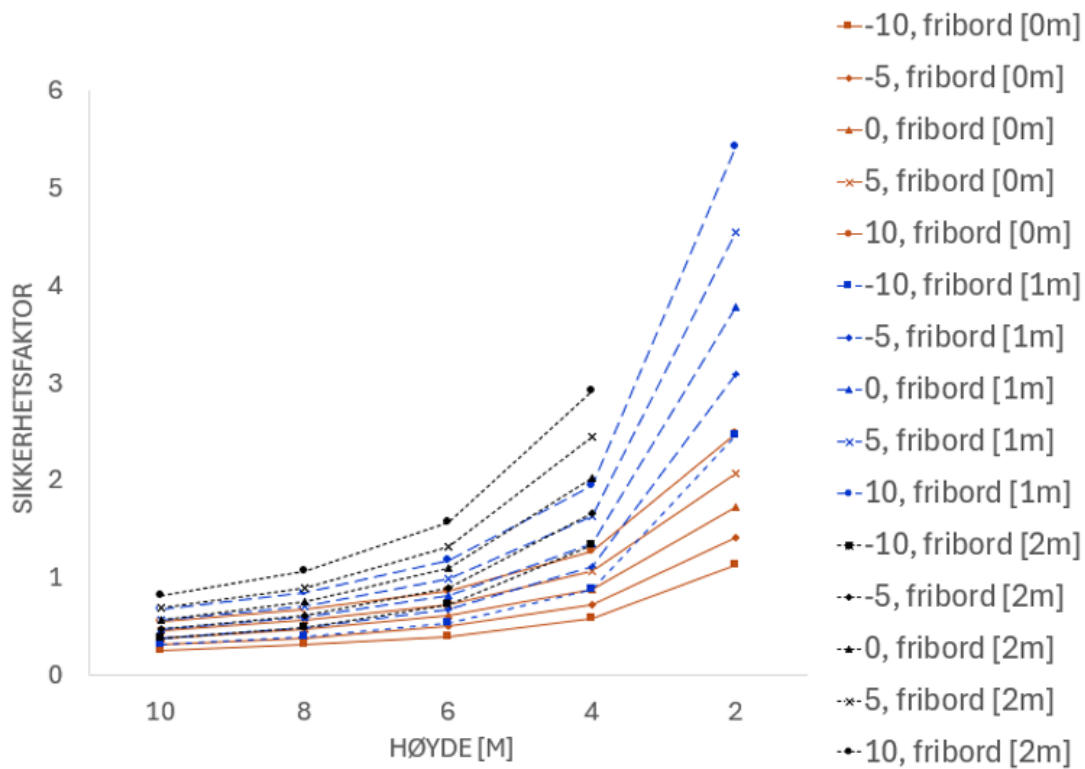
Figur 43: TLM, endring i fribord

Endringene for BP er vist i figur 44. I vedlegg F.2 er den samme grafen presentert med en skalering som gjør det enklere å skille de ulike grafene.



Figur 44: BP, endring fribord

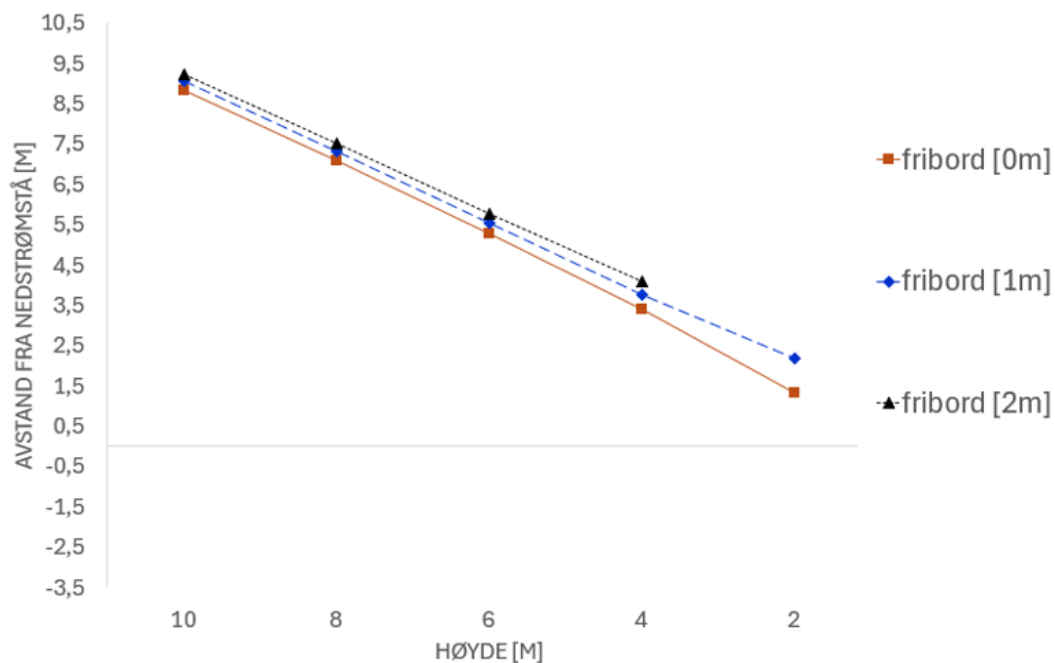
TT er representert i figur 45.



