

Tobias Kjelleevold Tveter

Trykkpåkjenning fra et sørpeskred og bruk av virtuelle felts metode til rekonstruering av trykk på plater

Pressure loading from slush flow and the use of virtual fields method for pressure reconstruction on plates

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Arne Aalberg

Medveileder: Haldis Døvre Kalland

Juni 2023



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Tobias Kjellevold Tveter

Trykkpåkjenning fra et sørpeskred og bruk av virtuelle felts metode til rekonstruering av trykk på plater

Pressure loading from slush flow and the use of virtual fields method for pressure reconstruction on plates

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Arne Aalberg
Medveileder: Haldis Døvle Kalland
Juni 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk



Kunnskap for en bedre verden



MASTEROPPGAVE 2023

FAGOMRÅDE: Konstruksjonsteknikk	DATO: 11. juni 2023	ANTALL SIDER: 96
------------------------------------	------------------------	---------------------

TITTEL:

Trykkpåkjenning fra et sørpeskred og bruk av virtuelle felts metode til rekonstruering av trykk på plater

Pressure loading from slush flow and the use of virtual fields method for pressure reconstruction plates

UTFØRT AV:

Tobias Kjellevold Tvetter



SAMMENDRAG:

Sørpeskred er store destruktive snøskred, som fort kan ødelegge det som måtte stå i veien. Både menneskeliv, infrastruktur og bygninger kan gå tapt dersom et sørpeskred skulle inntreffe. Informasjon om krefter involvert i disse skredene er derfor essensielt ved etablering av nye konstruksjoner og sikringstiltak i skredterreng. Det finnes begrenset forskning på området, og nedskalerte modeller kan gi verdifull informasjon om hvilke laster og trykk sørpeskred kan påføre.

I dag finnes det ingen universell metode å måle fordelt trykk på plater. Punktlaster kan måles ved lastceller, men disse gir ingen informasjon om hvordan trykket fordeler seg. Virtuelle felts metode er en metode som kan rekonstruere trykkfordeling og amplitude på plater, basert på overflatehelninger.

Rapporten kan derfor deles inn i to deler:

Del 1. Teorien rundt virtuelle felts metode blir forklart. I tillegg er det gjort et forsøk hvor virtuelle felts metode blir brukt til å rekonstruere et hydrostatisk trykk på en plate.

Del 2. Teori om sørpeskred, utløsning, sikring og krefter blir forklart. Det er også gjort et forsøk hvor et nedskalert sørpeskred blir sendt ned en renne og treffer en plate. Kraften på platen blir så målt ved lastceller.

Resultatene viser at virtuelle felts metode kan benyttes med en grei nøyaktighet til å bestemme hydrostatisk trykk på en plate. Samtidig anbefales det å videreutvikle metoden dersom den skal benyttes til å rekonstruere trykket på en plate i et sørpeskred. Forsøket med det nedskalerte sørpeskredet viser betydningene av konstruksjonens design for å dempe impulslaster. Lastene fra skredet sammenlignes med ulike beregningsmodeller, og resultatene viser viktigheten av å finne trykkfordelingen innad i skredet.

FAGLÆRER: Arne Aalberg

VEILEDER(E): Arne Aalberg, Haldis Døvre Kalland

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU

Denne masteroppgaven er utført ved institutt for konstruksjonsteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet (NTNU) i Trondheim våren 2023. Oppgaven er et avsluttende arbeid på studiet Bygg- og miljøteknikk med spesialisering innenfor konstruksjonsteknikk. Hensikten med oppgaven er å se på temaet sørpeskred og hvilke krefter som er involvert. Det er sett på teori, og gjort nedskalerte forsøk i laboratoriet. I tillegg er det sett på hvordan trykk måles på plater, derav en metode kalt for virtuelle felts metode. Oppgaven viser også muligheten til å benytte virtuelle felts metode på en plate utsatt for sørpeskred. Dette kan gi verdifull informasjon for hvordan trykket i et sørpeskred fordeler seg, og gjenstår som videre arbeid.

Jeg vil takke min veileder professor Arne Aalberg som har vært med å hente snø tidlig på morgenen, og gjort oppgaven mulig. Jeg vil også takke min medveileder Haldis Døvre Kalland som holder på med doktorgrad innenfor emnet. Du har kommet med gode innspill, og gav en god start med tips til litteratur. I tillegg vil jeg rette en takk til Rene Kaufmann som har vært til stor hjelp innenfor temaet virtuelle felts metode. En siste takk rettes til Paul, som har vært en trofast støttespiller gjennom 5 år her i Trondheim.

Sørpeskred er store destruktive snøskred, som fort kan ødelegge det som måtte stå i veien. Både menneskeliv, infrastruktur og bygninger kan gå tapt, dersom et sørpeskred skulle inntreffe. Informasjon om krefter involvert i disse skredene er derfor essensielt ved etablering av nye konstruksjoner og sikringstiltak i skredterreng. Det finnes begrenset forskning på området, og nedskalerte modeller kan gi verdifull informasjon om hvilke laster og trykk sørpeskred kan påføre.

I dag finnes det ingen universell metode å måle fordelt trykk på plater. Punktlaster kan måles ved lastceller, men disse gir ingen informasjon om hvordan trykket fordeler seg. Virtuelle felts metode er en metode som kan rekonstruere trykkfordeling og amplitude på plater, basert på overflatehelninger.

Rapporten kan derfor deles inn i to deler:

Del 1. Teorien rundt virtuelle felts metode blir forklart. I tillegg er det gjort et forsøk hvor virtuelle felts metode blir brukt til å rekonstruere et hydrostatisk trykk på en plate.

Del 2. Teori om sørpeskred, utløsning, sikring og krefter blir forklart. Det er også gjort et forsøk hvor et nedskalert sørpeskred blir sendt ned en renne og treffer en plate. Kraften på platen blir så målt ved lastceller.

Resultatene viser at virtuelle felts metode kan benyttes med en grei nøyaktighet til å bestemme hydrostatisk trykk på en plate. Samtidig anbefales det å videreutvikle metoden dersom den skal benyttes til å rekonstruere trykket på en plate i et sørpeskred. Forsøket med det nedskalerte sørpeskredet viser betydningene av konstruksjonens design for å dempe impulslaster. Lastene fra skredet sammenlignes med ulike beregningsmodeller, og resultatene viser viktigheten av å finne trykkfordelingen innad i skredet.

Slush flows are large destructive snow avalanches that often may destroy whatever in their path. Both human lives, infrastructure, and buildings can be lost if a slush avalanche occurs. Therefore, information about the forces involved in these avalanches is essential for the establishment of new constructions and safety measures in avalanche terrain. There is limited research in this area, and downscaled models can provide valuable information about the loads and pressures slush flows can exert.

Currently, there is no universal method to measure distributed pressure on plates. Point loads are measured using load cells, but they do not provide information about how the pressure is distributed. The virtual fields method is a technique that can reconstruct pressure distribution and amplitude on plates based on surface slope measurement.

The report can be divided into two parts:

Part 1: The theory behind the virtual fields method is explained. Additionally, an experiment is conducted where the virtual fields method is used to reconstruct hydrostatic pressure on a plate.

Part 2: Theory about slush flows, triggering, mitigation methods, and forces is explained. An experiment is also conducted where a downscaled slush flow is sent down a chute and impacts a plate. The force on the plate is then measured using load cells.

The results show that the virtual fields method can be used with reasonable accuracy to determine hydrostatic pressure on a plate. However, it is recommended to further develop the method if it is to be used to reconstruct the pressure on a plate in a slush flow. The experiment with the downscaled slush flow demonstrates the significance of the construction's design in reduce the impulse loads. The loads from the avalanche are compared with various calculation models, and the results emphasize the importance of finding the pressure distribution within the avalanche.

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Contents	vi
1 Introduksjon	1
2 Teori	3
2.1 Snøskred	3
2.1.1 Hva er et snøskred	3
2.1.2 Klassifisering av snøskred	3
2.1.3 Skredbane	4
2.1.4 Lagdeling i et skred	6
2.1.5 Snødekke og snøomvandling	6
2.2 Sørpeskred	8
2.2.1 Sørpe generelt	8
2.2.2 Utløsning av sørpeskred	9
2.2.3 Sørpeskred i bevegelse	11
2.2.4 Utløpet til et sørpeskred	11
2.2.5 Sikring mot sørpeskred	12
2.2.6 Forskning på sørpeskred	15
2.2.7 Nedskallering av løsmasser	18
2.3 Skreddynamikk	19
2.3.1 Skreddynamikk generelt	19
2.3.2 Beregningsmodeller	20
2.3.3 Skredhastighet	21
2.3.4 Utløpsdistanse	23
2.4 Krefter i et skred	24
2.4.1 Trykkfordeling på en konstruksjon	24
2.4.2 Statisk snøtrykk	27

2.4.3	Dynamiske beregningsmodeller for snøskred	28
2.4.4	Beregningsmodeller for flomskred	31
2.5	Plateteori	33
2.5.1	Platens differensialligning	33
2.5.2	Navier's plateløsning	34
2.6	Stålets flytegrense	34
2.7	Måleteknikk	36
2.7.1	Lastceller	36
2.7.2	Oppsett virtuelle felts metode	36
2.7.3	Virtuelle felts metode	37
2.8	Hydrostatisk trykk	40
3	Hydrostatisk vanntrykk mot plate og måleteknikk	41
3.1	Vanntrykk mot plate	41
3.1.1	Oppsett	41
3.1.2	Beregning av hydrostatisk trykk	42
3.1.3	Utbøyning av platen ved Naviers plateløsning	43
3.1.4	Modell i Abaqus	43
3.2	Resultat ved hydrostatisk trykk	45
3.2.1	Utbøyning av platen	45
3.2.2	Lastrekonstruering ved virtuelle felts metode	47
4	Skredforsøk i renne	49
4.1	Oppsett	49
4.2	Gjennomførelse av renneforsøk	53
4.3	Resultat fra renneforsøk med plate	57
4.3.1	Forsøk 1	57
4.3.2	Forsøk 2	57
4.3.3	Forsøk 3	58
4.3.4	Forsøk 4	59
4.3.5	Forsøk 5	61
4.3.6	Forsøk 6	62
4.3.7	Forsøk 7	62
4.3.8	Forsøk 8	63
4.4	Analyse av resultatene	65
4.4.1	Oppsummering	65
4.4.2	Beskrivelse av sørpens bevegelse	65
4.4.3	Filtrering av feilmålinger	67
4.4.4	Gjennomsnittsverdier og standardavvik	67
4.4.5	Trykkbelastninger fra beregningsmodeller	69
4.5	Resutlater fra utkrager i renne	73
5	Diskusjon	77
5.1	Rekonstruering av hydrostatisk trykk	77
5.2	Forsøk med renne	79
5.2.1	Usikkerheter	79
5.2.2	Kraft fra store legemer	79
5.2.3	Fordelt trykk fra vann i renne	82
5.2.4	Beregningsmodeller	82

5.2.5	Statisk snøtrykk	85
5.2.6	Forsøk med utkrager	86
6	Konklusjon	89
6.1	Videre arbeid	90
6.1.1	Målinger	90
6.1.2	Virtuelle felts metode	90
6.1.3	Abaqus-modell med relevante skredtrykk	90
	Kilder	93

KAPITTEL 1

Introduksjon

Norges beliggenhet og klima gjør landet utsatt for skred i mange former. Sørpeskred er en spesiell form for snøskred, som kan oppstå når snø er utsatt for betydelig vanntilførsel [1]. Med andre ord, er store deler av Norge utsatt for disse skredene. I et fremtidig klima, med varmere og våtere vintre, er det en mulighet at det kommer til å gå flere skred [2]. I tillegg vil det eksponeres nye områder, som ikke har vært utsatt for sørpeskred tidligere [3].

Sørpeskred forekommer naturlig, er vanskelig å forutsi og har et stort skadepotensial [4]. Både konstruksjoner, infrastruktur og menneskeliv er utsatt for sørpeskred. Denne type skred når ofte langt, selv ut på flate områder, som gjør at områder som normalt ikke anses som skredterreng er utsatt [3]. I Norge er det registrert flere dødsfall som følge av sørpeskred, og i 2012 omkom to personer da huset deres i balestrand ble tatt av sørpeskred [4]. Figur 1.1 viser de enorme kreftene som kan oppstå i et sørpeskred. Det har også blitt observert flodbølge etter at sørpeskred nådde ut i en fjord [5].



Figur 1.1: Før- og etterbilde viser de store ødeleggelsene av huset i balestrand. Foto: FJELL-ANGER WIDERØE/NRK, hentet fra [6].

Usikkerheten knyttet til utløsning av sørpeskred gjør det vanskelig å anskaffe data fra et naturlig fullskala skred. Kombinert med en mangelfull database, fører det til lite informasjon om sørpeskred [3, 7]. Det er derfor hensiktsmessig å gjennomføre laboratorieforsøk som kan gi verdifull informasjon om hvordan sørpeskred oppfører seg, og hvilke krefter det skal dimensjoneres mot.

Informasjon om krefter, og hvordan krefter påvirker konstruksjoner er essensielt ved design. Virtuelle felts metode er en metode som baserer seg på prinsippet om virtuelt arbeid, som kan rekonstruere trykkbelastninger på en plate basert på deflektometrimålinger [8]. Metoden åpner for å finne trykkfordeling på plater utsatt for ulike typer laster. Når det skal bygges konstruksjoner i skredterreng er det viktig med informasjon om belastning, slik at konstruksjoner kan dimensjoneres så bra som mulig.

