

Thea Sophie Skaaraen Herberg

Fleksible nettkonstruksjoner som sikringstiltak mot sørpeskred i Vannledningsdalen

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Arne Aalberg

Juli 2021



Foto: Svalbardposten AS

Thea Sophie Skaaraaen Herberg

Fleksible nettkonstruksjoner som sikringstiltak mot sørpeskred i Vannledningsdalen

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Arne Aalberg
Juli 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

I forprosjekteringen av ulike sikringsløsninger i Vannledningsdalen på Svalbard, er det kommet opp et forslag om bruk av fleksible nettkonstruksjoner som en del av et mulig tiltak mot sørpeskred. Det er ikke kjent at dette er gjort tidligere, og det må derfor legges ned et arbeid i det å kartlegge hva som skal undersøkes i prosjekteringen videre, og hvordan dette kan gjøres. I denne oppgaven er noen av utfordringene med sikringstiltaket tatt opp, og informasjon er hentet inn fra både nedskalerte forsøk, simuleringer i programmet REEF3D og publikasjoner om lignende sikringstiltak mot flomskred.

Det er foreslått fremgangsmåter for å anslå hvordan barrierene påvirker utløpsdistansen til sørpeskredene, fordi dette er vanskelig å få med i kjente skredsimuleringsprogrammer. I tillegg er det gjort en vurdering av ulike metoder for lastberegning på barrierer truffet av flomskred, for å undersøke om noen av disse kan tilpasses til å beskrive lasten fra sørpeskred på nettkonstruksjoner. Disse beregningsmetodene er brukt på skredmassene i nedskalerte forsøk i ei egenlagd testrenne, hvor en fri strøm av sørpemasser er sendt mot rigide gitterbarrierer med to forskjellige maskestørrelser. Belastningen på barrierene er også målt i forsøkene, slik at beregningsmetodene skal kunne sammenlignes med målingene.

I forbindelse med designet av forsøkene er det undersøkt hvordan sørpeskred kan nedskaleres, og hvilke utfordringer som oppstår. Som for flomskred, har massene i seg selv en sammensetning som ikke nødvendigvis kan skaleres, og overføringsverdien til resultatene fra nedskalerte forsøk på sørpeskred må derfor vurderes nøye før bruk. Det betyr at forsøkene som må gjøres for å hente tilstrekkelig med informasjon om fleksible nettbarrierer i sikring mot sørpeskred til å komme videre i arbeidet i Vannledningsdalen, må være i større skala, hvilket fort blir kostbart.

Det er derfor forsøkt å finne et dataprogram som egner seg til å simulere sørpeskredene i interaksjonen med nettbarrierer, med det formål at et slikt program etterhvert vil kunne redusere behovet for storskala forsøk. Programmet som er testet i oppgaven, er et simuleringsprogram laget for bruk på væskestrømning rundt faste konstruksjoner, kalt REEF3D. Fra simuleringene kan det blant annet hentes ut informasjon om belastningen på gitterbarrieren, og en visualisering av massene i løpet av interaksjonen. Ved sammenligning med målinger og observasjoner fra forsøkene, er det riktignok funnet ut at programmet må videreutvikles for å kunne gi nyttige resultater når det kommer til simulering av sørpeskred.

Arbeidet med simuleringene har dermed ikke har ført til noen god løsning, men de øvrige undersøkelsene gjort på rigide gitterbarrierer i oppgaven kunne danne et godt grunnlag for videre arbeid med forsøk og beregninger på fleksible barrierer.

Abstract

During the pre-planning of mitigation work around Vannledningsdalen in Svalbard, it is suggested to install flexible net structures to prevent slush flows from making damages to the settlement. This practice is not previously used in mitigation against slush flows, so there are several subjects that must be examined throughout the planning phase of the project. In this thesis some of the subjects are addressed, and information for evaluating them is gathered from downscaled laboratory tests, computer simulations, and publications about similar mitigation works against debris flows.

Procedures to predict how installation of net barriers will affect the run-out distance of slush flows are discussed, which is a challenge in the simulation programs commonly used for estimating run-out distances. Another addressed subject is how the loading on net barriers subjected to slush flows can be calculated. Methods for calculating the loading from debris flows have been gathered and assessed in case they can be adjusted to slush flows on net barriers as well. The calculation methods are used on the down scaled slush flows in laboratory tests, where slush is released down a chute and onto two rigid lattices with differing fineness. A comparison is then made between the calculated loads, and loads measured directly in the tests.

Just as for debris flows, downscaling slush flows has led to challenges, as the material in the flow is taken directly from the nature, and thus cannot be scaled down. Therefore, the necessary tests to achieve the information needed for further work in Vannledningsdalen must be in larger scales, or even full scale.

Because large-scale tests are expensive, it is considered if it is possible to simulate the interaction between slush flows and net barriers, with the aim to reduce the need for tests in the long run. The program used in the thesis is called REEF3D and is made for simulating flows around rigid structures. By comparison with observations and results from the downscaled laboratory tests, it does not seem to provide realistic simulations of the slush flows in the tests. Even though the work with simulating the slush did not lead to any result that easily can be used further, the other work on the rigid lattice barriers in the thesis seem to make a solid groundwork for further testing and calculations on net flexible net barriers.

Forord

Denne masteroppgaven er utført ved institutt for konstruksjonsteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim vårsemesteret 2021. Formålet med oppgaven er å kunne bidra i undersøkelsene av hvordan fleksible nettkonstruksjoner kan brukes i sikring mot sørpeskred i Vannledningsdalen på Svalbard. Arbeidet legger også et grunnlag for videre arbeid med utvikling av generelle testmetoder og beregningsmetoder relatert til sikring mot sørpeskred.

Det er flere ressurspersoner fra skredmiljøet som har bistått, og jeg vil spesielt takke Harald Norem og Kalle Kronholm for å ha stilt seg til disposisjon ved spørsmål gjennom hele semesteret. Det har vært spennende å bli kjent med en liten del av det dere har holdt på med, og jeg er takknemlig for at dere har tatt dere tid til å hjelpe meg. I tillegg skal Arun Kamath ha en stor takk for opplæringen i bruk av REEF3D, og for svar på alle mulige rare spørsmål i forbindelse med det. I tillegg det nevnes at det er veileder Arne Aalberg som i det hele tatt har gjort det mulig å få skrive om noe så spennende, og det setter jeg veldig pris på. Tusen takk for hjelpa!

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	I
Abstract	III
Forord	V
Liste over figurer	IX
Liste over tabeller	XI
Symbolliste	XII
1 Introduksjon	1
1.1.1 Praksis i sikring mot sørpeskred gjennom historien	1
1.1.2 Introduksjon til situasjonsstudiet i Vannledningsdalen på Svalbard	2
1.1.3 Problemstilling	6
2 Teori	8
2.1 Sørpeskred	8
2.1.1 Dannelse og utløsning	8
2.1.2 Strømning og utløp	10
2.1 Fleksible nett i sikring mot sørpeskred	11
2.1.1 Beskrivelse av foreslått sikringsløsning i Vannledningsdalen	14
2.2 Typisk oppbygning av nettkonstruksjoner for sikring mot sørpeskred	17
2.2.1 Nett	18
2.2.2 Støttevaiere og forankringer	19
2.2.3 Vingekabler	20
2.2.4 Endekabler	20
2.2.1 Bremseelementer	20
2.2.2 Støttestolper	21
2.2.3 Fundamenter	22
2.3 Beregning av utløpsdistanser	23
2.3.1 Beregning av utløpsdistanser ved forenklet metode	23
2.3.2 Beregning av utløpsdistanser ved bruk av RAMMS	25
2.3.3 Beregning av utløpsdistanser for skredløp med kontrolldammer ved kombinasjon av RAMMS og energibetraktninger	29
2.4 Beregning av laster på konstruksjoner truffet av sørpeskred	31
2.4.1 Statisk trykkrefter på grunn av snøsig oppstrøms nettet	32
2.4.2 Statisk trykkrefter fra skredmassene oppstrøms nettet	34
2.4.3 Beregningsmetoder for de dynamiske kreftene på rigide, tette barrierer truffet av flomskred	37
2.4.4 Beregningsmetoder for de dynamiske kreftene på nettbarrierer truffet av flomskred	43

3	Simulering av skredstrømning gjennom gitterkonstruksjoner	51
3.1	Simulering i REEF3D	51
3.2	Visualisering av resultater fra REEF3D i ParaView	53
4	Forsøk i litteraturen	56
4.1	Nedskalerte sørpeskred mot en enkel, rigid søyle	56
4.2	Full- og storskala flomskred mot fleksible nett	57
4.3	Nedskalerte laboratorieforsøk på flomskred mot fleksible nett	59
5	Metode for forsøk	61
5.1	Modellskalering	61
5.1.1	Geometriske forhold	61
5.1.2	Kinematiske forhold	62
5.1.3	Dynamiske forhold	62
5.1.4	Nedskalering i praksis	63
5.2	Forsøksoppsett	64
5.2.1	Renneoppsett	64
5.2.2	Barriere	65
5.2.3	Skredmasser	67
5.3	Testoversikt	68
6	Resultat av forsøk	69
6.1	Målinger	69
6.2	Lastberegninger basert på målt flyte høyde, massetetthet og hastighet	78
6.2.1	Statisk trykk	78
6.2.2	Hydrodynamisk metode	79
6.2.3	Armanini og Scottons metode	80
6.2.4	Lichtenhahns metode	81
6.2.5	Hübl og Holzingers metode	82
6.2.6	Nedre grense ved beregning på strømningsmotstand	82
6.2.7	Oppskalering av statiske laster	85
6.2.8	Oppsummeringstabeller	86
7	Drøfting	89
7.1	Vurdering av målinger og gjennomføring av forsøkene	89
7.2	Vurdering av de nevnte beregningsmetodene i forhold til de målte kreftene	89
7.2.1	Forsøk 1-11, med sørpeskred mot gitre	89
7.2.2	Enkelttester	92
7.3	Påvirkningen av barrierer på utløpsdistansen til forsøksskredene	93
7.4	Sammenligning av simuleringene i REEF3D med observasjoner og målinger fra forsøkene	94

8	Konklusjon.....	95
9	Kilder	97
	Vedlegg A	
	Vedlegg B	
	Vedlegg C	
	Vedlegg D	

Liste over figurer

Figur 1: Foto fra dosing av Vannledningsdalen.	2
Figur 2: Kart over området rundt Vannledningsdalen.....	3
Figur 3: Faresonekart for sørpeskred fra Vannledningsdalen slik situasjonen ser ut uten ytterligere sikringstiltak.....	4
Figur 4: Illustrasjon av pendulert og fenikulert regime i et snødekke	9
Figur 5: Illustrasjon av hovedfaktorene som påvirker mengden fritt vann i snødekket.....	9
Figur 6: Illustrasjon av vanlige utløsningsområder for sørpeskred. Det er tydelig at bekk- og elveløp er spesielt utsatt for utløsning av slike skred. Figuren er hentet fra Jaedicke (2014)..	10
Figur 7: Fleksible ringnett brukt i sikring mot flomskred.	12
Figur 8: Fleksible ringnett brukt i sikring mot snøskred i et testområde i Fieberbrunn i Østerrike.	12
Figur 9: Kart over området rundt Vannledningsdalen med markering av potensielle løsneområder for ulike skredtyper, og registrerte avsetningsområder fra tidligere skred.....	15
Figur 10: Kart over Vannledningsdalen med nettplasseringer som foreslått i forbindelse med forprosjekteringen av sikringsløsningen.	15
Figur 11: Illustrasjon av fremgangsmåten for å finne nettplasseringene foreslått i forprosjekteringen..	16
Figur 12: Typisk plassering av de viktigste komponentene i fleksible nettbarrierer brukt i sikring mot flomskred i V-daler..	17
Figur 13: Foreslått design av det som i forprosjekteringsrapporten (Kronholm et al., 2021) er nummerert som nett 11.....	18
Figur 14: Foto av wireanker og selvborende stag	19
Figur 15: Foto av SIFA-bremseelement før og etter belastning.....	20
Figur 16: Plott over hvor mye kraft et bremseelement av typen GN-9017 må belastes for å få oppnå ulike deformasjoner, som en andel av den maksimale krafta elementet tåler ved den belastningshastigheten.....	21
Figur 17: Illustrasjon av snøgjerder hvor forankringen med trykkplate er brukt, og hvorfor permafrosten fører til store krefter på forankringer.....	22
Figur 18: Foreslått prosedyre for beregning av utløpsdistanser for flomskred.	23
Figur 19: Inntegning av 20°-punktet i utløpet til eventuelle sørpeskred i Vannledningsdalen, med beregnede utløp ved beregning med forenklet metode.....	25
Figur 20: Illustrasjon av kraftlikevekten i skredet slik den antas å være i utgangspunktet.....	26
Figur 21: Illustrasjon av kraftlikevekten forenklet ved Voellmys friksjonslov.	27
Figur 22: Maksimal flyte høyde for hvert punkt i utløpene til skred simulert med ulike stoppkriterier i RAMMS..	28
Figur 23: Illustrasjon av energilinja til et skred uten barrierer i skredbanen.	29
Figur 24: Illustrasjon av energilinja til et skred med barrierer i skredbanen.	30
Figur 25: Foreslått inndeling av lastene på en barriere truffet av sørpeskred, hvor det er et liggende snødekke under skredet..	32
Figur 26: Det hydrostatiske trykket på en vertikal barriere etterhvert som masser fylles opp på oppstrøms side av den.	34
Figur 27: Det hydrostatiske trykket på en vertikal barriere, både ved beregning som hydrostatisk trykk, og jordtrykk.	36
Figur 28: Trykkfordelingen på en barriere dersom belastningen beregnes med hydrodynamisk metode.	38
Figur 29: Støtkraften på barrierer normalisert mot de statiske kreftene fra samme skredstrøm, gitt som en funksjon av tid.	39

Figur 30: Eksempel på lastene målt i de nedskalerte forsøkene Hübl og Holzingers metode er utviklet fra.	41
Figur 31: En illustrasjon av de to strømmingsscenarioene forespeilet i Armanini (1997).....	42
Figur 32: Dragkoeffisienten C_D som en funksjon av reynoldstallet Re ved strømming forbi todimensjonale legemer.....	46
Figur 33: Illustrasjon av hvordan belastningen på en barriere utvikler seg gjennom interaksjonen mellom skred og barriere dersom skredet kommer i bølger.	49
Figur 34: Den totale krafta normalt på barrieren i simuleringene som en funksjon av tid.	53
Figur 35: Visualisering av et nedskalert skred i et oppsett tilsvarende testforsøkene som presenteres senere i oppgaven.	53
Figur 36: Den turbulente viskositeten til skredmassene i simuleringene.....	54
Figur 37: Hastigheten til skredmassene i simuleringene.....	55
Figur 38: Renneoppsettet brukt i forsøkene på sørpeskred i Jaedicke et al. (2008).....	56
Figur 39: Foto av søyla belastningen fra sørpeskredene ble målt på i Jaedicke et al. (2008)..	57
Figur 40: Oversiktsbilde av oppsettet brukt i DeNatale (1999) for storskala tester av fleksible nettbarrierer truffet av flomskred.	58
Figur 41: De totale kreftene på ulike barrierer truffet av flomskred på 50 liter i nedskalerte forsøk presentert i Wendeler et. al. (2018).....	59
Figur 42: Illustrasjon av den innkommende strømmingen på tette og fleksible barrierer i Wendeler et. al. (2018).....	60
Figur 43: Forsøksoppsett 1	64
Figur 44: Forsøksoppsett 2.....	65
Figur 45: Foto og illustrasjon av gitterbarrierene brukt i forsøkene	66
Figur 46: Illustrasjon av barriereoppsettet sett fra lengre opp i renna.	67
Figur 47: Målt avstand mellom nederste del av renna og fremste punkt med en betydelig mengde avsetninger etter forsøk.	69
Figur 48: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 1 som en funksjon av tid.	71
Figur 49: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 2 som en funksjon av tid.	71
Figur 50: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 3 som en funksjon av tid.	72
Figur 51: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 4 som en funksjon av tid.	72
Figur 52: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 5 som en funksjon av tid.	73
Figur 53: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 6 som en funksjon av tid.	73
Figur 54: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 7 som en funksjon av tid.	74
Figur 55: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 8 som en funksjon av tid.	74
Figur 56: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 9 som en funksjon av tid.	75
Figur 57: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 10 som en funksjon av tid. ...	75
Figur 58: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 11 som en funksjon av tid. ...	76
Figur 59: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøket hvor vann ble sluppet mot et gitter med 50 mm lysåpninger.....	76
Figur 60: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøket hvor vann ble sluppet mot en tett treplate, gitt som en funksjon av tid.	77
Figur 61: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøket hvor sørpe ble sluppet mot en tett treplate, gitt som en funksjon av tid.	77
Figur 62: Det standardiserte avviket mellom de beregnede kreftene på barrierene, og de som ble målt i forsøkene.	90
Figur 63: Det standardiserte avviket beregnet likt som i figur 62, men hvor arealet av barrieren som treffes av skredet settes lik det projiserte arealet i alle beregningsmetodene....	91
Figur 64: Prosentavviket mellom de beregnede kreftene på barrierene i enkeltforsøkene som er gjort, og de målte kreftene i forsøkene.....	93

Liste over tabeller

Tabell 1: Ulike sikkerhetsklasser og den nominelle årlige sannsynligheten for skred som kan godkjennes for hver klasse.	5
Tabell 2: Friksjonsverdier foreslått brukt for designskred med ulike gjentaksintervall.....	27
Tabell 3: Tabell for bestemmelse av glidefaktoren ved beregning av krefter fra snøsig, hentet fra Margreth (2007).	33
Tabell 4: Ulike verdier av koeffisienten ω , ut fra den gjennomsnittlige massetettheten i det liggende snødekket.	33
Tabell 5: Forholdet mellom hastigheten i en skalert modell og fullskala forsøk, som nødvendig for å holde geometriske, kinematiske og dynamiske forhold konstant..	64
Tabell 6: Oversikt over utførte forsøk.	68
Tabell 7: Oversikt over målt hastighet, flyte høyde og maksimal totalkraft på barrieren.....	70
Tabell 8: Beregning av statiske laster på barrierene ut fra målingene på strømmingen fra forsøkene.	78
Tabell 9: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres med den hydrodynamiske metoden..	79
Tabell 10: Verdiene for koeffisienten α funnet ved minste kvadraters metode mellom beregnede og målte krefter i forsøkene.	80
Tabell 11: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres med Armanini og Scottons metode. ..	80
Tabell 12: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres med Lichtenhahns metode.....	81
Tabell 13: Verdiene for koeffisienten k funnet ved minste kvadraters metode mellom beregnede og målte krefter i forsøkene..	81
Tabell 14: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres med Hübl og Holzingers metode.....	82
Tabell 15: Arealutregninger for det projiserte arealet av gitrene som treffes av skredmassene ved ulike flyte høyder.....	83
Tabell 16: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres ved beregning av strømningsmotstanden til barrieren.	84
Tabell 17: Verdiene for koeffisienten C_D funnet ved minste kvadraters metode mellom beregnede og målte krefter i forsøkene.	84
Tabell 18: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres ved oppskalering av statiske laster som beskrevet i avsnitt 3.4.4.3.	85
Tabell 19: Verdiene for koeffisienten β funnet ved minste kvadraters metode mellom beregnede og målte krefter i forsøkene.	85
Tabell 20: Oppsummering av de totale kreftene på barrierene som målt i forsøkene og som beregnet med metodene beskrevet i avsnitt 7.2.1 til 7.2.7.	86
Tabell 21 Prosentavvik mellom målte og beregnede verdier, som beregnet med ligning 39. .	87

Symbolliste

Flere ligninger hentet fra eksterne kilder er skrevet om for å opprettholde en ryddig symbolbruk i oppgaven. Symbolene som brukes er samlet i lista nedenfor. I enkelte uttrykk brukes det indekser som ikke nevnes i lista, men betydningen fremgår da av teksten rundt.

A_p = projisert areal

C_D = dragkoeffisient

B = bredde

d = diameter

r = radius

L = lengde

ρ = tettheten til skredmassene

h = høyde, enten på en barriere, eller i forhold til et fast referansepunkt

h_{fl} = flyte høyde ved fri strømming

h_s = tykkelsen på et liggende snødekke

g = tyngdeakselerasjonen, satt til

m = masse

ϕ = helningsvinkel på terrenget

μ = friksjonskoeffisient for basal friksjon

ξ = koeffisient for friksjonseffekt som følge av viskositet

P = kraftresultant

p = trykk

W = arbeid

N = glidefaktor

K = sigefaktor

E = energi

K_c = lastreduksjonsfaktor brukt i Hertz' lastberegningsmetode for blokker

k, α og β = koeffisienter kalibrert mot empiriske data, brukt i ulike beregningsmodeller

s = deformasjon

t = tid

V = volum

δ = helning på energilinje S = total friksjon beregnet med Voellmys friksjonslov

Introduksjon

Oppgjennom historien har det vært en rekke situasjoner hvor det har oppstått skader på både folk og bebyggelse på grunn av leirskred, snø-, flom- eller sørpeskred. Likevel fortsetter det å være bruk av områder det kan være fare for skred, for geografien i landet er slik at det stadig finnes grunner for å bygge der. For at det skal være mulig å bruke disse områdene, må en god kartlegging av faresoner legges til grunn, og sikringstiltak utføres.

Et eksempel på eksisterende bebyggelse hvor det planlegges sikring mot skred for å kunne opprettholde bruken, er delen av Longyearbyen som ligger ved utløpet av Vannledningsdalen. Her har sørpeskred gjentatte ganger ført til store materielle skader, i tillegg til at tre mennesker omkom i et av skredene (Hannus, 2016). Etter en vurdering av situasjonen basert på kostnader og hva bruken av området har å si for befolkningen og arealet rundt, er det bestemt at sikringstiltak skal utføres, hvilket er et pågående prosjekt per dags dato (Longyearbyen Lokalstyre, 2018).

I forbindelse med dette sikringsprosjektet er det foreslått flere alternativer, hvorav ett innebærer bruk av fleksible nettkonstruksjoner montert normalt på skredbanen (Longyearbyen Lokalstyre, 2018; Jónsson *et al.*, 2015; Jónsson *et al.*, 2018; Kronholm *et al.*, 2021). En av de større ulempene ved dette forslaget, er at det ikke er noen dokumentert erfaring med hvordan nettkonstruksjoner virker i sikring mot sørpeskred. Det er derfor flere spørsmål som må besvares før løsningen kan installeres med tilstrekkelig sikkerhet uten å overdimensjoneres kraftig.

1.1.1 Praksis i sikring mot sørpeskred gjennom historien

Det var først på starten av 80-tallet at det virkelig ble kjent hvor omfattende problemet med sørpeskred var i Norge. Frem til da var omfanget av skredtypen kun kjent i særlig utsatte områder, som for eksempel i Longyearbyen etter at det hadde gått et større skred der i 1953 (Jónsson og Gauer, 2014). For å samle erfaringene fra ulike steder og utvikle kunnskapen videre, ble det satt opp et eget forskningsprogram på sørpeskred hos NGI i 1983. Dette skulle bidra til bedre forståelse av når og hvor sørpeskred ble utløst, og hvordan sannsynligheten for omfattende skader fra utløste skred kunne reduseres (Hestnes, 1996). Kunnskapen opparbeidet om blant annet utløsningsårsakene for skredene utvikles stadig i håp om å få et utbredt varslingsystem for skredfare (Skuset, 2018). En slik varslingsystem kan kombineres med evakuering, sprenging eller dosing for å gi sikring uten permanente inngrep, og vil derfor være spesielt viktig i områder hvor slikt ikke er aktuelt.

Evakuering og sprengning er kjente begreper fra sikring mot andre skredtyper. Dosing derimot, er spesielt rettet mot sørpeskred. Det innebærer å åpne dreinsveien til et snødekke i et potensielt utløsningsområde ved å fjerne snø med bulldoser. Dersom utløsningsområdet er i en bekkedal eller et elveløp, betyr det å brøyte bunnen av dalen, slik at det frie vannet kan sige dit og renne ut som vist i figur 1. Dette er en gammel metode, og er et av tiltakene som ble satt i gang i Vannledningsdalen etter skredet i 1953. Metoden brukes fremdeles i dag, men det er ønskelig å finne alternativer fremover som kan erstatte den (Jónsson og Gauer, 2014).

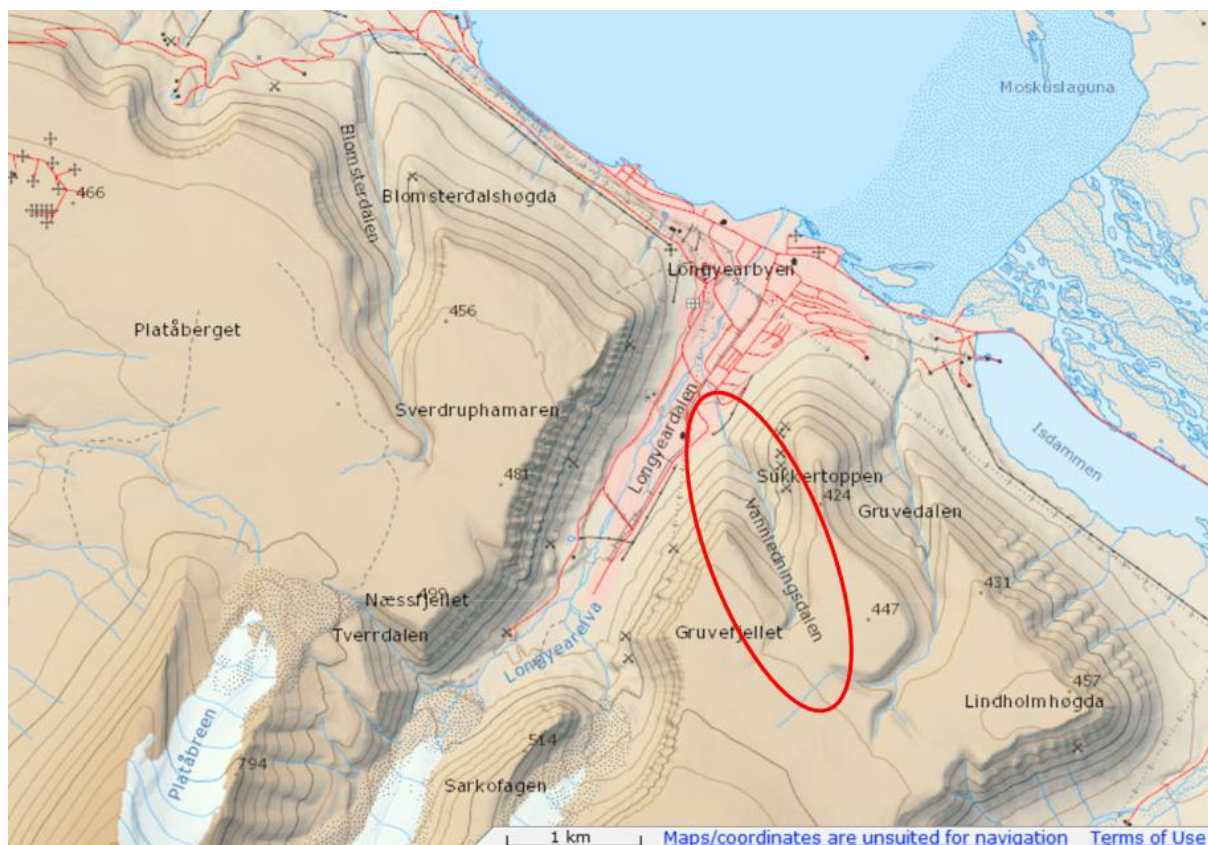


Figur 1: Foto fra dosing av Vannledningsdalen. Venstre bilde er hentet fra Jónsson og Gauer (2014), høyre fra Hoseth et al. (2018).

Alternative sikringstiltak mot sørpeskred er blant annet ledevoller, kanaler, kontrolldammer, sedimenteringsbasseng og flytting av nødvendig infrastruktur opp på broer over skredløpet (Norem, 2014). Ved planlegging av slike tiltak, er sørpeskred blitt behandlet omtrent på samme måte som flomskred oppigjennom. Riktignok viser erfaring at sikringstiltak mot flomskred ofte også er effektive mot sørpeskred, men det er likevel anbefalt i statens vegvesens håndbok «Veier og snøskred» å være forsiktig dersom dette skal gjøres ved dimensjonering av nevnte tiltak, som for eksempel ledevoller (Statens vegvesen, 2011). Det er fordi sørpeskredene skiller seg fra flomskred på punkter som gjerne er viktige i dimensjonering. For eksempel har de gjerne større hastigheter og klatrehøyder på voller enn flomskred (Norem, 2014). Effekten av dette er noe av det som må undersøkes når fleksible nettkonstruksjoner skal tas i bruk, som forhåpentligvis blir det neste steget i sikring mot sørpeskred.

1.1.2 Introduksjon til situasjonsstudiet i Vannledningsdalen på Svalbard

Delene av Longyearbyen som har vært utsatt for skader på grunn av sørpeskred, ligger ved utløpet av Vannledningsdalen, i området rundt Haugen. Se figur 2 for kart. Her er det registrert ødeleggende sørpeskred både i 1953, 1989 og 2012, og iallfall fem til i starten av det 19. århundret (Hannus, 2016; Jónsson og Gauer, 2014).



Figur 2: Kart over området rundt Vamledningsdalen, hentet fra Norsk polarinstitutt (u. å.). Dalen er markert med en rød ring i figuren.

De største sørpeskredene løses ut i øvre del av dalen, mens mindre skred utløses lengre ned (Hoseth *et al.*, 2018). På grunn av formen og brattheten i dalen, kan utløste sørpeskred forventes å transporteres helt ut i Longyeardalen, uavhengig av utløsningssted. Her danner utløpet en vifteformasjon som kan nå eksisterende bebyggelse dersom sikringstiltak ikke utføres. Det er tidligere bygd en ledevoll for å øke sikkerheten til den sør-vestlige delen av bebyggelsen i den naturlige faresonen, men nyere beregninger har vist at denne hverken er lang nok eller høy nok til å hindre overtopping ved store sørpeskred. I tillegg endrer ledevollen skredbanen slik at skredmassene kommer nærmere sentrumsområdene, hvilket gjør bebyggelse på den andre siden av elveløpet mer utsatt (Statens vegvesen, 2018).

Figur 3 viser utløpssonen til sørpeskred med ulike gjentaksintervall, basert på beregninger gjort med simuleringprogrammet RAMMS Debris Flow. Her er en terrengmodell med den eksisterende ledevollen lagt inn, slik den er før eventuelle endringer gjøres. Figuren er hentet fra Jónsson *et al.* (2015), og de markerte utløpssonene er kun omtrentlige, da effekten av hus ikke er tatt med i beregningene, men tatt hensyn til i ettertid ved skjønn. Likevel viser figuren tydelig at det i dag er bebyggelse der det kan forventes skredutløp med gjentaksintervall på både 5000 og 1000 år.



Figur 3: Faresonekart for sørpeskred fra Vannledningsdalen slik situasjonen ser ut uten ytterligere sikringstiltak. Rød linje markerer ytterkanten av faresonen for skred med gjentakintervall på 5000 år, oransje linje markerer det samme for 1000 år, og gul for 333 år. Figuren er hentet fra Jonsson et. al. (2015).

Ifølge byggforskrift TEK10, som er byggforskriften brukt i skredsikringen av Longyearbyen per dags dato (Kronholm *et al.*, 2021), skal bebyggelse deles inn i sikkerhetsklasser etter brukskategori. Videre må bebyggelsen følge kravene til maksimal skredfaretoleranse som følger med den respektive sikkerhetsklassen (Byggteknisk forskrift, 2010). Beskrivelser av de enkelte sikkerhetsklassene og maksimalt tillatte faregrader for hver klasse er gjengitt i tabell 1. I området nedenfor Vannledningsdalen er flere av byggene hoteller og flermannsboliger, og er derfor i sikkerhetsklasse S3. Likevel er det kun lagt inn krav i prosjektutlysningen om at området skal sikres i henhold til sikkerhetsklasse S2, men med en anmodning om å få så mye som mulig av bebyggelsen inn under kravene for sikkerhetsklasse S3. Tabell 1 viser hvordan dette innebærer at bebyggelsen ikke skal ligge innenfor faresonen for skred med gjentakintervall på mindre enn 1000 år, og at de aller helst skal ligge utenfor faresonen ved 5000 års gjentakintervall også.

Tabell 1: Ulike sikkerhetsklasser og den nominelle årlige sannsynligheten for skred som kan godkjennes for hver klasse, gjengitt fra Byggeteknisk forskrift (2010).

Sikkerhets-klasse for skred	Konsekvens	Største nominelle årlige sannsynlighet	Retningsgivende eksempler
S1	Liten	1/100	Garasje, uthus, båtnaust, mindre brygger, lagerbygning med lite personopphold
S2	Middels	1/1000	Enebolig, tomannsbolig, eneboliger i kjede/rekkehus/boligblokk/fritidsbolig med maksimum 10 boenheter, arbeids- og publikumsbygg/brakkerigg/overnattingssted hvor det normalt oppholder seg maksimum 25 personer, driftsbygning i landbruket, parkeringshus og havneanlegg
S3	Stor	1/5000	Eneboliger i kjede/rekkehus/boligblokk/fritidsbolig med mer enn 10 boenheter, arbeids- og publikumsbygg/brakkerigg/overnattingssted hvor det normalt oppholder seg mer enn 25 personer, skole, barnehage, sykehjem og lokal beredskapsinstitusjon
§ 7-3 første ledd	Særlig stor	Skal ikke plasseres i skredfarlig terreng	Bygninger som har nasjonal eller regional betydning for beredskap og krisehåndtering, slik som regionsykehus, regional/nasjonal beredskapsinstitusjon og lignende, samt byggverk for virksomheter som omfattes av storulykkeforskriften (virksomheter med anlegg der det fremstilles, brukes, håndteres eller lagres farlige stoffer).

Det er altså tydelig at tiltak er nødvendig for å få samsvar mellom sannsynligheten for skred og kravet til sikkerhetsnivå. Siden skredulykken i 1953 er dette løst ved at dalbunnen doses om våren for å hindre store sørpeskred i å løses ut. Tiltaket reduserer sannsynligheten for skred, og gjør med andre ord utløpssonene markert i figur 3 mindre enn hva terrenget og de klimatiske forutsetningene tilsier.

Dessverre hindrer ikke vårdosingen sørpeskred initiert tidligere i vintersesongen, som det er antatt at vil forekomme oftere fremover på grunn av økt temperatur og flere tilfeller av kraftig nedbør (Isaksen et. al, 2017). Det er i Hoseth *et al.* (2018) argumentert med at det ikke er aktuelt å gjennomføre dosing tidligere på året, både fordi vinddrift av snø motarbeider effekten den har, og fordi faren for snøskred gjør arbeidsoppgaven farlig. Sidene i Vannledningsdalen gjennomgående har helninger på over 27°, og i større områder også over 35°. Dalen er en typisk terrengfelle, slik at et opphold der kun er forsvarlig ved lav snøskredfare. Slike forhold kan det ikke garanteres at vil komme ofte nok til at det er mulig å dose dalen når det er ønskelig tidligere i sesongen. Dosing er derfor ikke lengre vurdert tilstrekkelig for å sikre området mot sørpeskred, hvilket har ført til at sikringsprosjektet i dalen er igangsatt. Formålet med prosjektet er derfor mer spesifikt å forebygge skader ved skredhendelser om vinteren og i tilfelle dosing om våren ikke blir gjennomført (Hoseth *et al.*, 2018).

Følgende tre sikringsløsninger er presentert som aktuelle i forprosjekteringsrapportene lagt frem hittil (Kronholm *et al.*, 2021; Jonsson et. al., 2018):

- 1) Bygging av en ny ledevoll på den ene siden av elveløpet, kombinert med heving og forlenging av den eksisterende ledevollen på den andre siden. I tillegg må brua hvor vei 500 krysser elva rives og bygges på nytt.
- 2) Bygging av en svingvoll på ene siden av elveløpet, kombinert med heving og forlenging av den eksisterende ledevollen på andre siden, slik at den også blir en svingvoll. Slik styres sørpeskredene parallelt med vei 500, mot et areal hvor det bygges et basseng for å samle opp massene. Dette fjerner behovet for å skifte ut brua.
- 3) Installasjon av 14 nettkonstruksjoner som kontrolldammer ned gjennom hele Vannledningsdalen, kombinert med bygging av en 3 meter høy ledevoll på den ene siden av elveløpet, og forlenging og heving av den eksisterende ledevollen. Nettkonstruksjonene forventes å redusere massetransporten nede ved kryssingen av vei 500 nok til at ei ny bru ikke er nødvendig. I tillegg vil de gjøre det mulig med lavere og kortere ledevoller enn i alternativ 1, men sees ikke på som en fullverdig løsning alene.

1.1.3 Problemstilling

Fordi sikringsløsningen presentert som alternativ 3 inkluderer tiltak det ikke finnes erfaring med virkningen av, ble dette alternativet tatt inn i vurderingen senere enn de andre. Det er nemlig usikkert hvor mange nett som behøves og hvilken snømengde hvert av dem må dimensjoneres for, mens konsekvensene av en feilvurdering er store (Jónsson og Gauer, 2014). Ved nærmere betraktning i ettertid, i forbindelse med en ny forprosjekteringsrapport tidligere i år, er det likevel funnet ut at alternativet er aktuelt til tross for usikkerhetene (Kronholm *et al.*, 2021).

I lastberegningene i rapporten er det antatt at kreftene fra sørpeskred kan beregnes på samme måte som lettflytende flomskred med samme massetetthet og hastighet. Dette kan rettferdiggjøres i en forprosjektering ved at omtrentlige resultater er nok til å avgjøre om sikringsløsningen er gjennomførbar eller ikke. Videre i detaljprosjekteringen må det derimot legges ned arbeid i å undersøke gyldigheten til antakelsen, for å få til en løsning som er sikker nok uten unødvendig dyre marginer. Alternativt kan det finnes en annen lastberegning metode tilpasset sørpeskred. Per dags dato er det ingen kjente forsøksresultater fra interaksjoner mellom sørpeskred og nettbarrierer, men det er funnet resultater fra forsøk hvor belastningen på en frittstående, rigid søyle er truffet av sørpeskred. Dette er publisert i

Jaedicke *et al.* (2008). Det er ikke kjent at det er gjort gode simuleringer av interaksjonen med nett. For å finne en fornuftig beregningsmetode og være sikker på at den egner seg til sørpeskred og nettbarrierer, må dette gjøres noe med.

I denne oppgaven er det gjort nedskalerte forsøk med rigide gitre som treffes av sørpeskred, som en begynnelse på undersøkelsene. Resultatene fra forsøkene sammenlignes med simuleringer i programmet REEF3D for å finne ut om programmet kan egne seg til simulering av interaksjonen. I tillegg sammenlignes kreftene på barrieren i forsøkene med lastberegninger utført etter metoder etablert for flomskred. Metodene varierer i hvilke antakelser de bygger på, og en sammenligning kan derfor gi informasjon om hvilke antakelser som kan overføres til sørpeskred, og hvilke som ikke kan det. I tillegg til dette vil forsøkene gi et inntrykk av hvordan strømmingen til skredene påvirkes av ulike maskeåpninger, og i hvilken grad den stoppes av gitrene. I forprosjekteringen i Vannledningsdalen er det antatt at skredene stoppes fullstendig ved hver barriere, hvilket er en enormt viktig antakelse både for lastberegningene på konstruksjonene og de beregnede utløpssonene.

Problemstillingen er begrenset ved at det kun behandles rigide konstruksjoner i forsøkene og simuleringene i oppgaven. Det er fleksible nett som brukes i sikring mot våte skred, og det er derfor dette som vurderes i Vannledningsdalen. Dessverre har det ikke vært mulig å få til forsøk på nett med en fleksibilitet som tilsvarer ringnettene som brukes, og fordi det heller ikke foreligger informasjon om interaksjonen mellom sørpeskred og rigide gitterkonstruksjoner, har det å finne dette vært et naturlig første steg på veien. Forhåpentligvis kan forsøkene og simuleringene danne et grunnlag for videre arbeid med sørpeskred, og kombineres med erfaring fra sikring mot flomskred og steinsprang for å gjøre gode vurderinger om sikringstiltakene i Vannledningsdalen.

Teori

2.1 Sørpeskred

Sørpeskred er en skredtype som har forårsaket store skader på både infrastruktur og mennesker i Norge oppgjennom tidene, og som er kjent for store ødeleggelser i skredbanen som følge av høye hastigheter og høy massetetthet (Jaedicke *et al.*, 2008). Skredene består i utgangspunktet av en blanding av snø og vann, men kan være sterkt eroderende, slik at avsetningene består av både snø, stein, jord og andre organiske materialer (Norem, 2014).

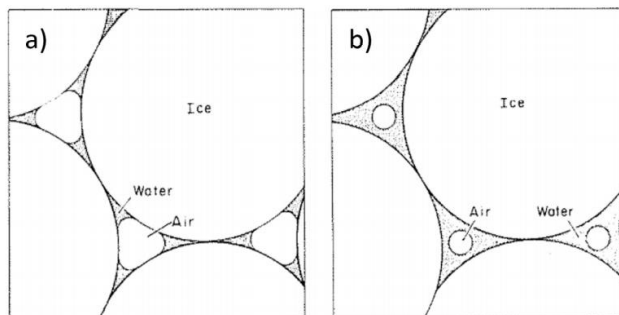
Den eroderende effekten er blant egenskapene som gjør sørpeskred problematiske til tross for sjeldne forekomster sammenlignet med for eksempel snøskred. I en rapport skrevet av Bjordal og Helle (2011) over registrerte skredhendelser på veinettet i Norge, kommer det frem at kun omtrent 2% av alle registrerte skred på veinettet i Norge i perioden mellom 2000 og 2009, er sørpeskred. Over 15% av de registrerte sørpeskredene gjorde skade på veidekket/veikroppen, som er enn høyere prosentandel enn for noen andre skredformer bortsett fra flomskred.

2.1.1 Dannelse og utløsning

Sørpe dannes når snø blir tilstrekkelig mett med vann, hvilket kan skje når vanntilførselen til et snødekke overstiger dreneringskapasiteten (Hestnes, 1996). Dersom det frie vanninnholdet i snøen overstiger 15 volumprosent, er massene definert som sørpe (Lied og Kristensen, 2003). Dette skjer gjerne i perioder med kraftig regn eller snøsmelting, hvor man regner den kritiske nedbørsgrensa for å være på minimum 50 mm per døgn, eller tilsvarende vannmengde tilført ved smelting. Erfaring viser også at det liggende snødekket bør være minst 0,5 meter tykt for å kunne samle tilstrekkelig store vannmengder til at et sørpeskred av særlig størrelse kan bygges opp og utløses. Dette fordi tynnere snødekker smeltes før de rekker å bli mett med vann, slik at det ikke er nok snø igjen til å gjøre store skader når metningen som kreves for utløsning er oppnådd (Norem, 2014).

Skredene løses vanligvis ut i vesentlig flattere områder enn hva stein- og snøskred gjør, og kan derfor være en trussel i terreng som ellers ikke byr på skredproblematikk. Utløsningen skjer typisk i 5°-25° helning. (Lied og Kristensen, 2003; Norem, 2014). I terreng brattere enn 25° samles det sjeldent opp nok vann i snøen til at sørpe dannes, og det går dermed ikke sørpeskred like ofte i bratte områder.

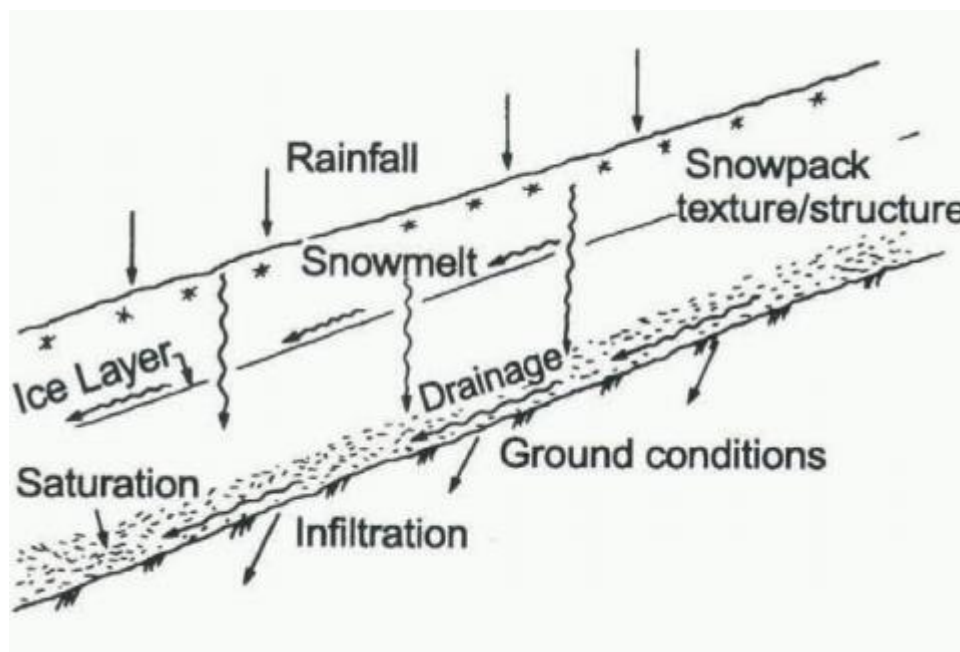
Det er gjort undersøkelser på hva slags snø som gir størst fare for sørpeskred, blant annet i Skuset (2018). Det som er funnet ut, er blant annet at grovkornet snø med et svakt lag av kantkorn i bunnen har en oppbygning som er spesielt utsatt. Det er nemlig porer mellom partiklene i snøen uansett forhold, selv om både strukturen og dermed massetettheten påvirkes av vær og temperatur. Oppbygningen er illustrert i figur 4. Dersom det er kontakt mellom luftbobla i ei pore og snøkornene rundt, har snøen et såkalt pendulert regime, som er mer stabilt enn sørpe. Hvis snødekket derimot er så vannmettet at luftboblene i porene ikke fyller opp nok volum til å være i kontakt med snøkornene, blir disse omsluttet av vann, og et fenikulert regime oppstår (Colbeck, 1974).



Figur 4: a) Pendulert regime, hvor luftboblene er i kontakt med de omliggende snøkornene. b) Fenikulert regime, hvor snøen er mer vannmettet, og luftboblene er omringet av vann på alle kanter. Figuren er hentet fra Colbeck (1974).

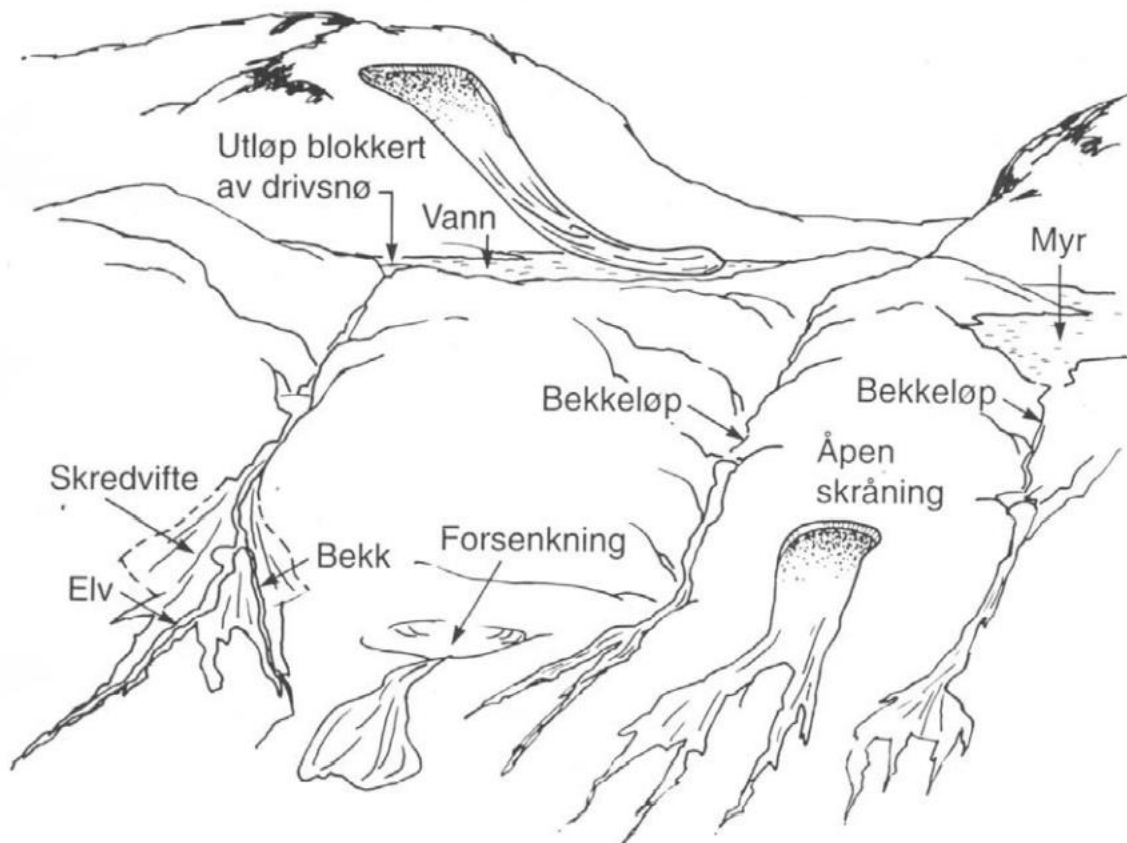
I et fenikulert regime svekkes bindingene mellom snøkornene av vannet, hvilket reduserer skjærstyrken til dekket. Dette fører til at det skal mindre drivende krefter til for at skred løses ut. For masser liggende på et hellende underlag, virker en gravitasjonskomponent drivende nedover langs bakken. Ved høy vannmetning øker massetettheten til snødekket, og dermed også størrelsen på gravitasjonskomponenten (Colbeck, 1974). Når størrelsen overstiger både strekkraftene i massene og den basale friksjonen, altså friksjonen mot underliggende masser, løses skredet ut. Dette er det spesiell fare for dersom det er et svakt lag med kantkorn nær bunnen av snødekket, fordi friksjonen i laget er liten.