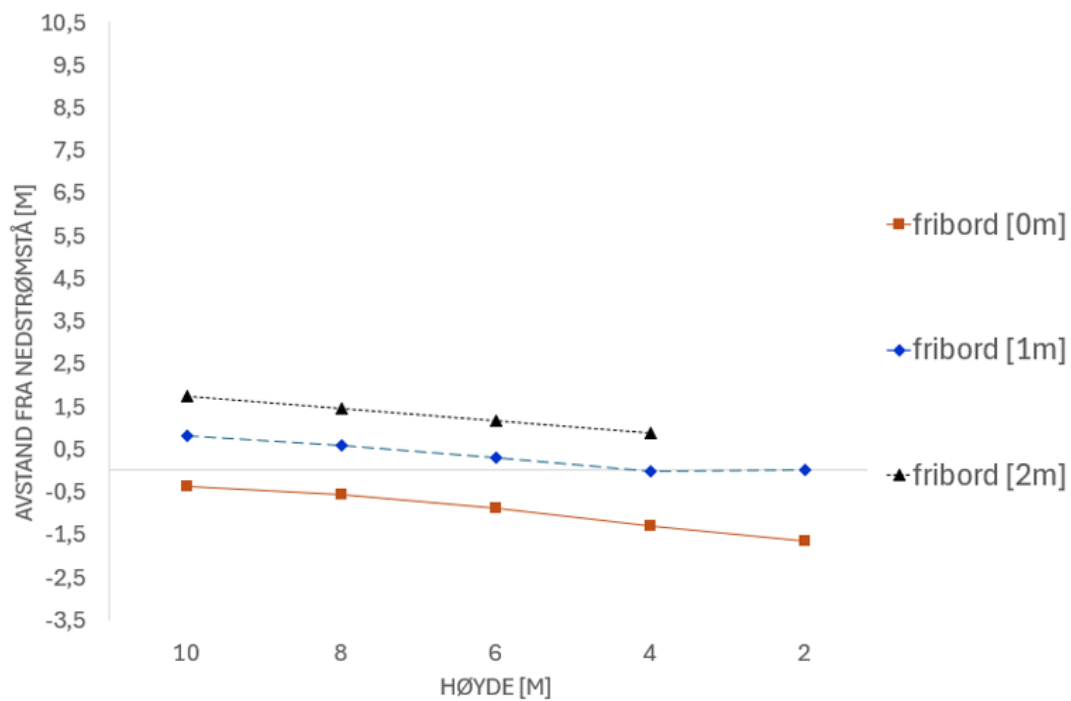
Figur 45: TT, endring fribord

Veltestabilitet

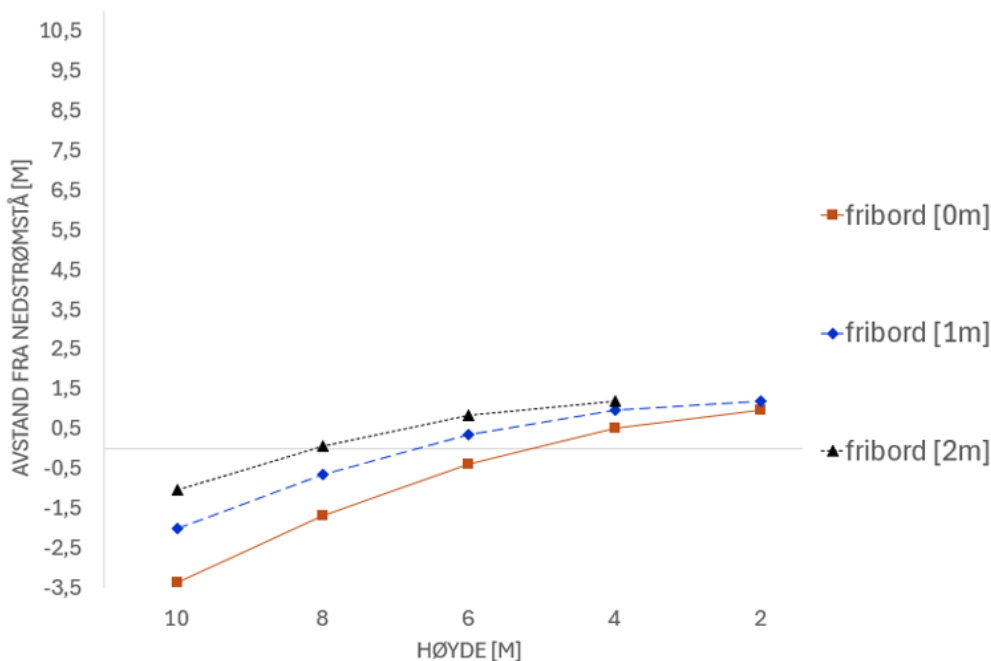
Figur 46, 47 og 48 viser hvordan endring av fribord påvirker veltestabiliteten.



Figur 46: TLM, veltestabilitet, fribord 0, 1 og 2 [m].



Figur 47: BP, veltestabilitet, fribord 0, 1, 2 [m]



Figur 48: TT, veltestabilitet, fribord 0, 1 og 2 [m].

5.5 Resultat av godkjent damkonstruksjoner

Som nevnt tidligere blir det analysert en 10 meter høy dam, der en sjekker hvordan dammen forholder seg til lastbildene i de ulike snittene. Snittene som blir testet er 2, 4, 6, 8 og 10 meter. I delkapittel 5.3 blir tabell 6 presentert, denne har en oversikt over hvilke dammer som oppnår kravene for glidning og helning ved 10 meter høy dam.

Selv om beregningene tester ulike snitt, vil utregningene bli lik dersom dammen ordinært var den høyden. Dermed kan en si at en dam som er godkjent for høydene 2, 4 og 6 meter, men ikke godkjent for høydene 8 og 10 meter kan bygges som en 6 meter høy dam. Det kreves at dammen er godkjent for de lavere høydene. Er dammen innenfor kravene på 4 meter, men ikke på 2 meter vil den ikke være godkjent, for da bryter den i snitt 2 meter. Dermed vil alle dammer som er godkjent for en høyde, også kunne bygges for de lavere høydene.

For å presentere dette på en ryddig måte vil alle godkjente damhøyder bli presentert her. Tabellen fra kapittel 5.3 vil bli lagt inn i denne oversikten.

Målet med denne tabellen er at den skal være så oversiktlig og enkel at man kan gå inn i den med en bestemt type murdam, tilstand, bredde, høyde og helningsvinkel for å sjekke om dammen holder. Eventuelt bruke den til å bestemme en av variablene for å bygge en dam som tilfredsstiller kravene. Denne oversikten, tabell 7, er laget uten dekomponering. Hvordan dekomponering påvirker resultatene blir diskutert i kapittel 6.3.

Murdam	Tilstand	Bredde [m]	Høyde [m]	Helningsvinkler [°]									
				-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	
Tetning lagt i mørtel	HRV, [100kN/m] islast	2	2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
			4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
			6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
			8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
			10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
		4	2	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓
			4	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓
			6	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓
			8	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓
			10	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓
	HRV, [40kN/m] islast	1	2	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
			4	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
			6	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
			8	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
			10	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
		2	2	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			4	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			6	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			8	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			10	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		4	2	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			4	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			6	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			8	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			10	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	DFV	1	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			4	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			6	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			8	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			10	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

		2	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
			4	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			6	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			8	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			10	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		4	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			6	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			8	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			10	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Betongplate	HRV [100kN/m] islast	4	2	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	
			4	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	
			6	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	
			8	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	
			10	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	
	HRV, [40kN/m] islast	4	2	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
			4	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
			6	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
			8	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
			10	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	
	DFV	2	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
			4	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
			6	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	
		4	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
			4	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
6			x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
8			x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
		10	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓			
Torvtetning	HRV, [0kN/m] islast	1	2	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
		2	2	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
			4	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓		
		4	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

			4	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
			6	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	DFV	1	2	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
		2	2	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		4	2	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			4	4	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			6	6	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓

Tabell 7: Godkjente dammer fra høyde 2 – 10, bredder der ingen helningsvinkler er godkjente er utelatt.

I tabell 7 kan det observeres at for TLM [40kN/m] og [100kN/m] islast blir den godkjent for alle høyder samtidig. Dette skyldes at murdammen først blir godkjent for snittet 10 meter, men ikke for de lavere snittene. Det samme gjelder for BP [100kN/m] islast.

Selv om dammene er godkjent i denne tabellen må de vurderes opp mot konsekvensklassen de havner i. Ut fra konsekvensklassen og type dam er det tilleggskrav som må oppfylles. Det må også bli tatt en vurdering om dammen en sjekker opp mot tabell 7 har hatt tidligere skader. Dette blir diskutert videre i kapittel 6.6.

Geometrien og materialvalg til dammene vil ha mye å si for stabiliteten, derfor må dammen ha lik oppbygning dersom en skal følge tabell 7.

6 Diskusjon

I kapittel 6 vil det diskuteres grunnlaget for beregningene, og hvorfor valgene er blitt tatt. Resultatene sammenlignes og diskuteres opp imot teorien som er gitt tidligere i oppgaven. Kapittelet avsluttes med en sammenligning mellom TLM, BP og TT.

6.1 Regnemetode

Regnemetoden for å beregne på murdammer, baserer seg i utgangspunktet på samme metode som støttemursberegning. Dette kan være noe misvisende, spesielt med tanke på velting, da murdammen ikke er en monolittisk konstruksjon, slik som en støttemur. Da det allerede er påpekt i teorien at velting er lite sannsynlig for å skje, men resultatene tilsier at betongplate og torvtetning har stor sannsynlighet til å velte, tilsier dette at noe ikke samsvarer. Spesielt med tanke på at eksempelbyggene som er brukt, stadig står stødig den dag i dag.

Betongplaten til murdammen skal være med på å bidra til at kreftene fra horisontal påvirkning skal fordeles jevnt over hele konstruksjonen. Dette vil bidra til en mindre sannsynlighet for glidning, grunnet steinene vil være mer fastholdt, men samtidig vil konstruksjonstypen ha større sannsynlighet for velting grunnet oppbygningen. Selv om det er påpekt at denne type murdam skal ha økt glidestabilitet, samsvarer dette ikke med resultatene i oppgaven.

BP er oftest mest attraktivt å bygge, da det krever mindre materialer til murdammen for at den skal holde, ettersom den skal være mer stabil for mindre kronebredde. Dette kommer ikke frem i resultatene sammenlignet med de to andre damtypene, da BP har dårligst resultat. Resultatene til BP viser ekstra tydelig at murdammen er beregnet på lik måte, til tross for at de har ulik oppbygning. Dette er en bekreftelse på at det er en svakhet i beregningene og at det vil være en usikkerhetsfaktor i resultatene våre. Det vil derfor bli konkludert med at resultatene ikke er like valide og brukbare til å kunne sammenligne oppbygningen til dammene.