Denne rapporten kan deles inn i to. En del som omhandler virtuelle felts metode, og en del om sørpeskred og skreddynamikk. Det blir gjennomgått teori, samt beskrivelse og analyse av to forsøk. Ved det første forsøket blir virtuelle felts metode brukt til å rekonstruere et hydrostatisk trykk. I forsøk to blir krefter fra et nedskalert sørpeskred målt i laboratoriet ved bruk av lastceller. Lastene blir videre analysert, og det blir sett på forskjellige aspekter av resultatene. Ideelt skulle virtuelle felts metode vært kombinert med sørpeskred, men grunnet tidshensyn ble ikke det gjort i denne omgang, og det gjenstår derfor som videre arbeid.

2.1 Snøskred

Dette kapitlet har som hensikt å gi en enkel oversikt over temaet snøskred. Det vil bli forklart viktige begreper innenfor området, hvordan snøskred kategoriseres og relevante prosesser med snø.

2.1.1 Hva er et snøskred

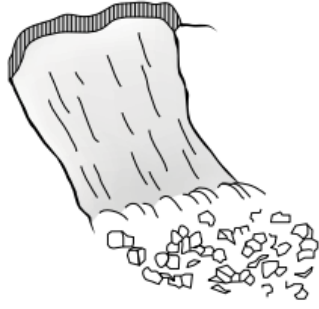
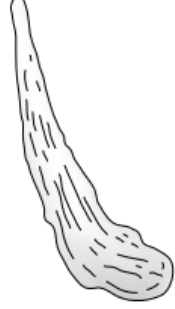

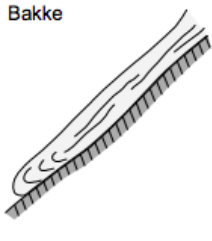

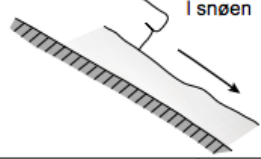
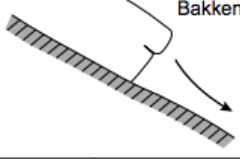
Snøskred er definert som en gravitasjonsdrevet strømning av snømasser som forflytter seg ned en fjellside [9]. Snøskred går under kategorien naturkatastrofer, og kan føre til store skader for mennesker og samfunn [10]. Utløsning av snøskred er et samspill mellom krefter som holder snøen på plass, og tyngdekraften som ønsker å føre snøen ned fjellsiden. Forenklet kan utløsning av snøskred skje på to måter:

1. Snødekke mister stabilitet.
2. Påkjenningen blir for stor.

2.1.2 Klassifisering av snøskred

Snøskred kommer i mange ulike former, og det kan derfor være hensiktsmessig å klassifisere de ulike skredtypene. Det finnes to hovedkategorier for snøskred, løssnøskred og flakskred [11]. Løssnøskred starter som en punktutløsning, og skredet brer seg utover ved at snøkornet drar med seg underliggende snø. Flakskred kategoriseres ved at en større del av snødekke, et flak, løser ut samtidig, og sklir nedover fjellsiden. Videre kan følgende underklassifiseringer benyttes:

- Bevegelse: Om skredet bevegelse er lokalisert ved bakken eller luften.
- Glideplan: Om skredets glideplan er i snødekke eller ved bakken.
- Vanninnhold: Om snøen er tørr, fuktig eller våt.

Utløsningsstype	Flakscred		Løs - cred	
				
Bevegelse	Luft	Bakke	Blandet	
				
Gildeplan	I snøen		Bakken	
				
Vann - innhold	Tørt	Fuktig	Vått	

Figur 2.1: Klassifisering av skredtyper. Hentet fra [11].

Figur 2.1 viser en skisse av klassifiseringen.

En annen form for snøskred er sørpeskred. Sørpeskred oppfører seg litt annerledes en de andre type snøskredene, og har på mange måter flere likheter med flømskred [2]. Beskrivelse og klassifisering av sørpeskred vil bli gjennomgått i kapittel 2.2.

2.1.3 Skredbane

En skredbane er et område som er utsatt for skred [12]. Området kan også bli kalt for skredterreng, og inkluderer område hvor skredet løses ut (utløsningsområde), beveger seg (skredløp) og stopper opp (utløpsområde) [13]. Den vertikale avstanden et skred beveger seg varierer stort, og kan variere alt fra et mindre heng på under 50 m, til en hel fjellside på over 2000 m [14]. For flaksred kan det være enkelt å se toppen av løsneområde, mens skille mellom løsneområde og skredløp er ikke alltid like lett og definere. Figur 2.2 viser hele skredbanen fra utløsningsområdet i topp, skredløpet i midten og utløpsområdet i bunn.

2.1.3.1 Utløsningsområde

Utløsningsområde er området hvor et skred løses ut [13]. Terrengets bratthet er den viktigste faktoren til løsneområdet [12]. Fjellsider med terreng over 30° defineres som utløsningsområder [13]. Unntaksvis når det har vært svært ustabile forhold har det også vært registrert skred som har løst ut ned mot 28° [13]. De fleste store snøskred løses ut når terrenget har



Figur 2.2: Skredbane med utløsningsområde, skredløp og utløpsområde. Foto NGI, hentet fra [13].

en helning mellom $35 - 45^\circ$ [14]. Når terrenget er brattere enn 55° går det ofte mindre skred rett etter et snøfall, og det går derfor sjeldent store skred ved disse helningene.

I tillegg til bratthet, er det andre faktorer som spiller inn på hvor lett et skred løses ut. Eksempelvis er områder med mye snø mer utsatt for snøskred [14]. Områder som ligger i le for vinden kan fort få stor opphopning av snø, og dermed øker sannsynligheten for skred betydelig. Vind vil også bidra til lagdeling av snøen, som blir forklart i kapittel 2.1.5. To andre viktige faktorer er solinnstråling og temperatur [14].

2.1.3.2 Skredløp

Skredløpet er området mellom utløsningsområde og utløpsområde [12]. Hovedsakelig vil skredet transporteres gjennom skredløpet, men det kan også dra med seg nye materialeer gjennom erosjon [2]. Vanligvis har skredet sin største hastighet i skredløpet, og store ødeleggelser kan forventes dersom noe står i veien for skredet. I skredbaner hvor det ofte går snøskred vokser det ikke skog [13]. Ettersom skred er gravitasjonsdrevne masser vil skredløpet ofte følge forsenkninger eller bekkeløp [13]. Store skred har ofte store skredløp, mens ved små skred er skredløpet en glidende overgang mellom utløsningsområde og utløpsområde [14].

2.1.3.3 Utløpsområde

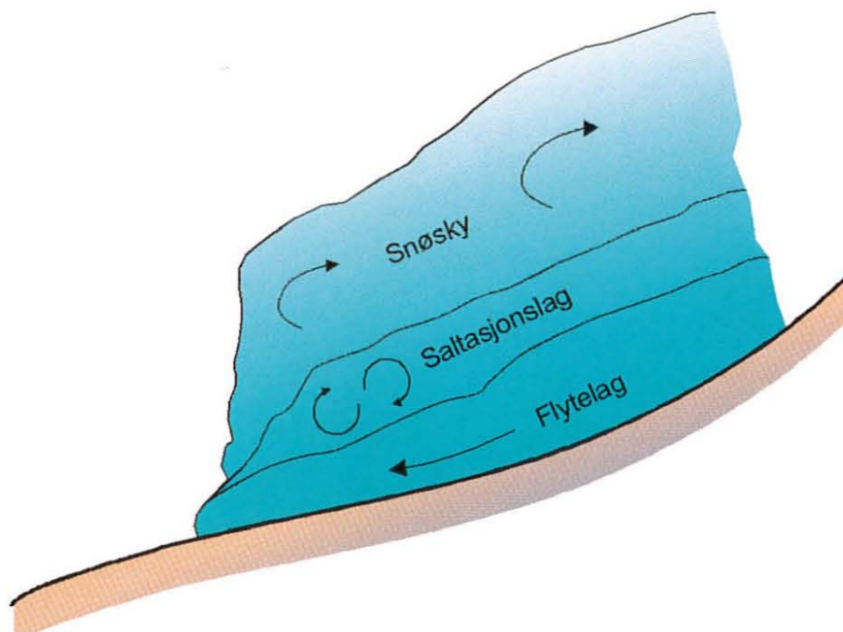
Utløpsområde er området hvor skredet bremses og stopper [13]. Som nevnt vil mange skredløp være bekkedaler eller forsenkninger, og utløpsområdene vil følge disse forsenkningene. Oppbremsingen starter som regel når terrenghelningen er under 25° , og øker betraktelig

under 10° [13]. For store skred kan utløpsområdet bli store, og enkelte skred kan gå flere hundre meter ut på flat mark før det stopper opp [13].

Ofte kan avsetninger fra et snøskred bli funnet i utløpsområde [13]. Dette kan være grus, stein eller vegetasjon. Spesielt våte skred har en stor eroderende effekt på underlaget og derav store avsetninger [2].

2.1.4 Lagdeling i et skred

Observasjoner av store skred viser at et skred ofte består av flere lag [13]. Det nederste laget kan kalles for kjernen, eller flytelaget i skredet. Ispartiklene i kjernen glir hovedsakelig nedover i skredets plan. Saltasjonslaget ligger over kjernen. Her har partiklene en hoppende bevegelse, og det er større plass mellom partiklene. For tørre skred dannes det også en snøsky. Snøskya brer seg ofte ut, og er svært synlig på avstand. Figur 2.3 viser inndelingen av disse lagene.



Figur 2.3: Skisse av lagdelingen innad i et snøskred. Hentet fra [13].

2.1.5 Snødekke og snøomvandling

Snøkrystallene er i konstant endring fra de blir laget i atmosfæren til de smelter bort ved høye temperaturer nede på jorden [13]. Dersom det er kaldt, vindstille og det snør, kommer snøkrystallene ned som sekskantede stjerner dersom atmosfæriske forhold tillater det [13]. Når snøkrystallet treffer bakken er det flere fysiske prosesser som starter samtidig, og som endrer egenskapene til snøkrystallene.

2.1.5.1 Snødekke

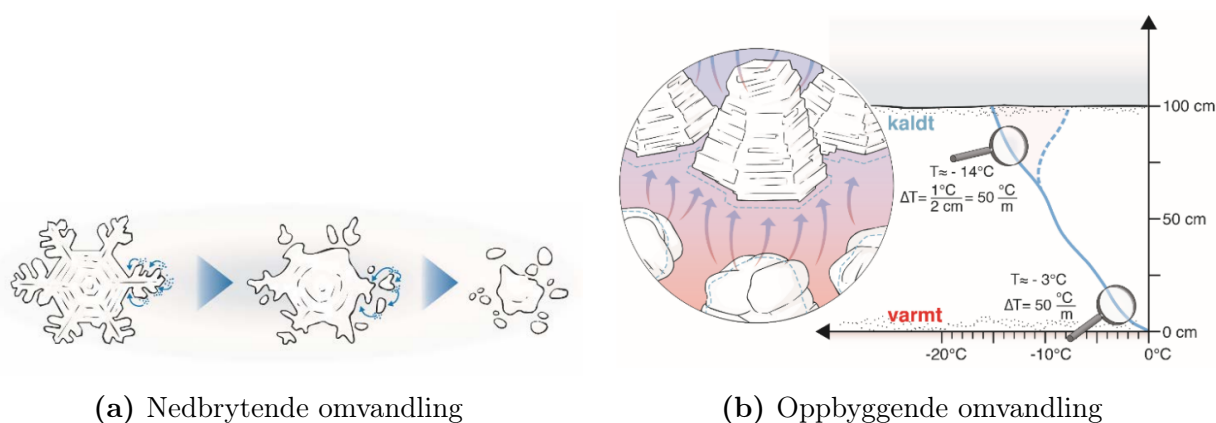
Snødekket beskriver mengden snø og egenskapene til snøen som er på bakken. Det bygges opp lagvis, og et snølag er et horisontalt lag i snødekke av lik kornform [15]. Hver gang det snør dannes det minst ett nytt lag. Sammensetningen av de forskjellige lagene, og deres

egenskaper definerer sannsynlighet for at det kan løsne snøskred. Lett nysnø som kommer ned når det er kaldt, uten påvirkning av vind, kan inneholde opp mot 99% luft og kun 1% is [13]. Disse snøkrystallene kan ha en tetthet ned mot 10 kg/m^3 . Som regel antas tettheten til nysnø å være rundt 100 kg/m^3 , mens eldre snø på bakken kan ofte ha høyere tetthet [13].

2.1.5.2 Snøomvandling

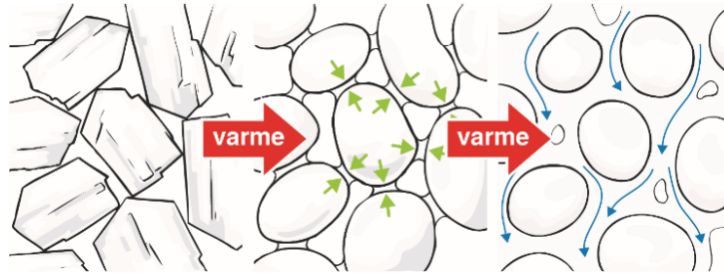
Nedbrytende omvandling skjer ved at vannmolekylene i snøkrystallene omstrukturerer seg for å få et best mulig forhold mellom overflate og volum [15]. Vannmolekylene beveger seg da fra konvekse former på snøkrystallet hvor det er stort trykk mot konkave former hvor det er lavere trykk. Dette fører til at snøkrystallene blir avrundet. Navnet nedbrytende omvandling kommer ettersom store krystaller brytes ned for å få minst mulig overflate. Nedbrytende omvandling fører til avrundede korn som har flere bindinger per volum, og derav større stabilitet. Figur 2.4a viser hvordan vannmolekylene beveger seg fra konvekse formasjoner mot konkave formasjoner.