Det kan være flere naturlige og menneskeskapt årsaker til at vanninnholdet i snøen overstiger nivået hvor snøen er stabil, slik at den går over til et fenikulert regime. De største faktorene er som nevnt kraftig regnvær og snøsmelting, men det kan også skje dersom dreneringen ut fra et snødekke blokkeres på grunn av skredavsetninger, fyllinger, snøfonner, issamlinger og lignende. Underlag av glatt svaberg eller frossen mark er spesielt utsatt for dette. Det er fordi infiltrasjonen av vann mot slike underlag er liten, slik at vannet kun kan dreneres bort via veier på overflaten. På spesielt jevne underlag kan de naturlige dremskanalene på overflaten være både få og små, og faren for blokkeringer blir stor (Norem, 2014). Figur 5 illustrerer bevegelsesmønsteret til det frie vannet i snøen.



Figur 5: Illustrasjon av hovedfaktorene som påvirker mengden fritt vann i snødekket. Figuren er hentet fra Hestnes (1996).

På grunn av permafrosten er Svalbard spesielt utsatt for sørpeskred. I tillegg er Vannledningsdalen et naturlig elveløp, hvilket gjør vanntilførselen stor generelt. Elveløpet får inn vann fra et nedslagsfelt mellom Sukkertoppen og Gruvefjellet på om lag 1765 dekar (NGI, 2015). Dette gjør dalen utsatt for sørpeskred ved at kraftig regnvær og snøsmelting kan bygge opp spesielt store vannmengder som skal transporteres gjennom dalen. I tillegg har dalsidene ned mot elveløpet en bratthet på over 28° i større områder, slik at det er fare for snøskred med utløpssone i elveløpet (Kronholm *et al.*, 2021). Avsetningene fra disse skredene kan blokkere dreneringen av vannet i elva. Alt i alt betyr dette at sørpeskred er et problem som burde forventes i en dal som Vannledningsdalen. Andre typiske utløsningsområder enn bratte elveløp som Vannledningsdalen, er vist i figur 6. Disse inkluderer blant annet små forsenkninger i terrenget, vann i utløpsområder for snøskred, og steder hvor de naturlige dreneringssystemene lett kan tettes. Forsenkninger langs eksisterende dreneringsveier er dog aller mest utsatt, ifølge Hestnes (1996).



Figur 6: Illustrasjon av vanlige utløsningsområder for sørpeskred. Det er tydelig at bekk- og elveløp er spesielt utsatt for utløsning av slike skred. Figuren er hentet fra Jaedicke (2014).

2.1.2 Strømning og utløp

Både sørpeskred og flomskred består av større partikler som beveger seg som en enhet med et fluid, så strømningsformen til de to skredformene har store likhetstrekk (Norem, 2014). Likevel er sørpeskred mye mer lettflytende enn flomskred, og de oppnår dermed større hastigheter i skredløpet. For flomskred vil hastighetene typisk variere mellom 5 og 10 m/s, mens sørpeskred kan ha hastigheter opp mot 30 m/s. Dette er hovedsakelig fordi

snøpartiklene sørpeskredene har lavere massetetthet enn vann, mens jord- og steinpartiklene i flomskred har en høyere massetetthet. På grunn av den lave massetettheten flyter partiklene opp mot øvre del av de strømmende massene, hvilket resulterer i et rent vannsjikt ned mot underlaget. Vann har typisk en lavere viskositet enn resten av skredmassene, så dette vannsjiktet øker både hastigheten på strømmingen og utløpsdistansen til skredene (Norem, 2014).

Strømmingen til sørpeskred kan både være laminær og turbulent, alt etter hastigheten til skredet og bratt- og ruheten til underlaget. Enkelte store sørpeskred kan i tillegg utvikle en skredsky over seg (Hestnes, 1996). Dette er ikke tatt hensyn til i denne oppgaven, da det ikke oppsto i forsøkene og trolig ikke vil kunne begrenses i særlig grad av nettkonstruksjoner.

Typisk beveger skredene seg helt til de når hovedvassdrag eller områder med en helning på under 5° (Lied og Kristensen, 2003). Likevel kan de våtere delene av skredmassene bevege seg langt i terreng enda flatere enn 5°. Dette gjør det spesielt vanskelig å definere hva utløpsdistansen til et sørpeskred er. (Norem, 2014) I utgangspunktet er utløpsdistansen til skred et mål på avstanden mellom utløsningspunktet og den ytterste kanten det er avsatt skredmasser ved. For sørpeskred kan det være en betydelig distanse mellom avsetningspunktet til de grove massene, og punktet hvor alt av skredmasser er avsatt. For veier og jernbaner regnes vannet med suspendert finmateriale forholdsvis uskadelig, slik at det er hensiktsmessig å bruke avsetningen til grovmassene i beregning av utløpsdistanse. For boligområder og lignende derimot, kan væskestrømmen føre til skade på hager og kjellere, slik at denne burde tas med i beregningene. I denne oppgaven defineres utløpsdistansen som det nederste punktet skredene legger igjen en avsetning av en betydelig tykkelse, altså sees det bort fra suspensjonsstrømmen. Dette er også definisjonen brukt i Norem (2014), som er en viktig kilde i flere deler av oppgaven.

Hittil er kjente faktorer som påvirker utløpsdistansen til sørpeskred identifisert som blant annet volum, strømningshastighet, partikkelstørrelser, erosjonspotensialet i underlaget, og ruheten i det. Store volum, høye hastigheter og skredmasser med en stor andel finstoff er typiske kjennetegn på lange skred, i tillegg til glatte underlag som sva eller langt og glatt gress. Underlag som lett eroderes bidrar også til volumvekst i skredet, som igjen forlenger utløpsdistansen (Norem, 2014). Installering av sikringsnett i en skredbane forventes å ha en virkning på flere av disse faktorene, blant annet volum, hastighet og størrelsessammensetningen av partiklene i skredet, men hvor stor virkningen er, er foreløpig ikke kjent.

2.1 Fleksible nett i sikring mot sørpeskred

Nettkonstruksjoner har lenge vært i bruk som sikringstiltak mot steinsprang, men er i nyere tid videreutviklet for også å kunne fange opp våte skred som flomskred og små snøskred. Dette gjøres fordi det er funnet klare fordeler ved bruk av nett i stedet for betongdammer, fangvoller og andre kjente tiltak mot våte skred. Fordelene er blant annet at de umiddelbare installasjonskostnadene er lave, og at nettkonstruksjonene i mange tilfeller er mindre skjemmende enn alternativene (Berger *et al.*, 2020; Wendeler, 2016; Håland, G., Langelig, A., 2015). Barrierene påvirker også fiskebestanden lite ved plassering i elveløp, fordi fisken kan bevege seg uhindret under nettet ved normal vannføring. Dette har det vært en større utfordring å tilrettelegge for ved bruk av for eksempel betongdammer.

Teori

Eksempler på bruk av fleksible nettkonstruksjoner som sikring mot flomskred og glidende snøskred er vist i henholdsvis figur 7 og 8.



Figur 7: Fleksible ringnett brukt i sikring mot flomskred. Fotoet tilhører Geobrudd AG, og er hentet fra Håland, G., Langelid, A. (2015).



Figur 8: Fleksible ringnett brukt i sikring mot snøskred i et testområde i Fieberbrunn i Østerrike. Fotoet tilhører Geobrudd AG, og er hentet fra Håland, G., Langelid, A. (2015).

I tillegg til å stoppe eller iallfall bremse skredmassene i allerede utløste skred, er det forventet at kontrolldammene kan bidra til å hindre at de løses ut (Kronholm *et al.*, 2021). Dette begrunnes med at de vil stabiliser snødekket på samme måte som støtteforbygninger gjør i sikring mot snøskred. I utgangspunktet regnes hindringer som for eksempel større masseoppsamlinger i en vannvei som en faktor som øker faren for sørpeskred, fordi de hindrer vanngjennomstrømning. Fordi nettbarrierene slipper vannet gjennom mens de danner en flate snøen hviler mot, virker de forebyggende i stedet. Dette med forbehold om at de dimensjoneres slik at det ikke er fare for dambrudd, da en større masseoppsamling og dambrudd kan føre til store skred også ved forhold det ellers ikke ville løses ut.

Når barrierer treffes av våte skred, utsettes de for store dynamiske krefter som virker over større nettarealer enn ved steinsprang (Volkwein, 2014). Konstruksjonene egnet til sikring mot disse skredene må derfor være enda mer fleksible enn dem brukt mot steinsprang, slik at de kan absorbere mer energi. Dette er i hovedsak oppnådd ved å øke fleksibiliteten i vaierne som holder nettet på plass, men også noe ved å gjøre endringer på selve nettet (Håland, G., Langelid, A., 2015). I Tan et. al. (2020) er det funnet at fleksibiliteten i selve nettet fører til en reduksjon på over 30% av belastningen på fundamentene og forankringene, hvilket kommer i tillegg til reduksjonen på grunn av fleksibilitet i vaierne. Resultatet kommer fra forsøk på en enkelt type nettbarriere truffet av flommasser i ei storskala testrenne. Dermed kan ikke tallet overføres direkte til andre nett og innkommende strømnings uten videre vurdering, men det gir likevel et bilde på størrelsesordenen effekten kan forventes å være i.

I tillegg til å redusere belastningen på fundament og forankringer, er det kjent at fleksibiliteten flater ut lastkurven hele barrieren utsettes for, slik at det umiddelbare støtet på grunn av skredfronten fordeles over et lengre tidsintervall (Song *et al.*, 2018). Det må også regnes med at måten barrieren påvirker den passerende strømmingen avhenger av hvor mye energi som tas opp, og dermed også fleksibiliteten. Disse sammenhengene er det viktig å være klar over ved eventuell bruk av denne oppgaven. Det er nemlig en av begrensningene ved at det kun brukes rigide konstruksjoner i forsøkene og simuleringene, mens formålet med oppgaven er å utvide grunnlaget for vurdering av fleksible konstruksjoner.

For øvrig finnes det også flere typer fleksible nettbarrierer med forskjellige grader av fleksibilitet, varierende maskeformer og -størrelser, og varierende last- og volumkapasitet. Felles for alle er at de må være CE-godkjent for å kunne brukes til sikring, og at lastkapasiteten både i selve nettet og ut til forankringene må kunne dokumenteres (Berger *et al.*, 2020). Den oppgitte lastkapasiteten kan variere mellom de ulike typene, og det er derfor viktig å velge en konstruksjon som er robust nok til å tåle de designskredene den skal sikre mot. Barrierene som foreslås brukt i sikringsløsningen i Vannledningsdalen, er det som kalles RXE-barrierer (Kronholm *et al.*, 2021). Disse leveres av Geobrugg AG, og er mye brukt i sikring mot flomskred. Kapasiteten varierer mellom ulike størrelser, så barrierene kan være dimensjonert for å ta opp en maksimal støtenergi på alt fra 1000 til 8000 kJ. (Håland, G., Langelid, A., 2015)

For sikring mot små, glidende snøskred, er det også testet ut modifiserte RXE-gjerder gjort ekstra fleksible ved bytte av bremsesystem, som har fundamentering og forankringer tilpasset grunnforholdene i frossen, bratt bakke. Nettene er belastet over flere vintersesonger, med både dynamiske laster fra glidende snøskred, og kvasi-statiske laster fra snøsig. Erfaringene fra utprøvingen er at de fungerer bra for å stoppe små, glidende snøskred (Håland, G., Langelid, A., 2015). På grunn av permafrosten vil fundamenteringen og forankringen til nettene i Vannledningsdalen måtte tilpasses frosne grunnforhold. De vil også måtte tåle en kombinasjon av de kvasi-statiske lastene fra snøsig og de dynamiske kreftene fra et skred på toppen. Testene av disse modifiserte RXE-nettene er derfor veldig relevante for situasjonen i Vannledningsdalen, og de positive resultatene fra bruk mot snøskred virker derfor lovende for hvordan nettene kan fungere på Svalbard.

2.1.1 Beskrivelse av foreslått sikringsløsning i Vannledningsdalen

Som nevnt i introduksjonen i oppgaven, innebærer sikringsløsningen med nettbarrierer både installasjon av kontrolldammer, og bygging av svingvoller ved utløpet av dalen. Sistnevnte skal hindre vann og suspenderte finmasser fra skredet i å spre seg ut i en vifteformasjon når det kommer ut i Longyeardalen.

2.1.1.1 Kostnader

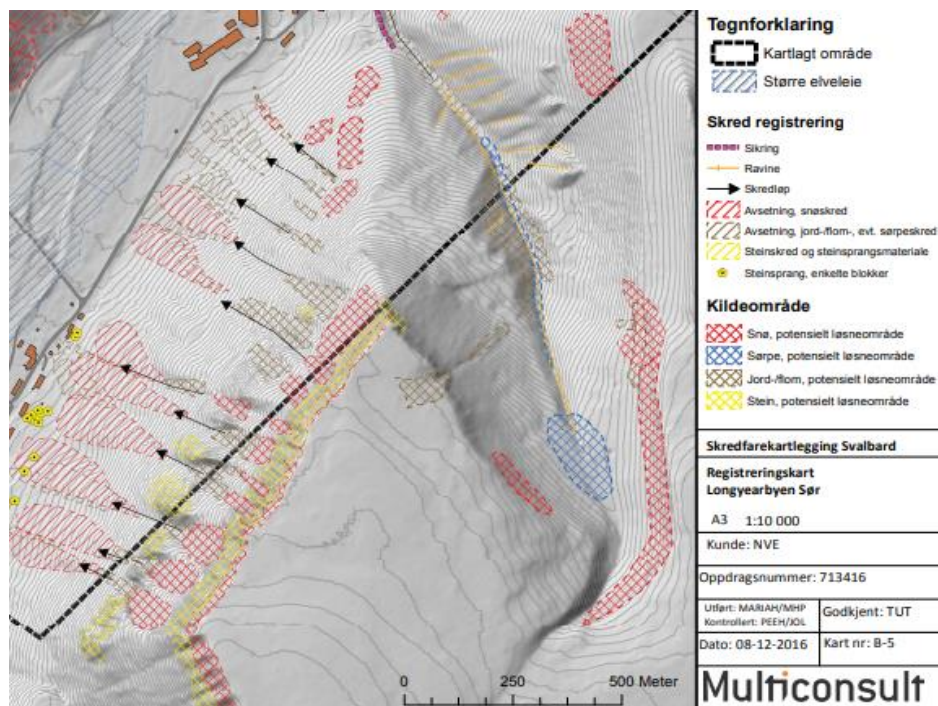
Investeringskostnaden ved bygging og installering av denne løsningen anslås å bli om lag 50-75 millioner kroner totalt. Sammenlignet med andre foreslåtte alternativer med umiddelbar prislapp på 150-165 millioner kroner, er dette en utpreget billig løsning i korttidsperspektiv. Det økonomiske incentivet for å velge den reduseres dog noe av høye vedlikeholdskostnader. Disse forventes å ligge rundt 1,5-2,1 millioner kroner i året, sammenlignet med under 100 000 kroner årlig for alternativene (Kronholm *et al.*, 2021). Det er kjent at de løpende kostnadene i forbindelse med bruk av nettkonstruksjoner i sikring mot flomskred avhenger av hvor ofte nettene må tømmes for masser, og ikke minst hvor enkelt tilgjengelig de er for tømming (Berger *et al.*, 2020). I Vannledningsdalen er det forholdsvis bratte sider og vanskelig å komme til med gravemaskiner uten fjerning av nett lengre ned, eller eventuelt store inngrep i terrenget. I tillegg må det antas at nettene må tømmes for skredmasser iallfall årlig, og muligens oftere for å opprettholde full kapasitet. Dette kan være momenter som fører til de høye anslagene for driftskostnadene.

Hva som vil lønne seg i Vannledningsdalen er derfor avhengig av tidsperspektiv, men nettløsningen presenterer et annerledes kostnadsforløp enn alternativene, hvilket gjør den viktig i vurderingene for å finne en kostnadseffektiv løsning.

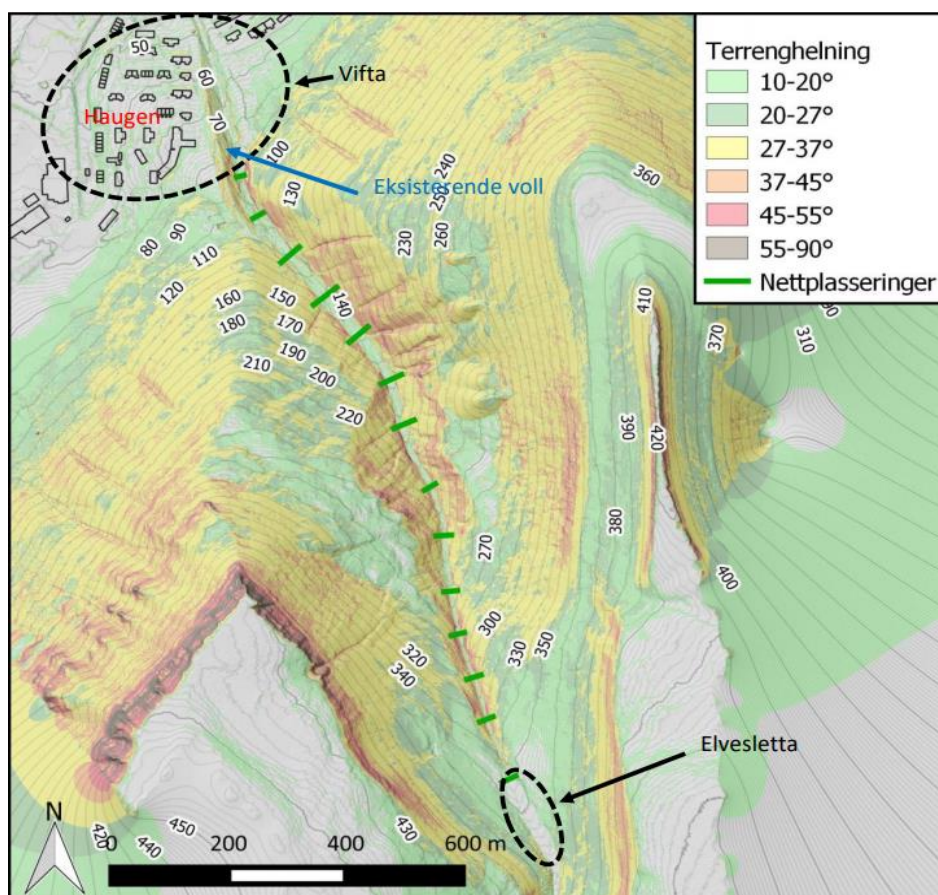
2.1.1.2 Plassering

Det er kjent at fleksible nettbarrierer er spesielt effektive i sikring mot flomskred hvis de plasseres i serie nært løseområdet, og at de da kan stoppe mindre flomskred fullstendig (Volkwein, 2014). Dersom det antas at dette også gjelder sørpeskred, betyr det at det bør planlegges nett med jevne mellomrom nedenfor de potensielle utløsningsområdene i Vannledningsdalen.

Erfaring fra tidligere hendelser peker ut to områder i dalen som potensielle utløsningsområder, som vist i figur 9 (Hannus, 2016). Likevel er det i Jónsson *et al.* (2018) kommet frem at det er mulige utløsningsområder i hele dalen, hvilket betyr at det må installeres nett jevnt nedover hele strekket for å kunne sikre mot skred fra alle de mulige utløpssonene. Figur 10 viser en mulig plassering av kontrolldammene som foreslått i Kronholm *et al.* (2021).



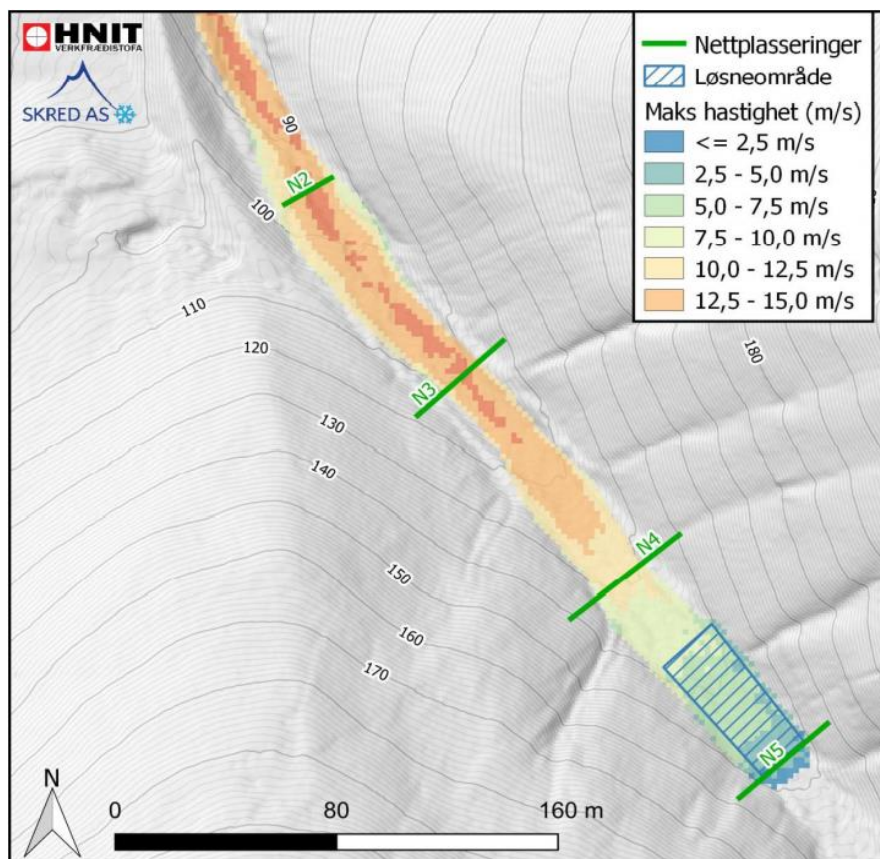
Figur 9: Kart over området rundt Vannledningsdalen med markering av potensielle løsningsområder for ulike skredtyper, og registrerte avsetningsområder fra tidligere skred. Figuren er et utsnitt fra en figur i Hannus (2016).



Figur 10: Kart over Vannledningsdalen med nettplasseringer som foreslått i forbindelse med forprosjekteringen av sikringsløsningen. Nettene er markert med grønne streker, mens de øvrige fargene viser hellingen på terrenget. Dermed gir kartet også informasjon om brattheten på dalsidene, som byr på utfordringer for sikringsløsningen på grunn av faren for snøskred. Figuren er hentet fra Kronholm (2021).

Plasseringen av de 14 nettene foreslått i forprosjekteringen og brukt i kostnadsestimatene, er funnet ved simuleringer gjort i RAMMS Debris Flow med friksjonsverdiene μ og ξ satt til henholdsvis 0,1 [-] og 2500 [m/s^2] (Kronholm *et al.*, 2021). For forklaring av verdiene og diskusjon om bruken av programmet til simulering av sørpeskred, refereres det til avsnitt 3.3.2.

I simuleringene plasseres hvert nett slik at hastigheten på skredmassene ved passering blir omtrent 10 m/s dersom et sørpeskred utløses nedstrøms forrige nett lengre opp i dalen. Nærmere bestemt er områdene definert som 50 meter lange stykker i lengderetningen av dalen, med øvre bruddkant nedenfor hvert etablerte nett. Et slikt løsningsområde er vist i figur 11. Som en øvre grense for tykkelsen på sørpelaget som sklir ut, ble det antatt en fast høyde på 2 meter i alle utløsningsområdene. Bredden på utløsningsarealet og arealet utsatt for massemedrivning ble definert som bredden på dalbunnen. De bratte dalsidene var altså ikke inkludert.



Figur 11: Illustrasjon av fremgangsmåten for å finne nettplasseringene foreslått i forprosjekteringen. Simuleringer gjøres med 50 meter lange utløsningsområder fra rett nedenfor et nett, og neste barriere plasseres i punktet hvor de utløste massene oppnår hastigheter over 10 m/s . I figuren er utløsningsområdet som skal brukes for plassering av nett N4 markert i blått. Figuren er hentet fra Kronholm *et al.* (2021).

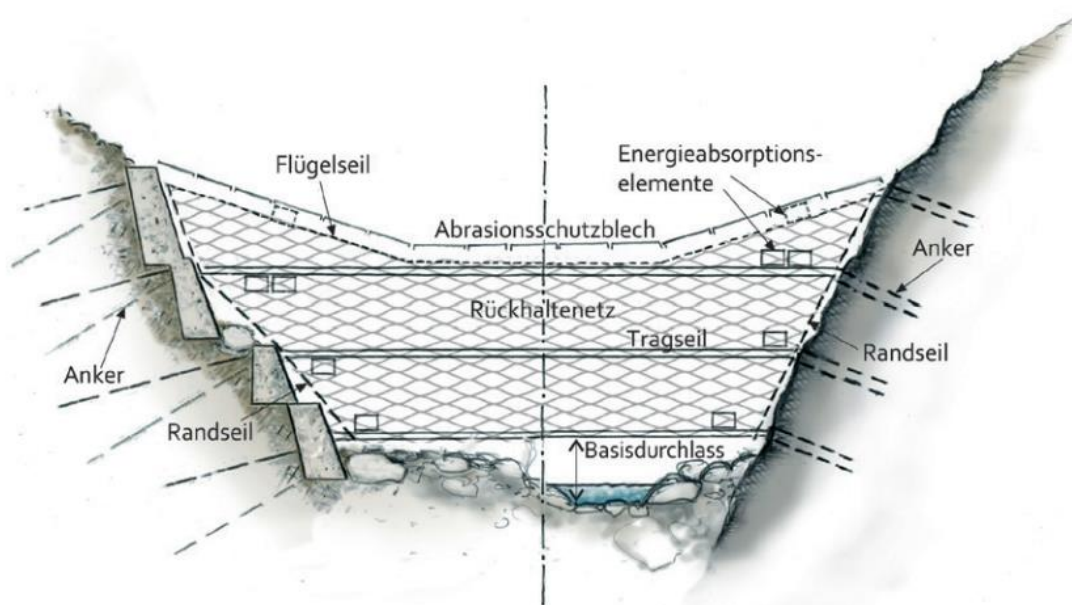
På grunn av varierende grunnforhold og fare for skred fra dalsidene, avviker noen av de foreslåtte plasseringene presentert i Kronholm *et al.* (2021) fra dem beregnet i simuleringene. Dette er både for å hindre at konstruksjonene plasseres steder de kan skades av snøskred fra dalsidene, og for at fundamenteringen skal bli så enkel og billig som mulig. De foreslåtte plasseringene varierer ikke mer enn ± 10 meter fra de beregnede, men fører likevel til at hastigheten til de simulerte skredene kommer opp mot 13 m/s ved enkelte nett.

En viktig antakelse som er gjort for at fremgangsmåten med simuleringsprogrammet skal kunne brukes, er at hvert nett stopper skredbevegelsen helt. Dette er ikke nødvendigvis en konservativ antakelse ved lastberegning på nettene, og definitivt ikke ved beregning av utløpsdistansene på skred etter installering av barrierene. Erfaring fra bruk av ringnett i sikring mot flomskred tilsier at en mengde små steiner, finmasser og fritt vann i skredene passerer gjennom barrierene før en masseoppsamling av større legemer på oppstrøms side reduserer gjennomstrømningen (Wendeler, 2016). Det betyr at det vil kunne tilføres masser til utløsningsområdene illustrert i figur 11, som ikke regnes med dersom fremgangsmåten fra forprosjekteringen brukes. Hvor stor effekten av dette vil være, og om det eventuelt kan dekkes av en margin i den anslåtte skredtykkelsen i utløsningsområdene, må vurderes nøye ved videre prosjektering.

2.2 Typisk oppbygning av nettkonstruksjoner for sikring mot sørpeskred

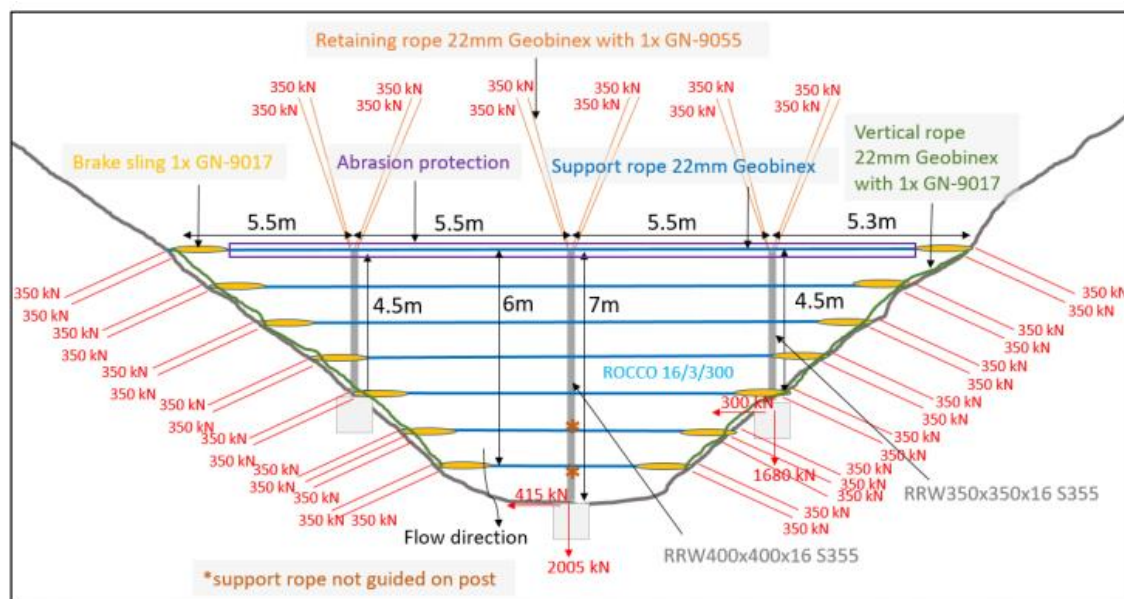
Nettkonstruksjonene i Vannledningsdalen er foreløpig planlagt lik som dem brukt i sikring mot flomskred. Dette innebærer som nevnt RXE-barrierer med en ringnettype kalt ROCCO. Disse er mye mer komplekse enn de rigide gitterkonstruksjonene som brukes i forsøkene og simuleringene i denne oppgaven, og det virker ikke hensiktsmessig å gjengi oppbygningen i detalj. For detaljerte tegninger av tilgjengelige nettløsninger refereres det til leverandørens hjemmeside (Geobruggettside). Likevel vil de viktigste komponentene gås kort igjennom for å få et overblikk over hva konstruksjonene det er snakk om består av.

I en åpen kanal som Vannledningsdalen hvor det ikke er spesielle hindre i kanalbunnen, men en relativt smal bunn og bratte sider, er det naturlig å bruke et oppsett som vist i figur 12 og 13. Figurene viser nettkonstruksjoner spent på tvers av elveløpet, med åpninger ned mot dalbunnen slik at vannet kan strømme uhindret forbi ved normal vannføring. Konstruksjonene består av selve nettingen, støttevauere, vinge- og endekabler, bremseelementer, forankringer og i tilfeller hvor dalen er bred (>15-20 m), støttestolper med tilhørende fundamenter. Figur 12 illustrerer plasseringen av de ulike delene.



Figur 12: Typisk plassering av de viktigste komponentene i fleksible nettkonstruksjoner brukt i sikring mot flomskred i V-daler. Anker = forankringer, Randseil = endekabler, Flügelseil = vinge-kabler, Abrasionsschutzblech = abrasjonsbeskyttelse, Rückhaltenetz = nett, Energieabsorptionselemente = bremseelementer, Tragseil = støttevauere, Basisdurchlass = åpning mot dalbunnen for blant annet å sikre fri strømning ved normal vannføring. Støttestolper er ikke brukt i tilfellet som er illustrert, men plasseringen av disse kan sees i figur 13. Illustrasjonen er hentet fra Berger et al. (2020).

Til tross for at Vannledningsdalen er en såkalt V-dal, er den bred nok til at støttestolper er nødvendig ved alle nettkonstruksjonene som installeres. Dette kan leses av fra kart med høydekurver, og sees fra de foreslåtte designene i Kronholm *et al.* (2021) for nettene nummerert 4 og 11. Det foreløpige designet til nett nummer 11 er vist i figur 13.



Figur 13: Foreslått design av det som i forprosjekteringsrapporten (Kronholm *et al.*, 2021) er nummerert som nett 11. Her vises en konstruksjon med støttestolper, hvor mål og anslåtte krefter i forankringene og fundamenteringene er tilpasset den enkelte plasseringen og skredene barrieren dimensjoneres mot. Figuren er hentet fra Kronholm *et al.* (2021).

Det vil ikke bli gjort dimensjoneringsberegninger for hver enkelt komponent i sikringsnettene i denne oppgaven, men informasjon om hvordan dette gjøres for nett utsatt for flomskred, er gjennomgått i Berger *et al.* (2020). Disse dimensjoneringsprinsippene burde kunne antas overførbare til nett brukt i sikring mot sørpeskred dersom belastningen fra sørpeskredet kan uttrykkes på en måte tilsvarende flomskred.

2.2.1 Nett

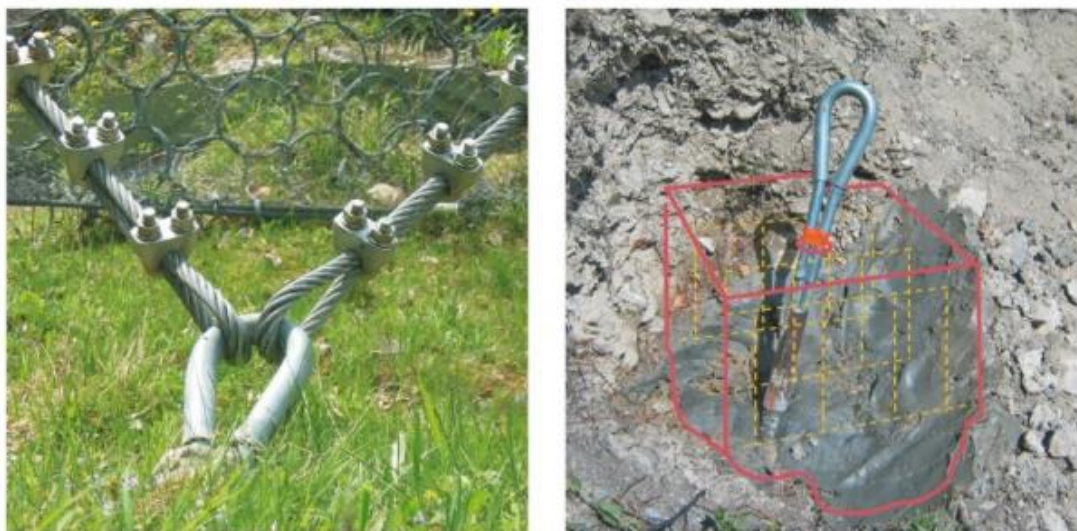
Det finnes flere ulike typer netting som kan brukes i fleksible kontrolldammer, med både runde og kantede maskeåpninger. ROCCO-nettet, som foreslås brukt i Vannledningsdalen, består av ringer av stålvaier flettet inn i hverandre. Dette er det som kalles et ringnett. Ringnett er mye brukt i sikring mot flomskred fordi de runde maskeåpningene gjør nettingen ekstra fleksibel, slik at den kan ta opp mer energi. Ringene gir nemlig rom for større deformasjoner enn firkantede masker, fordi de kan formes til å bli mer firkantede ved stor belastning. ROCCO-nettene leveres med flere ulike maskestørrelser, hvor størrelsen avhenger av bruken.

Hovedkravet til maskeåpningene er at de må være små nok til å fange opp en tilstrekkelig andel av grovmassene i skredet, om det måtte være snø, is eller stein. I tillegg fører små lysåpninger til større dragkrefter på vannet som strømmer gjennom nett, enn tilsvarende nett med større masker. Dette underbygges av hydrodynamiske beregninger som vil beskrives i avsnitt 3.4.4.1. Større dragkrefter på nettene innebærer at mer energi tas opp fra skredet, etter teorien om energikonservasjon. Dermed får strømmingen nedstrøms barrieren lavere hastigheter, og skadepotensialet reduseres. Til gjengjeld betyr økte dragkrefter at belastningen på konstruksjonen blir større, og at den derfor må dimensjoneres for å tåle mer dersom maskeåpningene i nettet er små.

Et annet krav til maskeåpningene i sikringsnett mot sørpeskred, er at de må være store nok til å slippe gjennom ny- og fokksnø, slik at det ikke samler seg opp større snømengder som tetter nettene og senker resthøyden. Denne utfordringen er mindre vanlig ved sikring mot flømskred, så der brukes det ofte finere sekundærnett i tillegg til hovednettene som hittil er beskrevet (Berger *et al.*, 2020). Dette kan være alt fra siltduker til gjerdenetting, og brukes for å holde tilbake mer av massene i skredet, uten at sekundærnettet har noen ytterligere lastbærende effekt. Det å finne den optimale maskestørrelsen, er altså en balanse som krever kjennskap til både snøforholdene i området, vindforholdene og ikke minst grunnforholdene, da alle faktorene kan være begrensende for hva barrieren kan dimensjoneres for.

2.2.2 Støttevaiere og forankringer

Støttevaiere brukes til å fordele kreftene fra skredet ut til sidene, slik at ikke alt tas opp av nettingen alene. Vaierne dimensjoneres ut fra kreftene de kan forventes å bli utsatt for, og kan derfor variere i både tykkelse og antall mellom ulike konstruksjoner. De er som regel fordelt utover høyden på nettet, med minimum en vaier i toppen og en i bunnen. For nettkonstruksjoner i daler forankres vaierne direkte i dalsiden ved bruk av enten wireanker eller selvborende stag med fleksible hoder som vist i figur 14. Wireanker anbefales der det er mulig dersom underlaget består av løsmasser, både fordi det er kjent at innfestingen av vaieren i de selvborende stagene er et svakt punkt, og fordi stagene krever dype borehull det er krevende å få borret i løsmasser, og ikke minst å få fylt ordentlig med gysemasse. Til gjengjeld er gjerne de selvborende stagene billigere å installere (Håland, G., Langelid, A., 2015). For nettkonstruksjoner hvor det ikke er bratte eller høye nok dalsider til at det er aktuelt å forankre støttevaierne i dem, festes vaierne i stedet til støttestolper som brukes til å få en høyde på nettet. Ut fra bratthetskart later det til at dette ikke er nødvendig i Vannledningsdalen (Kronholm *et al.*, 2021). Informasjon om støttestolper og bruken av dem er forklart i avsnitt 3.2.2.



Figur 14: Venstre: Foto av et wireanker brukt til å forankre vaier som holder et nett på plass. Høyre: Foto av et selvborende stag med fleksibelt hode før det støpes rundt den. Geometrien til støpeblokka er tegnet inn med rødt, og armering i gult. Begge figurene er hentet fra Håland, G., Langelid, A. (2015).

2.2.3 Vingekabler

Vingekabler kan brukes til å holde oppe høyden på nett i daler med bratte sider, og til å føre skredmassene inn mot midten av nettet. Sistnevnte reduserer sjansen for erosjon av dalsidene rundt nettet ved overstrømmning, og forankringene til støttevaierne blir beskyttet. Vingekablene festes parallelt med den øverste støttevaieren med klemmer, og ligner i utgangspunktet på resten av støttevaierne, både i forankring og utforming. Forskjellen er at de bøyes oppover rundt 30° nærme sidene av nettet, som vist i figur 12 (Volkwein, 2014). For å beskytte vingekablene og den øverste støttevaieren, settes det gjerne på en form for abrasjonsbeskyttelse. Det er en fysiske skjerming av kablene som hindrer at de skades ved overtopping av barrieren.

2.2.4 Endekabler

Endekablene strekkes opp langs overgangen mellom nettene og dalsiden, og er både festet til selve nettingen, og forankret i bakken med jevne mellomrom. Dette hindrer at det dannes store åpninger mellom nettet og underlaget, hvor skredmassene kan slippe gjennom uhindret. Plasseringen av endekablene er vist i figur 12.

2.2.1 Bremseelementer

I enden av både støttevaierne og vingekablene brukes bremseelementer for å ta opp energi og myke ut lastkurvene på forankringene (Wendeler, 2016). Det finnes flere ulike typer bremseelementer, men felles for gode bremseelementer, er at de får store plastiske deformasjoner ved en belastning som er noe lavere enn det som skal til for å skade forankringene de er festet til. Ved å velge riktige bremseelementer til ulike vaier, kan også deformasjonene tilpasses slik at nettet holder en optimal form gjennom hele skredbelastningen. Et eksempel på en type bremseelementer, er elementene kalt SIFA, som brukes mye i nettkonstruksjoner i sikring mot flomskred og lignende (Bollinger og Spang, 2001). Et slikt element er vist i figur 15. Disse fungerer ved at vaieren elementet festes på, trekkes gjennom et rør formet som en ring med en klemme. Ved tilstrekkelig strekkbelastning på vaieren gir klemma på ringen etter slik at ringdiameteren blir mindre, mens den totale lengden på elementet øker. Oppsettet og virkemåten er illustrert i figur 15 ved å vise et SIFA-bremseelement før belastning, og et etter.



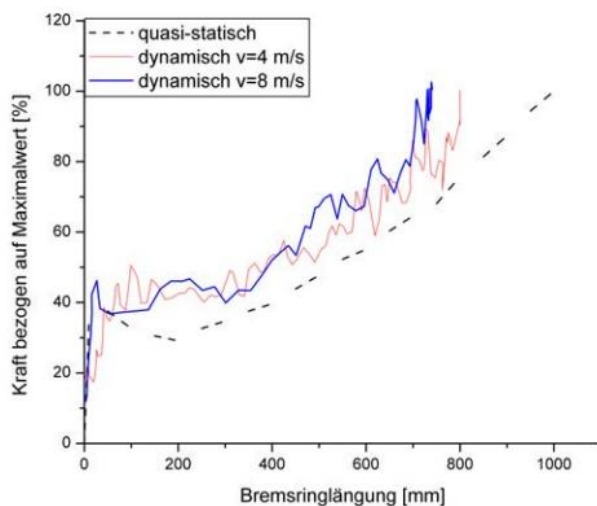
Figur 15: Venstre: ubrukt bremseelement før installasjon. Høyre: tilsvarende bremseelement etter belastning. Røret ringen er laget av har da sklidd gjennom klemma, slik at det har oppstått plastisk deformasjon av vaieren og røret. Begge bildene er hentet fra Wendeler (2016).

Fordi den statiske friksjonskrafta mellom to stive legemer er større enn den glidende friksjonskrafta (Ormestad, 2020), er det en terskel som sørger for at det må en viss belastning til før deformasjonene settes i gang. Dette hindrer at kapasiteten til bremseelementet brukes

opp ved små belastninger som kan tas opp ved elastisk deformasjon av nettingen i konstruksjonen.

Bremseelementer er brukt i lang tid, og akkurat SIFAs oppsett ble patentert av Fatzer AG (senere Geobrugg AG) i 1991. Energien elementene har kapasitet til å ta opp er derfor godt dokumentert, og varierer mellom 70 og 140 kJ per element, avhengig av diameteren på ringen i utgangspunktet (Bolliger *et al.*, 2001). Energien som tas opp på grunn av bremseelementet, kommer både av at den totale deformasjonen i systemet øker, og av friksjonskrafta i klemma som holder ringen sammen.

Størrelsen på energioptaket avhenger av både størrelsen på krafta og deformasjonen. Fordi den glidende friksjonskrafta reduseres ved økt hastighet mellom to legemer (Ormestad, 2020), betyr det at kapasiteten til et bremseelement er noe lavere for dynamiske belastninger med store hastigheter, enn ved små hastigheter. Figur 16 hentet fra (Wendeler, 2016) viser dette tydelig, da bremseelementene i de dynamiske forsøkene ikke er strukket ut fullstendig selv ved maksimal kraft. Effekten er allerede til stede ved hastighetene på 4 m/s og 8 m/s som er realistiske for flomskred. Fordi sørpeskred oppnår vesentlig høyere hastigheter, må denne effekten forventes å være enda større for elementer som skal brukes i sikring mot sørpeskred. Det er derfor viktig at bremseelementene ikke velges likt ved sikring mot sørpeskred som mot flomskred, men heller dimensjoneres ut fra dynamiske tester med hastigheter og massetettheter tilsvarende sørpeskred.



Figur 16: Plottet viser hvor mye kraft et bremseelement av typen GN-9017 må belastes med for å få oppnå ulike deformasjoner, som en andel av den maksimale krafta elementet tåler ved den belastningshastigheten. Den stiplede linja representerer en kvasistatisk belastning, rosa linje representerer en dynamisk belastning av masser som beveger seg med 4 m/s, og blå linje representerer det samme, men med 8 m/s. Kraft bezogen auf Maximalwert = belastning gitt som en andel av maksimalverdien, Bremsringlänge = forlengelse av bremseelementet.

2.2.2 Støttestolper

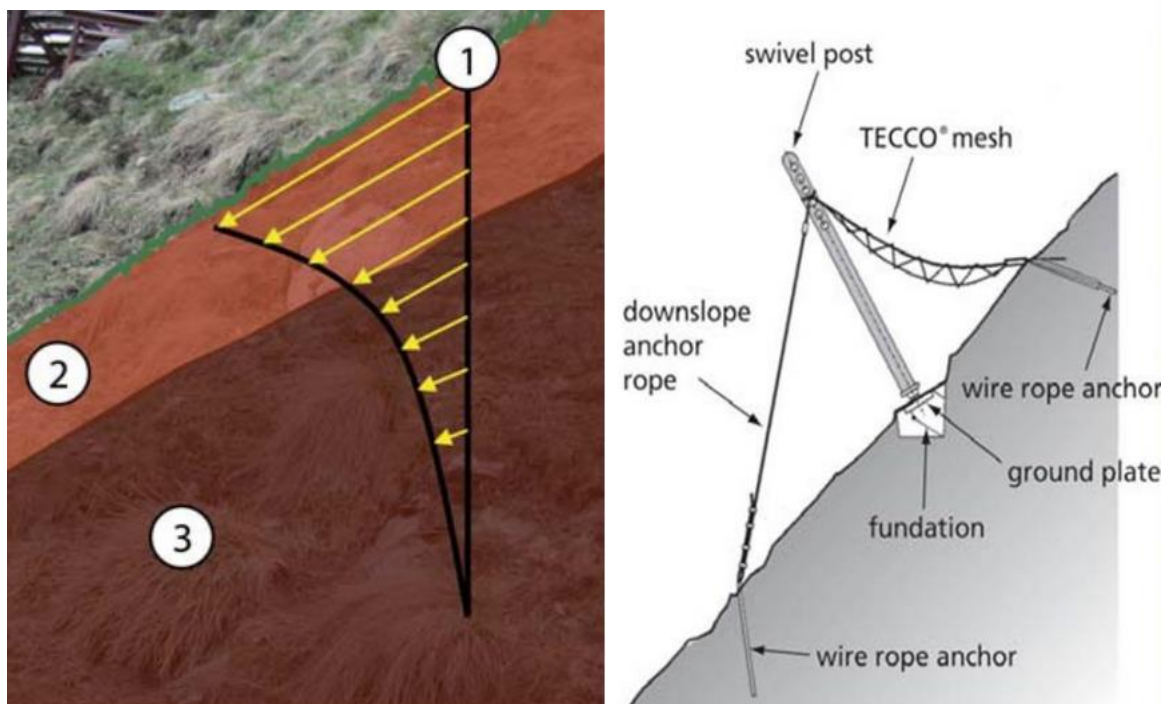
Støttestolper brukes som nevnt ikke i alle nettkonstruksjoner, men i brede daler som krever nett med stort spenn (>15-20m), samt åpne sider hvor det ikke er mulig å strekke barrierene sideveis til høyereliggende terreng. Stolpene i seg selv er stive, men de er leddet til fundamentet med en bolt. Denne boltene skal dimensjoneres slik at den er det svakeste punktet i konstruksjonen. Dermed er det boltene som ødelegges ved overbelastning av barrieren, hvilket minsker belastningen på fundamentene, stolpene og selve nettet. På den måten unngås ødeleggelse av konstruksjonsdeler det er dyrt å erstatte, da boltene er raske og billige å skifte. Slik sikres det også at gjerdet har en betydelig resthøyde selv ved overbelastning, fordi man

unngår bøyning av stolpene som holder høyden oppe (Håland, G., Langelig, A., 2015). Dette innebærer dog at nettet har et stort spenn uten ekstra støtte etter overbelastningen, så en utskiftning av boltene og øvrig tilstandssjekk av konstruksjonen burde gjøres raskt etter skredhendelsen.

2.2.3 Fundamenter

Fundamentering er et helt eget område som det må gjøres egne undersøkelser for, og som det ikke vil gås dypt inn på i denne oppgaven. Likevel må det nevnes hvordan fundamenteringen i Vannledningsdalen skiller seg ut fra andre steder lignende nettkonstruksjoner er installert.

I permafrost oppstår det spesielle utfordringer, fordi jordkryp fører til at det øverste jordlaget stadig er i bevegelse. Dersom konstruksjonen er festet i fast fjell under dette, fører bevegelsen i det øverste laget til store krefter på fundamentet, som igjen kan lede til deformasjon og ødeleggelse. For å unngå dette, har det sveitsiske skredforskningsinstituttet SLF testet ut en måte å fundamenter i permafrost ved bruk av en trykkplate som holdes på plass av vekten til gjerdet. På denne måten unngås kombinasjonen av et krypende jordlag og fast fjell, og gjerdet kan bevege seg fritt sammen med jordlaget det er festet til. Oppsettet er illustrert i figur 17. Dette er blant annet brukt ved fundamentering av snøgjerder i utløsningssonene til potensielle skred i Simplon Pass, hvor gjerdene holder snøen på plass og unngår at skred løses ut (Håland, G., Langelig, A., 2015). Disse gjerdene er ikke nødvendigvis dimensjonert for å tåle kreftene fra allerede utløste skred, altså betyr ikke erfaringene derfra nødvendigvis at fundamenteringsmåten egner seg til barrierene planlagt i Vannledningsdalen. Likevel er det en mulighet som burde undersøkes, da det vil kunne forenkle fundamenteringsarbeidet betraktelig.



Figur 17: Venstre: Det øverste jordlaget (2) kryper nedover når det tines opp, mens permafrosten hindrer jordlag lengre ned (3) i å gjøre det samme. Dette fører til en hastighetsfordeling på massene som illustrert av (1). Barrierer fundamentert i fjell nede i permafrosten vil derfor holdes på plass i nedre del, mens de dyttes nedover i øvre, og dermed utsettes for store belastninger. Høyre: Illustrasjon av et snøgjerde hvor forankringen med trykkplate er brukt. Fundamenteringsplata er kun festet til jorda ved hjelp av vekten til konstruksjonen, og konstruksjonen kan derfor bevege seg med det øvre jordlaget. Vaierne er forankret med wireanker til fast fjell, som gir noe fleksibilitet, men likevel holder konstruksjonen på plass. Begge figurene er hentet fra Håland, G., Langelid, A. (2015).

