

Tiril Berg Bjørsom

Miljølast og erosjonsskader på fyllingsdammer i Norge

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Fjola Gudrun Sigtryggsdottir

Juni 2020

Tiril Berg Bjørsom

Miljølaster og erosjonsskader på fyllingsdammer i Norge

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Fjola Gudrun Sigtryggsdottir
Juni 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

MASTEROPPGAVE

Student: *Tiril Berg Bjørsom*

Tittel: **Miljølaster og erosjonsskader på fyllingsdammer.**

1 BAKGRUNN

Fyllingsdammer er utsatte for oppskylling av vindgenererte bølger. Bølgeoppskylling kan føre til erosjon og forskyvning av oppstrøms plastrings stein. Oppstrøms skråning er viktig med tanke på erosjonsbeskyttelse. Effektiviteten av beskyttelsen er blant annet avhengig plastringsteinenes størrelse og tyngde. Situasjoner med islast kan føre til ustabilitet av plastringstein og videre svakhetssoner i oppstrøms skråning. Designkriterier for steinstørrelse i oppstrøms skråningen må være basert på passende miljølastparametere for beregning av bølgepåkjenning og islast.

Fyllingsdammer er viktige for norske vannkraft- og vannforsyningssystemer. Mange av de eksisterende fyllingsdammene må revurderes og muligvis rehabiliteres i nær fremtid for å møte strengere sikkerhetsforskrifter for dammer. Revurderingen inkluderer vurdering av miljølaster, bølge- og islast, og kan føre til at oppstrøms skråning må rehabiliteres på grunn av at steinstørrelsen oppfyller ikke gjeldende krav. Samtidig er grunnlag til bølgeberegningen basert på internasjonal praksis, med enkle metoder og empiriske formuler som ikke har vært utviklet utfra forhold ved magasiner i Norge. I tillegg mangler det nylig kartlegging av omfang erosjonsskader på fyllingsdammer i Norge utfra bølger og is til å kunne identifisere viktigheten av detaljerte undersøkelser eller videre forskning.

Denne oppgaven går ut på å kartlegge, utfra revurderingsrapporter samt utsendt spørsmålsliste og mulig annen dokumentasjon, fyllingsdammer som har vært utsatt for bølgeerosjon og/eller påkjennelser fra islast. Valgte tilfeller skal videre analyseres utfra tilgjengelige metoder i litteraturen.

2 HOVEDPUNKT I OPPGAVEN

Målet for prosjektet er å få mer kunnskap om miljølaster på norske fyllingsdammer og hvor vidt slike laster påvirker drift av dammene, for eksempel på grunn av rehabiliteringstiltak, og/eller påvirker damsikkerheten. Fokuset vil være på miljølaster som har betydning for damsikkerhet og erosjonsskader grunnet slike laster. Dette inkluderer vind, bølger og is, men fokus blir på vind genererte bølger.

Opgaven skal omfatte følgende hovedpunkter:

1. Litteraturstudie om miljølaster, erosjonsskader og relevante risikoanalyser i både norsk og internasjonal litteratur. Litteraturstudien skal blant annet inkludere relevant litteratur om

bølgeberegning, bølgeoppkylling, overtopping av bølger, påvirkning av is og dimensionering av stein i oppstrøms skråningsvern.

2. Analyse av data samlet under kartlegging av erosjonsskader på fyllingsdammer i Norge.
 - a. Identifisering av forhold når erosjonsskadene oppsto.
 - b. Identifisere omfang og type erosjonsskade. Tilknytte dette om mulig mot material brukt i dammen.
 - c. Vurdere om erosjonsskader påvirker damsikkerheten.
3. Beregninger etter metoder som er diskutert i litteraturstudien for valgte dammer og magasiner. Sammenligne det følgende
 - a. Observert vindhastighet og beregnet vindhastighet etter Norsk Standard.
 - b. Strøk og signifikant bølgehøyde ved ulike metoder.
 - c. Dimensjoneringskrav og gitt steinstørrelse på dammene.
4. Diskutere resultatene og gi anbefalinger for videre arbeid.
5. Rapportering.

3 RETTLEDNING, DATA OG INFORMASJON

Dr. Fjóla G. Sigtryggisdóttir vil være hovedveileder for arbeidet. Medveileder er Richard Duncumb, Multiconsult. Diskusjon med, og bidrag fra, kollegaer, studenter og medarbeidere ved NTNU, SINTEF, NVE og dameiere m.fl. anbefales. Bidrag som går inn i oppgaven skal alltid refereres til på korrekt måte.

4 RAPPORTFORMAT, REFERANSER OG ERKLÆRING

Oppgaven skal skrives i et tekstbehandlingsprogram og figurer, tabeller, foto etc. skal være av god rapportkvalitet. Rapporten skal inneholde et sammendrag, en innholdsliste, en liste over figurer og tabeller, en litteraturliste og opplysninger om andre relevante referanser. Sammendrag for elektronisk rapportering skal ikke overskride 450 ord. Elektroniske data fra modellforsøk (f. eks. video og rådata fra måleutstyr) skal innleveres elektronisk på en ryddig og strukturert måte. Oppgaven skal leveres som pdf i Inpera Assessment (IA) innen gitt frist.

Trondheim, vår 2020

Fjóla Guðrún Sigtryggisdóttir

Sammendrag

Målet for denne oppgaven er å få mer kunnskap om miljølaster på norske fyllingsdammer og hvorvidt slike laster påvirker drift av dammene, for eksempel ved rehabiliteringstiltak, og/eller damsikkerheten, samt om våre dimensjoneringskrav er tilstrekkelige for å bevare sikkerheten til damkonstruksjonen. Denne oppgaven er delt i tre deler, en teoretisk del med informasjon fra norsk og utenlandsk faglitteratur, en del der bølgeskader på fyllingsdammer er forsøkt kartlagt, og en del med beregninger ved ulike metoder på enkelte av dammene fra kartleggingen.

Den første delen beskriver bruddmekanismene til en dam som går i brudd som en konsekvens av bølgeskader, ulike utformingskrav og formler som brukes i norske retningslinjer i dag, samt ulike metoder for risikoanalyse som blir brukt for å vurdere sikkerheten på dammer. Det er også gjennomgått tre andre metoder for strøkberegning, og påfølgende bølgeberegning. Metodene beskrevet er Saville (1962)/SMB (1976) metoden som norske retningslinjer bruker en modifisert versjon av i dag, metoder som blir brukt i Storbritannia, og en metode som ble brukt i Norge i gamle retningslinjer.

Den andre delen består av en kartlegging av bølgeskader på norske fyllingsdammer. Det er samlet informasjon fra gamle rapporter fra Sintef, NVE, Statkraft, samt et spørreskjema som ble sendt ut til enkelte VTAer i januar 2020. Det er forsøkt å kartlegge hvilke bølgeskader som er observert, karakteristikkene til dammene, og under hvilke vindforhold skadene oppsto.

Den tredje delen inneholder beregninger av signifikant bølgehøyde, dimensjonerende vindstyrke, bølgeoppskylning og minimum steinstørrelse for enkelte av dammene beskrevet i kartleggingsdelen. Det er deretter sammenlignet ulike beregnede verdier for vindstyrke og observert vindstyrke, samt beregnet minimum steinstørrelse med verdier fra de ulike metodene og faktiske steinstørrelser fra dammene på tiden da skadene oppsto.

Kartleggingen av dammer viste at det ikke er gode nok beskrivelser eller informasjon om hvilke bølgeskader som er oppstått i Norge. Det var kun en av dammene som hadde informasjon om vindforhold da skadene oppsto, og det er ikke oppgitt hvordan denne informasjonen ble innhentet. Utformingskravene som blir brukt i norske retningslinjer i dag er ikke endret til å passe norske forhold og det finnes ikke nok informasjon om faktiske forhold til å bestemme hvilke metoder som passer best for bruk i Norge.

De ulike metodene gir ulike resultater og det er derfor viktig å samle nok informasjon slik at dimensjonering og utforming av oppstrøms skråningsvern kan være basert på krav med mindre usikkerhet.

Abstract

The aim of this assignment is to gain more knowledge about environmental loads on Norwegian embankment dams and whether such loads affect the operation of the dams, for example through rehabilitation measures, and / or dam safety, and whether the sizing requirements are sufficient to maintain the safety of the dam construction. This thesis is divided into three parts, a section with background information from Norwegian and international literature, a section where wave damage on embankment dams is attempted to be mapped, and a section with calculations by various methods on some of the dams from the survey.

The first part describes the fracture mechanisms of a dam that breaks as a consequence of wave damage, various design requirements and formulas used in Norwegian guidelines today, as well as background on risk analysis used to assess the safety of dams. Three other methods for calculating coats and subsequent wave calculations have also been studied. The methods described are the Saville (1962) / SMB (1976) method in which Norwegian guidelines use a modified version of today, methods used in the United Kingdom, and a method used in Norway in old guidelines.

The second part consists of a survey of wave damage on Norwegian embankment dams. Information has been gathered from old reports from Sintef, NVE, Statkraft, as well as a questionnaire that was sent out to some VTAs (dam owner's individual responsible for dam safety) in January 2020. An attempt has been made to map what type of wave damage has been observed, the characteristics of the dams and under which wind conditions the damage occurred.

The third section contains calculations of significant wave height, dimensioning wind strength, wave run-up and minimum rock size for some of the dams described in the survey section. Various calculated values for wind and observed winds were then compared, as well as calculated minimum rock size with values from the different methods and actual rock sizes from the dams at the time the damage occurred.

The mapping of dams showed that there are not good enough descriptions or information about the wave damage that has occurred in Norway. Only one of the dams had information on wind conditions when the damage occurred, and it is not stated how this information was obtained. The design requirements that are used in Norwegian guidelines today have not been adapted to Norwegian conditions and there is not enough information on actual conditions to determine which methods are best suited to use in Norway.


The different methods give different results and it is therefore important to gather enough information so that the sizing and design of the slope protection is based on requirements with less uncertainty.

Forord

Masteroppgaven «*Miljølast og erosjonsskader på fyllingsdammer i Norge*» markerer slutten av min studietid i Trondheim ved sivilingeniørstudiet innenfor Bygg- og Miljøteknikk på Norges teknisk- naturfaglige universitet (NTNU). Oppgaven er en videreføring av en prosjektoppgave skrevet høsten 2019, og omfatter 30 studiepoeng.

Arbeidet med oppgaven har vært lærerikt, spennende og til tider utfordrende. Vil gjerne takke Morten Skoglund, Dag Norum og Lars Grøttå i NVE, og Ingebrigt Bævre i Statkraft for god hjelp til å finne informasjon og grave i gamle arkiver og takk til alle som tok seg til å svare på spørreskjemaet. En stor takk også til min hovedveileder Fjola Gudrun Sigtryggdottir for god hjelp og veiledning underveis, og medveileder Richard Duncumb for hjelp med innspurten.

Det har vært en spesiell tid å skrive master på, og jeg har savnet å kunne sitte på kontoret og ha både faglige og ufaglige samtaler med klassekamerater. En stor takk til min mor Gry Berg, som har latt meg bo hjemme etter at skolen stengte og har delt stue/hjemmekontor de siste månedene.



Tiril Berg Bjørsum

Oslo, juni 2020

Innhold

Figurer.....	xi
Tabeller	xiii
Forkortelser/symboler	xiii
1 Innledning.....	- 1 -
1.1 Mål for oppgaven	- 2 -
1.2 Metode.....	- 3 -
1.3 Oppgavens innhold.....	- 4 -
2 Bruddmekanismer.....	- 5 -
2.1 Innledning.....	- 5 -
2.2 Bruddmekanismer	- 5 -
2.3 Ytre erosjon	- 6 -
3 Bakgrunn og beregningsmetoder.....	- 10 -
3.1 Innledning.....	- 10 -
3.2 Utforming av plastring	- 10 -
3.3 Risikoanalyse	- 12 -
3.3.1 Hendelsestrær	- 13 -
3.4 Oppstrøms plastring og ytre erosjon	- 14 -
3.4.1 Vindstyrke	- 15 -
3.4.2 Magasinets utforming.....	- 17 -
3.4.3 Bølgeberegninger	- 18 -
3.4.4 Bølgeoppskylning og fribord	- 20 -
3.4.5 Steinstørrelser.....	- 22 -
3.4.6 Påvirkning av is.....	- 25 -
3.5 Forskjellige metoder for beregning av strøk og bølger	- 25 -
3.5.1 Savilles metode for beregning av effektivt strøk 1962/SMB metode for bergening av bølger 1976	- 26 -
3.5.2 Beregninger etter britiske retningslinjer.....	- 28 -
3.5.3 Gamle metoder fra Norge/VHL	- 29 -
4 Tilfeller av bølgeskader på fyllingsdammer i Norge.....	- 31 -
4.1 Innledning.....	- 31 -
4.2 Tidligere kartlegginger av bølgeskader i Norge.....	- 31 -
4.3 Informasjon fra spørreskjema.....	- 32 -
4.3.1 Svar fra spørreskjemaet.....	- 32 -
4.3.2 Steinstørrelser.....	- 35 -
4.4 Nærmere beskrivelse av enkelte dammer.....	- 36 -
4.4.1 Innledning.....	- 37 -

4.4.2	Dam Nesjø.....	- 37 -
4.4.3	Akersvassdammen.....	- 39 -
4.4.4	Follsjø.....	- 43 -
4.4.5	Gråsjø.....	- 44 -
4.4.6	Kvilesteinsdammen.....	- 46 -
4.4.7	Sandgrovvassdammen.....	- 48 -
4.4.8	Muravassdammen.....	- 48 -
4.5	Bølgeskader fra nyere tid.....	- 48 -
4.6	Oppsummering.....	- 49 -
5	Beregninger og resultat.....	- 50 -
5.1	Innledning.....	- 50 -
5.2	Beregninger for spesifikke dammer.....	- 50 -
5.2.1	Forutsetninger.....	- 50 -
5.2.2	Dam Nesjø.....	- 52 -
5.2.3	Akersvassdammen.....	- 55 -
5.2.4	Gråsjø.....	- 57 -
5.2.5	Follsjø.....	- 59 -
5.2.6	Kvilesteinsdammen.....	- 61 -
5.2.7	Sandgrovvassdammen.....	- 64 -
5.2.8	Muravassdammen.....	- 66 -
5.3	Sammenligning av observert og beregnet vindstyrke.....	- 68 -
5.4	Strøk og signifikant bølgehøyde ved ulike metoder.....	- 70 -
5.5	Steinstørrelser ved ulike metoder.....	- 73 -
5.6	Oppsummering.....	- 75 -
6	Konklusjoner og videre arbeid.....	- 76 -
6.1	Innledning.....	- 76 -
6.2	Konklusjoner.....	- 77 -
6.3	Diskusjon.....	- 77 -
6.4	Videre arbeid.....	- 78 -
	Referanser.....	- 80 -
	Vedlegg.....	- 83 -
	Vedlegg 1: Svar fra spørreskjema.....	84
	Vedlegg 2: Excelark med bølgeberegninger fra Dam Nesjø.....	92
	Vedlegg 3: Excelark med bølgeberegninger fra Akersvassdammen.....	99
	Vedlegg 4: Excelark med bølgeberegninger fra Gråsjø.....	102
	Vedlegg 5: Excelark med bølgeberegninger fra Follsjø.....	105
	Vedlegg 6: Excelark med bølgeberegninger fra Kvilestein.....	108

Vedlegg 7: Excelark med bølgeberegninger fra Sandgrovvassdammen	111
Vedlegg 8: Excelark med bølgeberegninger fra Muravassdammen	113

Figurer

Figur 1 Snitt gjennom typisk norsk steinfyllingsdam, men mangler nedstrøms skråningsvern (Norges geotekniske institutt, 1983)	- 2 -
Figur 2 Ytre erosjon på dammen (Morten Skoglund, 2018).....	- 6 -
Figur 3 Hendelsestre for brudd forårsaket av islast(Duncumb, 2019).....	- 7 -
Figur 4 Overtopping av fyllingsdam (Novak et al., 2015).....	- 7 -
Figur 5 Bruddutvikling ved overtopping av fyllingsdam (NVE, 2009).....	- 8 -
Figur 6 Steiner i plastring lagt med helning inn mot damaksen.....	- 11 -
Figur 7 Steiner lagt i forband	- 11 -
Figur 8 Beskrivelse av sannsynlighetsestimater (Lacasse, 2017)	- 13 -
Figur 9 Skjema over hvordan parametere påvirker hverandre.	- 14 -
Figur 10 Beregning av effektivt strøk (NVE, 2003)	- 17 -
Figur 11 Bølgehøyde, bølgelengde og bølgeperiode. (NVE, 2003).....	- 18 -
Figur 12 Bølgeoppkylling (Schüttrumpf et al., 2017)	- 20 -
Figur 13 Dimensjoner i anbefalingene av steinstørrelse (Hyllestad, 2007)	- 24 -
Figur 14 Anbefaling for steinform i oppstrøms plastring (Hyllestad, 2007)	- 24 -
Figur 15 Beregning av effektivt strøk etter Saville sin metode fra 1962 (Saville, 1962)....	- 26 -
Figur 16 Strøklengder i bøyde magasin (Institution of civil engineers, 2015)	- 28 -
Figur 17 Strøklengde og bredde (NGI, 1993)	- 26 -
Figur 18 Diagram for å finne Fe (NGI, 1993)	- 30 -
Figur 19 Oversikt over plassering av bølgeskader på fyllingsdammer (Sintef, 2000).....	- 32 -
Figur 20 Kart over dammer med observerte bølgeskader	- 33 -
Figur 21 Sammenligning av oppgitt og beregnet steinstørrelse	- 36 -
Figur 22 Kart med plassering av dammer beskrevet i kapittel 5.4.....	- 37 -
Figur 23 Snitt gjennom Dam Nesjø fra før bygging(Trondheims Elektrisistetsverk, 1969)-	38 -
Figur 24 Kraftigste middelvind registrert i uke 42 og 43 1976.....	- 38 -
Figur 25 Kart med målestasjon ved Nesjø	- 39 -
Figur 26 Vindretning under uværet i 1975 ved Akersvassdammen (Strømme, 1997)	- 40 -
Figur 27 Observert vindstyrke ved Vardefjell høst 1974 og 1975 (Hoff, 1978).....	- 41 -
Figur 28 Kart over målestasjoner ved Akersvassdammen	- 41 -
Figur 29 Kraftigste middelvind ved Akersvassdammen i 1974.....	- 42 -
Figur 30 Kraftigste middelvind ved Akersvassdammen i 1975	- 42 -
Figur 31 Snitt av planlagt reparasjon av Akersvassdammen (Hoff, 1978)	- 42 -
Figur 32 Kart med målestasjoner ved Follsjø	- 43 -
Figur 34 Karftigste middeldvind ved Follsjø i 1972	- 44 -

Figur 33 Kraftigste middelvind ved Follsjø sommer og høst 1972.....	- 44 -
Figur 35 Kart med målestasjoner ved Gråsjø.....	- 45 -
Figur 36 Kraftigste middelvind ved Gråsjø Desember 1975 til Februar 1976.....	- 45 -
Figur 37 Kraftigste middelvind ved Gråsjø rundt 25. Februar.....	- 45 -
Figur 38 Opprinnelig snitt av Kvilesteindammen (Norconsult AS, 2011)	- 46 -
Figur 39 Kart med målestasjoner ved Kvilesteinsdammen.....	- 47 -
Figur 40 Vindmålinger ved Kvilestein høsten 1987	- 47 -
Figur 41 Vindoppstuvning med ulik gjennomsnittlig magasindybde	- 51 -
Figur 42 Strøk for Dam Nesjø.....	- 52 -
Figur 43 Diagram brukt for beregning av effektivt strøk (NGI, 1976)	- 53 -
Figur 44 Nesjøen, oversikt over eksisterende dybdekart (NVE.no)	- 53 -
Figur 45 Bølgeberegninger fra 1976 (NGI, 1976)	- 54 -
Figur 46 Akersvassdammen med strøk	- 55 -
Figur 47 Dam Gråsjø med strøk	- 57 -
Figur 48 Dam Follsjø med strøk	- 59 -
Figur 49 Foldsjøen med bøyd strøk.....	- 61 -
Figur 50 Kvilesteinsdammen med strøk.....	- 62 -
Figur 51 Kvilesteinsvatnet med bøyd strøk.....	- 63 -
Figur 52 Sandgrovvassdammen med strøk	- 64 -
Figur 53 Muravassdammen med strøk	- 66 -
Figur 54 Store Muravatn med bøyd strøk	- 68 -
Figur 55 Observerte og beregnede vindstyrker	- 70 -
Figur 56 Sammenligning av signifikant bølgehøyde fra vind med 1000 års returperiode..	- 71 -
Figur 57 Sammenligning av signifikant bølgehøyde, 30 m/s.....	- 71 -
Figur 58 Sammenligning av effektivt strøk.....	- 72 -
Figur 59 Sammenligning av signifikant bølgehøyde, 1000 år, med justert faktor for moh	- 72 -
Figur 60 Minimum steinstørrelse med ulike beregningsmetoder, hvor den britiske metoden er justert for moh.	- 73 -
Figur 61 Sammenligning av steinstørrelse beregnet med vind på 30 m/s og oppgitt steinstørrelse.....	- 74 -
Figur 62 Sammenligning av steinstørrelse beregnet med vind med returperiode på 1000 år og oppgitt steinstørrelse.	- 74 -

Tabeller

Tabell 1 Terrenkategori og ruhetslengder fra Norsk Standard for vindlaster (Standard Norge, 2009).....	- 17 -
Tabell 2 Faktor for justering av vindhastighet over land ift. over land (Institution of civil engineers, 2015)	- 29 -
Tabell 3 Spørreskjema sendt ut til VTA.....	- 34 -
Tabell 4 Resultat av bølgeberegninger for Dam Nesjø	- 54 -
Tabell 5 Resultat fra ulike metoder på Dam Nesjø	- 55 -
Tabell 6 Resultat av bølgeberegninger for Akersvassdammen	- 56 -
Tabell 7 Resultat fra ulike metoder på Akersvassdammen	- 57 -
Tabell 8 Resultater fra bølgeberegninger på Dam Gråsjø.....	- 58 -
Tabell 9 Resultat fra ulike metoder på Dam Gråsjø.....	- 59 -
Tabell 10 Resultat fra beregninger på Dam Follsjø	- 60 -
Tabell 11 Resultat fra ulike metoder på Dam Follsjø	- 61 -
Tabell 12 Resultater fra bølgeberegninger på Kvilesteinsdammen	- 63 -
Tabell 13 Resultat fra ulike metoder på Kvilesteinsdammen	- 64 -
Tabell 14 Resultat fra bølgeberegninger på Sandgrovvassdammen	- 65 -
Tabell 15 Resultat fra ulike metoder på Sandgrovvassdammen	- 66 -
Tabell 16 Resultat fra bølgeberegninger på Muravassdammen	- 67 -
Tabell 17 Resultat fra ulike metoder på Muravassdammen.....	- 68 -

Forkortelser/symboler

DFV	Dimensjonerende flomvannstand
EnFo	Energiforsyningens Fellesorganisasjon
HRV	Høyeste regulerte vannstand
NGI	Norges geologiske institutt
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NVE	Norges Vassdrags- og energidirektorat
SEBJ	Société d'énergie de la Baie James
SIV	Sikkerhet i vassdrag
SMB	Sverdrup-Munk-Bretschneider
VHL	Vassdrags- og havnelaboratoriet
VTA	Vassdragsteknisk ansvarlig

1 Innledning

Norges vassdrags- og energidirektorat, heretter kalt NVE, definerer fyllingsdammer som dammer hovedsakelig bygd opp av oppfylte og komprimerte materialer av jord, grus eller sprengstein. Dammen betegnes steinfyllingsdam når dammens volum består av mer enn 50 % sprengstein og jordfyllings- eller grusfyllingsdam når mer enn 50 % av fyllingsmassen består av leire, silt, sand eller grus (NVE, 2012).

Fyllingsdammer deles inn etter tetningstype og kan plasseres i tre kategorier:

- Fyllingsdam med tetningskjerne av morene
- Fyllingsdam med sentral tetningsvegg
- Fyllingsdam med oppstrøms tetningsdekke

Figur 1 viser et snitt gjennom en typisk steinfyllingsdam bygget i Norge med tetningskjerne av morene. Den viktigste funksjonen til tetningskjerna er hindre vann til å strømme gjennom dammen. Utenpå kjernen er det en filter- og overgangssone. Hovedfunksjonen til disse er å holde tetningskjernen på plass, så kommer støttefyllingen som er bygget for å sørge for at dammen er stabil, og at den tåler belastningene den er dimensjonert for. Utenpå støttefyllingen så kommer skråningsvern på begge sider og kronevern på toppen, hovedfunksjonene for disse vernene er å beskytte dammen for påkjenning av miljølaster. Figur 1 viser kun skråningsvern på oppstrøms skråning, men forskrift for sikkerhet ved vassdragsanlegg (Olje- og energidirektoratet, 2009), heretter kalt damsikkerhetsforskriften, gir krav om skråningsvern på begge sider.

Miljølaster defineres av NVE (NVE, 2003) som laster forårsaket av klimatiske, mikroklimatiske og topografiske påvirkning. Dette inkluderer tilleggsvanntrykk som følge av flom, bølger, islast, snølast, tele, jordskjelv, økt vannstand som følge av tilstopping (flytetorv, trær, snø/is), skred, utbrudd fra bredemt sjø, isgang, ising på overløpsterskler etc. I denne oppgaven vil det hovedsaklig bli fokusert på skader forårsaket av bølger og is.

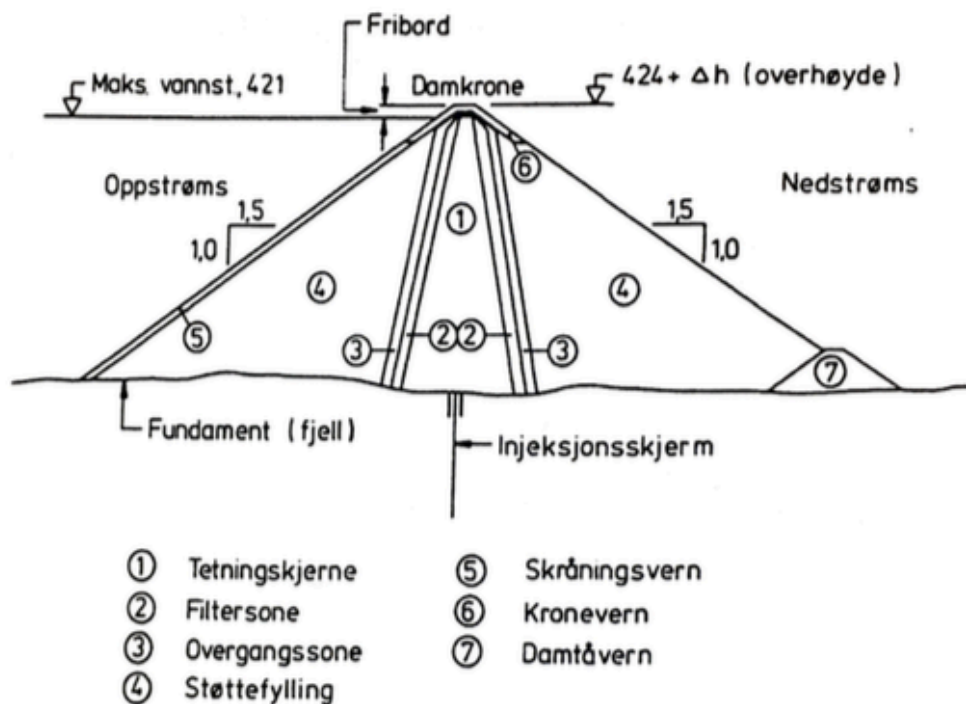
Sikkerheten ved dammer er svært viktig siden konsekvensene ved brudd kan føre til alvorlig skade på mennesker, miljø og eiendom. En eventuell dambruddsbølge kan føre til tap av liv og store økonomiske tap, men også føre til endringer i vann- og strømforsyning som kan ha langvarige effekter. For å sørge for god sikkerhet er det derfor viktig med sikker utforming og kontinuerlig overvåking av damanlegg.

Fyllingsdammer i Norge er utsatte for bølger og bølgeoppkylling generert av vind og påvirkninger fra is. Dette kan føre til erosjon og forskyvning av plastringsstein på oppstrøms skråning. Skråningsvernet på vannsiden av dammen er viktig med tanke på erosjonsbeskyttelse og effektiviteten er blant annet avhengig av steinstørrelse og plassering. Utformingskravene til plastringen må være basert på passende miljølastparametere for å begrense påkjenningen forårsaket av bølger og is. Disse miljølastparametere kan være påvirket av klimaendringer og det er derfor viktig at de er oppdaterte når man gjennomfører revurderinger. Denne oppgaven vil fokusere på oppstrøms skråningsvern, og skader fra

omtalte miljølaste. Oppgaven vil derfor ikke omhandle steinfyllingsdammer med oppstrøms tetningsdekke, men dammer med sentral kjerne og skråningsvern av stein.

Alle dammer i Norge må følge kravene gitt i damsikkerhetsforskriften (2009). I paragraf 5-10 som omhandler fyllingsdammer står det beskrevet om oppstrøms skråning:

«Oppstrøms skråning skal ha skråningsvern som er dimensjonert og utført slik at det motstår påvirkning av bølger, is, tele og andre mulige påkjenninger. Hvis skråningsvernet bygges opp av stein, skal det brukes steiner av tilfredsstillende størrelse og kvalitet, og disse skal være stabilt ordnet i forband. Steinene skal plasseres med fall og lengderetning innover i dammen. Overgang mot støttefylling må utføres slik at utvasking av innenforliggende materiale ikke finner sted. Hvis oppstrøms fylling er fundamentert på løsmasser, må skråningsvernet sikre naturlig terreng mot skadevirkning fra bølger og is. Den ytre del av fyllingen (skråningsvern, overgangssone og støttefylling) skal bestå av godt drenerende masser med en samlet tykkelse som hindrer at det kan oppstå sig på grunn av eventuelle telefarlige masser i innenforliggende fylling.» (Olje- og energidepartementet, 2009)



Figur 1. Snitt gjennom typisk norsk steinfyllingsdam, men mangler nedstrøms skråningsvern (Norges geotekniske institutt, 1983)

1.1 Mål for oppgaven

Målet for denne oppgaven er å få mer kunnskap om miljølaste på norske fyllingsdammer og hvorvidt slike laste påvirker drift av dammene, for eksempel ved rehabiliteringstiltak, og/eller damsikkerheten, samt om våre dimensjoneringskrav er tilstrekkelige for å bevare sikkerheten til damkonstruksjonen. Fokuset vil være på miljølaste som har betydning for damsikkerheten, og erosjonsskader forårsaket av slike laste, samt utforming for å hindre

skadene. Dette inkluderer vind, bølger og is, men hovedfokus blir på vindgenererte bølger og steinstørrelse i oppstrøms skråning.

Spørsmål som vil bli behandlet i oppgaven er:

- Under hvilke forhold er det bølgeskader på fyllingsdammer oppstår?
- Hva er omfanget av de observerte bølgeskadene?
- Påvirker erosjonsskader fra miljølaster damsikkerheten?
- Hvor godt samsvarer de beregnede verdiene for vind- og bølgeforhold med de observerte forholdene?
- Hvilken steinstørrelse var det på dammene da skadene oppsto, i forhold til dagens retningslinjer?
- Hvilken effekt har ulike metoder for bølgeberegninger?

Disse spørsmålene er forsøkt besvart ved litteraturstudier, spørreskjema og rapporter mottatt i sammenheng med dette, informasjon hentet fra kart og målestasjoner for vind, beregninger utført i henhold til dagens retningslinjer og andre metoder beskrevet i oppgaven.

1.2 Metode

Forarbeidet til denne masteroppgaven ble gjort i prosjektoppgaven “Bølgeoppskylling på fyllingsdammer i Norge”. Den oppgaven inneholdt litteraturstudie på bruddmekanismer for fyllingsdammer og teoretisk utforming av oppstrøms plastring etter norsk praksis i dag, samt undersøkelser av enkelte dammer med observerte bølgeskader. For å få tak i denne informasjonen ble Statkraft og NVE kontaktet, og det ble mulig å få tilgang til gamle rapporter fra deres arkiv.

Dette temaet er det undersøkt videre i denne masteroppgaven. Det er gjort større litteratursøk på utforming av oppstrøms plastring i Norge, og alternative metoder brukt i utlandet og etter tidligere norske retningslinjer for de samme beregningene. Metodene som er undersøkt i oppgaven er VHLs metode for strøkberegninger tidligere brukt i Norge, Saville/SMB sine metoder for strøk- og bølgeberegninger samt britiske metoder for vind-, bølge- og strøkberegninger.

I EnFo rapporten «*Sikkerhet ved fyllingsdammer*» (Strømme, 1997), er det listet opp noen norske fyllingsdammer som skal ha hatt observerte bølgeskader. Det ble laget og sendt ut et spørreskjema til nåværende VTAer på disse dammene. Det ble mottatt svar fra 11 av de 19 dammene listet opp. Fra 6 av dammene sendte VTA ferdig utfylt spørreskjema, og fra 5 av dammene sendte de rapporter og notater hvor det var mulig å finne informasjonen spurt om i spørreskjemaet. Denne informasjonen ble analysert sammen med tilleggsinformasjon mottatt fra enkelte VTAer sammen med undersøkelsen.

Det ble gjort undersøkelser om vær og klima ved dammene da bølgeskadene ble observert, og det er forsøkt å kartlegge under hvilke værforhold skadene oppsto. Denne informasjonen er hentet fra spørreundersøkelsen, samt fra historiske data fra Norsk Klimaservicesenter.

Ut ifra bakgrunnen beskrevet i kapittel 3.4 er det laget et beregningsark for å kunne beregne disse verdiene. Det er gjort beregninger på alle dammene fra spørreundersøkelsen der det var mulig. Det er gjort sammenligninger mellom de teoretiske kravene beregnet etter dagens retningslinjer, og oppgitt tilstand ved dammene da det ble observert bølgeskader.

1.3 Oppgavens innhold

Denne oppgaven er organisert i 6 kapitler hvor hvert kapittel har en innledning. Kapittel 2 handler om fyllingsdammer og bruddmekanismer med fokus på ytre erosjon. Bakgrunn og beregninger for hvordan en utformer oppstrøms plastring og beregner effektivt strøk, vindstyrke, bølgehøyder og steinstørrelse blir behandlet i kapittel 3, sammen med bakgrunn for en type risikoanalyse som er brukt i Norge. Kapittel 4 inkluderer en kartlegging av observerte fyllingsdammer i Norge, med fokus på 7 spesifikke dammer. Beregningene beskrevet i kapittel 3 er utført på dammene beskrevet i kapittel 5, resultat og antagelser gjort i forhold til dette er beskrevet i kapittel 5. En diskusjon rundt arbeidet utført i oppgaven, konklusjoner og videre arbeid er behandlet i kapittel 6.

2 Bruddmekanismer

Kapittelet inneholder årsaker og mekanismer ved dambrudd i fyllingsdammer, og hvordan dette beregnes i Norge.