Oppbyggende omvandling skjer ved at vannmolekyler beveger seg som følge av en trykk-gradient fra områder med høyt vanndamptrykk, og avsettes på områder med lavt vanndamptrykk [15]. Trykkforskjellen kommer som regel fra stor temperaturvariasjon over kort avstand. Det høyeste vanndamptrykket finnes der det er høyest temperatur. Vannmolekylene deponeres på bunnen av overliggende snøkrystaller, noe som over tid vil føre til at snøkrystallene får rette flater og skarpe kanter på undersiden, og bli avrundet på oversiden. En konsekvens av oppbyggende omvandling er at antall kontaktpunkter forsvinner, og snølaget mister stabilitet. Kantkorn og begerkrystaller er eksempler på slike snøkrystaller. Figur 2.4b viser hvordan vanndamp beveger seg fra bakken hvor det er høyere temperaturer og avsettes på bunnen av krystaller med lavere temperaturer.



Figur 2.4: Omvandlingsprosesser. Figur: Georg Sojer, hentet fra [15]

Smelteomvandling skjer når temperaturen er over 0°C [15]. Snø går da over til vann som legger seg som en film rundt snøkrystallene som følge av kohesjon. Etterhvert som vannmengden øker fylles porerommet mellom snøkrystallene opp. Når det er nok vann tilgjengelig vil tyngdekraften overgå kohesjonen, og vannmolekylene begynner å renne nedover i snødekket. Dette gjør at bindingene mellom snøkrystallene forsvinner. Figur 2.5 viser prosessene ved smelteomvandling.



Figur 2.5: Prosessen i en melteomvandling. Figur: Georg Sojer, hentet fra [15]

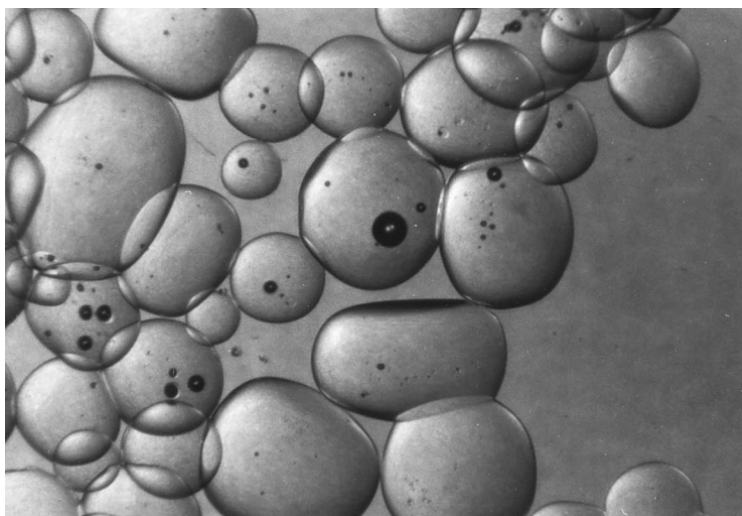
2.2 Sørpeskred

Sørpe er definert som snø med et vanninnhold høyere enn 15 prosent [2, 3]. Grunnet det høye vanninnholdet vil sørpeskred ofte ha flere likhetstrekk med flomskred enn ordinære snøskred [2]. Sørpeskred kan være svært skadelig på grunn av høy tetthet, stor hastighet og lange utløp [3].

2.2.1 Sørpe generelt

2.2.1.1 Definisjon av sørpe

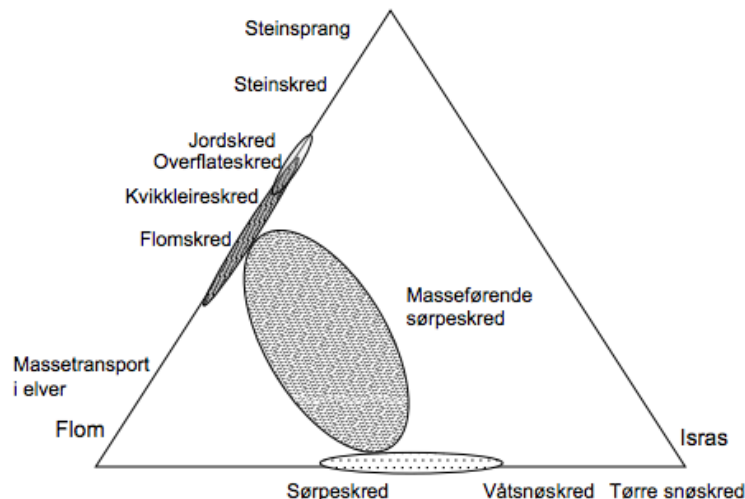
Sørpe er snø med et høyt vanninnhold, som gjerne har vært gjennom en rask smelteomvandling, forklart i kapittel 2.1.5.2. Dette gir et så høyt vanninnhold at det flyter fritt vann mellom snøpartiklene [2]. Snøkrystallene har derfor ingen bindinger seg i mellom, og det er ingen kohesjon i sørpeblandingen [3]. Figur 2.6 viser hvordan sørpe er avrundede krystaller som tilnærmet flyter rundt i vannet. Det høye vanninnholdet fører til en høy tetthet, og sørpe kan ofte ha en tetthet på 800 kg/m^3 eller mer [3]. Mangelen på bindinger mellom snøkrystallene gjør at sørpe er svært ustabil, og det kan derfor gå sørpeskred ved svært lave helninger [16].



Figur 2.6: Sørpeblanding sett med mikroskop. Foto: Colbeck, hentet fra: [16]

2.2.1.2 Klassifisering av sørpeskred

Kapittel 2.1.2 gjennomgår en klassifisering av snøskred. En annen måte å klassifisere skred er ut ifra skredmassenes innhold av snø, vann og stein [2]. Figur 2.7 viser hvordan sørpeskred plasserer seg midt mellom tørt snøskred og flomskred.



Figur 2.7: Klassifisering av skred ut fra innhold av snø, vann og stein. Hentet fra [2].

Det viser seg at andelen vann har mye å si for bevegelsesmønsteret til et skred [2]. Dersom skredet kun består av vann er det de hydrodynamiske lovene som gjelder. Dersom det er et rent snøskred er det samspillet mellom partikler, også kalt granulær dynamikk, som bestemmer skredbevegelsene. De fleste skred har variasjon i massene, og en kombinasjon av lovene vil derfor bestemme skredbevegelsen.

2.2.2 Utløsning av sørpeskred

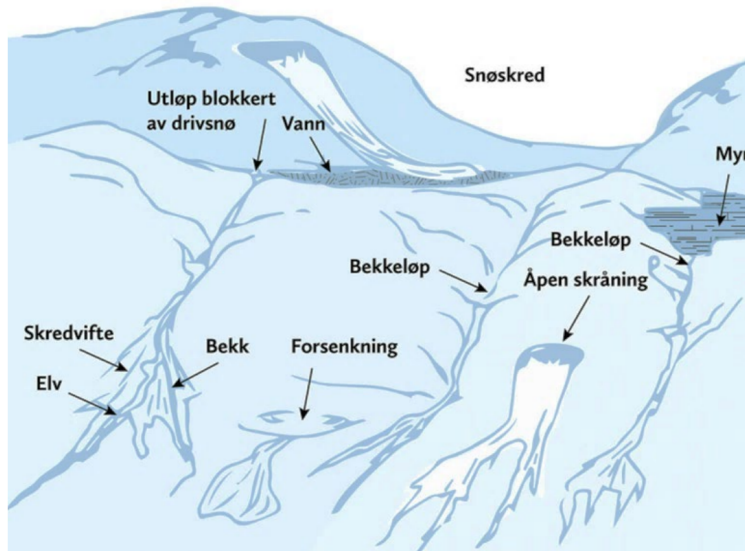
Utløsning av sørpeskred er et komplekst samspill mellom snø, vann, vær og terreng [3]. Generelt kan det sies at skredet utløses når gravitasjonskomponenten langs bakken blir større enn friksjonen mot underlaget og strekkstyrken til snødekke [5]. Sørpeskred kan forekomme over hele verden hvor det er sesongmessig snødekke, men på grunn av klimatiske forhold er de mest vanlige på den nordlige halvkule [3, 14]. En viktig forutsetning for at et sørpeskred skal kunne utløses er at tilsiget av vann er større enn dreneringen [1]. Aller helst skal poretrykket være større enn det hydrostatiske trykket, slik at det frie vannet løfter hele snødekket [2]. Været er en av de sterkeste pådriverene for å utløse sørpeskred. Hovedsakelig er det to vær-situasjoner som fører til sørpeskred [2]:

1. Nedbør som regn.
2. Kraftig snøsmelting, ofte i kombinasjon med regn.

Kritisk mengde tilsig av vann, enten som nedbør eller snøsmelting, er 50 mm/døgn. Kystnære områder er ofte utsatt for kraftig nedbør midtvinters, mens fjellsider i arktiske strøk vendt mot sør er mest utsatt for intens snøsmelting om våren [2, 5].

En annen viktig bidragsyter til utløsning av sørpeskred er terrenget. Sørpeskred løses ofte ut i terreng som har mulighet til å samle opp store mengder med vann [1]. Eksempler på slike områder kan være tette drensløp, forsenkninger i terrenget eller bratte konkave formasjoner.

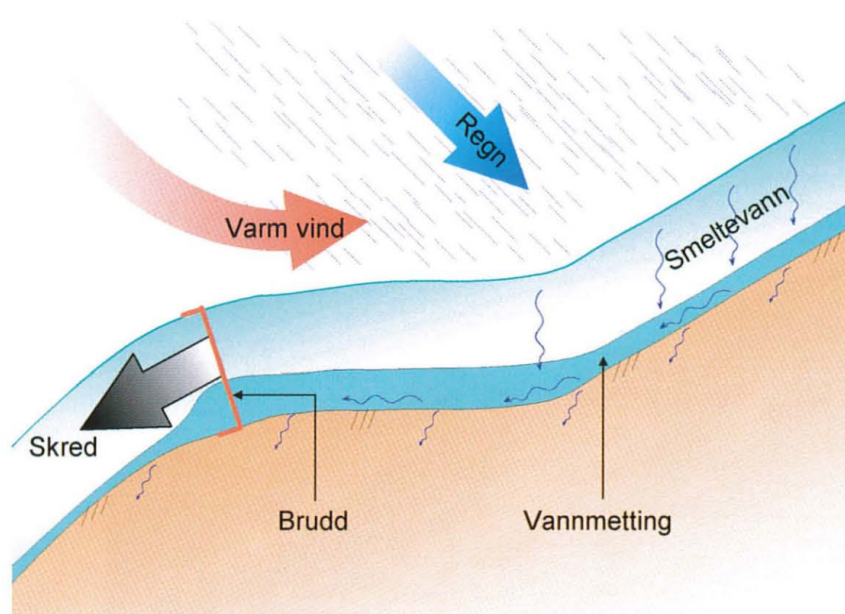
Ofte kan avsetninger fra tidligere snøskred i en bekkedal lage en naturlig dam, som fører til stor oppsamling av vann [1]. Når vanntrykket overgår kapasiteten til dammen, kan det løse ut sørpeskred. Menneskelig aktivitet kan også føre til sørpeskred, da ofte via å fylle igjen naturlige drenasjer [2]. Grunnforhold som svaberg, frossen jord og is hindrer vannet i å drenere, og øker dermed sannsynligheten for sørpeskred [1]. Vind fører også til en stor snøsmelting. Fjellsider vendt mot vinden har derfor en større sannsynlighet for sørpeskred [13]. Figur 2.8 viser terrengformasjoner som er mest utsatt for sørpeskred.



Figur 2.8: Terrengformasjoner utsatt for sørpeskred. Hentet fra [3]

Et snødekke som består av nysnø og grovkornet snø har størst sannsynlighet for å løse ut sørpeskred [1]. Felles for disse snøtypene er at det er få bindinger mellom snøkrystallene, og vannet må derfor ikke bryte ned mange bindinger før stabiliteten er lav [3]. Grovkornet snø med kantkorn eller begerkrystaller som et svakt lag kan føre til store sørpeskred. Et sørpeskred som løses ut under disse forholdene har en tendens til å spre seg ut på sin vei nedover skredløpet. Oppbygging av begerkrystaller er forklart i kapittel 2.1.5.2, og krever lengre perioder med kaldt og pent vær [3]. Sørpeskred i nysnø skjer når det kommer nedbør som snø etterfulgt av kraftig regn [3]. Et snødekke bestående av skare eller islag har svært sterke bindinger, og er lite utsatt for sørpe- og snøskred [1, 15]. Snødekke må helst ha en minimum tykkelse på 0,5 – 1 meter for at snødekket ikke skal smelte bort før skredet går [2]. De fleste sørpeskredene løses ut når snødekke er tynt, altså i starten av vinteren [5]. Ettersom det da er lite snø blir ikke disse skredene store i størrelse, men selv små sørpeskred kan ha et stort skadepotensiale. Sørpeskred har en tendens til å løses ut nede ved bakken [5]. Figur 2.9 viser prinsippene rundt utløsning av et sørpeskred.

Grunnet lav fasthet i sørpeblandingen kan sørpeskred utløses ved terrenghelninger mellom 5° – 40° [14]. Det er derfor ekstremt mange potensielle utløsningsområder for sørpeskred, så lenge snødekke har høyt nok vanninnhold. Vegetasjon kan ha en stabiliserende effekt mot sørpeskred ved at vegetasjonen fører til mindre solinnstråling, og dermed mindre tilsig av vann i form av smelting [3]. Det fører også til mindre snø på bakken, som igjen kan begrense sannsynligheten for sørpeskred. Vegetasjonen har derimot ingen effekt dersom snødekket allerede har blitt omvandlet til sørpe.