2.3 Beregning av utløpsdistanser

2.3.1 Beregning av utløpsdistanser ved forenklet metode

Det finnes flere forenklete måter å anslå utløpsdistansen til skred på, som kan brukes for å spare tid og kostnader sammenlignet med mer detaljerte beregninger. I de forenklete modellene anslås gjerne en omtrentlig utløpslengde for en enkelt strømningslinje i skredet, altså begrenses problemet til to dimensjoner.

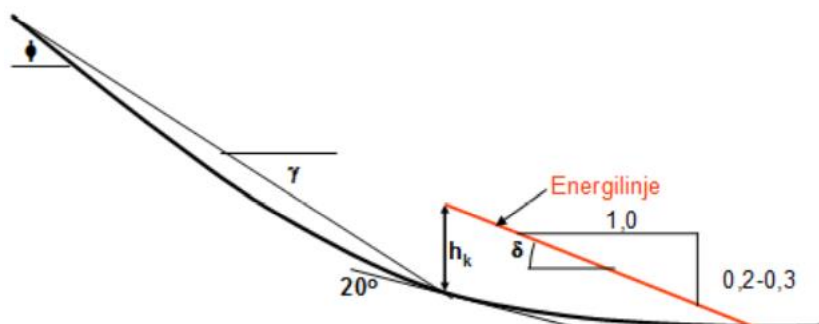
Et eksempel på en slik modell som presenteres i Norem (2014), er illustrert i figur 18. Her anslås utløpsdistansen ut fra det nederste punktet det kan forventes avsetninger med betydelig tykkelse etter et designskred, altså tas det ikke hensyn til distansen vann og suspenderte masser kan bevege seg. Fremgangsmåten brukes for beregninger på både sørpeskred og flomskred, men verdiene foreslått for parametere i modellen varierer mellom skredtypene.

Aller først antas hastigheten på strømmingen i punktet hvor skredbanen flater ut og får en helning lavere enn 20° . I Norem (2014) er det foreslått å bruke 20 m/s som standardverdi for sørpeskred, men dersom det foreligger informasjon som tilsier en annen hastighet, kan dette brukes. Ut fra hastighetsanslaget blir den mekaniske energien i skredet regnet ut i 20° -punktet, og en energilinje trekkes videre med en helning bestemt av egenskapene til skredet. Den mekaniske energien til et skred er summen av den kinetiske energien og den potensielle, gitt ved ligning 1. Her er h høyden på massene relativt til et valgt referansehøyde.

$$E_{\text{mekanisk}} = \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho g h \quad (1)$$

Energilinja videre er et plott over den mekaniske energien i skredet, som ofte forenkles som lineært synkende. Helningen bestemmes da av blant annet skredstørrelsen, grovheten til massene og hvorvidt utløpet er kanalisert eller ikke. Denne reduksjonen i den mekaniske energien skyldes blant annet friksjonskrefter på og i skredmassene, som gjør noe av den mekaniske energien om til varmeenergi (Grøn, 2018; Ormestad, 2020). Den forenklete metoden går ut på å anslå en helning på linja, slik at energien i skredet kan leses av når det kommer lengre ned i skredbanen. Se figur 18 for illustrasjon. Spesielt viktig er punktet hvor energilinja treffer terrengoverflata, da dette indikerer en hastighet lik null, og dermed nederste anslåtte strømningspunkt.

For flomskred brukes typisk en helning δ mellom $11,3^\circ$ og $16,7^\circ$ på energilinja, mens den for sørpeskred er foreslått satt ned til $5,7^\circ$, blant annet på grunn av lavere friksjon mot underlaget.



Figur 18: Foreslått prosedyre for beregning av utløpsdistanser for flomskred. Samme metode er foreslått brukt på sørpeskred, men da med en annen vinkel δ enn for flomskred, altså må tallene 0,2-0,3 sees bort fra. I tillegg vil hastigheten brukt til beregning av hastighetshøyden i 20° -punktet typisk være høyere for sørpeskred enn for flomskred. Utover det er fremgangsmåten lik. Figuren er hentet fra Norem (2014).

Det er ikke funnet informasjon om hvordan effekten av barrierer kan inkluderes i denne modellen, men det virker sannsynlig at barrierer oppstrøms 20°-punktet vil føre til en redusert strømningshastighet i punktet. Dersom dette kan dokumenteres, åpner det for bruk av lavere hastigheter i beregningene. Hvis barrierene i stedet installeres nedstrøms 20°-punktet, kan effekten tas inn i beregningene med et dropp i energilinja når skredet passerer dem.

Størrelsesordenen på droppet ved hver enkelt barriere kan anslås av en kombinasjon av last- og deformasjonsberegninger og strømningssteori, eller basert på erfaring fra lignende situasjoner eller forsøk. Størrelsen kan dog forventes å være avhengig av både barrieretype og strømningssegenskaper som for eksempel hastighet og flyte høyde. Overføringsverdien til resultater fra forsøk eller lignende situasjoner vil derfor måtte vurderes nøye før det anslåtte energitapet brukes i dimensjonering på noen måte.

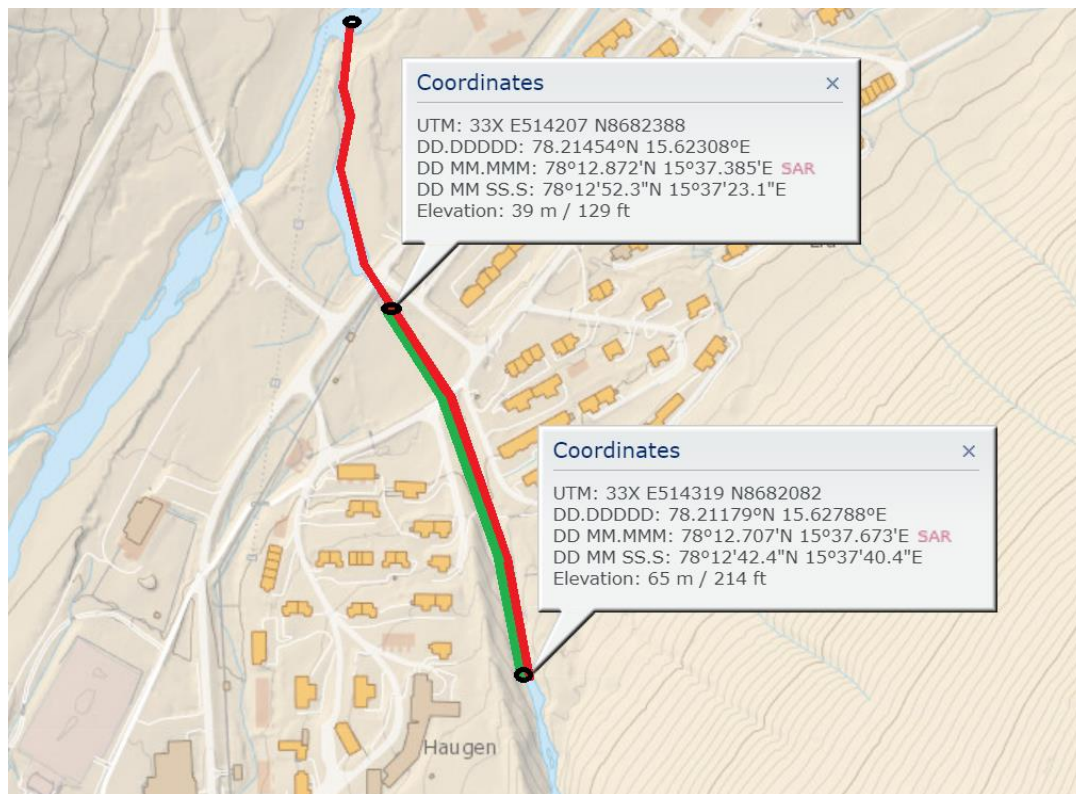
2.3.1.1 Beregning av utløpsdistanser i Vannledningsdalen ved forenklet metode

Dersom den forenklete metoden skal brukes til å beregne utløpsdistansen til designskred i Vannledningsdalen, kan det gjøres som følger. Punktet hvor helningen på skredbanen blir lavere enn 20° finnes fra bratthetskart eller terrengsnitt, og er på omtrent 65 moh, der elva passerer Haugen. Hastigheten anslås ved å bruke standardverdien på 20 m/s, selv om den i praksis forventes å avhenge av om det er installert kontrolldammer i dalen eller ikke. 20 m/s tilsvarer et kinetisk tillegg i energihøyden på 20,4 meter, som beregnet med ligning 2.

$$mgh_k = \frac{1}{2}mu^2 \Rightarrow 9,81 * h_k = \frac{1}{2} * 20^2 \Rightarrow h_k = 20,4 \text{ m} \quad (2)$$

Her er h_k tillegget i energihøyden som følge av den kinetiske energien i skredet ved passering av 20°-punktet. I tillegg til h_k kommer trykkehøyden til skredmassene, som kan være opp til 2 meter etter de dimensjonerende flyte høydene presentert i Kronholm *et al.* (2021). Med en referanse høyde på 0 moh, resulterer dette i en total energihøyde på 87,4 meter i 20°-punktet. Hvis det da brukes en helning på 5,7° på energilinja, treffer den terrenget om lag 580 meter lengre ned langs elva, like etter utløpet i Longyearelva. Høyden i det nederste utløpspunktet er da 30 moh. Utløpet er illustrert i figur 19.

Hvis det antas at det kan dokumenteres at hastigheten i 20°-punktet reduseres til halvparten av standardverdien, blir hastighetshøyden 5,1 meter i stedet. Størrelsen på denne hastighetsreduksjonen er tilfeldig valgt, og er kun for å få et inntrykk av sensitiviteten for hastighetsendringer. I dette tilfellet treffer energilinja til skredet terrenget allerede etter 320 meter ved en høyde på 39 moh., like før passering av vei 500. Denne forskjellen virker viktig for om brua på vei 500 må endres eller ikke, men en svakhet ved metoden er at den ikke gir noen informasjon om flyte høyde, hastighet eller andre viktige mål på strømmingen frem til det beregnede endepunktet. Den gir derfor ikke tilstrekkelig informasjon til å kunne anslå belastningen på bruene skredet passerer. Altså kan metoden brukes til å vurdere at brua på vei 500 ikke forventes påvirket av designskredet dersom hastigheten i 20°-punktet er 10 m/s, men ikke hvorvidt det er behov for flytting eller utbedring av brua hvis hastigheten er 20 m/s. I tillegg innebærer modellen store usikkerhetsmomenter, så ved annet enn innledende beregninger må det vurderes bruk av mer nøyaktige metoder som også kan gi uttrykk for skredutbredelsen i bredderetning.



Figur 19: Inntegning av 20°-punktet i utløpet til eventuelle sørpeskred i Vannledningsdalen, med en høyde på 65 moh. Rød linje markerer skredbanen videre dersom utløpsdistansen beregnes med den forenklete metoden og en hastighet på 20 m/s i 20°-punktet. Grønn linje markerer det samme, men hvor det er anslått en hastighet på 10 m/s i stedet, for å få et inntrykk av hvordan utløpslengden påvirkes av hastigheten i 20°-punktet, da denne kan forventes å reduseres ved installasjon av kontrolldammer. Kartet i bakgrunnen er hentet fra Norsk polarinstitutt (u. å.).

2.3.2 Beregning av utløpsdistanser ved bruk av RAMMS

Som nevnt tidligere, finnes simuleringprogrammer som kan beregne omtrentlig utløpslengde på skred ved løsning av likevektsligningene for elementer i skredet. Et eksempel på en samling slike programmer, er RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation). RAMMS er delt inn i tre versjoner- Debris Flow, Rockfall og Avalanche, som hovedsakelig skiller av hvilke parametere brukeren kan velge før igangsetting av en simulering. Av de tre, er førstnevnte mest aktuell for sørpeskred, fordi innstillingsmulighetene passer best til hva som behøves for å kunne beskrive skredtypen.

For eksempel er det i RAMMS Debris Flow mulig å velge om skredets utløsningsbetingelser skal være bestemt av en hydrograf eller ved blokkutløsning av et område med valgt dybde og areal. I RAMMS Avalanche brukes kun sistnevnte, fordi dette utløsningsalternativet er mest relevant for flakskred, som snøskredversjonen er laget for å simulere. I RAMMS Debris Flow er det også mulig å legge inn informasjon om massene skredet forventes å erodere langs skredbanen, slik at effekten av erosjon tas med i simuleringen. Dette er ikke mulig i RAMMS Avalanche uten å definere et nytt utløsningsområde lengre ned i skredbanen, som løses ut ved et senere tidspunkt enn hovedmassene (Bartelt et. al., 2017a; Bartelt et. al. 2017b). Dette er dog ikke en optimal løsning, og for simulering av sørpeskred med store erosjonskrefter, burde erosjon kunne tas med i simuleringen på best mulig måte. Riktignok kan også erosjonsfunksjonen i RAMMS Debris Flow føre til feil i simuleringene, men ved en totalvurdering virker denne versjonen bedre egnet til å simulere sørpeskred.

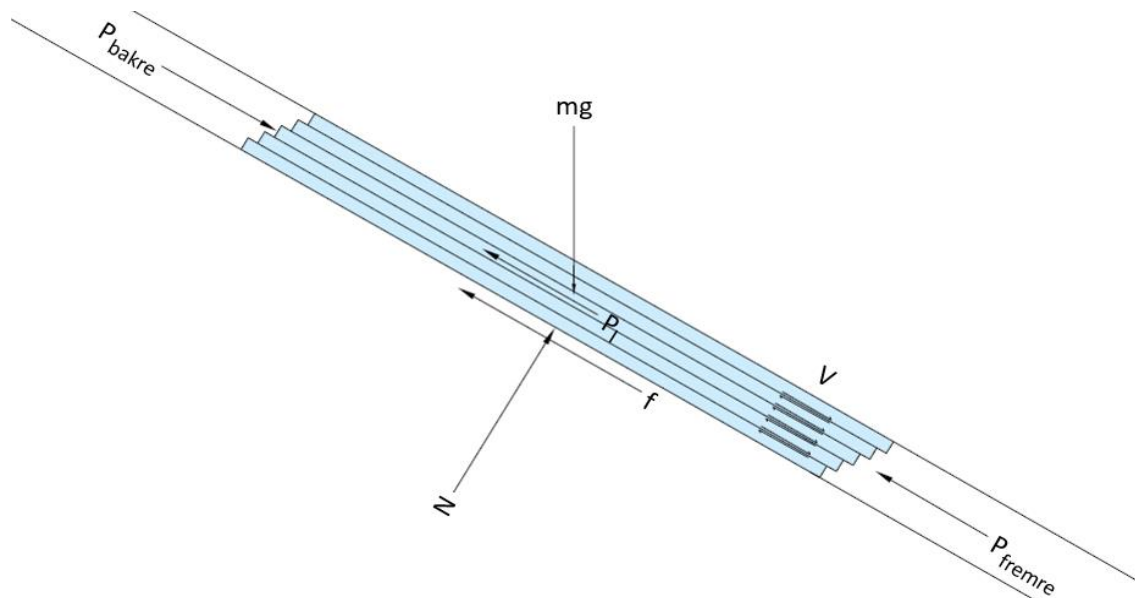
I RAMMS Debris Flow kan brukeren legge inn en terrengmodell, graden av kanalisering i den antatte skredbanen, informasjon om utløsningsmåte- og volum, og friksjonen i og rundt strømmingen. Resultatet er informasjon om blant annet hastighetsfordeling, trykkfordeling, utløpsdistanse og omtrentlig skredløp i en tredimensjonal modell (Bartelt *et al.*, 2017a).

Friksjonskoeffisientene μ og ξ er to essensielle inputverdier i programmet, som inngår i beregning av de bremsende effektene på skredene. Koeffisientene inngår i Voellmys friksjonslov, som uttrykker hvordan skjærkreftene som følge av hastighetsforskjeller i et skred betraktet som et fluid, kan summeres med friksjonskreftene langs underlaget når det betraktes som et stivt legeme (Bartelt *et al.*, 2017a). Slik blir fleksibiliteten og friksjonen innad i skredet tatt med i beregningene, samtidig som bevegelsen mellom skredet og underlaget inkluderes. Dette har gitt gode resultater ved tilbakeregning av tidligere skred, og ser derfor ut til å gi et godt estimat på hvordan situasjonen er i virkeligheten. Modellen er også mindre forenklet enn å betrakte massene som enten et stivt legeme, eller som en væske som ikke kan gli langs underlaget.

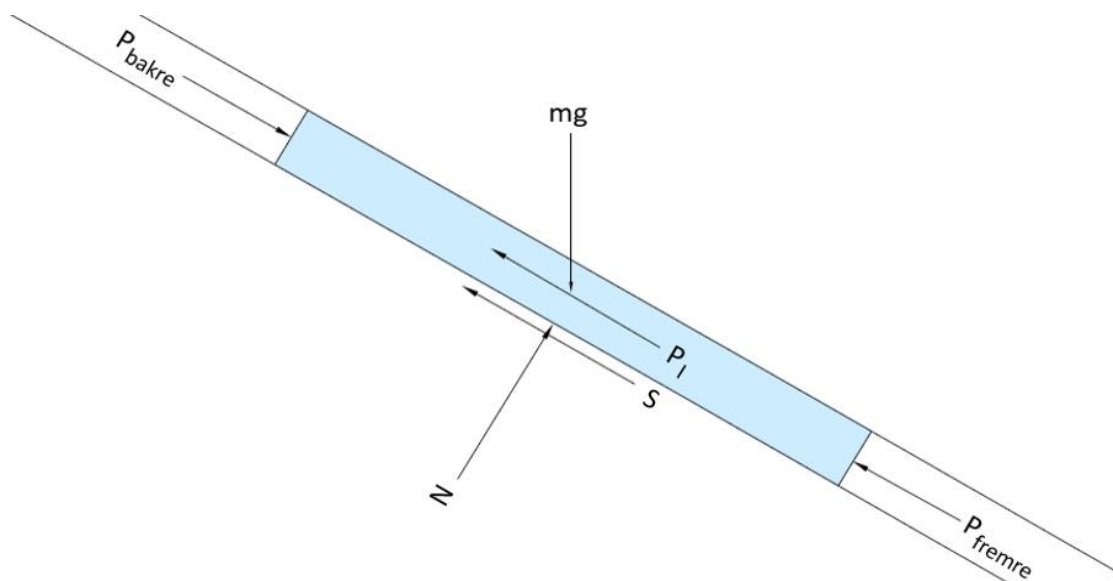
Ligning 3 viser hvordan friksjonsloven summerer de to bremsende effektene for å oppnå en total friksjonskraft S virkende på et stivt legeme (Voellmy, 1955). Merk at enheten til S er pascal, altså må den multipliseres med arealet av skredet mot underlaget for å bli en kraftresultant.

$$S = \mu\rho hg \cos(\phi) + \frac{\rho g \vec{u}^2}{\xi} \quad (3)$$

Her er h flyteøyden til skredet, og \vec{u} er hastigheten på bevegelsen skrevet som en vektor for å få med retningen på den. Krafttransformasjonen er illustrert i figur 20 og 21, hvor 20 viser kraftlikevekten i skredet slik den antas å være i utgangspunktet, mens 21 viser kraftlikevekten forenklet ved Voellmys friksjonslov. I figur 20 er viskositeten forenklet som at massene er delt inn i skiver glidende oppå hverandre, mens disse «skivene» i realiteten er uendelig små, i tillegg til at en eventuell turbulens fører til bevegelse også i andre retninger.



Figur 20: Illustrasjon av kraftlikevekten i skredet slik den antas å være i utgangspunktet, hvor det både virker skjærkrefter V på grunn av hastighetsforskjeller innad i skredet, og en basal friksjon f . I figuren er de viskøse egenskapene til massene forenklet som at de består av skiver som kan gli i forhold til hverandre. Dette er en grov forenkling, men den egner seg til å illustrere hvordan de viskøse egenskapene til massene kan føre til skjærkrefter som må tas hensyn til i en likevekt. P_f er treghtetskrefter i skredet, N er normalkrafta fra underlaget, mg er vekta til massene, og P_{fremre} og P_{bakre} er kreftene fra henholdsvis massene foran og bak skredelementet som studeres. Retningene på disse to kreftene varierer med om skredet er i en akselerasjonsfase eller i en bremsefase, men er tegnet inn som i en bremsefase.



Figur 21: Illustrasjon av kraftlikevekten forenklet ved Voellmys friksjonslov. Her er skjærkreftene innad i skredet og den basale friksjonen som illustrert i figur 20 samlet til en enkelt friksjonskomponent S. De øvrige kreftene er som i figur 20.

Friksjonskreftene beregnes for elementer av skredet, fordi flere av verdiene som inngår i uttrykket kan variere over skredmassene. Verdiene varierer også med tid, så for å få et så riktig bilde av skredbevegelsen som mulig, må samtlige beregninger gjentas med korte mellomrom gjennom hele perioden skredet er i bevegelse. For nøyaktige kraftanslag, er det helt essensielt at inndelingen i både tidsintervaller og elementer er fin nok, slik at beregningene ikke avviker for mye fra den reelle situasjonen. I tillegg er det viktig at parameterne μ og ξ er valgt riktig.

For flom- og snøskred er friksjonsverdier funnet ved tilbakeregning av en mengde tidligere skred, men det er mindre informasjon tilgjengelig om sørpeskred. Likevel er det hentet inn nok data fra sørpeskred på fastlandet til at det har vært mulig å foreslå friksjonsverdier basert på dem, og det er disse som er brukt i simuleringene av skred i Vannledningsdalen uten nettbarrierer i Kronholm *et al.* (2021) (Jónsson, 2018). De kalibrerte koeffisientene var en del lavere enn for flomskred, og kan sees i tabell 2.

Tabell 2: Friksjonsverdier foreslått brukt for designskred med ulike gjentakintervall. Utløsningsområdene med fet skrift er dem skredene er utløst i under designhendelsen. Markeringene med * i tabellen viser hvilke scenarioer det er gjort spesielt mange beregninger på, fordi det oppstår flere mulige skredbaner for de største skredene.

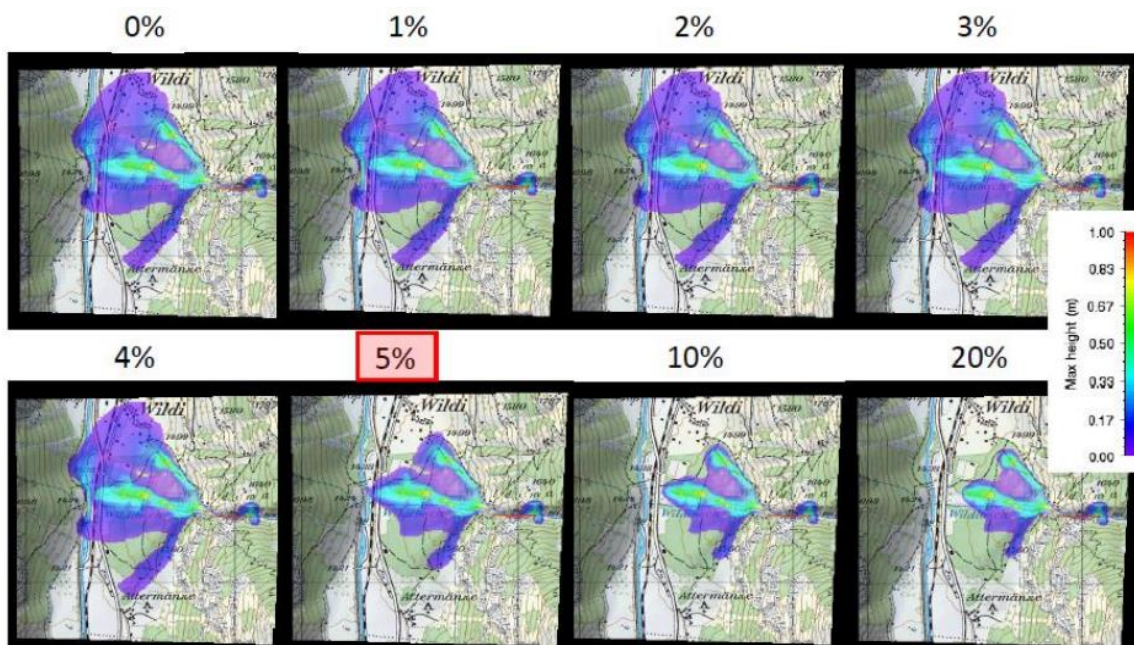
Scenario (årlig sannsynlighet)	Utløsningsområde	Volum [m^3]	μ [-]	ξ [m/s^2]
1/10	Øvre/midt/ nedre	4000	0,15	500
1/20	Øvre/midt/ nedre	10.000	0,12	1000
1/50	Øvre/ midt /nedre	20.000	0,09	1600
1/100	Øvre/ midt /nedre	25.0000	0,075	2000
1/333	Øvre/ midt /nedre*	35.000	0,06	2700
1/1000	Øvre/ midt *	45.000	0,05	3500
1/5000	Øvre/ midt *	60.000	0,04	4500

Disse verdiene kan sammenlignes med friksjonsverdiene brukt til plassering av nettbarrierene i Kronholm *et al.* (2021), som er $\mu = 0,1$ (0,08 ved utløpet i Longyeardalen) og $\xi = 2500 m/s^2$. Her er μ satt høyere enn for fullt utviklede sørpeskred med gjentakintervall på 50 år eller mer etter tabell 2, og ξ er satt lavere enn for skred med gjentakintervall på 333 år

eller mer. Det betyr at det forventes både høyere intern friksjon og større friksjon mot underlaget for skredene i startfasen, enn for fullt utviklede skred med samme gjentakintervall. Hvor stor innvirkning dette har, og hvor langt en kan regne med at skredene er i startfasen, er dog usikkerhetsmomenter i bestemmelse av verdiene. I tillegg kommer usikkerheten ved det å bruke data fra fastlandet som utgangspunkt, mens klimaet på Svalbard er tørrere, forholdsvis vindutsatt og mindre soleksponert. På grunn av disse usikkerhetene burde en god kalibrering av koeffisientene innebære sensitivitetsstudier av både μ og ξ , slik at usikkerhetene kan tas høyde for ved tolkning og bruk av resultatene.

I teorien er det mulig å simulere skredene helt frem til hastigheten på strømmingen er null i alle retninger, men i praksis avsluttes simuleringene noe tidligere i RAMMS. Det er fordi stoppkriteriet ikke er en strømningshastighet på null, men at det gjenstår mindre bevegelsesmengde i skredet enn en brukervalgt prosentandel av den maksimale bevegelsesmengden skredet har hatt.

Utløpsdistansen i simuleringen er altså direkte avhengig av den valgte prosentandelen av bevegelsesmengde som skal gjenstå ved simuleringsslutt. Dersom det blir satt en for høy prosentandel som stoppkriterium, vil simuleringen stoppe unaturlig tidlig, og utløpsdistansen bli kortere enn for et tilsvarende skred i naturen. Skulle stoppkriteriet være for rigid i stedet, kan det oppstå numerisk diffusjon. Det betyr at det simulerte skredet fortsetter å sige fremover selv etter det har nådd lavere hastigheter enn det et skred normalt ville bremses til full stopp ved. I et kart over maksimal flyte høyde i alle punkter i skredsimuleringen, vil den numeriske diffusjonen vises ved at det i en stor del av utløpssonen siger masser med flyte høyder nær null. Dette vises tydelig i figur 22 hentet fra Bartelt et. al. (2017a), hvor et skred er simulert med åtte ulike stoppkriterier. Her ser det ut til å ha oppstått numerisk diffusjon ved stoppkriterium på 4% og lavere, og det er derfor foreslått å bruke 5% som kriterium i den enkelte situasjonen.



Figur 22: Maksimal flyte høyde for hvert punkt i utløpene til skred simulert med ulike stoppkriterier i RAMMS. Flyte høydene illustreres ved bruk av en fargeskala som vist til høyre i figuren, hvor lilla representerer flyte høyder nær null, og rød representerer flyte høyder nær en meter. De åtte simuleringene er gjort av samme skred, men med ulike prosentandeler av den maksimale bevegelsesmengden i skredet som skal være igjen ved simuleringsslutt. Figuren er hentet fra Bartelt et al. (2017a).

Videre er det enda en funksjon i RAMMS som burde presenteres. Det er nemlig mulig å legge inn dammer i terrenngmodellen som brukes, enten ved å legge dem inn i modellen på forhånd, eller ved å bruke en funksjon for bygging av enkle dammer i programmet. Likevel advares det mot å bruke simuleringer hvor slike barrierer er lagt inn normalt på skredretningen til risikovurdering av områdene nedstrøms dammene eller vurdering av hvordan de påvirker skredbanen (Bartelt et. al., 2017a). Dette begrunnes blant annet med at programmet ikke tar hensyn til hverken masseoppsamlingene som oppstår foran de innlagte barrierene, eller energitapet i forbindelse med brå retningsendringer når skredet treffer dem.

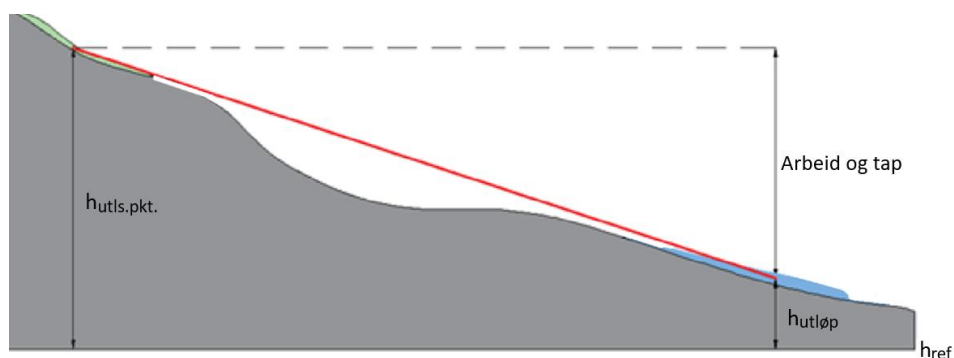
Det er heller ingen mulighet til å påvirke fleksibiliteten til det som legges inn i terrenngmodellen, så i tilfellet med nettkonstruksjoner i Vannledningsdalen vil virkningen av at nettene kan ta opp energi ved deformasjon neglisjeres. Det er heller ikke mulig å ta høyde for gjennomstrømming av finmateriale gjennom nettene. Altså egner ikke RAMMS seg til å anslå hvordan fleksible nettkonstruksjoner påvirker utløpsdistansene til sørpeskred. Likevel kan det være et nyttig verktøy i kartlegging av faresoner i usikrede områder, og kan dermed brukes til å vurdere om sikringstiltak som dette er nødvendig.

Det er også vist tidligere i oppgaven hvordan programmet kan brukes til å hente inn parametere brukt i planlegging og dimensjonering av sikringstiltak, selv om ikke selve dimensjoneringen kan foregå i programmet. I tillegg er det brukt til feilsøking av den foreslåtte sikringsløsningen lengre ned i utløpet, hvor det er foreslått å bygge svingvoller (Jónsson og Gauer, 2014). RAMMS Debris Flow er derfor et veldig nyttig verktøy i prosjekteringen av ulike sikringstiltak, men det virker ikke realistisk å kunne anslå utløpsdistansene til skred som passerer fleksible nettbarrierer direkte slik programmet er i dag.

2.3.3 Beregning av utløpsdistanser for skredløp med kontrolldammer ved kombinasjon av RAMMS og energibetraktninger

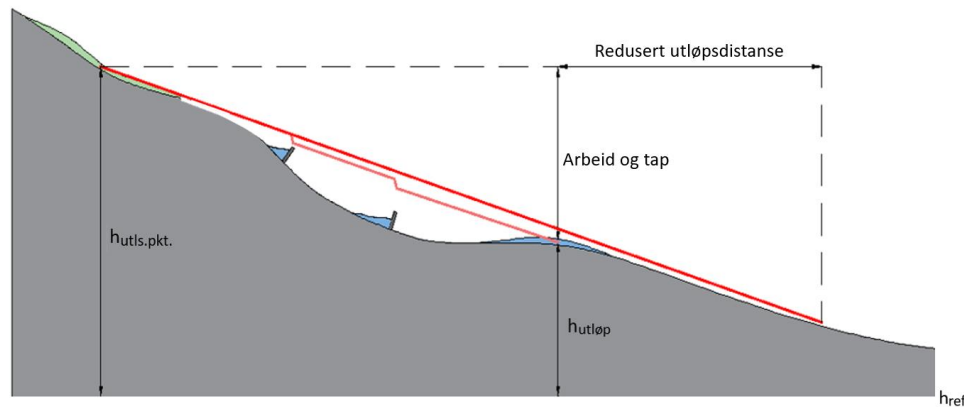
En måte å bruke RAMMS på for å anslå utløpsdistanser for skred med kontrolldammer i skredbanen, kan være å kombinere den beregnede utløpsdistansen uten dammer, med teori om energi og energitap. Dette stiller riktignok krav om at utløpsdistansen til sørpeskred i situasjoner uten sikringstiltak kan bestemmes direkte ved bruk av RAMMS Debris Flow. Det innebærer at det er tilstrekkelig med informasjon fra tidligere skred til at nøyaktigheten av simuleringene er kjent, også med de gjeldende innstillingene og parametere for sørpeskred.

Hvis dette er tilfellet og det antas et lineært energitap langs skredbanen, kan en energilinje for skredet tegnes fra utløsningspunktet til det nederste punktet i det simulerte utløpet. Dette er vist i figur 23. Her illustrerer grønn skravering skredmassene før utløsning, og blå skravering avsetningene etter at skredbevegelsen er ferdig. Energilinja er markert i rødt.



Figur 23: Illustrasjon av energilinja til et skred som før utløsning består av massene farget grønt, og etter avsetning tilsvarende massene farget blått. Det er her antatt at energilinja er lineær, til tross for at helningen på underlaget varierer. Tapet i den mekaniske energien i skredet i løpet av skredbevegelsen er da gitt ved forskjellen på energihøyden ved utløsning og avsetningspunkt.

For å ta hensyn til effekten av barrierer i skredbanen og hvordan de påvirker utløpsdistansen, må energitapet ved passering av barrierene tas inn i energilinja. I og med at både massen og hastigheten til et skred i bevegelse forventes redusert av en barriere, senkes den kinetiske energien til skredet uten at den potensielle energien øker. Det fører til et tap av mekanisk energi, som med noen antakelser kan tas hensyn til ved et skift i energilinja på samme størrelse som energitapet. Dette er illustrert i figur 24.



Figur 24: Illustrasjon av energilinja til et skred som før utløsning består av massene farget grønt, og etter avsetning tilsvarende massene farget blått. I denne skredbanen er det lagt inn to barrierer som fanger opp deler av massene, og som fører til mindre energi i skredet etter passering. Dette er vist med to dropp i den lyserøde energilinja i figuren. Den røde energilinja tilsvarende samme skred uten barrierene, og er hentet fra figur 23 for å tydeliggjøre hvordan utløpsdistansen reduseres når barrierer blir installert.

Det er riktignok flere av antakelsene denne fremgangsmåten bygger på som ikke nødvendigvis er riktige. Blant annet er det kjent at energilinja til skred avhenger av ruheten på underlaget og hastigheten på strømmingen, og at en lineær beskrivelse derfor ikke er nøyaktig. Hastighetsavhengigheten innebærer også at helningen kan forventes økt nedstrøms en barriere, på grunn av redusert hastighet. Til gjengjeld vil barrieren typisk holde igjen grovmasser i skredet og dermed øke andelen vann og finmasser i strømmingen lengre ned, hvilket fører til en slakere helning. Disse to effektene virker altså mot hverandre, slik at en antakelse om at helningen på energilinja forblir uendret ved installasjon av barrierer ikke nødvendigvis må forkastes.

Satt opp mot alternative måter å anslå utløpsdistansene på, virker fremgangsmåten forholdsvis nøyaktig, men med begrensninger. Blant annet anslås utløpslengden kun i et todimensjonalt system, mens det også er viktig å vite hvor langt skredet beveger seg ut mot sidene, spesielt i forbindelse med faresonekartlegging. Dette kan ordnes ved å implementere metoden i et program, slik at en mengde todimensjonale utregninger kan legges sammen for en fullstendig beskrivelse av grensa til faresonen. En større begrensning det er vanskeligere å omgå, er at fremgangsmåten kun egner seg til situasjoner hvor energitapet ved passering av barrierene er kjent.

Ved strømming gjennom nettbarrierer kan energitapet deles inn i to hovedkomponenter; deler av energien i strømmingen går over til plastisk deformasjon av barrieren, mens resten omgjøres til andre energiformer på grunn av økt friksjon i og rundt strømmingen. Sistnevnte tap vil typisk påvirke helningen på energilinja et stykke videre, og ikke virke som et dropp rett ved passering av barrieren. Dette tapet beregnes ved bruk av strømmingsteori eller bestemmes eksperimentelt, og kan eventuelt neglisjeres dersom kostnadene ved beregningene antas å overgå utbyttet. Fra figur 24 er det tydelig at utelatelse av en tapskomponent er en konservativ

antakelse som fører til lengre beregnede utløpsdistanser. Det kan derfor være aktuelt å neglisjere tap som er vanskelige å beregne, og som forventes å være små.

Energien som omgjøres til plastisk deformasjon beregnes fra arbeidet utført på barrieren. For å regne ut dette, multipliseres kreftene på barrieren med deformasjonene i samme retning, før alt integreres over tid for å finne arbeidet som er gjort. For så nøyaktige beregning som mulig, deles barrieren typisk inn i små elementer før dette beregnes for hvert element. Til slutt summeres arbeidet utført på alle elementene over hele barrieren. Denne fremgangsmåten krever kjennskap til både deformasjonen og kreftene på samtlige elementer.

I mange tilfeller undersøkes maksimal last på barrieren i forbindelse med dimensjonering av fundamenter, forankringer og andre konstruksjonsdeler. Dette er nyttig for å beregne arbeidet som gjøres, spesielt dersom de maksimale deformasjonene også er kjent. I DeNatale *et al.* (1999) er det nemlig funnet en lineær sammenheng mellom deformasjonene og kreftene på fleksible nettbarrierer truffet av flomskred i nedskalerte forsøk. Den maksimale deformasjonen inntreffer når barrieren blir utsatt for maksimal last. Det betyr at energien som går med til plastisk deformasjon av barrieren kan skrives som ligning 4 i tilfeller hvor sammenhengen antas å gjelde. Indeksen *maks* betyr maksverdien til variabelen i løpet av interaksjonen mellom skred og barriere.

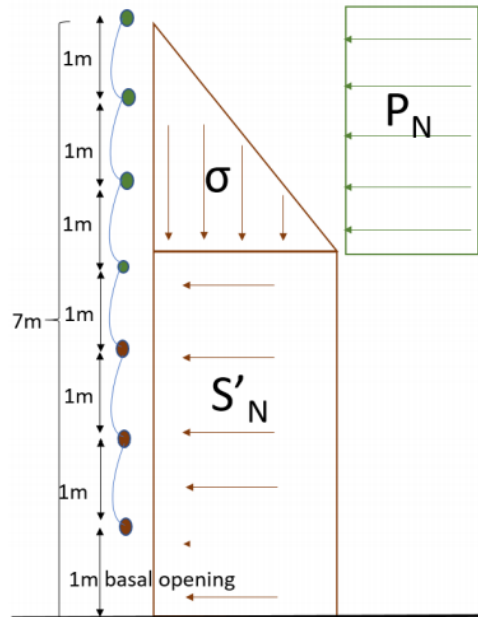
$$W_{nett} = \frac{(P_{maks}) * (S_{maks})}{2} \quad (4)$$

Resultatene fra DeNatale (1999) er basert på en begrenset mengde forsøk med bestemte oppsett, og det er derfor viktig å bemerke at sammenhengen ikke nødvendigvis er overførbart til andre skredsituasjoner eller testoppsett. Om resultatet ikke brukes, vil hele forløpet med laster og deformasjoner måtte anslås på andre måter.

Det er ikke funnet informasjon om hvorvidt deformasjonen i en nettkonstruksjon utsatt for et kjent lastforløp er lik for sørpeskred som for flomskred. Fordi det kun brukes rigide barrierer i simuleringene og forsøkene gjort i forbindelse med denne oppgaven, har det heller ikke vært mulig å få informasjon om det gjennom dem. Altså kommer det ikke til å gås mer inn på hvordan deformasjonen i ulike fleksible nett og bremseelementer bestemmes dersom belastningen er kjent. Det vil heller være fokus på å undersøke om belastningen på nett truffet av sørpeskred kan regnes ut på samme måte som flomskred, fordi dette heller ikke er kjent, og fordi det både er viktig for beregning av energitapet og dimensjonering av barrierene.

2.4 Beregning av laster på konstruksjoner truffet av sørpeskred

I lastberegningene i forbindelse med forprosjekteringen i Vannledningsdalen, ble de statiske og dynamiske kreftene på nettene regnet ut hver for seg. Deretter ble de summert for å finne den totale lastvirkningen. Prinsippet er illustrert i figur 25, hentet fra Kronholm *et al.* (2021). Figuren viser et skred glidende oppå et liggende snødekke som er 4 meter tykt. Barrieren skredet treffer er 6 meter høy, med 1 meter åpning ned mot bakken, og de dynamiske kreftene virker dermed kun på de øverste tre meterne. Hvis det er slik at de dynamiske kreftene overstiger de statiske, vil ikke dette være det dimensjonerende tilfellet for barrieren. Da vil totalbelastningen nemlig bli større hvis det ikke ligger noe snødekke foran barrieren i det hele tatt, slik at lastbildet kun består av de hydrostatiske og dynamiske kreftene.



Figur 25: Foreslått inndeling av lastene på en barriere truffet av sørpeskred, hvor det er et liggende snødekke under skredet. S'_N er laster fra snøsig som beregnet i avsnitt 3.4.1, og σ er et hydrostatisk trykk som følge av en eventuell masseoppsamling på oppstrøms side av barrieren. P_N er dynamiske krefter på grunn av hastighetene skredet treffer barrieren med. Fordi nedre del av barrieren er skjernet av det liggende snødekket, virker σ og P_N kun på de øvre delene som ikke er skjernet. Figuren er hentet fra Kronholm *et al.* (2021).

Denne inndelingen av lastvirkningene er også brukt i flere publikasjoner om beregning av laster på vertikale vegger og nett truffet av flomskred, som blant annet Volkwein (2014), Ng, *et. al.* (2018) og den østeriske standarden for permanent sikring mot snø- og flomskred, ONR (2010). Selv om fremgangsmåten med å dele inn lastene er lik i publikasjonene, er det forskjellige fremgangsmåter for å beregne størrelsen på de ulike komponentene. Dette vil gjennomgå i de følgende avsnittene. Det er ikke funnet andre publikasjoner enn rapporten fra Kronholm *et al.* (2021) som beskriver en metode for lastberegning på nett truffet av sørpeskred, så teorien vil i hovedsak omhandle metoder brukt på flomskred. Også beregningene i forprosjekteringsrapporten er basert på en metode og parametere brukt for lettflytende flomskred, i mangel på annen informasjon. Det er altså dette det finnes kjennskap til, men håpet er at enkelte av metodene også kan brukes til å beskrive lastene fra sørpeskred ved riktig kalibrering.

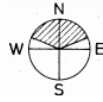
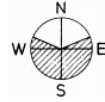
2.4.1 Statisk trykkrefter på grunn av snøsig oppstrøms nettet

Resultanten fra den jevnt fordelte flatelasta normalt på nettet på grunn av snøsig, beregnes i Margreth (2007) ved ligning 5. Det er også dette som er brukt i beregningene i forprosjekteringsrapporten for sikringsløsningen i Vannledningsdalen (Kronholm *et al.*, 2021).

$$P_{sig} = \frac{1}{2} \rho_{dekke} g K N h^2 \quad (5)$$

Her er ρ_{dekke} den gjennomsnittlige massetettheten til snødekket som ligger på bakken, N er glidefaktoren for underlaget, og h er tykkelsen på snødekket. Glidefaktoren N velges basert på ruhetsklassen til underlaget, og himmelretningen fordi den er et mål på hvor eksponert snøen er for sol. Faktoren finnes fra tabell 3, hentet fra Margreth (2007).

Tabell 3: Tabell for bestemmelse av glidefaktoren ved beregning av krefter fra snøsig, hentet fra Margreth (2007). Faktoren avhenger av både ruheten på underlaget, og graden av soleksponering. Dersom situasjonen er i et tilfelle mellom to klasser eller grader, interpoleres verdiene mellom de ulike klassene.

Ground classes	Glide factor	
	 Exposure WNW-N-E	 Exposure ENE-S-WNW
Class 1		
<ul style="list-style-type: none"> • Coarse scree ($d^* \geq 30$ cm) • Terrain heavily populated with smaller and larger boulders 	1.2	1.3
Class 2		
<ul style="list-style-type: none"> • Areas covered with larger alder bushes or dwarf pine at least 1 m in height • Prominent mounds covered with grass and low bushes (height of mounds over 50 cm) • Prominent cow trails • Coarse scree (d^* ca. 10–30 cm) 	1.6	1.8
Class 3		
<ul style="list-style-type: none"> • Short grass interspersed with low bushes (heather, rhododendron, bilberry, alder bushes and dwarf pine below approx. 1 m in height) • Fine scree ($d^* \leq 10$ cm) alternating with grass and low bushes • Smallish mounds of up to 50 cm in height covered with grass and low bushes, and also those alternating with smooth grass and low bushes • Grass with shallow cow trails 	2.0	2.4
Class 4		
<ul style="list-style-type: none"> • Smooth, long bladed, compact grass cover • Smooth outcropping rock plates with stratification planes parallel to the slope • Smooth scree mixed with earth • Swampy depressions 	2.6	3.2

d^* is the boulder diameter characteristic of the roughness of the ground surface.

I beregningen av lastene fra snøsig på nettene i Vannledningsdalen, er det brukt en glidefaktor lik $N = 2,2$, hvilket tilsvarer ruhetsklasse 3. For underlag med denne ruhetsklassen, leses glidefaktoren av som 2,0 for nordvendte sider, og 2,4 for sør-, øst- og vestvendte sider. Siden Vannledningsdalen heller nedover i retning nordvest, er dette en mellomting mellom de to eksponeringsgradene. I en slik situasjon skal gjennomsnittsverdien av glidefaktorene for de ulike eksponeringsgradene brukes som underlagets glidefaktor, hvilket her blir 2,2 (Margreth, 2007).

K er krypfaktoren til snødekket, definert om $K = \omega \sin(2\phi)$, hvor ϕ er helningen på terrenget, og ω er en koeffisient som avhenger av den gjennomsnittlige massetettheten ρ til snødekket på bakken. Størrelsen kan hentes fra tabell 4 hentet fra Margreth (2007).

Tabell 4: Ulike verdier av koeffisienten ω , ut fra den gjennomsnittlige massetettheten i det liggende snødekket. Tabellen er hentet fra Margreth (2007).

ρ [t/m^3]	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60
ω [-]	0,7	0,76	0,83	0,92	1,05

Massetettheten ρ til snødekket i Vannledningsdalen i et dimensjonerende tilfelle for sørpeskred, er satt som 500 kg/m^3 i Kronholm *et al.* (2021). Likevel er det valgt å bruke 1,05 som krypfaktor ω , i stedet for 0,92 som hentet fra tabell 4. Det har ikke vært mulig å få en forklaring på dette valget fra forfatteren bak rapporten.

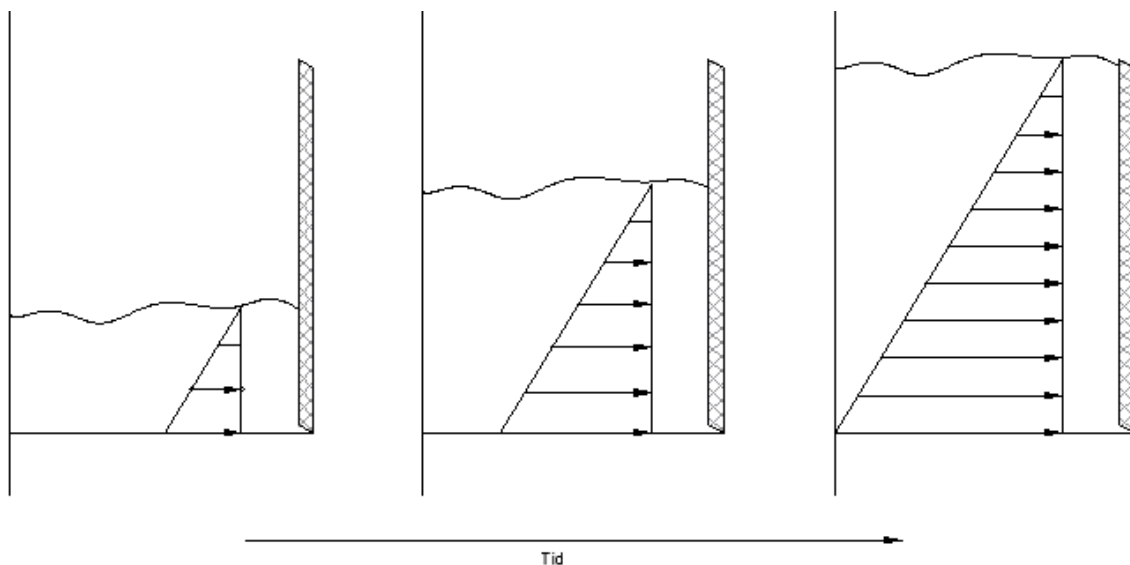
Dersom krypfaktoren i stedet settes til 0,92 som hentet fra tabell 4, gir dette en total kraftresultant lik $P_{sig} = 4964 h_s^2$. Tykkelsen på det liggende snødekket som regnes med i dimensjoneringen kan som nevnt varieres opp til en maksimal tykkelse bestemt ut fra data fra snømengde tidligere år, og annen værhistorikk. Maksimalverdien for tykkelsen ved hvert foreslåtte nett i Vannledningsdalen er bestemt i forprosjekteringsrapporten, og gitt i vedlegg C. Denne varierer mellom 3 m for noen nett, og opp til 5 m. Om det er disse tykkelsene eller lavere som blir dimensjonerende, er ikke kjent før uttrykkene for de andre kreftene på nettet også regnet ut, og kan dermed ikke anslås enda.