6.2 Valg av helningsvinkler, kronebredde og damhøyde

Etter diskusjon med veileder ble det valgt helningsvinkel $-20^{\circ} - 20^{\circ}$ med intervall på 5° . Dette er det gruppen har tatt som utgangspunkt i hovedanalysen av dammene. I vedlegg C.1, C.2 og C.3 ligger alle beregninger for helningsvinkler $-20^{\circ} - 20^{\circ}$, likevel er det bare helningsvinkel $-10^{\circ} - 10^{\circ}$ som er presentert i diagrammene. Dette er valgt etter en analyse av vedleggene. Gruppen oppdaget en trend i at helningsvinkel -20° og -15° som oftest ikke ble godkjent, mens helningsvinkel 15° og 20° vanligvis ble godkjent, dette kan en se i tabell 7.

Ifølge Statens vegvesen er kravet for maks stigning på bilveg 8%, dermed vil det være unaturlig å bygge en dam med høyere helningsvinkel enn dette [33]. Dette bekrefter valget om å ikke ta hensyn til disse helningsvinklene.

Ved valg av kronebredde, er det basert på hva som normalt bygges med. Det er ikke naturlig ved små dammer at en har kronebredde over 4 meter. Spesifikt for BP er det mer normalt å ha enda smalere kronebredde på mellom 0,5-2 meter. Det kan derfor argumenteres for at det ikke var nødvendig å teste for 4 meter kronebredde, men det er valgt å bli tatt med for sammenligningsgrunnlag. Det ble sett under beregningene spesifikt for BP og TT at kronebredde 4 meter ga betydelig bedre resultater og at dammene ikke fikk gode resultater ved kronebredder under 4 meter. Gruppen så derfor ikke nødvendigheten med å teste kronebredde på 0,5 og 3 meter. For TLM fikk murdammen generelt gode resultater for alle kronebreddene.

Når det gjelder damhøyde har det blitt valgt å holde seg innenfor kravene for at konstruksjonene skal kunne kategoriseres som lave dammer, slik som påpekt i kapittel 3. Det hadde også vært mulighet for å teste for opptil 15 meter, men ettersom det allerede er et stort datasett er det blitt valgt å begrenses. Det er valgt å snitte for hver andre meter, for å få en forståelse og oversikt over hvor de største dimensjonerende bruddlinjene vil gå på de ulike konstruksjonene. Dammene som det er tatt utgangspunkt i, er i lignende høyder, og derav var det og mer naturlig å holde seg innenfor høyden på 10 meter.

6.3 Dekomponering

Overordnet kan man se fra tabell 3 og 5 i kapittel 5 at dekomponering har relativt lite påvirkning på resultatene. Det er bevist at det vil få lavere stabilitetsverdier ved positiv helning og høyere verdier ved negativ helning hos blant annet TLM og BP både ved glide- og veltestabilitet. Dette gir et lite utslag på resultatet i enkelte tilfeller.

Ved glidestabilitet er det en forholdsvis liten endring, slikt som vist i tabell 3. At endringen er liten kan skyldes at det er tatt noe hensyn til helningsvinkelen ved beregning på vedlegg A.1 og A.2, og den dominerende faktoren i resultatene her er endringen av egenvekten til murdammen. Dersom det horisontale tilleggskraften til poretrykket hadde vært mindre enn reduksjonen av egenvekten ved en positiv helningsvinkel, ville det blitt motsatt resultat, da tilleggskraften virker destabiliserende.

Ved tabell 5 kan man se at veltestabilitet får relativt lite utslag ved sammenligning på dekomponering, enda det ikke er tatt hensyn til helningsvinkel i hovedanalysen, slik som ved glidestabilitet. Derimot skal man være noe skeptisk til å ikke bruke dekomponering, da det kan gi utslag ved noen tilfeller.

Dette ser en ved BP HRV kronebredde 4 meter med 100kN/m islast, der uten dekomponering er hele tverrsnittet godkjent for alle helningsvinkler, men med dekomponering er konstruksjonen ikke godkjent for -5° . Ved økning til helning 5° , så vil igjen konstruksjonen få et bedre resultat, men ikke nok til å redusere kronebredden for konstruksjonen til 2 meter. Dette er grunnet konstruksjonen ikke er godkjent for 10 meter høyde. Ved et slikt tilfelle måtte det potensielt sjekkes for 3 meter kronebredde, eller maks bygge murdammen til 8 meter høyde.

Da det er påvist forholdsvis liten differanse med og uten dekomponering, har dette minimalt innvirkning på om konstruksjonene ble godkjent for hele tverrsnittet. Derfor vil gruppen konkludere med at dekomponering ikke vil bli sett på som nødvendig, med mindre du ligger tett på sikkerhetskravene eller ved helningsvinklene -5° og 5° .

6.4 Fribord

For å analysere fribord er det valgt tilstand HRV [100kN/m] islast, mens for TT vil islasten være 0kN/m. Det er valgt å analysere bare en tilstand da det kun er hvordan fribord påvirker stabiliteten som blir sett på. Ved mindre islast vil stabiliteten bli bedre, fordi kreftene på dammen er mindre, men fribord 2 meter vil fortsatt gjøre dammen mer stabil enn fribord 0 og 1 meter.

Fribord kan beskrives som luft over topp vannhøyde til topp damhøyde. Det er naturlig at et høyere fribord vil gjøre dammen mer stabil, da et høyere fribord resulterer i lavere vannlast. Spørsmålet blir da om hvor mye det egentlig har å si for resultatene?

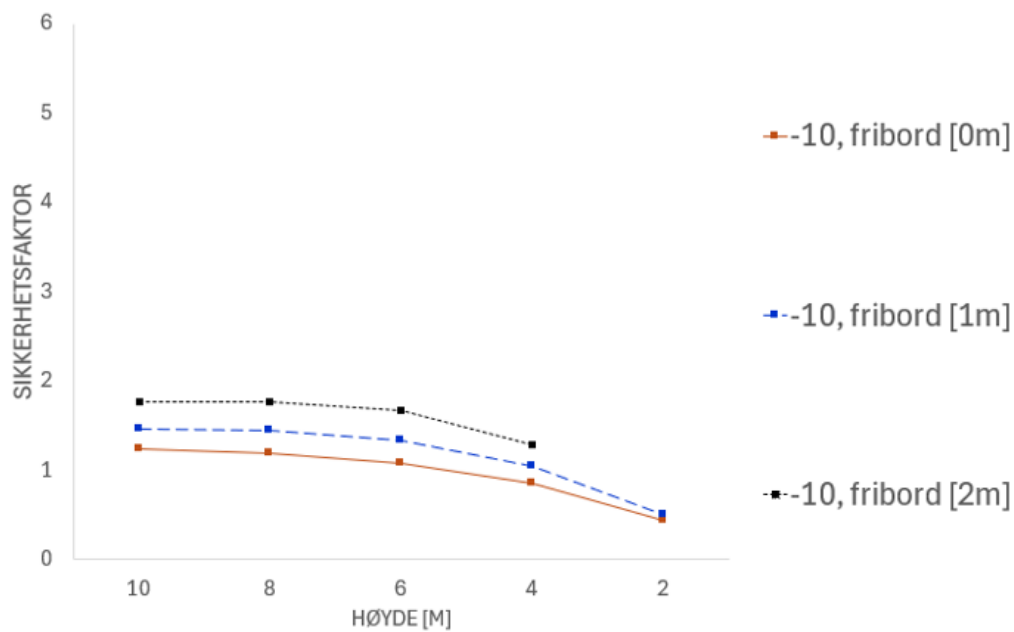
For å videre sammenligne hvordan fribord endrer stabiliteten til dammene er det valgt å se på ulike fribordhøyde med lik helningsvinkel. I sammenligningene er det valgt å se spesifikt på helningsvinkel -10° og 10° da de representerer endepunktene, og vil gi den største forskjellen i resultatene.

Til slutt vil det bli fokusert på tilfeller i grafen der de ulike fribordhøydene nærmer seg hverandre, uavhengig av helningsvinkel.