Figur 2.9: Prinsippskisse for utløsning av et sørpeskred. Hentet fra [13].

2.2.3 Sørpeskred i bevegelse

Ettersom sørpeskred er gravitasjonsrevne masser, følger de ofte eksisterende dreneringsveier eller forsenkninger i terrenget [2]. Grunnet det store vanninnholdet kan et sørpeskred se ut som et flomskred. Figur 2.10 viser et sørpeskred på vei ned en fjellside. Flom- og sørpeskred i bevegelse kan ha en sterk eroderende effekt på underlaget [2]. Spesielt sørpeskred som løses ut i bratte bekkedaler kan rive med seg store masser. Skredmassene blir da en blanding av snø, vann, løsmasser og organisk materiale.

Siden snøpartiklene er lettere enn vann, vil disse stige opp i skredmassen, og vannet legger seg på bunnen av skredet [2]. Dette fører til et såkalt vannsjikt nede ved bakken som har lavere viskositet enn resten av skredmassene. Vannsjiktet fører til at sørpeskred kan få høye hastigheter sammenlignet med flomskred. Hastigheter opp mot 30 m/s har vært registrert i bratt terreng, men de fleste sørpeskredene går under 10 m/s [2].

2.2.4 Utløpet til et sørpeskred

Dersom et sørpeskred følger et kanalisert løp, kan det nå langt ut på flate områder [2]. Det er normalt at sørpeskred med frie utløp kan nå ut til helninger under 5° . Ofte stopper det ikke før det eventuelt når ut til hovedvassdrag, vann eller fjorder. I 1994 ble det i Sogn registrert en flodbølge som følge av et stort sørpeskred som gikk ut i fjorden [5]. Grunnen til de lange utløpene er det høye vanninnholdet, og desto høyere vanninnhold desto lengre utløp [13]. Vannsjiktet er med på å gi lange utløp [2].

På grunn av sørpens eroderende effekt vil avsetningene etter et sørpeskred ofte bestå av snø, vann, is, løsmasser og organiske materialer [2, 3, 14]. Dette gjør at avsetningene ser skitne ut, og det er enkelt å skille dem fra ordinære snøskred [5]. Massene avsettes ved at grovmassene blir lagt igjen først, og de fineste massene når lengst [2]. Etter at snø og is har smeltet bort fra avsetningene, vil det være vanskelig å skille avsetningene fra et sørpeskred, og et flomskred [3].



Figur 2.10: Sørpeskred i bevegelse. Foto: L. Fontain, hentet fra [17]

2.2.5 Sikring mot sørpeskred

Når et område skal sikres mot skred er det mange faktorer å ta hensyn til. Det kan være konsekvenser av skred, hyppighet av skred, kostnad for sikring, potensielle ødeleggelse, ødeleggelse av natur, og mer. Sørpeskred har ofte høy returperiode som gjør at sikring mot det ofte blir nedprioritert. På en annen side gir sørpeskred ofte store ødeleggelse, og konsekvensene kan bli store [2]. Sikringstiltak mot sørpeskred kan prinsipielt deles inn i 3 grupper, arealplanlegging, varsling og fysiske sikringer [3].

2.2.5.1 Arealplanlegging og varsling

Arealplanlegging kan skje ved å kartlegge terreng som er utsatt for sørpeskred [3]. Historiske hendelser er viktig for slik kartlegging. Dersom området er utsatt for sørpeskred kan sikring ved hjelp av arealplan skje ved å unngå å plassere bebyggelse og infrastruktur i disse områdene. Varsling ved akutt skredfare kan gi mulighet for å evakuere utsatte områder, eller stenge veier og jernbane [3]. Varslingen skjer på bakgrunn av observert vær, værprognoser og informasjon om snødekke [7]. I Norge varsler Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) om faren for sørpeskred på regionalt nivå.

2.2.5.2 Fysisk sikring

Fysiske sikringstiltak mot sørpeskred vil være å fysisk endre dreneringsforhold, vegetasjon, hydrologiske forhold og terreng for å påvirke utløsning, bevegelse og utløp av sørpeskred [2, 3]. Mange av sikringstiltakene mot sørpeskred gjelder også for flomskred, med ulike materialer [3]. Prinsipielt skilles fysiske sikringer utifra hvor de er plassert i skredløpet. Generelt er det mer vanlig og billigere å sikre i utløpsområde, da dette gir enklere tilkomst enn utløsningsområde [2]. Ofte benyttes det en kombinasjon av flere løsninger [9].

Sikring i utløsningsområdet kan skje ved å redusere tilsiget av vann eller endre dreneringen av snødekke [2]. Dette har som formål å redusere sannsynligheten for at sørpeskred skal løses ut.

Sikring i skredløpet har som formål å minke skredets volum, øke energitapet eller prøve å kontrollere skredets bane [2]. For å minimere skredets volum, og derav minke potensielle ødeleggelser, kan wirenett benyttes [3]. Disse nettene kan også øke energitapet langs skredbanen, og flere nett kan plasseres etter hverandre for å øke effektiviteten [2, 18]. Ved å kanalisere skredløpet er det mulig å forhindre at skredet brer seg ut mot områder med stort skadepotensial. Overbygg er en metode som er mye brukt på vei- og jernbanestrekninger [3]. Dette er en kostbar metode, men gir tilnærmet full sikkerhet mot skred [13]. Figur 2.11 viser bilde av wirenett og overbygg.



(a) Wirenett, Foto: Geobrudd, hentet fra [3].



(b) Overbygg, Foto: NGI, hentet fra [13].

Figur 2.11: Sikringsmetoder i skredløpet.

Sikringer i utløpsområde vil prøve å stoppe skredet eller føre skredet til områder hvor skadepotensialet er lite [2, 3, 9]. Her skiller det mellom konstruksjoner som skal endre banen til skredet, stoppe skredet, og konstruksjoner som omgår skredet [9]. Ledevoller har som hensikt å endre banen til skredet slik at skredet ikke når til steder hvor det kan gjøre stor skade [2, 13]. I motsetning til ledevoller har en fangvoll formål å stoppe skredet [9, 19]. Wirenett kan også plasseres i utløpsområdet. Bruer er en måte å omgå skredløpet [9]. Det finnes flere eksempler på at bruer har blitt ødelagt av sørpeskred, og det er derfor viktig å legge lysåpningen over skredløpet/utløpsområdet eller dimensjonere brusøylene mot aktuelle krefter [2]. Figur 2.12 viser eksempel på en ledevoll og en fangvoll.



(a) Ledevoll, Foto: NGI, hentet fra [13]



(b) Fangvoll, Foto: NGI, hentet fra [13]

Figur 2.12: Sikringsmetoder i utløpsområde.

2.2.5.3 Fangvoller og wirenett

Ved bestemmelse av sikringskonstruksjon er det en stor forskjell mellom hvordan fleksible og rigide konstruksjoner tar opp krefter.

Fangvoller er en type rigide konstruksjoner [19]. Konstruksjonen plasseres slik at fangvollens lengdeakse står vinkelrett på skredets retning. På den måten stoppes skredet, uten at skredmassene blir ført til siden, som ved ledevoller. Høyden på fangvollen er en av de viktigste egenskapene, og høyden må være stor nok til å ta opp skredets kinetiske energi [13]. Den kinetiske energien, gitt som E_k , går ved sammenstøtet med fangvollen over til potensiell energi, gitt ved E_p :

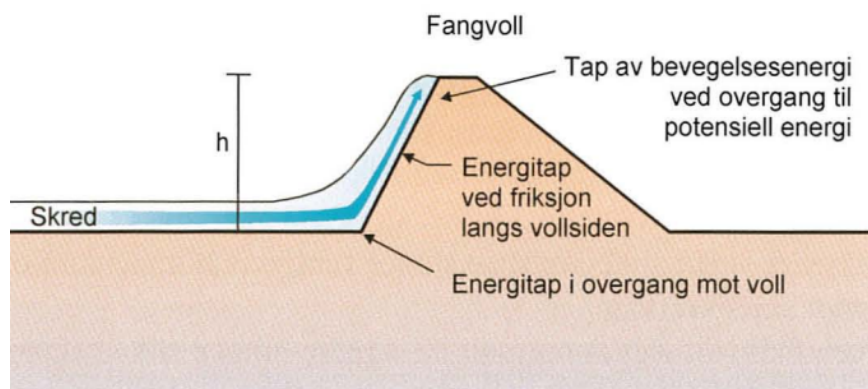
$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = E_p = mgh \quad (2.1)$$

Hvor m er skredmassen, v er skredhastigheten, g er gravitasjonskonstanten og h er klatrehøyde. Løst for høyden h , gir det:

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad \text{m} \quad (2.2)$$

Ettersom høyden h er proporsjonal med kvadratet av hastigheten, er det veldig viktig å plassere vollen hvor hastigheten er lav. Det bør også tas hensyn til snø som allerede ligger på bakken, samt skredets flyte høyde. I tillegg vil snøen ha energitap mot fangvollen, og en fangvoll plassert i et bratt terreng kombinert med våt snø fører til størst energitap [13]. Ofte benyttes det derfor en nødvendig damhøyde $H = v^2/(2g\lambda)$, hvor λ er en empirisk faktor som tar hensyn til energitap. Figur 2.13 viser en skisse av hvordan en fangvoll ser ut.

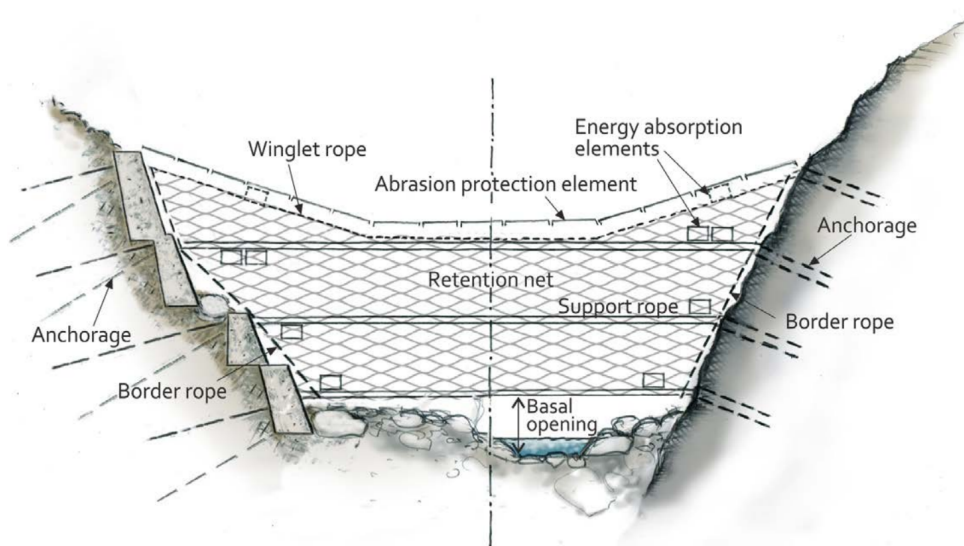
Fangvoller kan lages av ulike materialer, blant annet betong, stål eller løsmasser [19]. Dersom fangvollen er laget av løsmasser, blir ofte konstruksjonen så stor at kapasiteten er mer enn stor nok. For fangvoller av betong eller stål må vollen dimensjoneres mot aktuelle skredkrefter. I tillegg til kraften fra et sørpeskred, kan det oppstå ekstremt høye impulslaser fra større legemer som steiner, trær osv. [19]. Disse kreftene kan skape store ødeleggelser på rigide konstruksjoner dersom lasten ikke blir dempet av et beskyttelseslag eller et allerede liggende snødekke [19]. Fangvoller kan fort bli veldig dyre dersom det trengs en stor høyde [13]. I tillegg krever de ofte et stort areal og store maskiner, og kan være omfattende å bygge [18].



Figur 2.13: Skisse av en fangvoll, og energitalp. Hentet fra [13].

Wirenett designes som fleksible konstruksjoner, som skal ta imot og fange skredmasser [18]. En skisse av et wirenett er vist i figur 2.14. Nettet burde ha en gitteråpning som tilsvarer kornstørrelse d_{90} , som vil si at 90% av partiklene har mindre kornstørrelse enn gitteråpningen

[20]. Dette fører til at mindre partikler og ikke minst vann slipper gjennom. Support kablene overfører kreftene fra nettet til ankerene, og er jevnt fordelt over nettets høyde [20]. I tillegg til fleksibilitet i selve nettet, er det festet bremseelementer (energy absorption elements) [18]. Disse elementene har stor plastisk kapasitet, og kan deformeres mye. Summen av alle disse elementene gjør wirenett veldig fleksible, og er derfor svært gode til å ta imot impulslaste fra steiner og andre legemer [18].



Figur 2.14: Skisse av et wirenett. Hentet fra [18].

Fordeler og ulemper med wirenett og fangvoller. Wirenett er fleksible konstruksjoner og er derfor ikke like påvirket av dynamiske laster som fangvoller [18]. Dette fører til en redusert topplast, som ofte blir dimensjonerende for fangvoller bygget av betong eller stål [19]. Kostnadene til wirenett antas som mindre sammenlignet med fangvoller [18]. Vedlikeholdsbehovet til wirenett avhenger i stor grad av skredmassene den fanger opp, mens fangvoller har som regel mindre behov for vedlikehold. Fangvoller er en mer etablert teknikk, og det finnes flere standard oppsett på hvordan det skal bygges [19]. Wirenett er en nyere teknologi, og krever derfor mer planlegging [18].