2.4.2 Statistiske trykkrefter fra skredmassene oppstrøms nettet

2.4.2.1 Beregning uten reduksjon på grunn av drenering

Det statiske overtrykket oppstrøms dammen som følge av vekten til skredmassene fra flomskred regnes vanligvis ut som et vanlig hydrostatisk trykk, men med tilpasset massetetthet. Overtrykket oppstår dersom det er mer masse på oppstrøms side av barrieren enn nedstrøms. Som en konservativ antakelse kan det regnes med at det ikke er noen oppsamling som støtter opp på nedstrøms side. Hvis det er tilfellet, er det hydrostatiske trykket på nettkonstruksjonen kun avhengig av høyden og tettheten til skredmassene oppstrøms nettet.

Dersom dammen ikke fylles opp umiddelbart, vil det statiske trykket øke gradvis etter hvert som den fylles opp, slik at fordelingen endres for hvert stadium under oppfyllingen. Dette fremgår av endringen i trykkfordelingen gjennom lastforløpet som vist i figur 26. Det er viktig å merke seg at trykket fra allerede liggende skredmasser regnes med ved beregning av denne lasten, mens trykket fra snødekket som eventuelt måtte ligge under, er tatt hensyn til i avsnitt 3.4.1. Det skal derfor ikke tas med her i tillegg.



Figur 26: Det hydrostatiske trykket på en vertikal barriere etterhvert som masser fylles opp på oppstrøms side av den. Det er her illustrert med en barriere uten noe snødekke liggende, og dette vil også være tilfellet for andre lastfigurer i oppgaven. For forklaring på hvordan et snødekke påvirker lastfordelingene, refereres det til figur 25.

I utgangspunktet er det statiske trykket på en tett konstruksjon ved en gitt tid t en trekantlast med resultant gitt ved ligning 6. Her er h høyden på skredmassene oppstrøms nettet, og B er den totale bredden på konstruksjonen. h forventes å variere både med tiden og over bredden av tverrsnittet, og kan derfor skrives som $h(b, t)$.

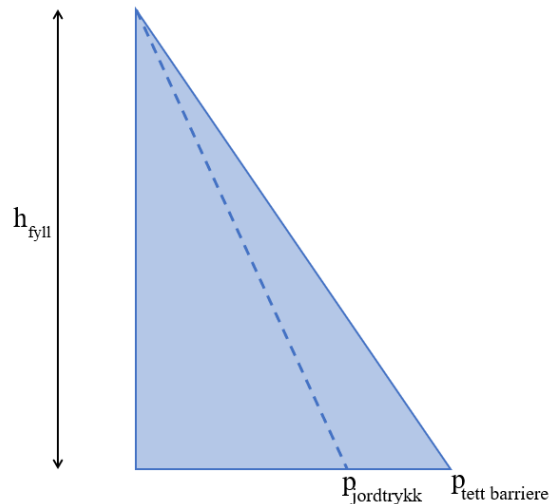
$$P_{stat} = \frac{1}{2} \rho g \int_B (h(b, t))^2 db \cos(\phi) \quad (6)$$

Grunnen til at trykket fra flomskred kan beskrives som hydrostatisk krefter, er fordi massene så fulle av vann at partiklene ikke trenger å være borti hverandre, spesielt rett etter at skredet har truffet barrieren. Når barrierene består av nett, vil noe av dette vannet strømme gjennom nettet med tiden, og trykket fra massene som står igjen reduseres. Denne reduksjonen beregnes i neste avsnitt. På grunn av en lignende oppbygning med tette masser og mye vann, forventes det at de hydrostatisk kreftene fra sørpeskred også kan beregnes som forklart hittil, men om teorien i neste avsnitt også er overførbar, kreves det mer undersøkelser for å vite noe om.

2.4.2.2 Reduksjon på grunn av drenering

For nettkonstruksjoner reduseres den statiske lasta på barrierene beregnet i avsnitt 3.4.2.1 hvis det kan strømme vann og finmasser gjennom lysåpningene i nettingen. I hvilken grad gjennomstrømning oppstår, avhenger av både egenskapene til nettingen, grovheten til skredmassene, og ikke minst hvor mye fritt vann det er i dem. Skredmassene i glidende snøskred er ofte så tett sammenpakket og med så lite fritt vann at det ikke blir særlig gjennomstrømning når de treffer sikringskonstruksjonene. Da reduseres heller ikke de statiske trykkreftene i forhold til tette dammer. For de fleste flomskred derimot, oppstår det gjennomstrømning slik at trykkreftene etter hvert reduseres. Dette forventes også i noen grad for sørpeskred.

Når vannet mellom de større partiklene i skredmassene dreneres ut gjennom nettåpningene vil vannmetningen synke, og partiklene ligge mer og mer inntil hverandre. Til slutt er massene så vannfattige at partiklene hviler mot hverandre, slik at poreformene- og størrelsene bestemmes av geometrien til partiklene. Dette øker den indre friksjonen i massene, og trykket i oppsamlede masser fra flomskred kan beregnes som jordtrykk med friksjonsvinkel og øvrige egenskaper tilpasset situasjonen. Dette er også en trykkfordeling som øker lineært med dybden, men den er noe mindre enn trykket beregnet for vannmettede masser i ligning 6, som vist i figur 27.



Figur 27: Trykkfordelingen fra massene oppstrøms barrieren dersom den beregnes på samme måte som jordtrykk, er markert med stiplet linja. Den tette linja lenger ut, markerer trykket dersom det er behandlet som hydrostatisk trykk. Det er tydelig at en drenering av massene fører til redusert trykk, men det regnes likevel for å være lineært både før og etter drenering.

Beregning av jordtrykk på en barriere er blant annet beskrevet inngående i Statens vegvesens veiledning for geoteknikk i bygging (Aabøe *et al.*, 2018), og vil derfor ikke gjennomgås her. Det må likevel nevnes at jordtrykket avhenger av den indre friksjonen i massene, og trykket beregnet på denne måten dermed forventes å være ganske annerledes for skredmasser fra sørpeskred.

Det kan finnes flere grunner til ikke å bruke ressurser på å hente informasjon til å benytte seg av denne lastberegningmetoden for sørpeskred. Både beregning med ligning 6 og tilsvarende jordtrykk gir nemlig ytterpunkter i hva det statiske trykket kan være. Frem til massene er blitt så drenert for vann at trykket beskrives med metoden for jordtrykk, skjer nemlig trykkreduksjonen gradvis, i en hastighet som avhenger av blant annet permeabiliteten til massene. Det eneste som er kjent i denne perioden, er at trykket er lavere enn det som regnes ut ved ligning 6, og høyere enn det som beregnes med uttrykkene for jordtrykk. Hvilken metode som brukes i denne perioden, må velges ut ifra hvilken av dem som gir konservative anslag i beregningene som skal gjøres. Dersom lasten som beregnes skal brukes til å undersøke om konstruksjonen med tilhørende fundamenter og forankringer er dimensjonert for å tåle belastningen, vil det være konservativt å bruke trykkfordelingen fra ligning 6.

2.4.2.3 Eksempelberegning på nett fra Vannledningsdalen uten trykkreduksjon

Eksempelet tar utgangspunkt i nett nr. 11 i forprosjekteringsrapporten (Kronholm *et al.*, 2021), se figur 13 i avsnitt 3.2 for illustrasjon. Den statiske lasta på grunn av masseoppsamling på oppstrøms side er størst når det liggende snødekket er tynnere enn klaringen under nettet. I dette tilfellet kan den totale statiske belastningen fra massene oppstrøms nettene beregnes ved ligning 7, hvor tettheten til skredmassene er satt lik 900 kg/m^3 , og tyngdeakselerasjonen er satt til $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$.

$$P_{\text{stat}} = \frac{1}{2} * 900 * 9,81 \int_B (h(b))^2 db \cos(23,3^\circ) \quad (7)$$

Høyden $h(b)$ på nettkonstruksjonen varierer over bredden, og beskrives av ligning 8.

$$h(b) = \begin{cases} \frac{9}{11}b & 0 \leq b < \frac{22}{3} \\ 6 & \frac{22}{3} \leq b \leq \frac{37}{5} \\ \frac{90}{106} \left(\frac{109}{5} - b \right) & \frac{37}{5} < b \leq \frac{109}{5} \end{cases} \quad (8)$$

Her er b en posisjonsvariabel over bredden av nettet, med $b = 0$ i øvre venstre hjørne av barrieren på figuren, og $b = B = \frac{109}{5}m$ i øvre høyre hjørne. Utregning av integralet resulterer i en total kraft på nettet på om lag 3276 kN i tilfellet hvor det samles opp masser helt fra bunnen til toppen av nettet. Dersom snødekket som ligger der fra før dekker deler av nettet, vil det bety at lasten reduseres ved at funksjonen for netthøyden h endres.

2.4.3 Beregningsmetoder for de dynamiske kreftene på rigide, tette barrierer truffet av flomskred

Til tross for at det er gjort undersøkelser med fleksible nettbarrierer som sikring mot flomskred i flere tiår, brukes det jevnlig metoder for lastberegninger på barrierene som egentlig er tilpasset rigide, tette vegger. Enkelte av de mest etablerte metodene er presentert i de følgende avsnittene, før det presenteres noen fremgangsmåter som er spesielt beregnet på fleksible nettkonstruksjoner.

Som nevnt tidligere, kombineres de statiske og de dynamiske kreftene i enkelte av metodene, slik at lastene beregnet i avsnitt 3.4.2 ikke må legges til. Samtidig er det andre som kun gir uttrykk for de dynamiske kreftene. I tillegg til denne forskjellen, skilles det også mellom dem som bygger på hydrodynamikk, og dem som bygger på hydrostatikk. Typisk stemmer hydrodynamiske modeller best med målinger fra forsøk dersom den dynamiske lasta er stor i forhold til de statiske kreftene, mens det motsatte er tilfellet for hydrostatiske modeller. Det finnes også beregningsmetoder for laster på flomskred som bygger på for eksempel sjokkbølgeteori, men i denne oppgaven vil kun dem basert på hydrodynamikk og -statikk benyttes (Proske *et al.*, 2011).

De ulike metodene innebærer ikke bare bestemmelse av kraftresultanten som virker på barrierene, men også hvordan lasten er fordelt. De som baserer seg på hydrostatikk vil typisk regne både den dynamiske og den statiske lasten som trekantlast, hvor det største trykket er i bunnen av kanalen. I de hydrodynamiske modellene derimot, virker det dynamiske trykket jevnt fordelt over hele flaten av barrieren som påvirkes av skredet. Høyden lasten fordeles over må i alle tilfeller anslås omtrentlig, og kan for eksempel settes til å være lik $1,5h_{fl}$, hvor h_{fl} er flyteøyden til skredet i fri strømming (Hungri *et al.*, 1984). Dersom den resulterende høyden er større enn barriereshøyden, kan den settes lik barriereshøyden i stedet. Det er ikke tilfellet for noen av forsøkene eller simuleringene som gjøres i forbindelse med oppgaven, og høyden lastene virker over vil derfor konsekvent antas å være $1,5h_{fl}$.

Samtlige av metodene bortsett fra én tar utgangspunkt i skredet som en mer eller mindre homogen masse, og uttrykker ikke hvordan lastvirkningen endres av blokker og andre legemer som treffer barrierene. På grunn av ulik massetetthet og muligens også hastighet enn resten av skredet, fører blokkene til at lastene på konstruksjoner i skredbanen kan variere, selv når strømningshastigheten og flyteøyden ellers er konstant. Det kan spekuleres i om dette problemet vil være like stort for sørpeskred som for flomskred, men fordi sørpeskredene er kjent for store erosjonskrefter, kan det ikke utelukkes at de kan dra med seg større legemer i skredbanen. For å få effekten av blokkene inn i lastberegningene, er lastene gjerne anslått for

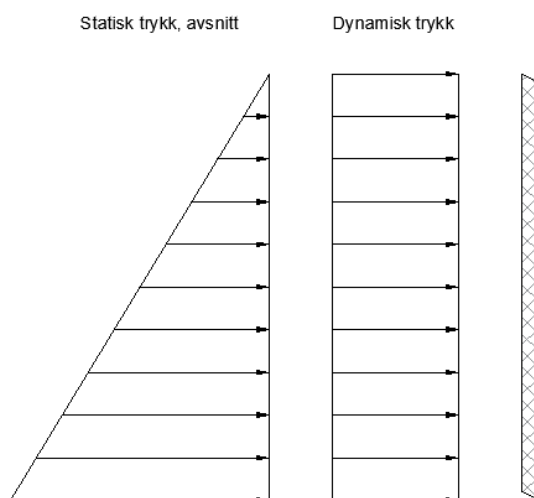
hver blokk eller som et gjennomsnitt over tid, og lagt til i det øvrige lastbildet (Zhang, 1993). For rigide barrierer gjøres dette for eksempel ved bruk av en modifisert versjon av Hertz' ligning, gjengitt i ligning 9 (Kwan, 2012).

$$P = K_c 4000 u^{1,2} r^2 \quad (9)$$

Her er K_c en lastreduksjonsfaktor vanligvis valgt som omtrent 0,1, u er hastigheten på legemet rett før kollisjon med konstruksjonen, og r er radiusen på legemet når det antas å være rundt. Dette er riktignok bare en av mange beregningsmodeller som brukes til formålet. Flere andre, som også er basert på andre antakelser og derfor kan passe bedre i enkelte tilfeller, beskrives i Hübl *et al.* (2009).

2.4.3.1 Hydrodynamisk metode

Denne metoden er brukt til i tilfeller hvor lastvirkningen i hovedsak forventes å være dynamisk, og er nevnt i blant annet Hungr *et al.* (1984), WSL (2009), Hübl *et al.* (2009), Ng *et al.* (2018), Volkwein (2014) og Kwan (2012). Metoden går ut på at de dynamiske kreftene på en konstruksjon som ikke kommer av større steiner og andre store legemer i skredet, kan beskrives ved en trykkresultant p_{dyn} virkende jevnt over veggarealet belastet av skredet. Denne metoden tar ikke med det statiske trykket i beregningene, så dette må legges til for å få et fullt lastbilde. Se figur 28 for illustrasjon.



Figur 28: Trykkfordelingen dersom belastningen beregnes med hydrodynamisk metode. Her regnes det dynamiske trykket ut som en jevnt fordelt flatelast, før den triangulære lastfordelingen fra avsnitt 3.4.2 legges til for et fullstendig lastbilde.

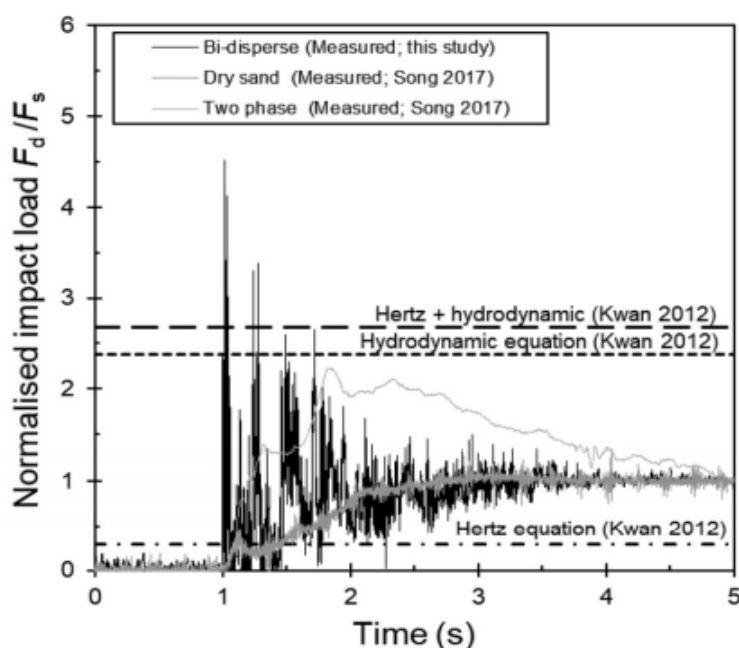
Størrelsen på det dynamiske trykket p_{dyn} kan beregnes ved ligning 10, hvor α er en dynamisk trykkoeffisient som må finnes empirisk.

$$p_{dyn} = \alpha \rho u^2 \quad (10)$$

Ved bruk av dette uttrykket antas det at bevegelsesmengden i skredet blir neglisjerbar etter møte med barrieren, altså at partiklene stoppes helt med en gang (Ng *et al.*, 2018). Dette stemmer kun for hypotetiske fluider, og spesielt ikke masser bestående av mange større, adskilte partikler blandet inn i et fluid. Noe av avviket på grunn av denne antakelsen tas hensyn til ved trykkoeffisienten α , ved at koeffisienten kalibreres mot fluider med lignende oppbygning som skredene det regnes på. Størrelsen på α er det gjort flere forsøk på innenfor flomskred, hvor det i Volkwein (2014) presenteres verdier rundt 2 for kornete skredmasser, og

0,7-1,0 for væskelignende flomskred som treffer nettbarrierer barrierer. I Berger *et al.* (2020) er også verdier mellom 0,7 og 1,0 brukt for flomskred på nett. I Zhang (1993) er det presentert α -verdier mellom 3 og 5, funnet fra tilbakeregning av 70 ulike lastmålinger fra flomskred på rigide barrierer. Det er ikke funnet informasjon om tilsvarende forsøk eller målinger for sørpeskred.

I Ng (2018) ble kreftene på en rigid barriere målt i nedskalerte forsøk hvor ulike blandinger med sedimenter i to forskjellige størrelser ble sluppet ned ei renne, og mot barrieren. Målingene ble sammenlignet med summen av krafta funnet fra ligning 10 og kreftene funnet fra ligning 9 for de større partiklene i sedimentblandinga. α var da satt til 2,5, hvilket er konservativt dersom det tas utgangspunkt i verdiene foreslått i Volkwein (2014), men ikke sammenlignet med verdiene fra Zhang (1993). Lastreduksjonsfaktoren K_c i Hertz' ligning var satt til 0,1. Både de målte og beregnede kreftene er plottet som normaliserte laster i figur 29, for tydelig å kunne sammenligne kreftene i forsøk med ulike sedimentblandinger.



Figur 29: Støtkraften på barrierer normalisert mot de statiske kreftene fra samme skredstrøm, gitt som en funksjon av tid. Dette er plottet for tre ulike forsøk, og det er i tillegg regnet ut den normaliserte krafta ved bruk av den hydrodynamiske metoden og Hertz' ligning for sammenligning. Figuren er hentet fra Ng (2018).

Fra figuren er det tydelig at denne regnemodellen underestimerte hvor store de dynamiske kreftene var i forhold til de statiske i forsøkene presentert i Ng (2018). Det betyr at regnemodellen underestimerte hvor store de dynamiske kreftene var generelt, da de statiske kunne regnes ut som i avsnitt 3.4.2 i ettertid. Dette til tross for at trykkoeffisienten var satt høyere enn foreslått for både kornete og væskelignende flomskred i Volkwein (2014).

Dog er det i Hübl *et al.* (2009) foreslått at regnemodeller basert på hydrodynamikk egner seg dårlig til å gjenspeile strømninger med lave froudetall, det vil si saktegående, dype strømninger. Det er fordi den dynamiske effekten er av mindre betydning for saktegående prosesser, og den hydrodynamiske modellen bygger på en antakelse om at de dynamiske kreftene er dominerende i systemet. Strømningene i Ng (2018) har froudetall mellom 1,84 og 3,87, mens de i Song (2017) ligger mellom 3,6 og 13,9.

Dersom det stemmer at modellens riktighet senkes ved lave froudetall, kan det innebære at den ikke egner seg for beregninger på sørpeskred like etter utløp. Basert på hastighetene og flytehydene anslått i forprosjekteringsrapporten til Kronholm *et al.* (2021), vil froudetallet til

strømningen i Vannledningsdalen variere innenfor intervallet 2,3-2,9. Dette er i samme sjikt som strømningen i forsøkene presentert i Ng (2018), hvor metoden beregnet lavere belastninger enn hva som ble målt i forsøkene, selv med konservative inputverdier. Dog betyr ikke dette at metoden trengs å forkastes for beregninger på sørpeskred generelt.

Sørpeskredene er kjent for å kunne oppnå høye hastigheter, hvilket fører til høyere froudetall, og at lastbildet preges mer av dynamiske laster. For å kunne bruke modellen for sørpeskred, må dog noe tilbakeregning av lastmålinger utføres, slik at et datagrunnlag for å beregne en passende trykkoeffisient kan bygges. Dog må det være en bevissthet rundt begrensningene til metoden, slik at den ikke blir brukt til dimensjonering av konstruksjoner utsatt for saktegående strømninger.

I Statens vegvesens håndbok om flom- og sørpeskred er det foreslått å anslå trykket på en vertikal dam bygd normalt på et flomskred ved en versjon av ligning 11.

$$p = \frac{1}{2} k \rho u^2 \quad (11)$$

Her k en koeffisient som skal ta hensyn til at skredmassene er fastere enn rent vann, og at det kan være større partikler innblandet (Norem, 2014). Uttrykket later til å være en variant av ligning 10. Det foreslås å bruke verdier opp til om lag $k = 6$ for flomskred og $k = 4$ for sørpeskred (Pers. kom., Norem). Førstnevnte stemmer godt overens med data fra Zhang (1997), men er vesentlig høyere enn det som er funnet i andre publikasjoner.

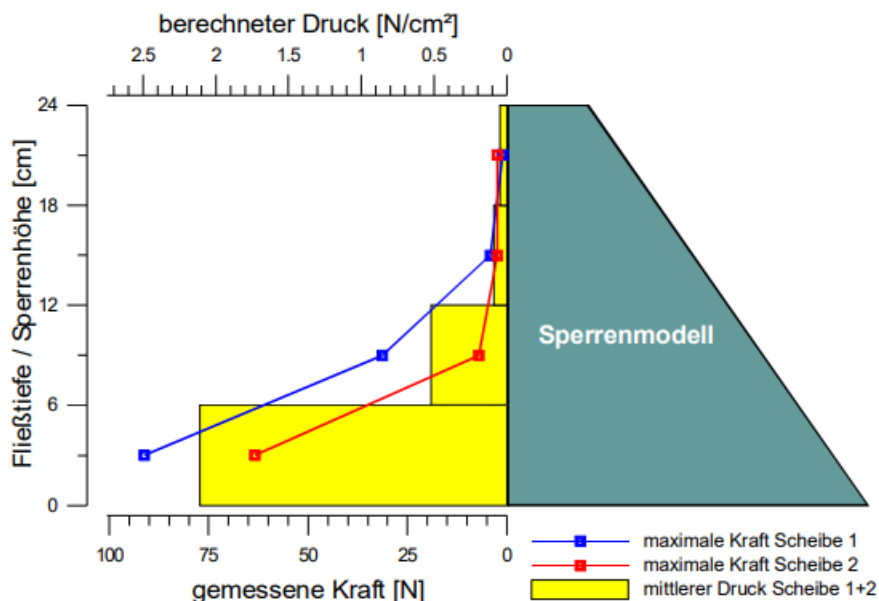
2.4.3.1 Hübl og Holzingers metode

Hübl og Holzingers metode er basert på en modifisert versjon av ligning 10, som også tar det statiske trykket med i beregningene, slik at disse ikke trenger å legges til. Metoden skal kunne brukes til å beskrive strømninger med froudetall mellom 1 og 15 (Hübl og Holzinger, 2003). Den forventes derfor å egne seg til beregninger på sørpeskred i startfasen, da disse gjerne har lavere froudetall enn fullt utviklede skred, og burde være innenfor dette intervallet. Metoden går ut på å beregne det maksimale trykket på en barriere truffet av flomskred ved ligning 12, altså det maksimale trykket både over tid og i lastfordelingen.

$$p_{maks} = 4,5 \rho u^{0,8} (gh_{fl})^{0,6} \quad (12)$$

Koeffisienten som her er satt til 4,5 var i utgangspunktet satt som 5, før den i Hübl og Holzinger (2003) ble justert ned til 4,5. Det er derfor 4,5 som vil bli brukt i beregningene i denne oppgaven.

Metoden ble utviklet ved å måle trykket på konstruksjoner truffet av masser fra det som skulle tilsvare et nedskalert flomskred i ei testrenne. Det ble da funnet trykkfordelinger over tverrsnittet lignende eksempelresultatet vist i figur 30. Dette viser et høyt trykk i nærheten av rennebunnen, som reduseres raskt oppover høyden på barrieren, før det nærmer seg null mot toppen. Til sammenligning er trykkfordelingene antatt i alle andre metoder nevnt i oppgaven enten rektangulære, triangulære eller trapesformede. Likevel gis ikke formen på trykkfordelingen av ligning 12, og det må vurderes hvilke antakelser som skal gjøres om fordelingen. I denne oppgaven vil det antas en triangulær fordeling med maksimalt trykk beregnet fra ligning 12. Dette tilsvarer en større total kraft enn hva som egentlig ville forutsees av resultatene fra Hübl og Holzinger (2003), og er derfor konservativt ved dimensjonering av barrierene. Det er likevel viktig å være klar over antakelsen når metoden brukes, fordi den for eksempel ikke er konservativ hvis kreftene skal brukes i energiberegninger og reduksjon av utløpsdistanse som beskrevet i avsnitt 3.3.3.



Figur 30: Eksempel på lastene målt i de nedskalerte forsøkene uttrykket i ligning 12 er utviklet fra. I forsøkene ble kreftene målt på to ulike skiver, kalt skive 1 og skive 2, hvor den målte krafta kunne variere noe mellom skivene. Målingene på disse skivene er markert på figuren med henholdsvis blå og rød farge. Gul farge viser gjennomsnittet av den enkelte målingen på de to skivene, og regnes om til trykk. Det er kun det maksimale trykket nederst på figuren som beregnes av ligning 12, uten at den gir noen informasjon om den øvrige lastfordelingen oppover barrieren. Fließtiefe/Sperrenhöhe = flyteøyde/barrierehøyde, berechneter Druck = beregnet trykk, gemessene Kraft = målt kraft, Sperrenmodell = barrieren i modellen.

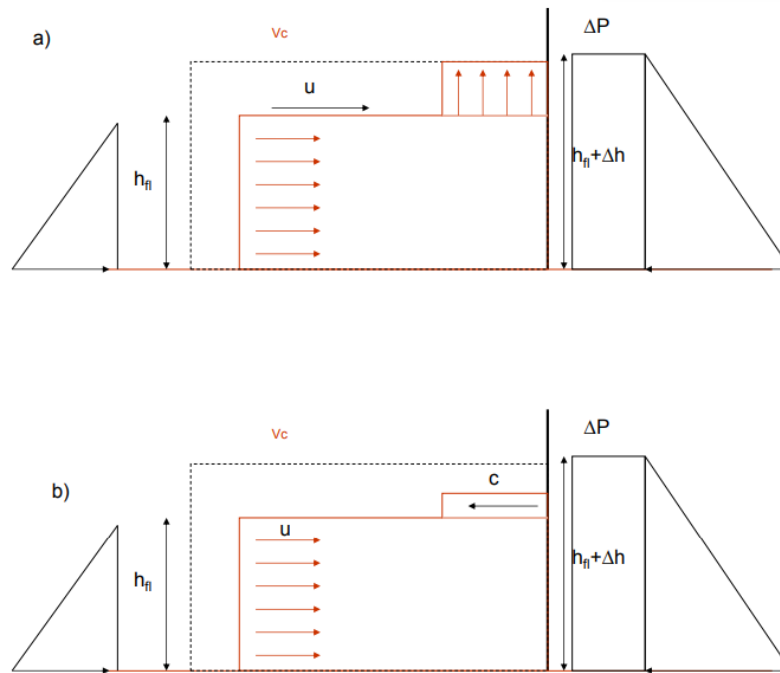
Ligning 12 for det maksimale trykket i bunnen av barrieren ble utledet ved å sette det målte trykket opp mot det hydrodynamiske trykket beregnet fra tettheten og hastigheten til de strømmende massene. Forholdet mellom disse to ble så plottet mot froudetallene til de ulike strømmingene, og det ble utført en regresjonsanalyse for å finne et uttrykk som kunne beskrive sammenhengene (Hübl og Holzinger, 2003). Uttrykket er presentert i ligning 13.

$$\frac{p_{maks}}{\rho u^2} = 4,5 Fr^{-1,2} \quad (13)$$

Dette kan skrives om ved bruk av definisjonen til froudetallet for strømming gjennom en åpen kanal, $Fr = u / \sqrt{gh_{fl}}$ for å oppnå uttrykket i ligning 12.

2.4.3.2 Armanini og Scottons metode

Metoden presentert i Armanini (1997) går ut på at den dynamiske delen av trykket, p_{dyn} , på et punkt av en barriere uttrykkes på to ulike måter for fluider med ulike skredfronter. I Armanini og Scotton (1992) ble det nemlig observert to ulike responsscenarioer i forsøk med flomskred på rigide, vertikale barrierer. Forsøkene viste at det oppsto en refleksjonsbølge oppstrøms barrieren for skred som allerede var i retardasjonsfasen og dermed hadde en butt front, mens skred som fremdeles akselererte, dannet en jet-stråle vertikalt opp langs barrieren. De to scenarioene er illustrert i figur 31.



Figur 31: En illustrasjon av de to scenarioene forespeilet i Armanini (1997). I a) er den innkommende strømmingen i en akselerasjonsfase, slik at den bøyes av og fortsetter som en jet-stråle opp langs barrieren. I b) bremses strømmingen opp, og massene som treffer barrieren kommer tilbake som en refleksjonsbølge. Etter teorien foreslått i Armanini (1997) vil kreftene på barrieren være større i dette scenarioet enn dersom det oppstår en jet-stråle. Figuren er hentet fra Armanini og Scotton (1992).

For skred i akselerasjonsfasen, altså de som dannet en jet-stråle, ble det dynamiske trykket p_{dyn} (kalt ΔP i figur 31) gitt ved ligning 14. Det statiske trykket som beregnet i avsnitt 3.4.2 må legges til separat for å få et fullstendig lastbilde.

$$p_{dyn} = \rho u^2 \quad (14)$$

Forutsetningen for at denne ligningen skal gjelde, er at bevegelsesmengden innenfor et kontrollvolum er konstant. Det betyr at bevegelsen til fluidet skifter retning til å bli vertikal, men med samme bevegelsesmengde og uten reflekterte bølger eller lignende. For skred i akselerasjonsfasen er altså støtet beregnet med metoden foreslått i Armanini (1997) på samme form som metoden foreslått i avsnitt 3.4.3.1 dersom trykkoeffisienten α i ligning 10 settes lik 1.

For skred i retardasjonsfasen derimot, altså hvor massene i stedet reflekteres i møte med barrieren, kunne trykktillegget uttrykkes ved ligning 15. Også her må statisk trykk legges til for et fullstendig lastbilde.

$$p_{dyn} \cong \rho u(u + c) \quad (15)$$

I ligningen er c bølgehastigheten til den reflekterte bølge, som kan uttrykkes som $c = \sqrt{g(h_{fl} + \frac{3}{2}\Delta h)}$. Her er Δh er differansen mellom flyteøyden til skredet ved fri strømming, og den maksimale høyden bølga som slår inn mot barrieren får i løpet av interaksjonen. Se figur 31 for illustrasjon. Δh er ofte liten i forhold til flyteøyden h_{fl} , hvilket betyr at uttrykket for c gjerne forenkles til $c = \sqrt{gh_{fl}}$, spesielt ved store flyteøyder.

2.4.3.3 Lichtenhahns metode

Lichtenhahns metode er basert på en antakelse om at belastningen på en barriere truffet av flomskred kan beskrives ved skalering av det hydrostatiske trykket fra vann med samme dybde. Det vil si at trykkfordelingen på en tett, rigid barriere truffet av en skredbølge antas å være triangulær, med maksimalt trykk i bunnen av kanalen. Hvis det fremdeles antas at høyden lasta virker over er $1,5h_{fl}$ som anslått i Hungr *et al.* (1094), påvirker det i denne metoden også størrelsen på maksimaltrykket. I dette tilfellet vil det maksimale trykket nær bunnen være gitt ved ligning 16.

$$p_{maks} = k\rho_{\omega}g(1,5h_{fl})\cos(\phi) \quad (16)$$

Her er ρ_{ω} massetettheten til vann, og k er en faktor som må bestemmes empirisk. Denne er i Lichtenhahn antatt å ligge mellom 7 og 10 for flomskred, men tidligere eksperimenter har vist at den i praksis har variert mellom 3 og 11 (Wendeler, 2016). Fordi k er eneste måte å skille mellom belastningene fra skred med ulike massetettheter og hastigheter, er det naturlig å anta at størrelsen på koeffisienten påvirkes av begge deler. Det er fordi det later til å være enighet om at hastigheten og massetettheten har innvirkning på belastningen på barrierer i noen grad. Fordi disse egenskapene varierer betydelig mellom typiske flom- og sørpeskred, kan ikke størrelsesintervallet til k forventet for flomskred overføres til sørpeskred uten videre. Verdien må derfor finnes på en annen måte, for eksempel gjennom fullskala- eller nedskalerte forsøk. Det vil bli utført en slik kalibrering basert på de nedskalerte forsøkene i denne oppgaven, men overføringsverdien i resultatene til fullskala sørpeskred er usikker. Det er fordi tettheten til massene i forsøksoppsettet ikke skaleres riktig i forhold til hastigheten, på grunn av utfordringer beskrevet mer inngående i avsnitt 6.1. Da k antas å avhenge av både hastigheten og massetettheten, og begge egenskapene ikke kan bli skalert riktig i samme oppsett, kan det føre til feil kalibreringen.

Dersom denne koeffisienten likevel bestemmes med nogenlunde sikkerhet ut fra andre forsøk, gjenstår bare å finne den forventede flyte høyden til strømmingen og helningen på terrenget ved barrieren. Det at metoden avhenger av få parametere gjør den forholdsvis enkel å skaffe data til, og den er derfor mye brukt av ingeniører.

2.4.4 Beregningsmetoder for de dynamiske kreftene på nettbarrierer truffet av flomskred

I Song *et al.* (2018) er det gjort et studie som viser at det dynamiske støtet flates ut ved deformasjon i en barriere, slik at støtet den utsettes for varer litt lengre, men med en mindre maksimalkraft. Dette er også nevnt i Wendeler (2016). Det betyr at maksimalbelastningen på konstruksjonen avhenger av deformasjonen, mens deformasjonen avhenger av belastningen med mindre materialet i nettet er perfekt plastiske eller uendelig stive. Denne gjensidige avhengigheten gjør nøyaktige beregninger på belastningen på fleksible konstruksjoner mye mer komplisert enn på rigide konstruksjoner. Det er også lettere å etablere generelle uttrykk for hvilken belastning som forventes i ulike tilfeller for rigide konstruksjoner, fordi de ikke varierer med materialstivheten og oppbygningen til nettet i samme grad.

Beregningene i forrige avsnitt er bygget på antakelser om at barrierene er både tette og rigide. Siden dette ikke er tilfellet for nettkonstruksjonene som planlegges installert i Vannledningsdalen, burde det undersøkes hvordan de to antakelsene kan unngås. Dette gjøres i de følgende avsnittene, hvor det tas hensyn til gjennomstrømmingen gjennom nettene. Det innebærer at trykkreftene kun virker på det projiserte arealet av nettingen, og at det i tillegg virker et drag på grunn av gjennomstrømmingen. Det er også mulig å hensyn til fleksibiliteten

i nettene i disse modellene, men dette er på bekostning av at de da blir tidkrevende og kostbare å regne ut.

For å kunne ta hensyn til fleksibiliteten, må problemet sees på som en FSI-beregning¹, hvor systemet fluidet er i, endres med deformasjonen til nettet. Når belastningen fra fluidet så fører til ytterligere deformasjoner i nettet, endres systemet igjen. Dette gjentas gjennom hele interaksjonen, og kan i simuleringsprogrammer beregnes forholdsvis nøyaktig ved inndeling i små tidsintervaller. Dette fører gjerne til store beregningsjobber, men kan også gi mye mer nøyaktige beregninger enn hva som oppnås ved å anta at de fleksible nettene er rigide. Dermed åpnes muligheter for mindre marginer på kapasiteten og innvirkningen nettene på utløpsdistansene, på bekostning av dyrere beregninger.

Flere av metodene som presenteres her kan også brukes for gitterbarrierer som antas å være rigide, mens det også finnes metoder hvor deformasjonene i barrieren er essensielle. En fellesnevner for alle dem som nevnes, er at de ikke tar lastene på grunn av større steinblokker og lignende legemer i betraktning. Dersom det regnes med deformasjoner i barrieren, kan ikke Hertz' ligning som beskrevet i avsnitt 3.4.3 brukes for beregning av tilleggslastene fra disse (Ng, 2018; Kwan, 2012). I stedet finnes egne metoder for beregning av støt på fleksible nett på grunn av enkeltlegemer, blant annet fordi problemstillingen er viktig i sikring mot steinsprang, som innebærer bruk av lignende nett.

Det er i Grassl H. G (2002) og Volkwein A. (2002) vist at nettkonstruksjoner belastet av kun ett legeme både skal tåle støt fra, og stoppe blokker med en total kinetisk energi opp til energiklassen satt i CE-godkjenningen. Zhao et. al. (2020) dekker simuleringer av fleksible ringnett som belastes av en steinblokk og flytende skredmasser omtrent samtidig. Dette er gjort ved å koble sammen simuleringer av interaksjonen mellom flomskred og fleksible barrierer, og interaksjonen mellom steinblokker og fleksible barrierer ved steinsprang. Simuleringene av de to belastningene i utgangspunktet er verifiserte med fullskala tester, men kombinasjonen gjenstår fremdeles å verifiseres ved forsøk. Som en huskeregel for overslag og en eventuell verifisering, er det slik at legemer i væskestrøm som treffer et objekt får det som kalles hydraulisk aktiv masse, som er om lag 20% høyere enn den egentlige massen ved tørr interaksjon (Hübl *et al.*, 2009). Dersom dette stemmer for blokkene i sørpeskred, betyr det at tilgjengelig data fra sikring mot steinsprang kan benyttes i beregningene, for så å skaleres opp med 1,2.

I noen tilfeller treffer også blokker, trær og lignende rett på vaierne som støtter og holder konstruksjonen oppe. Da er kreftene enklere å regne på, slik at kraftanslag kan gjøres uten kompliserte simuleringer. Dette behandles i Berger *et al.* (2020), og vil ikke gjengis her, da det går over på dimensjonering av enkeltelementer i konstruksjonen. Likevel er det viktig å være klar over muligheten for at det kan oppstå støt på enkeltvaiere, hvilket må tas med i lastbildet som et spesielt tilfelle.

2.4.4.1 Nedre grense ved beregning på strømningsmotstand

I Wendeler (2016) er det foreslått å bruke trykket fra skredmassene betraktet som et rent fluid strømmende gjennom nettbarrierene, som en nedre grense for belastningen fra et flytende skred. Med denne metoden beregnes den totale kraften på konstruksjonen ved ligning 17, som avhenger av blant annet formen på maskene, og dermed nettypen. I eksempelet i Wendeler (2016) er det brukt ringnett, hvilket også er nevnt som den aktuelle nettformen brukt i Vannledningsdalen (Kronholm *et al.*, 2021). I eksempelet beregnes kreftene på hver ring i

¹ Fluid-structure interaction

nettet, før de legges sammen for å oppnå den totale kraften på nettet som følge av det hydrauliske trykket, beskrevet ved ligning 17.

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (C_D \rho u^2 A_p)_i \quad (17)$$

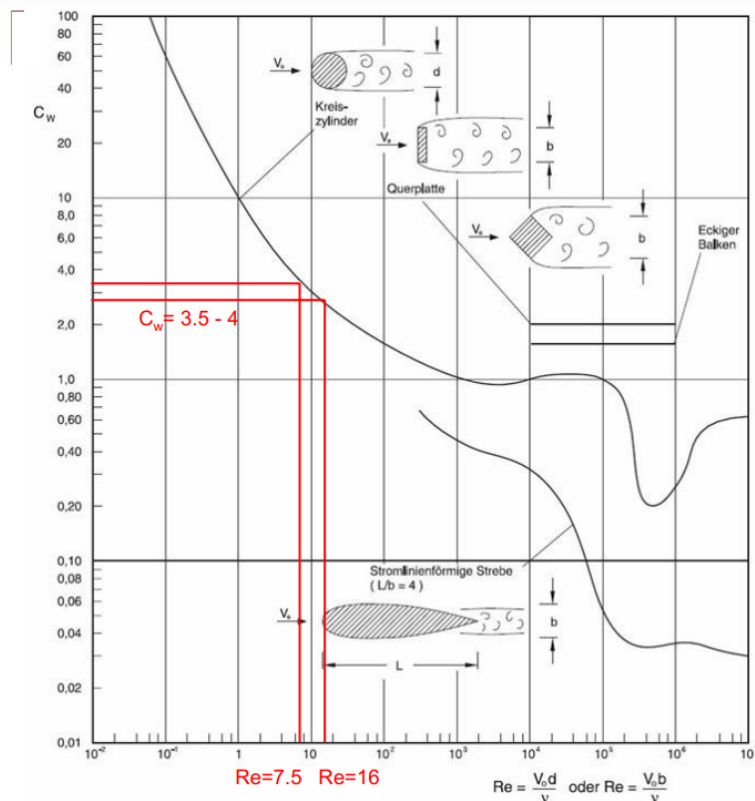
Her er C_D dragkoeffisienten til den enkelte ringen i nettet ved strømmingen den utsettes for, ρ er tettheten til de passerende skredmassene, og u er hastigheten deres. A_p er det projiserte arealet til hver enkelt ring normalt på strømningsretningen, og n er antall ringer i nettet. Denne formelen tar ikke hensyn til overlapp og knuter, eller andre eventuelle effekter av at ringene er satt sammen til nett, med mindre dette tas inn i ligningen gjennom dragkoeffisienten C_D .

Ligning 17 har klare fellestrekk med ligning 10, og er i praksis lik den hydrodynamiske metoden, bortsett fra at trykket kun beregnes på det projiserte arealet av nettet. Dette betyr at variasjoner i graden av gjennomstrømning, og dermed også belastningen på nett med ulike maskeåpninger, tas inn i betraktningen. De to metodene representerer altså to forhold mellom maskestørrelsen og belastningen på konstruksjonen, hvor ligning 17 er basert på at belastningen øker proporsjonalt med det projiserte arealet, mens bruk av ligning 10 innebærer en antakelse om at det kun er det totale arealet på barrieren som er viktig. For skred som i stor grad stoppes av barrieren, vil sistnevnte være en naturlig antakelse, mens det er mer naturlig å anta en form for avhengighet av det projiserte arealet i tilfeller med gjennomstrømning gjennom barrieren. Da trenger heller ikke det hydrostatiske trykket å legges til, ettersom det antas omtrent lik flytehyde og likt trykk nedstrøms barrieren, som oppstrøms.

Selv om det er funnet mye informasjon om hvordan et fluid påvirkes ved gjennomstrømning av nett, er det likevel begrensninger ved det å basere kraftberegningene på nett påvirket av sørpeskred på en antakelse om at skredmassene vil strømme gjennom barrieren på samme måte som vann, men med en større massetetthet. Blant annet tas det ikke hensyn til at det er faste masser dispersert i (og dratt med) den gjennomstrømmende massen, og at nettet etter hvert vil blokkeres av disse. Metoden gir derfor kun en nedre grense for belastningen, kun i tidsrommet mens strømmingen oppstrøms nettet er ublokkert. I dimensjoneringsøyemed på nettkonstruksjonene må metoden derfor brukes veldig forsiktig. Det kan likevel være fornuftig å ha kjennskap til den, fordi den kan være et godt alternativ for skred hvor det antas at de største kreftene oppstår umiddelbart etter at skredfronten har truffet barrieren, før den eventuelt er blokkert.

I tillegg til at fremgangsmåten er aktuell å bruke for lastberegninger, gir den også informasjon om hvordan dragkoeffisienten C_D varierer mellom ulike nettyper når det kommer til vanngjennomstrømning eller flomskred. Dette er nyttig i vurdering av hvordan dragkoeffisienten, og dermed også den empiriske faktoren α i den hydrodynamiske metoden, kan avhenge av nettypen i sikring mot sørpeskred.

Ved beregning på ringnett som vist i et eksempel i Wendeler (2016), settes C_D for hver enkelt ring ut fra reynoldstallet til vaieren den består av fra plottet i figur 32. Dette betyr at koeffisienten som brukes i eksempelet hverken tar hensyn til knuter eller overlappinger, og at det ikke gjør noen forskjell hvordan vaierne ringene er laget av ligger i forhold til hverandre. Med dette som bakgrunn, burde fremgangsmåten kunne overføres til å bestemme dragkoeffisienten også på nett med andre maskeformer.



Figur 32: Dragkoeffisienten C_D som en funksjon av reynoldstallet Re ved strømming forbi todimensjonale legemer. For den flytende delen av et flomskred er dragkoeffisienten rundt sylindere funnet til å ligge mellom 3,5 og 4 som markert med rødt i diagrammet. Dette er ikke nødvendigvis direkte overførbart til sørpeskred, fordi sørpeskred gjerne har andre reynoldstall enn flomskred på grunn av høyere hastigheter og lavere viskositet. Figuren er gjengitt i Wendeler (2016), hentet fra Hydromechanik (1998), og teksten i den er som følger: Kreiszyylinder = sylinder, Querplatte = plate, Eckiger Balken = rektangulær stang, Strömlinienförmige Strebe = strømlinjeformet stang, se nedre tegning i figuren for illustrasjon..

Gitrene i forsøkene i denne oppgaven har riktignok kvadratiske lysåpninger i stedet for sirkulære. Ligning 17 kan for disse gitrene skrives om til ligning 18, dersom fremgangsmåten i eksempelet fra Wendeler (2016) også kan brukes på nett med kvadratiske lysåpninger. Omskrevet blir uttrykket for den totale kraften på gitteret ved denne beregningsmåten gitt ved ligning 18. Her er L_{tot} er lengden av alle vaierne i gitteret summert, og d er diameteren til vaierne det består av.

$$P = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 d L_{tot} \quad (18)$$

Hvorvidt det er riktig å anta at dragkoeffisienten til et nett er lik som for vaierne det er flettet sammen av funnet fra figur 32, er et usikkerhetsmoment ved bruk av denne metoden. Fordi nett med kvadratiske lysåpninger er brukt i fiskeindustrien, er det publisert flere artikler om nettopp dette, men kun når det kommer til gjennomstrømming av vann. Det er ikke sikkert at denne informasjonen er overførbart til barrierer truffet av sørpe, men fordi de våteste massene som passerer barrieren i starten forventes å bestå av en stor andel vann, kan det være relevant for spesielt våte skred. Det finnes flere ulike uttrykk for dragkoeffisientene til nett nedsenket i vann, som ikke samsvarer fullstendig med figur 32.

Blant annet er det i Milne (1972) og Aarsnes et. al. (1990) funnet sammenhenger mellom strengdiameter, lysåpningsstørrelser og dragkoeffisienten for slike nett med kvadratiske lysåpninger. Sammenhengen gitt i Milne (1972) er gitt ved ligning 19 og 20, mens den fra Aarsnes et. al. (1990) er gitt ved ligning 21. Begge er kjent brukt for beregning av

dragkoeffisienten til hele nett spent normalt på en væskestrøm, hvor lysåpningene i nettene er kvadratiske.

Ligning 19 gjelder nett uten knuter i sammenbindingene mellom strengene.

$$C_D = 1,0 + 2,73 \left(\frac{d}{L}\right) + 3,12 \left(\frac{d}{L}\right)^2 \quad (19)$$

Ligning 20 gjelder nett med knuter i sammenbindingspunktene.

$$C_D = 1,0 + 3,77 \left(\frac{d}{L}\right) + 9,37 \left(\frac{d}{L}\right)^2 \quad (20)$$

Her er d diameter på strengene nettet er satt sammen av, mens L er sidelengdene på de kvadratiske lysåpningene. Samme parametere er brukt i ligning 21, hentet fra Aarsnes et. al. (1990).

$$C_D = 2 \frac{d}{L} - 4,96 \left(\frac{d}{L}\right)^2 + 109,6 \left(\frac{d}{L}\right)^3 \quad (21)$$

I disse uttrykkene er koeffisienten C_D kun avhengig av geometrien i nettet, og ingen parametere som forteller noe om fluidet som strømmer gjennom det. Fordi sammenhengene er utviklet for strømning av vann ved lave hastigheter, med høyere massetetthet og lavere dynamisk viskositet enn sørpeskred, er det ikke sikkert de vil egne seg for beregninger på sørpeskred.

Til gjengjeld er det i Choo *et al.* (1971) presentert en måte å ta hensyn til at fluidet i strømningen kan ha en høyere viskositet, men dette uttrykket gir kun dragkoeffisienten til strømning rundt en enkelt sylinder. Det tar altså ikke i betraktning at flere sylindre er satt sammen til et nett, og valget om hvilke uttrykk som skal brukes må derfor stå på hvilken antakelse som later til å stemme best for sørpeskred på nett. Uttrykket gitt i Choo *et al.* (1971) er gjengitt i ligning 22.

$$\frac{C_D A_p}{L_{tot} d} = \begin{cases} \frac{8\pi}{Re * s} (1 - 0,87s^{-2}) & (0 < Re \leq 1) \\ 1,45 + 8,55Re^{-0,90} & (1 < Re \leq 30) \\ 1,1 + 4Re^{-0,50} & (30 < Re \leq 2,33 * 10^5) \end{cases} \quad (22)$$

$$s = -0,077215655 + \ln\left(\frac{8}{Re}\right)$$

2.4.4.2 Energiberegninger ved Rickenmanns metode

Energiberegninger krever at deformasjonen i nettene ikke neglisjeres, og er derfor ikke egnet for rigide konstruksjoner som brukt i forsøkene og simuleringene i denne oppgaven. Likevel er den viktig i diskusjonen fordi den er basert på enkle, etablerte sammenhenger, og dermed er en av de mest åpnbare av de foreslåtte metodene sett fra et teoretisk perspektiv.