6.4.1 Glidestabilitet

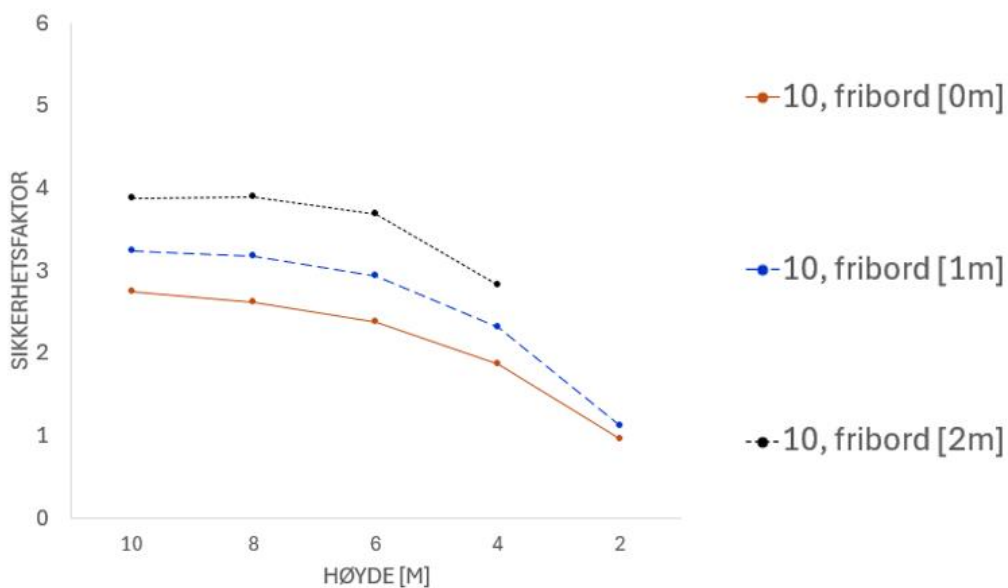
Murdam med tetning lagt i mørtel

Figur 49 viser tydelig at fribord 2 meter gir best stabilitet. Fribord 0 og 1 meter gir rimelig lik stabilitet ved 2 meter damhøyde, men fribord 1 meter gir gradvis bedre stabilitet på damhøyde 4 meter, dette vedvarer opp til 10 meter.



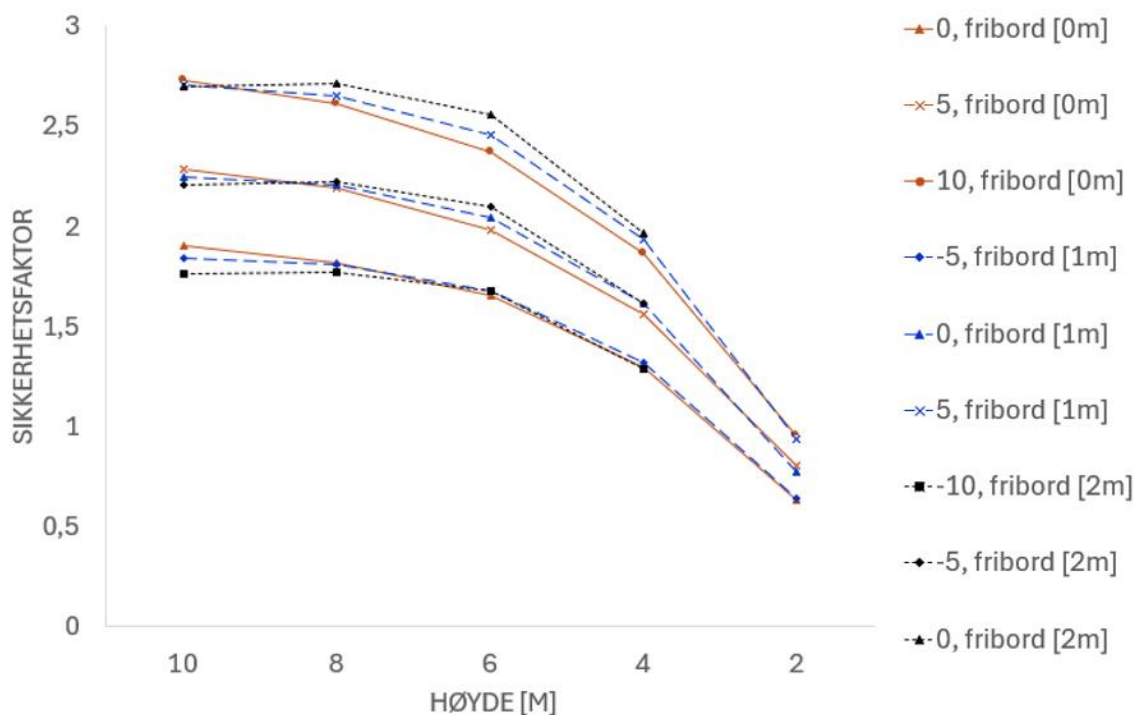
Figur 49: TT, ulikt fribord, helningsvinkel -10° .

For helningsvinkel 10° vil stabiliteten øke betraktelig. Differansen på sikkerhetsfaktoren mellom fribord 2 meter og fribord 0 meter i figur 49 ligger på rundt 0,5. I figur 50, som viser helningsvinkel 10° , ligger differansen på sikkerhetsfaktoren rundt 1,0. Det forteller oss at differansen for sikkerhetsfaktor mellom det ulike fribordene øker betraktelig med øking av helningsvinkel. Fribord 0 og 1 meter ligger enda tett på damhøyde 2 meter, men ikke like tett som i figur 49.



Figur 50: TLM, ulikt fribord, helningsvinkel 10° .

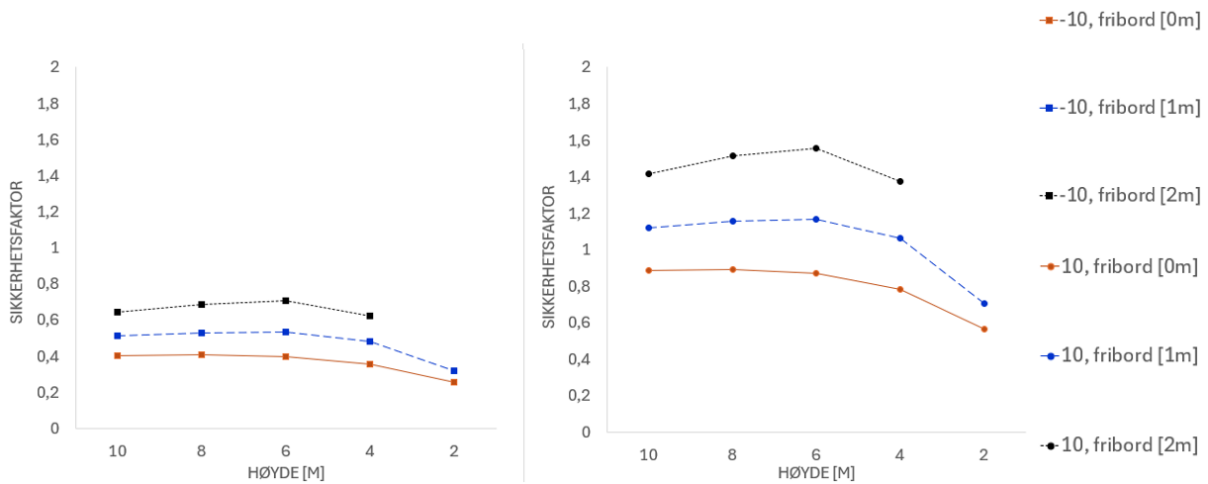
Figur 51 er et utsnitt av figur 43, denne figuren er skalert for å se de ulike grafene tydeligere. Ved analyse av figur 51 ser man at ved en høyere fribordhøyde kan en ha lavere helningsvinkel. Fribord 0 meter – helning 0° , fribord 1 meter – helning -5° og fribord 2 meter – helning -10° gir en ganske lik stabilitet. Med andre ord kan en ved å øke fribordet 1 meter minke helningsvinkelen med 5° og få tilsvarende stabilitet.