2.1 Innledning

Norge er et land med mange dammer, ifølge NVEs database (SIV) er det registrert ca. 3000 dammer. Når det gjelder store dammer som er over 15 meter høye er ca. halvparten fyllingsdammer, og blant dammer som er over 90 meter høye er 8 av 11 dammer steinfallingsdammer. (Norconsult AS, 2014) Et dambrudd kan ha svært store konsekvenser, spesielt for de store dammene, og det er derfor viktig at man har god kunnskap om hvordan et dambrudd forløper seg.

2.2 Bruddmekanismer

Dambrudd kan forårsakes av flere forskjellige årsaker som hovedsakelig kan klassifiseres i tre hovedkategorier (Morten Skoglund, 2018):

- Indre erosjon
- Geotekniske utglidninger
- Ytre erosjon

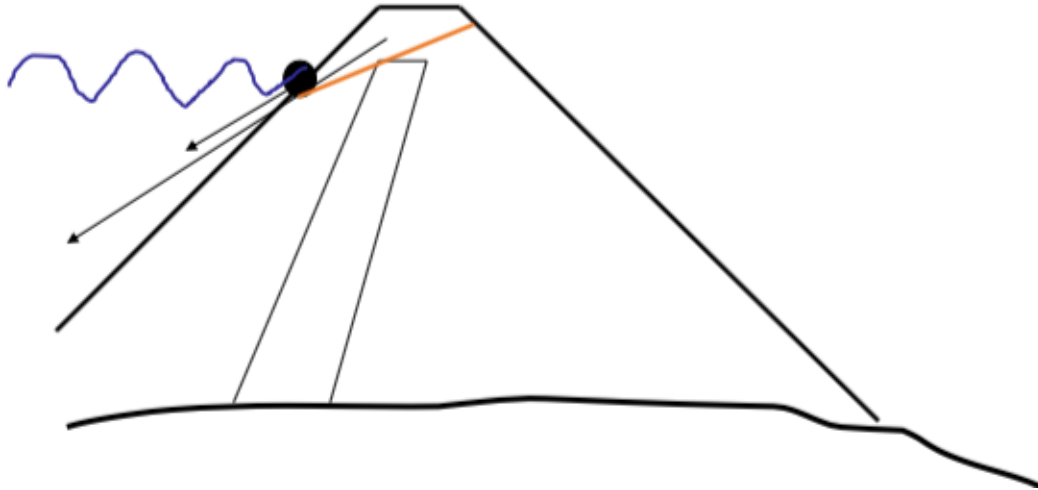
Ved indre erosjon eroderes partikler i tetningskjernen bort ved kreftene fra rennende vann gjennom dammen. Vannet kan komme fra lekkasjer på oppstrøms side av dammen, eller ved bakovererosjon. Dette kan forebygges ved å unngå gjennomgående konstruksjoner i dammen. Disse kan gi vannet en lettere vei gjennom dammen. God utforming av filter, både oppstrøms og nedstrøms kjerne, er også viktig for å hindre lekkasje.

Innenfor kategorien geotekniske utglidninger er det ulike årsaker til utglidning av skråningene. Dersom helningen nedstrøms er for høy, eller bratt, i forhold til materialets skjærstyrke kan det føre til en utglidning av materialet i fyllingen. Rask endring i vannstanden i magasinet, for eksempel ved nedtapping, kan føre til en utglidning av skråningsvernet på oppstrøms side. Der dammen er fundamentert på løsmasser, eller dårlig fjell, kan utglidninger og ras i fundament føre til utglidning av fyllingsdammen (Novak, Moffat, Nalluri, & Narayanan, 2015). Denne typen utglidninger kan forebygges ved å bygge skråningene slakere, slik at skjærkapasiteten forbedres, eller dreneres slik at poretrykket reduseres.

Den siste kategorien er ytre erosjon, og det er på denne måten miljølaste som bølger og is kan påvirke sikkerheten til en fyllingsdam.

2.3 Ytre erosjon

Miljølaster som bølger og is påvirker oppstrøms skråning på fyllingsdammer som ytre erosjon. Bruddårsaker ved ytre erosjon kan være lekkasjer gjennom dammen, vannstrøm over dammen eller erosjon på grunn av påvirkning fra bølger eller is på oppstrøms skråning, som vist i Figur 2.

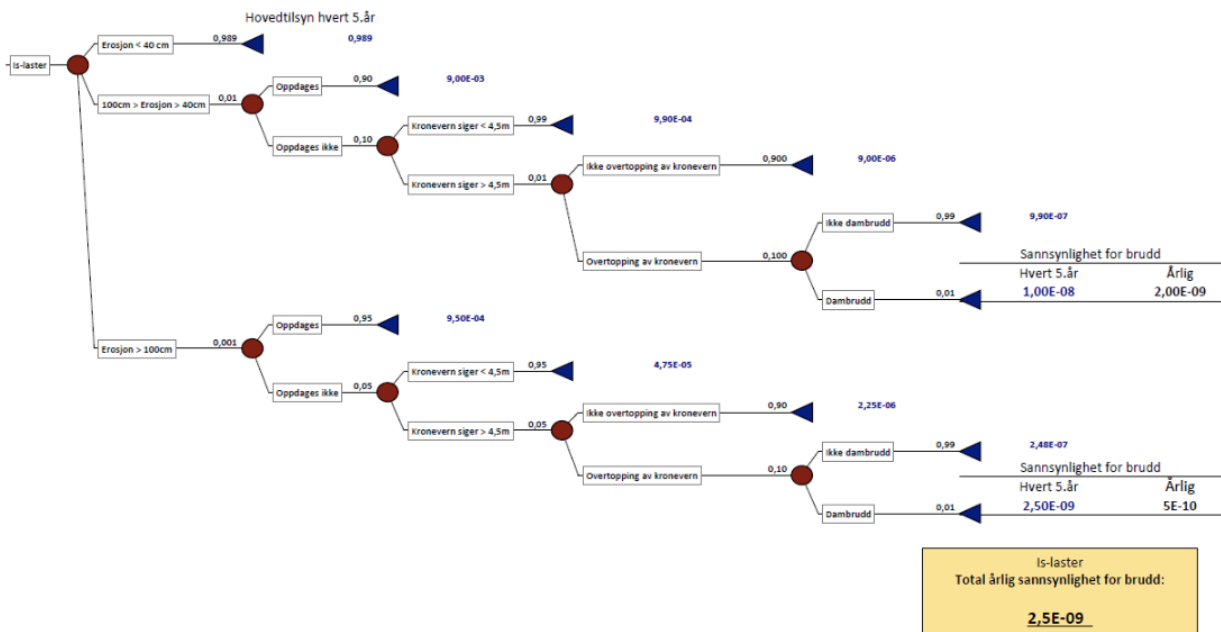


Figur 2. Ytre erosjon på dammen (Morten Skoglund, 2018)

Det er flere trinn som må skje, uten at det oppdages og utbedres, for at en dam skal gå til brudd. I en presentasjon holdt av Richard Duncumb på fagdag for fyllingsdammer i 2019 blir et eksempel på et slikt bruddforløp for laster som bølger og is beskrevet som (Multiconsult, 2019)

1. Vannstanden er like under kronevernet
2. Påvirkning av laster fra is eller bølger
3. Erosjon av underliggende skråningsvern og undergraving påbegynnes
4. Skråningsvernet under kronevernet eroderes tilstrekkelig slik at kronevernet siger
5. Oppstrøms kronevern overtoppes
6. Is og bølger angriper kjernen slik at den eroderes bort. Gjennomstrømningen blir så stor at kjerne og nedstrøms plastring vaskes bort

Et hendelsestre og sannsynligheten for brudd på Dam Båtsvatn, basert på beskrevet bruddforløp, er vist i Figur 3. Dette hendelsestreet er også lagt ved i Vedlegg 9.



Figur 3. Hendelsestre for brudd forårsaket av islast (Multiconsult, 2019)

Hendelsesforløpet viser at et brudd ved overtopping er svært lite sannsynlig, med en total årlig sannsynlighet for brudd på $2,5 \cdot 10^{-9}$. Det kritiske for risikoen er tidsforløpet, det vil si hvor fort en skade kan føre til dambrudd. Dette går betydelig raskere for store bølger enn for is, så et hendelsestre for bølgeerosjon ville generelt hatt en høyere sannsynlighet for brudd. Dersom skaden forårsaket av erosjonen ikke oppdages, eller oppdages men det utføres ingen tiltak, kan det skje et brudd ved overtopping og ifølge damsikkerhetsforskriften (2009) så skal dammer i Norge dimensjoneres slik at dette aldri skal kunne inntreffe. Det gis samtidig krav til både kronevern og nedstrøms skråningsvern slik at disse dimensjoneres for å tåle påkjenningene fra en eventuell overtopping.

I retningslinjer for dambruddbølgeberegninger (NVE, 2009) er bruddforløpet ved en slik overtopping beskrevet. Overtopping er det som skjer når vann, enten ved vannstandsøking eller ved bølger, skylles over dammen, som vist i Figur 4.



Figur 4. Overtopping av fyllingsdam (Novak et al., 2015)

Som en forenkling er det forutsatt at man benytter samme metode for beregning av bruddforløp for alle typer fyllingsdammer, dvs. empiriske formler der vannføring og erosjon ikke påvirker hverandre. Generelt skal det antas at brudd i en fyllingsdam utvikler seg over tid og at det ikke nødvendigvis er fullstendig. For å bestemme endelig bruddåpning (bruddbredde) og bruddtid benyttes Froehlichs empiriske formler, (1) og (2). Dette gjelder for alle typer fyllingsdammer.

$$B_m = k_0 \cdot 0,18 \cdot V_{magasin}^{0,32} \cdot h_d^{0,19} \quad (1)$$

$$T = 0,0025 \frac{V_{magasin}^{0,53}}{h_d^{0,9}} \quad (2)$$

Hvor:

B_m : midlere bruddbredde i meter (teoretisk)

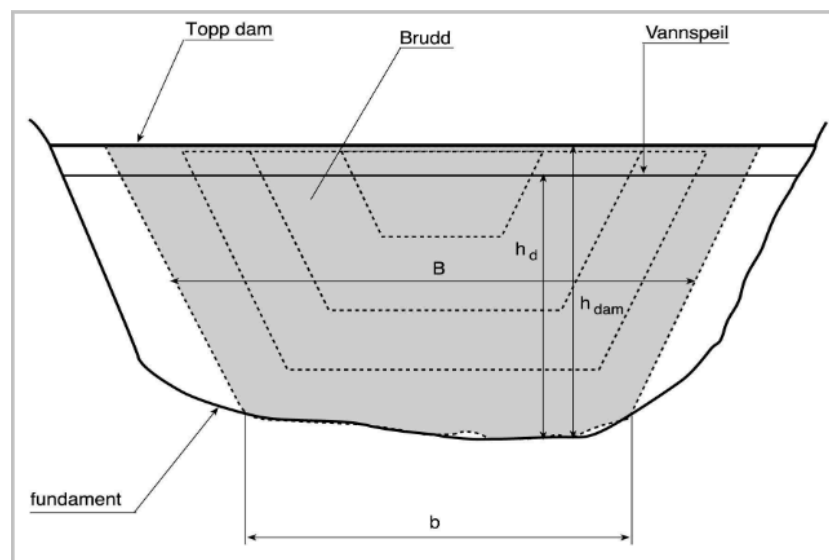
T : bruddtid i timer (tiden fra bruddet starter til det er ferdigutviklet)

$V_{magasin}$: magasinivolum ved begynnende brudd [m^3]

H_d : høyden mellom vannstand ved start av brudd (dimensjonerende flomvannstand, heretter kalt DFV, eller vannstand for middelflom) og bunn av ferdig utviklet brudd, oppgitt i meter. Bunn av ferdig utviklet brudd settes til laveste punkt i damfundamentet.

k_0 : 1,4 ved overtopping.

Det antas at bruddet starter i toppen av dammen, og utvikler seg videre nedover og utover. Dette er vist på Figur 5, hvor det første området som vil gli ut er innenfor de stiplede linjene øverst i damprofilen. Etter den første utglidningen vil områdene rundt startbruddet også gli ut. Bruddet antas ferdigutviklet når det ikke er mer materiale som glir ut. I beregningene antas det at når alt materialet i det skraverte området er glidd ut er bruddet ferdig utviklet.



Figur 5. Bruddutvikling ved overtopping av fyllingsdam (NVE, 2009)

Årsaker til dambrudd som ikke kommer av dammens utforming kan også forekomme. Dette er hendelser som for eksempel setninger i dammens fundament, eller fylling som kan føre til mindre fribord enn det som er dimensjonert. Dette fører til en usikkerhet i forhold til potensiell overtopping av dammen ved høy vannstand eller ved bølger. Bruddforløpet da vil være slik som beskrevet ved overtopping. Det er også muligheter for brudd ved jordskjelv, flystyrt, meteoritter eller terroraksjoner.

3 Bakgrunn og beregningsmetoder

Kapittelet inneholder en beskrivelse av utformingskravene til oppstrøms plastring etter dagens retningslinjer i Norge, samt en beskrivelse av en vanlig brukt metode for å utføre risikoanalyse. Dette inkluderer beregninger av vindstyrke, bølgehøyde, bølgeoppkylling og steinstørrelse. Det er også beskrevet andre metoder som er brukt i utlandet, eller har blitt brukt i Norge tidligere, for beregning av de samme kravene.

3.1 Innledning

I Norge stilles det krav til plastring på oppstrøms side av fyllingsdammer, og det er gitt krav til hvordan dette utformes. Plastringen skal utformes slik at plastringssteinene ligger stabilt og ikke får for store forskyvninger ved eventuelle deformasjoner i konstruksjonen. Dette forsikres ved korrekt utførelse av plastringen og ved bruk av stein med tilstrekkelig tyngde, styrke og utforming.

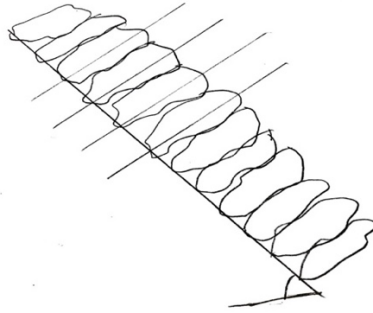
Plastringen skal beskytte mot miljølaste som vindgenererte bølger og is. Ved beregning av tilstrekkelig steinstørrelse er det nødvendig å finne signifikant bølgehøyde, denne høyden brukes til beregning av både steinstørrelse og bølgeoppkylling. Signifikant bølgehøyde er hovedsakelig bestemt av vindstyrke og effektivt strøk, og det er derfor nødvendig med informasjon om magasinets utforming og vindstyrker i området ved dammen for korrekt beregning av bølgehøyden. NVEs veiledere stiller krav til hvilke formler som skal brukes til beregning, og på hvilket datagrunnlag disse beregnes fra.

Steinstørrelsen blir bestemt ut fra nødvendig tyngde på steinen som kan tåle påkjenningene fra dimensjonerende bølgehøyde. For praktiske formål er denne verdien gjort om til steinstørrelse som er lettere å verifisere på en byggeplass. NVEs veiledere gir krav og definisjoner av passende dimensjoner på steiner som oppfyller disse kravene.

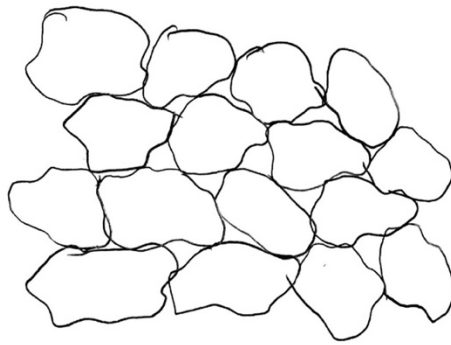
Påvirkningen på plastringen fra is er ikke beregnet ut fra formler, men det er gitt minimumskrav på steinstørrelses for å sørge for sikkerhet mot dette.

3.2 Utforming av plastring

Kort beskrevet består plastring av å legge steiner med en viss størrelse i forband og med helling inn mot damaksen, slik som vist i Figur 6. Det at stein legges i forband betyr at de legges forskjøvet i forhold til hverandre, slik at de låser hverandre fast, som vist i Figur 7. Dette vil gi sikkerhet mot at steinene glir ut.



Figur 6. Steiner i plastring lagt med helning inn mot damaksen



Figur 7. Steiner lagt i forband

Proessen i å utforme en oppstrøms skråningsvern for fyllingsdammer inneholder mer enn disse kravene og inkluderer blant annet

- Evaluere plassering av dam, og vurdere hvilke data som er tilgjengelig for vindstyrker og retning
- Bestemme effektivt strøk og dimensjonerende vindstyrke for magasinet
- Bestemme bølgekarakteristikker og dimensjonerende bølgehøyde utfra informasjon om vindstyrke.
- Bestemme krav til fribord.
- Bestemme kravene til plastringen for at den skal kunne tåle bølgepåkjenningen. Disse kravene inkluderer steinstørrelser, tykkelse på skråningsvernet, holdbarhet og gradering.
- Plotte graderingen ved å bruke estimert vekt av stein
- Bestemme gradering og fysiske egenskapet av lagene under plastringen for å sikre plastringen.

(U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012) (Société d'énergie de la Baie James, 1997)

I Norge er det gitt spesifikke krav til dimensjonerende vindstyrke, bølgehøyde, fribord og steinstørrelse. Disse er beskrevet nærmere videre i kapitlet.

Steinkvalitet

Det er viktig at steinen som blir brukt til plastringen er god. I NVEs veileder for fyllingsdammer (NVE, 2012), heretter kalt fyllingsdamveilederen, står det:

«det skal brukes stein av god kvalitet som er motstandsdyktig mot forvitring. Granittiske og gabbroide bergarter, enten disse opptrer som rene granitter, dioritter, gabbroer eller lignende, eller gneiser, vil som regel være av høy kvalitet».

Dammer i Norge er ofte plassert høyt oppe i fjellet og er påvirket av varierende og hardt klima, i tillegg til påvirkningene fra selve magasinet. En dam har lang levetid, og kan i praksis brukes mye lengre enn dimensjonert levetid. Det er derfor viktig at steinen som blir brukt kan tåle disse påkjenningene over tid.

3.3 Risikoanalyse

I Norge brukes et klassifiseringssystem for å bestemme minimumskrav til damsikkerhet for enkeltdammer. Dette systemer baserer seg på potensielle konsekvenser ved et dambrudd, og tar ikke hensyn til risikoen for et dambrudd. Det vil si at hendelser som har svært lav sannsynlighet for å skje, men som kan gi store konsekvenser, krever store sikkerhetstiltak. En slik hendelse kan være islaster på oppstrøms plastring, da dette er noe som skjer over tid og det er liten sannsynlighet for at det kan utvikle seg til noe alvorlig før det oppdages. Målet med risikoanalyser er å kunne innlemme usikkerhetene og sannsynlighetene for at noe kan skje inn i analysene. Dette kan gi verdifull kunnskap som ikke kommer frem av de forskriftmessige deterministiske kravene som er gitt i NVEs retningslinjer. (NGI, 2016)

NGI og Energi Norge anbefaler bruk av risikoanalyse på norske dammer i følgende tilfeller (NGI & Energi Norge, 2015)

- Dammer i høy konsekvensklasse (konsekvensklasse 3 og høyere), spesielt med tanke på å uniformere sikkerheten for slike dammer i Norge
- Dammer hvor det observeres en endring i oppførsel eller hvor det forventes en endring i ytre belastning (for eksempel på grunn av klimaendringer)
- Dammer hvor dameieren må velge den (de) mest effektive rehabiliteringstiltak
- Dammer hvor det er behov for kost-nytte analyser for å vurdere den mest effektive bruken av vedlikeholdsbudsjettet
- Dammer hvor det er relativt store kostnader forbundet med en eventuell rehabilitering eller andre endringer i forhold til opprinnelig dimensjonering
- I en større dampportefølje for å sikre at de riktige tiltakene prioriteres og blir gjennomført
- Dammer eller serier av dammer hvor det er 'fare' (mulighet) for «påfølgende» effekter («cascading effects») og store skader på infrastrukturen og miljø
- Når det er et ønske om å velge riktig instrumentering for overvåkning og oppfølging.
- Ved planlegging av beredskapstiltak i forbindelse med et potensielt dambrudd
- Dammer som kan være utsatt for terrorisme eller sabotasje

Risikoanalyser er i stor grad subjektive og vanskeligere å etterprøve enn tradisjonelle dimensjoneringskriterier. Usikkerhetene som kvantifiseres i en risikoanalyse er også til stede i de deterministiske kravene. Tradisjonelle deterministiske krav sammen med risikoanalyser kan gi bedre avgjørelser i forhold til damsikkerhet. (Hartford & Baecher, 2004)

3.3.1 Hendelsestrær

En måte å vurdere risiko er å bruke hendelsestrær, dette er den vanligste metoden for å utføre risikoanalyse for dammer. En hendelsestre-analyse er en visuell dekomponering av hendelser som kan skje i dammens levetid (Lacasse, 2017). Det vil si, et hendelsestre beskriver ulike hendelser som kan føre til dambrudd, og sannsynligheten av disse. Det blir typisk satt opp med en initierende hendelse fulgt av en respons som resulterer i en konsekvens. (BoR & USACE, 2019) Sannsynligheten for brudd for de ulike grenene kommer fra å bestemme produktet av sannsynlighetene langs grenen. Både grener som kan føre til brudd, og som ikke kan vil vises i figuren. Det er viktig at hendelsene som springer ut fra en gren er innbyrdes ekskluderende, det vil si at de ikke kan skje samtidig (NGI, 2016). Et eksempel på et slikt hendelsestre for påvirkning av islaster på oppstrøms skråningsvern, samt beregning av sannsynligheter er vist i Figur 3.

Sannsynlighetene for hver hendelse kan bestemmes fra ulike metoder, statistiske estimater, beregninger med modeller eller ekspertvurderinger. Den vanligste metoden er ekspertvurderinger og tidligere erfaringer. I en presentasjon utarbeidet i prosjektet «Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv» (Lacasse, 2017) presenterer de en sannsynlighetsbeskrivelse brukt i en risikovurdering av Dam Dravladalen i 2016, som vist i Figur 8. Disse sannsynlighetene er subjektive og bør gjøres av en gruppe eksperter som kommer til enighet, heller enn en persons mening.

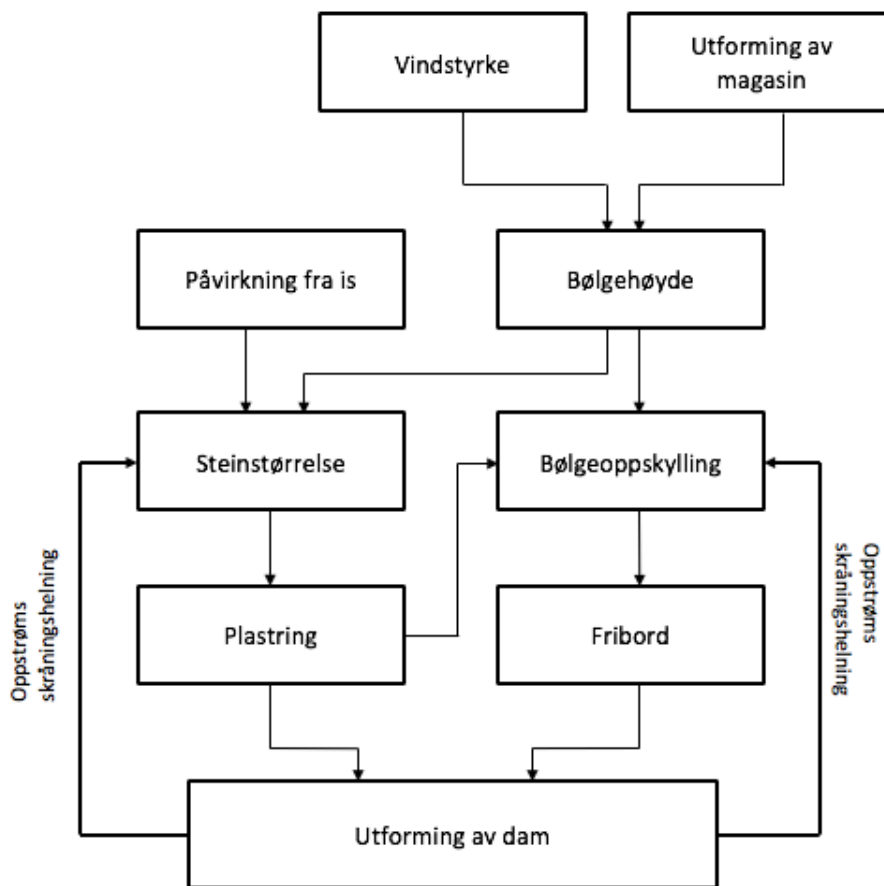
Sannsynlighet	Verbal beskrivelse	Norsk
~0.0 – 0.005 (snitt: 0.1%)	Virtually impossible, due to known physical conditions or process that can be described and specified with almost complete confidence	Nesten umulig
0.005 – 0.02 (snitt: 1%)	Very unlikely, although the possibility cannot be ruled out on the basis of physical or other reasons	Veldig usannsynlig
0.02 – 0.33 (snitt: 10%)	Unlikely, but it could happen	Usannsynlig
0.33 – 0.67 (snitt: 50%)	As likely as not (unknown) with no reason to believe that one possibility is more or less likely than the other	Usikker
0.67 – 0.98 (snitt: 90%)	Likely, but it may not happen	Sannsynlig
0.98 – 0.995 (snitt: 99%)	Very likely, but not completely certain	Veldig sannsynlig
0.995 – ~100 (snitt: 99.9%)	Virtually certain, due to know physical conditions or process that can be described and specified with almost complete confidence	Nesten sikker

Figur 8. Beskrivelse av sannsynlighetsestimater (Lacasse, 2017)

3.4 Oppstrøms plastring og ytre erosjon

Det er mange forskjellige parametere som inngår i den endelige utformingen av oppstrøms skråningsvern og dam, og de påvirker hverandre. De forskjellige parametere påvirker hverandre som vist i Figur 9. Dette delkapittelet er organisert etter figuren.

3.4.1 beskriver beregninger av stedsvindhastighet og 3.4.2 beskriver beregninger av effektivt strøk. Disse verdiene brukes når en beregner signifikant bølgehøyde og vindoppstuvning som blir beskrevet i 3.4.3. I 3.4.4 beskrives hvordan den signifikante bølgehøyden, type plastring og oppstrøms skråningshelning brukes til å beregne bølgeopp skylning, som sammen med vindoppstuvning og vannstandshøyde bestemmer fribord. 3.4.5 beskriver beregning av minimum steinstørrelse som bruker signifikant bølgehøyde og oppstrøms skråningshelning. 3.4.6 beskriver påvirkning fra is, og hvordan dette gir krav til en minimum steinstørrelse.



Figur 9. Skjema over hvordan parametere påvirker hverandre.

Retningslinjene for dimensjonering og laster (NVE, 2003), fastsetter hvilke lastsituasjoner kravene skal beregnes etter. Disse retningslinjene fastsetter at fribord og angrepspunkt for bølger skal beregnes for den mest ugunstige av følgende situasjoner

- Dimensjonerende flomvannstand pluss vindoppstuvning og bølger generert fra vind med returperiode på 50 år
- Høyeste regulerte vannstand pluss vindoppstuvning og bølger generert fra vind med returperiode på 1000 år, eller 30 m/s.

Med en verdi fra en gitt returperiode menes den største verdien som kan forventes i løpet av den gitte perioden. Vindhastighet returperiode på 1000 år, er den maksimale vindhastigheten en kan forvente i løpet av en periode på 1000 år.

Dimensjonering av bølgekrefter og skråningsvern skal beregnes for vind med et gjentakintervall på 1000 år eller med hastighet på 30 m/s.

3.4.1 Vindstyrke

Beregninger av vindhastigheter som blir beskrevet her er i henhold til NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009. Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Allmenne laster – Vindlaster (Standard Norge, 2009), heretter kalt Norsk Standard for vindlaster. Det er beskrevet i retningslinjene til dimensjonering og laster at beregningene skal utføres i henhold til en tidligere versjon, men som nå er blitt erstattet av denne.

Dimensjonerende vindhastighet er i standarden definert som stedsvindhastighet over magasinet. Dette er den gjennomsnittlige vindhastigheten over en periode på 10 minutter for den aktuelle returperioden, 10 meter over vannspeilet.

Stedsvindhastigheten bestemmes utfra basisvindhastigheten som er avhengig av vindklima, terreng og årstidsvariasjoner. Basisvindhastigheten beregnes ved formel (3).

$$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot C_{alt} \cdot C_{prop} \cdot v_{b,0} \quad (3)$$

Hvor:

C_{dir} : retningsfaktor, verdier finnes for hver kommune i tabell NA.4 (901.4)

C_{season} : årstidsfaktor

C_{prop} : sannsynlighetsfaktor, brukes dersom det velges returperioder avvikende fra 50 år. Settes lik 1,16 for returperiode på 1000 år

$v_{b,0}$: referansehastighet som en funksjon av vindretning og årstid for høyden 10 meter over bakken og terrengkategori II. Faktoren fordelt etter kommune blir hentet fra tabell NA.4 (901.1).

C_{alt} : nivåfaktor, settes lik 1 dersom konstruksjonen ligger under tregrensa. Med tregrensa menes her høyden over havet der nivåkorreksjonen begynner ifølge Norsk Standard for vindlaster. Dersom konstruksjonen ligger over tregrensa justeres dette ved nivåfaktoren som bestemmes fra formel (4)

$$C_{alt} = \begin{cases} 1,0; & \text{for } v_{b,0} \geq v_0 \\ 1,0 + \frac{(v_0 - v_{b,0}) \cdot (H - H_0)}{v_{b,0} \cdot (H_{topp} - H_0)}; & \text{for } v_{b,0} < v_0 \end{cases} \quad (4)$$

Hvor:

$v_{b,0}$: referanseverdien i lavlandet, havnivå

v_0 : terskelnivå som velges

H : høyden over havet for konstruksjonen

H_0 : høyden over havet der nivåkorreksjonen begynner. Finnes i tabell NA.4 (901.2)

H_{topp} : høyden over havet der maksimal nivåkorreksjon er nådd. Finnes i tabell NA.4 (901.2) og NA.4 (903) i Norsk Standard for vindlaster.

Stedsvindhastigheten berignes fra formel (5)

$$v_m(z) = C_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (5)$$

Hvor:

$C_0(z)$: terrengformfaktor

$C_r(z)$: ruhetsfaktor

Ruhetsfaktoren bestemmes ved formel (6)

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (6)$$

Hvor:

z : høyde over terrenget

z_0 : ruhetslengden, vist i Tabell 1

k_r : terrengruhetsfaktor, som bestemmes ved formel (7)

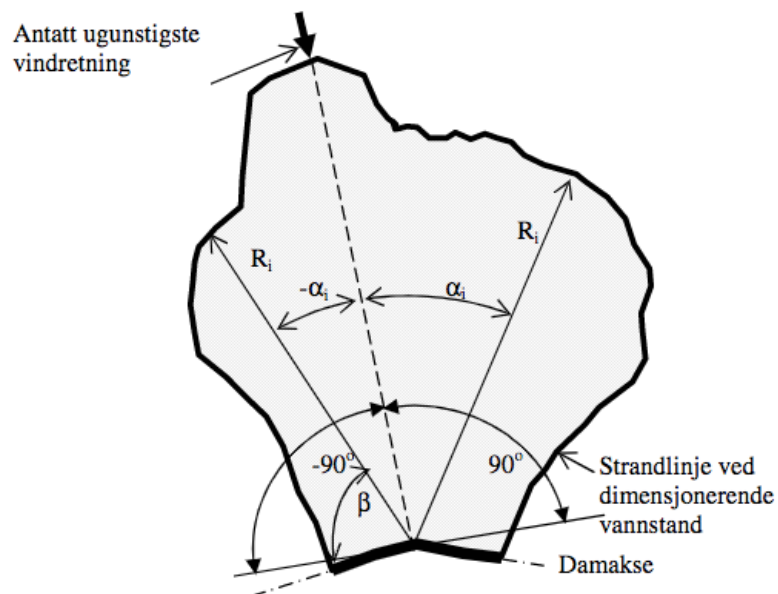
$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (7)$$

Tabell 1. Terrenkategori og ruhetslengder fra Norsk Standard for vindlaster (Standard Norge, 2009)

Terrenkategori	Beskrivelse	z_0 [m]
I	Magasinoverflaten og terreng over skoggrensen	0,01
II	Lav bjørkeskog og spredt barskog	0,05
III	Sammenhengende og høyreist skog	0,03

3.4.2 Magasinets utforming

Magasinets utforming bestemmer dammens effektive strøk. Effektivt strøk er beregnet vindfang for en bestemt retning. Beregningen baserer seg på antagelsen om at vinden overfører energi til vannflaten den retning vinden blåser. Det antas en mest ugunstig vindretning, så beregnes lengden fra damaksen til strandsonen for hver 6 grad til hver side, til inntil 90 grader, slik som vist i Figur 10.



Figur 10. Beregning av effektivt strøk (NVE, 2003)

Lengdene som finnes grafisk brukes så i formel (8) (Société d'énergie de la Baie James, 1997) for å beregne effektivt strøk.

$$F_e = \frac{\sum_{i=-90^\circ}^{i=90^\circ} R_i \cdot \cos^2 \alpha_i}{\sum_{i=-90^\circ}^{i=90^\circ} \cos \alpha_i} \quad [\text{km}] \quad (8)$$

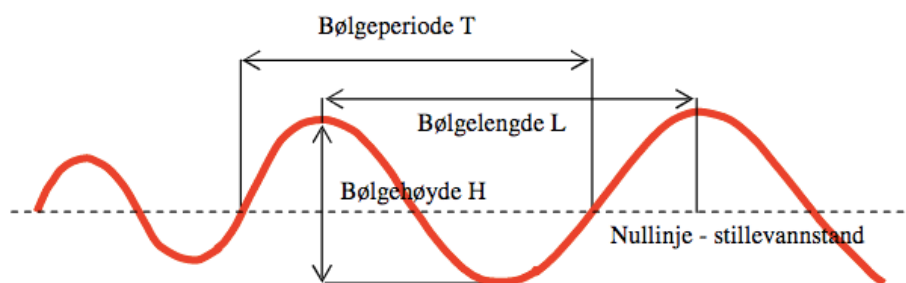
Magasin har ofte ujevn geometri og det bør antas flere forskjellige ugunstige vindretninger og beregne effektivt strøk for alle. Den største verdien fra de forskjellige beregningene settes som effektivt strøk. Dersom strøkene endrer seg betraktelig ved endring av vannstand bør det vurderes å beregne effektivt strøk ved forskjellige vannstands nivå.

3.4.3 Bølgeberegninger

Bølger beskrives av følgende bølgekarakteristikk: bølgehøyde, bølgelengde, bølgeperiode og måten bølgen bryter på. Dette og fordelingen av bølger mot plastringen er de viktigste parameterne til å forstå hvordan en bølge vil opptre i et magasin, og hvordan de vil kunne påvirke plastringen. Disse karakteristikkene bestemmes hovedsakelig av vindens egenskaper.

Den viktigste bølgekarakteristikken er bølgehøyden. I beregningene for fyllingsdammer brukes signifikant bølgehøyde i formlene.