Metoden baseres på energikonservasjon, hvor den kinetiske energien i skredmassene som stoppes av barrieren antas å gå over i plastisk deformasjon av konstruksjonen. Energien som tas opp som plastisk deformasjon av konstruksjonen kan settes sammen med uttrykket for den kinetiske energien i skredet, hvilket gir ligning 23.

$$\frac{1}{2}mu^2 = \int_t \sum_{i=1}^n (P(t))_i * (s(t))_i dt \quad (23)$$

Her er m massen stoppet av barrieren i løpet av interaksjonen. Denne størrelsen kan finnes ved å anslå en gjennomsnittlig masse Q som strømmer forbi et punkt per tidsenhet i fri strømning, og omtrent hvor lenge interaksjonen varer, t_{imp} . Da vil massen m være gitt ved ligning 24.

$$m = \rho Q t_{imp} \quad (24)$$

Dersom det også antas at resultatene fra DeNatale *et al.* (1999) om at deformasjonene i konstruksjonen øker lineært med kreftene på den stemmer, kan ligning 25 skrives om som følger.

$$\frac{1}{2}\rho Q t_{imp} u^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (P_{maks})_i * (S_{maks})_i \quad (25)$$

Denne fremgangsmåten er kjent for å gi høyere lastverdier enn hva som oppnås i forsøk, fordi den antar at all massen stopper opp, mens mye egentlig går gjennom nettene (Wendeler 2016). Dette burde kunne unngås ved å endre uttrykket for massene som samles opp, til også å ta hensyn til gjennomstrømningen. Dette vil kreve detaljert informasjon om hvordan det forventes at nettene fylles opp, i tillegg til at metoden i utgangspunktet krever informasjon om hvor lang tid det tar før barrieren overtoppes eller skredet er passert. Disse størrelsene er det er vanskelig å anslå, og bruk av metoden innebærer derfor antakelser og grove anslag som fører til store usikkerheter. Den ansees derfor ikke som praktisk for beregning av de maksimale lastene konstruksjonene i Vannledningsdalen bør dimensjoneres for, eller for bestemmelse av energitapet i skredet. Fordi metoden i tillegg er begrenset til fleksible barrierer og dermed ikke kan brukes på dem brukt i forsøkene og simuleringene, vil den ikke drøftes videre i oppgaven.

2.4.4.3 Oppskalering av de statiske lastene

Det er også publisert en metode for beregning av trykket på en fleksibel nettbarriere truffet av flomskred, som bygger på oppskalering av de statiske lastene fra skredet, slik også Lichtenhahns metode gjør (Gubler, 2007). Det innebærer at summen av det dynamiske og statiske trykket beskrives av en triangulær lastfordeling lik de hydrostatiske kreftene, men skalert opp med en faktor $\frac{P}{P_{stat}}$. Modellen skiller seg riktignok fra Lichtenhahns ved at den inkluderer hastigheten til strømningen i uttrykket for å beregne skaleringsfaktoren. Denne sammenhengen er hentet ut fra nedskalerte forsøk på fleksible nettbarrierer presentert i Gubler (2007), som har resultert i ligning 26.

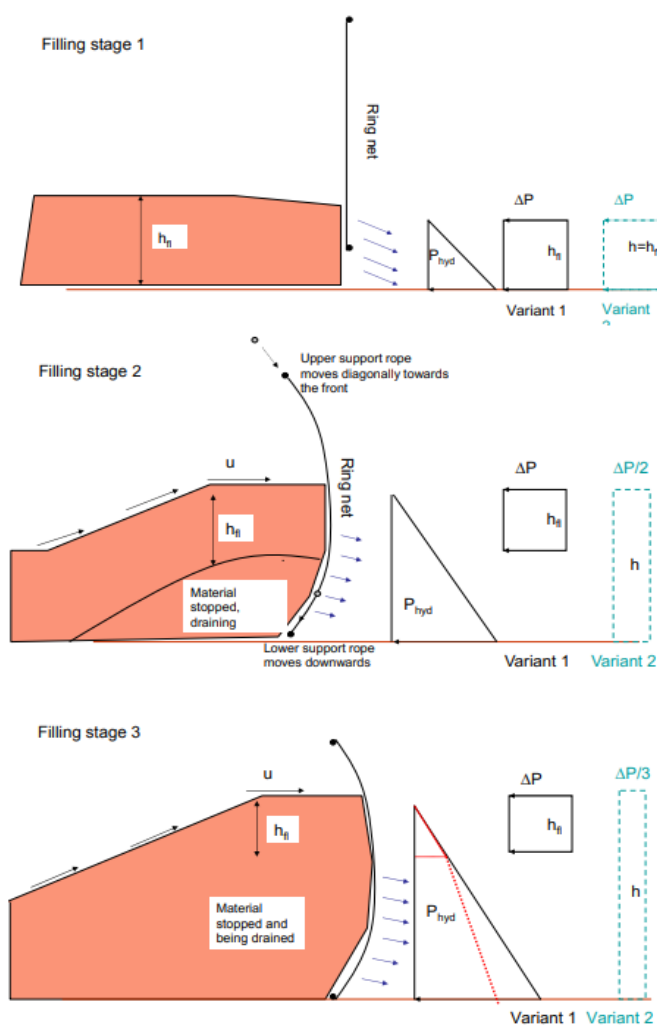
$$\ln\left(\frac{P_{max}}{P_{stat}}\right) = \beta u^2 \quad (26)$$

Her er β en koeffisient som avhenger av egenskapene til skredmassene. I forsøk presentert i Wendeler (2016), har størrelsen på denne ligget mellom 0,070 og 0,144 for flomskred. En eventuell overføring av verdien til beregninger på sørpeskred ville forutsette at forholdet mellom den statiske lasta og den dynamiske lasta på barrierene oppførte seg likt for de to skredtypene. På grunn av typisk høyere hastigheter for sørpeskred enn for flomskred, er ikke

dette nødvendigvis tilfellet. Derfor vil det måtte hentes inn informasjon fra sørpeskred for å kunne gi sikre anslag på kreftene med denne metoden.

2.4.4.4 Kombinasjon av de øvrige metodene for beregning på gradvis belastning

Hittil har de presenterte metodene vært ligninger hvor det antas at belastningen skjer over hele netthøyden samtidig, men det er som regel ikke tilfellet i praksis. Massene i flomskred kommer ofte i skredbølger (Wendeler, 2016), slik at det kan avsettes masser fra de fremre bølgene før de neste treffer. Dette illustreres i figur 33, som i utgangspunktet tilsvarer figur 25 uten noe liggende snølag i utgangspunktet. Laginndelingen som vises i figuren er selvfølgelig en forenkling av hva som er tilfellet i praksis, men det gir et mer nøyaktig bilde på interaksjonen mellom skredmassene og barrieren, enn det som oppnås dersom det antas at alle laster virker samtidig.



Figur 33: Illustrasjon av hvordan belastningen på en barriere utvikler seg gjennom interaksjonen mellom skred og barriere dersom skredet kommer i bølger. Her er P_{hyd} det statiske trykket som beregnet i avsnitt 3.4.2, hvor den røde, stiplede linja illustrerer reduksjonen som følge av drenering av massene som diskutert i avsnitt 3.4.2.2. ΔP er det dynamiske lasttillegget på grunn av støtet når en ny skredbølge treffer barrieren, som anslått i avsnitt 3.4.3 og 3.4.4. Fordelingen kalt variant 1 forventes dersom etterfølgende masser legger seg på toppen av det som allerede er samlet opp, mens variant 2 forventes dersom de dytter dem opp og fremover. Figuren er hentet fra (Wendeler 2016).

Belastningen på en barriere truffet av et skred i bølger kan presenteres som en kombinasjon av noen av metodene nevnt ovenfor. I starten treffer den første bølgen nettet, som vist i øvre del av figur 33. Det dynamiske trykket beregnes da ved en av de nevnte metodene, i tillegg til det

hydrostatisk trykk som oppstår. Videre kommer neste bølge, og det kan oppstå to ulike situasjoner. Skredmassene i den etterfølgende bølga kan enten strømme opp på toppen av massene som ligger igjen etter forrige, eller så kan de dytte de avlagte massene oppover langs nettet. Hvilken situasjon som oppstår påvirker hvor den dynamiske lasta virker, mens den totale størrelsen på belastningen er den samme uansett situasjon. Dersom massene legger seg over de som allerede ligger oppstrøms nettet, vil de dynamiske kreftene virke på nettet i et høydeintervall bestemt av flyte høyden til den etterfølgende strømmingen. Dette er vist som variant 1 i figur 33. Hvis strømmingen i stedet dytter på massene som allerede ligger der, vil den dynamiske lasten fordeles jevnt utover den totale høyden massene dekker, illustrert som variant 2.

Det er flere grunner til at det er viktig å få med seg hvordan belastningen endres gjennom interaksjonen. Blant annet kan det være avgjørende i dimensjonering av ulike komponenter i barrieren, fordi belastningen på de nedre delene av barriere gjerne er størst tidlig i fyllingsprosessen, da de dynamiske kreftene kun virker på dem, uten å fordeles utover et større areal. I tillegg er lastforløpet viktig dersom energien tatt opp ved plastisk deformasjon av barrieren skal beregnes, som beskrevet i avsnitt 3.3.3.

Simulering av skredstrømning gjennom gitterkonstruksjoner

3.1 Simulering i REEF3D

Som nevnt i avsnitt 3.3.2, er en av utfordringene ved å bruke RAMMS Debris Flow i kartlegging av skredbanen etter installasjon av fleksible nettkonstruksjoner, at interaksjonen mellom skred og barrierer ikke simuleres riktig. Denne interaksjonen burde det finnes programvare som kan simulere, da lignende situasjoner er simulert ved belastning av flomskred. Slike simuleringer er for eksempel presentert i Zhao *et al.* (2020).

I dette avsnittet undersøkes det hvordan programmet REEF3D egner seg til å gjøre slike simuleringer. Det gjøres ikke for å undersøke potensialet til programmet som substitutt for RAMMS, men som et hjelpemiddel brukt i kombinasjon med det, nettopp for å gjøre den delen av simuleringen som RAMMS ikke kan.

RAMMS har nemlig egenskaper som gjør det velegnet til å simulere skred over en vanlig terrengmodell uten spesielle hindringer, som for eksempel at det er brukervennlig og gir brukeren mange muligheter til finjustering av simuleringene. Dersom et annet program kan egne seg til å simulere selve interaksjonen med en barriere og hvordan den påvirker strømmingen, vil det kunne være et steg på veien til å oppnå en fullstendig simulering av hele skredbanen, også etter installasjon av sikringstiltak. Eventuelt kan bruken av programmene kombineres ved å hente ut energitapet på grunn av interaksjonen fra ett program, for så å bruke det sammen med data fra RAMMS-simuleringer som beskrevet i avsnitt 3.3.3.

REEF3D er et program som brukes til simulering av interaksjoner mellom vann og konstruksjoner som for eksempel gitre, søyler og lignende, men det er ikke kjent hvordan det egner seg til simulering av våte skred som sørpe- og flomskred. Programmet bygger på det som i litteraturen kalles «computational fluid dynamics (CFD)», som kan brukes til simulering av strømning og bølger i åpne kanaler, numeriske bølgetanker og ved åpne vannspeil. I tillegg kan programmet brukes til simulering av sedimenttransport strømmingene medfører, og det er mulig å ta hensyn til at væskene er både ikke-newtonske og kompressible (Bihs, H. et. al., u. å. a). Alt dette er egenskaper det er nyttig å kunne ta hensyn til i simuleringene av et sørpeskred. I en ikke-newtonsk væske varierer nemlig viskositeten med skjærhastigheten, slik at den enten blir mer tyntflytende ved høye skjærhastigheter, eller tyktflytende (Helseth, 2020). Dette later det til at kan beskrive sørpeskred. I tillegg regnes en blanding av snø og vann som kompressibel, selv om kompressibiliteten til vann er neglisjerbar. Det kommer av luftrommene mellom partiklene i snømassene, som illustrert i figur 4 tidligere i oppgaven.

For å kjøre simuleringer i REEF3D, må brukeren legge inn to tekstfiler med input, kalt ctrl.txt og control.txt. I ctrl.txt defineres blant annet randbetingelsene, initialbetingelsene, og væskeegenskapene til fluidet, i tillegg til strømningseffektene som skal regnes med og eventuelle sedimenteringseffekter. Tilsvarende inneholder control.txt informasjon om for eksempel elementinndelingen i simuleringen og ulike hindre eller faste strukturer som kan settes inn. Informasjon om eventuelle nett og gitre legges likevel inn i ctrl.txt, og ikke i control.txt.

Strømning i forenklete testrenner med innsatte gitre er en typisk situasjon REEF3D egner seg til å simulere, og det er akkurat det som skal til for å beskrive interaksjonen isolert, uten innflytelse av faktorer som varierende tverrsnitt og ruhet i kanalen. Det er derfor gjort simuleringer av skred tilsvarende de nedskalerte forsøkene i denne oppgaven, slik at forsøksresultatene og simuleringene kan sammenlignes. Det er da tatt utgangspunkt i en

gitterbarriere med lysåpninger på 50 mm. Denne barrieren vil beskrives ytterligere i avsnitt 6.2.2. Ved å gjøre utgangspunktet for simuleringene og forsøkene forholdsvis like, dannes et inntrykk av hvor godt programmet egner seg til simulering av nedskalerte forsøk på en interaksjon mellom sørpeskred og en gitterkonstruksjon. Dette kan gi en indikasjon på hvorvidt simuleringene av større, mer kompliserte nett i naturlige renner er aktuelt med samme program.

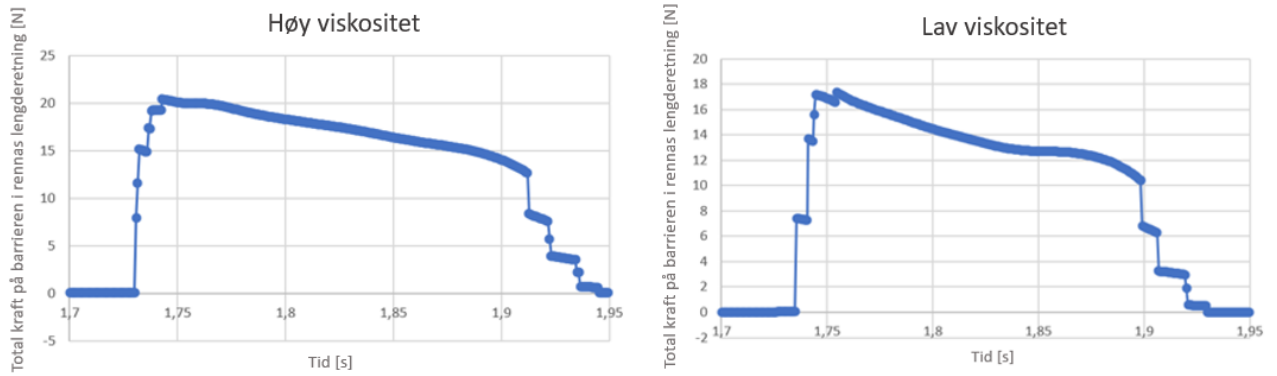
I og med at REEF3D ikke er brukt i simulering av sørpeskred tidligere, er det noe usikkerhet i hvilke inputverdier som skal brukes, og hvilke tilpasninger som bør gjøres for å få best mulig simuleringer med kortest mulig beregningstid. Forenklinger i modellen vil i noen tilfeller kunne spare mye tid og beregningskapasitet, og det lønner seg derfor å gjøre en vurdering på forhånd av hvilke antakelser som kan forenkle problemet uten å introdusere vesentlige usikkerheter. Forenklingene og valgene som er gjort i forbindelse med simuleringen i denne oppgaven, fremgår av tekstfilene gjengitt i vedlegg A. Noen av inputverdiene er valgt likt som tidligere simuleringer med vann i testrenner, mens for eksempel viskositeten og massetettheten er justert for å få fluidet i simuleringen til å oppføre seg så likt massene i et sørpeskred som mulig.

Skredet er simulert som en homogen masse med en noe større kinematisk viskositet enn vann, satt til $2,311 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Denne verdien er et anslag basert på verdier fra forsøk presentert i Kobayashi et. al. (1994). Her ble den dynamiske viskositeten til sørpe med et vektforhold på 1:5 mellom snø og vann målt, da blandingen ble sluppet ned ei testrenne gjentatte ganger. Helningen på renna ble variert mellom forsøkene, slik at viskositeten ble målt ved strømming med en helning på både 3° , 5° og 10° . Resultatene viste viskositetsverdier mellom $2,12 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$ og $2,04 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$, med et gjennomsnitt på $2,08 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$, og ingen tydelig stigende eller synkende trend med variasjonen i helningen på underlaget. Det antas derfor at den dynamiske viskositet i sørpeskred med omtrent lik sammensetning kan anslås å ligge rundt $2,08 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$. Tettheten til skredmassene er i simuleringen satt til 900 kg/m^3 , som er anbefalt maksimalverdi for massetettheten til sørpe i dimensjoneringsøyemed etter Norem (2014). Dette resulterer i den valgte inputverdien for den kinematiske viskositeten, som er definert som forholdet mellom den dynamiske viskositeten og massetettheten til fluidet.

Fordi sørpeblandingen i forsøkene viskositeten er hentet fra er vesentlig mer vannmettet enn blandingene brukt i denne oppgaven, er det også gjort simuleringer med den nedre verdien for viskositet anbefalt brukt i beregning på flomskred i Norem (2014), $0,07 \text{ Pa s}$. Det tilsvarer en kinematisk viskositet på $7,778 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Dette gjøres fordi viskositeten hentet fra Kobayashi et al. (1994) kan forventes å ligge i det lavere sjiktet for sørpeskred på grunn av vannmetningen, mens viskositeten for flomskred skal kunne forventes å være høyere enn for flomskred. Det betyr ikke at noen av disse er grenseverdier for hvilken viskositet et sørpeskred kan ha, men at de sammen kan gi informasjon om hva som kan forventes, og ikke minst hvor sensitiv simuleringene er for endringer i verdiene.

Når programmet er ferdig, får brukeren ut en rekke tekstfiler som kan brukes videre i andre programmer. En av filene inneholder blant annet informasjon om kreftene gitteret utsettes for, og er på et format som egner seg til prosessering i Excel. Figur 34 viser et plot over kraftresultanten i retningen langs lengdeaksen til renna. Plottet viser at skredfronten treffer gitteret etter 1,73 sekunder, og nesten momentant påfører det en kraft på mellom 17 og 21 N, avhengig av viskositeten. I løpet av under et halvt sekund har hele skredet passert barrieren, fordi skredvolumet brukt i forsøkene er lite. Likevel kan det sees at kreftene reduseres etter at skredfronten har passert, slik at kraften på grunn av massene i skredhalen ligger ned mot 4-5 N lavere enn i starten.

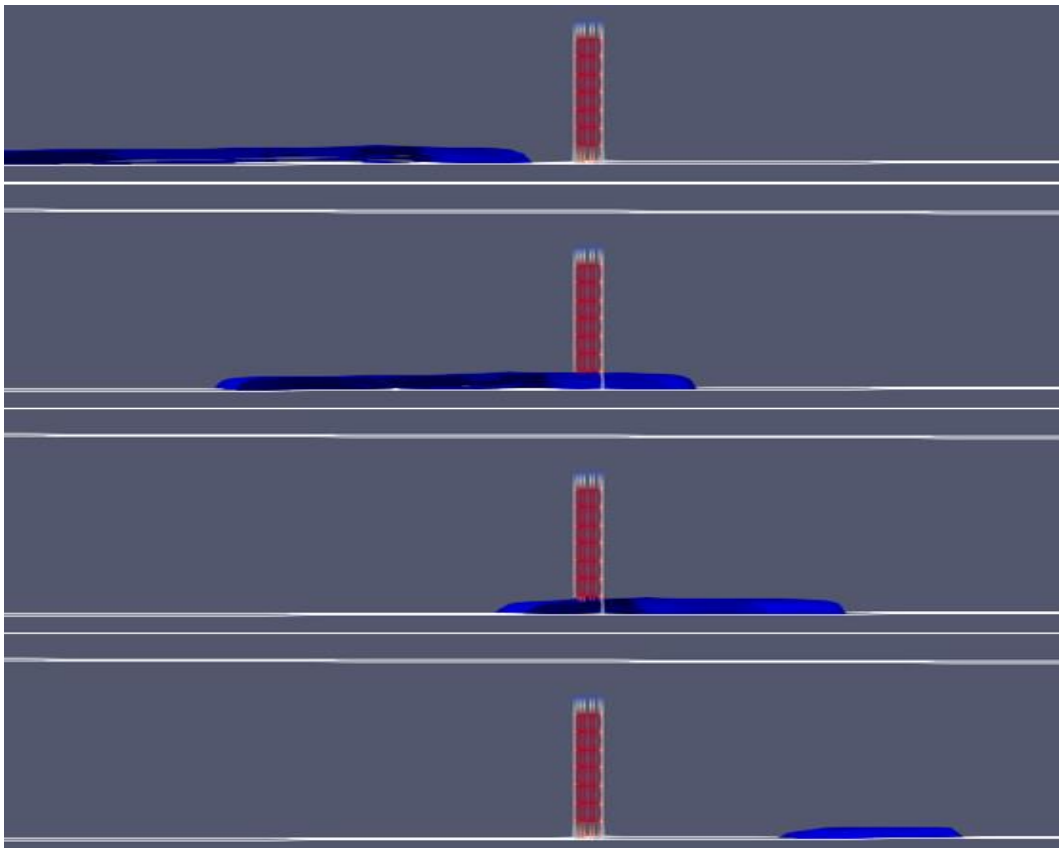
Simulering av skredstrømning gjennom gitterkonstruksjoner



Figur 34: Den totale krafta normalt på barrieren i simuleringene som en funksjon av tid. Venstre figur viser kreftene i simuleringen med en viskositet på $7,778 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, mens høyre figur er hentet fra simuleringene med $2,311 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.2 Visualisering av resultater fra REEF3D i ParaView

Etter å ha kjørt REEF3D kan flere av de resulterende tekstfilene importeres til ParaView, hvor resultatene visualiseres og post-prosesseres. Her er det mulig å hente ut informasjon om for eksempel hastigheten og turbulensen før og etter passering av barrieren. I tillegg kan høyden til overflata på strømmingen hentes ut for å få et inntrykk av hvordan massene samles opp på oversiden av barrieren. Figur 35 viser dette for simuleringene beskrevet i avsnitt 4.1. Det er ikke funnet noen synlig forskjell mellom bevegelsen til skredmassene simulert med høy og lav viskositet, og det gjengis derfor kun bilder fra simuleringen med lav viskositet i figuren.

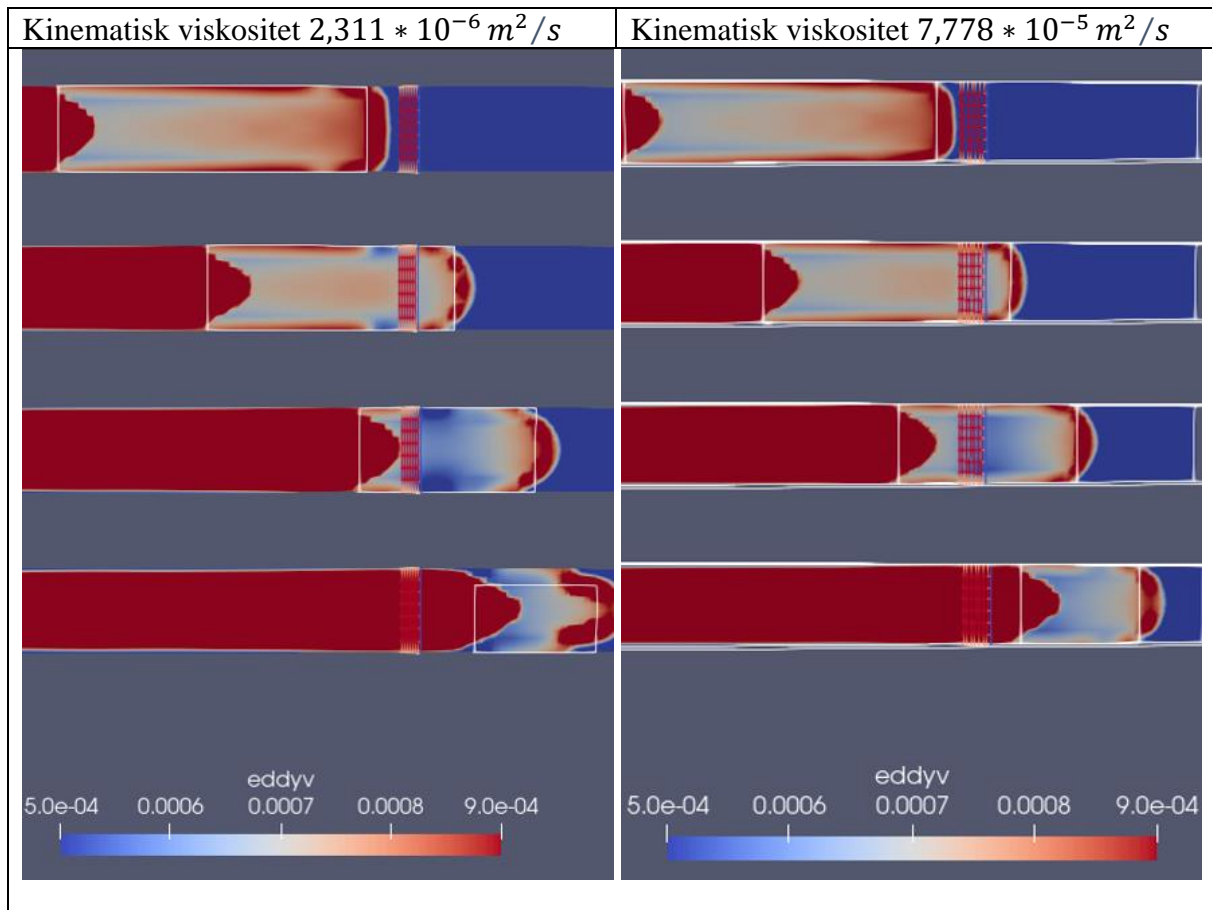


Figur 35: Simulering av et nedskalert skred i et oppsett som skal tilsvare testforsøkene som presenteres senere i oppgaven. Barrieren er en gitterbarriere med kvadratiske lysåpninger med sidekanter på 50 mm, og det er forsøkt å tilpasse skredmassene til å etterligne sørpe. Denne figuren ble ikke endret av betydning ved justering av viskositeten til sørpa, og gjengis derfor kun en gang.

Simulering av skredstrømning gjennom gitterkonstruksjoner

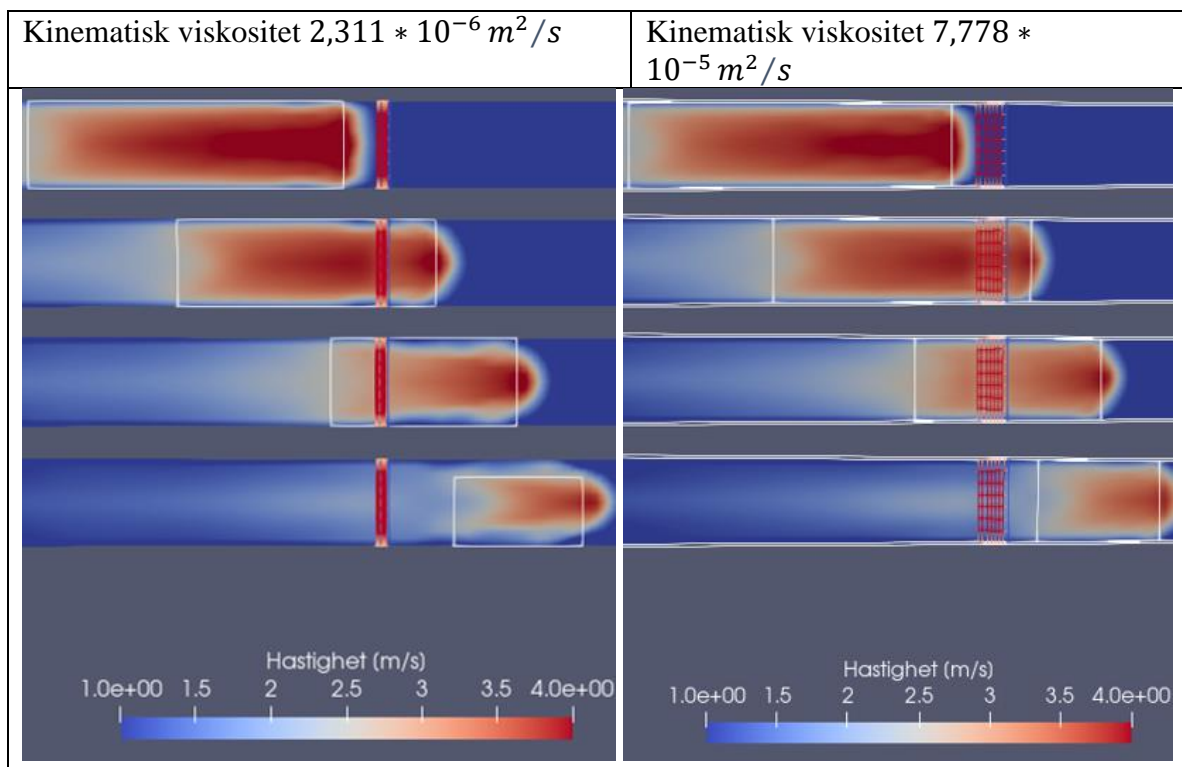
Fra denne simuleringen ser det ut til at barrieren ikke fanger opp noe av massene, og at en eventuell virkning på utløpsdistansen til skredet derfor skyldes endringer i strømningshastigheten eller turbulensen ved passering. Fordi barrieren i simuleringene tilsvarer gitteret med de minste lysåpningene brukt i forsøkene senere i oppgaven, betyr det at det ikke forventes noen vesentlig masseoppsamling ved forsøk på noen av gitterbarrierene. Dette tar riktignok forbehold om at det ikke er større partikler i skredmassene, da fluidet i simuleringene er homogent, med samme viskositet og massetetthet over det hele.

Figur 36 illustrerer hvordan barrieren påvirker turbulensen i skredmassene, ved å vise hvordan den turbulente viskositeten til fluidet varierer med tiden. Verdiene er hentet fra et snitt 20 mm over kanalbunnen, hvilket er omtrent midt i strømningshøyden. Turbulent viskositet er en størrelse som forteller hvor mye av energitransporten i fluidet som gjøres gjennom virvelbevegelser, og er mye brukt til å modellere turbulens (Jarvis et. al., 2005). Det kan sees en endring i turbulensen i skredmassene ved passering av nettbarrieren brukt i simuleringene. Dette betyr at simuleringene ikke viser at det vil oppstå noe energitap på grunn av økt turbulens, hvor den kinetiske energien i skredet blir omgjort til varme.



Figur 36: Den turbulente viskositeten til skredmassene er kartlagt i fire steg av skredbevegelsen, fra før skredfronten treffer barrieren, til hele skredhalen er forbi. Verdiene som brukes i figuren er hentet fra et snitt 20 mm over kanalbunnen, altså omtrent midt i skredet. De simulerte skredmassene befinner seg hele tiden innenfor det hvite rektangelet, og fargene utenfor dette er derfor ikke av betydning. Figuren viser en reduksjon i turbulensen ved passering av barrieren, hvilket er motsatt av hva som er forventet.

Figur 37 viser hvordan gitteret påvirker hastigheten til skredmassene på overflaten. Reduksjonen i hastighet ved passering av nettet er mindre tydelig, men til stede. Ved nærmere betraktninger ser denne hastighetsendringen ut til å være opp mot 2 m/s på det meste.



Figur 37: Hastigheten til skredmassene er kartlagt i fire steg av skredbevegelsen, fra før skredfronten treffer barrieren, til hele skredhalen er forbi. Som i figur 36, er de simulerte skredmassene hele tiden innenfor det hvite rektangelet slik at fargene utenfor dette kan sees bort fra, og verdiene er hentet fra et snitt 20 mm over kanalbunnen. Figuren viser at hastigheten reduseres med opptil 2 m/s ved passering av barrieren, omtrent likt for begge simuleringene.

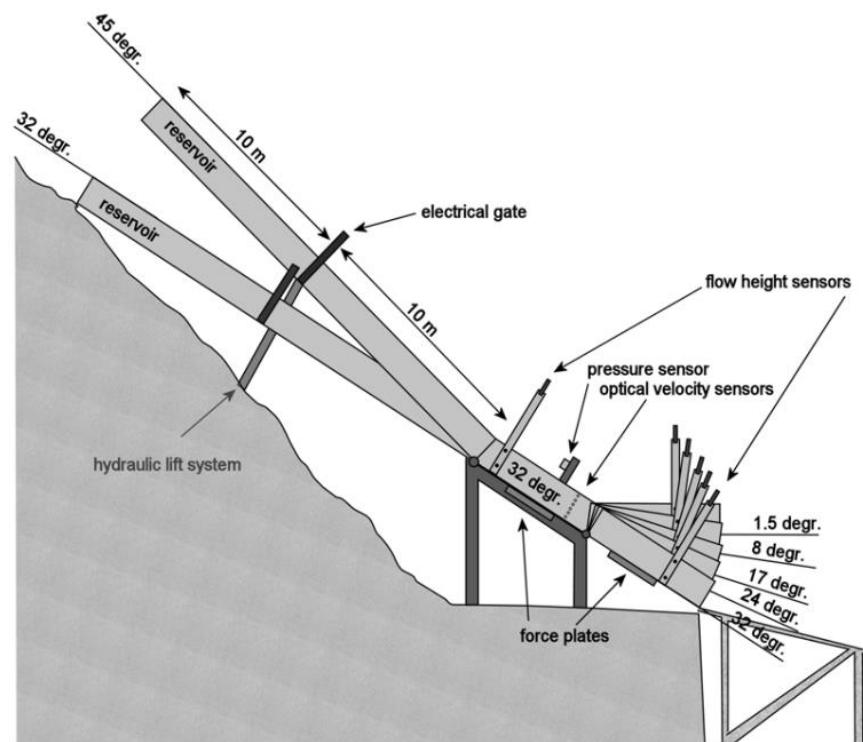
Ut fra simuleringene ser det altså ut til at turbulensen i skredet påvirkes av barrieren, men motsatt vei at hva som forventes. I tillegg reduseres hastigheten ved passering, men dette er som forventet. Likevel endres ikke volumet til skredet videre, iallfall ikke med den valgte størrelsen på maskeåpningene i gitrene. Fordi skredet simuleres som et homogent fluid, var det ikke forventet at det skulle samles opp skredmasser foran barrieren over lengre tid. Likevel kunne det vært mulig å se noe oppbremsing og dermed økt flyte høyde nær barrieren før massene kom gjennom med en lavere hastighet. Strømningen i figur 35 viser ingen tegn til noe slikt. Dette kan riktignok påvirkes noe av at det er lagt inn i programmet at massene er kompressible, men det indikerer at gjennomstrømningen gjennom gitteret med 50 mm åpninger burde foregå relativt raskt dersom simuleringene skal stemme overens med observasjonene fra forsøk.

Forsøk i litteraturen

Hittil er det referert kort til en rekke publikasjoner med problemstillinger og resultater som har tilknytning til våte skred på fleksible nettkonstruksjoner. Mange av disse er underbygget av materiale funnet fra enten nedskalerte forsøk i laboratorier, eller fullskala forsøk. Det følgende kapittelet vil gå nærmere inn på enkelte spesielt interessante forsøksoppsett, for å danne et inntrykk av hvordan andre har tilnærmet seg problemstillingene med barrierer og skred i naturen. Fordi det ikke er funnet publikasjoner om nettbarrierer truffet av sørpeskred, er det kun presentert forsøk hvor lastene fra sørpeskred måles på en enkel, rigid søyle. I tillegg er det funnet en rekke publikasjoner om både fullskala og nedskalerte forsøk på flomskred som treffer ulike barrierer, også fleksible nettbarrierer. Dette finnes det mye informasjon om, og utover de forsøkene som beskrives her, kan det refereres til blant annet Scheidl *et al.* (2013), Hübl *et al.* (2009), Tan *et al.* (2020), Gubler (2007) og Ng *et al.* (2018). Utfyllende lister over forsøk gjort på interaksjonen mellom nettbarrierer og flomskred gjennom tidene, finnes også i Wendeler (2018) og Proske *et al.* (2011).

4.1 Nedskalerte sørpeskred mot en enkel, rigid søyle

I Jaedicke *et al.* (2008) er det utført tester i ei 2,5 meter bred og 30 meter lang renne som vist i figur 38. Helningen på renna ble satt til 32° hele veien, selv om det i figuren fremgår at det er mulig å stille inn renna i ulike posisjoner. Det ble gjort flere forsøk for å finne ut av ulike aspekter ved sørpeskred og hvordan strømmingen i dem oppfører seg, men det som er mest relevant for oppgaven, er forsøkene hvor lasta på ei søyle plassert i skredbanen ble målt. I disse forsøkene ble også hastigheten og flyteøyden til strømmingen målt, og tettheten til massene.



Figur 38: Renneoppsettet brukt i forsøkene på sørpeskred i Jaedicke *et al.* (2008). Helningen på renna var satt til 32°, øvrige vinkler viser kun mulige innstillinger på renna. Søyla belastningen ble målt på kan sees omtrent midt i figuren. Figuren er hentet fra Jaedicke *et al.* (2008).

Søyla som ble brukt i forsøkene i Jaedicke *et al.* (2008) kan sees i figur 39, med en lastcelle forholdsvis nært underlaget i renna. Plasseringen av denne er vist i figur 38.



Figur 39: Foto av søyla belastningen fra sørpeskredene ble målt på, hvor lastcella sees nær bunnen av søyla. Bildet er hentet fra Jaedicke *et al.* (2008).

Det ble gjort totalt 14 forsøk med sørpeskred i testrenna, men i litteratursøket i forbindelse med oppgaven har det bare blitt funnet resultater fra ett av forsøkene hvor det ble målt trykk på søyla. I dette forsøket ble trykket målt til 42 kPa , flyteøyden til 1,01 meter, hastigheten til $7,3 \text{ m/s}$ og tettheten til massene til 476 kg/m^3 . Dersom trykket skal beregnes ved bruk av strømningsmotstand og dragkoeffisienten C_D , resulterer det i en koeffisient $C_D = 3,3$. Fordi formen og størrelsen på søyla er annerledes enn både nettene i fleksible nettbarrierer og vaierne de er flettet sammen av, kan ikke denne verdien sammenlignes direkte med dem som finnes fra forsøkene på gitre senere i oppgaven. Resultatene er likevel nyttige i det at de gir en omtrentlig størrelsesorden på dragkoeffisienten. I tillegg er det gjort en erfaring med at bruk av infrarødt lys som fanges opp av en sensor for å finne posisjonen til skredmassene og dermed måle hastigheten, ikke egner seg til bruk på sørpeskred.

4.2 Full- og storskala flomskred mot fleksible nett

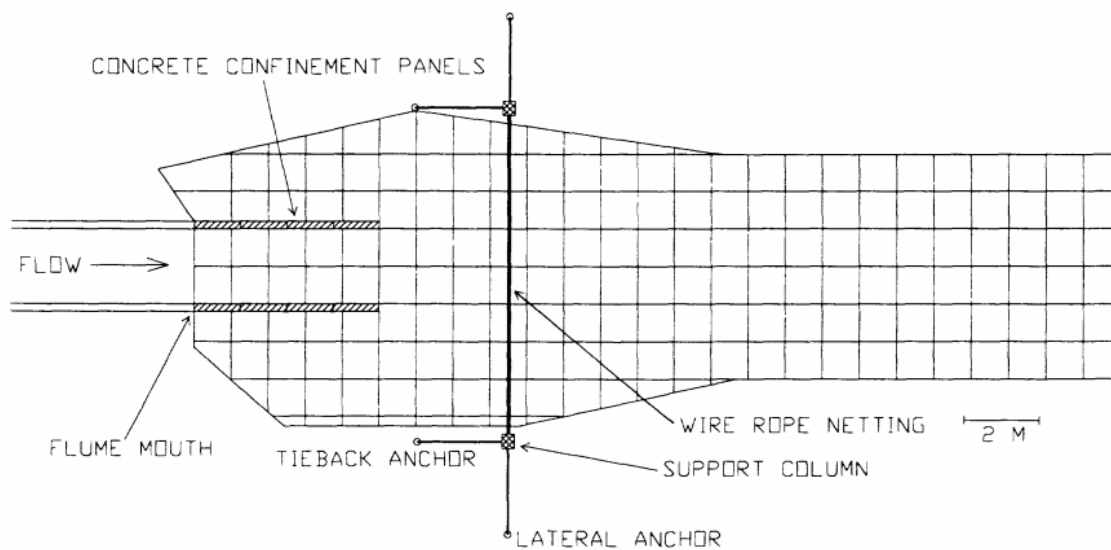
Både i Wendeler *et. al.* (2016; 2018) og DeNatale *et. al.* (1999) presenteres det storskala forsøk på flomskred gjennom fleksible nettbarrierer. I førstnevnte er det installert nett i en kanal hvor det er kjent at det forholdsvis ofte går flomskred, og som derfor er utviklet til et testområde for flomskred. Det er observert både grove flomskred og skred med mer finmasser i kanalen, og det var derfor ikke kjent hva som ville passere i perioden som ble studert. Totalt 8 flomskred passerte barrieren i 2005 og 2006, og det er målingene fra disse skredene som er analysert i Wendeler (2016), mens det i Wendeler (2018) også er inkludert data fra et skred i 2008.

I forbindelse med forskningsprosjektet på nettbarrierer i sikring mot flomskred, presentert i Wendeler (2016; 2018), ble det brukt geofoner et stykke lengre opp i kanalen, som sendte signaler til måleinstrumentene rundt barrieren for at de skulle begynne målingene sine. Dette inkluderte blant annet to videokameraer for å kunne studere strømmingen visuelt, en vekt som ga informasjon om vannmengden og tettheten til skredmassene, og en skjærvegg som viste hastighetsprofilen til den passerende strømmingen, samt skjærkreftene i den. Rett ved barrieren

var det også installert en laser som målte flyteøyden på skredet og oppfyllingsøyden foran nettet. På selve konstruksjonen ble lastceller brukt for å måle strekkraftene i vajerne. Det ble gjort endringer på nettene mellom enkelte av skredene, for å forbedre dem etter manglene funnet i tidligere forsøk.

Resultatene ga informasjon om deformasjonene i fleksible barrierene som følge av belastningen, og hvordan barrieren førte til erosjon av kanalen nedstrøms nettet. I tillegg dukket det opp flere forbedringsområder på selve konstruksjonen, og det ble dannet grunnlag for beregninger med fremgangsmåten beskrevet i avsnitt 3.4.4.4, og vurderinger av den. Fordi resultatene ble sammenlignet med resultater fra nedskalerte forsøk i ei testrenne i laboratoriet, ga de også nyttig informasjon om hvordan parametere kan nedskaleres i modellering av skred med naturmaterialer (Wendeler. 2016).

I DeNatale et. al. (1999) er det utført forsøk i en testrenne som er nedskalert litt i forhold til naturlige designskred, men ikke helt ned til størrelsene det er snakk om i forsøkene og simuleringene i denne oppgaven. I hvert forsøk ble det sluppet omtrent 10 kubikkmeter med vannmettet, grovkornet sand med mindre enn 2% finmasser ned ei 95 meter lang renne. De øverste 88 meterne hadde en helning på 31°, mens de nederste 7 meterne var flatet ut til 3°. Til tross for utflatingen hadde massene hastigheter på mellom 5 og 9 m/s. Tverrsnittet på renna var rektangulært, med en dybde på 1,2 meter og bredde på 2 meter. Like nedenfor enden av renna var nettene som skulle testes plassert som vist i figur 40.



Figur 40: Oversiktsbilde av oppsettet brukt i DeNatale (1999) for storskala tester av fleksible nettbarrierer truffet av flomskred. Oppsettet er sett ovenfra, med bunnen av renna massene strømmer ned gjennom til venstre, og nettbarrieren midt i figuren. Nettbarrierene som ble brukt varierte mellom forsøkene, men oppsettet som illustrert var det samme. Figuren er hentet fra DeNatale (1999).

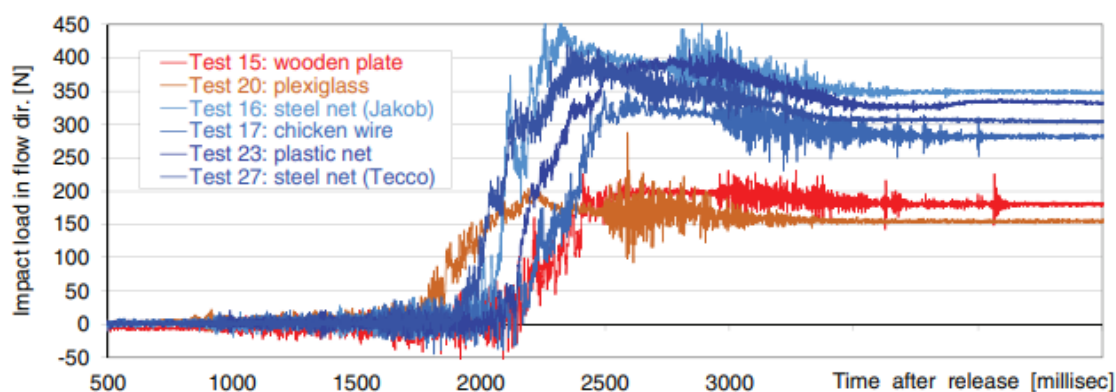
Blant nettene som ble testet, var tre nett med kvadratiske lysåpninger på 30, 20 og 15 cm, og et ringnett bestående av ringer med 30 cm i diameter flettet sammen til en netting. På grunn av et lite antall tester gjort i forbindelse med prosjektet, kan ikke resultatene brukes til å bestemme klare sammenhenger mellom krefter, maskestørrelser, maskeform, hastigheter eller lignende, da flere parametere ble endret mellom forsøkene. Likevel er det ett resultat som skiller seg ut som spesielt nyttig for diskusjonen om nettbarrierer som sikring mot sørpeskred.

Alle nettypene ble nemlig testet i kombinasjon med finere netting à la gjerde- og hønsenetting for å holde tilbake mer av sedimentene, og ringnettet var i tillegg dekket av en siltduk for å forsterke effekten. Dette var fordi mye av massene fra skredfronten gikk rett igjennom lysåpningene slik de var i utgangspunktet, mens nettene egentlig kunne tåle å fange opp mye mer. De fine nettingene bidro til at en del av sedimentene ble holdt tilbake, mens siltduken førte til nærmest full stopp av dem. Dette resultatet kan overføres til sikring mot sørpeskred ved at bruk av silt og finmasket netting i tillegg til hovednettet kan bidra til å stoppe mer av massene, selv om de ikke kan bære store laster i seg selv. Etter resultatene fra simuleringen tidligere i oppgaven, hvor veldig lite av skredmassene ble holdt igjen av barrieren, later dette til å være en billig og enkel løsning på et problem som må adresseres for at sikringsløsningen skal fungere som ønsket.

I utgangspunktet burde også testene i DeNatale (1999) kunne fortelle noe om hvordan formen til lysåpningene i nettbarrierene påvirker interaksjonen, fordi de samme målingene er gjort for ringnett som for nett med kvadratiske lysåpninger av omtrent samme størrelse. Likevel er det vanskelig å hente ut informasjon om dette fra resultatene, nettopp fordi hovednettene er brukt i kombinasjon med ulike fine nettinger eller silt. Dette gjør at man går glipp av informasjon om et forhold som er viktig i denne oppgaven, fordi det både i simuleringene og senere forsøkene blir brukt kvadratiske åpninger, mens det i de kommersielle sikringsbarrierene gjerne brukes ringnett.

4.3 Nedskalerte laboratorieforsøk på flomskred mot fleksible nett

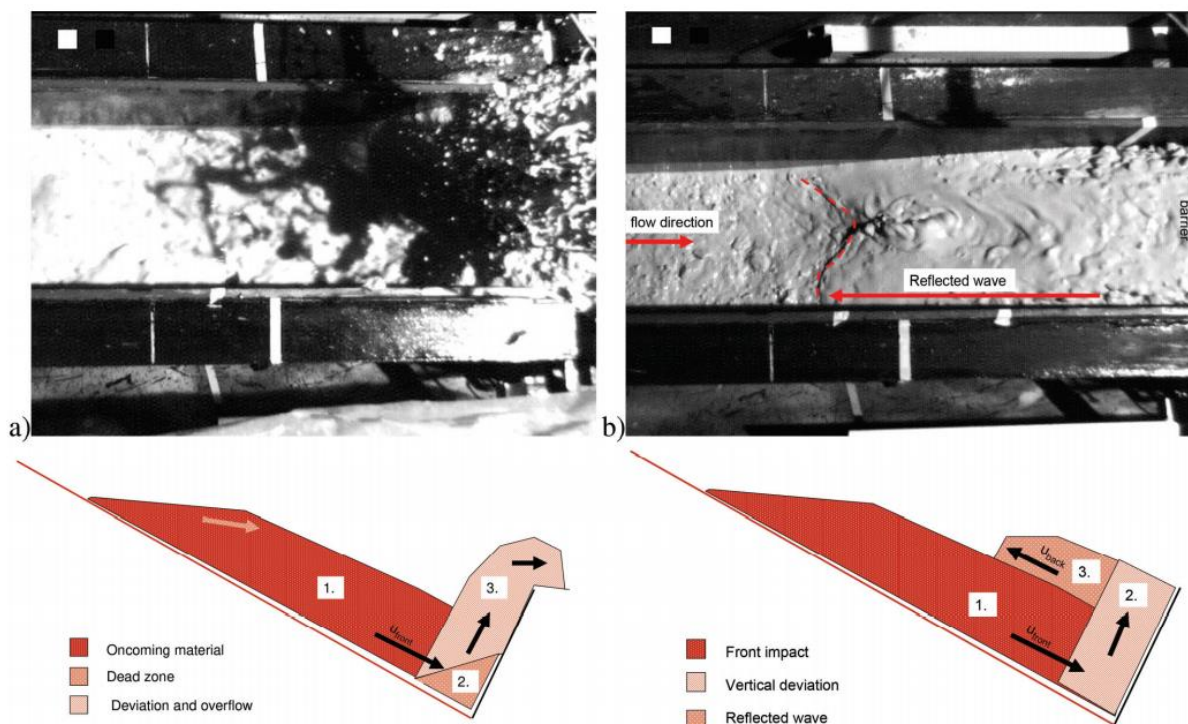
I Wendeler og Volkwein (2015), Wendeler (2016) og Wendeler et. al. (2018) beskrives et testoppsett ganske likt oppsettet i denne oppgaven, som brukes til å måle kreftene på ulike nett og plater truffet av en sedimentblanding med vanninnhold mellom 30 og 52%. Lastmålingene er gjengitt i figur 41. I forsøkene er det også målt hvor stor tilbakeholdelseeffekt konstruksjonene har på massene, altså hvor stor andel av skredmassene som blir stoppet av konstruksjonen. Disse laboratorieforsøkene er gjort hovedsakelig for å sjekke hvordan testresultatene fra et slikt nedskalert oppsett kan overføres til fullskala tester på flomskred. Forholdene i nedskaleringen undersøkes ved å utføre en dimensjonsløs analyse basert på testresultatene i renna, og resultater fra de tilsvarende fullskala testene som er beskrevet i avsnitt 5.2.