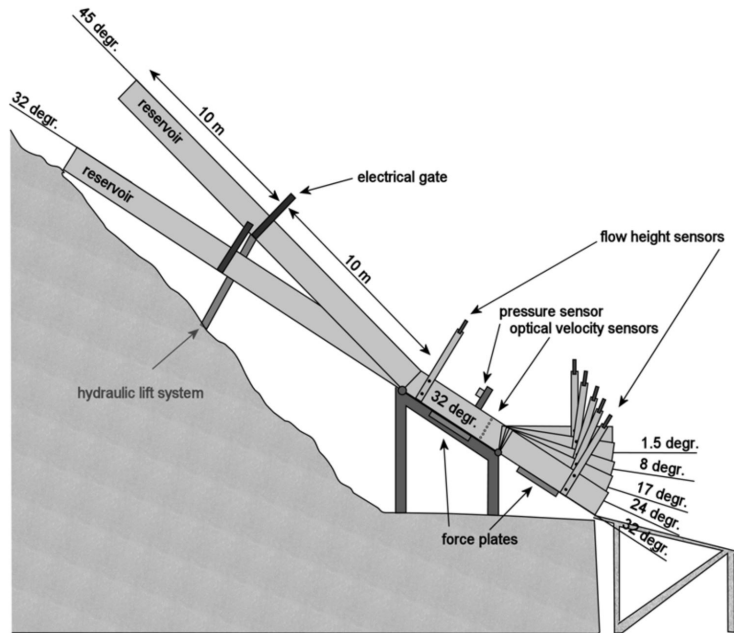
2.2.6 Forskning på sørpeskred

Det er begrenset med litteratur å finne om temaet sørpeskred, derav dynamikken til sørpeskred [3]. Blant annet er det et manglende datagrunnlag, og i den nasjonale skredtabasen blir mange sørpeskred klassifisert som snøskred [3]. I tillegg opptrer sørpeskred relativt sjeldent, noe som gjør det vanskelig å få tak i relevant data fra et fullskala skred mens det pågår [2]. Det finnes enkelte nedskalerte tester hvor skredmasser har blitt sendt ned en renne, og ulike instrumenter måler eksempelvis hastighet og trykkvirkninger [21]. Utenom dette er mye av kunnskapen basert på analysering og tilbakeregning av kartlagte skred [2]. Under blir to tidlige eksperimenter forklart nærmere.

2.2.6.1 Chute experiments on slushflow dynamics

I 2005 ble det gjort flere forsøk hvor $10 - 15 \text{ m}^3$ sørpe ble sendt ned en 30 m lang og $2,5 \text{ m}$ bred renne [21]. Forsøket ble gjennomført ved lokalene til Swiss Federal Institute of Snow and Avalanche Research (SLF) ved Davos i Sveits. Hensikten med forsøket var å

teste instrumenter som ble brukt til å måle hastighetsprofiler, støtkrefter, basal- og normal spenninger, samt flyte høyde. Målingene gjorde det mulig å beregne dragkoeffisienten mot en søyle som stod i bunnen av rennen. Rennen hadde en helling på 32°. Figur 2.15 viser forsøksoppsett.



Figur 2.15: Testrenne i Davos. Hentet fra [21]

Forsøkene ble delt inn i tre grupper, utfra formålet med forsøket [21]. De ulike grupperingene benyttet seg derfor av ulike instrumenter. Hensikten ved forsøkene var å undersøke:

1. Hastighetsprofiler.
2. Basal normal- og skjærspenninger.
3. Støtrefter på en hindring.

Ved å gjøre samme forsøk på tørr snø og sørpe, ble det blant annet funnet ut at hastigheten til sørpe var høyere enn tørr snø [21]. Det var også knyttet større usikkerhet til målingene av hastigheten til sørpe sammenlignet med tørr snø grunnet de optiske egenskapene til sørpe som fører til utydelige signaler. Det konkluderes derfor med at infrarøde LED-sensorer, som ble benyttet, ikke er egnet for sørpeskred. Flere optiske hastighetssensorer over flyte høyden gjorde det mulig å estimere hastighetsprofilen i skredet.

Basale normal- og skjærspenninger ble målt to steder i renna, hvor det i figur 2.15 er referert til "force plates" [21]. Hovedresultatet er at normalspenningene er omtrent to til tre ganger større enn skjærspenningene.

Til slutt ble det gjennomført fire forsøk hvor en lastcelle ble montert på en søyle midt i renna [21]. Figur 2.16 viser søylen med lastcelle. Lastcellen målte kreftene, mens hastigheten ble målt med LED-sensoren omtalt over. På bakgrunn av målt trykk, hastighet og tetthet kan dragkoeffisienten c_d anslås. Etersom det er knyttet en stor usikkerhet til hastigheten av sørpen, er dragkoeffisienten i stor grad knyttet til denne usikkerheten. De målte trykkene varierer fra 42 – 119 kPa, som gir dragkoeffisient mellom 2.27 og 11.70 for de aktuelle hastighetene og tetthetene [21].

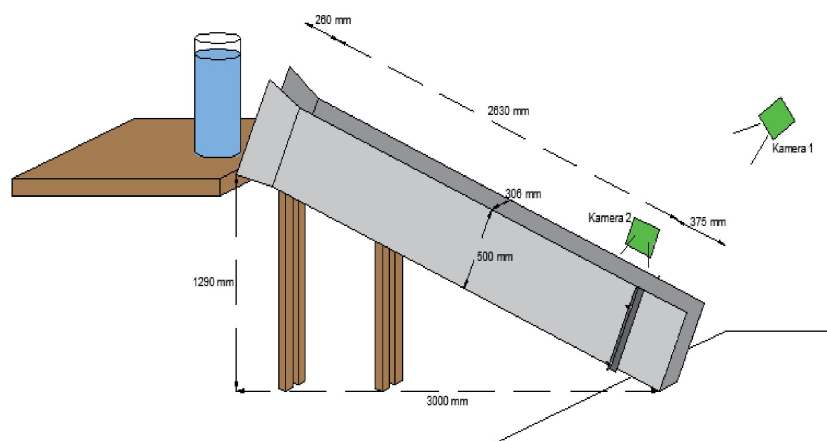


Figur 2.16: Lastcelle på søyle. Hentet fra [21].

2.2.6.2 Fleksible nettkonstruksjoner som sikringstiltak mot sørpeskred i Vannledningsdalen

Dette forsøket var en del av masteroppgaven til Thea Sophie Skaaraaen Herberg hos NTNU våren 2021. I masteroppgaven ble det gjort flere forsøk hvor en sørpeblanding ble sendt ned en renne, for å så treffe en nettkonstruksjon i bunnen i bunnen av rennen [22]. Rennens lengde varierte mellom forsøkene for å endre flyte- og hastighet. Rennene hadde en konstant helning på 23° , bredde på $30,6\text{ cm}$ og en høyde på 50 cm . Lengden på rennene varierte mellom to lengder, på henholdsvis $326,5\text{ cm}$ og $426,5\text{ cm}$. En beholder med $45,5\text{ L}$ sørpe ble tippet ut i rennen.

Lastceller i hvert hjørne av nettkonstruksjonen målte kreftene gjennom skredet. I tillegg ble det benyttet to høyhastighetskameraer. Kamera 1 tar bilder av skredet i det det treffer nettkonstruksjonen for å fange opp informasjon om støtøyeblikket. Kamera 2 fanger flyte- og høyden til skredet. Figur 2.17 viser det korteste oppsettet. Hensikten med forsøket var å



Figur 2.17: Testoppsett med lengde $326,5\text{ cm}$ på rennen. Hentet fra [22]

måle hvordan fleksible nettkonstruksjoner tok opp kreftene fra sørpen. I stedet for fleksible nettkonstruksjoner ble det brukt en rigid gitterkonstruksjon. Det ble brukt to forskjellige gitre, med ulike maskeåpninger. Kraftene ble målt i hvert hjørne, men det er uvisst hvordan

trykket sprer seg over gitteret. Det er knyttet stor usikkerhet til flyte høyde og hastigheten til sørpen [22]. Den laveste og høyeste hastigheten ble målt til $3,0 \text{ m/s}$ og $5,0 \text{ m/s}$ mens flyte høyden ble målt mellom $3 - 7 \text{ cm}$. Både det laveste og det høyeste trykket ble målt ved den lengste rennen, og grovt gitter. Det minste trykket ble målt til $104,3 \text{ N}$, mens det største trykket ble målt til $448,2 \text{ N}$. I et forsøk hvor gitteret ble byttet ut mot en tett plate, ble trykket målt til $367,1 \text{ N}$. Fordelingen av lasten fra dette forsøket er omtrent 267 N på de to nederste lastcellene, og 100 N på de øverste.

2.2.7 Nedskallering av løsmasser

Forskning på sørpe- eller løsmasseskred medfører noen praktiske utfordringer ved å få tak i relevant data. Ettersom disse skredene opptrer relativt sjeldent og uforutsigbart er det vanskelig å få tak i data mens skredet pågår. Å gjennomføre nedskalerte forsøk i laboratoriet gjør det mulig å gjennomføre mange billige forsøk i kontrollerte omgivelser. Et problem med slike nedskalerte forsøk kalles skalering. Skalering for skred er problemet ved å overføre resultater fra nedskalerte skred i laboratoriet til fullskala skred [23].

Et nedskalert forsøk som prøver å reprodusere naturlige prosesser bør oppfylle kriterier for geometrisk, dynamisk, og kinematisk likhet [23].

2.2.7.1 Geometrisk likhet

Geometrisk likhet er oppfylt dersom det er en konstant skaleringsfaktor, L_s , mellom fullskala naturlige lengder, L_n ($n = \text{natural}$), og nedskalerte lengder L_m ($m = \text{model}$) [23]. Dette gjelder alle lengder, som vil si dersom skredløpet halveres ($L_s = 0,5$), må også partikkelstørelsen i skredmaterialet halveres. Dette er ofte en feilkilde da det er vanskelig å sikre geometrisk likhet.

2.2.7.2 Dynamisk likhet

Dynamisk likhet er oppfylt dersom størrelseforholdet mellom kreftene i det nedskalerte forsøket og kreftene i et fullskala skred er likt [23]. Det er viktig å gjøre dette størrelseforholdet så likt som mulig. Eksakt dynamisk likhet er derimot umulig dersom samme fluid benyttes i det nedskalerte forsøket som i den naturlige prosessen. Ettersom skred er gravitasjonsdrevne masser med fri overflate, kan dynamisk likhet beskrives av Froude's modellov [23]:

$$\frac{v_m}{\sqrt{g_m h_{f,m}}} = \frac{v_n}{\sqrt{g_n h_{f,n}}} \quad (2.3)$$

Froude's modellov kommer fra Froude's tall definert som $F_r = v/\sqrt{gh_f}$. Her er v strømningshastigheten, g er gravitasjonen og h_f er flyte høyden [23]. Froude's tall beskriver sammenhengen mellom treghetskrefter og tyngdekrefter. Verdien av Froude's tall beskriver strømmingens tilstand [23]:

$F_R < 1$: underkritisk strømming

$F_R = 1$: kritisk strømming

$F_R > 1$: overkritisk strømming

Tørre snøskred har ofte Froude's tall mellom $5 - 10$, mens for sørpeskred kan det antas Froude's tall mellom $2 - 5$. [9, 24].

2.2.7.3 Kinematisk likhet

Kinematisk likhet er oppfylt dersom det er en lik skaleringsfaktor mellom tid, hastigheten og akselerasjon [23]. Kinematisk likehet kan beskrives av Reynold's tall, som forteller om en strømning er laminær eller turbulent [23]. Reynold's tall er definert som:

$$Re = \frac{vL\rho}{\eta} \quad (2.4)$$

I formelen er v hastigheten til skredet, L geometrisk lengde av strømningen, ρ er massens tetthet og η er dynamisk viskositet. Dersom Reynolds tall for løsmasseskred er mindre enn 600, er strømningen laminær [23]. For Reynolds tall større enn 1600, oppfører løsmasseskredet seg som en turbulent strømning [23]. Et sørpeskred kan oppføre seg som en laminær strømning eller en turbulent strømning, avhengig av blant annet hastighet, terrenghelning og ruhet langs bakken [5]. For å oppnå kinematisk likhet kan Reynold's tall benyttes:

$$\frac{v_m L_m \rho_m}{\eta_m} = \frac{v_n L_n \rho_n}{\eta_n} \quad (2.5)$$

En følge av kinematisk likhet er at dersom en skaleringsfaktor L_s er bestemt, er forholdet mellom fluidets viskositet i naturlige forekomster og laboratoriet gitt [23]. Ofte er det umulig, eller vanskelig, å gjennomføre nedskalerte eksperimenter med proporsjonalt forskjellige viskøse egenskaper i forhold til fullskala forsøk. Derfor er det ved gravitasjonsdrevne masser vanlig å kun basere seg på Froude's modell, og neglisjere kinematiske likheter [23].

2.3 Skreddynamikk

Informasjon om skredets bevegelse, hastighet, utløpslengde og trykkvirkninger er essensielt ved planlegging og design av konstruksjoner i skredområder. Skred er en komplisert fysisk prosess hvor friksjon, hastighet og skredvolum er i konstant endring nedover skredbanen [13]. Grunnet den store variasjonen i snøens egenskaper, finnes det ikke en komplett matematisk beskrivelse av skredbevegelser [9].

Enkelte beregningsmodeller i dette kapitlet er hentet fra litteratur som gjelder snøskred, og enkelte er utviklet for flomskred. I noe av litteraturen står det at sørpeskred kan ha bevegelse som bygger på samme prinsipp som ordinære snøskred [13], mens i annen litteratur er det ikke nevnt noen likheter eller forskjeller av bevegelsen [9].