Signifikant bølgehøyde er definert som gjennomsnittshøyden av den høyeste tredjedel av bølgene i et bølgetog. (NVE, 2003). Bølgene i et magasin er antatt fordelt etter en Rayleighfordeling og koeffisienten i beregningen av dimensjonerende bølgehøyde forutsetter en slik fordeling. Forholdet mellom vannstand, bølgeperiode, bølgelengde og bølgehøyde er som vist i Figur 11.



Figur 11. Bølgehøyde, bølgelengde og bølgeperiode (NVE, 2003).

Signifikant bølgelengde beregnes ut fra formel (9), (10) og (11). (Société d'énergie de la Baie James, 1997)

$$H_s = 0,001917 \cdot F^{0,45} U^{1,353} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

$$T_a = 0,143 \cdot F^{0,225} U^{0,676} \quad [\text{s}] \quad (10)$$

$$t = 3,21 \cdot F^{0,775} U^{-0,676} \quad [\text{h}] \quad (11)$$

Hvor:

H_s : signifikant bølgehøyde [m]

F : effektivt strøk [km]

U : dimensjonerende vindhastighet [km/h]

T_a : gjennomsnittlig bølgeperiode [s]

t : tid for utvikling av stasjonær bølgetilstand [h]

Dersom beregnet tid for utvikling av stasjonær bølgetilstand er under, eller lik, 10 minutter, bruker man den signifikante bølgehøyden beregnet i (9). Dersom den nødvendige tiden beregnet er mer enn 10 minutter må man beregne H_s på nytt og bruke vindhastigheten med t lik den som er beregnet i (11).

Denne korrigeringen gjøres ved formel (12) (NVE, 2003).

$$\frac{U_t}{U_{10}} = e^{-0,01 \cdot (t-10)^{0,5}}; 10 \text{ min} \leq t \leq 360 \text{ min} \quad (12)$$

Hvor:

U_t : Vindhastighet med varighet på t minutter [m/s]

t : nødvendig tid for utvikling av stasjonær bølgetilstand [h]

U_{10} : Vindhastighet med varighet på 10 minutter [m/s]

Korrigeringen av vindhastigheten må brukes i alle beregningene der antatt ugunstig retning er brukt, og den høyeste verdien til de beregnede bølgehøydene er den som brukes i dimensjonering.

Vindoppstuvning er forskyvning av vannet til én del av magasinet, forårsaket av vedvarende vind i én retning. Vindoppstuvning skal beregnes etter formel (13) (NVE, 2003)

$$S_u = 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{U^2 \cdot F}{d} \quad [\text{m}] \quad (13)$$

Hvor:

S_u : Vindoppstuvning [m]

U^2 : Vindhastighet [km/h]

F : Strøklengde definert som maksimal lengde av magasinet med henblikk på vindoppstuvning foran dammen (ikke samme som F_e). Hindringer i form av øyer og nes neglisjeres [km]

d : Gjennomsnittlig dybde langs strøket [m]

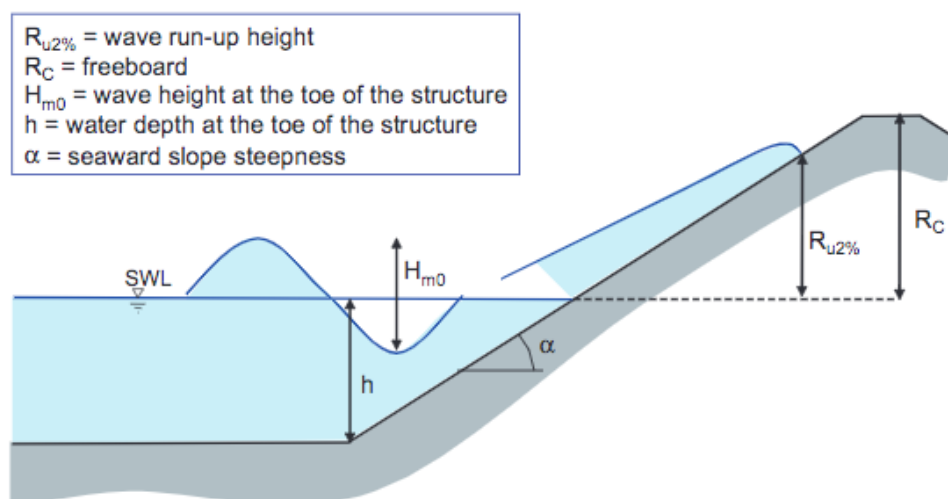
3.4.4 Bølgeopp skyling og fribord

Bølgeopp skyling er den vertikale avstanden mellom stille vannstanden og det høyeste punktet i damskråningen bølgen når opp til, som vist i Figur 12. Dimensjonerende bølgeopp skyling betegnes R_u og er i Norge satt til størrelsen med beregningsmessig 1% sannsynlighet for overskridelse ved dimensjonerende bølgehøyde.

I damsikkerhetsforskriften (2009) § 5-10 i) er det oppgitt:

«For fyllingsdammer med sentral tetning skal topp av dam ha et så stort fribord over dimensjonerende flomvannstand (DFV), eller høyeste regulerte vannstand (HRV) at det ikke kan skylle vann over topp av dam ved kombinasjon av bølgeopp skyling og vindoppstuvning. Topp av sentral tetning skal ha et så stort fribord at det ikke kan renne vann over tetningen ved dimensjonerende flomvannstand, tillagt vindoppstuvning. Fribordet skal gis et tillegg for å redusere usikkerheter.»

Dette kravet er oversatt i retningslinjene til et krav om 1% sannsynlighet til overskriding av dimensjonert bølgeopp skyling. Dette sikkerhetskravet er oppgitt i Van der Meer sine beregninger $R_{u2\%}$ som har en sannsynlighet for overskridelse på 2%. Dette er fordi formlene er beregnet for kystkonstruksjoner der en situasjon med 2% av bølgene når toppen av en konstruksjon vil man ikke måtte ta spesielle hensyn (Schüttrumpf, van der Meer, Kortenhaus, Bruce, & Franco, 2017).



Figur 12. Bølgeopp skyling (Schüttrumpf et al., 2017)

Den generelle formelen for å beregne vertikal bølgeopp skyling er formel (14)

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = 1,65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_m \quad (14)$$

Med en maksimumsverdi som beregnes fra formel (15)

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = 1,00 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \left(4,0 - \frac{1,5}{\sqrt{\xi_m}}\right) \quad (15)$$

Hvor:

$R_{u2\%}$: Dimensjonerende bølgeoppskylling [m]

H_s : Signifikant bølgehøyde [m]

γ_b : Faktor for påvirkning av berm

γ_f : Faktor for påvirkning av ruheten til skråningen

γ_β : Faktor for påvirkning av skrått bølgeangrep

ξ_m : Brytningsparameter

Brytningsparameteren beregnes utfra (16)

$$\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{C_m}} \quad (16)$$

Hvor

α : Skråningens helning

C_m : Fiktiv bølgebratthet definert som $\frac{H_s}{\left(\frac{gT_{02}^2}{2\pi}\right)}$, der T_{02} er bølgeperioden beregnet ved spektral analyse.

I Norge brukes formel (17) for beregning av bølgeoppskylling med forutsetninger til ordnet steinskråning, og helning på mer enn 1,0:2,7. Dette er basert på kanadiske retningslinjer, gitt det sikkerhetsnivået NVE setter som krav i Norge.

$$R_u = \frac{2,4 \cdot H_s}{n^{0,44}} \quad (17)$$

Hvor:

R_u : Bølgeoppskylling [m]

H_s : Signifikant bølgehøyde [m]

n : Skråningshelningens horisontalkomponent

For en helning med slakere skråning gjelder formel (18)

$$R_u = \frac{4,1 \cdot H_s}{n} \quad (18)$$

Ved andre typer damskråning brukes en korreksjonsfaktor for å beregne bølgeopp skyllingen. Bølgeopp skyllingen vil også bli størst normalt på damaksen. Ved en innfallsvinkel beta, β , mellom damakse og bølge kan bølgeopp skyllingen korrigeres ved formel (19).

$$R_{u,redusert} = R_u \cdot \sin \beta \quad (19)$$

3.4.5 Steinstørrelser

Damsikkerhetsforskriften (2009) gir krav om at skråningsvernet i oppstrøms skråning skal dimensjoneres for påvirkning av bølger, is og snø, tele og andre mulige påkjenninger. Dette skal gjøres ved at dammen plastres med tilstrekkelig stor stein. I Norge bestemmes denne steinstørrelsen ut fra tilstrekkelig vekt på stein i plastringen. Steinstørrelsen har en minimumsverdi for å sikre tilstrekkelig kapasitet for påvirkning fra is, og bestemmes ellers ut fra Hudsons formel basert på signifikant bølgehøyde. Denne formelen baserer seg på empiriske resultater fra en rekke forsøk utført på steinmoloer med forskjellig utforming.

Fyllingsdamveilederen (2012) stiller krav til minimumsvekt av stein beregnet fra Hudsons formel tilpasset et relativt ensgradert skråningsvern (20) (Société d'énergie de la Baie James, 1997).

$$W_{min} = \frac{\gamma_r \cdot H_s^3}{K \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cdot n} \quad (20)$$

Hvor:

W_{min} : minste vekt av stein [kN]

H_s : signifikant bølgehøyde [m]

γ_r : tyngdetetthet av stein [kN/m³]

γ_w : tyngdetetthet av vann, settes lik 10 kN/m³

n : skråningshelningens horisontalkomponent

K : stabilitetskonstant, for norske forhold settes den til $K \leq 2,5$.

For å etablere størrelsen på en stein som kan tåle en viss bølgehøyde, må størrelsen av skade som aksepteres bestemmes. Det defineres derfor en skadeindeks. Société d'énergie de Baie James, heretter kalt SEBJ, (1997) definerer denne ved formel (21)

$$S = \frac{A}{D_n^2} \quad (21)$$

Hvor:

S : teoretisk antall kubiske steiner, med størrelse D_n , som blir erodert fra plastringen.

A : arealet av skadet plastring [m^2]

D_n : Nominell størrelse på stein [m]

Med gjennomsnittlig masse og dimensjon på stein viste Van der Meer (1988) at $S=2$ viser til en skade opp 0-5% som kan defineres lik ingen skade. En skadeindeks på 5 gir grensa for akseptabel skade på plastringen.

Stabilitetskonstanten, K , blir bestemt utfra forsøksdata og avhenger av skadeindeksen. Ved valgt skadeindeks under 2,5, kan stabilitetskoeffisienten settes til 1,75. Ved en skadeindeks på 5, grensa for akseptabel skade, kan stabilitetskoeffisienten settes til 3,5 (Société d'énergie de la Baie James, 1997). Dette er kanadiske anbefalinger og forutsetter dobbelt lag med plastring og helning slakere enn 1:1,8.

I fyllingsdamveilederen (2012) blir ikke denne skadeindeksen diskutert, og det er ikke oppgitt at stabilitetskonstanten avhenger av en skadeindeks. Det er ikke beskrevet hvilke forutsetninger som ligger bak den brukte verdien i Norge, $K \leq 2,5$. Dersom en bruker de samme forutsetningene som i de kanadiske retningslinjene, kan en anta at i de norske retningslinjene er grensen for akseptabel skade lavere enn i Canada.

Generelt bør tykkelsen av skråningsvernet være minst to ganger største tverrmål av steinen og stein med mindre diameter enn 1/10 av steinen i skråningsvernet vil kunne bli vasket ut mellom hulrom i skråningsvernet. Det er derfor satt krav til forhold mellom minste og største stein. Dette forholdet er definert av formel (22)

$$W_{max} \leq 5 \cdot W_{min} \quad (22)$$

Kravene til stein er på vekt, men dette gir lite mening å bruke på byggeplass så disse kravene er gjort om til krav for diameter. Formel (23) brukes for omregning fra steinvekt til steindiameter (NVE, 2012):

$$D_{min} = \left(\frac{W_{min}}{c_f \cdot \gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (23)$$

Hvor:

D_{min} : Minimum steindiameter [m]

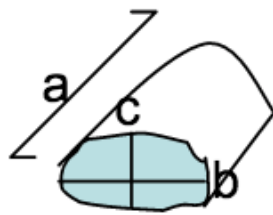
W_{min} : minste vekt av stein [kN]

C_f : Konstant avhengig av steinens form. Kan variere fra 0,4 for skifrig stein til 0,8 for mer kubisk form. Ofte brukes 0,6

γ_r : tyngdetetthet av stein [kN/m³]

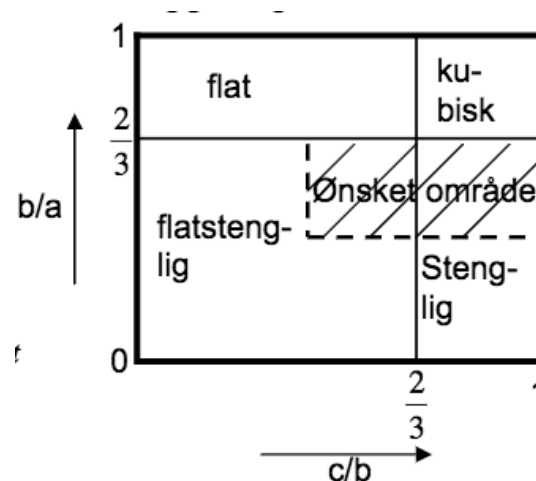
Det å beskrive steinstørrelser eksakt med en verdi for diameter er ikke mulig da steiner har svært irregulær og varierende geometri. Det er derfor fastsatt regler om hvordan diameteren til en stein skal defineres. SEBJ (1997) har i sin rapport definert steindiameter som tredjerota av produktet til de tre målte største dimensjonene på steinen, formel (24). Figur 13 viser en skisse av hvordan de tre største dimensjonene kan være.

$$D = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \quad (24)$$



Figur 13. Dimensjoner i anbefalingene av steinstørrelse (Hyllestad, 2007).

Verdiene a, b og c vil gi dimensjonene på en boks hvor stein med diameter D vil passe inn. Kravene gitt i damsikkerhetsforskriften (2009) sier at den lengste aksen skal ligge med fall innover mot dammen. Under et av EBLs vårmøter (Hyllestad, 2007) ble det representert anbefalinger, basert på Zinnings regler for kornform, for hvilke type steiner som egner seg best i oppstrøms plastring, disse er vist i Figur 14.



Figur 14. Anbefaling for steinform i oppstrøms plastring (Hyllestad, 2007)

I tillegg til at steinene i plastringen oppfyller disse kravene bør materialene plassert under plastringen være riktig dimensjonert. Disse materialene under bør oppfylle tre krav.

- i. Må ikke være så velgraderte masser at det kan oppstå intern ustabilitet
- ii. Må være grovt nok til å hindre at materialet vaskes ut gjennom plastringen
- iii. Må være fint nok til å holde igjen materialene under.

(U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012)

Fyllingsdamveilederen (2012) har flere spesifikke krav til sjikt 2 og filter/overgangssonen som ikke vil bli beskrevet i denne oppgaven.

3.4.6 Påvirkning av is

Fyllingsdamveilederen (2012) baserer seg i stor grad på rapporten «*Rip-rap sizing*» utgitt av SEBJ i 1997. Denne rapporten fastslår at en studie av plastring ble utført nord i Canada i 1988 på vegne av the Canadian Electrical Association. Studien viste at de vanligste årsakene til skade på plastring av is var steinbrudd på grunn av fryse/tine prosesser, underdimensjonering av plastring og dårlige utleggingsteknikker. Det var veldig få dammer i studien som hadde skader på plastringen påført av disse grunnene. På bakgrunn av dette har SEBJ valgt å se bort fra isskader da dimensjoneringen fra bølgeoppkyllingen vil være god nok til å motstå isskader.

Is i magasin kan påvirke oppstrøms plastring på flere måter enn de som er beskrevet i studiet fra Canada. Et islag i magasinet vil ha en betydelig masse og ved bevegelser vil det kunne skape et støt som fører til ustabilitet og utglidning av plastringen. Isen kan også grave på plastringen med konsekvens å dytte på eller flytte steiner. Dersom islaget fryser fast til enkelte steiner i plastringen, vil endringen i vannstanden føre til at disse steinene blir dratt ut sammen med islaget. På grunn av dette bør steinene i plastringen være minimum så store som tykkelsen på forventet islag (Rattue, 2013). Dette kan gi veldig store verdier for norske dammer, og det er viktig å vurdere hver enkelt dam for seg selv.

Islasters påvirkning på damstabiliteten beregnes på mur- og betongdammer, men påvirkningen på plastringen beregnes ikke spesifikt i Norge. Steiner i plastring har derimot en minimumsverdi for å kunne motstå påvirkningen av is. Denne minimumsverdien er ved skråningshelning 1:1,5 2,5 kN og for slakere skråningshelninger kan det brukes mindre stein, for eksempel 1,6 kN for helning 1:2 og 1,3 kN for helning 1:3.

3.5 Forskjellige metoder for beregning av strøk og bølger

Metodene beskrevet i kapittel 3.4.3 er hvordan man i dag beregner effektivt strøk for bølgeberegninger. Denne metoden er en modifisert versjon av Savilles metode fra 1962, men med utslagsvinkel på 180 grader istedenfor 90 grader. Metoden som blir brukt i Norge i dag

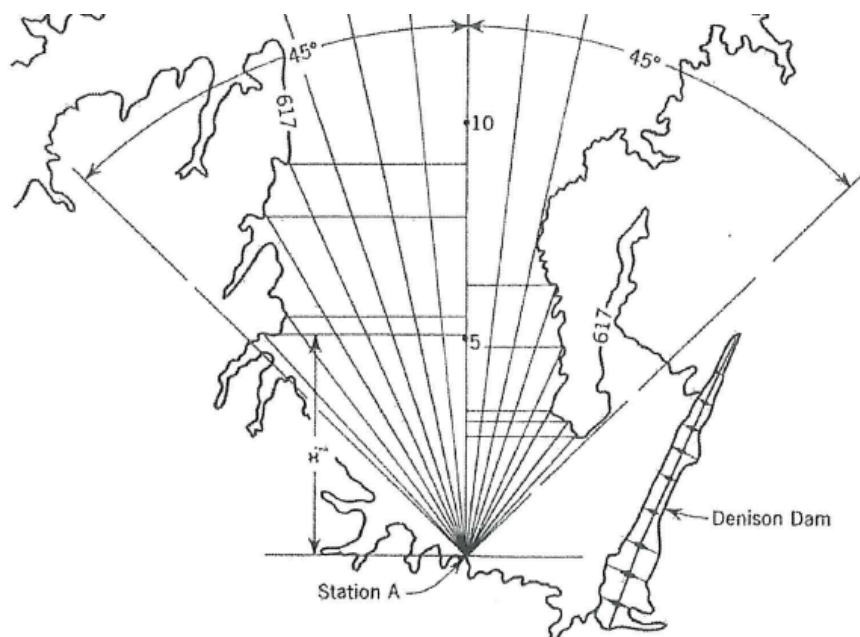
er utformet av SEBJ og de skriver tydelig at deres formler for beregning av bølger hører sammen med deres metode for beregning av strøk. Derfor kan man ikke endre metoden for strøkberegning og bruke SEBJ sine formler for bølgeberegning (Société d'énergie de la Baie James, 1997).

SEBJ har utført eksperimenter i magasiner som er en del av La Grande Complex i Canada, og har funnet ut at deres måte å jevne ut strøkene på er viktig for å få riktig beregninger i irregulære magasin. Magasinene de har utført eksperimenter på, er brede og har irregulær geometri, ikke lange og smale, slik norske magasin ofte er. Det er derfor satt spørsmål ved om disse metodene for å beregne bølger er optimal for norske forhold. Dette delkapittelet beskriver ulike metoder som har blitt brukt, eller blir brukt, i andre land og Norge.

3.5.1 Savilles metode for beregning av effektivt strøk 1962/SMB metode for bergening av bølger 1976

Metoden som er beskrevet i norske retningslinjer i dag er en modifisert versjon av Saville sin metode for beregning av effektivt strøk fra 1962. Verdiene for effektivt strøk fra Saville sin opprinnelige metode kan bli brukt i Sverdrup Munk Bretschneider, heretter kalt SMB, sin metode for beregning av bølger fra 1976.

Det ble gjort målinger av vind og bølger på ulike magasin i USA på 1950-tallet. Dette er grunnlaget som Saville har sammenlignet resultatene fra beregningene med. Det ble prøvd ulike metoder, og metoden de endte opp med å beskrive i rapporten (Saville, McGlendon, & Cochran, 1962) er den som passet best med observasjonene. Det ble antatt at effektiviteten til et strøk er lik projeksjonen av strøkets lengde på sentral radiusen, vist som x_i i Figur 15.



Figur 15. Beregning av effektivt strøk etter Saville sin metode fra 1962 (Saville et al., 1962).

Videre er det antatt at vindens effektivitet til å generere bølger på strekningen er proporsjonal med cosinus av vinkelen fra strøket til den aktuelle vindretningen, som vist i Figur 10, som i formel (25).

$$\cos \alpha = \text{vindens effektivitet til å generere bølger} \quad (25)$$

Basert på dette er det antatt at produktet av cosinus av vinkelen til vindretningen og projeksjonen av strøkets lengde er lik effektiviteten av strøket, som i formel (26). Dermed er total effekt av strøket lik summen av effektiviteten til hvert strøk delt på summen av cosinus, som i formel (27).

$$\cos \alpha_i \cdot x_i = F_{e,i} \quad (26)$$

$$\frac{\sum \cos \alpha_i \cdot x_i}{\sum \cos \alpha_i} = F_e \quad (27)$$

For å beregne projeksjonen av strøkets lengde på den vindretningen en har valgt ganger man strøket med cosinus til vinkelen mellom strøket og vindretningen. Dette gir den samme formelen som er brukt i norske retningslinjer.

I denne metoden bruker en strøkene på 45 grader til hver side av den sentrale radialen, som er strøket i den valgte vindretningen. Dette er basert delvis på teori om skjerming, og delvis siden dette samsvarer best med observasjonene som ble gjort.

I rapporten «*Performance of blockwork and slabbing protection for dam faces*» (Herbert, Lovenbury, Allsop, & Reader, 1995) har de beregnet bølgehøyder ved å bruke Sverdrup Munk Bretschneider, heretter kalt SMB, sin metode fra 1976. SMB metoden er utviklet fra kurver for dyptvannsbølger og er vist i formel (28), (29) og (30).

$$\hat{H} = 0,283 \cdot \tanh(0,0125 \cdot \hat{F}^{0,42}) \quad (28)$$

$$\hat{H} = g \frac{H_s}{U^2} \quad (29)$$

$$\hat{F} = g \frac{F_e}{U^2} \quad (30)$$

Hvor:

H_s : signifikant bølgehøyde [m]

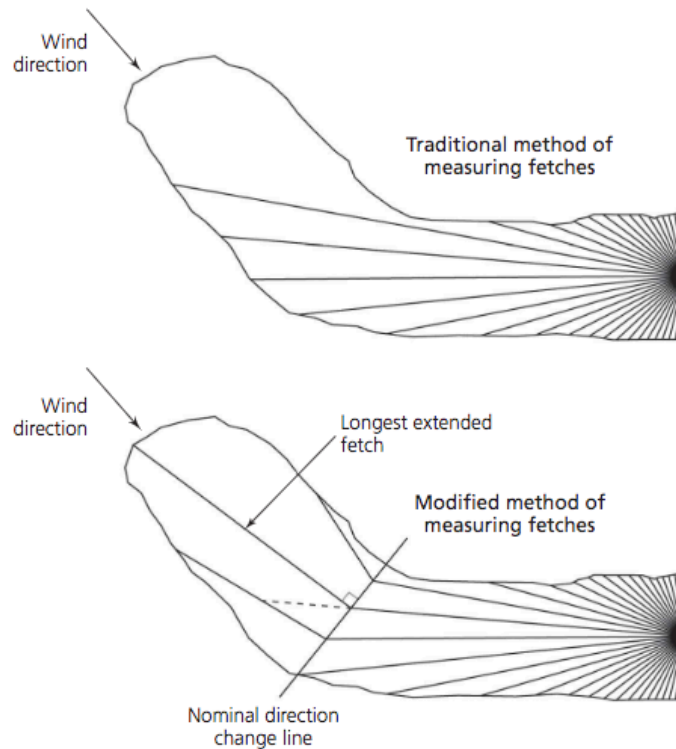
U : vindhastighet [m/s]

F_e : effektivt strøk

g : tyngdekraft

3.5.2 Beregninger etter britiske retningslinjer

I Storbritannia bruker man en metode for å beregne bølger som er basert på kun en verdi av strøk (Institution of civil engineers, 2015). Den lengste strekningen vinden kan fungere på for å generere bølger er verdien en baserer seg på. Dersom magasinet har en bøy kan det beregnes med hele strekningen, som vist i Figur 16. Dette er fordi det er observert at vinden kan følge dalen/magasinet og derfor generere bølger gjennom bøyen.



Figur 16. Strøklengder i bøyde magasin (Institution of civil engineers, 2015)

I de britiske retningslinjene blir den dimensjonerende vindhastigheten beregnet ut ifra formel (31).

$$U = U_{50} \cdot f_T \cdot f_A \cdot f_W \cdot f_D \cdot f_N \quad (31)$$

Hvor:

U_{50} : vindhastighet med returperiode på 50 år [m/s]

f_T : faktor for justering av returperiode, settes lik 1.0 ved valgt periode på 50 år

f_A : faktor for justering for meter over havet. Bestemmes ved formel (32)

$$f_A = 1.0 + (0.001 \cdot moh) \quad (32)$$

Storbritannias og Norges geografi er svært forskjellig da store deler av Norge ligger på høyde over havet høyere enn normalen i Storbritannia. Referanseverdiene til vindhastighet i Norge

oppgitt i Norsk standard for vindlaster er gitt for hver enkelt kommune, og har da tatt hensyn til høyden over havet i den enkelte kommunen. For tilfeller der det er nødvendig å justere etter høyde over havet kan det derfor brukes den norske justeringen, C_{alt} , oppgitt i formel (4) for f_A .

f_W : faktor for justering av vindhastighet over vann i forhold til over land. Bestemmes fra Tabell 2.

Tabell 2. Faktor for justering av vindhastighet over land ift. over land (Institution of civil engineers, 2015)

Fetch length: m	1000	2000	4000	8000	12 000
f_W	1.10	1.16	1.23	1.29	1.31

Source: Saville (1962) in Herbert *et al.* (1995)

f_D : faktor for justering av vind i forhold til varighet. I England har de satt denne faktoren til 1.05, fordi vindhastigheten er gitt for en varighet på 1 time. I Norge er referansehastigheten oppgitt, gitt for en varighet på 10 minutter. Denne bør derfor ikke være lik for norske forhold.

f_N : faktor for justering i forhold til retning. I Norge kan en bruke faktorene oppgitt for retningsreduksjon gitt i Norsk Standard for vindlaster.

For beregning av bølger basert på denne vinden og metoden for beregning av strøk gir de britiske retningslinjene (33). Dette er en simplifisert versjon av Donelan/JONSWAP metoden.

$$H_s = 0.00178 \cdot U \cdot \left(\frac{F}{g}\right)^{0.5} \quad (33)$$

Hvor:

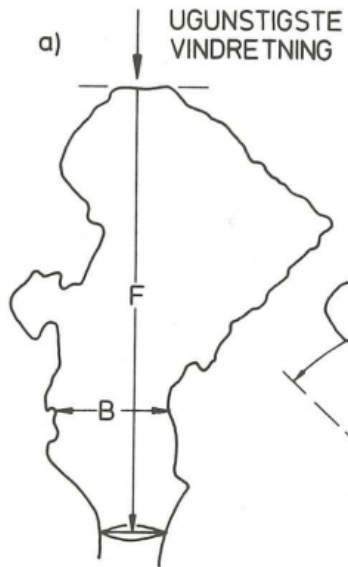
U : dimensjonerende vindhastighet [m/s]

F : effektivt strøk [m]

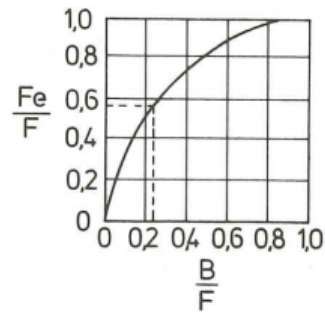
g : tyngdekraft [m/s^2]

3.5.3 Gamle metoder fra Norge/VHL

I Norges geologiske institutts, heretter kalt NGI, gamle veiledninger fra 1993 kunne man enten bruke Saville sin metode til å beregne strøk, eller et diagram angitt av Vassdrags- og havnelaboratoriet, heretter kalt VHL (NGI, 1993). VHL sitt diagram tar utgangspunkt i at man velger en bredde og lengde på strøket basert på antagelser gjort fra kart, som vist i Figur 17. Denne informasjonen brukes i grafen, vist i Figur 18, og effektivt strøk hentes fra dette.



Figur 17. Strøklengde og bredde (NGI, 1993)



Figur 18. Diagram for å finne F_e (NGI, 1993)

Antagelsene er basert på skjønn, og denne metoden er derfor mer subjektiv enn de andre og kan gi ulike resultat basert på hvem som utfører beregningene. Retningslinjene sier også at Saville sin metode gir 10-30% lavere verdier for effektivt strøk, og at disse forskjellene er størst ved lave bredde til lengde forhold.

Uavhengig av hvordan man beregnet strøk, ble den signifikante bølgehøyden beregnet ut ifra Sverdrup-Munk-Bretschneider sin formel (34).

$$\frac{g \cdot H_s}{U^2} = 0,0026 \cdot \left(\frac{g \cdot F_e}{U^2} \right)^{0,47} \quad (34)$$

Hvor:

U : dimensjonerende vindhastighet [m/s]

F_e : effektivt strøk [m]

g : tyngdekraft [m/s^2]

H_s : Signifikant bølgehøyde [m/s]

4 Tilfeller av bølgeskader på fyllingsdammer i Norge

Dette kapittelet inneholder en kartlegging av observerte bølgeskader på fyllingsdammer i Norge. Kapittelet inneholder informasjonen fra en rapport fra Sintef (Sintef, 2000), et eget spørreskjema sendt ut for denne oppgaven og informasjon hentet inn fra dameiere og dagens VTAer for enkelte damanlegg.

4.1 Innledning

Utformingskravene oppgitt i dagens norske retningslinjer er basert på observasjoner og empiriske formler fra utlandet. Dette gjør det usikkert om disse er optimale for norske forhold. Derfor er det viktig å ha en oversikt over bølgeskader observert på norske fyllingsdammer for å kunne gi en idé om retningslinjene som er brukt i Norge i dag er tilstrekkelige, eller for konservative. Det er gjort en delvis kartlegging av observerte bølgeskader i Norge. Informasjonen er hovedsakelig hentet fra spørreskjemaet sendt ut i forbindelse med denne oppgaven angående 19 dammer som er listet opp som dammer med bølgeskade i EnFo-rapporten «*Sikkerhet ved fyllingsdammer*» (Strømme, 1997), og rapporter og notat mottatt i forbindelse med dette.

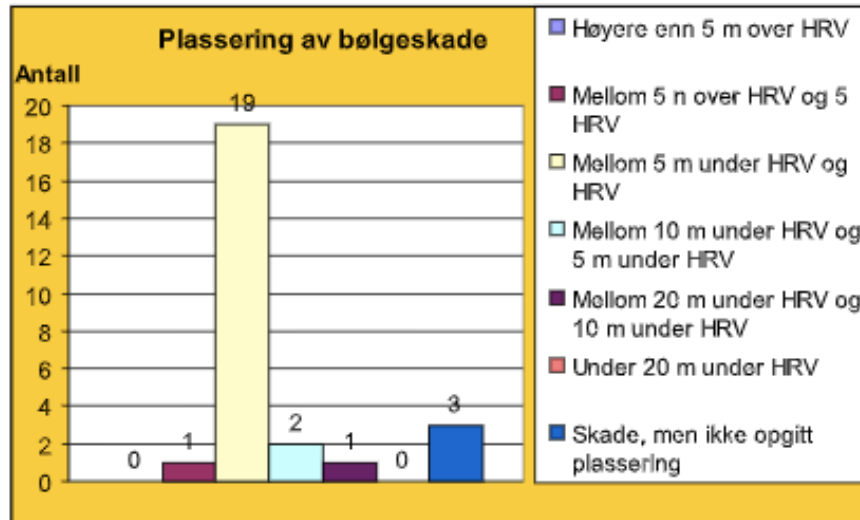
Beregninger for vindhastighet, strøk, bølger og steinstørrelser på dammene beskrevet i dette kapittelet er utført i kapittel 5.2.

4.2 Tidligere kartlegginger av bølgeskader i Norge

I en rapport utført i samarbeid med Sintef og NTNU (Sintef, 2000) ble tilstanden på norske dammer kartlagt. Det ble sendt ut en spørreundersøkelse til alle registrerte vassdragsteknisk ansvarlig, heretter kalt VTA, personer i Norge (1998) utfra en liste fra NVE. Det ble mottatt svar om 174 fyllingsdammer som var 29% av registrerte fyllingsdammer i Norge under offentlig tilsyn, på dette tidspunktet. Svarene som kom inn fra undersøkelsen kan vurderes som et representativt utvalg av Norges fyllingsdammer.

Informasjon samlet inn fra spørreundersøkelsen viste at det er observert 13 dammer med ras eller utglidninger på oppstrøms skråning av fyllingsdammen og 26 dammer har hatt bølgeskader. Bølgeskadenes areal var fra 0-5 m² til over 100 m². Det var en stor overvekt der bølgeskadens plassering var mellom 5 m under høyeste regulerte vannstand, heretter kalt HRV, og HRV, se Figur 19. Det ble registrert en overvekt av bølgeskader på dammer med røysfylling i motsetning til de med plastret skråning.

I den samme rapporten vises det til at skader forårsaket av bølgeerosjon og islaster er de hyppigste årsakene til reparasjon av oppstrøms skråning. Dette kan delvis skyldes dammer som er bygd før 1970-tallet er utført med røysfylling og med en del undermålt stein.



Figur 19. Oversikt over plassering av bølgeskader på fyllingsdammer (Sintef, 2000)

Det ble stilt spørsmål om maksimal observert vind, retning av maksimal vind og maksimal observert bølgehøyde. I alt 13 dameiere har oppgitt maksimal observert vind der 3 av disse verdiene er opplagt feil. Svarene tilsier at 6 av 10 dammer har hatt maksimal observert vind større enn 30 m/s som er dimensjoneringskriteriet i damsikkerhetsforskriften (2009).

4.3 Informasjon fra spørreskjema

Det ble sendt ut et spørreskjema til nåværende VTA på de dammene som er beskrevet i EnFo rapporten «Sikkerhet ved fyllingsdammer» (Strømme, 1997). Formålet med spørreskjemaet var å samle inn informasjon fra observerte bølgeskader på fyllingsdammer i Norge, spesielt da om under hvilke forhold skadene oppsto og hvilket omfang skadene hadde.