Figur 41: De totale kreftene på ulike barrierer truffet av flomskred på 50 liter i nedskalerte forsøk presentert i Wendeler et. al. (2018). Kreftene er vist som en funksjon av tid. Det er tydelig at belastningen på de tette barrierene (treplate og plexiglass), var lavere enn på alle de ulike nettene, mens maksimalkreftene på de ulike nettbarrierene kun varierte med opptil 100 N.

Forsøk i litteraturen

Det er tydelig fra figur 41 at kreftene på de heldekkende platene i tre og plexiglass er målt til å være lavere enn de fleksible nettene, til tross for forventningen om at lastene burde bli mindre når gjennomstrømning tillates. Avviket fra forventningene er forklart med at de fremste massene i skredet bygger opp en såkalt «dødzone» foran de tette dammene, som vist i figur 42. Denne fører de etterfølgende massene opp over kanten på platene som jetstrålene foreslått i Armanini (1997), som det i avsnitt 3.4.3.2 ble foreslått at belaster barrieren mindre enn dersom massene slås tilbake som en reflektert bølge. Dette gjør også så store deler av skredmassene kommer seg forbi barrierene, til tross for at de er tette i bunnen. Dette senker naturlig nok den statiske belastningen på platene, hvilket stemmer overens med de lave statiske lastene lest av plottet i figur 41. I tillegg senkes støtkreftene noe, som foreslått i Armanini (1997). Effekten med dødsoner og jetstråler er også observert i forsøk presentert i Song et. al. (2018). Figur 42 illustrerer forskjellen på bevegelsen oppstrøms barrierer hvor en dødzone bygges opp, og det ikke oppstår.



Figur 42: Venstre: en illustrasjon av den innkommende strømmingen som ble bøyd av foran de tette barrierene, på grunn av dødsonen som oppsto. Strømningsretningen ble da endret slik at massene sto som en jet-stråle langs barrieren. Øvre venstre figur viser et foto fra et av forsøkene hvor dette ble observert. Høyre: tilsvarende illustrasjon av situasjonen hvor de fleksible nettbarrierene bremset strømmingen, slik at den ble dyttet tilbake som en reflektert bølge i stedet for opp som en jet-stråle. Fotoet til høyre viser oppstrøms side av barrieren i en slik situasjon. Figuren er hentet fra Wendeler et. al. (2018).

I tillegg er det i Wendeler et. al. (2018) observert at det oppstår reflekterte bølger i forsøkene med fleksible nett, og ingen jet-stråler. Det foreslås at dette er fordi fleksibiliteten i nettene bremser strømmingen før den stoppes helt, altså går strømmingen inn i en retardasjonsfase. Etter teorien presentert i Armanini (1997) og beskrevet i avsnitt 3.4.3.2, skal retarderende strømming i møte med en barriere gi en reflektert bølge, og ingen jet-stråle, som observert. Dersom kausaliteten stemmer, betyr det at kun metoden presentert for skred i retardasjonsfasen i Armanini (1997) er aktuell for beregninger på fleksible nettkonstruksjoner.

Metode for forsøk

Hensikten med forsøkene er å undersøke hvordan rigide gitterbarrierer påvirker strømmingen til sørpeskred, og hvilke laster som påføres barrieren i interaksjonen. Dette gjøres for å få et bedre grunnlag for å vurdere effekten av nettbarrierer som sikring mot sørpeskred, og hvordan barrierene skal dimensjoneres. Forsøkene er skalert ned, og det er derfor relevant å sette seg inn i hvordan dette er gjort før videre forklaring av testoppsettet.

5.1 Modellskalering

For å få resultatene fra en modell på laboratoriet til å gi et riktig bilde av hvordan et fullskala sørpeskred oppfører seg, må de fysiske sammenhengene ivaretas ved nedskaleringen. Dette blir spesielt vanskelig i forsøk som omhandler strømming av inhomogene fluider hentet fra naturen, som skredmasser i flom-, snø- og sørpeskred. I Volkwein (2014) er det derfor konkludert med at nedskalerte forsøk på flomskred ikke egner seg til bruk i utvikling av uttrykk for ulike fysiske sammenhenger- som for eksempel sammenhengene presentert i avsnitt 3.4.3 og 3.4.4. Likevel er slike forsøk mindre kostbare å gjennomføre, og kan derfor utføres flere av. De nedskalerte forsøkene som gjøres i denne oppgaven kan derfor ikke brukes til å fastslå sammenhenger som skal brukes på storskala skredsituasjoner, men de kan brukes til å få en pekepinn på hva som bør undersøkes videre i større tester. Likevel er det ønskelig å minimere feilkildene også i de nedskalerte forsøkene, slik at resultatene peker ut riktige elementer og sammenhenger som skal undersøkes videre. Resultatene vil kunne påvirkes mye dersom feilskalering oppstår, og det er derfor viktig å minimere denne feilkilden ved å skalere ned modelloppsettet på best mulig måte.

I praksis viser det seg å være urealistisk å få til en nedskalering som blir riktig både med tanke på både rennestørrelse, barriere og skredmassene. Da er det viktig å kjenne til sammenhengene innen modellskalering, slik at det er mulig å forutsi hva som burde prioriteres å få skalert riktig. De ulike forholdene som ideelt sett burde ivaretas, kan deles inn i geometriske, kinematiske og dynamiske forhold. I de følgende avsnittene blir de ulike presentert.

5.1.1 Geometriske forhold

Geometriske forhold bevares ved en modellskalering dersom alle lengdemål endres med en konstant faktor L_s (Wendeler, 2016). Dette betyr at dersom for eksempel lengden på renna i testoppsettet halveres, må også diameteren til lysåpningene i barrieren halveres for at de geometriske forholdene skal ivaretas ved nedskaleringen. I dette eksempelet ville faktoren L_s vært lik 0,5.

På grunn av egenskapene til snø og sørpe, har det vist seg utfordrende å ivareta de geometriske forholdene ved nedskalering til modellen i laboratoriet. Dette er fordi sørpe består av en blanding av vann og snø, hvor strukturen og størrelsen på partiklene og sammenhopningene i snøen er vanskelig å påvirke. Dersom det antas at størrelsesfordelingen i sørpeblandingen er lik for fullskala forsøk og nedskalerte forsøk, kan ikke geometrisk likhet oppnås. Fordi de nedskalerte nettbarrierene har vesentlig mindre lysåpninger i modelloppsettet enn i full skala, vil det oppstå en skaleringsfeil i forsøkene. Det må vurderes om skaleringsfeilen er av så stor betydning at forsøkene ikke vil være av nytteverdi, eller om det er tilstrekkelig å ta hensyn til feilen ved tolkning av resultatene.

5.1.2 Kinematiske forhold

De kinematiske forholdene opprettholdes ved å sørge for at både tidsintervaller, hastigheter og akselerasjoner nedskaleres med omtrent samme faktor (Jirka, 1998). Dette er tilfellet dersom reynoldstallet Re holdes konstant, altså at ligning 27 oppfylles.

$$\left(\frac{uh_{fl}}{\nu}\right)_m = \left(\frac{uh_{fl}}{\nu}\right)_F \quad (27)$$

I ligningen er ν den kinematiske viskositeten til fluidet, definert som $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, hvor μ er den dynamiske viskositeten til fluidet. I de nedskalerte forsøkene gjort i denne oppgaven vil heller ikke dette kravet bli oppfylt, på grunn av utfordringer presentert i avsnitt 6.1.4.

5.1.3 Dynamiske forhold

For dynamisk likhet mellom to skalerte modeller, må forholdene mellom kreftene i systemet tilsvare de samme forholdene i de naturlige skredene. Dette gjelder alt fra treghetskrefter, tyngdekraften, trykkrefter, overflatetrykk og viskøse krefter, som alle må skaleres slik at forholdet mellom dem blir ivaretatt. Dette kan dog ikke skje uten at modellene er både geometrisk og kinematisk like, så det å oppnå de samme dynamiske forholdene i en modell ved nedskalering, er svært vanskelig.

Det finnes en rekke størrelser som beskriver sammenhengen mellom ulike krefter som virker i et system. (Wendeler, 2016). For forsøkene i denne oppgaven, er de følgende ansett som de viktigste:

5.1.3.1 Konstant froudetall

Dersom froudetallet til strømmingen i en modell holdes uendret ved skalering, vil tyngdekraften og de kreftene som følger av den skaleres riktig i forhold til treghetskreftene (Steen, 2017). Denne faktoren er det spesielt viktig å holde konstant i forsøk på skred, da de både drives fremover av tyngdekraft, og har en fri overflate hvor det i mange tilfeller er observert bølgedannelser. Bølgekrefter følger nemlig av tyngdekraften, og inngår derfor i sammenhengen. For å holde froudetallet konstant, må likevekten i ligning 28 opprettholdes. Her står indeksen m for verdier fra den skalerte modellen, og F for verdier fra modellen før skalering, altså i full skala.

$$\frac{u_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{u_F}{\sqrt{gL_F}} \quad (28)$$

u er hastigheten til strømmingen som modelleres og L er en karakteristisk lengde, som for eksempel lengden på kanalen forsøkene gjøres i. Fordi geometrisk likhet også etterstrebes, betyr dette at ligning 28 kan skrives om til ligning 29, hvor L_s er faktoren lengdene i modellen nedskaleres med, som forklart i avsnitt 6.1.1.

$$u_m = u_F \sqrt{L_s} \quad (29)$$

5.1.3.2 Konstant reynoldstall

For å skalere de viskøse kreftene riktig, må også forholdet mellom de viskøse kreftene og treghetskreftene ivaretas, hvilket betyr at reynoldstallet Re holdes konstant (Steen, 2017), som vist i ligning 27. Fordi dette også er kravet for kinematisk likhet før og etter skalering, betyr det at de viskøse kreftene skaleres riktig dersom kinematisk likhet oppnås.

5.1.3.3 Konstant machnummer

Videre må også forholdet mellom treghetskreftene og væsketrykket skaleres riktig. Dette gjøres ved at machnummeret M_n holdes konstant, som vist i ligning 30. Hvis fluidet i modellen er vann, er dette så lite kompressibelt at machnummeret kan antas å være uendret uansett skalering. Dog er det ikke unaturlig å anta at en blanding med snø og vann kan være mer kompressibelt enn rent vann, da det gjerne er porer i snøen som vist i figur 4, som kan presses sammen. Det kan derfor være noe mer relevant å undersøke for modellering av sørpeskred, enn det det antas at det er for vann.

$$\left(\frac{u}{\sqrt{E_v/\rho}} \right)_m = \left(\frac{u}{\sqrt{E_v/\rho}} \right)_F \quad (30)$$

I ligning 30 betyr m at verdiene hentes fra den skalerte modellen, og F at de er fra modellen før skalering, altså i fullskala. E_v er volumelastisiteten til fluidet.

5.1.3.4 Konstant webers tall

For at kreftene som følge av overflatespenningene skal skaleres riktig i forhold til treghetskreftene, må webers tall W_n holdes konstant. Dette er uttrykt i ligning 31, med samme notasjon som ligning 30. σ er overflatespenningen til fluidet, som varierer både mellom ulike fluider, og med temperatur.

$$\left(\frac{u}{\sqrt{\sigma/\rho L}} \right)_m = \left(\frac{u}{\sqrt{\sigma/\rho L}} \right)_F \quad (31)$$

5.1.4 Nedskalering i praksis

I praksis vil sørpeblandingen måtte antas å være omtrent uendret gjennom nedskaleringen, med mindre et alternativ til sørpe kan brukes. Dette fører til at massetettheten ρ , overflatespenningen σ , den kinematiske viskositeten ν og volumelastisiteten E_v til sørpa blir lik før og etter skaleringen. Dersom dette settes inn i de fire ovennevnte sammenhengene, oppstår fire ulike forhold mellom hastighetene i modellen og full skala, som gitt i tabell 5. Altså er det ikke mulig å opprettholde alle de dynamiske forholdene gjennom nedskaleringen.

Forholdet mellom hastigheten i en skalert modell og fullskala forsøk, som nødvendig for å holde hver av sammenhengene nevnt over konstant. L_s er faktoren de geometriske målene i modellen er skalert med, som beskrevet i avsnitt 6.1.1.

Metode for forsøk

Tabell 5: Forholdet mellom hastigheten i en skalert modell og fullskala forsøk, som nødvendig for å holde hver av sammenhengene nevnt over konstant. L_s er faktoren de geometriske målene i modellen er skalert med, som beskrevet i avsnitt 6.1.1.

	Froudetall	Reynoldstall	Machnummer	Webers tall
$\frac{u_m}{u_F}$	$\sqrt{L_s}$	$\frac{1}{L_s}$	1	$\frac{1}{\sqrt{L_s}}$

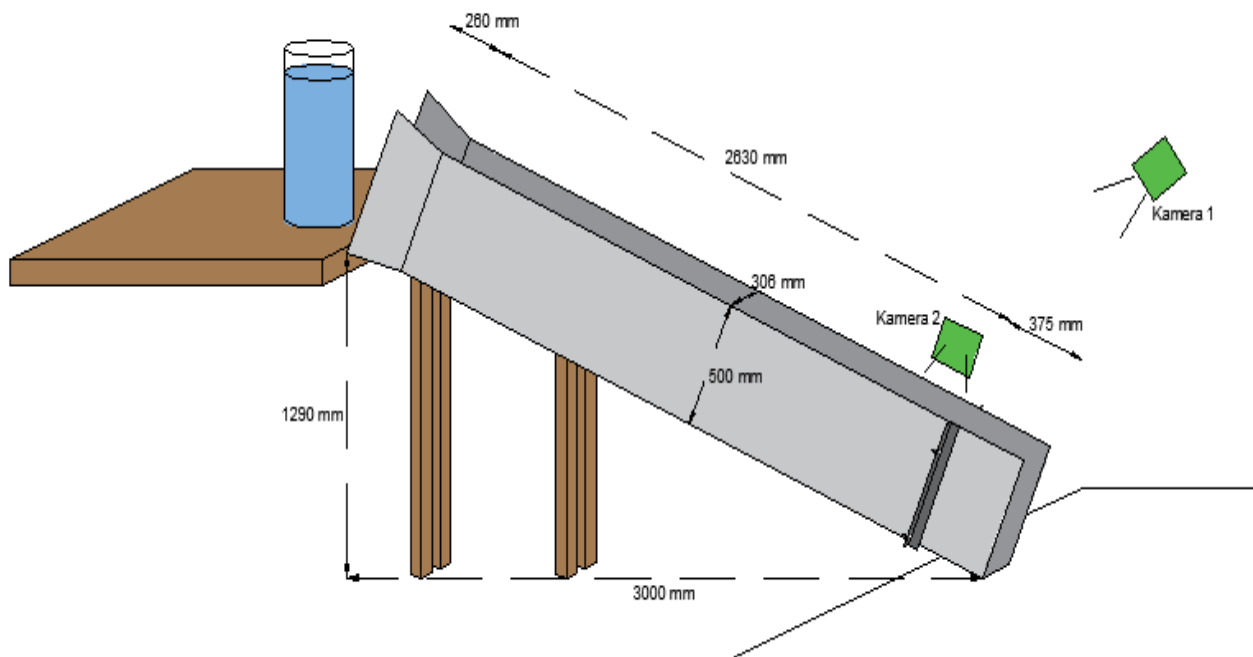
Fordi tyngdekraften kan antas å være den dominerende kraften i forsøket, vil sammenhengen i ligning 28 prioriteres ved nedskaleringen. Denne antakelsen gjøres også i Wendeler (2016) ved nedskaleringen av forsøk på flomskred, samt i Norem (2014), og fremstår som den mest hensiktsmessige måten å håndtere problemstillingen med sørpeblandingen på.

5.2 Forsøksoppsett

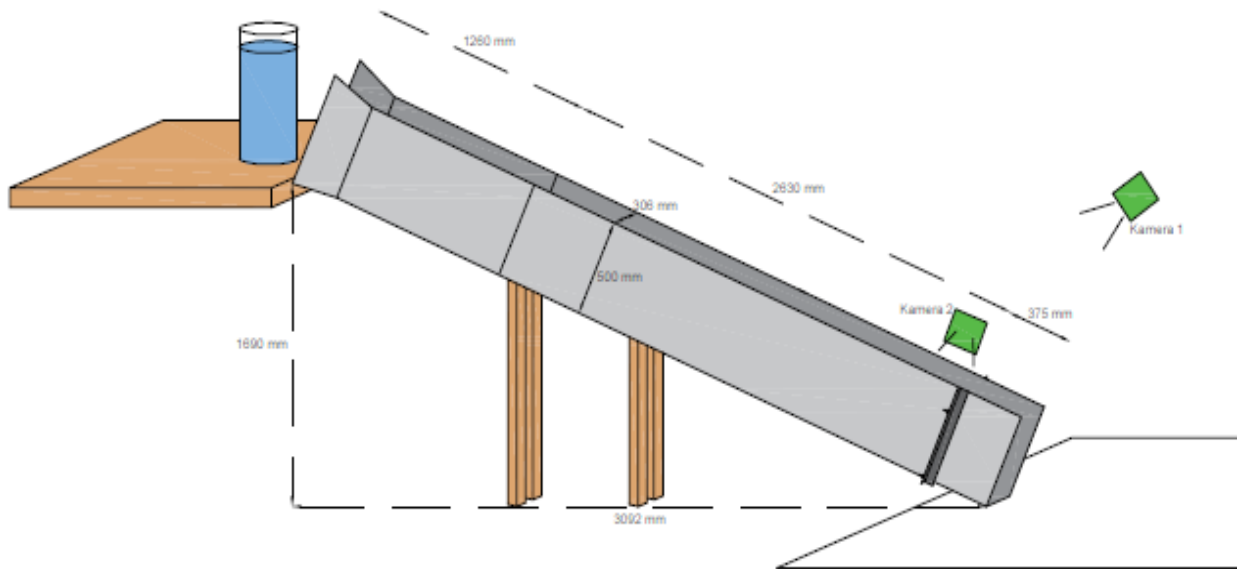
I forsøkene er sørpemasser sluppet ned ei renne med geometri som vist i figur 43 og 44, og gjennom et gitter nært utløpet av renna. Kreftene som utøves på gitteret måles ved bruk av fire lastceller, og flyteøyden og hastigheten til skredet ved fri strømming oppstrøms barrieren anslås fra bilder tatt med to høyhastighetskameraer. Testoppsettet er inspirert av blant annet Wendeler *et al.* (2018) og Hübl *et al.* (2009) og Scheidl *et al.* (2013). Barrierene testet i de nevnte publikasjonene varierer noe, men bruken av renne, måleapparater og naturmasser i et ellers nedskalert system er gjennomgående.

5.2.1 Renneoppsett

Det er brukt to ulike lengder på renna, for å kunne variere hastigheten og flyteøyden til strømmingen.



Figur 43: Oppsett 1 består av ei renne med tverrsnitt på 306*500 mm, laget av glatte treplater. Renne er omlag 3265 mm lang, med noe større tverrsnitt de første centimeterne for å forenkle slipprosessen. Helningen er på 23,3°. Barriereplasseringen sees i mørk grå farge, like under de to kameraene som markert i grønt. Den blå beholderen øverst i figuren markerer beholderen skredmassene ble sluppet fra. Denne ble tippet manuelt ut i renna.



Figur 44: Oppsett 2 er likt oppsett 1, men med 1000 mm lengre renne. Med samme helning på renna betyr det at beholderen med skredmassene er hevet, forøvrig er alt likt.

Renna har en konstant helning på $23,3^\circ$, en bredde på $30,6\text{ cm}$ og en høyde på tverrsnittet på 50 cm . Lengden på renna varierer mellom $326,5\text{ cm}$ og $426,5\text{ cm}$. På veggene $37,5\text{ cm}$ fra utløpet er det montert fire lastceller gitteret hviler mot, og som måler kreftene som virker på det når skredmassene passerer. I tillegg er det festet et høyhastighetskamera som tar bilder av skredet mens det treffer barrieren. Kameraet fanger opp informasjon om støtøyeblikket, som for eksempel om asymmetri i skredet, spesielle masseoppsamlinger og lignende. I tillegg brukes det til å hente ut informasjon om strømningshastigheten rett før passering av barrieren, ved at posisjonen til et valgt punkt i skredet sammenlignes i bilder tatt et kjent tidsintervall etter hverandre. Posisjonen leses av på en målestokk i rennebunnen, med en nøyaktighet på $\pm 0,5\text{ cm}$. Rett utenfor den ene sideveggen oppstrøms barrieren er det festet et annet høyhastighetskamera som informasjon om flyte høyde hentes fra. Denne leses av mot en annen målestokk, festet på renneveggen. Denne har en nøyaktighet på $\pm 1,75\text{ cm}$. I enden av renna løper massene ut på et flatt underlag kledd med filtduk.

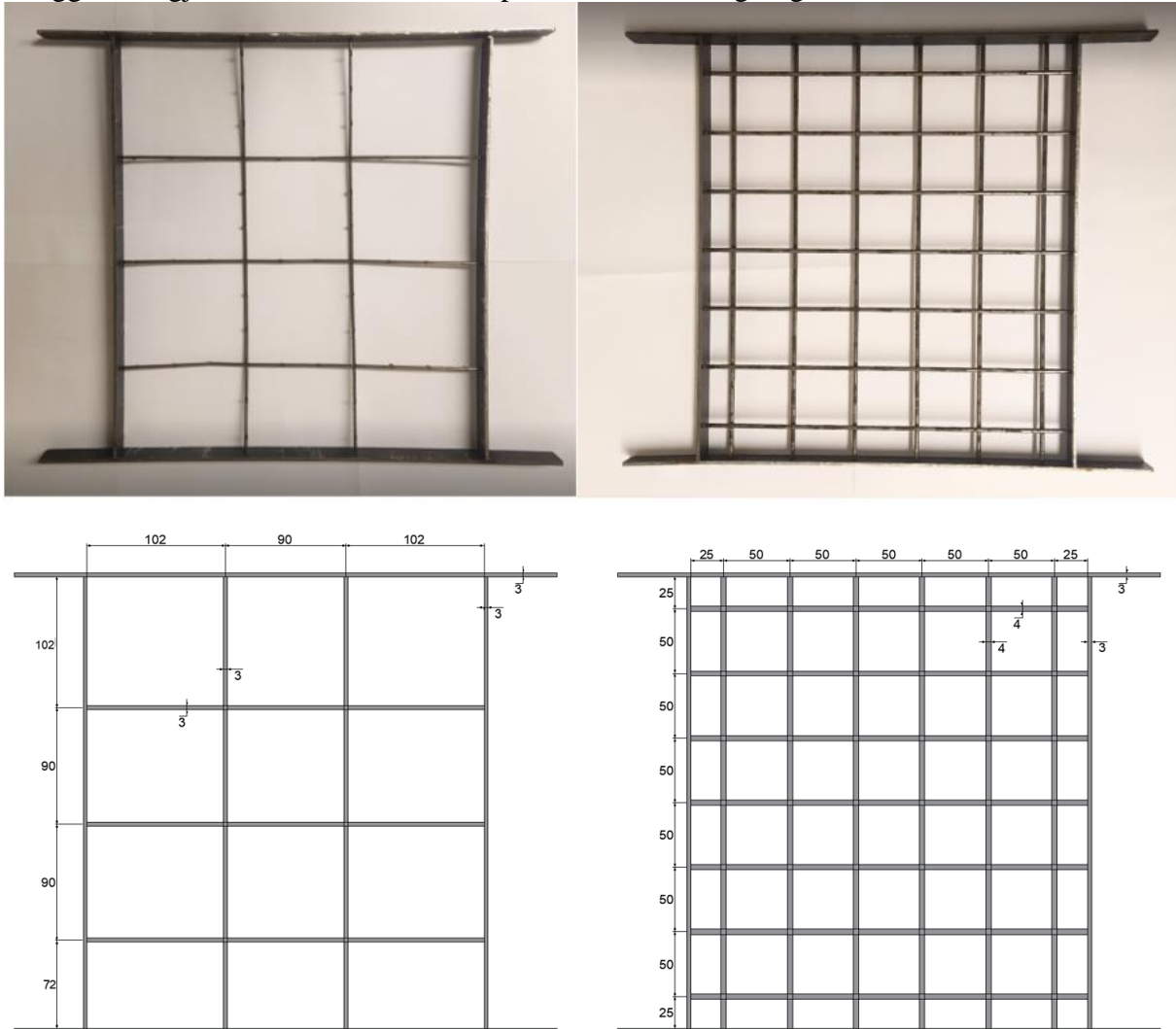
I tillegg til de to oppsettene som er beskrevet, er det gjort et enkeltforsøk hvor et lite påbygg ble lagt til for at massene skulle kunne slippes fra en større høyde. Dette ble gjort for å kunne øke hastigheten på massene ytterligere, men viste seg å ikke ha noen særlig innvirkning på hverken hastighet eller flyte høyde. Oppsettet ble derfor ikke brukt videre.

5.2.2 Barriere

Det har ikke vært mulig å gjøre hverken fullskala forsøk eller forsøk med nett som tilsvarer de fleksible nettene på det kommersielle markedet perfekt i nedskalert form. Det er derfor brukt rigide gitre i forsøkene, slik at det kan antas at det ikke tas opp energi ved deformasjon av selve nettet. Dette forventes å gi et lastbilde med noe større krefter i støtet like etter skredfronten treffer barrieren, fordi kreftene ikke fordeles utover i tid på grunn av deformasjon av nettet (Song *et al.*, 2018). Resultatene kan likevel gi en pekepinn på hva som kan forventes ved bruk av nett i sikring mot sørpeskred, og hvordan dette skiller seg fra sikring mot flomskred.

Metode for forsøk

For å undersøke hvordan lastmålingene og påvirkningen på strømmingen varierer med maskestørrelse, er det brukt to forskjellige gitre med ulike maskestørrelser vist i figur 45. I tillegg er det gjort forsøk med en tett treplate for sammenligning.

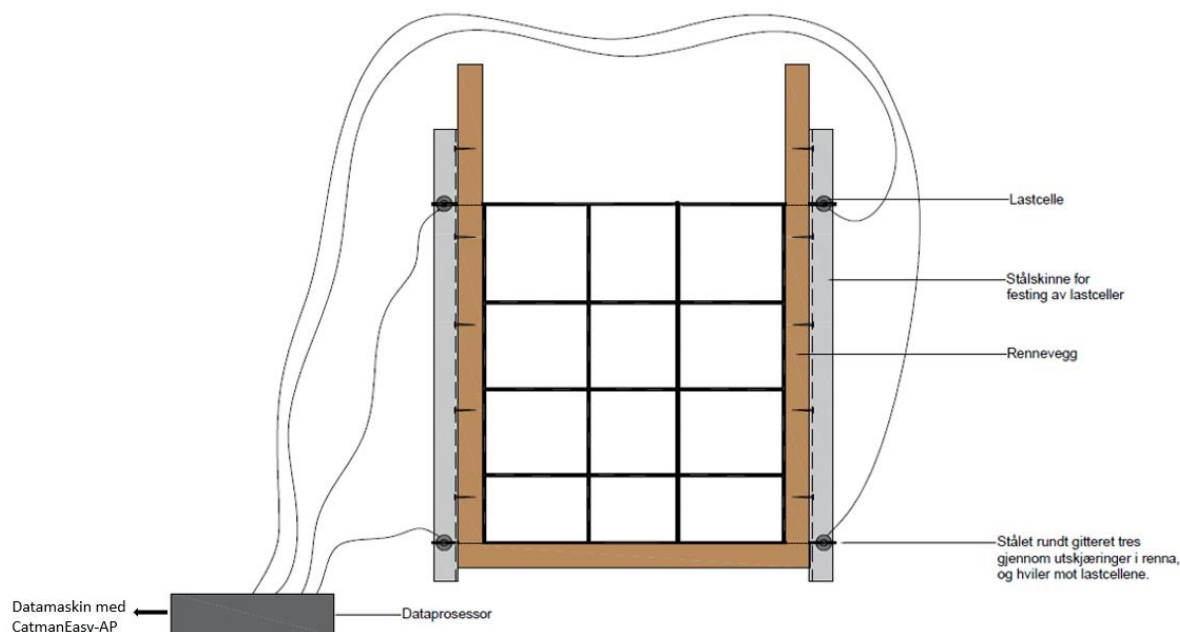


Figur 45: Til venstre vises det groveste gitteret brukt i forsøkene, mens høyre del viser det finmaskede gitteret. Øvre del av figuren viser foto av barrierene som ble brukt, mens tegningene under viser nøyaktige mål. Profilene i bunnen og toppen av rammene er laget ekstra lange for å kunne stikkes gjennom utsparinger i veggene på renna, slik at de hviler mot lastcellene montert på utsiden. Se figur 46 for videre forklaring av monteringen.

Selve gitrene har tverrsnitteareal på $360 \times 300 \text{ mm}$, og består av sikteduker i stål med kvadratiske lysåpninger. Den ene sikteduken har en ståldiameter på 4 mm og lysåpninger med sidekanter på 50 mm . Den andre sikteduken har ståldiameter på 3 mm og 30 mm lysåpninger i utgangspunktet, men er klippet opp til å ha åpninger på om lag 90 mm . Dette har ført til at det er små «knuter» igjen langs stengene i gitteret, som kan skimtes på figur 45. Disse neglisjeres i alle beregninger. I begge gitrene er det også noe variasjon i størrelsen på lysåpningene for å få gitrene til å passe inn i rennetvernsnittet. Se figur 45 for nøyaktige mål.

Gitrene er sveiset til rammer laget av flate stålprofil på $3 \times 20 \text{ mm}$, som settes inn i renna ved hjelp av fire åpninger i renneveggene. Stålprofilene stikkes gjennom åpningene, og hviler mot lastcellene montert på utsiden av renneveggene som vist i figur 46.

Fra lastcellene går informasjon fra målingene via en dataprosessor, til en datamaskin med programmet CatmanEasy-AP er installert. Hele oppsettet rundt barrierene er vist i figur 46.



Figur 46: Illustrasjon av barriereoppsettet sett fra lengre opp i renna. Barrieren festes ved å tre topp- og bunnprofilene i ramma inn i utspåringer i renneveggene. På utsiden er det montert stålprofiler med fire lastceller på, og lastcellene er plassert slik at topp- og bunnprofilene treffer dem når barrieren belastes. Fra lastcellene går det ledninger til en dataprosessor, som sender informasjonen om lastmålingene videre til en datamaskin.

I tillegg ble det gjort enkelttester hvor det ble satt inn en treplate i ramma foran et av gitrene. Oppsettet forøvrig var likt som i figur 46, også i disse forsøkene.

5.2.3 Skredmasser

Det ble utført 13 tester med en sørpeblanding sluppet ned renna og mot de ulike barrierene, og to tester med vann for sammenligning. Både når det ble brukt sørpe og når det ble brukt vann, ble en sylinderformet beholder fylt opp med 45,4 liter masser, og tippet manuelt ut i renna. For å lage sørpeblandingen, ble våt snø hentet inn utenfra og lagret i et fryserom med en temperatur på $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. På grunn av kombinasjonen av vårsnø med høyt vanninnhold og minusgrader på fryserommet, ble snøen fast, og måtte hakkes opp for ikke å bli for sammenbundet. Etter hakking ble snøen til store korn med lite sammenbindingsevne, bortsett fra enkelte klumper på opp mot 40 mm i diameter. Disse virket som nedskalerte is- og snøklumper og eroderte masser, som det antas å være noe av i fullskala sørpeskred. Det ble også gjort en enkel test hvor snøen var finhakket for å få et inntrykk av hvor mye dette påvirket resultatene. Denne sørpa ble forberedt på samme måte, men i tillegg til å hakkes for hånd, ble den knust av en betongmikser. Dette gjorde blandingen noe finere, men det var fremdeles enkelte snøklumper i blandingen. Bilder av en liten del av de to ulike snøblandingene er gjengitt i vedlegg B.

Da beholderen var fylt tilstrekkelig opp med snø, ble det tilsatt vann ved 0°C frem til den hadde en massetetthet på 900 kg/m^3 . Denne bruken av massetetthet som mål på vannmetningen forutsetter at snøen ikke er pakket sammen tettere enn hva som ville forekomme i naturen før vannet tilsettes. Dette er forsøkt unngått, og blandingen antas dermed å kunne være representativ for hvordan naturlig laget sørpe vil oppføre seg.

5.3 Testoversikt

Informasjon om hvilket renneoppsett, skredmateriale og hvilken barriere som er satt inn i hver test, er samlet i tabell 6.

Tabell 6: Oversikt over utførte forsøk.

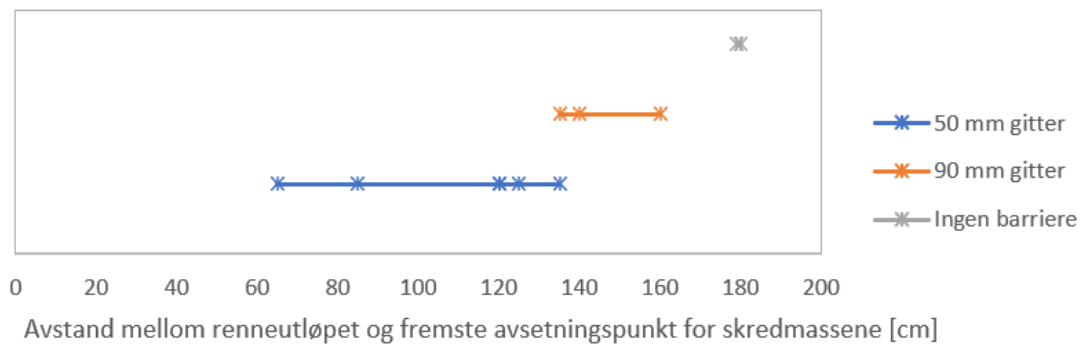
Forsøk nr.	Skredmateriale	Barriere	Renneoppsett
1	Sørpe, grovhakket	Gitter, cc 50 mm	Kort
2	Sørpe, grovhakket	Gitter, cc 50 mm	Kort
3	Sørpe, grovhakket	Gitter, cc 50 mm	Kort
4	Sørpe, grovhakket	Gitter, cc 50 mm	Lang
5	Sørpe, grovhakket	Gitter, cc 50 mm	Lang
6	Sørpe, grovhakket	Gitter, cc 50 mm	Lang
7	Sørpe, grovhakket	Gitter, cc 50 mm	Lang, med høyt slipp
8	Sørpe, finhakket	Gitter, cc 50 mm	Lang
9	Sørpe, grovhakket	Gitter, cc 90 mm	Lang
10	Sørpe, grovhakket	Gitter, cc 90 mm	Lang
11	Sørpe, grovhakket	Gitter, cc 90 mm	Lang
12	Sørpe, grovhakket	Ingen	Lang
13	Sørpe, grovhakket	Tett treplate	Lang
14	Vann	Tett treplate	Lang
15	Vann	Gitter, cc 50 mm	Lang

Resultat av forsøk

Det er ikke målt hvor stor del av massene som ble stoppet av det fine gitteret for hver repetisjon, blant annet fordi mye av massene som passerte barrieren, gjorde det over toppen i form av noe som muligens kan kalles en jet-stråle som beskrevet i Armanini (1997). I et bestemt forsøk med sørpe gjennom dette nettet ble det likevel målt at om lag 13 kg masser passerte enten over eller gjennom gitteret, altså i overkant av 30% av de totale skredmassene. For det grovere gitteret var masseoppsamlingen oppstrøms barrieren neglisjerbar.

Det er også gjort målinger av hastigheten lengre opp i renna for å undersøke hvorvidt skredmassene akselererte mot barrieren, for å kunne bestemme hvilken av situasjonene beskrevet i avsnitt 3.4.3.2 som skulle forventes. Massene akselererte i samtlige forsøk med sørpe, mens vannmassene beveget seg så raskt at to ulike hastighetsmålinger ikke kunne gjennomføres med det oppsettet som ble brukt.

6.1 Målinger

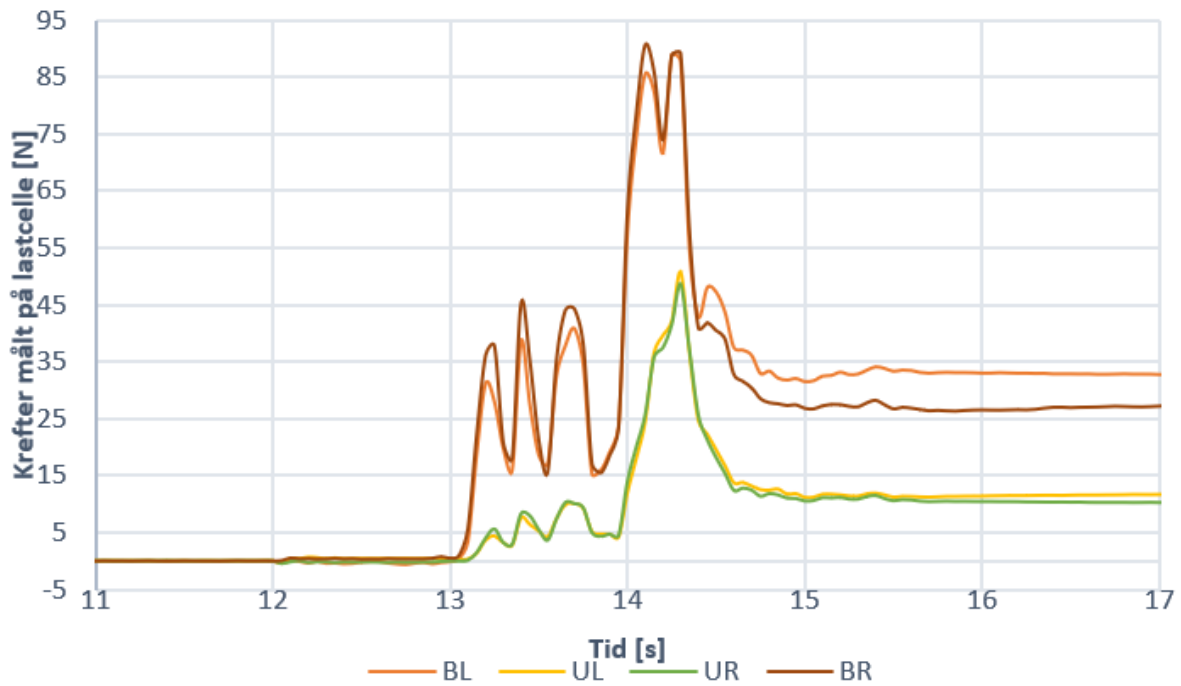


Figur 47: Målt avstand mellom nederste del av renna og fremste punkt med en betydelig mengde avsetninger etter forsøk. De ulike fargene illustrerer målinger som er gjort etter forsøk med ulike barrierer.

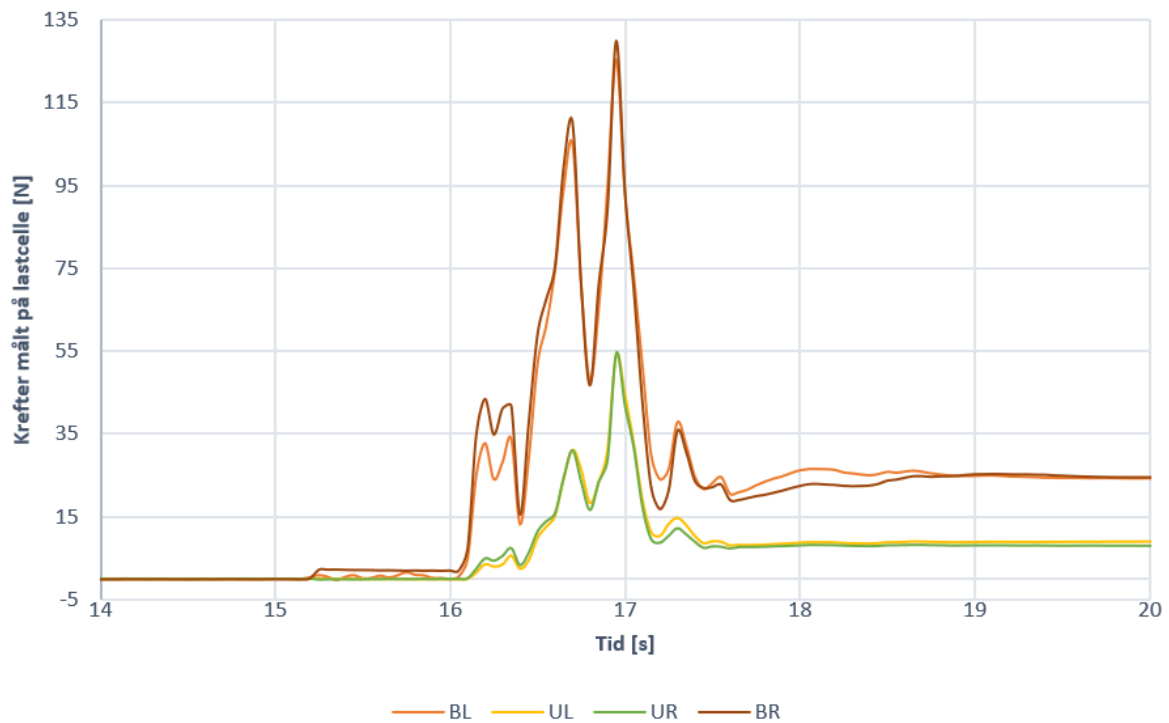
Resultat av forsøk

Tabell 7: Oversikt over målt hastighet og flyte høyde på strømmingen like oppstrøms barrieren, samt den maksimale totalkrafta på barrieren i løpet av interaksjonen med skredet.

Forsøk nr.	Hastighet [m/s]	Flyte høyde [cm]	Målte krefter [N]	Kommentarer
1	3,6	7	278,94	Enkelte større massesamlinger foran hovedfronten. Jet-stråle.
2	3,1	5	363,66	Skredmassene er tydelig delt inn i to. Ingen jet-stråle.
3	3,1	5	355,47	Forholdsvis samlede masser, noe med tydelig form etter beholder. Jet-stråle.
4	3,4	5	352,04	Skredmassene er tydelig delt inn i to, med form etter beholderen. Jet-stråle.
5	3,0	3	268,93	En større massesamling foran hovedfronten, ellers rimelig samlet skred. Ingen jet-stråle.
6	3,8	4	448,18	Skredmassene er delt inn i flere distinkte deler, med tydelig form etter beholderen. Jet-stråle.
7	3,6	6	258,22	Skredmassene ble sluppet inn i renna ovenfra. Forholdsvis samlet skredmasse. Liten jet-stråle.
8	3,4	4	355,48	Finhakked sørpeblanding. Forholdsvis samlet skredmasse. Jet-stråle.
9	3,0	5	122,81	Ingen masseoppsamling av betydning. Ingen jet-stråle.
10	3,0	7	155,71	Ingen masseoppsamling av betydning. Ingen jet-stråle.
11	3,4	3	104,28	Ingen masseoppsamling av betydning. Ingen jet-stråle.
12	3,8	5	-	Ingen barriere.
50 mm, vann	3,1	4	22,73	Vann. For rask passering til at tre målinger kunne gjøres.
Plate, sørpe	5,0	4	367,06	Stor, tydelig jet-stråle.
Plate, vann	4,8	4	170,85	Vann. For rask passering til at tre målinger kunne gjøres.

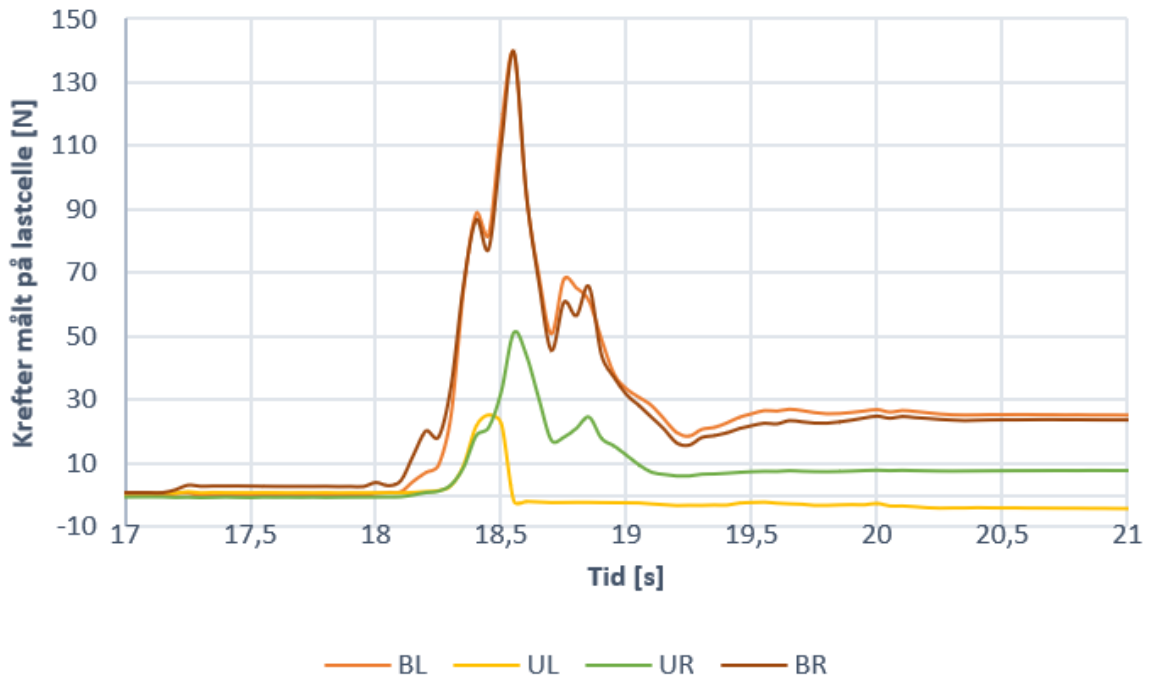


Figur 48: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 1 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.

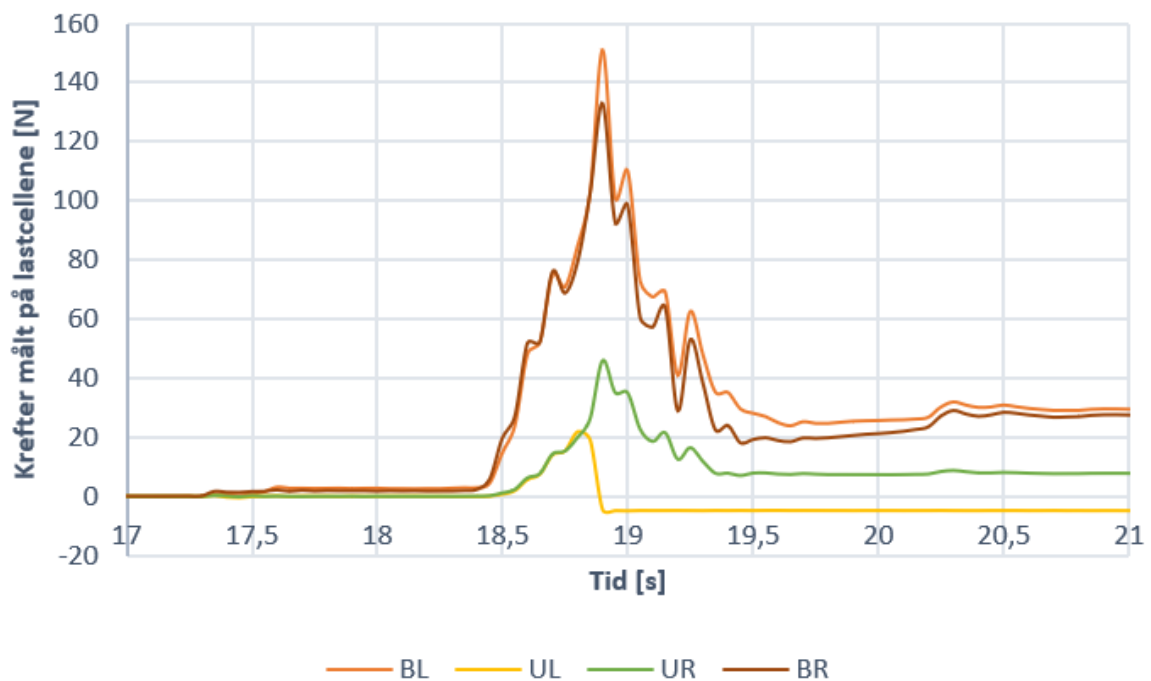


Figur 49: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 2 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.