Figur 51: TLM, Fokus på grafer som ligg nært hverandre

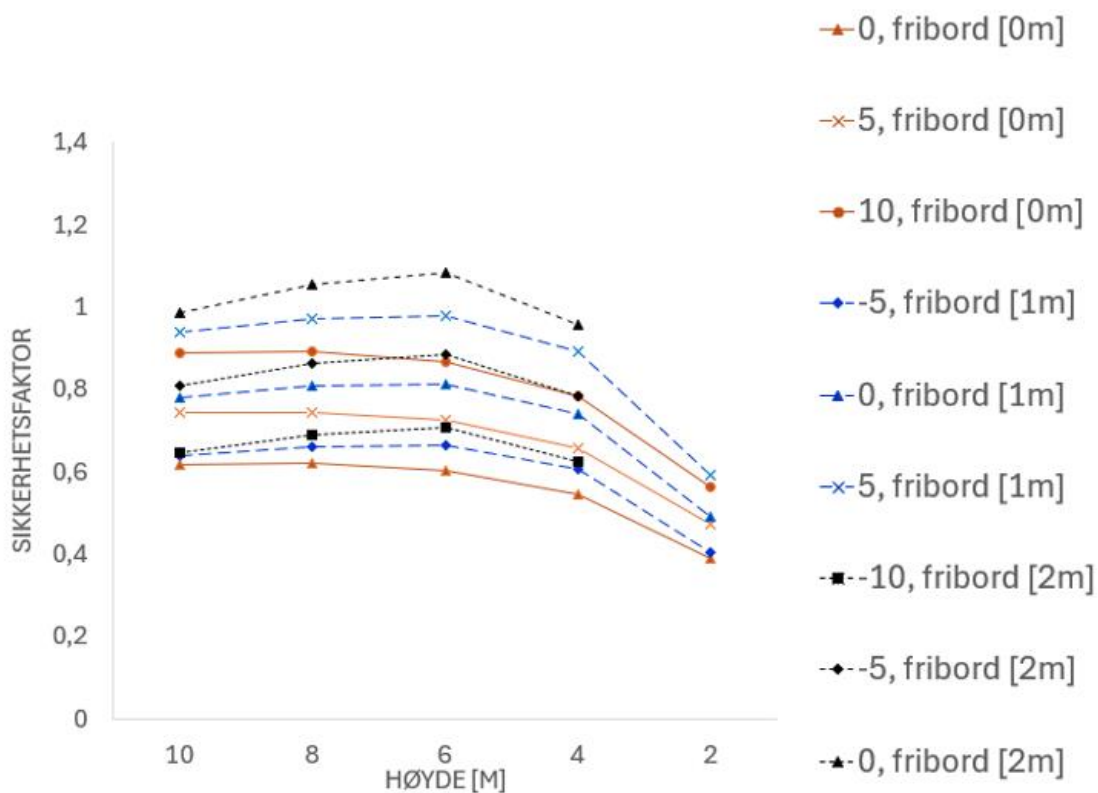
Murdam med betongplate

Figur 52 er skalert for å lettere se endringene i grafene. For BP syner figur 52 mye av det samme som ble diskutert i kapittelet over. Fribord 2 meter har betraktelig bedre stabilitet enn de andre tilfellene. Fribord 0 og 1 meter har ganske lik stabilitet ved damhøyde 2 meter. Grafene viser og at differansen mellom sikkerhetsfaktorene øker ved høyere helningsvinkel.



Figur 52: BP, ulikt fribord, helningsvinkel -10° og 10° .

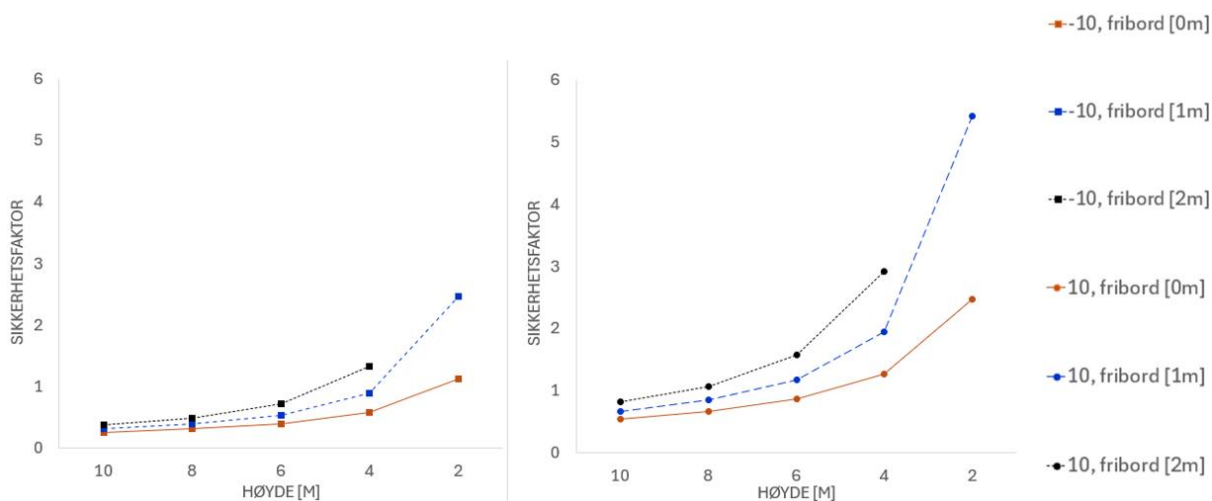
Figur 53, som også er skalert, tyder på mye av det samme som figur 51. Ved å se på damhøyden kan det konkluderes med det samme som ved TLM, ved å øke fribordhøyde 1 meter kan en minke helningsvinkelen med 5° .



Figur 53:BP, Fokus på grafer som ligg nært.

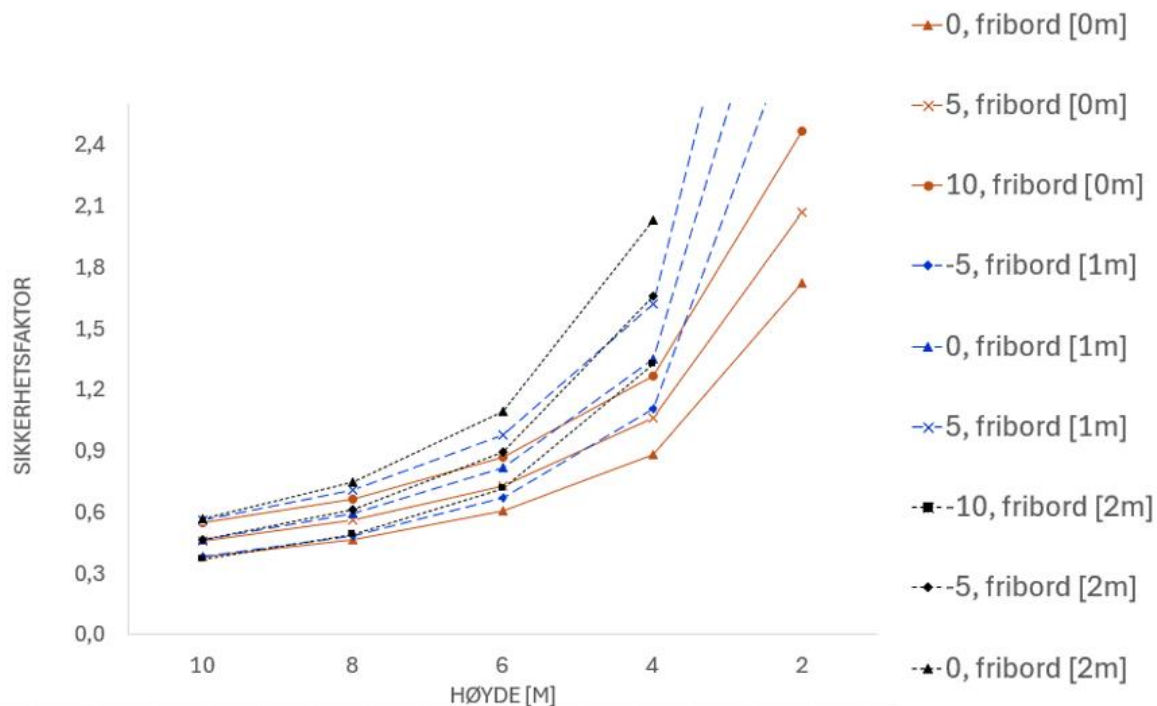
Murdam med torvtetting

TT oppfører seg, som vi har sett tidligere, motsatt av de andre dammene. Sikkerhetsfaktoren er best ved høyde 2 meter, illustrert i figur 54. Grafen for fribord 2 meter stopper ved damhøyde 4 meter, men ved 2 meter ville sikkerhetsfaktoren vært uendelig, da man ikke har noen motkrefter i dette tilfellet, bare dammens egenvekt. Sikkerhetsfaktoren øker betraktelig ved minking av damhøyden. Også her er det fribord 2 meter som gir best stabilitet.