4.3.1 Svar fra spørreskjemaet

Det ble mottatt svar fra 11 av de 19 dammene som det ble sendt ut spørreskjema til. Dette gir er svarprosent på 58%. Spørsmålene i spørreskjemaet er vist i Tabell 3. Det er kun 6 av dammene som har svart ved å sende inn utfylt spørreskjema. De resterende svarene er innhentet ved at VTAene har sendt inn rapporter og notater som inneholder etterspurt informasjon. Spørreskjemaer utfylt av VTAer, og utfylt fra innsendte rapporter og notater er lagt ved i Vedlegg 1. Her er navnet på dammen, og eventuelle rapporter anonymisert.

Det er lite informasjon som er lagret fra tiden da bølgeskadene på disse dammene oppsto, da de har blitt rehabilitert opp til flere ganger i ettertid. Det ble derfor mottatt en del ufullstendige svar. Det var ønskelig å oppnå god informasjon om vindforholdene ved disse skadene, men kun én av dammene hadde informasjon om dette. Det ble derfor ikke mulig å kunne trekke konklusjoner om vindforholdene sin betydning på disse skadene, eller om dagens beregninger for vind er optimale. 9 av dammene oppga informasjon om steinstørrelse. Dette er brukt til å sammenligne faktisk steinstørrelse og steinstørrelse etter dagens krav. Det ble generelt mottatt for få svar til å kunne trekke sikre konklusjoner, og spørreskjemaet fungerte derfor ikke optimalt. Det hadde vært ønskelig å motta mer utfyllende svar, fra flere dammer, dersom en skal kunne trekke sikre konklusjoner.

Dammene inkludert i den opprinnelige listen ligger spredt over hele Norge, og beliggenhet er vist på Figur 20. Dette gir en god geografisk variasjon i svarene.



Figur 20. Kart over dammer med observerte bølgeskader

Tabell 3. Spørreskjema sendt ut til VTA

Skader på skråningsvern oppstrøms side av fyllingsdammer

Navn på dammen:

Informasjon om dammen

1.1. Hvor høy er dammen?

1.2. Hva er HRV og LRV?

a) HRV

b) LRV

1.3. Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?

1.4. Hva er støttefyllingen laget av?

Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?

1.5. Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?

Informasjon om skader

2.1. Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?

2.2. Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?

2.3. Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?

a) Vindforhold

b) Vindstyrke

c) Vindretning

d) Dato

2.4. Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?

2.5. Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?

2.6. Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?

Dammene har ulik høyde, fra 16 meter som den laveste til 73 meter som den høyeste. De ligger både høyt på fjellet, høyeste på 1090 moh., og lenger ned i landet, laveste på 315 moh. Oppstrøms helning er på de fleste dammene 1,5 eller 1,6, med to unntak på 1,8 og 1,46. Alle dammene der støttefylling er beskrevet, er det brukt sprengstein. Omtrent halvparten av

dammene har hatt overgangssone men ulik type steinstørrelse. Alle rapporterte skader har vært omkring HRV-beltet, bortsett fra ett tilfelle der det var en utrasing under plastret del.

Skademekanismene på skråningsvernet har vært varierende og kan oppsummeres:

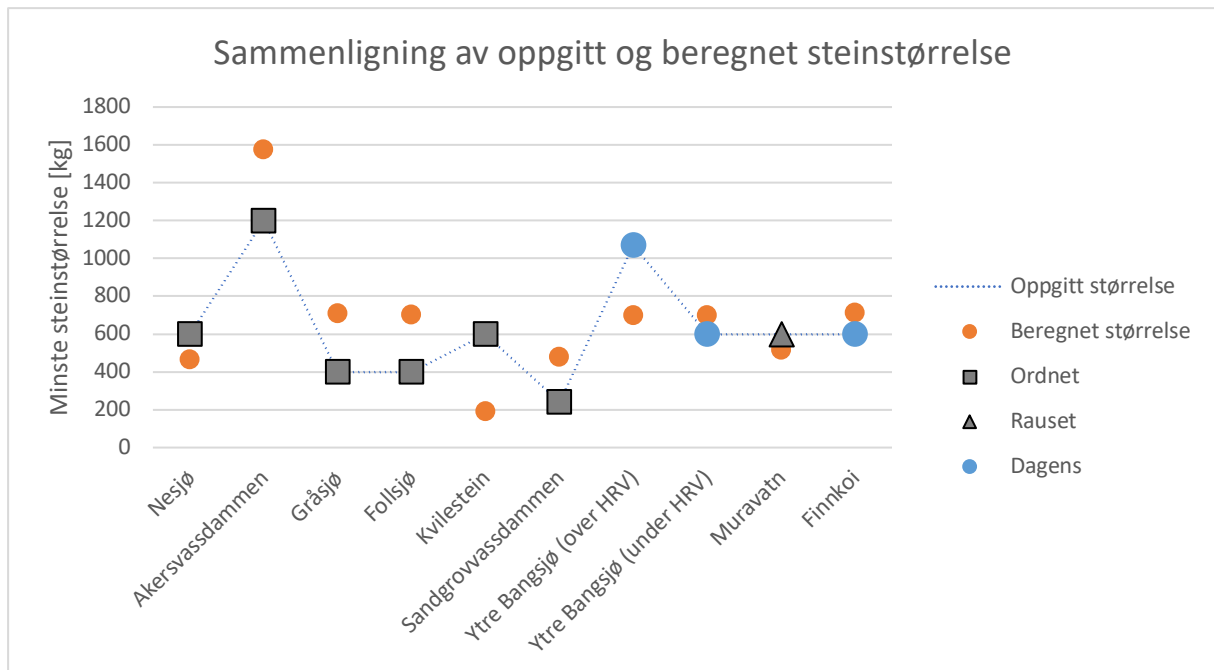
- Bølgeerosjon: 4 dammer
- Utvasking av finstoff gjennom skråningsvern: 3 dammer
- Frostsprengning: 1 dam
- Forflytning av stein på grunn av is: 1 dam
- Ikke oppgitt: 2 dammer

Det er svært ulike dammer som har observert bølgeskader, og det er relativt lite informasjon om selve skadene. Mesteparten av informasjonen er hentet fra rapporter som er beskrevet for utbedringen av dammene etter skaden er observert. Det at alle skadene er observert rundt HRV-beltet gir mening da det er her bølgene slår opp mot dammen oftest. Det kan også være mangel på overgang mellom plastring og støttefyllingen i øverste del av dammen, da det er lite plass, som kan forårsake utvasking mellom hulrommene i plastringen.

Ingen av dammene har oppgitt observert bølgeskader etter utbedring av bølgeskadene, eller rehabilitering av dammen.

4.3.2 Steinstørrelser

Opgitt steinstørrelse sammenlignet med beregnet steinstørrelse for samme dam, etter dagens retningslinjer med dimensjonerende vindstyrke med 1000 års gjentakintervall, er vist i Figur 21. Steinstørrelsen som er oppgitt er den som var på dammen i tidsperioden dammen ble utsatt for bølgeskader, bortsett fra to dammer (Ytre Bangsjø, Finnkoi). Kun de dammene med tilstrekkelig informasjon som oppstrøms skråningshelning, og steinstørrelse i skråningsvernet, vist i Figur 21.



Figur 21. Sammenligning av oppgitt og beregnet steinstørrelse

Steinstørrelsen er beskrevet på ulike måter, diameter på stein, vekt på stein eller volum på stein, og er omregnet til kg for å kunne sammenlignes. Det er brukt verdien 24 kN/m^3 for alle omregninger, fordi denne verdien er brukt i enkelte av rapportene for dammene.

Det kommer frem av grafen at nesten alle dammene med ordnet skråningsvern har hatt steinstørrelser i skråningsvernet som er mindre enn dagens retningslinjer tilsier. Unntaket er Kvilestein, hvor det var observert desimert stein grunnet frostsprengning i lengre tid før bølgeskadene oppsto, og Nesjøen.

Det er en av dammene med rauset skråningsvern, og denne skal ha hatt tilstrekkelig stor steinstørrelse etter dagens retningslinjer. Ordnet skråningsvern tilsier at steinen er blitt forsøkt plassert enkeltvis og i forband, men ikke nødvendigvis oppfyller alle kravene til plastring. Dagens retningslinjer forutsetter plastret skråningsvern da dette er mer stabilt.

Alle dammene er blitt rehabilitert etter skadene, og har ikke rapportert observerte bølgeskader i ettertid. Dette kan vise at steinstørrelsen på dammene med ordnet skråningsvern og steinstørrelse etter tidligere retningslinjer ikke har vært tilstrekkelig, men utvalget er ikke godt nok til å representere situasjonen i Norge.

4.4 Nærmere beskrivelse av enkelte dammer

Det er 7 dammer som har oppgitt steinstørrelse i plastringen på den tiden da skaden oppsto. Mer detaljert informasjon om disse dammene er beskrevet i dette delkapittelet, da det er disse dammene det gjøres beregninger på i kapittel 5.

4.4.1 Innledning

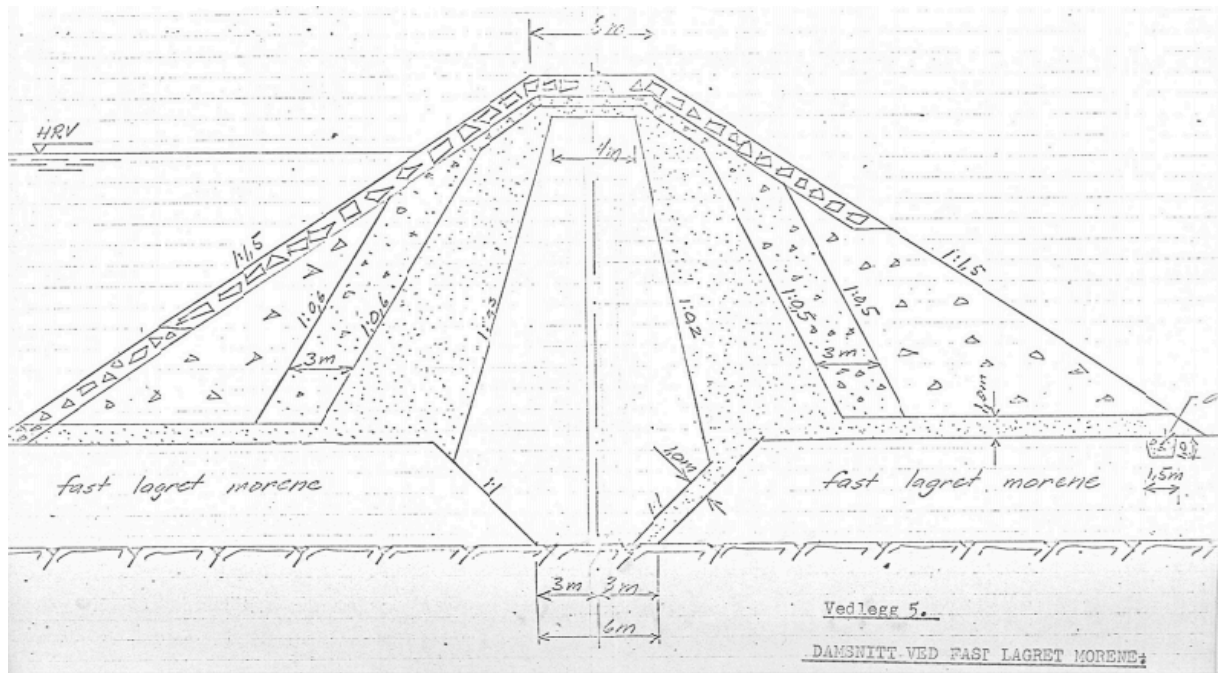
Informasjonen beskrevet i delkapittelet er nøkkelinformasjon om dammene, beskrivelser av bølgeskadene, og den informasjonen som finnes om under hvilke vind- og bølgeførhold skadene oppsto. Det er hentet informasjon om vindforhold fra Norsk Klimaservicesenter for målestasjonene nærmest dammene. Dammene ligger spredt over Norge, beliggenheter er vist i Figur 22.



Figur 22. Kart med plassering av dammer beskrevet i kapittel 4.4

4.4.2 Dam Nesjø

Dam Nesjø er en steinfyllingsdam, med HRV på kote 729 og LRV på kote 723, i Tydal kommune med tetningskjerne av morene. Et snitt av dammen fra da den ble bygd, er vist i Figur 23. Dammen hadde på tidspunktet da bølgeskadene opptrådte, et skråningsvern av ordnet stein med minimum steinstørrelse på 600 kg, eller 0,25 m³. I 1976 ble det utført en befaring med representanter fra dameieren, NVE og NGI i forbindelse ved observerte skader på oppstrøms skråningsvern. Observasjoner og konklusjoner fra denne befaringen ble satt sammen til en rapport utført av NGI (NGI, 1977).



Figur 23. Snitt gjennom Dam Nesjø fra før bygging (Trondheims Elektrisitetsverk, 1969).

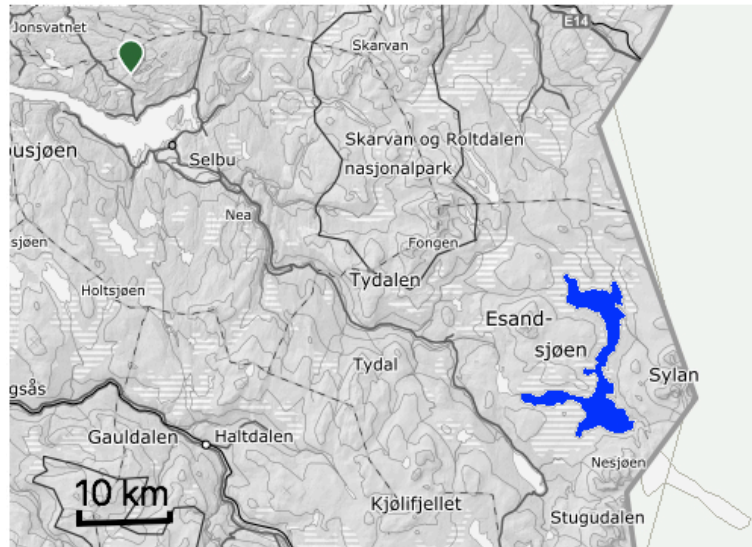
Skadene ble påført under storm i uke 42 og 43 i 1976. Det står i rapporten fra NGI (1977) at Meteorologisk institutt registrerte vind i østlig retning med styrke opp til 25 m/s ved dammen, men det er ikke oppgitt hvor eller hvordan dette ble målt. Det ble observert lignende skader ved dammene ved Ranaverkene og Auraverkene under samme storm, som det ble på Nesjøen, men rapporten beskriver ikke disse skadene.

Norsk klimaservicesenter har registrert observasjoner på kraftigste middelvind på opp til 26,8 m/s under de to ukene med storm, som vist i Figur 24. Verdiene og kart er hentet fra <https://klimaservicesenter.no/observations/>. Det kommer ikke frem i rapporten hvordan de har målt vinden i 1976.



Figur 24. Kraftigste middelvind registrert i uke 42 og 43 1976

Verdien fra norsk klimaservicesenter er registrert ved en stasjon ved Vennafjell, ca. 50 km nordvest for Dam Nesjø, og ligger på ca. samme høyde over havet som dammen. Stasjonens plassering i forhold til dammen er som vist på Figur 25.



Figur 25. Kart med målestasjon ved Nesjø

Skadene ble observert fra HRV til ca. 1 meter under damkrona på den sydlige delen av dammen. Skadene var i form av rundt 10 groper med 2-5 meter brede og 1-1,5 meter dybde. Det ble også observert strandlinjedannelse i 20-30 meter av dammen. En relativt finsprengt steinmasse som lå under den grovsprengte steinmassen ble skylt ut av bølgene mellom de grove blokkene noe som har ført til utglidning av skråningsvernet (NGI, 1977).

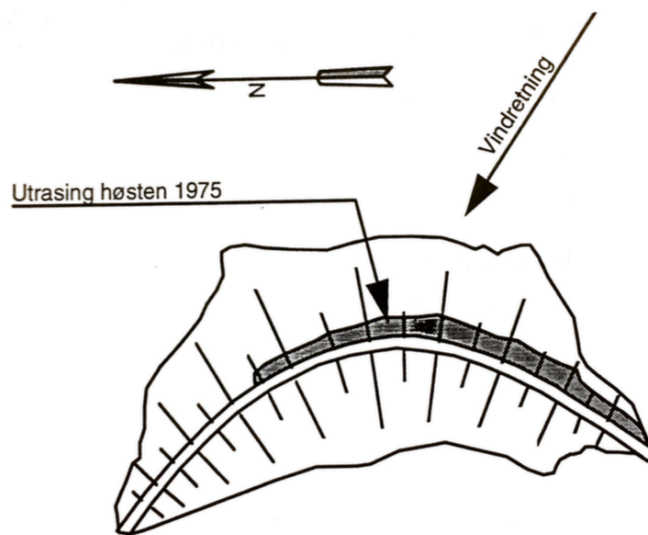
NGI rapporten (1977) konstaterer at byggingen av dammen var utført akseptabelt, og målinger av lekkasje og deformasjoner i ettertid var gunstige. Ifølge arbeidsbeskrivelsen til dammen skulle 50% av steinen i skråningen ha en steinstørrelse på minimum $0,25 \text{ m}^3$. Befaringen viste at steinstørrelsen stort sett var tilfredsstillende, men at skråningsvernet, som skulle være på 2 m, noen ganger var mindre. Dammen ble reparert igjen året etter på grunn av fem sår på oppstrøms plastring.

I dag er det kun observert mindre skader i form av enkelte steiner som er flyttet på av snø og is i magasinet.

4.4.3 Akersvassdammen

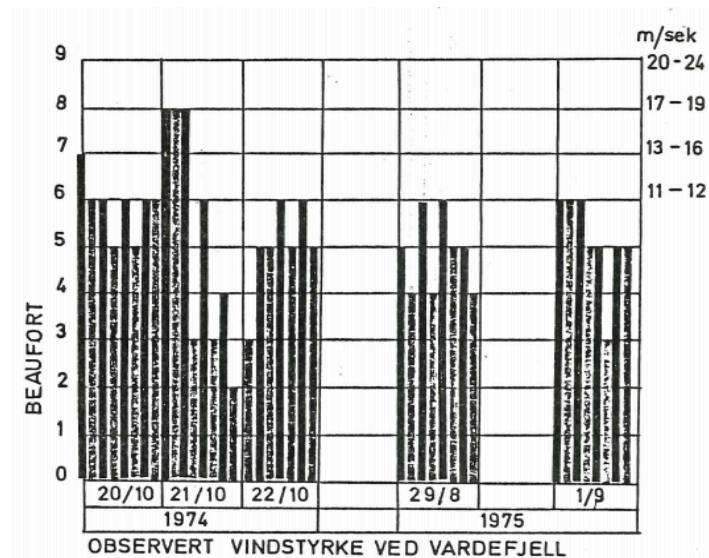
Akersvassdammen er en 54 meter høy steinfyllingsdam, med HRV på kote 523. Dammen har tetningskjerne av morene og ble bygget i 1967. Skråningsvernet besto av ordnet stein med minimum steinstørrelse på $0,5 \text{ m}^3$. Akersvassdammen ligger i Rana kommune og eies av Statkraft. I forbindelse med uvær høsten 1975 ble det observert skader på oppstrøms skråningsvern antatt utført av bølger.

På Akersvassdammen ble det observert enkelte partier med erosjon, og at flere blokker var splittet av frost i de første årene etter bygging. Uværet høsten 1975 førte til forverring av denne situasjonen og flere store skader i form av utglidning og erosjon på oppstrøms skråning av dammen. Skadene var verst på det midtre partiet, og det er antatt at utvasking av finere masser gjennom skråningsvernet er årsaken til utglidningene. På det midtre partiet av dammen var skråningsvernet praktisk talt borte i HRV-beltet. I de partiene av dammen som lå noenlunde parallelt med vindretningen ble det ikke observert skader. Plasseringen av skadene i forhold til vindretning er vist i Figur 26 (Strømme, 1997).



Figur 26. Vindretning under uværet i 1975 ved Akersvassdammen (Strømme, 1997)

Det er ikke registrert noen vindstyrker ved Akersvassdammen på tidspunktet da skadene skjedde. Nærmeste målestasjon, som ligger på Vardefjell, registrerte vindforhold som vist i Figur 27, med en maksimal vindverdi på 19 m/s den 21. oktober 1974. Utrasingene etter uværet høsten 1975 ble observert den 5. september. Denne målestasjonen ligger 50 km sørvest for Akersvassdammen. Verdier for vindstyrke og kart er hentet fra <https://klimaservicesenter.no/observations/>. Det er usikkert hvor representative disse verdiene er, men det kan gi et brukbart oversiktsinntrykk (Hoff, 1978).

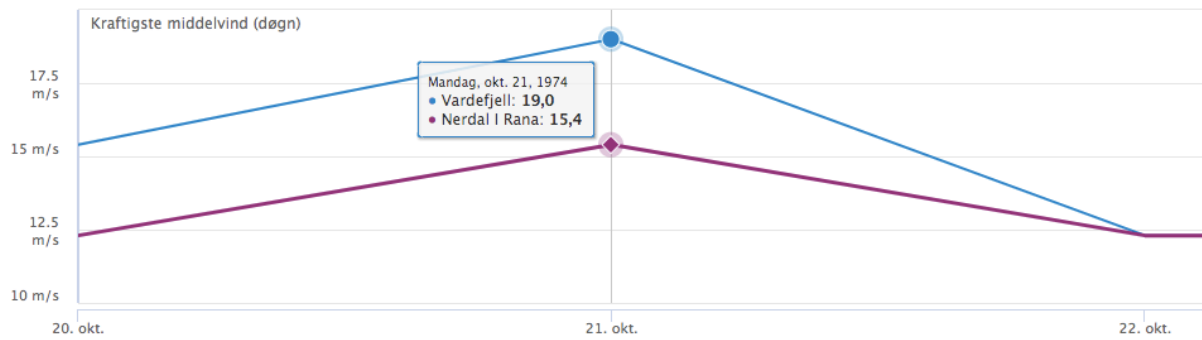


Figur 27. Observert vindstyrke ved Vardefjell høst 1974 og 1975 (Hoff, 1978)

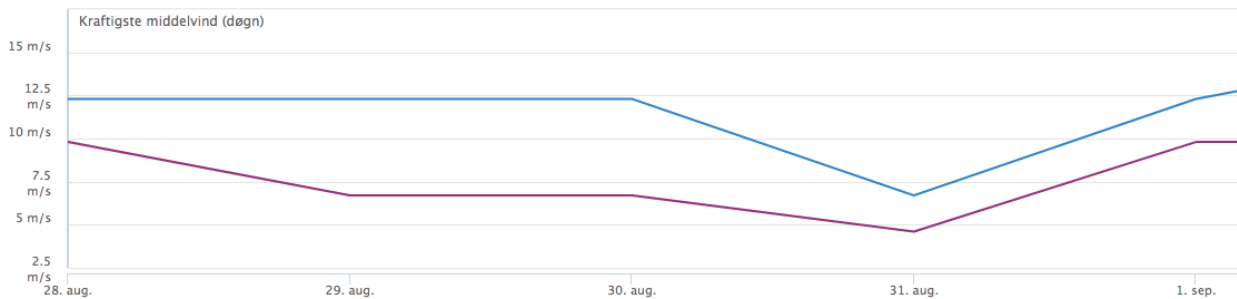
Målestasjonen på Nerdal i Rana ligger nærmere dammen enn den på Vardefjell, ca. 15 km vest for dammen, men dammen ligger ca. 500 m høyere over havet. Kart over målestasjonenes beliggenhet i forhold til dammen er vist på Figur 28. Målestasjonen på Nerdal gir lavere verdier. Verdiene fra begge målestasjonene er vist i Figur 29 og Figur 30.



Figur 28. Kart over målestasjoner ved Akersvassdammen

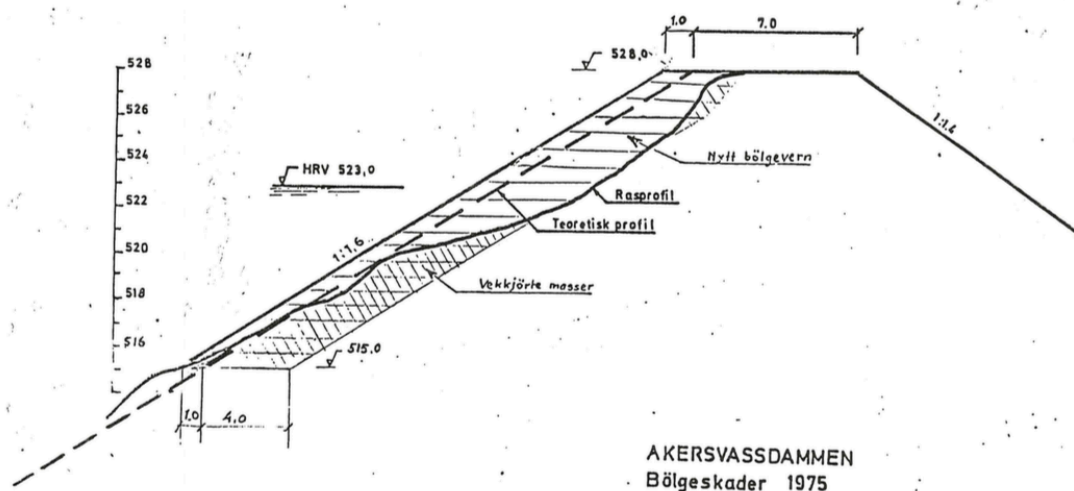


Figur 29. Kraftigste middelvind ved Akersvassdammen i 1974



Figur 30. Kraftigste middelvind ved Akersvassdammen i 1975

Etter vurdering av skadene ble det vedtatt å reparere plastringen ned til kote 515. Repareringen skulle bestå av å fjerne eksisterende masse og legge plastringstein i forband med størrelse 0,5-1 m³ med lengderetningen normalt på damaksen (Hoff, 1978). Rasprofil og nytt skråningsvern ble planlagt som vist i Figur 31. Det er ikke oppgitt registrerte bølgeskader på dammen etter rehabiliteringen.

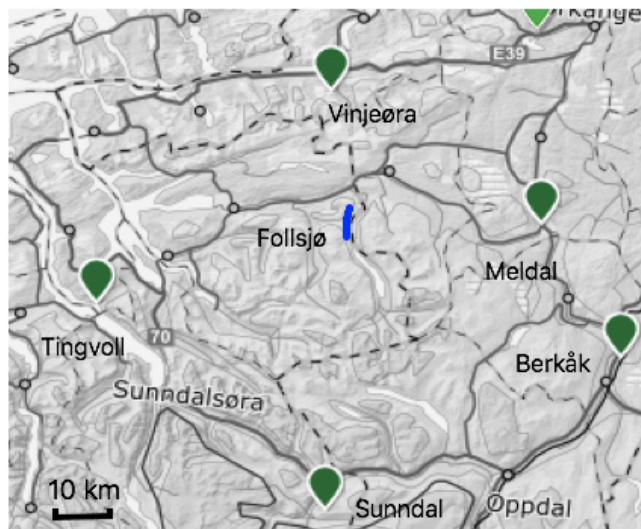


Figur 31. Snitt av planlagt reparasjon av Akersvassdammen (Hoff, 1978)

4.4.4 Follsjø

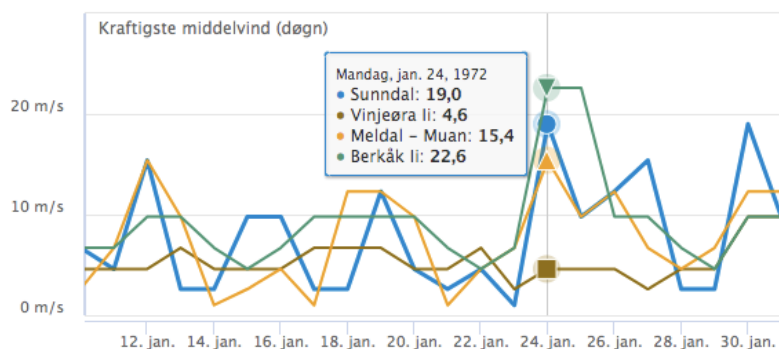
Follsjødammen er en 73 meter høy steinfyllingsdam med tetningskjerne av morene og HRV på kote 420. Dammen ligger mellom Surnadal og Rindal kommune, og eies av Statkraft. Oppstrøms skråningsvern besto av ordnet stein med minimum størrelse på 400 kg, eller 0,2 m³, på tidspunktet bølgeskadene oppsto. Det ble oppdaget bølgeskader på Follsjø i HRV-beltet høsten 1972. Disse skadene ble utbedret året etter med påfylling av stein. Det ble etter hvert flere erosjonspartier og raskjegler (Statkraft, 1997).

Ved å se på klimahistorikk, og verdier for kraftigste middelvind per døgn, kan man få en anelse av hvilke vindforhold det var dette året. Verdiene er hentet fra Norsk Klimaservicesenter og det er hentet verdier fra fire målestasjoner rundt Follsjødammen. Plasseringen av målestasjonene er vist på Figur 32.

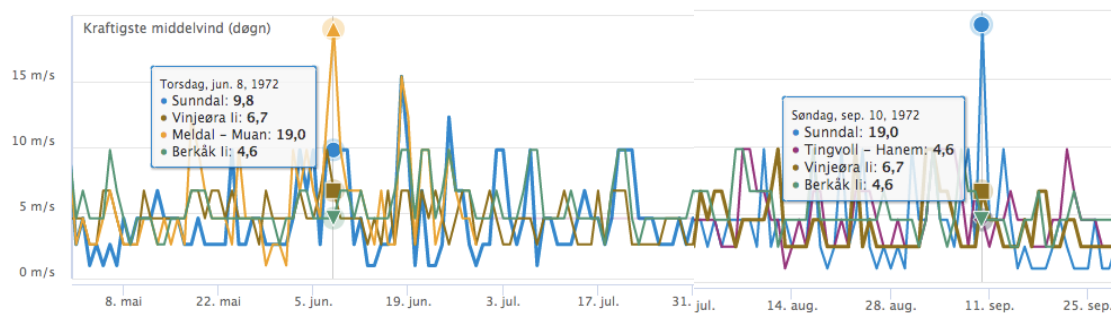


Figur 32. Kart med målestasjoner ved Follsjø

Årets kraftigste vind ble observert på Berkåk 24. januar 1972, som vist i Figur 33. Der ble den kraftigste vindstyrken målt til 22,6 m/s på målestasjonen på Berkåk. Det står beskrevet at skadene ble oppdaget på høsten og dersom en antar at skader oppstått på dammen i januar ville blitt oppdaget tidligere, gir verdier fra mai til november et mer realistisk bilde på situasjonen. Det ble observert høye vindstyrker 8. juni, 10. september og vedvarende høye verdier i oktober og starten av november, som vist i Figur 34.



Figur 33. Kraftigste målte vind ved Follsjø i 1972



Figur 34. Kraftigste middelvind ved Follsjø sommer og høst 1972

Dammen ble rehabilitert i 1994, og hele oppstrøms skråning ble bygget om til plastret skråningsvern.

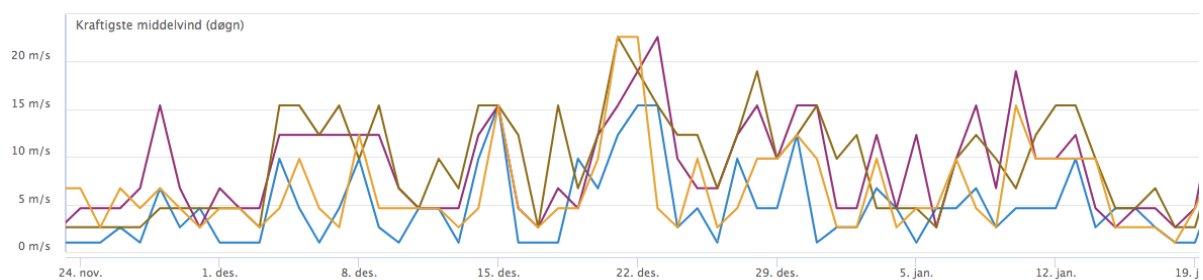
4.4.5 Gråsjø

Gråsjødammen er en 69 meter høy fyllingsdam med tetningskjerne av morene. Dammen ligger i Surnadal og er eid av Statkraft. Oppstrøms skråningsvern besto av ordnet stein med minimum størrelse på 400 kg, eller 0,2 m³ (NGI, 1970), på tidspunktet bølgeskadene oppsto. Det er beskrevet at bølgeskadene ved Gråsjø ble oppdaget sommeren 1976, og det er derfor hentet data fra høsten 1975, og frem til september 1976. Det er hentet data fra fem målestasjoner ved Gråsjø, og beliggenheten er vist i Figur 35. Verdier for vindstyrke og kart er hentet fra <https://klimaservicesenter.no/observations/>.

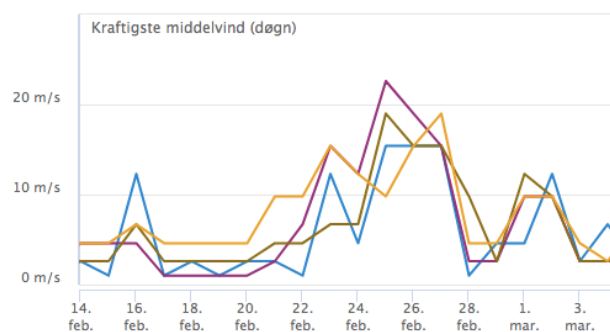


Figur 35. Kart med målestasjoner ved Gråsjø

I perioden september 1975 til september 1976 er det registrert en periode fra desember 1975 til februar 1976 med kraftig middelvind, som vist i Figur 36, den kraftigste vindstyrken som ble registrert var 22,6 m/s. Det er også noen dager rundt 25. februar der det er registrert kraftig vind, vist i Figur 37.



Figur 36. Kraftigste middelvind ved Gråsjø desember 1975 til februar 1976

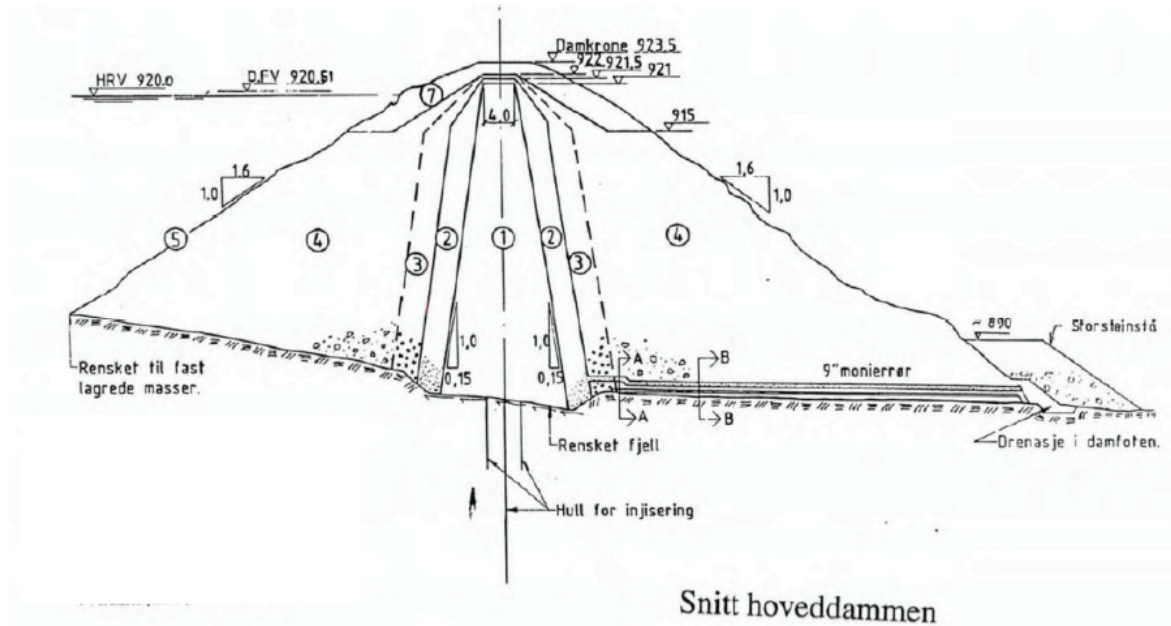


Figur 37. Kraftigste middelvind ved Gråsjø rundt 25. februar

Dammen ble rehabilitert i 1995, med nytt oppstrøms skråningsvern som ble utført som plastring.