2.3.1 Skreddynamikk generelt

Grunnet sørpens lave interne friksjon, høye tetthet og høye hastigheter, kan sørpeskred ha en stor ødeleggende effekt på det som måtte stå i veien [9, 25]. Reologien til sørpe kan bli beskrevet som en ikke-Newtonsk væske med viskoplastisk og granulær oppførsel [25]. Generelt kan et sørpeskred beskrives som et kontinuerlig medium hvor bevegelsen beskrives av ligninger for bevaring av masse og momentum [9, 25].

Målinger av store sørpeskred har vist krefter opp mot 1000 kPa [9]. Tabell 2.1 viser hvordan ulike trykk påvirker ulike konstruksjoner. Ut fra tabellen er det lett å se viktigheten av å vite hvilke krefter som kan inntreffe.

Trykkpåkjenning [kPa]	Skadepotensiale
1	Vinduer knuses
5	Dører trykkes inn
30	Konstruksjoner av tre ødelegges
100	Granskog ødelegges
1000	Betongkonstruksjoner ødelegges

Tabell 2.1: Trykkvirkninger av snøskred, hentet fra [9].

De viktigste faktorene som påvirker bevegelsestypen, skredhastigheten og utløpsdistansen til vannrelaterte skred er [2]:

- Størrelsen på skredet, volum og flyte høyde
 - Store skred har høy hastighet og lange utløp. Dersom grunnforholdene tillater erosjon, blir skredene større, og får lengre utløp.
- Partikkelstørrelser
 - Store partikler, eksempelvis større steiner, har stor friksjon mot underlaget, og reduserer derfor hastigheten og utløpslengden.
- Poretrykk
 - Stort poretrykk gir lengre utløp. Poretrykket kan variere gjennom skredbanen, og varierer langs skredets lengderetning.
- Ruheten til skredbanen
 - Stein størrelse langs skredbanen og type vegetasjon har mye og si for ruheten, og derav friksjonskreftene, mellom bakken og skredet.

2.3.2 Beregningsmodeller

I dag finnes det mange ulike numeriske og empiriske beregningsmodeller for å beskrive skredbevegelser [2]. Enkelte modeller er veldig generelle, og kan omfatte mange forskjellige skredtyper, mens andre modeller er spesifikt rettet mot enkelte typer skred. Det finnes ikke beregningsmodeller som er spesifikt rettet mot sørpeskred, men på grunn av likheter i reologien mot flomskred, blir det ofte benyttet modeller utviklet for flomskred [26, 27, 28].

Numeriske modeller kan være en-, to- eller tre-dimensjonale, avhengig av kompleksiteten til modellen [2, 9, 29]. En-dimensjonale modeller beregner hastigheten og utløpsdistansen for skredets tyngdepunkt. Dersom modellen i tillegg tar hensyn til skredets lengde og tykkelse, kan den beregne endringer i flyte høyde langs skredets senterlinje, og kalles to-dimensjonale modeller. De mest komplekse tre-dimensjonale modellene beregner skredets hastighet, flyte høyde og bredde. Disse modellene kan også beregne sannsynlig skredbane utfra topografien.

For å beskrive kreftene som påvirker skredmassene inneholder modellene minst et plastisk ledd som er uavhengig av hastigheten, og et kinematisk ledd som er hastighetsavhengig [2]. Dette krever at skredmaterialets egenskaper fra fasthetslæren og hydrodynamikken er kjent.

Empiriske modeller for å beregne skredhastighet og utløpslengde er enkle matematiske sammenhenger som baserer seg på observerte skred eller grunnleggende kunnskap fra hydrodynamikken [29]. Ofte blir det derfor sett bort fra kompliserte fysiske prosesser ved disse modellene.

Teorien om hvordan snø- og flomskred beveger seg bygger på hydraulisk teori som igjen kan deles inn i hydrostatisk, hydrodynamisk teori eller en kombinasjon [13, 23, 30]. Dette er matematiske ligninger til å beskrive en væske som beveger seg i en åpen kanalstrøm. Modeller som baserer seg på hydraulisk teori har noen store baksider da det er nødvendig å ha informasjon om snøens friksjonsegenskaper og flyte høyde [13].

2.3.3 Skredhastighet

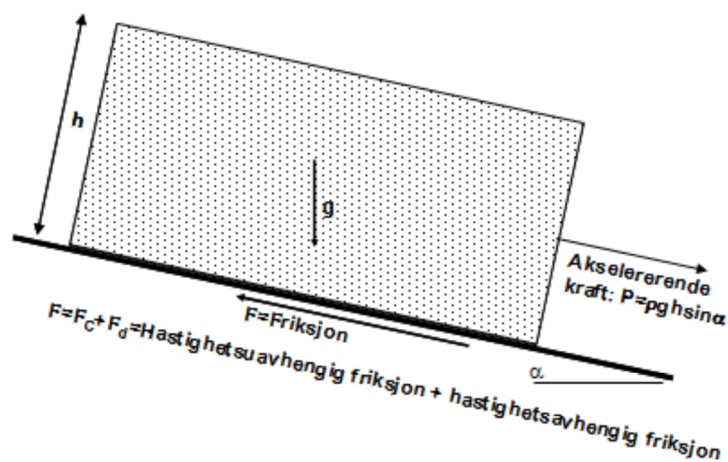
Hastigheten til skredet har stor betydning for hvilke krefter skredet vil påføre en konstruksjon. Mens maksimal hastighet som vanlig befinner seg i skredløpet, er hastigheten i utløpsområdet ofte av større interesse for ingeniørrelaterte problemer [29]. Dette fordi det er i utløpsområdet de fleste konstruksjonene vil bli plassert.

2.3.3.1 Likevekt av skredvolum

Ved å betrakte likevekt av et lite skredvolum med en enhets utstrekning, som vist i figur 2.18, kan følgende ligning settes opp [2]:

$$ma = \rho h \frac{dv}{dt} = P - F = \rho g h_f \sin(\alpha) - (F_c + F_d) \quad \text{N} \quad (2.6)$$

Ligning 2.6 kommer fra newtons første lov hvor summen av krefter er lik produktet av massen og akselerasjonen a . ρ er skredmassens tetthet, h_f er flyte høyde og α er terrenghelningen. Ved å dekomponere tyngden til skredvolumet, mg , vil akselererende kraft P virke nedover skredbanen. Friksjonskraften F virker alltid mot skredbevegelsen, og kan videre dekomponeres i et hastighetsuavhengig ledd F_c , og et hastighetsavhengig ledd F_d . Begrunnelse for denne inndelingen er at hastighetsavhengig friksjon gjør det mulig å oppnå en terminalhastighet, mens hastighetsuavhengig friksjon gjør det mulig for skredet å stoppe opp selv i nedoverhellende terreng [2].



Figur 2.18: Krefter som virker på et skredvolum. Hentet fra [2].

Det er vanlig å representere hastighetsuavhengig friksjon som Mohr-Coulomb skjærspenning, og hastighetsavhengig friksjon gjennom viskøse egenskaper til skredmassen [2]. Ligning 2.6 kan omformuleres til:

$$ma = P - F = \rho gh_f \sin(\alpha) - \left(c + \mu \rho gh \cos(\alpha) + \kappa \frac{v}{h} \right) \quad \text{N} \quad (2.7)$$

Hvor Mohr-Coulomb friksjonen beskrives av de to første friksjonsleddene, mens det siste leddet beskriver de viskøse egenskapene. Etttersom sørpe er tilnærmet kohesjonsløst er det vanlig å neglisjere kohesjonen c [2]. μ er den effektive friksjonskoeffisienten og κ er skredmassens viskositet.

Når skredet oppnår sin terminalhastighet er akselerasjonen lik 0. Ved å innføre dette i ligning 2.7 for å så løse for hastigheten v , finnes et uttrykk for terminalhastigheten v_{term} :

$$v_{term} = \frac{\rho gh_f^2}{\kappa} (\rho \sin(\alpha) - \mu \cos(\alpha)) \quad (2.8)$$

Verdiene av μ og κ kan undersøkes i laboratoriet, men det mest vanlige er å etterberegne kartlagte skred [2]. Det er da mulig å velge verdier som gir riktig utløpslengde. Dette er ikke gjort i særlig stor grad for sørpeskred. På grunn av vansjiktet, nevnt i kapittel 2.2.3, er den hastighetsuavhengige friksjonen μ svært liten [2]. Friksjonskoeffisienten antas derfor ofte å være mellom 0,01 – 0,05.

2.3.3.2 Grafisk fremstilling av hastigheter

Ved utløsningstidspunktet er all energien lagret som potensiell energi [2]. Etterhvert som skredet beveger seg nedover skredbanen går denne energien over til hastighetsenergi og varme. Varmen representerer tap av mekanisk energi gjennom friksjon. Når skredet stanser har all potensiell energi og hastighetsenergi gått over til varme og resterende potensiell energi. Bernoullis ligning sier at summen av trykkenergi, potensiell energi, hastighetsenergi og energitap er konstant:

$$H_{e1} = H_{z1} + H_{p1} + H_{k1} = H_{e2} + \Delta H_e \quad (2.9)$$

Hvor:

H_e er energilinje

$H_z = z$ er potensiell energi tilsvarende stedshøyden z .

$H_p = h_f$ er trykkehøyden tilsvarende skredets flyte høyde h_f .

$H_k = v^2/2g$ er skredets hastighetsenergi.

ΔH_e er energitapet fra punkt 1 til 2.

Dersom det ses bort fra friksjonen, vil bevaring av energi føre til at all potensiell energi går over til kinetisk energi. Hastigheten kan da settes lik:

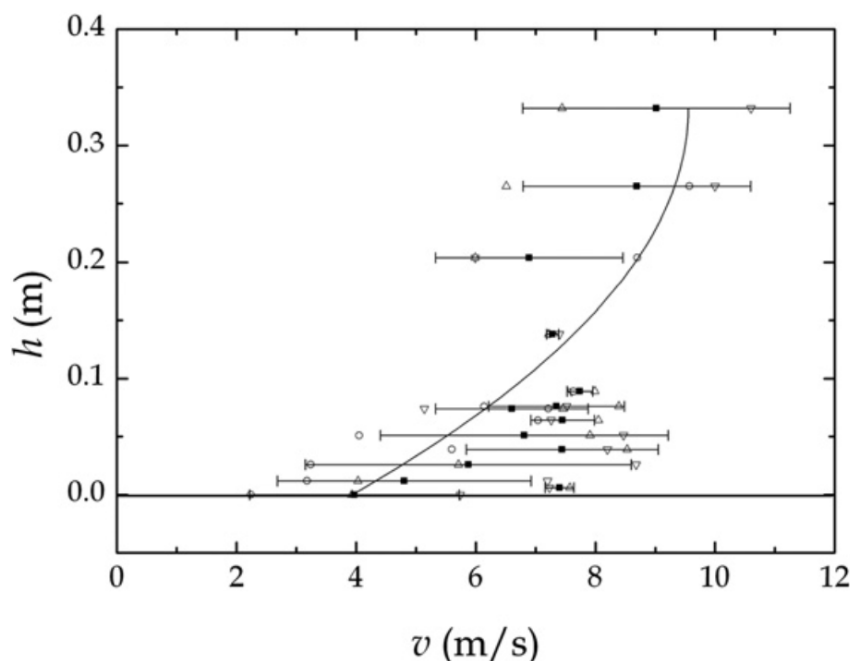
$$v = \sqrt{2gh} \quad (2.10)$$

2.3.3.3 Hastighetsprofil i skredet

Skredets hastighet varierer gjennom flyteøyden i skredet [9, 21]. I [21] antas det en hastighetsprofil lik en Newtonsk væske med en laminær strømming for sørpeskred. Hastighetsprofilen $v(z)$ kan da beskrives ved følgende formel over høyden z [21]:

$$v(z) = \frac{1}{\mu} \rho g (h_f - z) \sin(\alpha) g h_f z \left(1 - \frac{z}{2h_f}\right) + v_0 \quad \text{m/s} \quad (2.11)$$

Hvor v_0 er basal hastighet. Figur 2.19 viser at det er stor variasjon i dataen, og at hastighetsprofilen ikke nødvendigvis er eksakt. Det kan derimot gi et grovt inntrykk over hvordan hastigheten fordeler seg innad i skredet.



Figur 2.19: Hastighetsprofil hentet fra [21].

2.3.4 Utløpsdistanse

”Skredets utløpsdistanse er definert som ytre begrensning av de avsatte skredmassene” [2]. Etersom vannet i et sørpeskred når lengre enn snøen og isen, kan det være praktisk å definere utløpsdistansen som en ytre grense for hvor skredmasser av betydning avsettes. For veger og jernbane kan disse massene være grovmasser, mens for boliger kan selv vann og finstoff gjøre skade, og derav definere utløpsdistansen.

2.3.4.1 Regelverk

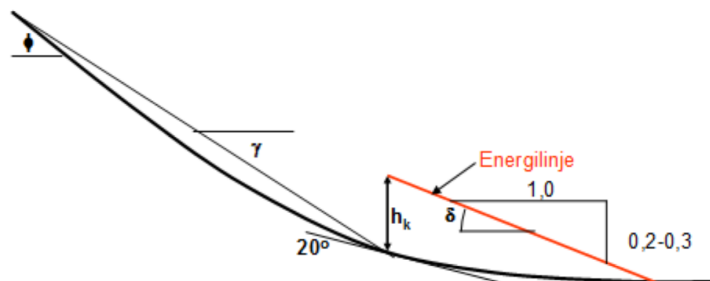
Ved etablering av nye byggverk gir TEK-17 krav til sikkerhet mot skred. Her defineres byggverket ut ifra sikkerhetsklasser som følge av konsekvensene av et skred [31]. Utløpsdistansen blir da anslått som en funksjon av returperiode, altså hvor ofte skredet når en viss avstand. Tabell 2.2 viser akseptabel årlig sannsynlighet for skred i forhold til konsekvens.