Figur 54: TT, ulikt fribord, helningsvinkel -10° og 10°

Figur 55 er kuttet før fribord 1 meter når sitt toppunkt, dette er for å få et bedre bilde av der grafene ligg nært. Fult utsnitt av diagrammet er lagt med i vedlegg F.2, her ligger og et mer skalert utsnitt av figur 55, som gir en tydeligere presentasjon av ulikhetene i dammen. Ved damhøyde 8 og 10 meter gir 1 meter høyere fribord mulighet for å senke helningsvinkelen med 5° , mens ved damhøyde 4 meter kan en ved å øke fribordhøyde med 1 meter minke helningsvinkelen med 10° .

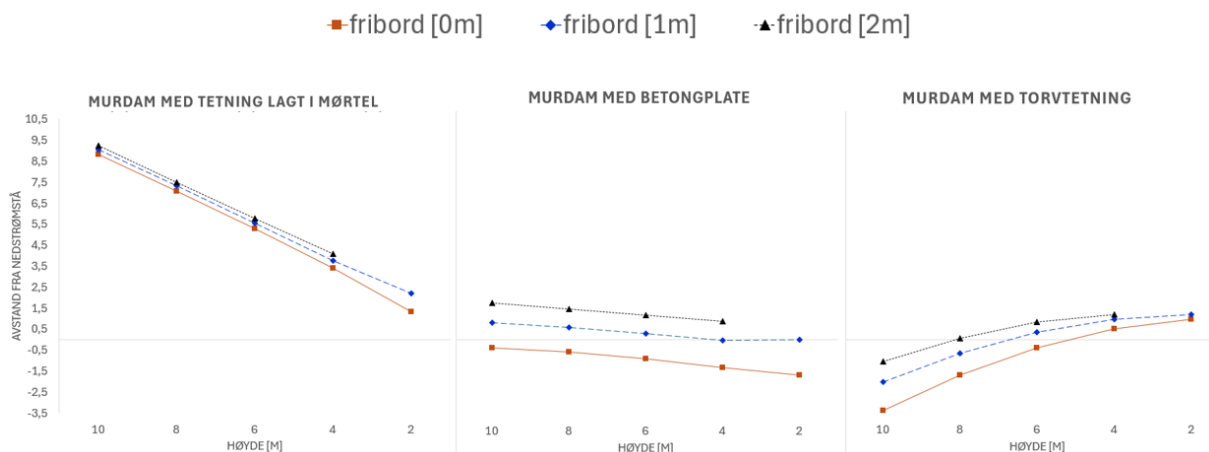


Figur 55: TT, Fokus på grafer som ligg nær hverandre

For TT må det regnes på oppstrømsmuren, dersom fribord skal senkes lavere enn 1 meter. Dette er grunnet at løsmassene må være stabile mot utglidning ved nedtrapping av vannmagasinet, som er angitt i retningslinjer for fyllingsdammer. (NVE, 2003). Dette vil være grunnet likevektsprinsippet om horisontale krefter, da torvtetningen stadig vil ha et konstant trykk mot både oppstrøms- og nedstrømsmur, men oppstrømsmur vil ikke ha en motkraft til torvtetningen dersom magasinet senkes. Det konkluderes derfor med at dersom det skal være ønskelig å senke vannstanden, er det nødvendig å gjøre beregninger på oppstrømsmur i tillegg til nedstrømsmur.

6.4.2 Veltestabilitet

Figur 56 viser veltestabiliteten til de tre ulike oppbyggingene, for fribord 0, 1 og 2 meter. Sammenligner vi diagrammene er det enkelt å se at TLM gir best stabilitet. Diagrammet indikerer og at BP er den dammen som har mest endring i veltestabilitet ved endring i fribord. Differansen for stabilitet øker mer dess høyere dammen blir for TT, selv om stabiliteten blir dårligere. I vedlegg F.2 kan en se hvordan diagrammet ser ut med kravet for veltestabilitet.



Figur 56: Sammenligning av veltestabilitet, endring i fribord og de ulike damoppbyggingene

Å øke fribordhøyden vil gi alle damtypene økning i både velte- og glidestabilitet. For TT må det tas en vurdering av oppstrømsmur. For alle damtypene kan en ved å endre fribordhøyden med 1 meter minke helningsvinkelen med 5° og få lik glidestabilitet som utgangspunktet.

Det vil si at dammen i tabell 8 vil bli godkjent for -10° om fribordet blir økt fra 1 til 2 meter.

Murdam	Tilstand	Bredde [m]	Høyde [m]	Helningsvinkel [$^{\circ}$]								
				-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
Betongplate	DFV	4	6	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabell 8: Utsnitt av tabell 7.

6.5 Islast på murdam med torvtetning

For TT er 0kN/m islast valgt. Dette er grunnet islasten vil bli tatt opp av oppstrømsmur og torvtetning før den treffer nedstrømsmur, som er den delen av muren det blir beregnet på. Etter samtaler med veileder har gruppen fått opplyst om at en mindre islast på opptil 35kN/m kan bli overført til nedstrømsmur. Det er ikke valgt å ta dette med i beregningene, da det allerede er et fåtall av TT 0kN/m islast som er godkjente. Det er blitt beregnet på 35kN/m islast på de TT som ble presentert som godkjente i tabell 7, disse er presentert i tabell 9.

Tilstand	Bredde [m]	Høyde [m]	Helningsvinkel [°]								
			-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
HRV, [35kN/m] islast	2	2	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓
	4	2	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		4	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
HRV, [0kN/m] islast	1	2	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	2	2	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		4	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓
	4	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		4	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabell 9: Godkjente murdammer med torvtetning ved 35kN/m islast. Bredder der ingen helningsvinkler er godkjent er utelatt.

Tabell 9 viser at det er flere dammer som er godkjente for 0kN/m islast enn for 35kN/m islast. For TT i lasttilfelle HRV må det tas en vurdering på hvilke islast som blir overført til nedstrømsmuren, før en kan nytte denne tabellen for å se om dammen holder kravene.

6.6 Stabilitet og dambrudd

Glidestabilitet tar hensyn til alle potensielle krefter som kan påvirke dammen. Murdammer utsettes for vanntrykk fra innsiden, som er betydelige faktorer for dambrudd. Det er viktig å vurdere om dammen er i stand til å motstå de horisontale kreftene for å unngå at dammen glir. Dersom dammen glir, kan dette føre til at det oppstår store sprekkdannelser og i verste fall brudd.

Det er ofte lettere å hindre velting enn glidning. Ved å tilrettelegge for riktig geometri, samt benytte seg av egnede materialer og metoder under konstruksjon, kan man redusere risikoen for velting. Derimot kan en ha en velbygd dam som likevel ikke har tilfredsstillende glidestabilitet, og dette kan resultere i et katastrofalt brudd.

I *rapport 2* om evaluering av eksisterende betong- og murdammer blir det påpekt at ved velting er resultantens plassering ikke er relevant for en tørmurt dam, grunnet poretrykket ikke påvirkes av trykk i fundamentet. Ettersom det kun er sett på skader på konstruksjoner og ikke fundament, så er trykk i fundament ikke tatt hensyn til i oppgaven. Det er og påpekt at det ikke vil kunne oppstå strekk i murdammer, bortsett fra konstruksjoner med betongplate med tetning mot vannside. FornybarNorge har derfor foreslått et nytt forslag for testing av velting i bruddgrensetilstand, der veltestabilitet skal beregnes likt som glidning, med en sikkerhetsfaktor på 1.2-1.3, avhengig av konsekvensklasse. Dette understreker påstanden om at glidning krever en høyere sikkerhet, i tillegg til at det blir påpekt at det vil være usannsynlig at en murdam vil velte i utgangspunktet [34].

Det er viktig å merke seg at selv om glidestabilitet er den dimensjonerende bruddårsaken, betyr det ikke at velting ikke er viktig. Begge faktorene må tas i betraktning under planlegging og konstruksjon av murdammer for å sikre en trygg og stabil struktur, spesielt for BP.