4.4.6 Kvilesteinsdammen

Kvilesteinsdammen er en 47 meter høy fyllingsdam med tetningskjerne av morene. Dammen ligger i Vik kommune i Sogn og Fjordane og er eid av Statkraft. Oppstrøms skråningsvern besto av ordnet stein med minimum størrelse på 600 kg, eller $0,25 \text{ m}^3$, da bølgeskadene oppsto. Opprinnelig snitt av dammen vist i Figur 38.



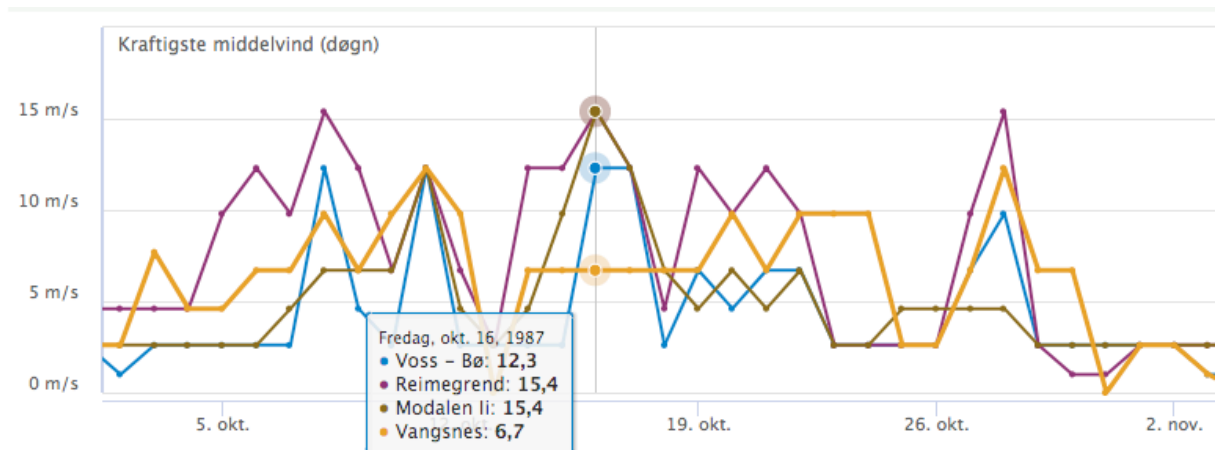
Figur 38. Opprinnelig snitt av Kvilesteindammen (Norconsult AS, 2011)

De store steinene ble etterhvert desimert av frostsprengning, da steinene hadde riss fra sprengningen. Rissene var store nok til at det kunne samle seg fuktighet der. Under et kraftig uvær høsten 1987 ble det dannet 3-4 markerte erosjonsgroper 2-3 meter under HRV (Hoff, 1996). Da skadene oppsto høsten 1987 er det hentet data fra vindmålinger fra august til desember 1987. Informasjonen er hentet fra Norsk Klimaservicesenter fra fire målestasjoner ved dammen, vist i Figur 39.



Figur 39. Kart med målestasjoner ved Kvilesteinsdammen

De høyeste målingene av vindstyrken var mellom 5. oktober og 2. november, vist i Figur 40. Kraftigste observerte måling var på 15,4 m/s og ble målt både på stasjonen ved Modalen, som ligger ca. 25 km fra dammen, og ved Reimegrend som ligger ca. 60 km fra dammen. Modalen og Reimegrend ligger på henholdsvis 114 moh og 590 moh, og Kvilesteinsdammen ligger på 920 moh. Verdier for vindstyrke og kart er hentet fra <https://klimaservicesenter.no/observations/>



Figur 40. Vindmålinger ved Kvilestein høsten 1987

Dammen ble rehabilitert i 2001 med ny plastret oppstrøms skråningsvern og det er ikke rapportert betydelige bølgeskader etter dette.

4.4.7 Sandgrovvassdammen

Sandgrovvassdammen er en 12 meter høy fyllingsdam med tetningskjerne av morene. Dammen ligger i Rauma kommune i Møre og Romsdal og er eid av Statkraft. Oppstrøms skråningsvern besto av rauset stein med minimum størrelse på 600 kg, eller 0,25 m³, da bølgeskadene oppsto. Stein størrelsen var gjennomgående større enn kravet, lagt direkte på tunnelmassen i skråningen og i godt forband. Det ble til dels store åpninger mot den tunnelmassen under.

Dammen ligger i et værutsatt område og etter to år hadde det på deler av dammen blitt vasket ut store deler av tunnelmassen. Det var steder der plastringen kun ble holdt fast ved støtte fra nabosteinerne. Etter tre år kollapset store deler av bølgevernet sammen. Dammen ble rehabilitert med nytt oppstrøms skråningsvern i 1980, og hadde per 1996 ingen observerte bølgeskader (Statkraft, 1996).

4.4.8 Muravassdammen

Muravassdammen er en 77 meter høy fyllingsdam med tetningskjerne av morene. Dammen ligger i Vik kommune i Sogn og Fjordane og er eid av Statkraft. Oppstrøms skråningsvern besto av rauset stein med minimum størrelse på 240 kg, eller 0,1 m³, da bølgeskadene oppsto. Det var ikke anlagt noe spesifikt skråningsvern, men det ble forsøkt å legge de største steinene ytterst da skråningen ble bygget. Det ble tidlig merket at konstruksjonen var et røft byggverk, og ble rehabilitert i 1976-77, kort tid etter at det ble ferdigstilt i 1968.

Det er beskrevet i statusrapport fra 1994 at skråningsvernet hadde oppstrøms skråning hadde *«ubetydelige merker etter bølgeerosjon, men at vannsiden var sterkt preget av byggemåten og med stor variasjon i steinstørrelse»* (Hoff, 1994).

Muravassdammen ble rehabilitert i 1996 med ny oppstrøms plastring, og det er ikke rapportert observerte bølgeskader i ettertid.

4.5 Bølgeskader fra nyere tid

Det er ikke blitt kartlagt bølgeskader fra nyere tid i denne oppgaven, da denne informasjonen var vanskelig å finne.

I damsikkerhetsforskriften (2009) § 7-11 står det:

«Dersom det oppstår ulykke eller uønsket hendelse ved et vassdragsanlegg skal den ansvarlige snarest melde fra om dette til NVE, og skal innen tre måneder redegjøre for hva som har skjedd og hvordan ulykken eller hendelsen er håndtert. For anlegg i konsekvensklasse 0 gjelder meldeplikten bare ved ulykker. Med ulykke menes en uønsket eller en utilsiktet, plutselig situasjon som har skadelige følger. Med uønsket hendelse menes enhver

annen uønsket situasjon enn ulykke som har sammenheng med vassdragsanlegget og som innvirker eller vil kunne innvirke på sikkerheten, herunder nestenulykker.»

Denne meldeplikten inkluderer bølgeskader på plastring som gjør en kartlegging av bølgeskader i nyere tid mulig. Damsikkerhetsforskriften (2009) tredde i kraft i 2010, så for å få informasjon om bølgeskader før dette må en få informasjon direkte fra ansvarlig VTA, eller dameier. Fra rapportene som ligger ute på NVEs nettsider er det fra 2016-2019 registrert en uønsket hendelse relatert til oppstrøms skråning på fyllingsdam. Dette var erosjonsskader på en fyllingsdam i klasse 0 (NVE, 2017)(NVE, 2018)(NVE, 2019)(NVE, 2020). NVE skal ha lagret denne informasjonen fra meldeplikten tredde i kraft og har oversikt over disse skadene tilbake til 2010, og kan derfor innhente mer utfyllende informasjon om hendelsene.

4.6 Oppsummering

Det er en stor variasjon i utvalget av dammer i spørreskjemaet og informasjonen hentet fra sintefrapporten (Sintef, 2000), både geografisk konstruksjonsmessig. Spørreskjemaet har fått inn få svar. Informasjonen om 7 av dammene er nærmere beskrevet i kapitlet.

En oppsummering av de viktigste funnene er:

- 5 av 7 dammer har oppgitt steinstørrelse på tidspunktet bølgeskadene opptrådte mindre enn det som er beregnet fra dagens retningslinjer med en vindstyrke beregnet med 1000 år returperiode
- På 3 av 7 dammer har utvasking av underliggende materiale vært årsak til skadene. Denne utvaskingen skyldes mangel på, eller for dårlig, overgang fra plastring til underliggende materiale.
- De fleste av bølgeskadene har opptrådd rundt HRV-beltet
- Det er generelt lite informasjon om vind og bølgef forhold ved dammene
- Skademekanismene på skråningsvernet har vært varierende og inkludert bølgeerosjon, utvasking av finstoff, frostsprengning av stein og stein flyttet på av is.
- Alle dammene er rehabilitert etter bølgeskadene
- Ingen av dammene har rapportert alvorlige bølgeskader etter rehabilitering
- Ingen av bølgeskadene har ført til dambrudd
- En hendelse innmeldt til NVE etter 2016 om skader på oppstrøms skråningsvern

5 Beregninger og resultat

Dette kapitlet inneholder beregninger utført på de ulike dammene, både beregningsmetode og resultater for effektivt strøk, vindstyrker, signifikant bølgehøyde og steinstørrelse. Beregningene er utført som beskrevet i kapittel 3.

5.1 Innledning

De fleste skadene som er beskrevet i denne oppgaven ble observert før nye krav fra damsikkerhetsforskriften (2009) trådte i kraft i 2010. Det er nødvendig å sammenligne observerte data, med teoretiske beregninger for hvordan disse dammene ville sett ut etter dagens standard. Ved å sammenligne disse resultatene kan en få bedre kunnskap om hvordan miljølasten fungerer på oppstrøms plastring. Beregningene i dette kapitlet er gjort i forbindelse med masteroppgaven. Beregningene følger dagens norske retningslinjer, men det er også utført beregninger etter de ulike metodene beskrevet i kapittel 3.5.

5.2 Beregninger for spesifikke dammer

Det er utført beregninger for de 7 dammene beskrevet i delkapittel 4.4. Det er beskrevet fremgangsmåte og antagelser gjort i beregningene, samt resultat.

5.2.1 Forutsetninger

Det er utført beregninger for vind, bølger, og steinstørrelse for dammene der det har vært tilgjengelig tilstrekkelig informasjon. Kopi av de viktigste delene som excelarkene bruker for beregningene er lagt ved i Vedlegg 2-8.

Beregningsarket tar utgangspunkt i formlene beskrevet i kapittel 3.4. For beregninger av basisvind er retningsfaktoren, C_{dir} , hentet fra tabell NA4. (901.4) i Norsk Standard for vindlaster, årstidsfaktoren, $C_{årstid}$, satt lik 1. Sannsynlighetsfaktoren for å tilpasse til en returperiode på 1000 år, C_{sans} satt til 1,16. Nivåfaktoren, C_{alt} , er bestemt fra formel (4) med terskelverdien, $v_{b,0}$, satt til 30 m/s.

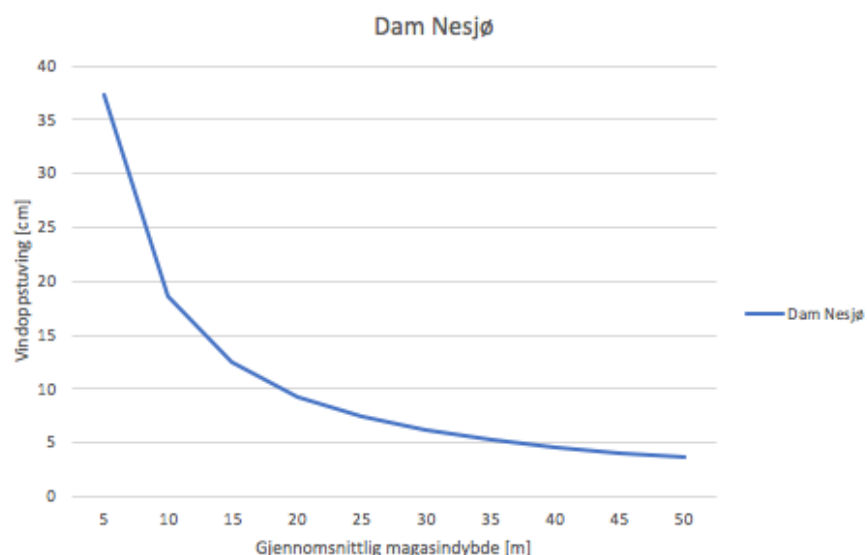
For beregning av middelvind, som er verdien som brukes i bølgeberegningene, er terrengformfaktoren, C_0 , satt til 1 og ruhetsfaktoren, C_r bestemt ved formel (6). Terrengruhetsfaktoren, K_r , er bestemt ved formel (7), med verdier beskrevet i Tabell 1.

Strøkene er tegnet på kart hentet på kartverket.no, og det er brukt Autocad til å måle lengder og vinkler. Det er antatt at magasinnivået ligger på HRV på kartene. Effektivt strøk er deretter beregnet fra formel (8) med vinkler til og med 90 grader fra sentral radialen.

Nødvendig tid for å oppnå stasjonær bølgetilstand er beregnet fra formel (11). Dersom den nødvendige tiden er mer enn 10 minutter, er dimensjonerende vindhastighet korrigert etter formel (12). Dette er også gjort for beregningene der det er brukt 30 m/s som vindstyrke.

Signifikant bølgehøyde, H_s , er beregnet fra formel (9). Vindoppstuvning, S_u , er beregnet fra formel (13), og bølgeoppskylling fra formel (17) eller (18). Korrigering for innfallsvinkel er beregnet fra formel (19).

Beregning av vindoppstuvning krever gjennomsnittlig dybde på magasinet. Da det sjeldent er dybdekart tilgjengelig er det sammenlignet vindoppstuvning med forskjellige dybder. Resultatet fra Dam Nesjø er vist på Figur 41. Denne sammenligningen viser at vindoppstuvningen blir størst ved grunne magasiner, og det er derfor antatt lave verdier på magasindybde ut ifra damhøyde og dette fører til konservative resultat.



Figur 41. Vindoppstuvning med ulik gjennomsnittlig magasindybde

Der strøk og bølger er beregnet etter metoden kalt Saville, er strøkene beregnet etter formel (27) med vinkler til og med 45 grader fra sentral radialen. Signifikant bølgehøyde blir beregnet fra formel (28), (29) og (30). Vindhastigheten som er brukt er den som er beregnet etter Norsk Standard for vindlaster med returperiode på 1000 år, og 30 m/s.

Der strøk og bølger er beregnet etter britiske retningslinjer er det lengste, eller mest ugunstige, strøket valgt og brukt som effektivt strøk. I denne metoden er det også brukt bøyd strøk der utformingen av magasinet passer dette. Vindhastigheten er beregnet fra formel (31) med returperiode på 1000 år, og 30 m/s justert for tid til å oppnå stasjonær bølgetilstand etter formel (12). Faktor for justering for varighet er satt til 1.0. Dette er fordi referanse vinden i England er gitt for en varighet på 1 time, men den i Norge er gitt for 10 minutter. Justering for endring i hastighet på grunn av vind over vann er gitt etter Tabell 2. Der det er justering i

forhold til vindretning er faktorene for dette gitt i Norsk Standard for vindlaster brukt. For å endre returperiode til 1000 år er 1,6 brukt som faktor for oppgitt verdi med returperiode på 50 år. Signifikant bølgehøyde er beregnet fra formel (33).

Der strøk og bølger er beregnet etter metoden kalt VHL er strøkbredde og det lengste, eller mest ugunstige, strøket antatt etter kart. Disse verdiene er brukt i grafen vist i Figur 18. Signifikant bølgehøyde er beregnet fra formel (34) og vindhastigheten som er brukt er den beregnet etter Norsk Standard for vindlaster med returperiode på 1000 år, og 30 m/s som er justert for tid til å oppnå stasjonær bølgetilstand etter formel (12)

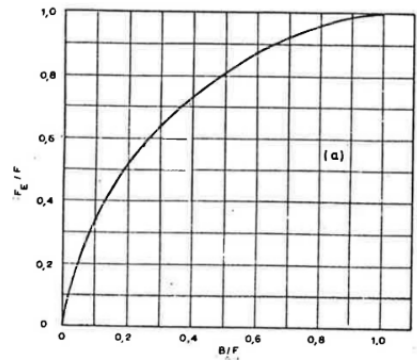
5.2.2 Dam Nesjø

Beregningene for Dam Nesjø er gjort slik som beskrevet i kapittel 5.2.1. Kartet med strøk er vist i Figur 42. Kartet er hentet fra <https://www.kartverket.no/Kart/> og strøkene er tegnet ved bruk av AutoCad.



Figur 42. Strøk for Dam Nesjø

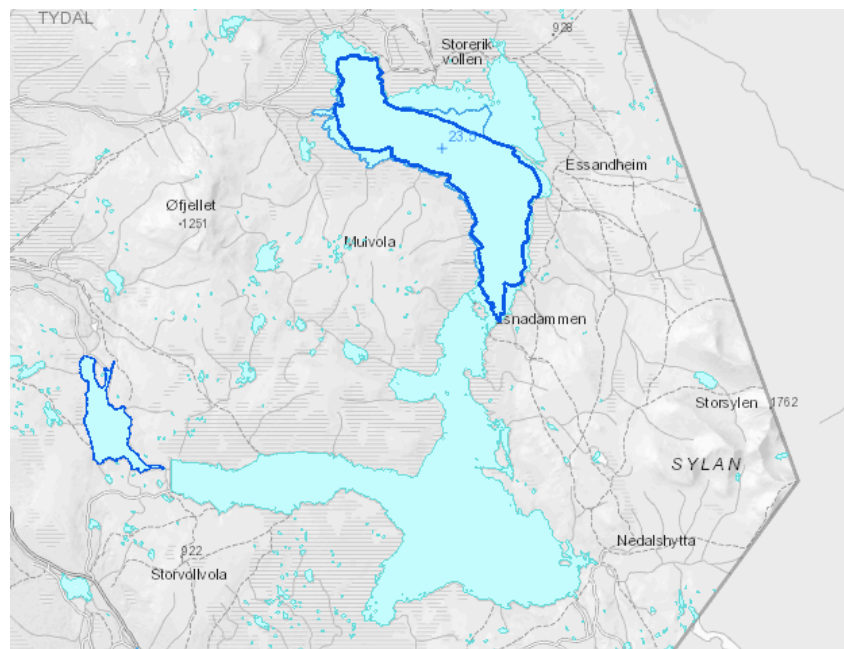
Beregningen av effektivt strøk etter dagens metoder gir en verdi på 2,1 km. I rapporter fra 1976 er effektivt strøk beregnet fra diagram i Figur 43 og formel (35), med en verdi på 3,4 km. Det vil si at beregnet strøk i 1976 er 1,3 km lengre enn det som er beregnet i dag. Dette gir også en høyere dimensjonerende bølgehøyde.



Figur 43. Diagram brukt for beregning av effektivt strøk (NGI, 1976)

$$\frac{B}{F} = 0,1; \frac{F_e}{F} = 0,34 \Rightarrow F_e = 3,4 \text{ km} \quad (35)$$

Gjennomsnittlig dybde for strøk er antatt likt som for den nordlige delen av magasinet og er hentet fra NVE Atlas. Kart over hele magasinet er vist i Figur 44, og dybden er tatt fra den delen av kartet som er markert med tykk blå strek.



Figur 44. Nesjøen, oversikt over eksisterende dybdekart (NVE.no)

For vindberegningene er referansevind hentet fra Norsk Standard for vindlaster og er oppgitt som 25 m/s for Tydal kommune. Referansehøyder er satt til 900 moh. for start av nivåkorreksjon og 1500 moh. for hvor maksimalkorreksjon er nådd. Dette er verdier oppgitt for Sør-Norge. Dam Nesjø ligger på ca. 720 moh. Vindhastigheten er derfor ikke korrigert for høyde over havet. Det er antatt at ugunstigste vindretning er fra øst og retningsfaktoren, er blitt satt til 0,8, etter tabell NA.4 (901.4)

Resultatene for beregning av dimensjonerende vindstyrke, signifikant og dimensjonerende bølgehøyde, vindoppstuvning og bølgeoppskylling er vist i Tabell 4. Verdiene for dimensjonerende bølgehøyde er beregnet for å kunne sammenligne med NGIs beregninger oppgitt i rapporten fra 1976.

Tabell 4. Resultat av bølgeberegninger for Dam Nesjø

Dimensjonerende vindstyrke			
- 50 års intervall	U	23,45	m/s
- 1000 års intervall	U	27,21	m/s
Dimensjonerende bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hd	1,89	m
- vind: 50 års intervall	Hd	1,36	m
- vind: 1000 års intervall	Hd	1,66	m
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	1,46	m
- vind: 50 års intervall	Hs	1,04	m
- vind: 1000 års intervall	Hs	1,28	m
Vindoppstuvning			
- vind: 30 m/s	Su	0,18	m
- vind: 50 års intervall	Su	0,11	m
- vind: 1000 års intervall	Su	0,15	m
Bølgeoppskylling			
- vind: 30 m/s	Ru	2,84	m
- vind: 50 års intervall	Ru	2,04	m
- vind: 1000 års intervall	Ru	2,49	m

Beregningene gjort for bølgehøyde i 1976, vist i Figur 45, gir verdier høyere enn de som er gitt ved dagens metode.

Vindhast. m/s	Bølgeh. m.	Bølgeh. x 1.3	Steinv. & tonn	Q/ 2.7 m ³
25	1.25	1.63	0.50	0.185
30	1.50	1.95	0.85	0.315

Figur 45. Bølgeberegninger fra 1976 (NGI, 1976)

Det er beregnet strøk og signifikant bølgehøyde på tre andre metoder enn den som er beskrevet i NVEs retningslinjer. Disse metodene er beskrevet i kapittel 3.5. I den britiske metoden er justering for vindhastighet over vann satt til 1,3 og i VHL sin metode er antatt bredde satt lik 1100 m og faktoren hentet fra grafen satt til 0,34. Resultatet fra de forskjellige metodene er vist i Tabell 5. Her er det tatt med verdier etter britiske retningslinjer, og med justering for høyde over havet etter Norsk standard for vindlaster.

Tabell 5. Resultat fra ulike metoder på Dam Nesjø

	Fe [km]	Hs [m]-returperiode på 1000 år	Hs [m] 30 m/s
Norge	2,07	1,28	1,46
Saville	2,50	1,13	1,27
UK guidelines	10,84	3,07	1,739
UK guidelines - justert Calt	10,84	1,78	1,739
VHL	3,69	1,19	1,324

5.2.3 Akersvassdammen

Beregningene for Akersvassdammen er gjort slik som beskrevet i kapittel 5.2.1. Kartet med strøk er vist i Figur 46. Kartet er hentet fra <https://www.kartverket.no/Kart/> og strøkene er tegnet ved bruk av AutoCad.



Figur 46. Akersvassdammen med strøk

Gjennomsnittlig dybde er satt til 30 meter. Dette er antatt ut ifra at dammen er 53 meter høy, og at lavere gjennomsnittdybde gir mer konservative resultat som vist i Figur 41.

For vindberegningene er referansevind hentet fra Norsk Standard for vindlaster og er oppgitt som 26 m/s for Rana kommune. Referansehøyder er satt til 700 moh. for start av nivåkorreksjon og 1300 moh. for hvor maksimalkorreksjon er nådd. Dette er verdier oppgitt for Nord-Trøndelag, Nordland og Troms. Akersvassdammen ligger på ca. 520 moh., og vindhastigheten er derfor ikke korrigeret for høyde over havet. Det er antatt at ugunstigste vindretning er fra sør-øst og retningsfaktoren er blitt satt til 1 etter tabell NA.4 (901.4) i Norsk Standard for vindlaster.

Resultatene for beregning av dimensjonerende vindstyrke, signifikant bølgehøyde, vindoppstuvning og bølgeoppskylning er vist i Tabell 6.

Tabell 6. Resultat av bølgeberegninger for Akersvassdammen

Dimensjonerende vindstyrke			
- 50 års intervall	U	29,77	m/s
- 1000 års intervall	U	34,53	m/s
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	1,54	m
- vind: 50 års intervall	Hs	1,57	m
- vind: 1000 års intervall	Hs	1,92	m
Vindoppstuvning			
- vind: 30 m/s	Su	0,05	m
- vind: 50 års intervall	Su	0,06	m
- vind: 1000 års intervall	Su	0,08	m
Bølgeoppskylning			
- vind: 30 m/s	Ru	3,00	m
- vind: 50 års intervall	Ru	3,06	m
- vind: 1000 års intervall	Ru	3,74	m

Det er beregnet strøk og signifikant bølgehøyde på tre andre metoder enn den som er beskrevet i NVEs retningslinjer. Disse metodene er beskrevet i kapittel 3.5. I den britiske metoden er justering for vindhastighet over vann satt til 1,3 og i VHL sin metode er antatt bredde satt lik 2000 m og faktoren hentet fra grafen satt til 0,52. Resultatet fra de forskjellige metodene er vist i Tabell 7. Her er det tatt med verdier etter britiske retningslinjer, og med justering for høyde over havet, C_{alt} , etter Norsk standard for vindlaster.

Tabell 7. Resultat fra ulike metoder på Akersvassdammen

	Fe [km]	Hs [m]-returperiode på 1000 år	Hs [m] 30 m/s
Norge	2,34	1,92	1,54
Saville	3,23	1,70	1,41
UK guidelines	9,23	3,26	1,599
UK guidelines - justert Calt	9,23	2,14	1,599
VHL	4,80	1,78	1,494

5.2.4 Gråsjø

Beregningene for Dam Gråsjø er gjort slik som beskrevet i kapittel 5.2.1. Kartet med strøk er vist i Figur 47. Kartene er hentet fra <https://www.kartverket.no/Kart/> og strøkene er tegnet ved bruk av AutoCad.



Figur 47. Dam Gråsjø med strøk

Gjennomsnittlig dybde er satt til 50 meter. Dette er antatt ut ifra at dammen er 69 meter høy og at lavere gjennomsnittsdybde gir mer konservative resultat som er vist i Figur 41.

For vindberegningene er referansevind hentet fra Norsk Standard for vindlaster og er oppgitt som 25 m/s for Surnadal kommune. Referansehøyder er satt til 900 moh. for start av nivåkorreksjon og 1500 moh. for hvor maksimalkorreksjon er nådd. Dette er verdier oppgitt for Sør-Norge unntatt Nord Trøndelag. Dam Gråsjø ligger på ca. 480 moh. og vindhastigheten er derfor ikke korrigeret for høyde over havet. Det er antatt at ugunstigste vindretning er fra sør-øst og retningsfaktoren er blitt satt til 1 etter tabell NA.4(901.4) i Norsk Standard for vindlaster.

Resultatene for beregning av dimensjonerende vindstyrke, signifikant bølgehøyde, vindoppstuvning og bølgeoppkylling er vist i Tabell 8.

Tabell 8. Resultater fra bølgebergninger på Dam Gråsjø

Dimensjonerende vindstryke			
- 50 års intervall	U	27,83	m/s
- 1000 års intervall	U	32,29	m/s
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	1,28	m
- vind: 50 års intervall	Hs	1,18	m
- vind: 1000 års intervall	Hs	1,44	m
Vindoppstuvning			
- vind: 30 m/s	Su	0,04	m
- vind: 50 års intervall	Su	0,03	m
- vind: 1000 års intervall	Su	0,04	m
Bølgeoppkylling			
- vind: 30 m/s	Ru	2,58	m
- vind: 50 års intervall	Ru	2,36	m
- vind: 1000 års intervall	Ru	2,89	m

Det er beregnet strøk og signifikant bølgehøyde på tre andre metoder enn den som er beskrevet i NVEs retningslinjer. Disse metodene er beskrevet i kapittel 3.5. I den britiske metoden er justering for vindhastighet over vann satt til 1,3 og i VHL sin metode er antatt bredde satt lik 2100 m og faktoren hentet fra grafen satt til 0,3. Resultatet fra de forskjellige metodene er vist i Tabell 9. Her er det tatt med verdier etter britiske retningslinjer, og med justering for høyde over havet, C_{alt} , etter Norsk standard for vindlaster.

Tabell 9. Resultat fra ulike metoder på Dam Gråsjø

	Fe [km]	Hs [m]-returperiode på 1000 år	Hs [m] 30 m/s
Norge	1,52	1,44	1,28
Saville	2,06	1,30	1,18
UK guidelines	10,38	3,11	1,72
UK guidelines - justert Calt	10,38	2,10	1,718
VHL	3,11	1,35	1,24

5.2.5 Follsjø

Beregningene for Dam Follsjø er gjort slik som beskrevet i kapittel 5.2.1. Kartet med strøk er vist i Figur 48. Kartene er hentet fra <https://www.kartverket.no/Kart/> og strøkene er tegnet ved bruk av AutoCad.



Figur 48. Dam Follsjø med strøk

Gjennomsnittlig dybde er satt til 53 meter. Dette er antatt ut ifra at dammen er 73 meter høy og at lavere gjennomsnittsdybde gir mer konservative resultat som vist i Figur 41.

For vindberegningene er referansevind hentet fra Norsk Standard for vindlaster og er oppgitt som 25 m/s for Surnadal kommune. Referansehøyder er satt til 900 moh. for start av

nivåkorreksjon og 1500 moh. for hvor maksimalkorreksjon er nådd. Dette er verdier oppgitt for Sør-Norge unntatt Nord Trøndelag. Dam Follsjø ligger på ca. 420 moh. og vindhastigheten er derfor ikke korrigeret for høyde over havet. Det er antatt at ugunstigste vindretning er fra sør-vest og retningsfaktoren er blitt satt til 1 etter tabell NA.4(901.4) i Norsk Standard for vindlaster.

Resultatene for beregning av signifikant bølgehøyde, vindoppstuvning og bølgeopp skyling er vist i Tabell 10.

Tabell 10. Resultat fra beregninger på Dam Follsjø

Dimensjonerende vindstyrke			
- 50 års intervall	U	29,22	m/s
- 1000 års intervall	U	33,89	m/s
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	1,22	m
- vind: 50 års intervall	Hs	1,17	m
- vind: 1000 års intervall	Hs	1,43	m
Vindoppstuvning			
- vind: 30 m/s	Su	0,01	m
- vind: 50 års intervall	Su	0,01	m
- vind: 1000 års intervall	Su	0,02	m
Bølgeopp skyling			
- vind: 30 m/s	Ru	2,44	m
- vind: 50 års intervall	Ru	2,36	m
- vind: 1000 års intervall	Ru	2,88	m

Det er beregnet strøk og signifikant bølgehøyde på tre andre metoder enn den som er beskrevet i NVEs retningslinjer. Disse metodene er beskrevet i kapittel 3.5. I den britiske metoden er justering for vindhastighet over vann satt til 1,23, og det er brukt bøyd strøk som vist i Figur 49. Det er brukt bøyd strøk da det i den britiske metoden kan antas at vinden «følger» dalen som magasinet ligger i, og Gråsjø har et magasin hvor det er stor sannsynlighet for at denne effekten eksisterer.



Figur 49. Foldsjøen med bøyd strøk

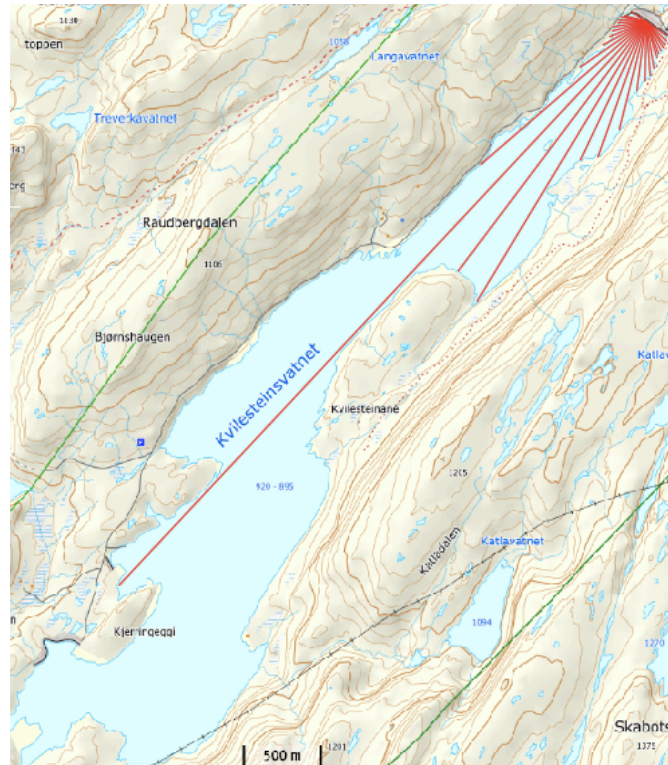
I VHL sin metode er antatt bredde satt lik 1100 m og faktoren hentet fra grafen satt til 0,61. Resultatet fra de forskjellige metodene er vist i Tabell 11. Her er det tatt med verdier etter britiske retningslinjer, og med justering for høyde over havet, C_{alt} , etter Norsk standard for vindlaster.

Tabell 11. Resultat fra ulike metoder på Dam Follsjø

	Fe [km]	Hs [m]-returperiode på 1000 år	Hs [m] 30 m/s
Norge	1,30	1,43	1,22
Saville	1,73	1,28	1,11
UK guidelines	6,25	2,28	1,35
UK guidelines - justert C_{alt}	6,25	1,60	1,35
VHL	2,53	1,29	1,13

5.2.6 Kvilesteinsdammen

Beregningene for Kvilesteinsdammen er gjort slik som beskrevet i kapittel 5.2.1. Kartet med strøk er vist i Figur 50. Kartene er hentet fra <https://www.kartverket.no/Kart/> og strøkene er tegnet ved bruk av AutoCad.