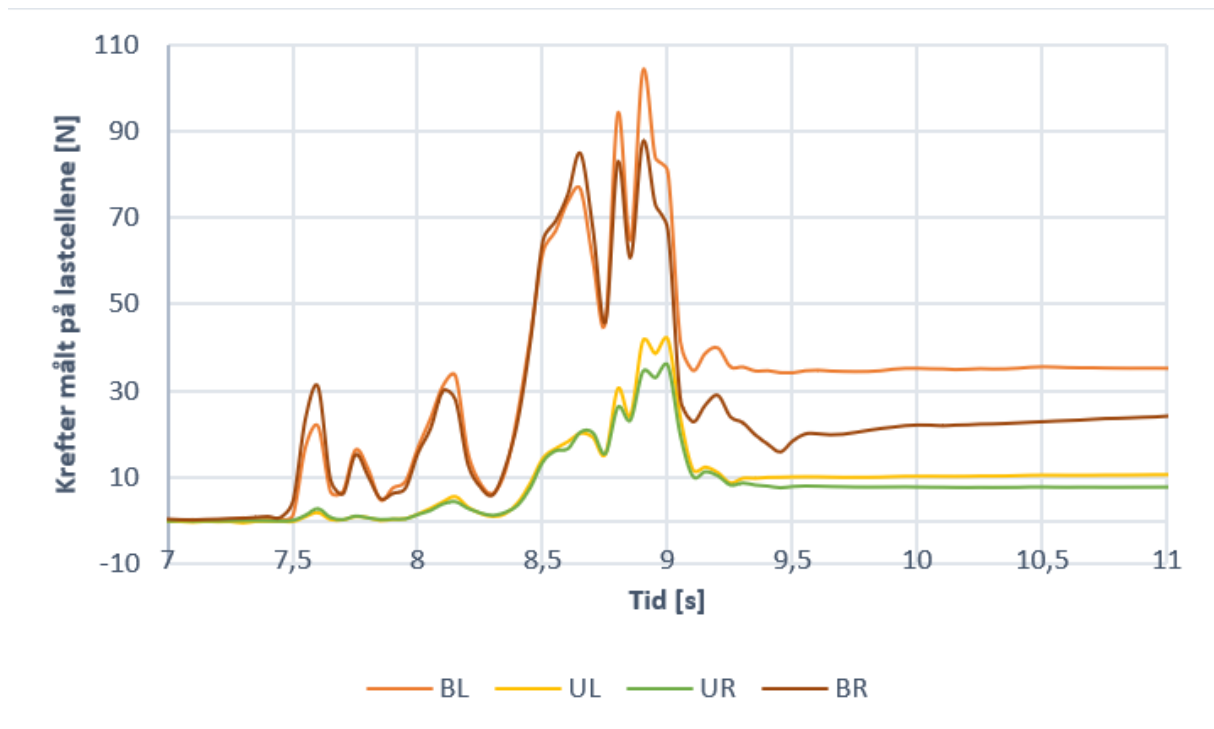
Resultat av forsøk



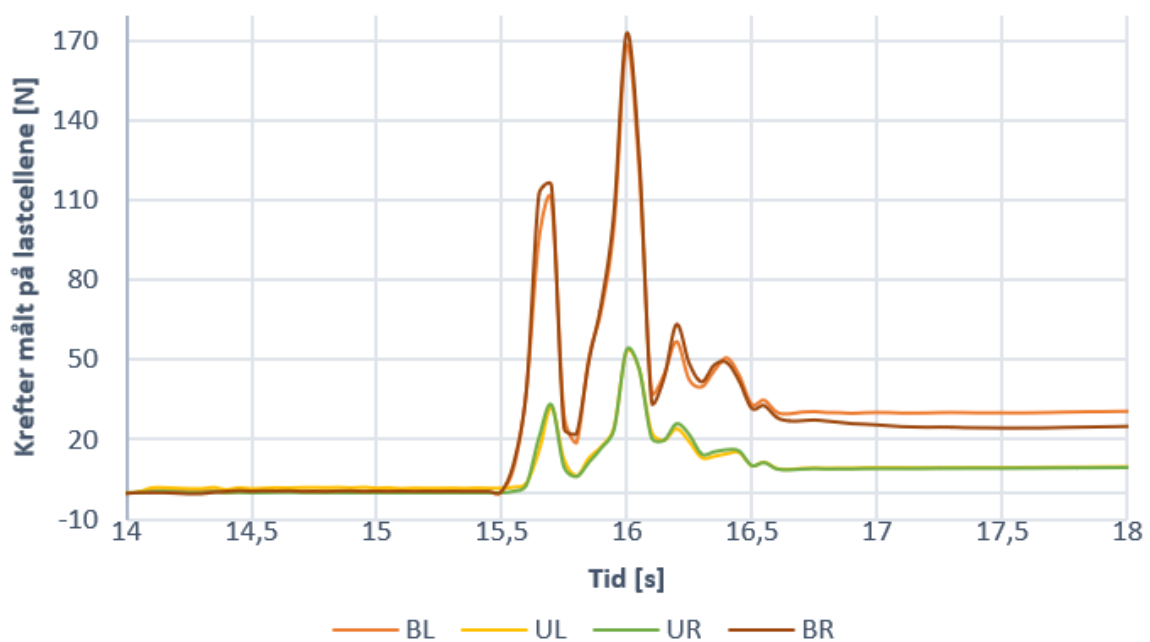
Figur 50: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 3 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.



Figur 51: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 4 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.

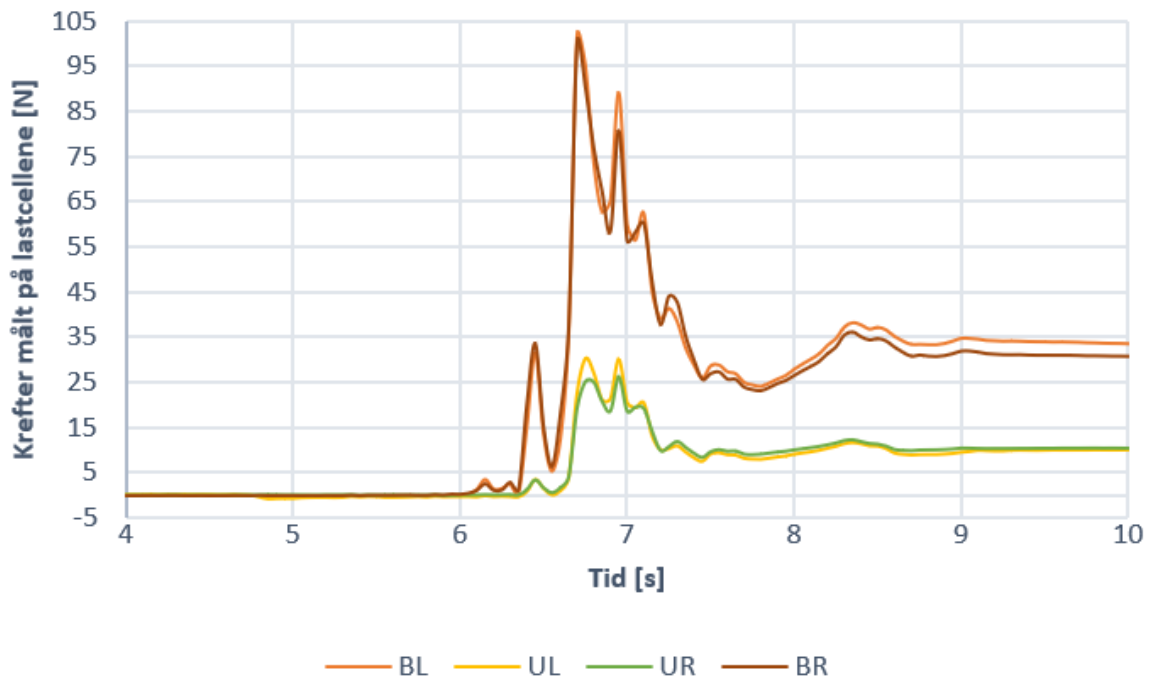


Figur 52: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 5 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.

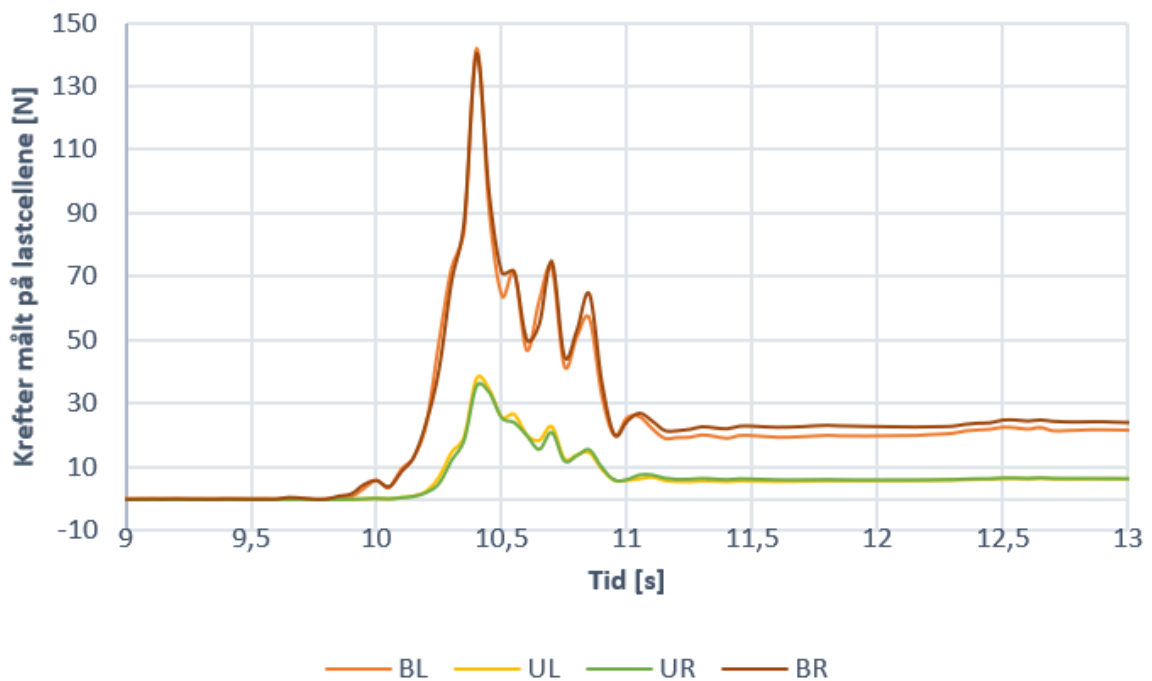


Figur 53: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 6 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.

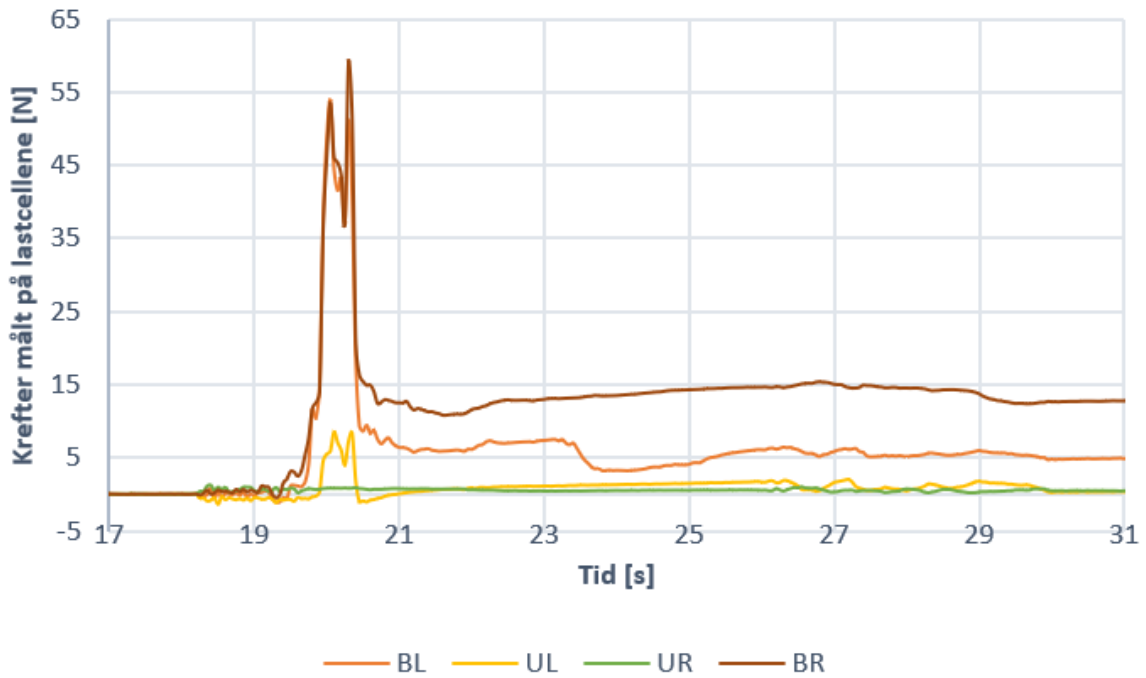
Resultat av forsøk



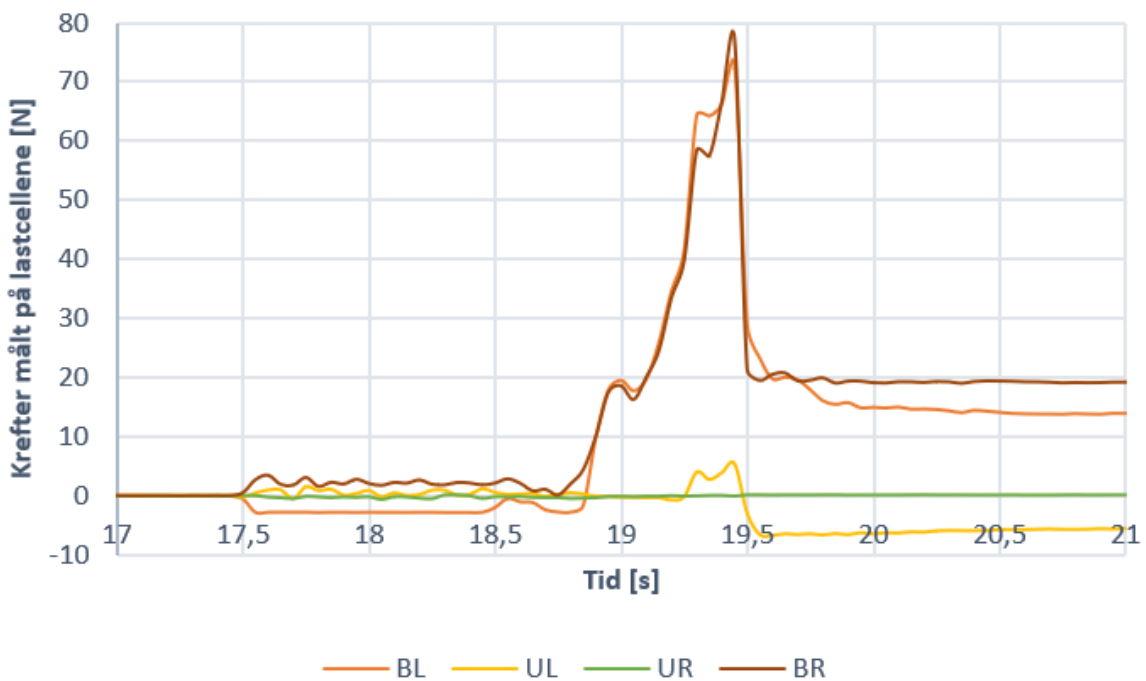
Figur 54: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 7 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.



Figur 55: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 8 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.

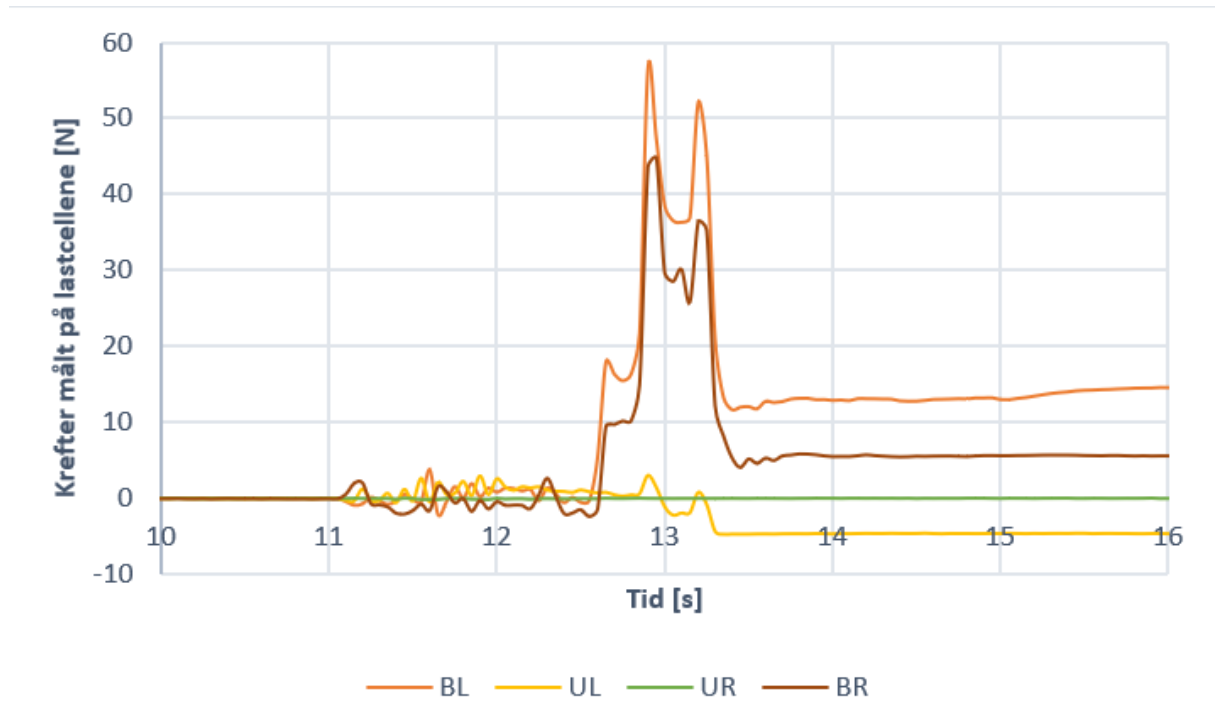


Figur 56: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 9 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.

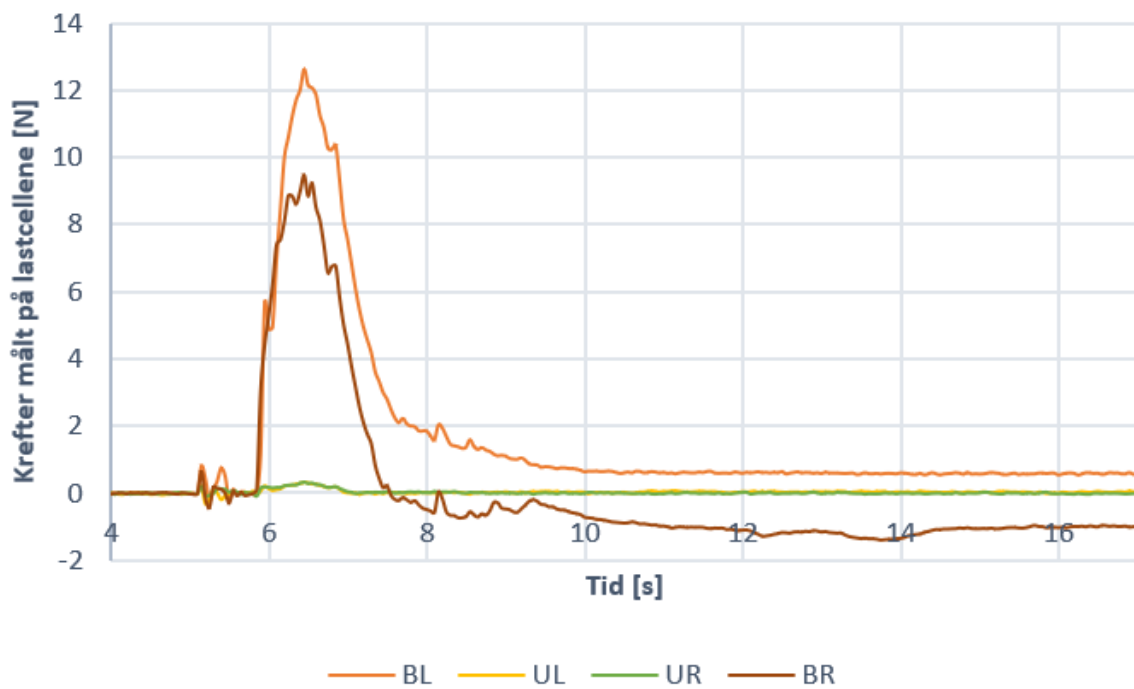


Figur 57: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 10 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.

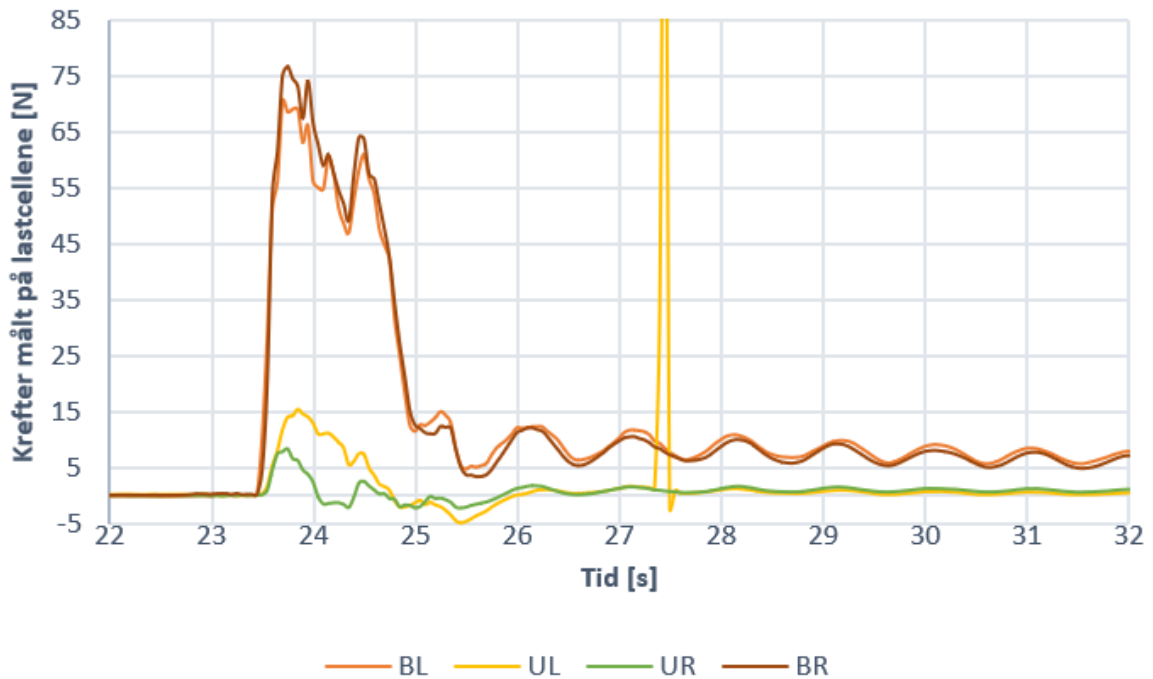
Resultat av forsøk



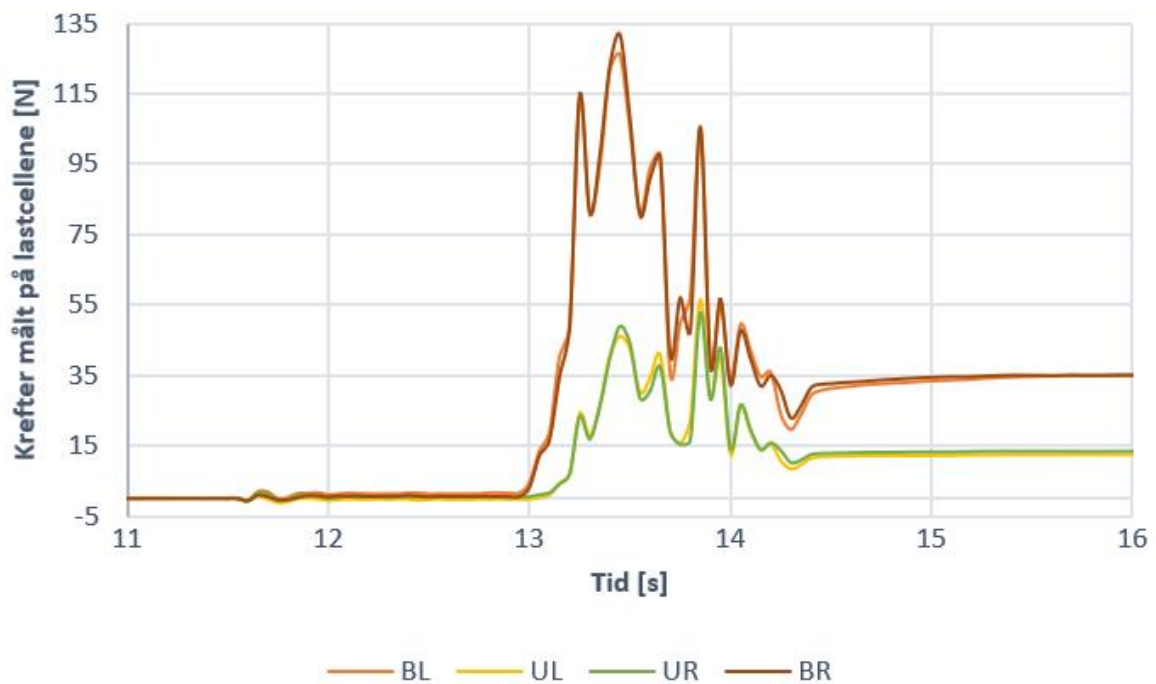
Figur 58: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøk 11 som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.



Figur 59: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøket hvor vann ble sluppet mot et gitter med 50 mm lysåpninger. Kraftene er gitt som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.



Figur 60: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøket hvor vann ble sluppet mot en tett treplate, gitt som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.



Figur 61: Krafta målt på hver enkelt lastcelle i løpet av forsøket hvor sørpe ble sluppet mot en tett treplate, gitt som en funksjon av tid. BL = bottom left, UL = upper left, UR = upper right, BR = bottom right. Benevningene er satt som barrieren sees fra lengre opp i renna.

6.2 Lastberegninger basert på målt flyte høyde, massetetthet og hastighet

Det er en klar forskjell mellom forsøkene på de to gitrene, både når det kommer til den observerte oppførselen til skredet, og når det kommer til størrelsen på den målte belastninga på barrierene. Både ståldiameterne og maskestørrelsene er ulike i de to gitrene, men det går ut fra at effekten av forskjellen i ståldiameter er neglisjerbar, og at variasjonen i resultatene derfor kommer av større maskeåpninger. Det indikerer at koeffisientene brukt i metodene for lastberegning varierer med maskestørrelsen, eventuelt uttrykt ved det projiserte arealet av gitteret. I første omgang er dette tatt hensyn til ved å sette to ulike koeffisienter i metodene hvor koeffisienter inngår- en basert på de åtte første forsøkene hvor gitteret med 50 mm lysåpninger er brukt, og en basert på de tre forsøkene på det grovere gitteret. Videre er egne koeffisienter beregnet for hver av enkelttestene utført med vann eller tette barrierer.

I beregningene er det anslått at kreftene virker på barrieren opp til en høyde $h = 1,5h_{fl}$, som foreslått i Hungr *et al.* (1984). I forsøkene er det nemlig observert at massene ikke når spesielt høyt opp på barrieren i tidsrommet det største støtet måles. Derfor virker det ikke hensiktsmessig å bruke hele gitterhøyden i beregningene som innebærer sammenligning mellom metode og målinger, da det er om å gjøre å få et riktig lastanslag, og ikke store marginer. Det må likevel bemerkes at det kan være aktuelt å bruke hele barrierehøyden dersom metodene brukes i dimensjonering av fundamenter og lignende, for å være sikker på å gjøre en konservativ antakelse.

6.2.1 Statisk trykk

I avsnitt 3.4.2 presenteres det statiske trykket på grunn av masseoppsamling på oppstrøms side som en triangulær lastfordeling med maksimal verdi nær kanalbunnen. Ved bruk av de målte verdiene for massetetthet og flyte høyde på strømmingen i forsøkene, kan resultatanten fra det statiske trykket beregnes som følger.

$$P_{stat} = \frac{1}{2} \rho g h^2 b \cos(\phi) = \frac{1}{2} \rho * 9,81 * (1,5h_{fl})^2 * 0,3 * \cos(23,3^\circ) \quad (32)$$

Tabell 8: Beregning av statiske laster på barrierene ut fra målingene på strømmingen fra forsøkene.

Forsøk nr.	Flyte høyde [m]	Massetetthet [kg/m ³]	Total statisk last [N]
1	0,07	900	13,41
2	0,05	900	6,84
3	0,05	900	6,84
4	0,05	900	6,84
5	0,03	900	2,46
6	0,04	900	4,38
Høyt slipp	0,06	900	9,85
Fin sørpe	0,04	900	4,38
9	0,05	900	6,84
10	0,07	900	13,41
11	0,03	900	2,46
50mm, vann	0,04	997	4,85
Plate, vann	0,04	997	4,85
Plate, sørpe	0,04	900	4,38

6.2.2 Hydrodynamisk metode

Beregningene etter metoden i avsnitt 3.4.3.1 inkluderer ikke det statiske trykket, så dette må legges til for å få den fullstendige størrelsen på støtet barrieren utsettes for. Utregningen gjøres som vist i ligning 33.

$$\begin{aligned}
 P_{tot} &= \alpha \rho u^2 h b + \frac{1}{2} \rho g h^2 b \cos(\phi) \\
 &= \alpha \rho u^2 (1,5 h_{fl}) * 0,3 + \frac{1}{2} \rho * 9,81 * (1,5 h_{fl})^2 * 0,3 * \cos(\phi)
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

Koeffisienten α er funnet ved minste kvadraters metode, hvor avviket bestemmes ved sammenligning av beregningsverdiene med kraftmålingene fra samme forsøk (Minste kvadraters metode, 2017). For bestemmelse av koeffisienten, er forsøkene delt inn i to uavhengige grupper etter hvilken barriere som ble brukt. Slik er det blitt to ulike verdier for koeffisienten. Dette er gjort fordi kraftmålingene på barrieren tydelig viser forskjeller i lastvirkningene på gitrene med forskjellig maskestørrelse, og det dermed virker hensiktsmessig å etablere koeffisienter avhengig av barrieretype.

Tabell 9: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres med den hydrodynamiske metoden.

Forsøk nr.	Flyte høyde [m]	Hastighet [m/s]	Helning [rad]	Massetetthet [kg/m ³]	Total statisk last [N]	Total last, hydrodynamisk metode [N]
1	0,07	3,6	0,41	900	13,41	478,55
2	0,05	3,1	0,41	900	6,84	253,20
3	0,05	3,2	0,41	900	6,84	269,35
4	0,05	3,4	0,41	900	6,84	303,19
5	0,03	3,0	0,41	900	2,46	140,90
6	0,04	3,8	0,41	900	4,38	300,53
Høyt slipp	0,06	3,6	0,41	900	9,85	408,54
Fin sørpe	0,04	3,4	0,41	900	4,38	241,46
9	0,05	3,0	0,41	900	6,84	117,61
10	0,07	3,0	0,41	900	13,41	168,49
11	0,03	3,4	0,41	900	2,46	87,83
50mm, vann	0,04	4,8	0,41	997	4,85	22,73
Plate, vann	0,04	5,0	0,41	997	4,85	170,85
Plate, sørpe	0,04	3,1	0,41	900	4,38	367,06

Resultat av forsøk

Tabell 10: Verdiene for koeffisienten α funnet ved minste kvadraters metode mellom beregnede og målte krefter i forsøkene. Verdien for «50 mm, sørpe» er funnet ut fra forsøk 1-8, mens verdien for «90 mm, sørpe» er funnet fra forsøk 9-11. De øvrige verdiene er funnet direkte fra enkeltforsøk.

Barriere, skredmasse	α
50 mm, sørpe	1,27
90 mm, sørpe	0,61
50 mm, vann	0,04
Plate, vann	0,37
Plate, sørpe	2,33

6.2.3 Armanini og Scottons metode

Det dynamiske trykket beregnet med Armanini og Scottons metode tar heller ikke med de statiske kreftene direkte, så disse må legges til for å få et fullstendig lastbilde. Fra hastighetsmålingene på skredet like oppstrøms barrieren og lengre opp i renna, er det funnet ut at massene akselererer i alle forsøkene som gjøres med sørpe. Uttrykket for den totale krafta i støtet når barrieren treffes, blir da gitt ved ligning 34.

$$\begin{aligned}
 P_{tot} &= \rho u^2 h b + \frac{1}{2} \rho g h^2 b \cos(\phi) \\
 &= \rho u^2 (1,5h_{fl}) * 0,3 + \frac{1}{2} \rho * 9,81 * (1,5h_{fl})^2 * 0,3 * \cos(\phi)
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

Tabell 11: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres med Armanini og Scottons metode.

Forsøk nr.	Flyte høyde [m]	Hastighet [m/s]	Massetetthet [kg/m ³]	Total statisk last [N]	Total last, Armanini og Scotton [N]
1	0,07	3,6	900	13,41	380,83
2	0,05	3,1	900	6,84	201,44
3	0,05	3,2	900	6,84	214,20
4	0,05	3,4	900	6,84	240,93
5	0,03	3,0	900	2,46	111,81
6	0,04	3,8	900	4,38	238,31
Høyt slipp	0,06	3,6	900	9,85	324,78
Fin sørpe	0,04	3,4	900	4,38	191,65
9	0,05	3,0	900	6,84	189,09
10	0,07	3,0	900	13,41	268,56
11	0,03	3,4	900	2,46	142,92
50 mm, vann	0,04	3,1	997	4,85	418,33
Plate, vann	0,04	5,0	997	4,85	453,50
Plate, sørpe	0,04	4,8	900	4,38	160,06

6.2.4 Lichtenhahns metode

Lichtenhahns metode er basert på skalering av de statiske kreftene, og har derfor den samme triangulære trykkfordelingen som dem. Beregningene tar også hensyn til de statiske kreftene, slik at de ikke trenger å legges til. Uttrykket for den totale krafta i støtet når barrieren blir truffet av skredene blir da gitt ved ligning 35.

$$P_{tot} = \frac{1}{2} k \rho_{\omega} g h^2 b \cos(\phi) = \frac{1}{2} k * 997 * 9,81 * (1,5h_{fl})^2 * 0,3 \cos(23,3^\circ) \quad (35)$$

Koeffisienten k er funnet på samme måte som koeffisienten α i den hydrodynamiske metoden, slik det beskrives i avsnitt 7.2.2.

Tabell 12: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres med Lichtenhahns metode.

Forsøk nr.	Flyte høyde [m]	Helning [rad]	Total last [N]
1	0,07	0,41	516,80
2	0,05	0,41	263,67
3	0,05	0,41	263,67
4	0,05	0,41	263,67
5	0,03	0,41	94,92
6	0,04	0,41	168,75
7	0,06	0,41	379,69
8	0,04	0,41	168,75
9	0,05	0,41	93,65
10	0,07	0,41	183,55
11	0,03	0,41	33,71
50mm, vann	0,04	0,41	22,73
Plate, vann	0,04	0,41	170,85
Plate, sørpe	0,04	0,41	367,06

Tabell 13: Verdiene for koeffisienten k funnet ved minste kvadraters metode mellom beregnede og målte krefter i forsøkene. Verdien for «50 mm, sørpe» er funnet ut fra forsøk 1-8, mens verdien for «90 mm, sørpe» er funnet fra forsøk 9-11. De øvrige verdiene er funnet direkte fra enkeltforsøk.

Barriere, skredmasse	k
50 mm, sørpe	34,79
90 mm, sørpe	12,36
50 mm, vann	4,69
Plate, vann	35,22
Plate, sørpe	74,67

6.2.5 Hübl og Holzingers metode

Som beskrevet i avsnitt 3.4.3.1, er Hübl og Holzingers metode kun et uttrykk for det maksimale trykket på barrieren, uten å gi mer informasjon om den øvrige trykkfordelingen. I beregningene i denne oppgaven er det antatt en triangulær fordeling som illustrert for statisk trykk i figur 26. Denne antakelsen kan være både konservativ og ikke, avhengig av hva lastberegningene brukes til. Derfor er det viktig å være klar over den når resultatene brukes og sammenlignes med andre metoder.

$$P_{\text{tot}} = 4,5\rho u^{0,8}(gh_{fl})^{0,6} * \frac{1}{2} 1,5h_{fl}b = 3,375\rho u^{0,8}(9,81 * h_{fl})^{0,6} * h_{fl} * 0,3 \quad (36)$$

Tabell 14: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres med Hübl og Holzingers metode.

Forsøk nr.	Massetetthet [kg/m ³]	Hastighet [m/s]	Flyte høyde [m]	Total last, Hübl og Holzinger [N]
1	900	3,6	0,07	141,85
2	900	3,1	0,05	73,46
3	900	3,2	0,05	75,35
4	900	3,4	0,05	79,10
5	900	3,0	0,03	31,60
6	900	3,8	0,04	60,50
Høyt slipp	900	3,6	0,06	110,85
Fin sørpe	900	3,4	0,04	55,35
9	900	3,0	0,05	71,56
10	900	3,0	0,07	122,60
11	900	3,4	0,03	34,93
50 mm, vann	997	4,8	0,04	80,79
Plate, vann	997	5,0	0,04	83,48
Plate, sørpe	900	3,1	0,04	51,41

6.2.6 Nedre grense ved beregning på strømningsmotstand

Det antas her at det største støtet forventes før det har kommet væske på begge sider av barrieren, hvilket er konservativt ved dimensjonering av konstruksjonsdeler som fundamenter og lignende. De statiske kreftene må derfor legges til i utregningene. Totallasten på barrieren blir da gitt ved ligning 37.

$$P = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 A_p + \frac{1}{2} \rho g h^2 b \cos(\phi) \quad (37)$$

Det projiserte arealet A_p av gitrene brukt i forsøkene er beregnet som vist i tabell 15.

Tabell 15: Arealutregninger for det projiserte arealet av gitterne som treffes av skredmassene ved ulike flytehighyder. Alle mål er i mm.

	Stålpromfil i ramme, tykkelse: 3 mm	Horisontale stenger Ø4 mm / Ø3 mm	Vertikale stenger Ø4 mm / Ø3 mm	Overlapp i kryss	Totalt projisert areal [mm^2]
90 mm gitter $75,5 \text{ mm} < 1,5h_{fi} < 162,5 \text{ mm}$	$2 * 1,5h_{fi} + 294$	294	$2 * (1,5h_{fi} - 3)$	$2 * 3 * 3$	$18h_{fi} + 1728$
90 mm gitter $1,5h_{fi} < 72,5 \text{ mm}$	$2 * 1,5h_{fi} + 294$	0	$2 * (1,5h_{fi} - 3)$	0	$18h_{fi} + 864$
50 mm gitter $130 \text{ mm} < 1,5h_{fi} < 176 \text{ mm}$	$2 * 1,5h_{fi} + 294$	$3 * 294$	$6 * (1,5h_{fi} - 3)$	$18 * 4$ *4	$45h_{fi} + 4050$
50 mm gitter $80 \text{ mm} < 1,5h_{fi} < 126 \text{ mm}$	$2 * 1,5h_{fi} + 294$	$2 * 294$	$6 * (1,5h_{fi} - 3)$	$12 * 4$ *4	$45h_{fi} + 2970$
50 mm gitter $30 \text{ mm} < 1,5h_{fi} < 76 \text{ mm}$	$2 * 1,5h_{fi} + 294$	294	$6 * (1,5h_{fi} - 3)$	$6 * 4 * 4$	$45h_{fi} + 1890$

Resultat av forsøk

Tabell 16: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres ved beregning av strømningsmotstanden til barrieren.

Forsøk nr.	Massetetthet [kg/m^3]	Hastighet [m/s]	Projisert areal [m^2]	Total last, strømningsmotstand [N]
1	900	3,6	0,006120	468,43
2	900	3,1	0,004140	235,08
3	900	3,2	0,004140	250,05
4	900	3,4	0,004140	281,40
5	900	3,0	0,003240	169,75
6	900	3,8	0,003690	310,06
Høyt slipp	900	3,6	0,005670	431,41
Fin sørpe	900	3,4	0,003690	249,09
9	900	3,0	0,002628	132,63
10	900	3,0	0,002988	156,43
11	900	3,4	0,001404	88,78
50 mm, vann	997	4,8	0,003690	22,73
Plate, vann	997	5,0	0,018000	170,85
Plate, sørpe	900	3,1	0,018000	367,06

Tabell 17: Verdiene for koeffisienten C_D funnet ved minste kvadraters metode mellom beregnede og målte krefter i forsøkene. Verdien for «50 mm, sørpe» er funnet ut fra forsøk 1-8, mens verdien for «90 mm, sørpe» er funnet fra forsøk 9-11. De øvrige verdiene er funnet direkte fra enkeltforsøk.

Barriere, skredmasse	C_D
50 mm, sørpe	12,75
90 mm, sørpe	11,82
50 mm, vann	0,42
Plate, vann	4,66
Plate, sørpe	0,74

6.2.7 Oppskalering av statiske laster

I denne metoden beregnes det dynamiske og statiske trykket sammen ved en skalering av de statiske kreftene beregnet i avsnitt 7.2.1. Skaleringsfaktoren $\frac{P}{P_{stat}}$ er gitt ved ligning 38.

$$\frac{P}{P_{stat}} = e^{\beta u^2} \quad (38)$$

Tabell 18: Beregning av den maksimale totallasta på barrierene ut fra målingene på strømmingen i forsøkene, dersom beregningene gjøres ved oppskalering av statiske laster som beskrevet i avsnitt 3.4.4.3.

Forsøk nr.	Total statisk last [N]	Hastighet [m/s]	Total last ved oppskalering av statiske laster [N]
1	13,41	3,6	503,26
2	6,84	3,1	100,60
3	6,84	3,2	119,98
4	6,84	3,4	173,57
5	2,46	3,0	30,53
6	4,38	3,8	248,60
Høyt slipp	9,85	3,6	369,75
Fin sørpe	4,38	3,4	111,08
9	6,84	3,0	94,88
10	13,41	3,0	185,97
11	2,46	3,4	72,17
50 mm, vann	4,85	4,8	22,70
Plate, vann	4,85	5,0	170,79
Plate, sørpe	4,38	3,1	367,06

Tabell 19: Verdiene for koeffisienten β funnet ved minste kvadraters metode mellom beregnede og målte krefter i forsøkene. Verdien for «50 mm, sørpe» er funnet ut fra forsøk 1-8, mens verdien for «90 mm, sørpe» er funnet fra forsøk 9-11. De øvrige verdiene er funnet direkte fra enkeltforsøk.

Barriere, skredmasse	β
50 mm, sørpe	0,28
90 mm, sørpe	0,29
50 mm, vann	0,07
Plate, vann	0,14
Plate, sørpe	0,46

6.2.8 Oppsummeringstabeller

Tabell 20: Oppsummering av de totale kreftene på barrierene som målt i forsøkene og som beregnet med metodene beskrevet i avsnitt 7.2.1 til 7.2.7. Alle verdier er i [N].

Forsøk nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	50 mm, vann	Plate, vann	Plate, sørpe
Målte verdier	278,9	363,7	355,5	352,0	268,9	448,2	258,2	355,5	122,8	155,7	104,3	22,7	170,9	367,1
Statisk last	13,4	6,8	6,8	6,8	2,5	4,4	9,9	4,4	6,8	13,4	2,5	4,9	4,9	4,4
Hydrodynamisk metode	478,6	253,2	269,4	303,2	140,9	300,5	408,5	241,5	117,6	168,5	87,8	22,7	170,9	367,1
Armanini og Scotton	380,8	201,4	214,2	240,9	111,8	238,3	324,8	191,7	189,1	268,6	142,9	418,3	453,5	160,1
Lichtenhahn	516,8	263,7	263,7	263,7	94,9	168,8	379,7	168,8	93,7	183,6	33,7	22,7	170,9	367,1
Hübl og Holzinger	141,9	73,5	75,4	79,1	31,6	60,5	110,9	55,4	71,6	122,6	34,9	80,8	83,5	51,4
Strømningsmotstand	468,4	235,1	250,1	281,4	169,8	310,1	431,4	249,1	132,6	156,4	88,8	22,7	170,9	367,1
Oppskalering	503,3	100,6	120,0	173,6	30,5	248,6	369,8	111,1	94,9	186,0	72,2	22,7	170,8	367,1
Hydrodynamisk iht. SSV	748,2	396,0	421,6	475,0	221,2	472,2	639,7	378,9	371,3	523,7	283,4	831,8	902,2	315,7

Prosentavviket mellom de målte og beregnede kreftene på barrierene kan beregnes for hvert enkelt forsøk og for hver beregningsmetode beskrevet i avsnitt 7.2.1 til 7.2.7. Prosentavviket er beregnet ved ligning 39.

$$\text{Prosentavvik} = 100\% * \frac{\sqrt{(\text{Beregnete krefter} - \text{Målte krefter})^2}}{\text{Målte krefter}} \quad (39)$$

Tabell 21 Prosentavvik mellom målte og beregnede verdier, som beregnet med ligning 39.

Forsøksnr	1	2	3	4	5	6	7	8
Statisk last	95,2	98,1	98,1	98,1	99,1	99,0	96,2	98,8
Hydrodynamisk metode	71,6	30,4	24,2	13,9	47,6	32,9	58,2	32,1
Arranini og Scotton	36,5	44,6	39,7	31,6	58,4	46,8	25,8	46,1
Lichtenhahn	85,3	27,5	25,8	25,1	64,7	62,3	47,0	52,5
Hübl og Holzinger	49,1	79,8	78,8	77,5	88,2	86,5	57,1	84,4
Strømningsmotstand	67,9	35,4	29,7	20,1	36,9	30,8	67,1	29,9
Oppskalering av statiske laster	80,4	72,3	66,2	50,7	88,6	44,5	43,2	68,8
Hydrodynamisk iht. SSV	168,2	8,9	18,6	34,9	17,8	5,4	147,7	6,6

Resultat av forsøk

Forsøksnr	9	10	11	50 mm, vann	Plate, vann	Plate, sørpe	Gjennomsnitt 1-11	Gjennomsnitt 1-8	Gjennomsnitt 9-11
Statisk last	94,4	91,4	97,6	78,7	97,2	98,8	96,9	97,8	94,5
Hydrodynamisk	4,2	8,2	15,8	0,0	0,0	0,0	30,8	38,9	9,4
Armanini og Scotton	54,0	72,5	37,0	1740,7	165,4	56,4	44,8	41,2	54,5
Lichtenhahn	23,7	17,9	67,7	0,0	0,0	0,0	45,4	48,8	36,4
Hübl og Holzinger	41,7	21,3	66,5	255,5	51,1	86,0	66,5	75,2	43,2
Strømningsmots tand	8,0	0,5	14,9	0,0	0,0	0,0	31,0	39,7	7,8
Oppskalering av statiske laster	22,7	19,4	30,8	0,1	0,0	0,0	53,4	64,4	24,3
Hydrodynamisk iht. SSV	202,4	236,3	171,7	3560,1	428,0	14,0	92,6	51,0	203,5

Drøfting

7.1 Vurdering av målinger og gjennomføring av forsøkene

Først og fremst må det bemerkes at det er betydelige usikkerheter i avlesningene av både flyte høyde og hastighet på skredmassene. Dette kommer hovedsakelig av at begge parameterne varierer over skredmassene, slik at det som måles i en del av skredet ikke nødvendigvis er representativt for hele massen. For å minimere denne feilen, er skredforløpet i bildesekvensene sammenlignet med lastkurvene i figur 48 til 61. På den måten kan punktet flyte høyden og hastigheten måles ut fra velges fra delen av skredet som fører til det største støtet, slik at punktet blir så representativt som mulig for massene som har mest betydning i lastberegningene.

I flere forsøk kom det mindre masseoppsamlinger både i for- og etterkant av hoveddelen, som er mindre interessante iallfall i dimensjoneringsøyemed og derfor ikke er regnet på. I tillegg er det observert at massene i enkelte forsøk kom oppstykket ut av beholderen. Hvilke forsøk dette gjelder kan sees fra tabell 7. Det er forsøkt å bruke skjønn ved avlesing av flyte høyden i disse tilfellene, men det er tydelig at usikkerheten rundt målingene av flyte høyden er stor.

Videre har kraftmålingene fra lastcellene resultert i kurver som ligner det som er målt i tidligere forsøk på flomskred, blant annet i Song *et al.* (2018), Tan *et al.* (2020), og Wendeler *et al.* (2018). Her oppstår det et støt når skredet når barrieren, før skredhalen følger etter og fører til laster av vesentlig mindre størrelse. Til slutt går belastningen over til kun å bestå av de statiske lastene fra masseoppsamlingen på oppstrøms side av barrieren. Riktignok viser forsøkene på gitteret med grove masker (forsøk 9-11) noe større belastning etter hoveddelen av skredmassene har passert, enn hva det statiske trykket fra de gjenværende massene skulle tilsi. Størrelsesordenen på belastningen er rundt 14-28 N, hvilket kan komme av en liten vannstrømning i renna, som fortsetter lenge etter at hoveddelen av skredmassene er passert. Denne antakelsen støttes av at kreftene virker omtrent utelukkende på de nedre lastcellene, og at de øvre cellene er tilbake i omtrent ubelastet tilstand. Det er altså ingen tydelige tegn på at det skal være feil i lastmålingene.

Likevel må det bemerkes at gitteret ikke ser ut til å ligge inntil lastcella i øvre, høyre hjørne sett fra oppstrøm side i forsøk 9, 10 og 11. Fordi disse forsøkene er de eneste det groveste gitteret brukt i, tyder det på at dette har vært skjevt eller litt bøyd. Denne skjevheten kan påvirke eventuelle analyser av hvor på nettet krafta er størst, men burde ikke ha noen vesentlig innvirkning på den totale kraftresultanten på barrieren, da opplagerkreftene forventes fordelt til de øvrige lastcellene.

7.2 Vurdering av de nevnte beregningsmetodene i forhold til de målte kreftene

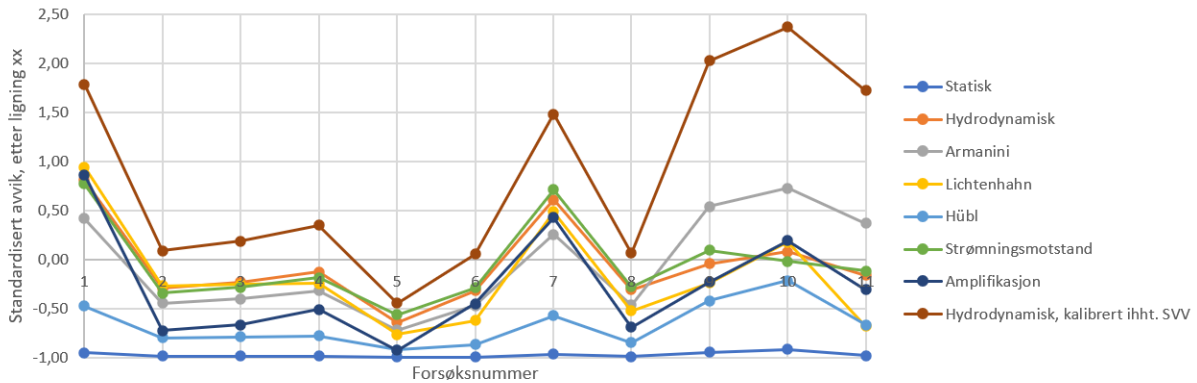
7.2.1 Forsøk 1-11, med sørpeskred mot gitre

For å vurdere beregningsmetodene fra avsnitt 3.4.3 og 3.4.4, er totallastene på barrierene beregnet ut fra målte og kjente verdier som flyte høyde, hastighet, massetetthet og lignende for hvert forsøk, sammenlignet med belastningen målt på lastcellene. En slik fremgangsmåte for vurdering av beregningsmetodene tar utgangspunkt i at målingene fra forsøkene er riktige og representative for sørpeskred. Fra avsnitt 6.1.4 og 8.1 er det tydelig at dette ikke nødvendigvis er tilfellet, hvilket vil være viktig å ha i mente i tolkning og eventuell bruk av resultatene fra sammenligningen.