I kapittel 3 blir det presentert ulike skader som kan oppstå på murdammer. I denne oppgaven har det blitt beregnet på krefter for å se om dammen er stabil i forhold til glidning og velting. Tabell 7 i kapittel 5.5 gir en oversikt over godkjente dammer i forhold til stabilitetskravene. Selv om disse dammene er innenfor stabilitetskravene er det flere tilfeller som kan påvirke dammens stabilitet.

Både flom og vannintrenging er skadetyper som kan endre dammens stabilitet ved utrivning av steinblokker eller ved å ødelegge tetningen til dammen. Utskyvning av steinblokker er og en fare for ved TT.

Frost i steinblokkene kan forårsake sprekkdannelse og dermed redusere steinens funksjonalitet. På samme måte kan frost mot betongplaten føre til lignende skader.

De fleste murdammer er over 70 år gamle, og aldring av materialer er derfor en skadeårsak som er naturlig at kan forekomme.

Dermed er det viktig å tenke på at selv om en dam er godkjent i forhold til tabell 7 må eventuelle skader også vurderes.

6.7 Resultatet sammenlignet mot krav før 1981

Det fleste murdammer er over 70 år gamle. Dette vil si at de tilhører tidligere krav før 1981 og er ikke bygd etter dagens damsikkerhetsforskrift.

Ettersom eksempel-dammene oppgaven er basert på enda ikke har gått til brudd, antas det at det er lite sannsynlighet for de vil gå til brudd i nærmere fremtid. Enda de ikke nødvendigvis oppfyller dagens krav, strider dette mot resultatene som er blitt fremstilt i denne oppgaven. Det kan være flere årsaker til dette, som blant annet alle forenklingene som har blitt gjort. Beregningene har blitt gjort veldig til konservativ side, og vil derfor naturligvis få dårligere resultat enn hva realiteten tilsier.

Resultatene for murdammene har generelt vært dårligere enn forventet, spesielt ved BP og TT. Oppgaven baserer seg på geometrien til tre eksisterende murdammer som er bygget i lang tid tilbake og har ikke opplevd noen dambrudd. Det var derfor forventet bedre resultater. Det har vært mye diskusjon rundt årsakene til de oppnådde resultatene. Deretter er det blitt konkludert med at resultatene skyldes en kombinasjon av manglende kompetanse, betydelige forenklinger og bygging av konstruksjoner i samsvar med eldre sikkerhetskrav.

For å se om beregningene er for konservativ, er det testet glidestabilitet for murdammene i tilstandene de ikke oppfyller dagens krav oppimot tidligere krav på 0.7, se tabell 10. Det er kun gjennomført tester for glidestabilitet, ettersom dette er identifisert som den dominerende årsaken til skade. Det er blitt vurdert om dammene oppfyller kravene for alle snitt ved damhøyde på 10 meter.

Murdam	Tilstand	Bredde [m]	Helningsvinkel [°]									
			Dagens krav: 1.5					Krav fr 1900: 0.7				
			-10	-5	0	5	10	-10	-5	0	5	10
Tetning lagt i mørtel	HRV, [100kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
		2	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓
		4	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	HRV, [40kN/m] islast	1	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		2	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	DFV	1	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Betongplate	HRV, [100kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
		4	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓
	HRV, [40kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
		2	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓
		4	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	DFV	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
		2	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓
		4	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Torvtetning	HRV, [0kN/m] islast	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		4	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓
	DFV	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		4	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓

Tabell 10: Sammenligning av glidestabilitetskrav.

I tabell 10 kan en se at resultatene ble betydelig bedre, spesielt for tetning lagt i TLM og BP, mens TT kun ble godkjent for helning 0°, 5° og 10° for kronebredde 4 meter.

Ettersom murdammene enda ikke er godkjent for alle helningsvinkler under eldre stabilitetskrav, men stadig står i dagens lys, kan gruppen utelukke at de dårlige resultatene ikke kun kan skyldes økningen av sikkerhetskravene.

6.8 Sammenligning av de tre oppbyggingene

Glidestabilitet

For lasttilfellet HRV [40kN/m] islast vil TT ha [0kN/m] islast. Selv uten islast vil TT ha svakest stabilitet av de tre ulike murdamoppbyggingene. Dette blir tydelig ved bredde 4 meter der TLM er godkjent for alle helningsvinkel, BP er godkjent for helningsvinkel 5° og 10°, mens TT ikke er godkjent for noen helningsvinkler. Ved mindre bredde eller ved HRV [100kN/m] islast er tilfellet også likt, der TLM har best stabilitetsverdier, mens TT har dårligst.

Ved DFV vil TLM og BP ha best stabilitetsverdier ved 2 meter damhøyde og ikke ved 10 meter som ved HRV [100kN/m] og [40kN/m] islast. Her er det også tydelig at TLM har best stabilitetsverdier, og TT har dårligst.

Veltestabilitet

Kravet for veltestabilitet er forskjellig for de ulike oppbyggingene da kravet varierer ut fra bunnbredden. Sammenligner man disse i forhold til kravene er det tydelig at TLM har best stabilitet. Ved 4 meter kronebredde er BP over kravet for alle lasttilfellene, mens TT ikke er godkjent for noen av tilstandene. Dermed kan vi konkludere med at TLM har best veltestabilitet, og TT har dårligst.

Dekomponering

Ved dekomponering av glidestabilitet viser det seg at TLM og BP i realiteten har dårligere stabilitet for negative helningsvinkler. For TT viser dekomponering at konstruksjonens stabilitet forverres ved en positiv helningsvinkel.

Dekomponering av veltestabilitet vil påvirke hver konstruksjon ulikt.

Der stabiliteten blir lavere er det viktig at dekomponering blir gjennomført. I de tilfeller dekomponering gir høyere verdier enn uten dekomponering vil det være til sikker side å ikke dekomponere.

Fribord

Alle dammene får bedre stabilitet ved å øke fribordhøyden. Etter å ha analysert diagrammene for fribord kan det konkluderes med at alle damtypene kan øke fribordhøyden med en meter og minke helningsvinkelen med 5° og få tilsvarende stabilitet som før.

Som et resultat av oppgaven har det blitt vurdert mange faktorer som spiller inn på stabiliteten til konstruksjonene. Av dette har det vært tydelig at TLM er den mest stabile konstruksjonen.

7 Konklusjon

Hensikten med oppgaven var å undersøke hvordan ulike lasttilfeller og variabler påvirker stabiliteten til murdammene, samt å identifisere hvilke murdamoppbygging som er best. I tillegg var det et mål å utarbeide en oversikt over de dammene som tilfredstiller stabilitetskravene, denne oversikten finner en i kapittel 5.5 tabell 7.

Beregningene som er utført viser at ingen av murdammene er godkjent for alle tilstandene de er testet for, men det er klare forskjeller. Etter en fullstendig drøfting av resultatene, er det konkludert med at TLM er den mest stabile murdamsoppbyggingen, men krever mye plass, ressurser og materialer.

Ved vurdering av lasttilfeller ble DFV lastbildet som gir best stabilitetsresultat for BP og TLM. Dette skyldes at den ikke inkluderer islast. HRV [40kN/m] islast vil gi bedre resultat enn HRV [100kN/m] islast. For TT vil DFV være dimensjonerende lasttilfelle.

De ulike variablene påvirker stabiliteten på denne måten:

- **Kronebredde:** stabiliteten blir bedre ved økning av kronebredde, dette skyldes at konstruksjonen blir mer massiv.
- **Damhøyde:**
 - o TLM: For HRV [40kN/m] og [100kN/m] islast vil de høyeste damhøydene gi best stabilitet, dette skyldes islast som alltid vil oppstå rundt damhøyde 2 meter. For DFV vil de laveste damhøydene gi best stabilitet, da det ikke er noe islast og vanntrykket er mindre når dammen er lavere.
 - o BP: For HRV [100kN/m] islast vil de høyeste damhøydene gi best stabilitet. Ved HRV [40kN/m] og DFV vil det være best stabilitet ved lavere damhøyde.
 - o TT: Både HRV og DFV har best stabilitet ved 2 meter, stabiliteten minker når dammen blir høyere.
- **Helningsvinkel uten dekomponering:** En negativ helningsvinkel vil gi lavere stabilitet. Positiv helningsvinkel vil gi høyere stabilitet.
- **Fribord:** Økning av fribordhøyde vil gi bedre stabilitet.