Figur 50. Kvilesteinsdammen med strøk

Gjennomsnittlig dybde er satt til 36 meter. Dette er antatt ut ifra at dammen er 47 meter høy, og at lavere gjennomsnittdybde gir mer konservative resultat som er vist i Figur 41

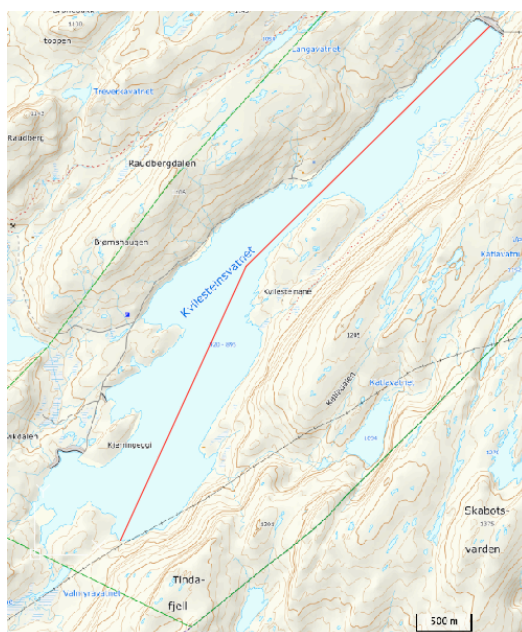
For vindberegningene er referansevind hentet fra Norsk Standard for vindlaster og er oppgitt som 24 m/s for Vik kommune. Referansehøyder er satt til 900 moh. for start av nivåkorreksjon og 1500 moh. for hvor maksimalkorreksjon er nådd. Dette er verdier oppgitt for Sør-Norge unntatt Nord Trøndelag. Kvilesteinsdammen ligger på ca 920 moh. og vindhastigheten er derfor korrigert for høyde over havet med en verdi for C_{alt} lik 1,01. Det er antatt at ugunstigste vindretning er fra sør-vest og retningsfaktoren er blitt satt til 0,9 etter tabell NA.4(901.4) i Norsk Standard for vindlaster.

Resultatene for beregning av signifikant bølgehøyde, vindoppstuvning og bølgeoppskylning er vist i Tabell 12.

Tabell 12. Resultater fra bølgeberegninger på Kvilesteinsdammen

Dimensjonerende vindstyrke			
- 50 års intervall	U	25,55	m/s
- 1000 års intervall	U	29,63	m/s
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	0,97	m
- vind: 50 års intervall	Hs	0,78	m
- vind: 1000 års intervall	Hs	0,95	m
Vindoppstuvning			
- vind: 30 m/s	Su	0,03	m
- vind: 50 års intervall	Su	0,02	m
- vind: 1000 års intervall	Su	0,02	m
Bølgeoppskylning			
- vind: 30 m/s	Ru	1,88	m
- vind: 50 års intervall	Ru	1,52	m
- vind: 1000 års intervall	Ru	1,85	m

Det er beregnet strøk og signifikant bølgehøyde på tre andre metoder enn den som er beskrevet i NVEs retningslinjer. Disse metodene er beskrevet i kapittel 3.5. I den britiske metoden er justering for vindhastighet over vann satt til 1,245, og det er brukt bøyd strøk som vist i Figur 51. Det er brukt bøyd strøk da det i den britiske metoden kan antas at vinden «følger» dalen som magasinet ligger i, og Kvilestein har et magasin hvor det er stor sannsynlighet for at denne effekten eksisterer.



Figur 51. Kvilesteinsvatnet med bøyd strøk

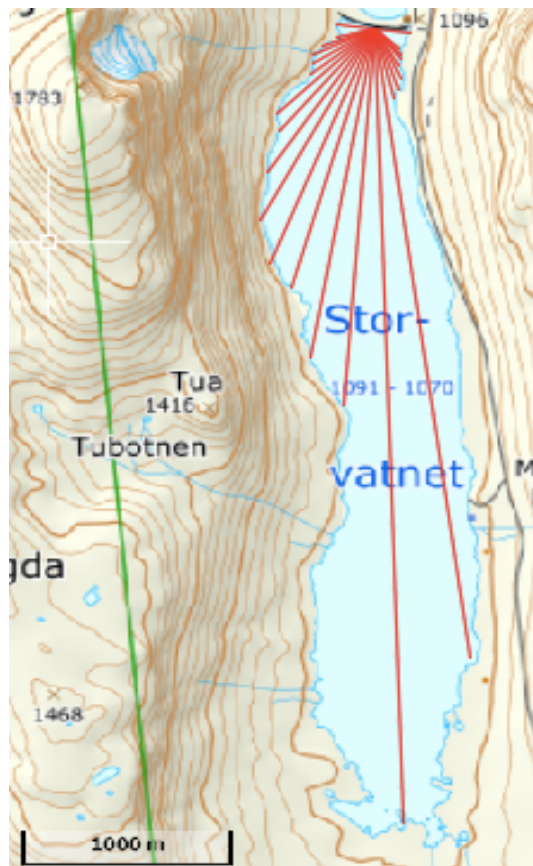
I VHL sin metode er antatt bredde satt lik 600 m og faktoren hentet fra grafen satt til 0,3. Resultatet fra de forskjellige metodene er vist i Tabell 13. Her er det tatt med verdier etter britiske retningslinjer, og med justering for høyde over havet, C_{alt} , etter Norsk standard for vindlaster.

Tabell 13. Resultat fra ulike metoder på Kvilesteinsdammen

	Fe [km]	Hs [m]-returperiode på 1000 år	Hs [m] 30 m/s
Norge	0,78	0,95	0,97
Saville	1,06	0,89	0,91
UK guidelines	5,86	2,61	1,31
UK guidelines - justert Calt	5,86	1,37	1,31
VHL	1,48	0,87	0,88

5.2.7 Sandgrovvassdammen

Beregningene for Sandgrovvassdammen er gjort slik som beskrevet i kapittel 5.2.1. Kartet med strøk er vist i Figur 52. Kartet er hentet fra <https://www.kartverket.no/Kart/> og strøkene er tegnet ved bruk av AutoCad.



Figur 52. Sandgrovvassdammen med strøk

Gjennomsnittlig dybde er satt til 7 meter. Dette er antatt ut ifra at dammen er 12 meter høy, og at lavere gjennomsnittsdypde gir mer konservative resultat som er vist i Figur 41.

For vindberegningene er referansevind hentet fra Norsk Standard for vindlaster og er oppgitt som 28 m/s for Rauma kommune. Referansehøyder er satt til 900 moh. for start av nivåkorreksjon og 1500 moh. for hvor maksimalkorreksjon er nådd. Dette er verdier oppgitt for Sør-Norge unntatt Nord Trøndelag. Sandgrovvassdammen ligger på ca. 1070 moh. og vindhastigheten er derfor korrigerert for høyde over havet med en verdi for C_{alt} lik 1,03. Det er antatt at ugunstigste vindretning er fra sør og retningsfaktoren er blitt satt til 0,9 etter tabell NA.4(901.4) i Norsk Standard for vindlaster.

Resultatene for beregning av signifikant bølgehøyde, vindoppstuvning og bølgeoppkylling er vist i Tabell 14.

Tabell 14. Resultat fra bølgeberegninger på Sandgrovvassdammen

Dimensjonerende vindstyrke			
- 50 års intervall	U	30,38	m/s
- 1000 års intervall	U	35,25	m/s
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hd	1,04	m
- vind: 50 års intervall	Hd	1,06	m
- vind: 1000 års intervall	Hd	1,29	m
Vindoppstuvning			
- vind: 30 m/s	Su	0,11	m
- vind: 50 års intervall	Su	0,12	m
- vind: 1000 års intervall	Su	0,16	m
Bølgeoppkylling			
- vind: 30 m/s	Ru	2,02	m
- vind: 50 års intervall	Ru	2,06	m
- vind: 1000 års intervall	Ru	2,52	m

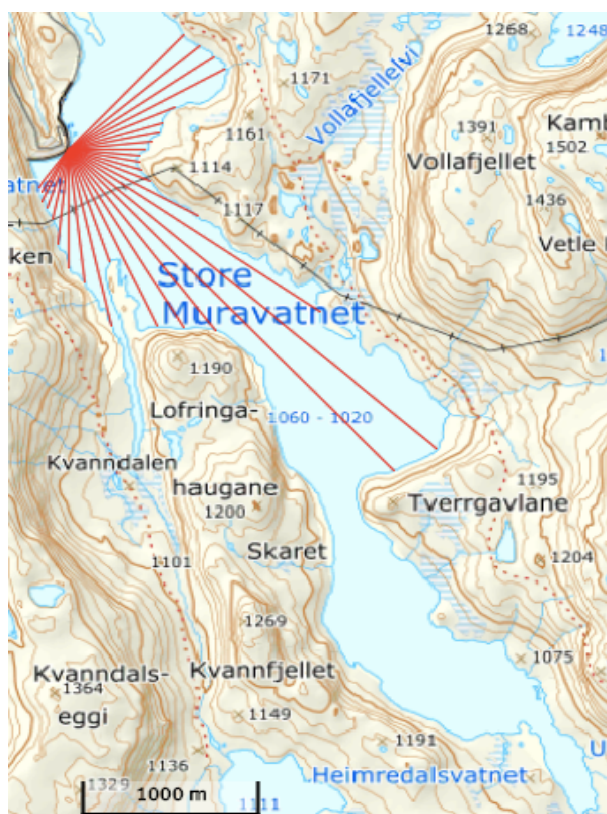
Det er beregnet strøk og signifikant bølgehøyde på tre andre metoder enn den som er beskrevet i NVEs retningslinjer. Disse metodene er beskrevet i kapittel 3.5. I den britiske metoden er justering for vindhastighet over vann satt til 1,23 og i VHL sin metode er antatt bredde satt lik 700 m og faktoren hentet fra grafen satt til 0,3. Resultatet fra de forskjellige metodene er vist i Tabell 15. Her er det tatt med verdier etter britiske retningslinjer, og med justering for høyde over havet, C_{alt} , etter Norsk standard for vindlaster.

Tabell 15. Resultat fra ulike metoder på Sandgrovvassdammen

	Fe [km]	Hs [m]-returperiode på 1000 år	Hs [m] 30 m/s
Norge	0,91	1,29	1,04
Saville	1,24	1,17	0,97
UK guidelines	4,22	2,75	1,108
UK guidelines - justert Calt	4,22	1,36	1,108
VHL	1,27	0,97	0,819

5.2.8 Muravassdammen

Beregningene for Muravassdammen er gjort slik som beskrevet i kapittel 5.2.1. Kartet med strøk er vist i Figur 53. Kartene er hentet fra <https://www.kartverket.no/Kart/> og strøkene er tegnet ved bruk av AutoCad.



Figur 53. Muravassdammen med strøk

Gjennomsnittlig dybde er satt til 60 meter. Dette er antatt ut ifra at dammen er 77 meter høy, og at lavere gjennomsnittdybde gir mer konservative resultat som vist i Figur 41.

For vindberegningene er referansevind hentet fra Norsk Standard for vindlaster og er oppgitt som 24 m/s for Vik kommune. Referansehøyder er satt til 900 moh. for start av

nivåkorreksjon og 1500 moh. for hvor maksimalkorreksjon er nådd. Dette er verdier oppgitt for Sør-Norge unntatt Nord Trøndelag. Sandgrovvassdammen ligger på ca. 1060 moh. og vindhastigheten er derfor korrigerert for høyde over havet med en verdi for C_{alt} lik 1,01. Det er antatt at ugunstigste vindretning er fra sør-øst og retningsfaktoren er blitt satt til 1 etter tabell NA.4(901.4) i Norsk Standard for vindlaster.

Resultatene for beregning av signifikant bølgehøyde, vindoppstuvning og bølgeopp skyling er vist i Tabell 16.

Tabell 16. Resultat fra bølgeberegninger på Muravassdammen

Dimensjonerende vindstyrke			
- 50 års intervall	U	30,70	m/s
- 1000 års intervall	U	35,61	m/s
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hd	1,02	m
- vind: 50 års intervall	Hd	1,05	m
- vind: 1000 års intervall	Hd	1,29	m
Vindoppstuvning			
- vind: 30 m/s	Su	0,01	m
- vind: 50 års intervall	Su	0,01	m
- vind: 1000 års intervall	Su	0,01	m
Bølgeopp skyling			
- vind: 30 m/s	Ru	2,07	m
- vind: 50 års intervall	Ru	2,13	m
- vind: 1000 års intervall	Ru	2,61	m

Det er beregnet strøk og signifikant bølgehøyde på tre andre metoder enn den som er beskrevet i NVEs retningslinjer. Disse metodene er beskrevet i kapittel 3.5. I den britiske metoden er justering for vindhastighet over vann satt til 1,19, og det er brukt bøyd strøk som vist i Figur 54. Det er brukt bøyd strøk da det i den britiske metoden kan antas at vinden «følger» dalen som magasinet ligger i, og Muravassdammen har et magasin hvor det er stor sannsynlighet for at denne effekten eksisterer.



Figur 54. Store Muravatn med bøyd strøk

I VHL sin metode er antatt bredde satt lik 600 m og faktoren hentet fra grafen satt til 0,55,

Resultatet fra de forskjellige metodene er vist i Tabell 17. Her er det tatt med verdier etter britiske retningslinjer, og med justering for høyde over havet, C_{alt} , etter Norsk standard for vindlaster.

Tabell 17. Resultat fra ulike metoder på Muravassdammen

	Fe [km]	Hs [m]-returperiode på 1000 år	Hs [m] 30 m/s
Norge	0,88	1,29	1,02
Saville	1,12	1,13	0,93
UK guidelines	3,51	2,30	1,01
UK guidelines - justert C_{alt}	3,51	1,22	1,01
VHL	2,85	1,09	0,91

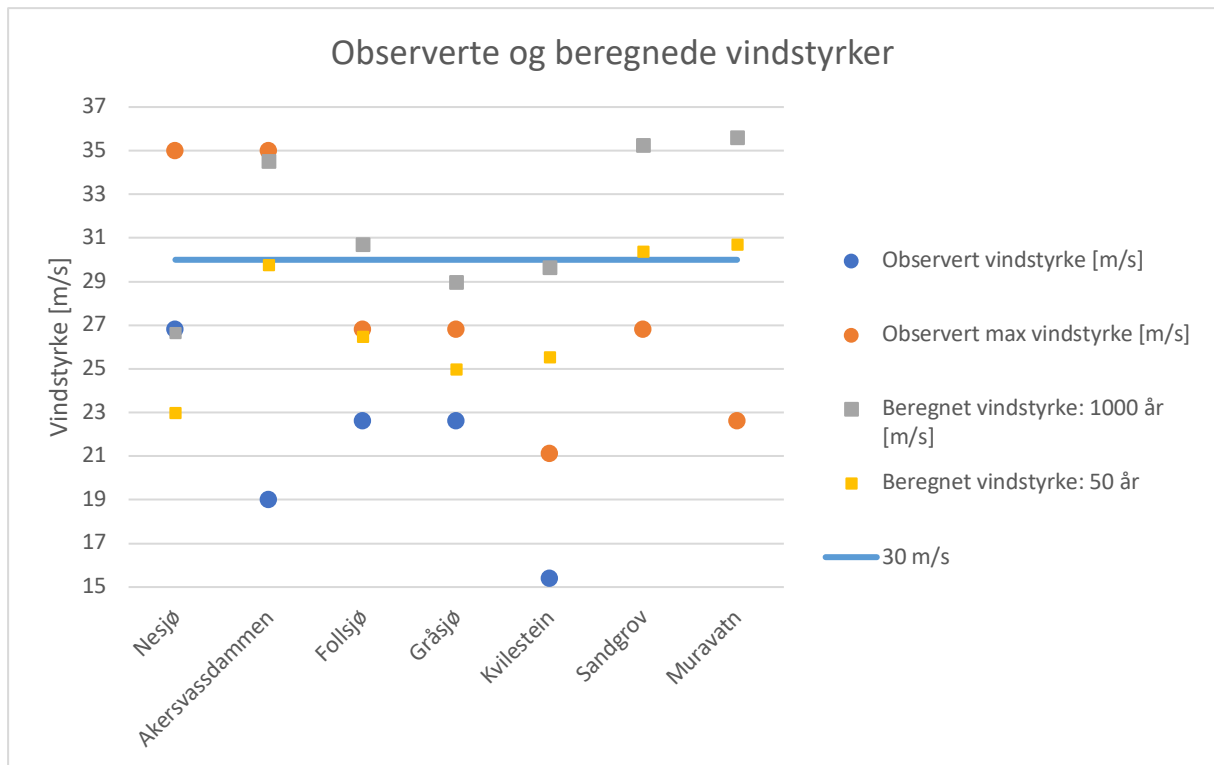
5.3 Sammenligning av observert og beregnet vindstyrke

Informasjon om observerte vindstyrker ved dammene er beskrevet i kapittel 4. Det er store usikkerheter knyttet til disse observasjonene da de er målt relativt langt fra selve dammen. Det er også hentet informasjon om den maksimale vindstyrken fra disse målestasjonene. De observerte vindstyrkene er sammenlignet med de beregnede vindstyrkene i Figur 55. Med observerte vindstyrker i denne grafen menes det de verdier som var observerte på tidspunktet

da bølgeskadene skjedde. Med observert max. vindstyrke menes det den maksimale vindstyrken som den aktuelle målestasjonen har registrert. Verdier for vindstyrke og plassering er hentet fra <https://klimaservicesenter.no/observations/>. Ved Follsjø og Gråsjø endret de stasjon fra Berkåk til Berkåk II i 1967, men plasseringen er den samme. To av dammene, Sandgrovvassdammen og Muravassdammen, har ikke beskrevet under hvilket tidsrom skadene oppsto og det er derfor ikke inkludert verdier for dette.

Verdiene og målestasjonene bruk for hver enkelt dam er:

- Nesjø
 - o Vennafjell – 16.11.1978 – 35 m/s
 - o Vennafjell – 15.10.1976 – 26,8 m/s
- Akersvassdammen
 - o Vardefjell – 31.12.1972 – 35 m/s
 - o Vardefjell – 21.10.1974 – 19 m/s
- Follsjø
 - o Berkåk – 11.01.1965 – 26,8 m/s
 - o Berkåk II – 24.01.1972 – 22,6 m/s
- Gråsjø
 - o Berkåk – 11.01.1965 – 26,8 m/s
 - o Berkåk II – 22.12.1975 – 22,6 m/s
- Kvilesteinsdammen
 - o Modalen II – 22.12.1988 – 21,1 m/s
 - o Modalen II – 16.10.1987 – 15,4 m/s
- Sandgrovvassdammen
 - o Aursjøen – 09.01.1975 – 26,8 m/s
- Muravassdammen
 - o Vangsnes – 29.01.1989 – 22,6 m/s

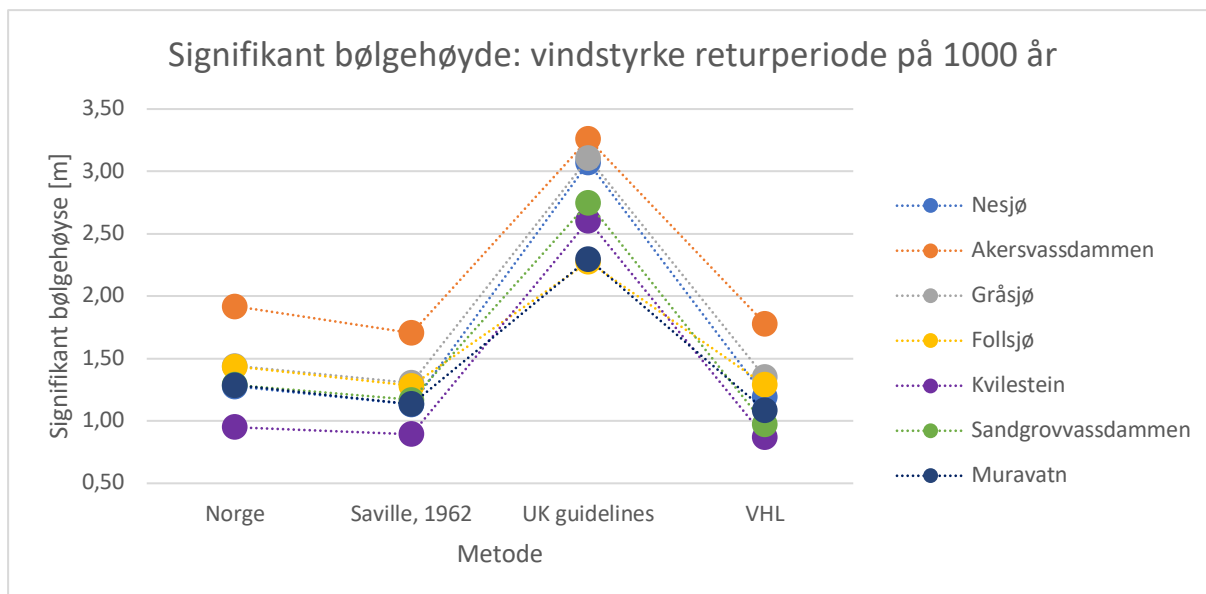


Figur 55. Observerte og beregnede vindstyrker

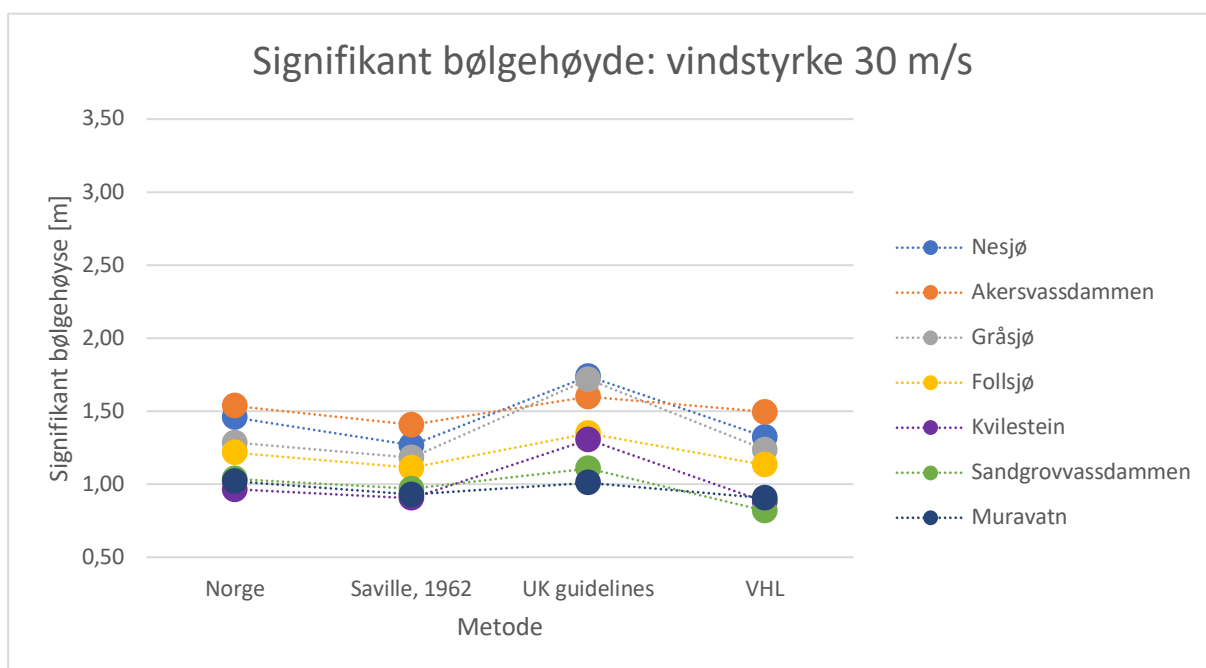
Nesjø og Muravassdammen har observerte vindstyrker høyere enn beregnet vindstyrke med returperiode på 1000 år. Målestasjonen til Nesjøen er plassert ca. 50 km bortenfor dammen, så denne verdien er veldig usikker. Dette indikerer at disse dammene kan ha vært underdimensjonerte i forhold til vindstyrken da skadene inntraff. Informasjonen fra Sintefrapporten tilsier at 6 av 10 dammer har hatt maksimal observert vind større enn 30 m/s. Dette indikerer at det å bruke 30 m/s som vindstyrke kan føre til urealistiske dimensjoneringskriterier, som enten er usikre eller for konservative.

5.4 Strøk og signifikant bølgehøyde ved ulike metoder

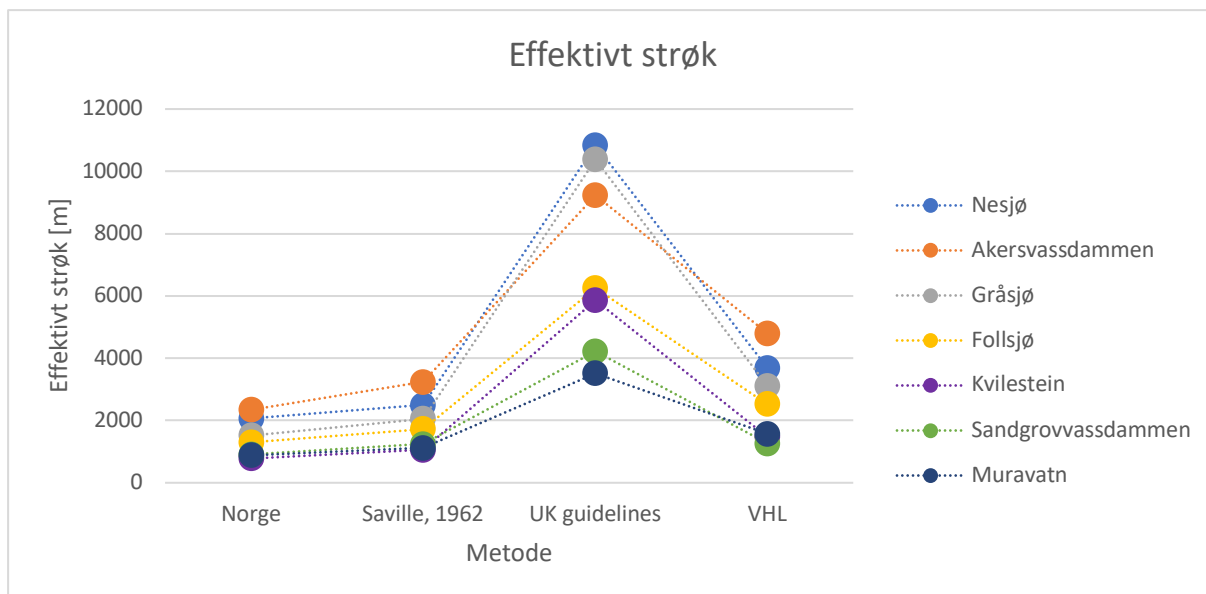
Resultatene fra de ulike metodene er vist i Figur 55 og Figur 56 for bølgehøyde, og Figur 57 for strøk. Det er brukt forskjellige verdier for vindstyrke i figurene. Det er både regnet ut signifikant bølgehøyde med en vindstyrke på 30 m/s, og en vindstyrke med returperiode på 1000 år regnet ut ifra Norsk Standard for vindlaster. Disse figurene viser at Saville sin metode gir lavest signifikant bølgehøyde, men ikke høyest verdi for effektivt strøk. De britiske metodene gir høyest verdi for signifikant bølgehøyde, og også høyest verdi for signifikant strøk.



Figur 56. Sammenligning av signifikant bølgehøyde fra vind med 1000 års returperiode

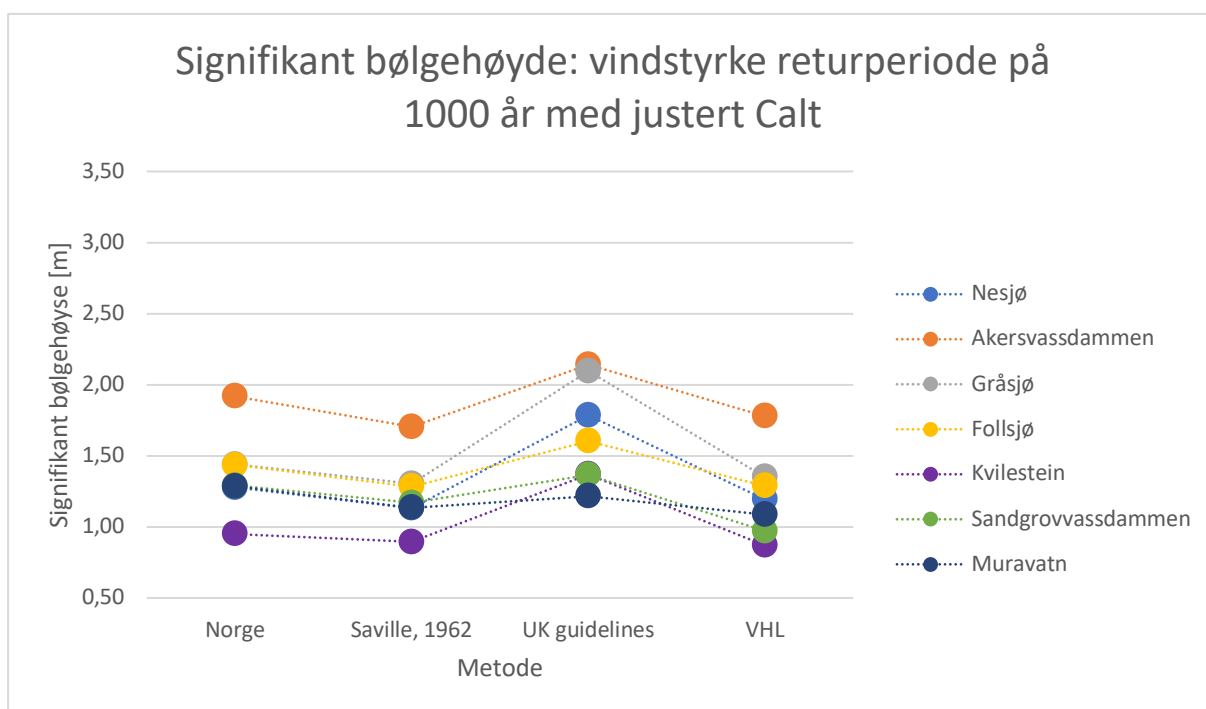


Figur 57. Sammenligning av signifikant bølgehøyde, 30 m/s



Figur 58. Sammenligning av effektivt strøk

Det vises at den britiske fremgangsmetoden gir veldig mye høyere verdier enn de andre metodene. Dette skyldes faktoren for justering for meter over havet. Referansehastigheten brukt i beregningene er gitt etter norske forhold, og det vil da bli et mer realistisk resultat ved å justere for høyde over havet på norsk måte. Dersom denne faktoren settes til Calt etter formel (4), og ikke ut fra formel (32) skiller ikke denne metoden seg like mye fra de andre. Dette er vist i Figur 59. Da referansehastigheten er gitt for hver kommune, er allerede noe av effekt av høyden over havet tatt med i denne verdien. Det gir derfor mer realistiske svar når det justeres etter Norsk Standard for vindlaster.

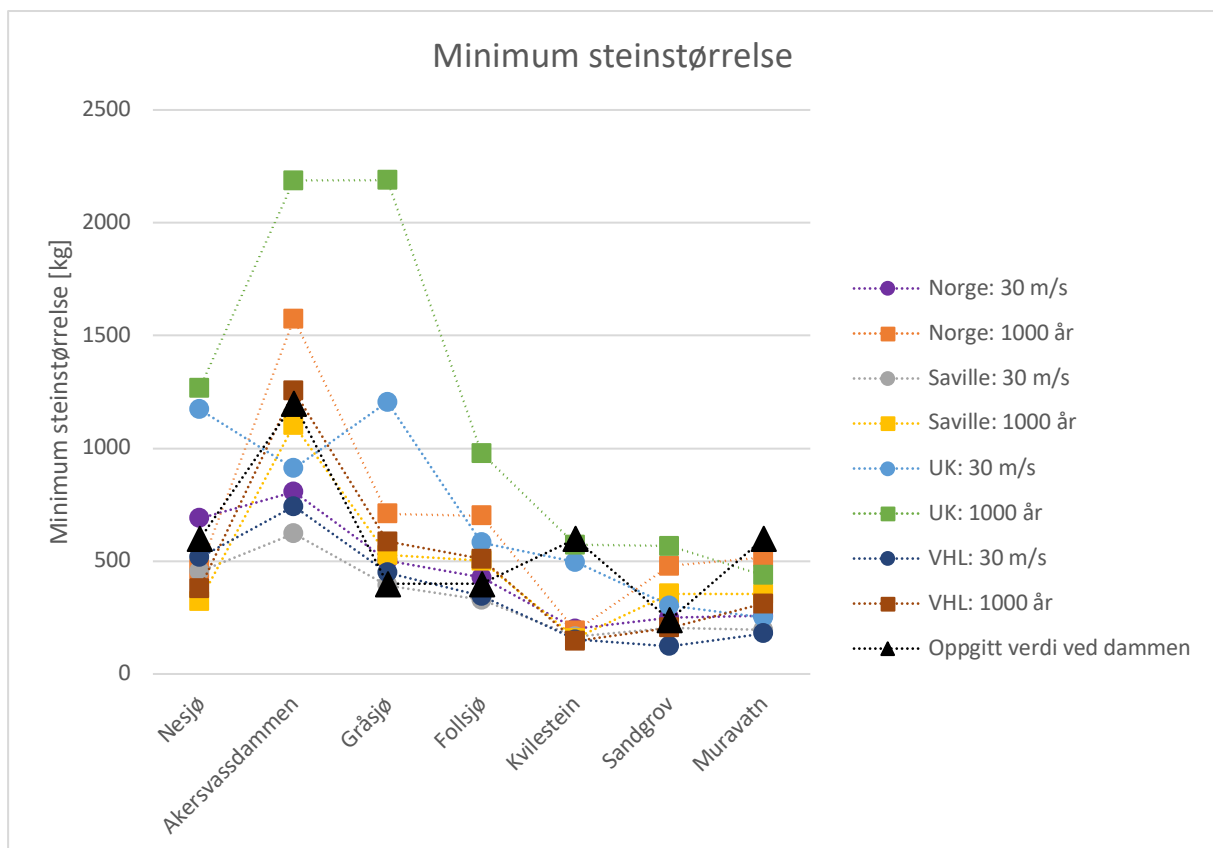


Figur 59. Sammenligning av signifikant bølgehøyde, 1000 år, med justert faktor for moh

5.5 Stein størrelser ved ulike metoder

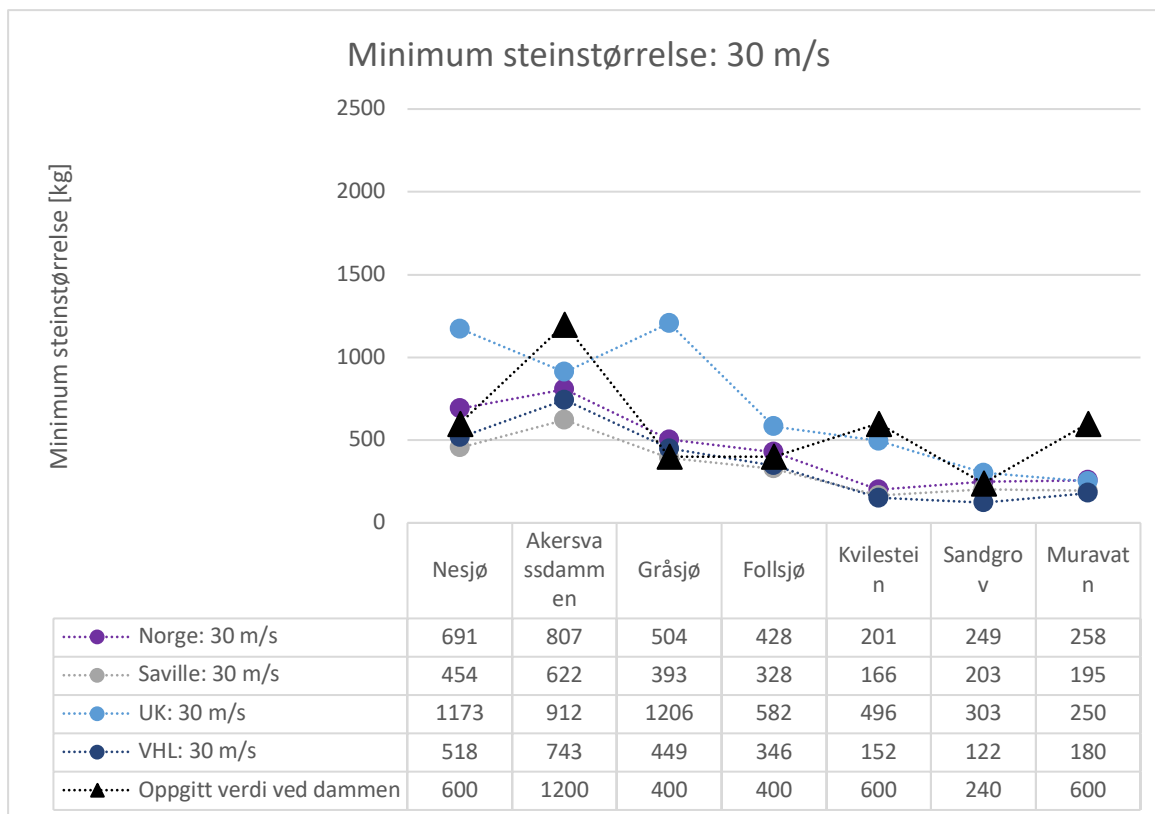
De ulike metodene for å beregne bølgehøyder gir også ulike verdier for minimum steinstørrelse. I kapittel 4.3.2 er det vist at 5 av dammene hadde mindre steinstørrelse enn det som er beregnet minimum steinstørrelse etter dagens retningslinjer. I disse retningslinjene dimensjoneres minste steinstørrelse fra signifikant bølgehøyde ved en vind på 30 m/s og ved en vind med returperiode på 1000 år. Vinden med returperiode på 1000 år er beregnet fra Norsk Standard for vindlaster for alle metodene bortsett fra den britiske. For den britiske metoden er det brukt tilhørende vindberegninger, og med norsk justering for høyde over havet. Det er derfor brukt disse vindstyrkene i beregningene for minimum steinstørrelse ved de ulike metodene. Resultatet er vist i Figur 60. Den verdien som er oppgitt ved dammen, er den verdien på tidspunktet da bølgeskadene oppsto.