Drøfting

Fordi belastningen i de ulike forsøkene varierer i størrelse, blant annet på grunn av to ulike oppsett og maskestørrelser, er det sett på et standardisert avvik mellom de målte og beregnede totallastene. Dette er beregnet med ligning 40, og vist i figur 62. I figuren er også den hydrodynamiske metoden med koeffisienten $k = 4$ ($\alpha = 2$) som foreslått i Norem (2014) lagt inn, i tillegg til de statiske lastene fra avsnitt 7.2.1 for sammenligning.

$$\text{Standardisert avvik} = \frac{\text{Beregnete verdier} - \text{Målte verdier}}{\text{Målte verdier}} \quad (40)$$



Figur 62: Det standardiserte avviket mellom de beregnede kreftene på barrierene, og de som ble målt i forsøkene. Avvikene er beregnet ved ligning 40, med bruk av data fra tabell 20. Her er også de statiske kreftene som beregnet i avsnitt 7.2.1 tatt med for sammenligning, samt den hydrodynamiske metoden med koeffisient $\alpha=2$, som foreslått i Norem (2014).

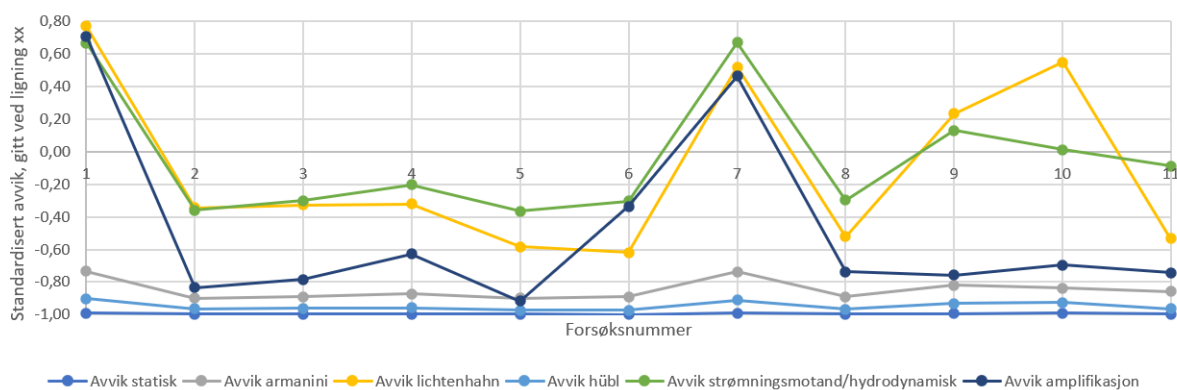
Fra figur 62 er det tydelig at ingen av metodene beregner lastene i forsøkene helt presist. Dersom dette kommer av feilavlesninger av hastighet og flyte høyde, burde dette kunne sees av at Lichtenhahns metode enten er utpreget presis, eller utpreget upresis i forhold til de andre beregningsmåtene. Det er fordi det varierer hvordan hastigheten og flyte høyden inngår i de ulike metodene, slik at det er forskjellig hvordan feilmålinger påvirker beregningene. Hastighetsmålingene inngår ikke i uttrykket for den totale lasta på barrieren beregnet med Lichtenhahns metode, og derfor vil det ikke oppstå avvik som følge av feil i hastighetsmålingene ved bruk av denne metoden. Metoden avhenger derimot av kvadratet til flyte høyden, slik at eventuelle avvik på grunn av feil avlesninger i denne ville forsterkes i forhold til metodene som er lineært avhengig av parameteren. Som sett fra figur 62 utpeker ikke avvikene i Lichtenhahns metode seg på noen spesiell måte.

Videre kan det bemerkes at det kun er den hydrodynamiske metoden kalibrert som foreslått i Statens vegvesen (2014) som jevnt over resulterer i høyere beregnede laster enn de målte, bortsett fra for et enkelt forsøk. I dimensjonering av fundamenter og barrierekomponenter, må det være forholdsvis sikkert at beregningsmetoden som brukes fører til lastanslag på samme størrelse eller større enn belastningen fra et designskred i realiteten. Dette kan enten løses ved å legge inn sikkerhetsfaktorer for å få den nødvendige marginen, eller ved å bruke metoder det er kjent at gir konservative resultater. Det betyr at beregningene fra alle de øvrige metodene må skaleres opp, enten ved bruk av høyere koeffisienter i selve uttrykkene der hvor koeffisienter inngår, eller ved introduksjon av en sikkerhetsfaktor. En slik oppskalering ville, i tillegg til å gå på bekostning av nøyaktigheten til anslagene, redusere presisjonen i dem. Det vises tydelig ved at variasjonen i avvikene funnet ved beregninger med Lichtenhahns metode, som er en direkte oppskalering av de statiske lastene, er vesentlig større enn variasjonen i avvikene til de statiske lastene. Dette må legges til grunn når de ulike metodene skal vurderes. For eksempel gir Hübl og Holzingers metode jevnt over lave, men presise lastanslag, mens presisjonen senkes ned til samme størrelsesorden som de andre metodene når belastningen skaleres opp til deres nivå.

Metodene hvor det brukes en koeffisient i uttrykket for belastningen, har i vurderingene hittil være helt nøyaktige i gjennomsnitt, fordi koeffisientene som brukes er kalibrert ut fra forsøkene det sammenlignes med. Dette gjelder den hydrodynamiske metoden, Lichtenhahns, og metodene basert på strømningsmotstand og oppskalering av statiske krefter. Likevel kan det ikke forventes at denne nøyaktigheten vil oppnås ved gjenskapning av forsøkene, fordi koeffisientene er tatt fra forsøk med lav presisjon og relativt få repetisjoner, og dermed kan være påvirket av enkeltforsøk.

Til slutt burde det nevnes hvordan figuren viser at verdiene beregnet uten koeffisienter er vesentlig større i forhold til de målte verdiene i forsøk 9-11, enn i 1-8. Dette gjelder både beregningene med Armanini og Scottons metode, Hübl og Holzingers metode og den hydrodynamiske metoden med koeffisienten fastsatt til $k = 4$ ($\alpha = 2$). Fordi forsøk 1-8 er gjort på det fine gitteret, og 9-11 på det grove, indikerer det et behov for en koeffisient som varierer med maskestørrelsen eller det projiserte arealet av gitteret. For eksempel ser det i figur 62 ut til at mens $k = 4$ ($\alpha = 2$) egner seg for det fine gitteret ved bruk av den hydrodynamiske metoden, ville $k = 2$ ($\alpha = 1$) passet bedre til beregninger på det grove.

I realiteten er det nødvendig å finne mer standardiserte verdier, for eksempel vil det i første omgang være realistisk å finne et omtrentlig intervall som kan brukes for beregninger på sørpeskred og gitterbarrierer eller etterhvert nettbarrierer i det hele tatt. Fra målingene og beregningene i denne oppgaven virker det som at forskjellene mellom belastningen på de to ulike gitrene kan tas hensyn til ved å la trykket virke kun på det projiserte arealet av gitrene i uttrykkene, i stedet for det totale arealet barrieren tar opp i renna. Dette vil riktignok føre til en betydelig reduksjon i belastningen dersom den beregnes med samme koeffisient, så koeffisientene i de metodene hvor slike inngår, må kalibreres igjen. Denne gangen settes én verdi ut fra minste kvadraters metode av avviket mellom de beregnede og målte kreftene i alle 11 forsøk med sørpe mot gitre (forsøk 1-11). De standardiserte avvikene som beregnet med ligning 40 med disse modifikasjonene på metodene, er vist i figur 63.



Figur 63: Det standardiserte avviket beregnet likt som i figur 62, men hvor arealet av barrieren som treffes av skredet settes lik det projiserte arealet i alle beregningsmetodene. Det er da brukt en enkelt koeffisient for alle 11 forsøkene som er gjort på sørpes mot gitre i de metodene som innebærer bruk av en koeffisient. Denne er fremdeles funnet ved minste kvadraters metode mellom beregningene og de målte kreftene.

I utarbeidelsen av figur 63 er det ikke tatt hensyn til hvor belastningen på gitrene er, altså skaleres de triangulære lastfordelingene på samme måte som de rektangulære, til tross for at tverrliggende stenger i nettet kan være plassert både langt nede og langt oppe i tverrsnittet.

Modifiseringen av lastmetodene ved å la trykket virke over et mindre areal, fører naturlig nok til lavere verdier for metodene som ikke inkluderer koeffisienter, og virker derfor ikke fornuftig å bruke på disse. For spesielt den hydrodynamiske metoden, metoden basert på strømningsmotstand, og Lichtenhahns metode, ser modifiseringen ut til å ta inn forskjellene i

belastning på grunn av maskeåpningene på en god måte. I disse metodene blir gjennomsnittet til de standardiserte avvikene i forsøk 1-8 og 9-11 forholdsvis nærme null selv om det brukes samme koeffisient for å beskrive belastningen på to ulike gitre. Metoden basert på oppskalering av de statiske lastene som beskrevet i avsnitt 3.4.4.3 derimot, resulterer i for lave lastanslag for forsøkene på de grove gitrene når denne modifiseringen gjøres. Det virker logisk, fordi metoden allerede er utarbeidet for flomskred på nettbarrierer, slik at en videre tilpasning til nett er derfor ikke nødvendig.

De statiske kreftene som beregnet i avsnitt 7.2.1 er en liten andel av de totale kreftene som virker på barrieren i selve støtet, hvilket indikerer at metodene basert på hydrostatikk, som Lichtenhahns metode og oppskalering av statiske laster, ikke burde være åpenbare førstevalg for beregninger. Lichtenhahns metode fremstår likevel som en av de bedre metodene når avvikene fra de målte kreftene på lastcellene vurderes, som vist i figur 62 og 63. Det later likevel til at metoden som beregner lastene på barrierene best, er den basert på strømningsmotstand, som tilsvarende den hydrodynamiske metoden dersom trykket kun virker på det projiserte arealet av gitteret.

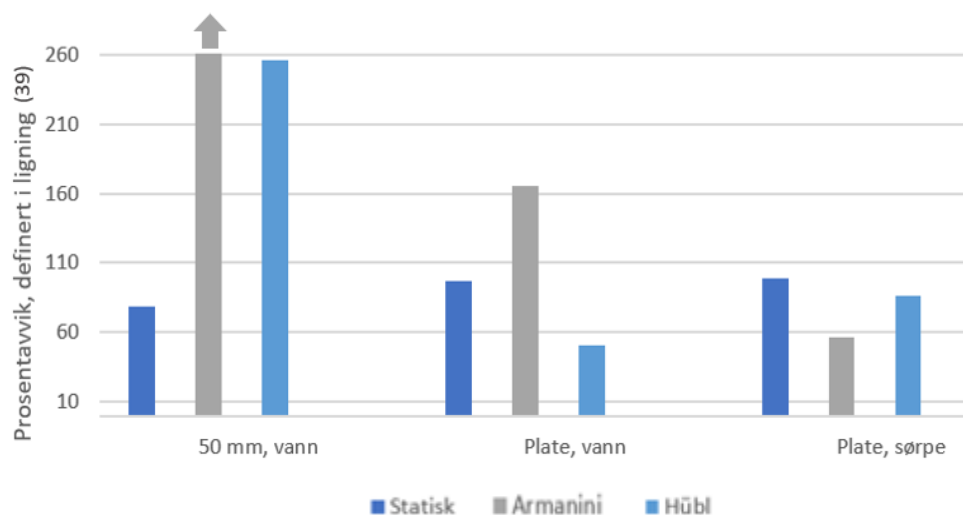
7.2.1.1 Delkonklusjon

Det ser ut til at det å la trykket virke på det projiserte arealet av gitrene i stedet for det totale arealet de tar opp, kan være en tilpasning som burde gjøres når metodene for tette barrierer skal overføres til gitterbarrierer. Det er da viktig å være klar over hvilke antakelser og forsøk som ligger bak hver metode, da en slik endring ikke passer for metodene som allerede er laget for nett eller gitre. Fordi endringen i arealet trykket virker på reduserer den totale beregnede lasta, har det ført til en kompensasjon ved større koeffisienter i metodene hvor dette brukes. Derfor har modifiseringen resultert i for lave lastanslag når den er blitt gjort på metodene hvor det ikke er noen koeffisient som kan økes som kompensasjon. Dette kan eventuelt løses ved å innføre en koeffisient også i disse metodene. I Armanini og Scottons metode vil dette i tilfeller med akselererende masser innebære at metoden blir lik den hydrodynamiske metoden.

Riktignok må det legges til at denne sammenhengen kun er hentet fra to gitre med omtrent samme sørpeblanding i alle forsøkene, og at det derfor må gjøres flere undersøkelser før det er sikkert at den er gjeldende også i andre situasjoner.

7.2.2 Enkelttester

I forbindelse med denne oppgaven er det tre forsøk det kun er utført én repetisjon av. Disse enkelttestene er gjort for å få et inntrykk av hvordan de ulike metodene oppfører seg når det kommer til ytterverdier som en tett barriere, eller et skred med bare vann. Fordi de ikke er repetert, er det større sjanse for at disse resultatene inneholder tilfeldige feil, enn gjennomsnittsverdiene fra flere forsøk. I tillegg er det ikke mulig å vurdere hvordan belastningen beregnet med de ulike metodene varierer med for eksempel flyte høyde og hastighet i de enkelte tilfellene, altså når vann strømmer gjennom et gitter eller på en tett plate, eller når sørpeskred strømmer mot en tett barriere. Likevel gir de informasjon om omtrentlig hvilke koeffisienter som kan brukes i hvert tilfelle, som kan være nyttig i vurdering av hvor sensitive de ulike metodene er for endringer i for eksempel viskositet og grovheten til gitteret. Dette har ført til at lastberegningene for enkelttestene ikke avviker fra de målte verdiene i metodene basert på uttrykk med koeffisienter. Figur 64 viser prosentavvikene som beregnet med ligning 39 for de øvrige metodene, og de statiske belastningene for sammenligning. Merk at prosentavviket til beregningene gjort med Armanini og Scottons metode for forsøket hvor et gitter treffes av vannmasser er på over 1700%, og er kuttet ut av figuren.



Figur 64: Prosentavviket mellom de beregnede kreftene på barrierene i enkeltforsøkene som er gjort, og de målte kreftene i forsøkene. Avviket beregnes ved ligning 39. I tilfellet hvor en gitterbarriere treffes av vann, er prosentavviket til beregningene gjort med Armaninis metode på over 1700 %. Dette ble ikke tatt med i figuren, da det ville utydeliggjort de øvrige verdiene. Merk altså at prosentavviket ved Armaninis metode i forsøket merket «50 mm, vann» ikke er 260 %, men mye høyere.

Det er tydelig at hverken Armaninis eller Hübl og Holzingers metode egner seg godt til å beskrive kreftene fra rene vannmasser, hverken på nett eller på en tett barriere, men at de treffer bedre når det kommer til sørpemasser som treffer en tett barriere. Det støtter opp om en hypotese om at det burde legges inn en koeffisient som avhenger av massenes egenskaper som for eksempel fasthet og kompressibilitet i uttrykket for belastningen på barrierer, som forutsagt av Norem, H. (Pers. kom., 2021).

7.3 Påvirkningen av barrierer på utløpsdistansen til forsøksskredene

Målingene av avstanden mellom renneutløpet og fremste avsetningspunkt som vist i figur 47 indikerer at nettbarrierer reduserer utløpsdistansen til skred, også når det ikke blir noen vesentlig masseoppsamling foran dem. Det er riktignok store variasjoner i avstandsmålingene for hver barrieretype, og dermed usikkerhet rundt hvor stor effekten er for hvert gitter.

Likevel viser målingene en tydelig trend hvor det fineste gitteret reduserer utløpsdistansen noe mer enn det grove. En stor del av denne forskjellen kan antakeligvis begrunnes med den betydelige masseoppsamlingen foran det fine gitteret, som ikke oppstår ved det grove. Det er ikke tilfellet når det grove gitteret fører til lavere utløpsdistanser enn et åpent skredløp, da det ikke oppstår noen masseoppsamling av betydning foran dette gitteret.

Etter teorien presentert i avsnitt 3.3.3, betyr det at hastigheten til skredmassene reduseres enten ved passering av barrieren, eller i etterkant på grunn av økt turbulens. Fordi det antas at barrieren er rigid, og at energi derfor ikke er gått med til deformasjon av den, kan målingene brukes til å finne ut hvor stort energitapet i forbindelse med turbulens og lignende tap er for barrieren. Det vil likevel ikke gjøres ut fra målingene som er gjort. Det er det to grunner til; den ene er at utfordringene ved nedskalering av forsøkene fører til så store usikkerheter i hvordan strømmingen oppfører seg i forhold til den nedskalerte barrieren, at det ikke virker hensiktsmessig å regne på tapet ut fra forsøksresultatene. Den andre er at det i praksis virker mer aktuelt å anslå energitapet ved bruk av simuleringverktøy, slik at hele energitapet kan tas hensyn til og beregnes samlet, også for ulike typer nettbarrierer. Det vil gi en større fleksibilitet når det kommer til tilpasning av ulike barrieretyper, og burde derfor fokuseres på fremfor tilbakeregning av forsøk på nedskalerte versjoner av hvert enkelt nett.

7.4 Sammenligning av simuleringene i REEF3D med observasjoner og målinger fra forsøkene

Resultatene fra simuleringen av skredet på et gitter med lysåpninger på 50 mm viser både vesentlig mindre belastning enn forsøkene, og ingen masseoppsamling ved nettet. Forskjellen er så stor at simuleringer med inputverdiene som valgt i oppgaven ikke virker fornuftig å bruke til noen form for overslag eller beregninger.

Det er usikkert hvilke parametere som eventuelt burde endres, fordi det kan virke som at store deler av problemet ligger i at fluidet i simuleringene ikke samles opp av barrieren. Under forsøkene kunne det observeres hvordan større klumper i sørpeblandingen ble samlet opp foran barrieren, selv om størrelsen på dem var mindre enn lysåpningene. Det tyder på at snøen lett fester seg i nærliggende partikler og oppsamlinger, og derfor ikke oppfører seg som en homogen, tyktflytende væske, slik den er simulert i REEF3D. Det er derfor nødvendig å komme opp med en funksjon hvor det tas hensyn til at en stor del av massen også er større, tette partikler med en viss sammenbindingskraft. Dette er ikke tilgjengelig i REEF3D per dags dato. Riktignok finnes det en funksjon som tar hensyn til sedimenttransport, men simuleringer hvor denne er brukt har ikke vist seg å gi resultater som ligner mer på det som observeres i forsøkene. Disse simuleringene er derfor ikke gjengitt.

Det er mulig parametere som massetetthet og viskositet kan justeres slik at simuleringene kan gi belastninger som stemmer overens med det som måles på barrierene i forsøk. I så fall vil dette måtte være justeringer utover verdier som er kjent for sørpeskred, for å kompensere for manglende tette partikler med sammenbindingskrefter. Dersom noe slikt skal forsøkes, vil det være viktig å være godt kjent med både simuleringsprogrammet og hvordan strømmingen i sørpeskred oppfører seg, slik at det ikke oppstår feil. Fordi dimensjonering av nettbarrierer i sikring mot sørpeskred er et område hvor det er store konsekvenser ved feilberegninger, er den foreløpige vurderingen at det antakeligvis vil være like hensiktsmessig å teste ut andre simuleringsprogrammer, som for eksempel programmer som brukes i simulering av nettbarrierer truffet av sørpeskred. Et eksempel på dette er FARO. Bruken av dette programmet i simulering av flomskred er drøftet i Wendeler (2016).

Konklusjon

I litteraturen er det ikke funnet pålitelige metoder for predikering av utløpsdistanser for sørpeskred med nettkonstruksjoner, og heller ikke for beregning av belastningen på slike konstruksjoner under skred. Ved bruk av nettkonstruksjoner for sikring av Vannledningsdalen må det derfor enten gjøres mer omfattende utviklingsarbeider eller velge meget konservative løsninger som tar høyde for usikkerheten.

For predikasjon av utløpsdistansen for sørpeskred i område sikret med nettkonstruksjon, foreslås det i rapporten å kombinere bruk av beregningsprogram for skred i det aktuelle terrenget, feks. Ramms, i kombinasjon med korreksjon for energitapene fra den enkelte nettkonstruksjon. I oppgaven er det derfor lagt vekt på å finne metoder for å bestemme belastningen på nettkonstruksjonen.

Et annet alternativ som er presentert, er å tilpasse den forenklete metoden for beregning av utløpsdistanser som presentert i Norem (2014) og gjengitt i avsnitt 2.3.1. Fordi det ikke er planlagt installasjon av nettkonstruksjoner nedstrøms 20°-punktet, er det foreslått å gjøre dette ved å redusere hastigheten brukt i utregningene. Størrelsen på reduksjonen vil da være avhengig av både den endelige plasseringen til nederste barriere, og hvor mye masse det forventes at skal passere barrieren ved et designskred.

Nedskalerte skredforsøk gjennomført i forbindelse med oppgaven viser at størrelsen på lysåpningene i en gitterbarriere har stor innvirkning på hvor mye masse som passerer igjennom barrieren, og også hvor store krefter den utsettes for. Det indikerer at nettene som brukes i sikringsløsningen i Vannledningsdalen må være forholdsvis finmasket for å kunne ha den effekten det er gått ut fra i forprosjekteringen. Eventuelt foreslås det å bruke fine sekundærnett montert inntil grovere nett som et alternativ.

Når det kommer til beregning av kreftene på en barriere truffet av sørpeskred, har det ikke vært mulig å komme frem til noe konkret svar på om det finnes noen kjent beregningsmodell som egner seg. Det er det gjort for få forsøk til å bestemme sikkert, og det har vist seg at en nedskalering av skred med et naturmateriale som sørpe fører til store usikkerheter i overføringsverdien til resultatene. Resultatene og informasjonen som hentes fra dem, må derfor heller tolkes som indikasjoner på hva som vil være nyttig å undersøke nærmere i videre arbeider. Det er funnet en indikasjon på at uttrykk brukt til beregning av laster fra flomskred på tette barrierer kan tilpasses gitre ved å la trykket virke kun på det projiserte arealet. Det har da måttet brukes en koeffisient som kan kompensere for deler av det reduserte arealet, men denne har kunnet vært den samme for beregninger på både det fine gitteret, og det grove. Størrelsen på koeffisienten er da avhengig av hvilken beregningsmetode det er snakk om, i tillegg til at sammenligning med enkeltforsøk med vann har indikert at den påvirkes av egenskapene til skredmediet.

Enkelte av de kjente metodene for beregning av laster på barrierer truffet av flomskred har også vist seg mer lovende enn andre, og spesielt metoden basert på strømningsmotstand virker interessant å undersøke videre. Lichtenhahns metode førte også til lastberegninger med relativt små avvik fra målingene, men fordi lastbildet klart domineres av dynamiske krefter, er det noe usikkert om metoden basert på hydrostatikk faktisk egner seg til beregning på skredene.

I arbeidet videre anbefales det å gjennomføre forsøk i større skala, og da eventuelt med fleksible nettbarrierer av samme type som planlegges brukt i Vannledningsdalen. I tillegg vil det være nyttig å få erfaring med bruk av et simuleringsverktøy som kan gi realistiske simuleringer av interaksjonen mellom skred og nettbarrierer. Det gjelder spesielt dersom det

Konklusjon

skal jobbes mot at fleksible nettbarrierer skal bli et utbredt sikringstiltak mot sørpeskred i et lengre perspektiv. Simuleringene i CFD-programmet REEF3D viste seg ikke å gjenspeile forsøkene på noen god måte, og det burde derfor undersøkes om andre CFD-programmer er mer egnet, eller om enkelte programmer brukt til simulering av flomskred på nettbarrierer også kan brukes for sørpeskred.

Kilder

- Aabøe, R. *et al.* (red.) (2018) *Geoteknikk i vegbygging. Veiledning*. (Håndbok V220) Statens vegvesen, Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: https://fileserv.motocross.io/trafikksiden/HB_V220_Geoteknikk_vegbygging_2018.pdf (Hentet 05.05.2021)
- Armanini, A., Scotton, P. (1993) On the impact of a debris flow on structures i *Proceedings of XXV Congress of International Association for Hydraulic Research*. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers.
- Armanini A. (1997) On the dynamic impact of debris flows, i Armanini A., Michiue M. (red) *Recent Developments on Debris Flows. Lecture Notes in Earth Sciences*, vol 64. Berlin/Heidelberg: Springer, s. 208-226.
- Austrian standards (2010) *ONR 24805: Permanenter technischer Lawinenschutz — Benennungen und Definitionen sowie statische und dynamische Einwirkungen*. Tilgjengelig fra: <https://www.bdb.at/Service/NormenDetail?id=362911>
- Bartelt, P. *et al.* (2017a) *RAMMS::DEBRISFLOW User Manual*, v1.7.0. Davos/Zürich: WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. Tilgjengelig fra: https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_DBF_Manual.pdf (Hentet: 16.03.2021)
- Bartelt, P. *et al.* (2017b) *RAMMS::AVALANCHE User Manual*, v1.7.0. Davos/Zürich: WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. Tilgjengelig fra: https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_AVAL_Manual.pdf (Hentet: 12.12.2020)
- Berger *et al.* (2020) *Praxishilfe Murgang- und Hangmurenschutznetze*. (WSL Berichte 102) Birmensdorf: WSL. Tilgjengelig fra: <https://www.wsl.ch/de/publikationen/praxishilfe-murgang-und-hangmurenschutznetze.html> (Hentet: 28.03.2021)
- Bihs, H. *et al.* (u. å. a) *REEF3D User Guide*, v21.02. NTNU, Trondheim. Tilgjengelig fra: <https://github.com/REEF3D/REEF3D> (Hentet: 27.03.2021)
- Bihs, H. *et al.* (u. å. b) *DIVEMesh User Guide* v21.01. NTNU, Trondheim. Tilgjengelig fra: <https://github.com/REEF3D/DIVEMesh> (Hentet: 27.03.2021)
- Bjordal, H., Helle, T. E. (2011) *Skred og flom på veg. Statistiske betraktninger*. (VD-rapport nr. 5) Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: https://fileserv.motocross.io/trafikksiden/VD_rapport_005.pdf (Hentet: 26.01.2021)
- Bolliger, R., Spang, R. M. (2001) From the timber fence to the high-energy net. Developments in rockfall protection from the origins to the present, *Geobrugg Jubilee Conference*. Bad Ragaz, Sveits, 20.06.2001. Romanshorn: Fatzer AG, s. 6-7.
- Byggteknisk forskrift (2010) *Veiledning om tekniske krav til byggverk*, TEK10. Tilgjengelig fra: https://dibk.no/regelverk/tek/?_t_q=tek+10 (Hentet: 12.12.2020)
- Choo, Y.I., Casarella, M.J. (1971) Hydrodynamic resistance of towed cables. *Journal of Hydronautics*, vol 5, side 126–131. Tilgjengelig fra: <https://fdocuments.in/document/hydrodynamic-resistance-of-towed-cables.html> (Hentet: 10.07.2021)
- Colbeck, S. C. (1974) *Grain and bond growth in wet snow*, International Association of Hydrological Sciences, Publication nr. 114.

- DeNatale, J. S. et al. (1999) *Experimental testing of flexible barriers for containment of debris flows*. (Open-file report 99-205). Vancouver, Washington: U.S. Geological survey, U.S. Department of the Interior. Tilgjengelig fra: <https://pubs.usgs.gov/of/1999/0205/report.pdf> (Hentet: 29.01.2021)
- Grassl, H. G. (2002) *Experimentelle und numerische Modellierung des dynamischen Trag- und Verformungsverhaltens von hochflexiblen Schutzsystemen gegen Steinschlag*. Doktorarbeid, Eidgenössische Technische Hochschule Zurich.
- Grøn, Ø. (2018) Arbeid, *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/arbeid_-_fysikk (Hentet: 16.03.2021)
- Gubler, A. (2007) *Physikalische Modellierung flexibler Barrieren zum Schutz vor Murgängen*. Masteroppgave. Eidgenössische Technische Hochschule Zurich.
- Hannus, M. (2016) *Skredfarekartlegging i utvalgte områder på Svalbard*. (Rapport nr. 91-2016) Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_91.pdf (Hentet: 11.02.2021)
- Helseth, L. E. (2020) Ikke-newtonsk væske, *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/ikke-newtonsk_v%C3%A6ske (Hentet: 16.03.2021)
- Hestnes, E. (1996). Slushflow hazard — where, why and when? 25 years of experience with slushflow consulting and research. *Annals of Glaciology*, 26, s. 370-376. doi:10.3189/1998AoG26-1-370-376
- Hungr, O., Morgan, G. C., Kellerhals, R. (2011) Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotech Journal*, 21, s. 663–677. doi:10.1139/t84-073
- Hübl, J. og Holzinger, G. (2003): *Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung kronenoffener Bauwerke für die Geschiebemanagement in Wildbächen: Kleinmaßstäbliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern*. (WLS Rapport 50, bind 3). Wien: Universität für Bodenkultur Wien. Tilgjengelig fra: https://www.researchgate.net/publication/282246123_Entwicklung_von_Grundlagen_zur_Dimensionierung_g_kronenoffener_Bauwerke_fur_die_Geschiebemanagement_in_Wilbachen_Projektbeschreibung_und_Band_1_Literaturstudium_und_Zusammenstellung_vorhandener_Ans (Hentet: 02.06.2021)
- Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R., Scheidl, C. (2009) Debris flow impact estimation, *Proceedings of the 11th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*. Ohrid/Makedonia, 1.-5. september 2009. s. 137-148.
- Hoseth, K. A., Johnsen, I., Gundersen, J (2018) *Konseptstudie. Sikringstiltak Sukkertoppen og Vannledningsdalen*. (Rapport nr. 78-2018) Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2018/rapport2018_78.pdf (Hentet: 27.01.2021)
- Håland, G., Langelid, A. (2015) *Naturfareprosjektet. Delprosjekt 7. Skred og flomsikring*. (21/2015) Oslo: Norges vassdrags og energidirektorat. Tilgjengelig fra: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_61.pdf (Hentet: 29.01.2021)
- Isaksen K. et. al. (2017) *Klimascenarioer for Longyearbyen-området, Svalbard. Delrapport 1, Statsbygg oppdrag: «Bygging og forvaltning på Svalbard i et langsiktig klimaperspektiv»*. (METreport nr. 15/2017). Meteorologisk institutt. Tilgjengelig fra: https://www.met.no/sokeresultat/_/attachment/inline/8932a8b1-17b4-4567-8559-

ed4b78d61aee:6fe02353a8212c195f00bd59dc5b2baaa6c4118c/2017-10-METreport_Statsbygg-Svalbard_final.pdf (Hentet: 10.05.2021)

Jaedicke, C., et al. (2008) Chute experiments on slushflow dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 51, s. 156–167. Tilgjengelig fra: <https://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/issw-2006-139-147.pdf> (Hentet: 10.07.2021)

Jaedicke, C. (2014) *Endringer i risiko og forløp av skred i Norge*. Tilgjengelig fra: https://www.standard.no/Global/PDF/Bygg,%20anlegg%20og%20eiendom/2014Laster_og_klima/4_Skred_i_Norge_Christian%20Jaedicke_NGI.pdf (Hentet: 09.02.2021).

Jarvis, P. et. al. (2005) *A review of floc strength and breakage* Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135405002794> (Hentet 22.05.2021)

Jirka, G. H. (1998) *Hydromechanik*. Institut für Hydromechanik: Universität Karlsruhe.

Jónsson, Á., Gauer, P. (2014) *Optimizing Mitigation Measures against Slush Flows by Means of Numerical Modelling. A Case Study*. Longyearbyen, Svalbard. Tilgjengelig fra: <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimizing-Mitigation-Measures-against-Slush-Flows-Gauer/d1d44e2a3f325ba4d623402c6e23138a712c1df7> (Hentet: 10.02.2021)

Jónsson, A. et. al. (2015) *Forprosjektering av sikringstiltak for bebyggelse og infrastruktur nedenfor Vannledningsdalen*. (NVE-rapport 20120650-01-R). Longyearbyen: NGI. Tilgjengelig fra: <https://www.lokalstyre.no/fagrappporter.488045.no.html> (Hentet: 03.04.2021)

Jónsson, A., Kronholm, K., Nielsen, L. E. (2018) *Rapport, Forprosjektering av sikringstiltak – Fase B2*. (NVE-rapport 18241-03-3). Longyearbyen: NVE. Tilgjengelig fra: <https://www.lokalstyre.no/fagrappporter.488045.no.html> (Hentet 17.03.2021)

Kobayashi, S., Izumi, K. og Kamiishi, I. (1994) Slushflow disasters in Japan and its characteristics. Tilgjengelig fra: <https://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/issw-1994-657-665.pdf> (Hentet: 15.05.2021)

Kronholm, K., Jónsson, Á., Nordbrøden, H. S. (2021) *Forprosjektering av nettløsning mot sørpeskred i Vannledningsdalen*. (Nr. 18241-25-1) Ål, Reykjavik: Norges vassdrags- og energidirektorat. Tilgjengelig fra: <https://www.lokalstyre.no/getfile.php/4839834.2046.qmimiwupswnbqz/18241-25-1+Forprosjekt+nettl%C3%B8sning+i+Vannledningsdalen+%28005%29.pdf> (Hentet 25.04.2021)

Kwan, J.S.H. & Cheung, R.W.M. (2012) *Suggestions on Design Approaches for Flexible Debris-resisting Barriers* (GEO Discussion Note 1/2012). Hong Kong: Geotechnical Engineering Office.

Longyearbyen lokalstyre (2018) *Valg av løsning for skredsikring av Lia og Vannledningsdalen*. Longyearbyen. Tilgjengelig som vedlegg på: <https://www.lokalstyre.no/forprosjekt-av-sikringstiltak-i-lia-og-vannledningsdalen.6170116-321755.html> (Hentet: 03.04.2021)

Margreth, 2007 *Defense structures in avalanche starting zones Technical guideline as an aid to enforcement* Tilgjengelig fra: https://www.slf.ch/fileadmin/user_upload/SLF/Permafrost/Bauen_im_Permafrost/Lawinenverbau_im_Anbruchgebiet_E.pdf Hentet: 19.05.2021

Minste kvadraters metode (2017) *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/minste_kvadraters_metode (Hentet: 28.06.2021)

Kilder

- Ng et. al. (2018) *Effects of dynamic fragmentation on the impact force exerted on rigid barrier: centrifuge modelling*. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology. Tilgjengelig fra: http://ias2.ust.hk/ias/files/pdf/1566528775_b2.pdf (Hentet: 10.07.2021)
- Norem, H. (2011) *Vegeter og snøskred. Håndbok om sikring mot snøskred*. (VD-rapport nr. 27) Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: https://files.motocross.io/trafikksiden/VD_rapport_027.pdf (Hentet: 26.01.2021)
- Norem, H. (2014) *Flom- og sørpeskred. Veiledning*. (Håndbok V139) Statens vegvesen, Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: http://www.vegvesen.no/_attachment/740653/binary/1006021 (Hentet: 26.01.2021)
- Norsk polarinstitutt (u. å.) *Kart over området rundt Longyearbyen*. Tilgjengelig fra <https://toposvalbard.npolar.no/> (Hentet: 08.07.2021)
- Ormestad, H. (2020) Friksjon, *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra <https://snl.no/friksjon> (Hentet 17.03.2021)
- Proske, D., Hübl, H., Suda, J. (2011) Debris flow impact estimation for breakers. *Georisk Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, doi: 10.1080/17499518.2010.516227
- Scheidl et al. (2013) Analysing Debris-Flow Impact Models, Based on a Small Scale Modelling Approach, *Surveys in Geophysics* vol.34, s. 121–140. doi:10.1007/s10712-012-9199-6
- Song, D. (2017) Mechanisms of debris flow impact on rigid and flexible barriers. Doktorarbeid, Department of Civil Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology.
- Song, D. et al. (2018) Geophysical flows impacting a flexible barrier: effects of solid-fluid interaction. *Landslides* vol. 15, s. 99–110 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0856-1>
- Steen, S. (2017) General Modelling and Scaling Laws. *TMR7 Experimental Methods in Marine Hydrodynamics*. Tilgjengelig fra: https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Litteratur/NTNU_Scaling_Laws.pdf (Hentet: 02.07.2021)
- Tan et al. (2020) New simple method for measuring impact force on a flexible barrier from rockfall and debris flow based on large-scale flume tests. *Engineering Geology* vol. 279. doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105881
- Voellmy, A. (1955) Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung*, vol. 73. Tilgjengelig fra: <http://doi.org/10.5169/seals-61891> (Hentet: 10.07.2021)
- Volkwein, A. (2002) *Numerische Simulation von flexiblen Steinschlagschutzsystemen*. Doktorarbeid. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Volkwein, A. (2014) *Flexible debris flow barriers. Design and application*. WSL: Birmensdorf. Tilgjengelig fra: <https://www.geobrugg.com/file-48898/downloadcenter/level1-level2-level3-research-papers/Research-2014/Flexible-debris-flow-barriers-Design-and-application-2014.pdf> (Hentet 27.03.2021)

Wendeler, C., Volkwein, A. (2015) *Laboratory tests for the optimization of mesh size for flexible debris-flow barriers*. WSL: Birmensdorf. Tilgjengelig fra: <https://nhess.copernicus.org/articles/15/2597/2015/nhess-15-2597-2015.pdf> (Hentet 13.04.2021)

Wendeler, C. (2016) *Debris-Flow Protection Systems for Mountain Torrents. Basic Principles for Planning and Calculation of Flexible Barriers*. WSL: Birmensdorf. Tilgjengelig fra: https://www.geobruigg.com/file-82875/downloadcenter/level1-level2-level3-research-papers/Research-2016/Diss-C_Wendeler-DebrisFlowProtection_EN_2016.pdf (Hentet 27.03.2021)

Wendeler, C. et. al. (2018) *Load model for designing flexible steel barriers for debris flow mitigation*. WSL: Birmensdorf/Davos-Dorf. Tilgjengelig fra: <https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.1139/cgj-2016-0157> (Hentet 13.04.2021)

Zhang, S. (1993) A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China. *Natural Hazards*, vol. 7. doi: 1–23. doi:10.1007/BF00595676.

Zhao L. et. al. (2020) Coupled numerical simulation of a flexible barrier impacted by debris flow with boulders in front. *Landslides*, vol. 17. doi: 10.1007/s10346-020-01463-x

Vedlegg A

Inputverdier til DiveMesh, satt sammen i en tekstfil kalt control.txt: Denne filen er den samme for begge simuleringene gjort i oppgaven, altså uavhengig av viskositeten til skredmassene.

C 11 21
C 12 21
C 13 21
C 14 2
C 15 21
C 16 3
B 1 0.025
B 10 0.0 7.0 0.0 0.3 0.0 0.45
M 10 2
M 20 2

Inputverdier til Reef3d, satt sammen i en tekstfil kalt ctrl.txt.

For simuleringen med lav viskositet:	For simuleringen med høy viskositet:
D 10 4	D 10 4
D 20 2	D 20 2
D 30 1	D 30 1
F 30 3	F 30 3
F 40 3	F 40 3
F 54 1.0	F 54 1.0
F 55 0.3	F 55 0.3
F 56 0.15	F 56 0.15
N 10 14	N 10 14
N 11 11	N 11 11
N 40 3	N 40 3
N 41 15.0	N 41 15.0
N 45 50000	N 45 50000
N 47 0.1	N 47 0.1
M 10 2	M 10 2
P 10 1	P 10 1
P 30 0.1	P 30 0.1
T 10 2	T 10 2
T 36 2	T 36 2
T 37 0.02	T 37 0.02
w 1 900	w 1 900
W 2 0.000002311	W 2 0.0000777777
W 20 4.905	W 20 4.905
W 22 -8.496	W 22 -8.496
X 320 3	X 320 3
X 321 0.185 0.004 0.05 0.00 7800.0 7 8	X 321 0.185 0.004 0.05 0.00 7800.0 7 8
X 322 0.30 0.36 6.0 0.15 0.0 0.0 0.0 0.0	X 322 0.30 0.36 6.0 0.15 0.0 0.0 0.0 0.0

Vedlegg B



Foto av det som antas å være en representativ del av snømassene brukt i blandingen av sørpe for forsøk 1-7, 9-11 og enkeltforsøket med sørpe mot en tett barriere.

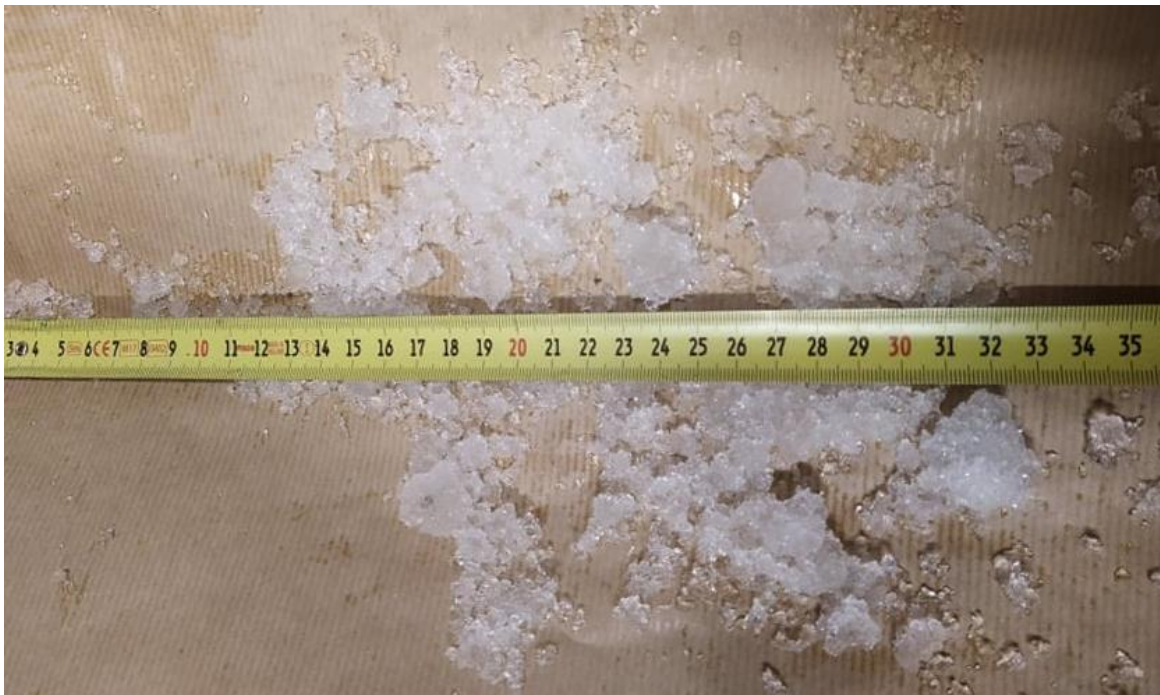


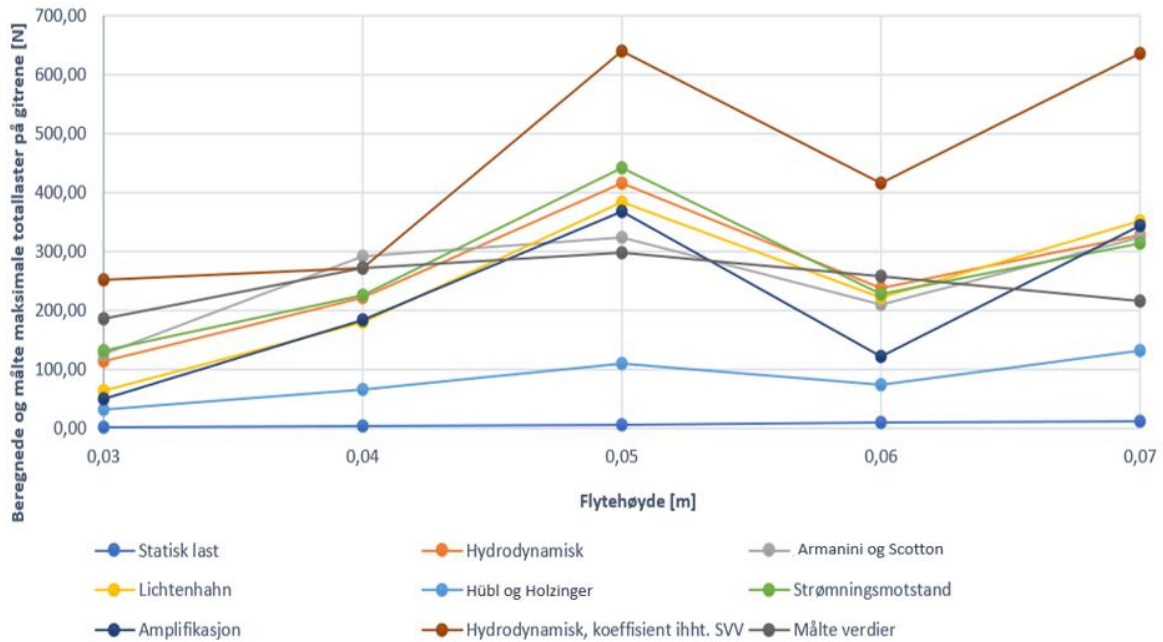
Foto av det som antas å være en representativ del av snømassene brukt i blandingen av sørpe for forsøk 8.

Vedlegg C

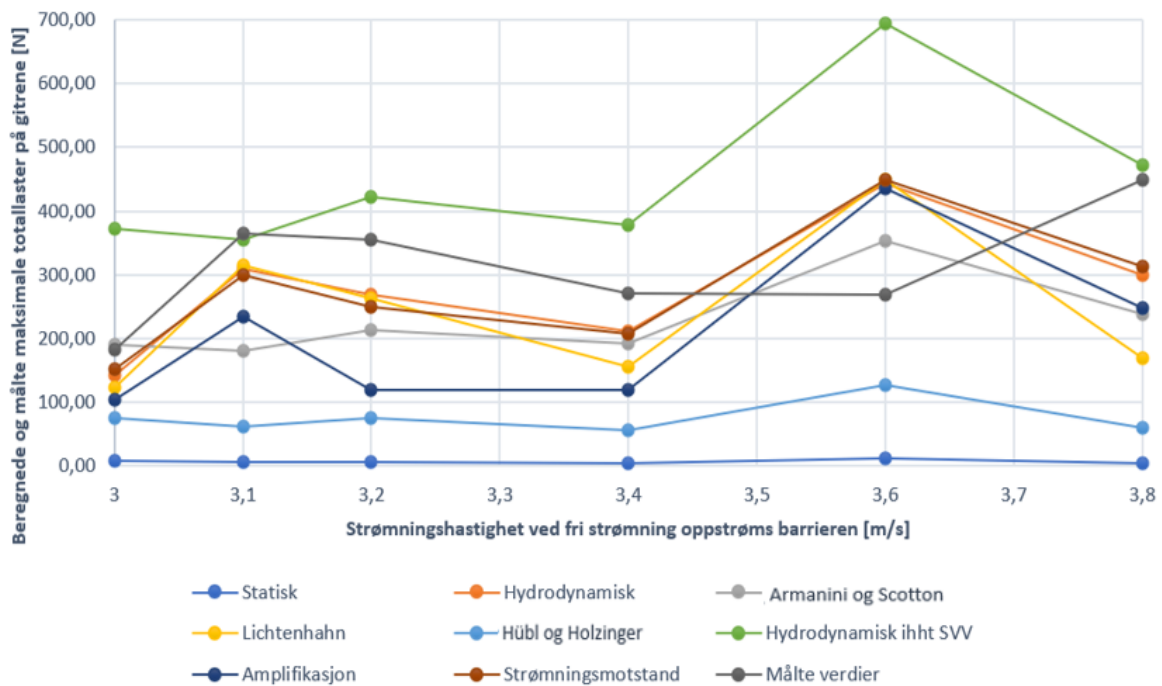
Designverdier for nettene i Vannledningsdalen, funnet i forbindelse med forprosjekteringen av sikringsløsningen. Nettnummereringen går fra øverst i dalen og ned mot utløpet i Longyeardalen, og plasseringen av hvert nett kan sees i figur 10. Tabellen er hentet fra Kronholm et al. (2021).

Nett	Pel (m)	Avstand fra forrige (m)	Snøhøyde (m)	Helning (°)	Hastighet av sørpeskred (m/s)	Flyte høyde av sørpeskred (m)	Høyde nett (m)
1	683	-	3	8,5	10	2	5
2	760	77	3	11	10	2	5
3	850	90	3	10	10	2	6
4	945	95	3	11	10	2	6
5	1035	90	3	11	10	2	6
6	1132	97	3	11	10	2	6
7	1215	83	3	12	12	2	6
8	1337	122	3	13	12	2	6
9	1430	93	4	12	12	2	7
10	1530	100	4	15	12	2	7
11	1608	78	4	17	13	2	7
12	1690	82	5	16	12	2	8
13	1770	80	5	14	12	2	8
14	1884	114	3	5	-	-	4

Vedlegg D



Beregnet og målt belastning på gitterbarrierene i forsøk 1-11, som en funksjon av flyte høyden til strømmingen oppstrøms barrieren. Der det har vært flere forsøk med samme flyte høyde, er gjennomsnittet av de beregnede belastningene i de involverte forsøkene brukt i grafen. Det har ikke lyktes å hente ut noen informasjon fra grafen som er relevant for drøftingen som gjort i oppgaven, men figuren er tatt med i tilfelle informasjonen kan brukes i annet henseende.



Beregnet og målt belastning på gitterbarrierene i forsøk 1-11, som en funksjon av hastigheten til strømmingen oppstrøms barrieren. Der det har vært flere forsøk med samme hastighetsmålinger, er gjennomsnittet av de beregnede belastningene i de involverte forsøkene brukt i grafen. Det har ikke lyktes å hente ut noen informasjon fra grafen som er relevant for drøftingen som gjort i oppgaven, men figuren er tatt med i tilfelle informasjonen kan brukes i annet henseende.