Etter en grundig gjennomgang av hovedanalysen og dekomponering av helningsvinkler kan det konkluderes med at dekomponering ikke er nødvendig for de fleste tilfeller. Likevel anbefales det å undersøke dammer med helningsvinkel på -5° eller 5° , samt de som ligger nær sikkerhetskravene.

Dersom tabellen skal være til nytte, er det avgjørende å bygge relativt lik geometri som ligner på eksempeldammene (figur 1, 2 og 3) brukt i oppgaven. Dette gjør at oppgaven kun treffer en liten nisje

av murdammer. For å maksimere tabellens nytte burde en ta hensyn til flere variabler i form av geometri til konstruksjonene. Det er også viktig å vurdere tidligere skadeforhold på dammene.

8 Vedleggsliste

Vedlegg A.1 – Hovedanalyse HRV, Mathcad

Vedlegg A.2 – Hovedanalyse DFV, Mathcad

Vedlegg B.1 – Dekomponering TLM og BP, Mathcad

Vedlegg B.2 – Dekomponering TT, Mathcad

Vedlegg C.1 – Hovedanalyse TLM, Excel

Vedlegg C.2 – Hovedanalyse BP, Excel

Vedlegg C.3 – Hovedanalyse TT, Excel

Vedlegg D.1 – TLM Glidestabilitet og velttestabilitet uten dekomponering, diagram

Vedlegg D.2 – BP glidestabilitet og velttestabilitet uten dekomponering, diagram

Vedlegg D.3 – TT glidestabilitet og velttestabilitet uten dekomponering, diagram

Vedlegg D.4 – Sammenligning av glidestabilitet uten dekomponering, diagram

Vedlegg E.1 – Dekomponering, Excel

Vedlegg E.2 – Dekomponering, diagram

Vedlegg F.1 – Fribord, Excel

Vedlegg F.2 – Fribord, diagram

9 Kilder

- [1] NVE, «Dam: Kobberdammen». Åpnet: 26. februar 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.nve.no/om-nve/nves-listefoerte-kulturminner/dammer/kobberdammen/>
- [2] NVE, «Norsk damsikkerhetsarbeid - NVE», NVE. Åpnet: 13. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.nve.no/energi/tilsyn/damsikkerhet/norsk-damsikkerhetsarbeid/>
- [3] NVE, «Regelverk - Damsikkerhet - NVE», Regelverk. Åpnet: 26. februar 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.nve.no/energi/tilsyn/damsikkerhet/regelverk/>
- [4] Regjeringen, «Slik kan vi tilpasse oss klimaendringene», Regjeringen.no. Åpnet: 26. februar 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/klimatilpasning/id2344803/>
- [5] ICOLD, «ICOLD CIGB > Definition of a Large Dam». 13. mai 2024. Åpnet: 13. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.icold-cigb.org/GB/dams/definition_of_a_large_dam.asp
- [6] I. Støren, *Bare søk!* Oslo, 2013. Åpnet: 12. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://issuu.com/cdundervisning/docs/binder1>
- [7] Lovdata, *Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften)*. 2023. Åpnet: 12. februar 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-12-18-1600/*#*
- [8] Autodesk, «Autodesk Revit-programvare | Se priser og kjøp den offisielle versjonen av Revit 2024». Åpnet: 8. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.autodesk.no/products/revit/overview>
- [9] Microsoft Excel, «Gratis programvare for regneark på nettet: Excel | Microsoft 365». Åpnet: 9. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.microsoft.com/nb-no/microsoft-365/excel>
- [10] NVE, «Dette er NVE - NVE». Åpnet: 13. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.nve.no/om-nve/dette-er-nve/>
- [11] NVE, «Retningslinjer for murdammer». 2011. Åpnet: 31. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://publikasjoner.nve.no/retningslinjer/2011/retningslinjer2011_03.pdf
- [12] R. Thorsteinsen, «Damsikkerhet I». mai 2010. Åpnet 01.april 2024 [Unntatt offentligheten].
- [13] NVE, «Dammer og vassdragsanlegg - definisjoner - NVE». Åpnet: 13. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.nve.no/energi/tilsyn/damsikkerhet/dammer-og-vassdragsanlegg-definisjoner/>
- [14] R. Heggstad og T. Konow, «demning», *Store norske leksikon*. 22. august 2023. Åpnet: 13. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/demning>
- [15] NVE, «Retningslinjer for betongdammer». 2005. Åpnet: 24. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.nve.no/media/8103/retningslinjer-for-betongdammer-med-3-tillegg-april-2023.pdf>

- [16] J. V. Thue, «Mørtel», *Store norske leksikon*. 23. august 2023. Åpnet: 6. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/m%C3%B8rtel>
- [17] UIO, «Torv - Institutt for biovitenskap», Torv. Åpnet: 11. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/t/torv.html>
- [18] NVE, «Klassifisering av vassdrag». 2014. Åpnet: 14. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://publikasjoner.nve.no/veileder/2014/veileder2014_03.pdf
- [19] T. Konow og M. Engseth, «Rapport 2 - Hovedrapport med underlag», FornybarNorge, 2, aug. 2017. Åpnet: 7. februar 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.fornybarnorge.no/contentassets/864b0a680a3648d5b4a2d759869e764b/rapport-2-hovedrapport-evaluering-av-betongdammer-2017.pdf>
- [20] NVE, «Retningslinjer for laster og dimensjonering». NVE, 15. desember 2003. Åpnet: 20. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.nve.no/Media/7091/retningslinjer-for-laster-og-dimensjonering-med-tillegg-juli-2018.pdf>
- [21] NVE, «Overvåkning av vassdrag». 2019. Åpnet: 16. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://publikasjoner.nve.no/veileder/2019/veileder2019_03.pdf
- [22] ICOLD, «ICOLD Bulletin 99 - Statistical analysis of dam failures». ICOLD, desember 2019. Åpnet: 13. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp
- [23] ASDSO, «Concrete Gravity Dam Failures | Association of State Dam Safety». Åpnet: 26. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://damsafety.org/dam-owners/concrete-gravity-dam-failures>
- [24] R. Thorsteinsen, «Damsikkerhet II». oktober 2010. Åpnet 01.april 2024 [Unntatt offentligheten].
- [25] A. Tollan, «flom», *Store norske leksikon*. 22. august 2023. Åpnet: 5. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/flom>
- [26] I. Bryhni og T. O. Røthe, «erosjon», *Store norske leksikon*. 22. august 2023. Åpnet: 27. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/erosjon>
- [27] Plankepriser, «Ordbok for sement, mørtel og betong». Åpnet: 13. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.plankepriser.no/innsikt/semment-m%C3%B8rtel-betong>
- [28] ENFO, *Tilstandsbeskrivelse av betong- og fyllingsdammer: håndbok*. Lysaker: Energiforsyningens fellesorganisasjon, 2000. Åpnet: 27. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2011022209036
- [29] NVE, «Veileder for fyllingsdammer». 2012. Åpnet: 12. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.nve.no/media/17017/veileder-uten-rettelse-og-tilleggsnotat.pdf>

- [30] N. Gundersen, «poretrykk», *Store norske leksikon*. SNL, 21. januar 2020. Åpnet: 15. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/poretrykk>
- [31] M. Rognes, «Poretrykk under betongdammer fundamentert på fjell». NTNU, juni 2014. Åpnet: 1. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/242505>
- [32] «Klassifisering av vassdrag». Åpnet: 11. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://publikasjoner.nve.no/veileder/2014/veileder2014_03.pdf
- [33] Vegdirektoratet, «Veg- og gateutforming». Staten vegvesen, juli 2014. Åpnet: 6. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-n100.pdf>
- [34] T. Konow og M. Engseth, «Rapport 1 - Anbefalinger», FornybarNorge, 1, aug. 2017. Åpnet: 11. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.fornybarnorge.no/contentassets/1245bd9b0ca64c979ab480f92cae334a/rapport-1-anbefalinger-evaluering-av-betongdammer-rev-4---2017.pdf>