Steinstørrelsen er her beregnet etter kapittel 3.4.5, der minimum steinstørrelse er gitt ved formel (20). Denne verdien er gitt i kN, og dette er blitt omgjort til kg ved å multiplisere verdien med en korreksjonsfaktor på 101,97.

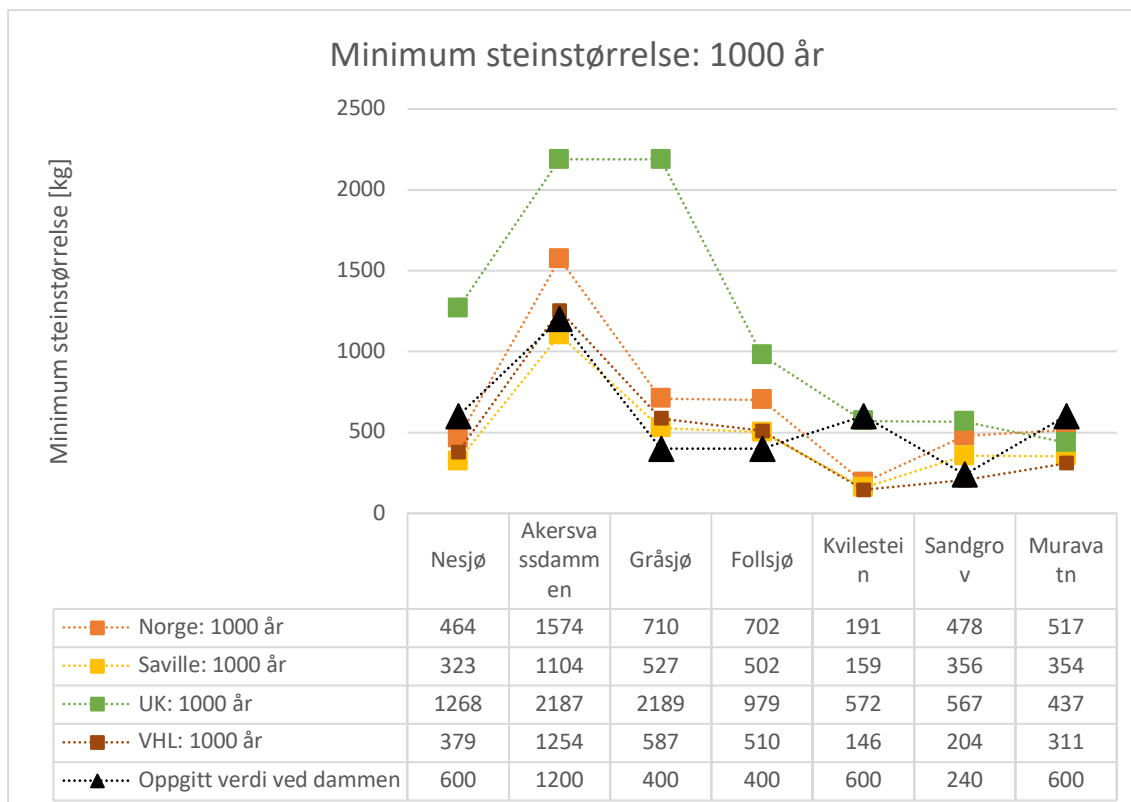


Figur 60. Minimum steinstørrelse med ulike beregningsmetoder, hvor den britiske metoden er justert for moh.

Det er store forskjeller på om steinstørrelsen er beregnet for 30 m/s, eller for en vind med returperiode på 1000 år. Disse to verdiene er derfor sammenlignet hver for seg, vist i Figur 61 og Figur 62.



Figur 61. Sammenligning av steinstørrelse beregnet med vind på 30 m/s og oppgitt steinstørrelse.



Figur 62. Sammenligning av steinstørrelse beregnet med vind med returperiode på 1000 år og oppgitt steinstørrelse.

5.6 Oppsummering

Den viktigste informasjonen en kan hente ut fra beregningene er:

- Nesjøen og Akersvassdammen har observert vindstyrker kraftigere enn både 30 m/s og dimensjonerende vindstyrke med returperiode på 1000 år. De resterende dammene har ikke det.
- Nesjøen og Akersvassdammen har hatt observert vindstyrker på over 30 m/s, og rapporten til Sintef og NTNU (Sintef, 2000) viser at 6 av 10 dammer har hatt observert vindstyrke på over 30 m/s. Dette kan vise til at 30 m/s ikke er et bra alternativ til å beregne vind med 1000 års returperiode for hver enkelt dam.
- Det kan være stor forskjell på beregningene når en bruker dimensjonerende vindstyrke på 30 m/s, eller med 1000 års gjentakintervall.
- Forskjellige metoder gir svært forskjellige resultat, og det finnes ikke observasjoner som kan bekrefte hvilke metoder som gir best resultat til norske forhold
- Kvilesteinsdammen har oppgitt minimum steinstørrelse mye høyere enn krav fra samtlige metoder
- Den britiske metoden er den metoden som gir høyeste verdier for effektivt strøk, bølgehøyde og minimum steinstørrelse.
- Det gir generelt høyere verdier for minimum steinstørrelse om en bruker vindstyrke med 1000 års returperiode enn med 30 m/s. Unntaket for dette er Nesjøen, der kun den britiske måten med 1000 års vind gir høyest verdi.

6 Konklusjoner og videre arbeid

Dette kapitlet inneholder analyse og konklusjoner av litteraturstudiene, spørreundersøkelsen, og beregningene utført i oppgaven, diskusjon rundt resultatene, samt videre arbeid med temaet.

6.1 Innledning

Formålet med denne oppgaven er å få mer kunnskap om miljølaster på norske fyllingsdammer og hvorvidt slike laster påvirker drift av dammene, for eksempel ved rehabiliteringstiltak, og/eller damsikkerheten, samt om dagens dimensjoneringskrav er tilstrekkelige for å bevare sikkerheten.

Denne oppgaven har samlet og analysert informasjon fra litteraturstudier, spørreundersøkelser, informasjon fra dameiere og beregninger, men det er fortsatt mye informasjon å hente om vindgenererte bølger, minimum steinstørrelse og bølgeskader på oppstrøms skråningsvern.

6.2 Spørsmål besvart i oppgaven

I innledningen er det beskrevet 6 spørsmål som er forsøkt besvart i oppgaven, disse kan beskrives som:

- Under hvilke forhold er det bølgeskader på fyllingsdammer oppstår?
 - o Bølgeskadene kan oppstå på fyllingsdammer ved ekstremvær, men også ved vanlige vindforhold dersom skråningsvernet er dårlig utformet. Ved dårlig utformet skråningsvern menes det for liten steinstørrelse, dårlig eller mangel på overgang mellom plastring og underliggende materiale, mangel på fundamentering av plastringen eller dårlig lagt plastringsstein.
- Hva er omfanget av de observerte bølgeskadene?
 - o De fleste bølgeskadene viser seg som erosjonsgroper og «strandlinjer» i området rundt HRV og utvasking av underliggende materialer, men det er også beskrevet utrasing av fundamentet til plastringen der den er utført på rauset steinfylling.
- Påvirker erosjonsskader fra miljølaster damsikkerheten?
 - o Erosjonsskader på oppstrøms plastring kan føre til dambrudd, og påvirker derfor damsikkerheten. I tilfellene beskrevet i oppgaven er skadene blitt oppdaget og reparert før de har ført til potensielt dambrudd. Risikoanalyse kan være et godt verktøy til å bestemme hvor farlig slike erosjonsskader er for hver enkelt dam.

- Hvor godt samsvarer de beregnede verdiene for vind- og bølgeforhold med de observerte forholdene?
 - o De beregnede vindstyrkene etter Norsk Standard for vindlaster samsvarer bedre med de observerte vindstyrkene, enn verdien på 30 m/s. Det er ikke observert bølgehøyder ved dammene.
- Hvilken steinstørrelse var det på dammene da skadene oppsto, i forhold til dagens retningslinjer?
 - o Steinstørrelsen var mindre enn dagens beregnede minimumsverdi da bølgeskadene oppsto på flere, men ikke alle, dammene.
- Hvilken effekt har ulike metoder for bølgeberegninger?
 - o De ulike metodene gir ulike verdier for vindstyrke, bølgehøyder og steinstørrelser, men de observerte verdiene funnet i denne oppgaven er ikke gode nok til å kunne vurdere hvilke metoder som best passer til norske forhold

6.3 Konklusjoner

De fleste bølgeskadene har opptrådd rundt HRV-beltet i form av erosjonsgroper eller «strandlinje». Dette kan indikere at bølgeskadene har skjedd på tidspunkt der vannstanden har ligget på HRV, eller at det har vært mangelfull overgang mellom plastring og underliggende masser på grunn av plassmangel.

Det er sammenlignet ulike måter å beregne vind, bølger og steinstørrelse. De ulike metodene gir svært ulike svar, men det kommer ikke frem av informasjonen samlet i oppgaven hvilken metode som passer best til norske forhold. Det kan vises til at det å beregne vindstyrke etter Norsk Standard for vindlaster for hver enkelt dam, kan passe bedre til de virkelige verdiene enn å bruke vindstyrke på 30 m/s. Da 30 m/s kan føre til for konservative, eller ikke tilstrekkelige, resultat.

Det er sammenlignet minimum steinstørrelse i plastringen og dammene har hatt varierende skråningsvern, enten rauset eller ordnet stein. De dammene med ordnet steinskråning der det har blitt beregnet minimum steinstørrelse har alle bortsett fra to dammer hatt minimum steinstørrelse mindre enn dagens krav. Det betyr ikke at dette er grunnen til at det oppsto bølgeskader, men kan vise til at dette er en potensiell mulighet.

6.4 Diskusjon

Informasjonen i denne oppgaven baserer seg på dammene som var med i spørreundersøkelsen og informasjonen som har vært mulig å få ut av undersøkelsen og andre dokumenter har vært begrenset, og basert seg på et for lite utvalg dammer. Derfor er ikke kartleggingen gjort i denne undersøkelsen representativ for dagens situasjon i Norge.

Bølgeskadene ved disse dammene er alle fra før 1990, og fulgte ikke kravene i dagens damsikkerhetsforskrift (2009). Det er derfor vanskelig å vite om disse skadene ville oppstått dersom dammen var utført etter dagens retningslinjer. Det kan derimot vise at de gamle kravene ikke var gode nok for å bevare tilstrekkelig sikkerhet.

Kartleggingen og beregningene gjort i denne oppgaven har store usikkerheter da det er et lite utvalg og vil derfor ikke kunne gi sikre resultater, heller en idé på hva som kan utforskes videre. Spørreskjemaet burde ha vært sendt ut til flere og kunne da ha oppnådd sikrere resultater.

Det er fokusert på kvantitative verdier som strøk, vindstyrke og steinstørrelse, men sikkerheten til en plastring er avhengig av flere faktorer enn dette. Viktige faktorer er blant annet utførelse, steinform og steinkvalitet. I denne sammenligningen er det ikke tatt hensyn til hvordan forholdene bak plastringen er, da informasjonen det var mulig å hente om dette kun besto av hvor steinen var hentet, og ikke spesifikke størrelser. Dette kan være viktig med tanke på skadene, og hvordan de oppsto. Det er flere av dammene der skaden har vært utvasking av finstoff gjennom plastringen, og dette er ikke påvirket av minimum steinstørrelse, men heller hvordan plastringen er utformet og gradering av massen.

Det finnes lite informasjon tilgjengelig angående observerte bølgeskader på fyllingsdammer i Norge. Metodene som blir brukt i dag er ikke endret fra metodene som baserer seg på kanadiske magasin. Det kan derfor være til god hjelp å bruke risikoanalyser når man skal vurdere rehabiliteringstiltak. Ved å utføre en risikoanalyse får en mer kunnskap om dammen og hvilke usikkerheter som inkluderes i utformingskravene. En risikoanalyse kan også ta hensyn til tid, og hvor sannsynlig det er at en initial skade oppdages før den får tid til å utvikle seg til å bli farlig. Dette er noe som er forskjellig fra dam til dam og det er derfor vanskelig å inkludere i standard deterministiske utformingskrav. Dersom en ser på hendelsestreet i Figur 3 kan en se ulike trinn som må til for at en dam skal gå til brudd ved erosjonsskader fra miljølaster. Det er ingen av dammene i denne oppgaven som har kommet til det trinnet i dette hendelsestreet hvor kronevernet begynner å sige. Det har derfor aldri vært en reell fare for dambrudd i disse tilfellene, da bølgeskaden har blitt oppdaget og reparert før det har ført til en potensiell farlig situasjon.

6.5 Videre arbeid

Det er veldig lite dokumentert informasjon om faktiske bølgeforhold ved norske fyllingsdammer i Norge. Dersom en skal oppnå sikre resultater er det nødvendig med god informasjon fra norske forhold. Dette kan innhentes ved å gjøre en større kartlegging av norske fyllingsdammer og ved å dokumentere vind og bølgeforhold. Ut ifra denne informasjonen kan en bedre bestemme hvilke metoder som gir de mest realistiske resultatene. Det bør derfor måles vindforhold ved flere norske dammer for å best kunne beregne riktig vind, dette kan gjøres ved å plassere vindmålere ved dammene over lengre tid. Det kan også observeres hvilke bølgeforhold det er ved dammen og hvordan ulike bølger fungerer på plastringen.

Det kan være vanskelig å observere hvordan bølger fungerer på dammen i virkelighet, da det er sjeldent ekstreme vind og bølgeforhold oppstår. Det kan derfor gjøres modellforsøk for å undersøke hvordan bølger påvirker plastringen. Årsakene til de ulike skadene har vært varierende og inkludert blant annet utvasking av finstoff, frostsprengning av stein eller stein som er blitt erodert/flyttet. Det bør derfor vurderes forsøk som inkluderer flere parametere enn kun minimum steinstørrelse.

Energi Norge avsluttet i 2017 et forskingsprosjekt «*Plastring for fyllingsdammer*» som fokuserte på stabiliteten til plastring på nedstrøms skråningsvern. I sammenheng med dette prosjektet ble det utført forsøk i Vassdragslabben på nedstrøms skråning, og erfaring fra dette kan brukes til å planlegge hvordan en kan utføre forsøk for oppstrøms plastring.

Referanser

- BoR, & USACE. (2019). *Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis*. Denver, Colorado: U.S Department of the Interior Bureau of Reclamation, U.S Army Corps of Engineers.
- Hartford, D. N. D., & Baecher, G. B. (2004). *Risk and Uncertainty in Dam Safety*. London: Thomas Telford Ltd.
- Herbert, D. M., Lovenbury, H. T., Allsop, N. W. H., & Reader, R. A. (1995). *Performance of blockwork and slabbing protection for dam faces*. (Mai 1995).
- Hoff, T. (1978). *Skader på fyllingsdammer*. Seminar på Gol. 10.02.1978
- Hoff, T. (1994). *Hovuddam Muravatn-Statusrapport*.
- Hoff, T. (1996). *Kvilesteinsdammane-Statusrapport*.
- Hyllestad, E. (2007). EBLs vårmøte. *Retningslinjer for fyllingsdammer*. Hentet 12.12.2019, Fra NVEs nettsider: <https://docplayer.me/49178300-Norges-vassdrags-ogenergidirektorat-ebls-varmote-retningslinjer-for-fyllingsdammer-egil-hyllestad.html>
- Institution of civil engineers. (2015). *Floods and Reservoir Safety, 4th edition*.
- Lacasse, S. (2017). *Risikoanalyse - metodikk. Damsikkerhet i et Helhetlig Perspektiv*. NGI & Energi Norge.
- Multiconsult. (2019). *Risikovurdering av avvikende oppstrøms skråning*. (Presentasjon på fagdag fyllingsdammer, 23.03.2019)
- NGI. (1970). *Gråsjø dam Sluttrapport geoteknisk kontrollarbeid*.
- NGI. (1977). *Bølgeskader Nesjø*. Befaringsrapport
- NGI. (1993). *Fyllingsdammer*. ISBN 82 546 0104 6
- NGI (2016). *Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv: "state-of-the-art" om risikovurderinger for dammer sett i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv*. NGI rapport til Energi Norge. Rapportnr. 2015 0624-01-R. Datert 2016-07-01
- NGI (2016). *Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Risikovurdering for Dam Dravladalen*. NGI rapport til Energi Norge. Rapportnr 2015 0624-01-R-01. Datert 2016-11-01
- NGI & Energi Norge. (2015). Teknisk notat: *Anvendelse av risikovurdering i norsk damsikkerhetsarbeid*. Rapportnr. 2015 0624-01-TN.
- Norconsult AS. (2011). *Kvilesteinsdammane - Revurdering 2011 - Utdrag*.
- Norconsult AS. (2014). *NVEs virksomhet for tilsyn med dammer Evaluering av tilsynet Vurderinger og anbefalinger*.

- Norges geotekniske institutt. (1983). *Veiledning nr. 2, Fyllingsdammer*. Oslo: NGI.
- Novak, P., Moffat, I., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2015). *Hydraulic structures. 4th edition*. I Hydraulic Structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- NVE. (2003). *Retningslinje for laster og dimensjonering*. Oslo: NVE
- NVE. (2009). *Retningslinjer for dambruddsbølgeberegninger*. Oslo: NVE
- NVE. (2012). *Veileder for fyllingsdammer*. Oslo: NVE
- NVE. (2017). *Rapporterte hendelser og ulykker på vassdragsanlegg 2016*.
- NVE. (2018). *Rapporterte hendelser og ulykker på vassdragsanlegg 2017*.
- NVE. (2019). *Melding om ulykker og uønskede hendelser 2018*.
- NVE. (2020). *Melding om ulykker og uønskede hendelser 2019*.
- Olje- og energidepartementet. *Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften)*. (2009). Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-12-18-1600>
- Rattue, A. (2013). *Slope protection with consideration for ice effects*. SNC-lavalin, rapport nr. 505573-3006-40ER-0102
- Saville, T. J., McGlendon, E. W., & Cochran, A. L. (1962). *Freeboard allowances for waves in inland reservoirs*. Journal of the Waterways and Harbors Division, pp. 93–124.
- Schüttrumpf, H., van der Meer, J., Kortenhaus, A., Bruce, T., & Franco, L. (2017). *Wave-runup and wave overtopping at armored rubble slopes and mounds*. Fra Handbook of Coastal and Ocean Engineering: Expanded Edition, 1–2. Singapore: World Scientific. Publishing Co. Pte. Ltd.
- Sintef. (2000). *Spørreundersøkelse vedrørende tilstanden til norske betongdammer, Fyllingsdammer og kraftverk*.
- Skoglund, Morten. (2018). *Vannkraftverk og vassdragsteknikk. Fyllingsdammer*. Presentasjon
- Société d'énergie de la Baie James. (1997). *Practical guide. Riprap Sizing*. (Juni).
- Standard Norge (2009) NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009. *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=392208>
- Statkraft. (1996). *Statusrapport Sandgrovdammen*.
- Statkraft. (1997). *Statusrapport Follsjø*.

Strømme, N. Geografiske institutt/Berdal. (1997). *Sikkerhet ved fyllingsdammer. Skademekanismer. Undersøkelser og utbedringer*. EnFo rapport 192_1997

Trondheims Elektrisitetsverk. (1969). *Rapportsammendrag fra Nesjø dam byggesesongen 1968*.

U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation. (2012). *Chapter 7: Riprap Slope Protection*. Design Standards No. 13: Embankment Dams, 4(13). The Bureau of Reclamation

Vedlegg

Vedlegg 1: Svar fra spørreskjema

Vedlegg 2: Excelark med bølgeberegninger fra Dam Nesjø

Vedlegg 3: Excelark med bølgeberegninger fra Akersvassdammen

Vedlegg 4: Excelark med bølgeberegninger fra Dam Follsjø

Vedlegg 5: Excelark med bølgeberegninger fra Dam Gråsjø

Vedlegg 6: Excelark med bølgeberegninger fra Kvilesteinsdammen

Vedlegg 7: Excelark med bølgeberegninger fra Sandgrovvassdammen

Vedlegg 8: Excelark med bølgeberegninger fra Muravassdammen

Vedlegg 9: Hendelsestre fra Dam Båtsvatn

Vedlegg 1: Svar fra spørreskjema

Utfylt av VTA		Dam 1
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	16 m
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	HRV	315,0 moh
	LRV	305 moh
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1,5:1
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	Samfengt sprengstein D < 600 mm
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	Ikke i henhold til tegninger
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	Skråningsvern: 2 lag av stein, 500 < 1000 mm lagt i forband.
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	Det er ikke registrert skader på oppstrøms plastring etter at hele oppstrøms damside ble plastret om ca. 1988-90
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	Ref. NGI
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	
	a) Vindforhold	ukjent
	b) Vindstyrke	ukjent
	c) Vindretning	ukjent
	d) Dato	ukjent
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	Ukjent
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	Nei
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	Ja

Utfylt av VTA		Dam 2
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	40 m
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	HRV	978,0
	LRV	950,0
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1:2 frå kote 949 til 970, 1:1.6 over dette
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	Sprengstein
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	Nei
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	$d_{50} \approx 0.9$ m
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	Ja. Utbeta i 1974 og 1987 pga. skader frå bølger og is. I tillegg er det i åras løp, fram til nyleg ombygging, fylt i betong for stabilisering.
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	Fleire områder på oppstrøms side. Utrasing/erosjon.
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	
	a) Vindforhold	Ukjent
	b) Vindstyrke	Ukjent
	c) Vindretning	Ukjent
	d) Dato	Ukjent
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	Ukjent
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	Ukjent
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	nei

Utfylt av VTA		Dam 3
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	HRV	
	LRV	
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1 : 1,6 = 32,0 °
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	Samfengt sprengstein av fyllitt
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	Ja. Samfengt sprengstein fråsortert egna plastringsstein
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	Utsortert grovfraksjonert sprengstein. $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 1,0 \text{ m}^3$
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	Noko forvitra plastringsstein.
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	Jamnt fordelt over heile dammen både oppstrøms og nedstrøms.
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	
	a) Vindforhold	
	b) Vindstyrke	
	c) Vindretning	
	d) Dato	
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	Ikkje vindmålar
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	I revurderinga av dammen er det berekna ei bølgeoppskylning (R_u) = 1,55 m. Vindoppstuinga (S_u) er berekna til 0,13 m.
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	Ja, finnes rapport fra 1996

Utfylt av VTA		Dam 4
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	HRV	
	LRV	
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1 : 1,47 = 34,2 °
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	Sprengstein av gneis med god kvalitet og lite subbus.
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	Ja. Samfengt sprengstein fråsortert egna plastringsstein
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	To lag plastring der ytre lag er minst 0,2 m ³ . Over ca. kt. 1053,5 er kronevernet i to lag der ytre lag er minst 1,0 m ³ .
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	Få og ingen skader på plastring frå 1996.
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	
	a) Vindforhold	
	b) Vindstyrke	
	c) Vindretning	
	d) Dato	
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	Ikkje vindmålar
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	I revurderinga av dammen er det berekna ei bølgeoppskylning (R_u) = 2,68 m. Vindoppstuvinga (S_u) er berekna til 0,01 m.
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	Ja, det finnes rapport fra 1994

Utfylt av VTA		Dam 5
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	39 m
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	a) HRV	729 (lokal høyde), 732,78 (NN2000)
	b) LRV	706 (lokal høyde), 709,78 (NN2000)
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1 : 1,5
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	Sprengstein
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	Nei
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	Under HRV - 3 m: > 0,25 m ³ . Over HRV - 3 m: Pel 0-600; >0,25 m ³ , Pel 600-1050; >0,50 m ³ Under LRV - 1 m: Sprengstein
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	1976: Deler av plastring påført skade på søndre halvpart av dammen over ca. kt. 726. Se vedlagte rapporter I dag: Kun mindre skader observert, enkelte steiner er flyttet på av snø/is i plastringa
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	Se punktet over
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	
	e) Vindforhold	Vedvarende vind over flere dager
	f) Vindstyrke	Opp mot 25 m/s
	g) Vindretning	Øst
	h) Dato	Okt. -76
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	Det finnes værstasjon med vindmåler ved Singerhytta, ca 200 meter nord for dammen. Vet ikke hvordan de målte vindstyrken i 1976.
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	Dammen fikk erosjonskader i frontplastring på søndre halvpart pel 0-60 etter uvær oktober 1976 - over KT 726.00. Reparasjon utført i 1977. Året etter ble det gjort utbedringer på 5 mindre sår mellom pel 60-90 - og i 1994 ble samme utbedring som 0-60 gjort mellom pel 60-90 og KT 726 - damtopp.
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	Ja

Utfylt av VTA		Dam 6
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	19
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	HRV	769 (lokal høyde)
	LRV	758 (lokal høyde)
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1 : 1,5
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	Sprengstein
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	Ja, men kun for kronevern (over HRV). Denne sonen består av mindre stein: $d_{min} > D_{maks}/4$
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	Under HRV: $> 0,25 \text{ m}^3$ (volum) Over HRV (kronevern): $> 0,9 \text{ m}$ (diameter)
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	Ja det er skader på oppstrøms side, disse går for det meste ut på at steiner fra plastring/røysfylling er flyttet ut fra opprinnelig plassering av snø/is/bølger. Mange har i tillegg feil helning ifht dagens krav og praksis
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	Fra HRV og nedover, ellers beskrevet over.
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	Finnes ikke detaljert beskrivelse av dette - utvikling over tid
	a) Vindforhold	
	b) Vindstyrke	
	c) Vindretning	Vest - Nordvest
	d) Dato	
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	Det er ikke etablert værstasjon med vindmåler i nærheten - kun temperatur
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	nei
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	Tilsyn sjekklister beskriver noe

Utfylt av fra rapporter og notater		Dam 7
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	17
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	HRV	557
	LRV	532,6
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1:1,5
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	tunnellstein
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	grus/tunellstein
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	Bruddstein,
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	Ja, utvasking gjennom hulrom mellom steiner i skråningen. Langs hele øverste del av dammen.
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	øverste del av dammen
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	ukjent
	a) Vindforhold	
	b) Vindstyrke	
	c) Vindretning	
	d) Dato	
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	ukjent
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	ukjent
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	To rapporter med mye informasjon om rehabiliteringsarbeidet, men ikke skadene

Utfylt av fra rapporter og notater		Dam 8
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	73
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	HRV	420
	LRV	375
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1:1,5
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	400kg, eller 0,2 kubikk
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	Ja, groper og "raskjegler" på mindre enn 1 meter
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	Ligger i HRV-beltet
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	Kan kanskje finnes ved å spørre hydrologen, men må da finne dato
	a) Vindforhold	
	b) Vindstyrke	
	c) Vindretning	
	d) Dato	
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	Ja, vedlagt i mailen

Utfylt av fra rapporter og notater		Dam 9
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	69 m
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	HRV	483
	LRV	
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1:1,5
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	400kg, eller 0,5 kubikk
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	Ja, oppdaget sommer 1969
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	
	a) Vindforhold	
	b) Vindstyrke	
	c) Vindretning	
	d) Dato	
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	Ja, vedlagt i mail

Utfylt av fra rapporter og notater		Dam 10
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	12
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	HRV	1090,6
	LRV	
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1:1,6
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	tunellstein
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	240kg, 0,1 kubikk
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	etter to år var mye av de underliggende massene rast ut og plastringsteinene sto fast pga nabosteinene. Etter tre år raste hele bølgevernet sammen
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	
	a) Vindforhold	
	b) Vindstyrke	
	c) Vindretning	
	d) Dato	
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	Ja, i mail

Utfylt av fra rapporter og notater		Dam 11
Informasjon om dammen		Svar
1.1.	Hvor høy er dammen?	53
1.2.	Hva er HRV og LRV?	
	HRV	523 moh
	LRV	
1.3.	Hva er helningen på oppstrøms skråning (V:H)?	1:1,6
1.4.	Hva er støttefyllingen laget av?	
1.5.	Er det overgangssone (mellom støttefylling og oppstrøms plastring), hvilke materialer er denne laget av?	
1.6.	Hvilke steinstørrelser er brukt i oppstrøms plastring?	større en 0,5 kubikk.
Informasjon om skader		
2.1.	Er det observert skader på oppstrøms side av dammen, og hva er omfanget av disse?	Ja, utrasninger og erosjon
2.2.	Hvor på dammen ble disse observert, og hvordan opptrådte de?	fra krone og til under HRV
2.3.	Ved hvilke vindforhold, vindstyrke og retning, ble disse skadene utviklet?	ikke spesielt sterk vind
	a) Vindforhold	
	b) Vindstyrke	
	c) Vindretning	
	d) Dato	
2.4.	Hvor ligger vindmåleren som målte verdiene?	
2.5.	Er det registrert noe annen informasjon om bølger, eller bølgeskader ved dammen?	
2.6.	Finnes det en rapport, notat, bilder eller annen informasjon om skadene?	ja, i mail

Vedlegg 2: Excelark med bølgeberegninger fra Dam Nesjø

Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Dimensjonerende vindhastighet - 50 år	U	km/h	82,70
Dimensjonerende vindhastighet - 1000 år	U	km/h	95,93
Dimensjonerende vindhastighet - 30m/s	U	km/h	105,79
Effektivt strøk	Fe	km	2,07
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	m	1,46
- vind: 50 års intervall	Hs	m	1,04
- vind: 1000 års intervall	Hs	m	1,28
Dimensjonerende bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hd	m	1,89
- vind: 50 års intervall	Hd	m	1,36
- vind: 1000 års intervall	Hd	m	1,66
Tid for utvikling av stasjonær bølgetilstand			
- vind: 30m/s	t	h	0,24
- vind: 50 års intervall	t	h	0,28
- vind: 1000 års intervall	t	h	0,26
Strøk for vindoppstuving	F	km	10,84
Gj.snitt dybde langs strøk v/HRV	d	m	11,00
Vindoppstuving			
- vind: 30 m/s	Su	m	0,18
- vind: 50 års intervall	Su	m	0,11
- vind: 1000 års intervall	Su	m	0,15
Vannsidens horisontalkomponent	n	-	1,60
Korreksjonsfaktor	C	-	1,00
Innfallsvinkel	beta	grader	87,00
Sinus innfallsvinkel	sin(beta)	-	1,00
Bølgeoppskylling			
- vind: 30 m/s	Ru	m	2,84
- vind: 50 års intervall	Ru	m	2,04
- vind: 1000 års intervall	Ru	m	2,49

Vindberegninger			
Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Referansehastighet	vb.0	m/s	25,000
Høyde over havet	H	m	720,000
Referanse høyde over havet	H0	m	900,000
Referanse maks. høyde over havet	Htopp	m	1500,000
Terskelnivå	v0	m/s	30,000
Nivåkorreksjon	Calt	-	1,000
basisvindhastighet	vb	m/s	20,000
ruhetslengde	z0	-	0,010
terrengruhetsfaktor	Kr	-	0,170
ruhetsfaktor	cr	-	1,173
Stedvindhastighet	vm	m/s	23,45268874
Direksjonsfaktor	Cdir	-	0,8

Strøkberegninger						
Strøk	km	Vinkel	grader	radianer	$R \cdot \cos^2(a)$	$\cos(a)$
Ugunstigste vindretning	10,843	a0	0	0	10,843	1
R1	5,688	a1	6	0,105	5,626	0,99
R2	1,61	a2	12	0,209	1,540	0,98
R3	1,238	a3	18	0,314	1,120	0,95
R4	1,118	a4	24	0,419	0,933	0,91
R5	0,877	a5	30	0,524	0,658	0,87
R6	0,743	a6	36	0,628	0,486	0,81
R7	0,604	a7	42	0,733	0,334	0,74
R8	0,561	a8	48	0,838	0,251	0,67
R9	0,543	a9	54	0,942	0,188	0,59
R10	0,575	a10	60	1,047	0,144	0,50
R11	0,639	a11	66	1,152	0,106	0,41
R12	0,52	a12	72	1,257	0,050	0,31
R13	0,522	a13	78	1,361	0,023	0,21
R14	0,499	a14	84	1,466	0,005	0,10
R15	0,489	a15	90	1,571	0,000	0,00
R16	5,096	a16	-6	-0,105	5,040	0,99
R17	4,04	a17	-12	-0,209	3,865	0,98
R18	2,596	a18	-18	-0,314	2,348	0,95
R19	2,088	a19	-24	-0,419	1,743	0,91
R20	2,058	a20	-30	-0,524	1,544	0,87
R21	1,383	a21	-36	-0,628	0,905	0,81
R22	1,271	a22	-42	-0,733	0,702	0,74
R23	0,906	a23	-48	-0,838	0,406	0,67
R24	0,693	a24	-54	-0,942	0,239	0,59
R25	0,643	a25	-60	-1,047	0,161	0,50
R26	0,647	a26	-66	-1,152	0,107	0,41
R27	0,576	a27	-72	-1,257	0,055	0,31
R28	0,554	a28	-78	-1,361	0,024	0,21
R29	0,493	a29	-84	-1,466	0,005	0,10
R30	0	a30	-90	-1,571	0,000	0,00
				sum	39,450	19,08
				Eff. Strøk	2,067	km