Sikkerhetsklasse	Konsekvens	Sannsynlighet	Eksempel
S1	Liten	1/100	Garasje, uthus, lagerbygg
S2	Middels	1/1000	Enebolig, arbeidsplass < 25 personer
S3	Stor	1/5000	Rekkehus > 10 boenheter, skole, sykehjem
§første ledd	Særlig stor	Skal ikke settes i skredområde	Bygninger med betydning for beredskap

Tabell 2.2: Årlig sannsynlighet mot skred for ulike sikkerhetsklasser. Hentet fra [31].

2.3.4.2 Beregning av utløpsdistanse

Statens vegvesens håndbok V139 gir et forslag til en enkel prosedyre for å beregne utløpsdistanse for flom- og sørpeskred [2]. Her benyttes det såkalte 20° graders punktet, som er punktet i skredbanen hvor helningen er 20° . I dette punktet beregnes hastighetsenergien til skredet, tilsvarende H_k fra ligning 2.9 [11]. En energilinje trekkes her med en helning δ til linjen treffer skredprofilen. Vinkelen δ avhenger av skredets størrelse og størrelsen på skredpartiklene. Krysningpunktet blir da sannsynlig utløpsdistanse, se figur 2.20. Det kan være greit å merke seg at figur 2.20 gjelder for flomskred. Forskjellen mellom flomskred og sørpeskred er at vinkelen δ for flomskred settes mellom $11,3^\circ - 16,7^\circ$, mens for sørpeskred settes den til $\delta = 5,7^\circ$. Dette gjør at stigningstallet $0,2 - 0,3$ endres til $0,1$. Hastigheten til et sørpeskred kan anslås til 20 m/s dersom det ikke er grunnlag for noe annet.



Figur 2.20: Beregning av utløpsdistanse. Stigningstallet i figuren gjelder for flomskred, og skal endres til $0,1$ for sørpeskred. Hentet fra [2].

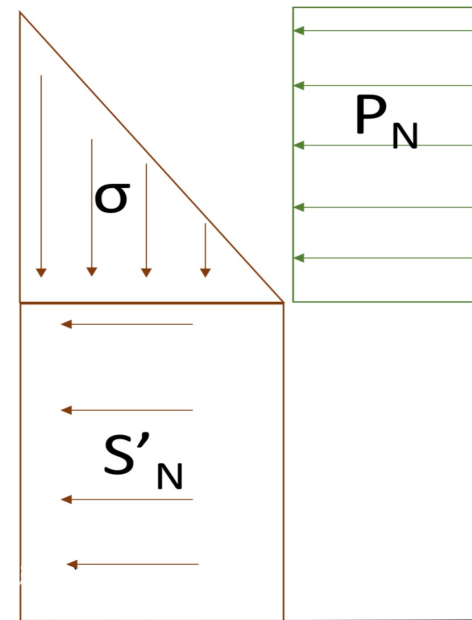
2.4 Krefter i et skred

2.4.1 Trykkfordeling på en konstruksjon

Det dynamiske trykket fra et snøskred kan variere over skredets tverrsnitt [9]. Eksempelvis vil en konstruksjon påført skredtrykk kjernen av skredet ofte ha store trykk, mens snøskyen på toppen av skredet vil ha mindre trykk. Store legemer i skredet, som trær og steiner, vil komplisere trykkberegningene. Det er da viktig å ta hensyn til størrelse og fasthet på legemet. Trykket fra et skred antas fordelt over det påkjente arealet. Den påkjente høyden kan settes lik skredets flyte høyde, $1,5$ ganger skredets flyte høyde [32] eller konstruksjonens høyde [30]. Under følger noen trykkfordelinger for ulike situasjoner.

2.4.1.1 Inndeling av statisk og dynamisk snøtrykk

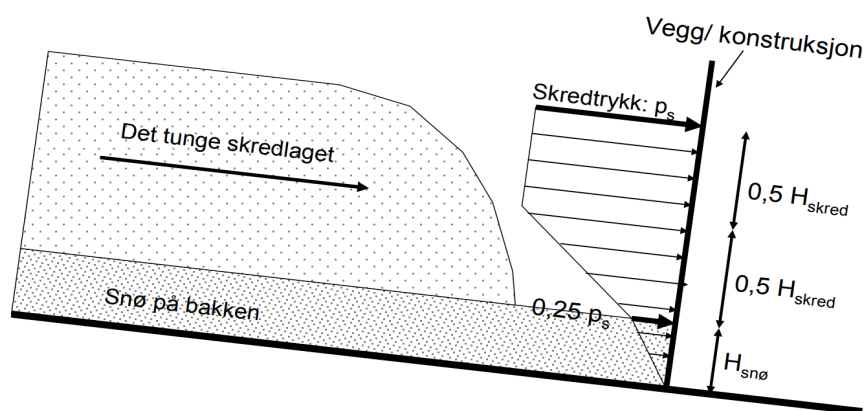
Ved beregning av krefter fra et sørpeskred er det tidligere gjort et skille mellom statiske og dynamiske krefter [27]. Figur 2.21 viser dette skille, hvor snøens setning S'_N , og vekt av sørpe σ , er statiske krefter mens P_N er dynamisk kraft. Figur 2.21 viser denne forskjellen hvor S'_N antas å være fordelt over hele høyden av snødekke og P_N antas å være jevnt fordelt over flyteøyden [20, 27].



Figur 2.21: Fordeling av statiske og dynamiske laster. Hentet fra [27]

2.4.1.2 Statens vegvesen håndbok V138

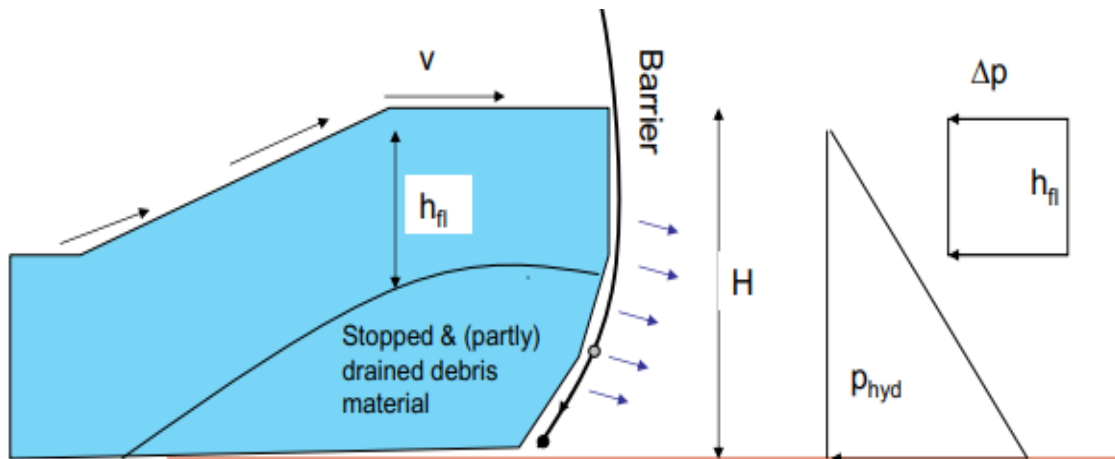
Figur 2.22 viser hvordan Statens vegvesens håndbok V138 fordeler trykket fra et snøskred over høyden på en konstruksjon [11]. Det nederste trykket som varierer lineært over høyden $H_{snø}$ blir forklart i kapittel 2.4.2.1, mens skredtrykket p_s er trykket fra kjernen av skredet. Dette trykket vil bli diskutert senere. Høyden h_{skred} er skredets flyteøyde.



Figur 2.22: Fordeling av trykk mot en konstruksjon. Hentet fra [11].

2.4.1.3 Hydrostatisk og hydrodynamisk trykk

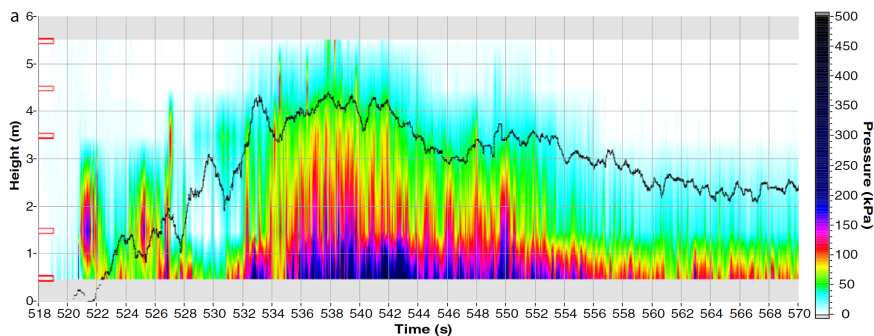
For løsmasseskred er det vanlig å dele trykket inn i et hydrostatisk og et hydrodynamisk trykk [30]. Det hydrostatiske trykket p_{hyd} øker lineært nedover, mens det hydrodynamiske trykket er jevnt fordelt over skredets flyte høyde [30]. Figur 2.23 viser de to forskjellige komponentene ved design av wirenett mot løsmasseskred. Kraftene virker samtidig, og må derfor legges sammen for å få total last.



Figur 2.23: Hydrostatisk Δp og hydrodynamisk trykk p_{hyd} som virker på et wirenett. Hentet fra [20].

2.4.1.4 Støtkrefter fra våte snøskred

I Valle de la Sionne, Sveits, er det en teststasjon finnes det en forskningsstasjon rettet mot snøskred [33]. Der er det blant annet gjort målinger av krefter, skredhastigheter og flyte høyde. I en studie fra 2008 ble det sett på trykkfordelingen i snøskred [33]. Figur 2.24 viser hvordan flyte høyden og trykket endres over tid til kjernen av et vått snøskred. Den svarte streken er flyte høyden, mens trykket er gitt som et fargeplot. Resultatet viser at trykket er størst lengst nede i skredet.



Figur 2.24: Trykkfordeling (fargeplot) satt opp mot flte høyde (svart strek). Hentet fra [33].

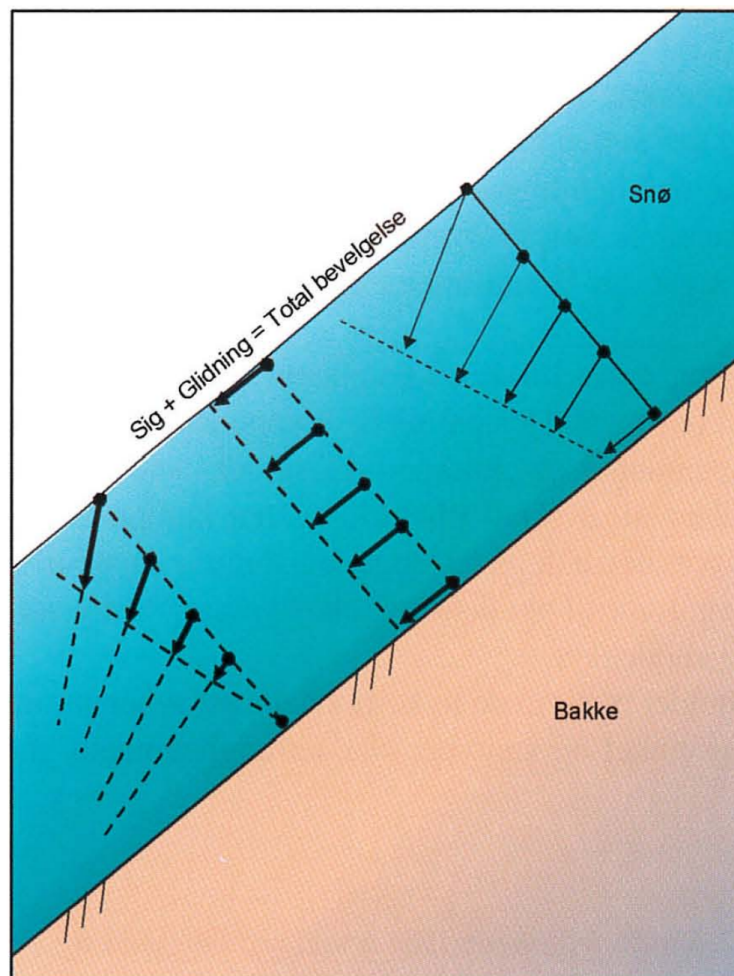
2.4.2 Statisk snøtrykk

2.4.2.1 Snø på bakken

Snøen som allerede ligger på bakken før skredet kommer er viktig av to grunner. For det første vil skredet gli oppå denne snøen, og dermed bestemmer tykkelsen av dette laget hvor høyt skredet vil treffe konstruksjonen [11, 13]. Den andre grunnen er at det oppstår skjærspenninger i grensesjiktet mellom skredet og snøen som ligger på bakken. Skjærspenningene fører til trykk på konstruksjoner som snødekket hviler mot [11]. I [11] kalles høyden av snødekket for $h_{snø}$, trykket her kan antas å fordele seg lineært nedover snødekke.

2.4.2.2 Setninger i snøen

Når snøen ligger på bakken er den i konstant langsom bevegelse, selv når det ikke defineres som skred [13, 34]. Denne bevegelsen skyldes snøsig og snøglidning, og er drevet av tyngdekraften. Snøsig skjer ved at snødekke komprimeres. Dersom snødekke består av lett nysnø med stort porevolum er snøsiget større. Glidning skyldes gravitasjonskomponenten som er parallell med helningen, og hele høyden av snødekke har lik glidning. Figur 2.25 viser hvordan snødekket påvirkes av snøsig og snøglidning som tilsammen kalles for snøens setning.