Ulike metoder			
Saville			
Effektivt strøk	Fe	m	2496,03
Strøk hatt, 1000 år	F [^]	m	34,48
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,13
Strøk hatt, 30 m/s	F [^]	m	28,35
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,27
Britiske retningslinjer			
Strøk	F	m	10843
Faktor for moh	fa	-	1,72
Faktor for hastighet over vann	fw	-	1,3
Retningsfaktor	fd	-	0,8
Dim. Vindhastighet, 1000 år	U	m/s	51,8752
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	3,070
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,739
Dim. Vindhastighet - 1000 år -justert Calt	U	m/s	30,160
Signifikant bølgehøyde - 1000 år - justert Calt	Hs	m	1,785
VHL			
Strøklengde	F	m	10843
Strøkbredde	B	m	1100
B/F			0,101
Faktor fra graf		-	0,34
Effektivt strøk	Fe	m	3686,62
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,194
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,324

Steinstørrelser			
Tyngdetetthet stein	yr	kN/m ³	24,00
Tyngdetetthet vann	yw	kN/m ³	10,00
stabilitetskonstant	K	-	2,50
Min. Steinstørrelse: 30 m/s	wmin	kN	6,77
Min. Steinstørrelse: 1000 år	wmin	kN	4,55
konstant for steinform	cf	-	0,60
min. Steindiameter, 30 år	Dmin	m	0,78
min. Steindiameter, 1000 år	Dmin	m	0,68
Saville			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	4,46
- min. Steindiameter, 1000 år	Wmin	kN	3,17
UK guidelines			
- min. Steindiameter, 30 år	Wmin	kN	11,50
- min. Steindiameter, 1000 år	Wmin	kN	63,26
- min. Steindiameter, 1000 år-justert	Wmin	kN	12,43
VHL			
- min. Steindiameter, 30 år	Wmin	kN	5,08
- min. Steindiameter, 1000 år	Wmin	kN	3,72

Vedlegg 3: Excelark med bølgeberegninger fra Akersvassdammen

Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Dimensjonerende vindhastighet, 50 år	U	km/h	107,16
Dimensjonerende vindhastighet, 1000 år	U	km/h	124,31
Dimensjonerende vindhastighet, 30m/S	U	km/h	105,45
Effektivt strøk	Fe	km	2,34
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	m	1,54
- vind: 50 års intervall	Hs	m	1,57
- vind: 1000 års intervall	Hs	m	1,92
Dimensjonerende bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hd	m	2,00
- vind: 50 års intervall	Hd	m	2,04
- vind: 1000 års intervall	Hd	m	2,49
Tid for utvikling av stasj. Bølgetilstand,			
- vind: 30m/s	t	h	0,26
- vind: 50 års intervall	t	h	0,26
- vind: 1000 års intervall	t	h	0,24
Strøk for vindoppstuving	F	km	9,23
Gj.snitt dybde langs strøk	d	m	35,00
Vindoppstuving			
- vind: 30 m/s	Su	m	0,05
- vind: 50 års intervall	Su	m	0,05
- vind: 1000 års intervall	Su	m	0,07
Vannsidens horisontalkomponent	n	-	1,60
Korreksjonsfaktor	C	-	1,00
Innfallsvinkel	beta	grader	24,00
Sinus innfallsvinkel	sin(beta)	-	0,41
Bølgeoppskylning			
- vind: 30 m/s	Ru	m	3,00
- vind: 50 års intervall	Ru	m	3,06
- vind: 1000 års intervall	Ru	m	3,74

Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Referansehastighet	vb.0	m/s	26
Høyde over havet	H	m	523
Referanse høyde over havet	H0	m	700
Referanse maks. høyde over havet	Htopp	m	1300
Terskelnivå	v0	m/s	30
Nivåkorreksjon	Calt	-	1
basisvindhastighet	vb	m/s	26
ruhetslengde	z0	-	0,01
terrengruhetsfaktor	Kr	-	0,169756222
ruhetsfaktor	cr	-	1,172634437
Stedvindhastighet	vm	m/s	30,48849536
Direksjonsfaktor	Cdir	-	1

Strøk	m	Vinkel	grader	radianer	$R \cdot \cos^2(a)$	$\cos(a)$	
Ugunstigste vindretning	9230	a0	0	0	9230	1	
R1	8110	a1	6	0,105	8021,388521	0,99	
R2	8220	a2	12	0,209	7864,671831	0,98	
R3	8370	a3	18	0,314	7570,736121	0,95	
R4	7550	a4	24	0,419	6300,968039	0,91	
R5	1580	a5	30	0,524	1185	0,87	
R6	950	a6	36	0,628	621,7830723	0,81	
R7	700	a7	42	0,733	386,5849621	0,74	
R8	610	a8	48	0,838	273,1188187	0,67	
R9	500	a9	54	0,942	172,7457514	0,59	
R10	430	a10	60	1,047	107,5	0,50	
R11	350	a11	66	1,152	57,90214389	0,41	
R12	340	a12	72	1,257	32,46711096	0,31	
R13	350	a13	78	1,361	15,12954491	0,21	
R14	340	a14	84	1,466	3,714907875	0,10	
R15	310	a15	90	1,571	1,16327E-30	0,00	
R16	500	a16	-6	-0,105	494,5369002	0,99	
R17	460	a17	-12	-0,209	440,1154553	0,98	
R18	460	a18	-18	-0,314	416,0739087	0,95	
R19	480	a19	-24	-0,419	400,5913455	0,91	
R20	450	a20	-30	-0,524	337,5	0,87	
R21	410	a21	-36	-0,628	268,3484838	0,81	
R22	270	a22	-42	-0,733	149,1113425	0,74	
R23	270	a23	-48	-0,838	120,8886575	0,67	
R24	270	a24	-54	-0,942	93,28270576	0,59	
R25	270	a25	-60	-1,047	67,5	0,50	
R26	270	a26	-66	-1,152	44,66736814	0,41	
R27	280	a27	-72	-1,257	26,73762079	0,31	
R28	290	a28	-78	-1,361	12,53590864	0,21	
R29	290	a29	-84	-1,466	3,168597894	0,10	
R30	290	a30	-90	-1,571	1,08822E-30	0,00	
					sum	44718,76912	19,08
					Eff. Strøk	2,343611382	km

Ulike metoder			
Saville			
Effektivt strøk	Fe	m	3233,49
Strøk hatt, 1000 år	F [^]	m	26,60
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,70
Strøk hatt, 30 m/s	F [^]	m	36,97
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,41
Britiske retningslinjer			
Strøk	F	m	9230
Faktor for moh	fa	-	1,523
Faktor for hastighet over vann	fw	-	1,3
Retningsfaktor	fd	-	1
Dim. Vindhastighet, 1000 år	U	m/s	59,7138
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	3,260
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,599
Dim. Vindhastighet - 1000 år -justert Calt	U	m/s	39,208
Signifikant bølgehøyde - 1000 år - justert Calt	Hs	m	2,141
VHL			
Strøklengde	F	m	9230
Strøkbredde	B	m	2000
B/F			0,217
Faktor fra graf		-	0,52
Effektivt strøk	Fe	m	4799,6
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,778
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,494

Steinstørrelser			
Tyngdetetthet stein	yr	kN/m ³	24,00
Tyngdetetthet vann	yw	kN/m ³	10,00
stabilitetskonstant	K	-	2,50
Min. Steinstørrelse: 30 m/s	wmin	kN	7,91
Min. Steinstørrelse: 1000 år	wmin	kN	15,44
konstant for steinform	cf	-	0,60
min. Steindiameter, 30 m/s	Dmin	m	0,82
min. Steindiameter, 1000 år	Dmin	m	1,02
Saville			
- min. Steinstørrelse, 30 m/s	Wmin	kN	6,10
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	10,82
UK guidelines			
- min. Steinstørrelse, 30 m/s	Wmin	kN	8,94
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	75,78
- min. Steinstørrelse, 1000 år-justert	Wmin	kN	21,45
VHL			
- min. Steinstørrelse, 30 m/s	Wmin	kN	7,29
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	12,30

Vedlegg 4: Excelark med bølgeberegninger fra Gråsjo

Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Dimensjonerende vindhastighet, 50 år	U	km/h	100,20
Dimensjonerende vindhastighet, 1000 år	U	km/h	116,23
Dimensjonerende vindhastighet, 30m/S	U	km/h	106,81
Effektivt strøk	Fe	km	1,52
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	m	1,28
- vind: 50 års intervall	Hs	m	1,18
- vind: 1000 års intervall	Hs	m	1,44
Dimensjonerende bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hd	m	1,67
- vind: 50 års intervall	Hd	m	1,53
- vind: 1000 års intervall	Hd	m	1,87
Tid for utvikling av stasj. Bølgetilstand,			
- vind: 30m/s	t	h	0,19
- vind: 50 års intervall	t	h	0,20
- vind: 1000 års intervall	t	h	0,18
Strøk for vindoppstuving	F	km	10,38
Gj.snitt dybde langs strøk	d	m	50,00
Vindoppstuving			
- vind: 30 m/s	Su	m	0,04
- vind: 50 års intervall	Su	m	0,03
- vind: 1000 års intervall	Su	m	0,04
Vannsidens horisontalkomponent	n	-	1,50
Korreksjonsfaktor	C	-	1,00
Innfallsvinkel	beta	grader	14,00
Sinus innfallsvinkel	sin(beta)	-	0,24
Bølgeoppskylling			
- vind: 30 m/s	Ru	m	2,58
- vind: 50 års intervall	Ru	m	2,36
- vind: 1000 års intervall	Ru	m	2,89

Vindberegninger			
Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Referansehastighet	vb.0	m/s	24
Høyde over havet	H	m	483
Referanse høyde over havet	H0	m	900
Referanse maks. høyde over havet	Htopp	m	1500
Terskelnivå	v0	m/s	30
Nivåkorreksjon	Calt	-	1
basisvindhastighet	vb	m/s	24
ruhetslengde	z0	-	0,01
terrengruhetsfaktor	Kr	-	0,169756
ruhetsfaktor	cr	-	1,172634
Stedvindhastighet	vm	m/s	28,14323
Direksjonsfaktor	Cdir	-	1

Strøk	m	Vinkel	grader	radianer	$R \cdot \cos^2(a)$	$\cos(a)$
Ugunstigste vindretning	10380	a0	0	0	10380,00	1
R1	1240	a1	6	0,105	1226,45	0,99
R2	930	a2	12	0,209	889,80	0,98
R3	880	a3	18	0,314	795,97	0,95
R4	760	a4	24	0,419	634,27	0,91
R5	710	a5	30	0,524	532,50	0,87
R6	660	a6	36	0,628	431,98	0,81
R7	630	a7	42	0,733	347,93	0,74
R8	580	a8	48	0,838	259,69	0,67
R9	550	a9	54	0,942	190,02	0,59
R10	480	a10	60	1,047	120,00	0,50
R11	440	a11	66	1,152	72,79	0,41
R12	410	a12	72	1,257	39,15	0,31
R13	370	a13	78	1,361	15,99	0,21
R14	350	a14	84	1,466	3,82	0,10
R15	350	a15	90	1,571	0,00	0,00
R16	3810	a16	-6	-0,105	3768,37	0,99
R17	2910	a17	-12	-0,209	2784,21	0,98
R18	2290	a18	-18	-0,314	2071,32	0,95
R19	2010	a19	-24	-0,419	1677,48	0,91
R20	1560	a20	-30	-0,524	1170,00	0,87
R21	1060	a21	-36	-0,628	693,78	0,81
R22	680	a22	-42	-0,733	375,54	0,74
R23	390	a23	-48	-0,838	174,62	0,67
R24	330	a24	-54	-0,942	114,01	0,59
R25	320	a25	-60	-1,047	80,00	0,50
R26	280	a26	-66	-1,152	46,32	0,41
R27	270	a27	-72	-1,257	25,78	0,31
R28		a28	-78	-1,361	0,00	0,21
R29		a29	-84	-1,466	0,00	0,10
R30		a30	-90	-1,571	0,00	0,00
sum					28921,79	19,08
Eff. Strøk					1,52	km

Ulike metoder			
Saville			
Effektivt strøk	Fe	m	2056,08
Strøk hatt, 1000 år	F^	m	19,35
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,30
Strøk hatt, 30 m/s	F^	m	22,91
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,18
Britiske retningslinjer			
Strøk	F	m	10380
Faktor for moh	fa	-	1,483
Faktor for hastighet over vann	fw	-	1,3
Retningsfaktor	fd	-	1
Dim. Vindhastighet, 1000 år	U	m/s	53,67
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	3,108
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,718
Dim. Vindhastighet - 1000 år -justert Calt	U	m/s	36,192
Signifikant bølgehøyde - 1000 år - justert Calt	Hs	m	2,096
VHL			
Strøklengde	F	m	10380
Strøkbredde	B	m	2100
B/F			0,202
Faktor fra graf		-	0,3
Effektivt strøk	Fe	m	3114
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,352
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,236

Steinstørrelser			
Tyngdetetthet stein	yr	kN/m3	24,00
Tyngdetetthet vann	yw	kN/m3	10,00
stabilitetskonstant	K	-	2,50
Min. Steinstørrelse: 30 m/s	wmin	kN	4,94
Min. Steinstørrelse: 1000 år	wmin	kN	6,96
konstant for steinform	cf	-	0,60
min. Steindiameter, 30 år	Dmin	m	0,70
min. Steindiameter, 1000 år	Dmin	m	0,78
Saville			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	3,85
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	5,17
UK guidelines			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	11,83
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	70,00
- min. Steinstørrelse, 1000 år-justert	Wmin	kN	21,46
VHL			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	4,40
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	5,76

Vedlegg 5: Excelark med bølgeberegninger fra Follsjø

Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Dimensjonerende vindhastighet, 50 år	U	km/h	100,20
Dimensjonerende vindhastighet, 1000 år	U	km/h	116,23
Dimensjonerende vindhastighet, 30m/S	U	km/h	106,81
Effektivt strøk	Fe	km	1,52
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	m	1,28
- vind: 50 års intervall	Hs	m	1,18
- vind: 1000 års intervall	Hs	m	1,44
Dimensjonerende bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hd	m	1,67
- vind: 50 års intervall	Hd	m	1,53
- vind: 1000 års intervall	Hd	m	1,87
Tid for utvikling av stasj. Bølgetilstand,			
- vind: 30m/s	t	h	0,19
- vind: 50 års intervall	t	h	0,20
- vind: 1000 års intervall	t	h	0,18
Strøk for vindoppstuving	F	km	10,38
Gj.snitt dybde langs strøk	d	m	50,00
Vindoppstuving			
- vind: 30 m/s	Su	m	0,04
- vind: 50 års intervall	Su	m	0,03
- vind: 1000 års intervall	Su	m	0,04
Vannsidens horisontalkomponent	n	-	1,50
Korreksjonsfaktor	C	-	1,00
Innfallsvinkel	beta	grader	14,00
Sinus innfallsvinkel	sin(beta)	-	0,24
Bølgeoppskylning			
- vind: 30 m/s	Ru	m	2,58
- vind: 50 års intervall	Ru	m	2,36
- vind: 1000 års intervall	Ru	m	2,89

Vindberegninger			
Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Referansehastighet	vb.0	m/s	25
Høyde over havet	H	m	420
Referanse høyde over havet	H0	m	900
Referanse maks. høyde over havet	Htopp	m	1500
Terskelnivå	v0	m/s	30
Nivåkorreksjon	Calt	-	1
basisvindhastighet	vb	m/s	25
ruhetslengde	z0	-	0,01
terrengruhetsfaktor	Kr	-	0,17
ruhetsfaktor	cr	-	1,17
Stedvindshastighet	vm	m/s	29,32
Direksjonsfaktor	Cdir	-	1

Strøk	m	Vinkel	grader	radianer	$R \cdot \cos^2(a)$	$\cos(a)$
Ugunstigste vindretning	4140	a0	0	0	4140	1
R1	710	a1	6	0,105	702,24	0,99
R2	650	a2	12	0,209	621,90	0,98
R3	600	a3	18	0,314	542,71	0,95
R4	550	a4	24	0,419	459,01	0,91
R5	530	a5	30	0,524	397,50	0,87
R6	490	a6	36	0,628	320,71	0,81
R7	480	a7	42	0,733	265,09	0,74
R8	460	a8	48	0,838	205,96	0,67
R9	450	a9	54	0,942	155,47	0,59
R10	430	a10	60	1,047	107,50	0,50
R11	420	a11	66	1,152	69,48	0,41
R12	420	a12	72	1,257	40,11	0,31
R13	410	a13	78	1,361	17,72	0,21
R14	390	a14	84	1,466	4,26	0,10
R15	380	a15	90	1,571	0,00	0,00
R16	3580	a16	-6	-0,105	3540,88	0,99
R17	3320	a17	-12	-0,209	3176,49	0,98
R18	3380	a18	-18	-0,314	3057,24	0,95
R19	3050	a19	-24	-0,419	2545,42	0,91
R20	2590	a20	-30	-0,524	1942,50	0,87
R21	1650	a21	-36	-0,628	1079,94	0,81
R22	1040	a22	-42	-0,733	574,35	0,74
R23	880	a23	-48	-0,838	394,01	0,67
R24	600	a24	-54	-0,942	207,29	0,59
R25	480	a25	-60	-1,047	120,00	0,50
R26	390	a26	-66	-1,152	64,52	0,41
R27	360	a27	-72	-1,257	34,38	0,31
R28	310	a28	-78	-1,361	13,40	0,21
R29		a29	-84	-1,466	0,00	0,10
R30		a30	-90	-1,571	0,00	0,00
sum					24800,09	19,08
Eff. Strøk					1,30	km

Ulike metoder			
Saville			
Effektivt strøk	Fe	m	1729,41
Strøk hatt, 1000 år	F [^]	m	14,77
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,28
Strøk hatt, 30 m/s	F [^]	m	18,85
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,11
Britiske retningslinjer			
Strøk	F	m	4140
Bøyd strøk	F	m	6250
Faktor for moh	fa	-	1,42
Faktor for hastighet over vann	fw	-	1,23
Retningsfaktor	fd	-	1
Dim. Vindhastighet, 1000 år	U	m/s	50,6514
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	2,276
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,348
Dim. Vindhastighet – 1000 år -justert Calt	U	m/s	35,670
Signifikant bølgehøyde – 1000 år – justert Calt	Hs	m	1,603
VHL			
Strøklengde	F	m	4140
Strøkbredde	B	m	1100
B/F			0,266
Faktor fra graf		-	0,61
Effektivt strøk	Fe	m	2525,4
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,289
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,133

Steinstørrelser			
Tyngdetetthet stein	yr	kN/m ³	24,00
Tyngdetetthet vann	yw	kN/m ³	10,00
stabilitetskonstant	K	-	2,50
Min. Steinstørrelse: 30 m/s	wmin	kN	4,20
Min. Steinstørrelse: 1000 år	wmin	kN	6,89
konstant for steinform	cf	-	0,60
min. Steindiameter, 30 år	Dmin	m	0,66
min. Steindiameter, 1000 år	Dmin	m	0,78
Saville			
- min. Steindiameter, 30 år	Wmin	kN	3,22
- min. Steindiameter, 1000 år	Wmin	kN	4,92
UK guidelines			
- min. Steindiameter, 30 år	Wmin	kN	5,71
- min. Steindiameter, 1000 år	Wmin	kN	27,49
- min. Steindiameter, 1000 år-justert	Wmin	kN	9,60
VHL			
- min. Steindiameter, 30 år	Wmin	kN	3,39
- min. Steindiameter, 1000 år	Wmin	kN	5,00

Vedlegg 6: Excelark med bølgeberegninger fra Kvilestein

Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Dimensjonerende vindhastighet, 50 år	U	km/h	91,97
Dimensjonerende vindhastighet, 1000 år	U	km/h	106,69
Dimensjonerende vindhastighet, 30m/S	U	km/h	108,00
Effektivt strøk	Fe	km	0,78
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	m	0,97
- vind: 50 års intervall	Hs	m	0,78
- vind: 1000 års intervall	Hs	m	0,95
Dimensjonerende bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hd	m	1,26
- vind: 50 års intervall	Hd	m	1,01
- vind: 1000 års intervall	Hd	m	1,23
Tid for utvikling av stasj. Bølgetilstand,			
- vind: 30m/s	t	h	0,11
- vind: 50 års intervall	t	h	0,12
- vind: 1000 års intervall	t	h	0,11
Strøk for vindoppstuving	F	km	4,92
Gj.snitt dybde langs strøk	d	m	36,00
Vindoppstuving			
- vind: 30 m/s	Su	m	0,03
- vind: 50 års intervall	Su	m	0,02
- vind: 1000 års intervall	Su	m	0,02
Vannsidens horisontalkomponent	n	-	1,60
Korreksjonsfaktor	C	-	1,00
Innfallsvinkel	beta	grader	10,00
Sinus innfallsvinkel	sin(beta)	-	0,17
Bølgeoppskylling			
- vind: 30 m/s	Ru	m	1,88
- vind: 50 års intervall	Ru	m	1,52
- vind: 1000 års intervall	Ru	m	1,85

Vindberegninger			
Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Referansehastighet	vb.0	m/s	24
Høyde over havet	H	m	920
Referanse høyde over havet	H0	m	900
Referanse maks. Høyde over havet	Htopp	m	1500
Terskelnivå	v0	m/s	30
Nivåkorreksjon	Calt	-	1,01
basisvindhastighet	vb	m/s	21,7862
ruhetslengde	z0	-	0,01
terrengruhetsfaktor	Kr	-	0,16976
ruhetsfaktor	cr	-	1,17263
Stedvindshastighet	vm	m/s	25,5473
Direksjonsfaktor	Cdir	-	0,9

Strøk	m	Vinkel	grader	radianer	$R \cdot \cos^2(a)$	$\cos(a)$
Ugunstigste vindretning	4920	a0	0	0	4920,000	1
R1	1400	a1	6	0,105	1384,703	0,99
R2	510	a2	12	0,209	487,954	0,98
R3	320	a3	18	0,314	289,443	0,95
R4	250	a4	24	0,419	208,641	0,91
R5	230	a5	30	0,524	172,500	0,87
R6	210	a6	36	0,628	137,447	0,81
R7	180	a7	42	0,733	99,408	0,74
R8	170	a8	48	0,838	76,115	0,67
R9	160	a9	54	0,942	55,279	0,59
R10	140	a10	60	1,047	35,000	0,50
R11		a11	66	1,152	0,000	0,41
R12		a12	72	1,257	0,000	0,31
R13		a13	78	1,361	0,000	0,21
R14		a14	84	1,466	0,000	0,10
R15		a15	90	1,571	0,000	0,00
R16	1980	a16	-6	-0,105	1958,366	0,99
R17	2070	a17	-12	-0,209	1980,520	0,98
R18	970	a18	-18	-0,314	877,373	0,95
R19	910	a19	-24	-0,419	759,454	0,91
R20	700	a20	-30	-0,524	525,000	0,87
R21	440	a21	-36	-0,628	287,984	0,81
R22	370	a22	-42	-0,733	204,338	0,74
R23	340	a23	-48	-0,838	152,230	0,67
R24	300	a24	-54	-0,942	103,647	0,59
R25	240	a25	-60	-1,047	60,000	0,50
R26	210	a26	-66	-1,152	34,741	0,41
R27	210	a27	-72	-1,257	20,053	0,31
R28	200	a28	-78	-1,361	8,645	0,21
R29	190	a29	-84	-1,466	2,076	0,10
R30	180	a30	-90	-1,571	0,000	0,00
					sum	14840,92
					Eff. Strøk	0,78 km

Ulike metoder			
Saville			
Effektivt strøk	Fe	m	1057,89
Strøk hatt, 1000 år	F [^]	m	11,82
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	0,89
Strøk hatt, 30 m/s	F [^]	m	11,53
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	0,91
Britiske retningslinjer			
Bøyd strøk	F	m	5860
Faktor for moh	fa	-	1,92
Faktor for hastighet over vann	fw	-	1,245
Retningsfaktor	fd	-	0,9
Dim. Vindhastighet, 1000 år	U	m/s	59,8939
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	2,606
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,305
Dim. Vindhastighet - 1000 år -justert Calt	U	m/s	31,464
Signifikant bølgehøyde - 1000 år - justert Calt	Hs	m	1,369
VHL			
Strøklengde	F	m	4920
Strøkbredde	B	m	600
B/F			0,122
Faktor fra graf		-	0,3
Effektivt strøk	Fe	m	1476
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	0,869
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	0,880

Steinstørrelser			
Tyngdetetthet stein	yr	kN/m ³	24,00
Tyngdetetthet vann	yw	kN/m ³	10,00
stabilitetskonstant	K	-	2,50
Min. Steinstørrelse: 30 m/s	wmin	kN	1,97
Min. Steinstørrelse: 1000 år	wmin	kN	1,87
konstant for steinform	cf	-	0,60
min. Steindiameter, 30 år	Dmin	m	0,52
min. Steindiameter, 1000 år	Dmin	m	0,51
Saville			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	1,63
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	1,56
UK guidelines			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	4,86
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	38,68
- min. Steinstørrelse, 1000 år-justert	Wmin	kN	5,61
VHL			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	1,49
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	1,43

Vedlegg 7: Excelark med bølgeberegninger fra Sandgrovvassdammen

Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Dimensjonerende vindhastighet, 50 år	U	km/h	105,18
Dimensjonerende vindhastighet, 1000 år	U	km/h	122,00
Dimensjonerende vindhastighet, 30m/S	U	km/h	108,00
Effektivt strøk	Fe	km	1,30
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	m	1,22
- vind: 50 års intervall	Hs	m	1,17
- vind: 1000 års intervall	Hs	m	1,43
Dimensjonerende bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hd	m	1,58
- vind: 50 års intervall	Hd	m	1,53
- vind: 1000 års intervall	Hd	m	1,86
Tid for utvikling av stasj. Bølgetilstand,			
- vind: 30m/s	t	h	0,17
- vind: 50 års intervall	t	h	0,17
- vind: 1000 års intervall	t	h	0,15
Strøk for vindoppstuving	F	km	4,14
Gj.snitt dybde langs strøk	d	m	53,00
Vindoppstuving			
- vind: 30 m/s	Su	m	0,01
- vind: 50 års intervall	Su	m	0,01
- vind: 1000 års intervall	Su	m	0,02
Vannsidens horisontalkomponent	n	-	1,50
Korreksjonsfaktor	C	-	1,00
Innfallsvinkel	beta	grader	1,00
Sinus innfallsvinkel	sin(beta)	-	0,02
Bølgeoppskylning			
- vind: 30 m/s	Ru	m	2,44
- vind: 50 års intervall	Ru	m	2,36
- vind: 1000 års intervall	Ru	m	2,88

Vindberegninger			
Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Referansehastighet	vb.0	m/s	25
Høyde over havet	H	m	420
Referanse høyde over havet	H0	m	900
Referanse maks. høyde over havet	Htopp	m	1500
Terskelnivå	v0	m/s	30
Nivåkorreksjon	Calt	-	1
basisvindhastighet	vb	m/s	25
ruhetslengde	z0	-	0,01
terrengruhetsfaktor	Kr	-	0,169756222
ruhetsfaktor	cr	-	1,172634437
Stedvindshastighet	vm	m/s	29,31586093
Direksjonsfaktor	Cdir	-	1

Ulike metoder			
Saville			
Effektivt strøk	Fe	m	1242,97
Strøk hatt, 1000 år	F ^Λ	m	9,82
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,17
Strøk hatt, 30 m/s	F ^Λ	m	13,55
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	0,97
Britiske retningslinjer			
Strøk	F	m	4220
Faktor for moh	fa	-	2,07
Faktor for hastighet over vann	fw	-	1,23
Retningsfaktor	fd	-	0,9
Dim. Vindhastighet, 1000 år	U	m/s	74,427595
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	2,748
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,108
Dim. Vindhastighet - 1000 år -justert Calt	U	m/s	36,971
Signifikant bølgehøyde - 1000 år - justert Calt	Hs	m	1,365
VHL			
Strøklengde	F	m	4220
Strøkbredde	B	m	700
B/F			0,166
Faktor fra graf		-	0,3
Effektivt strøk	Fe	m	1266
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	0,972
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	0,819

Steinstørrelser			
Tyngdetetthet stein	yr	kN/m ³	24,00
Tyngdetetthet vann	yw	kN/m ³	10,00
stabilitetskonstant	K	-	2,50
Min. Steinstørrelse: 30 m/s	wmin	kN	2,44
Min. Steinstørrelse: 1000 år	wmin	kN	4,69
konstant for steinform	cf	-	0,60
min. Steindiameter, 30 år	Dmin	m	0,55
min. Steindiameter, 1000 år	Dmin	m	0,69
Saville			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	1,99
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	3,49
UK guidelines			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	2,97
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	45,36
- min. Steinstørrelse, 1000 år-justert	Wmin	kN	5,56
VHL			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	1,20
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	2,01

Vedlegg 8: Excelark med bølgeberegninger fra Muravassdammen

Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Dimensjonerende vindhastighet, 50 år	U	km/h	110,53
Dimensjonerende vindhastighet, 1000 år	U	km/h	128,21
Dimensjonerende vindhastighet, 30m/S	U	km/h	108,00
Effektivt strøk	Fe	km	0,88
Signifikant bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hs	m	1,02
- vind: 50 års intervall	Hs	m	1,05
- vind: 1000 års intervall	Hs	m	1,29
Dimensjonerende bølgehøyde			
- vind: 30 m/s	Hd	m	1,33
- vind: 50 års intervall	Hd	m	1,37
- vind: 1000 års intervall	Hd	m	1,67
Tid for utvikling av stasj. Bølgetilstand,			
- vind: 30m/s	t	h	0,12
- vind: 50 års intervall	t	h	0,12
- vind: 1000 års intervall	t	h	0,11
Strøk for vindoppstuving	F	km	2,85
Gj.snitt dybde langs strøk	d	m	60,00
Vindoppstuving			
- vind: 30 m/s	Su	m	0,01
- vind: 50 års intervall	Su	m	0,01
- vind: 1000 års intervall	Su	m	0,01
Vannsidens horisontalkomponent	n	-	1,47
Korreksjonsfaktor	C	-	1,00
Innfallsvinkel	beta	grader	0,00
Sinus innfallsvinkel	sin(beta)	-	0,00
Bølgeoppskylling			
- vind: 30 m/s	Ru	m	2,07
- vind: 50 års intervall	Ru	m	2,13
- vind: 1000 års intervall	Ru	m	2,61

Vindberegninger			
Faktor	Betegnelse	Enhet	Verdi
Referansehastighet	vb.0	m/s	24
Høyde over havet	H	m	1060
Referanse høyde over havet	H0	m	900
Referanse maks. høyde over havet	Htopp	m	1500
Terskelnivå	v0	m/s	30
Nivåkorreksjon	Calt	-	1,090909091
basisvindhastighet	vb	m/s	26,18181818
ruhetslengde	z0	-	0,01
terrengruhetsfaktor	Kr	-	0,169756222
ruhetsfaktor	cr	-	1,172634437
Stedvindshastighet	vm	m/s	30,70170162
Direksjonsfaktor	Cdir	-	1

Strøk	m	Vinkel	grader	radianer	$R \cdot \cos^2(a)$	$\cos(a)$
Ugunstigste vindretning	2850	a0	0	0	2850	1
R1	1770	a1	6	0,105	1750,66	0,99
R2	850	a2	12	0,209	813,26	0,98
R3	500	a3	18	0,314	452,25	0,95
R4	440	a4	24	0,419	367,21	0,91
R5	410	a5	30	0,524	307,50	0,87
R6	400	a6	36	0,628	261,80	0,81
R7	430	a7	42	0,733	237,47	0,74
R8	470	a8	48	0,838	210,44	0,67
R9	530	a9	54	0,942	183,11	0,59
R10	560	a10	60	1,047	140,00	0,50
R11	660	a11	66	1,152	109,19	0,41
R12	1030	a12	72	1,257	98,36	0,31
R13	1020	a13	78	1,361	44,09	0,21
R14	1000	a14	84	1,466	10,93	0,10
R15	990	a15	90	1,571	0,00	0,00
R16	2788	a16	-6	-0,105	2757,54	0,99
R17	1430	a17	-12	-0,209	1368,19	0,98
R18	1320	a18	-18	-0,314	1193,95	0,95
R19	1240	a19	-24	-0,419	1034,86	0,91
R20	750	a20	-30	-0,524	562,50	0,87
R21	1160	a21	-36	-0,628	759,23	0,81
R22	860	a22	-42	-0,733	474,95	0,74
R23	760	a23	-48	-0,838	340,28	0,67
R24	610	a24	-54	-0,942	210,75	0,59
R25	460	a25	-60	-1,047	115,00	0,50
R26	390	a26	-66	-1,152	64,52	0,41
R27	370	a27	-72	-1,257	35,33	0,31
R28	310	a28	-78	-1,361	13,40	0,21
R29	300	a29	-84	-1,466	3,28	0,10
R30		a30	-90	-1,571	0,00	0,00
sum					16770	19,08
Eff. Strøk					0,879	km

Ulike metoder			
Saville			
Effektivt strøk	Fe	m	1124,38
Strøk hatt, 1000 år	F [^]	m	8,70
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,13
Strøk hatt, 30 m/s	F [^]	m	12,26
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	0,93
Britiske retningslinjer			
Bøyd strøk	F	m	3510
Faktor for moh	fa	-	2,06
Faktor for hastighet over vann	fw	-	1,19
Retningsfaktor	fd	-	1
Dim. Vindhastighet, 1000 år	U	m/s	68,247
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	2,298
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	1,010
Dim. Vindhastighet - 1000 år -justert Calt	U	m/s	36,141
Signifikant bølgehøyde - 1000 år - justert Calt	Hs	m	1,217
VHL			
Strøklengde	F	m	2850
Strøkbredde	B	m	600
B/F			0,211
Faktor fra graf		-	0,55
Effektivt strøk	Fe	m	1567,5
Signifikant bølgehøyde, 1000 år	Hs	m	1,086
Signifikant bølgehøyde, 30 m/s	Hs	m	0,906

Steinstørrelser			
Tyngdetetthet stein	yr	kN/m ³	24,00
Tyngdetetthet vann	yw	kN/m ³	10,00
stabilitetskonstant	K	-	2,50
Min. Steinstørrelse: 30 m/s	wmin	kN	2,53
Min. Steinstørrelse: 1000 år	wmin	kN	5,07
konstant for steinform	cf	-	0,60
min. Steindiameter, 30 år	Dmin	m	0,56
min. Steindiameter, 1000 år	Dmin	m	0,71
Saville			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	1,91
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	3,47
UK guidelines			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	2,45
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	218,88
- min. Steinstørrelse, 1000 år-justert	Wmin	kN	4,29
VHL			
- min. Steinstørrelse, 30 år	Wmin	kN	1,77
- min. Steinstørrelse, 1000 år	Wmin	kN	3,05

Vedlegg 9: Hendelsestre fra Dam Båtsvann

Hendelsestre for påvirkning av islast ved Dam Båtsvatn, (Multiconsult, 2019)