Figur 2.25: Snøsig og snøglidning. Hentet fra [13].

Kraften en konstruksjon blir påført per løpemeter som følge av setning kan beregnes til [13, 27, 34]:

$$S'_N = \rho g \frac{h_s^2}{2} K N \quad \text{N/m} \quad (2.12)$$

Hvor h_s er vertikal snøhøyde, K er en sigefaktor avhengig av snøens tetthet og terrenghelning, og N er en glidefaktor som er avhengig av bakkens ruhet. Hvordan verdiene til sigefaktor K og glidefaktor N blir bestemt, er beskrevet i [34]. I følge [13] ligger K mellom 0,7 – 1,5 og N mellom 1,2 – 3,2.

2.4.2.3 Vekt av snø på toppen

Når et skred kommer frem til en konstruksjon vil det legge seg skredmasser på toppen av eventuell snø som ligger der på forhånd, [13, 27]. σ er vekten av denne skredmassen som legger seg på toppen [27]. Denne lasten kan beregnes til:

$$\sigma = \rho g \frac{(h_k - h_b)^2}{2} \quad \text{N/m} \quad (2.13)$$

Hvor h_k er konstruksjonens høyde mens h_b er høyden til snøen som allerede ligger på bakken.

2.4.2.4 Total statisk last

Den totale statiske lasten som trykker på en konstruksjon blir lik summen av setning og vekt [27]. Dette gir total statisk last lik:

$$S_N = S'_N + \sigma \quad (2.14)$$

2.4.2.5 Aktivt snøtrykk

Snø som hviler mot en vegg eller en annen konstruksjon kan sammenlignes med jordtrykk påført en vegg [13]. Det aktive snøtrykket på veggen, p_{aktiv} , blir da:

$$p_{aktiv} = k_a \sigma = k_a \rho g h_s \quad \text{Pa} \quad (2.15)$$

Den aktive snøtrykk-koeffisienten kan settes lik 0,65 [13].

2.4.3 Dynamiske beregningsmodeller for snøskred

2.4.3.1 Intensitet av et snøskred

Den dynamiske påkjenningen av et snøskred kan være alt fra et harmløst løssnøskred til et destruktivt sørpeskred. Det er derfor svært vanskelig å utvikle en beregningsmodell som skal passe alle former for snøskred. Intensiteten av et snøskred kan regnes som en konstant multiplisert med skredets tetthet samt kvadratet av skredhastigheten [9]:

$$p = k \rho v^2 \quad \text{Pa} \quad (2.16)$$

Konstantet k avhenger blant annet av skredmassen. Dersom massen inneholder mange store legemer blir k stor, mens for et skred bestående stort sett av en snøsky, er k liten. Dersom skredtrykket, tettheten og skredhastigheten er målt kan verdien k beregnes som følgende:

$$k = \frac{p}{\rho v^2} \quad (2.17)$$

Verdien av skredtrykket fra ligning 2.16 avhenger mye hvilken verdi k som blir valgt. Det er tidligere registrert at skredtrykket når sitt maksimale etter noen få millisekund [9]. For store tørre snøskred kan verdien k antas å være opp mot 3, mens for våte snøskred kan konstanten være mellom 2 – 3 grunnet lavere hastighet [9]. Ettersom sørpeskred både har stor hastighet og tetthet, samt ofte består av store steinblokker og andre eroderte materialer, antas verdien av k og være større enn 3 [9].

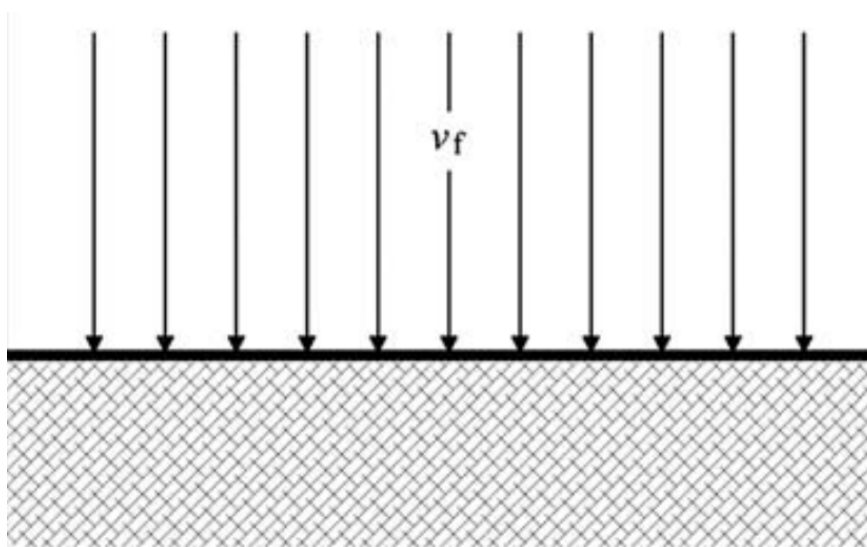
Formel 2.16 brukes også til å beregne hydrodynamisk trykk ved dimensjonering av wirenett [18]. Der avhenger konstanten k av hvilken type løsmasse og strømming skredet består av, og kan antas å være mellom 0,7 og 2.

2.4.3.2 Trykk mot brede konstruksjoner

Denne situasjonen krever en bred konstruksjon slik at det meste av skredet ikke kan flyte rundt konstruksjonen [9, 30]. For en konstruksjon som står vinkelrett på skredet kan trykkvirkningen da forenkles til [9, 13, 30]:

$$p_{bred} = \rho v^2 \quad \text{Pa} \quad (2.18)$$

Hvor p_{bred} er fordelt trykk over påkjent areal. Denne formuleringen benyttes blant annet av ONR 24805 som er en del av den sveitsiske standarden for snøskred [9]. Formelen blir også kalt for hydrodynamisk trykk, og kan bli funnet i litteratur som gjelder løsmasseskred [30]. Figur 2.26 viser hvordan trykket brer seg over bredden på konstruksjonen.



Figur 2.26: Trykk påkjent en bred konstruksjon. Hentet fra [9].

2.4.3.3 Trykk mot konstruksjoner med helning

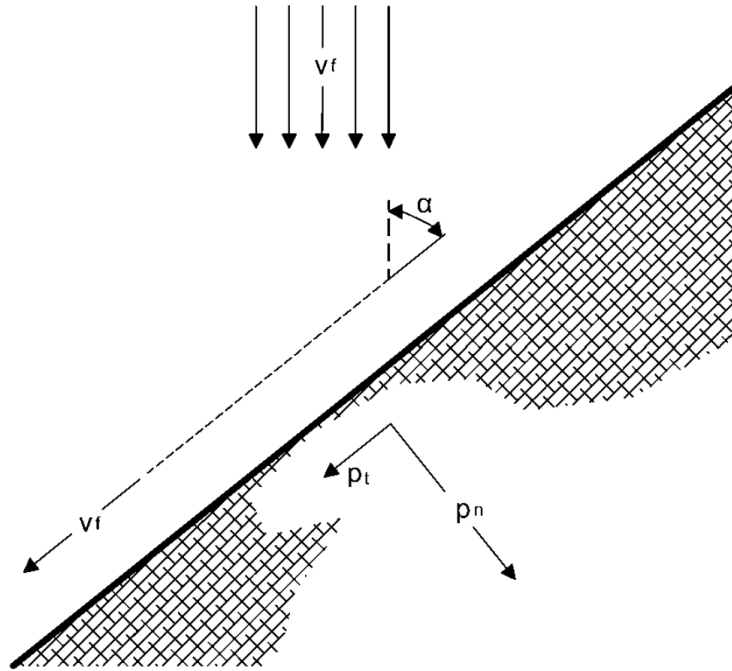
Når skredet treffer en konstruksjon som har en helning α til skredet, kan normal og tangentiell trykkkomponent beregnes som følger [9]:

$$p_{norm} = \rho v^2 \sin^2(\alpha) \quad \text{Pa} \quad (2.19)$$

og

$$p_{tang} = \mu p_n \quad \text{Pa} \quad (2.20)$$

Hvor μ er friksjonskoeffisienten mellom skredet og konstruksjonen. Figur 2.27 viser kraften p_n og p_t .



Figur 2.27: Kraft påkjent en konstruksjon med en hellning α i forhold til skredretning. Hentet fra [9].

2.4.3.4 Trykk mot smale konstruksjoner

En smal konstruksjon er en konstruksjon hvor skredet antas å strømme rundt konstruksjonen. Figur 2.28 viser trykket p_{smal} . Trykkvirkningen kan da beregnes til som et stagnasjonstrykk [9]:

$$p_{smal} = c_d \frac{\rho v^2}{2} \quad \text{Pa} \quad (2.21)$$

Hvor c_d er en dragkoeffisient som beskriver virkningen av både dynamisk trykk, og friksjon mellom skredet og konstruksjonen [19, 21]. Denne faktoren kan være vanskelig å anslå, og må bli funnet gjennom eksperimenter [19]. Generelt er c_d en funksjon av strømmingen og avhenger blant annet av Reynolds tall Re , Froudes tall Fr , geometrien til konstruksjonen, partikkelstørrelser i sørpeblandingen, samt forholdet mellom partikkelstørrelse og størrelse på konstruksjonen [21]. Verdien til dragfaktoren i et sørpeskred antas å ha stor variasjon med hensyn på ulik tetthet og vanninnhold i snøen [21].

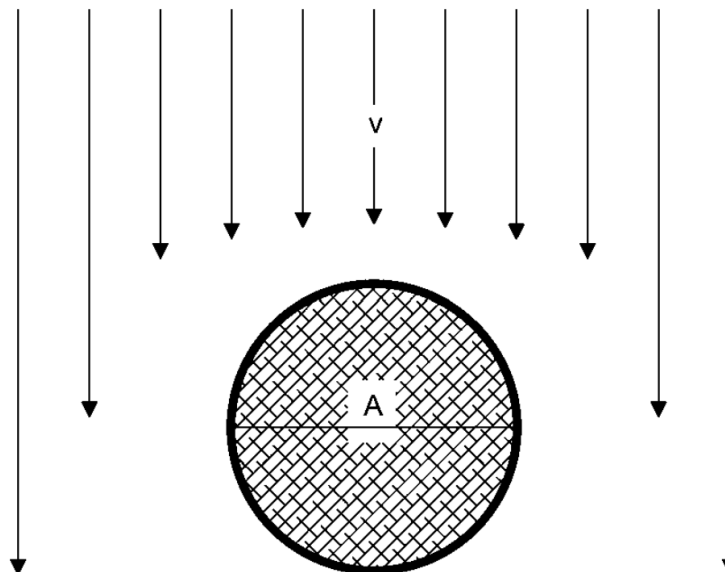
For løsmasseskred er det ofte brukt dragkoeffisienter i siktet 3 – 5 [30]. Det er stor usikkerhet knyttet til disse verdiene, og tilbakeberegninger for løsmasseskred viser verdier mellom 0,38 og 18,67 [30]. Det finnes få verdier utarbeidet for sørpeskred, men for våte snøskred har verdien 6,3 blitt foreslått [19, 21].

2.4.3.5 Statens vegvesens håndbok V139

Statens vegvesen gir et anslag på trykket fra et flomskred mot flate vegger [2]. Formelen baserer seg på prinsippene for stagnasjonstrykk, og der en kontinuerlig væskestrøm renner mot en vertikal flate kan trykket p_{svv} beregnes til:

$$p_{svv} = 0,5 k_{svv} \rho v^2 \quad \text{Pa} \quad (2.22)$$

Konstanten k_{svv} avhenger av skredmassens fasthet og partikkelstørrelse. Ved dimensjonering av bruer mot sørpeskred, er anbefalt verdi $k_{svv} = 4$.



Figur 2.28: Kraft påkjent en smal konstruksjon hvor store deler av skredet antas å gå rundt. Hentet fra [9].

2.4.3.6 Impulslaster fra legemer

I tillegg til snøtrykk inneholder ofte et snøskred andre større legemer som steiner, trær, røtter osv. Dersom konstruksjonen er laget som en rigid konstruksjon blir disse kreftene tatt opp i løpet av veldig kort tid, og kan gjøre store skader på konstruksjonen [19, 18]. Det må i hvert tilfelle bestemmes hvor sannsynlig det er at disse lastene opptrer med tanke på at alle skredløp er forskjellige, og tilgjengelighet av løsmasser varierer fra skredløp til skredløp. Ved design mot slike laster antas det at lasten blir påført samtidig som lasten fra skredet, samt kan det kan intreffe over hele arealet til kjernen av skredet [19]. Det kan antas at trykket ved slike impulslaster, inkludert snøtrykk, kan settes til [19]:

$$p_I = 66,6\rho v^2 \quad \text{Pa} \quad (2.23)$$

2.4.4 Beregningsmodeller for flomskred

2.4.4.1 Statisk beregningsmetode

Som nevnt i kapittel 2.3.2 er det ofte gjort et skille mellom hydrostatisk og hydrodynamisk trykk. Lichtenhahn presenterte i 1973 en enkel formel for å beregne hydrostatisk trykk, som fortsatt en populær metode i dag [30]. Det hydrostatiske trykket kan settes til:

$$p_{licht,stat} = k_{stat}\rho gh_f \quad (2.24)$$

Hvor k_{stat} er en empirisk faktor som tar hensyn til strømningsforholdene på løsmassene. I følge [30] kan k_{stat} variere mellom 3,7 og 21,4 ved tettheter mellom $1130 - 2400 \text{ kg/m}^3$. Denne ligningen kan også benyttes for å beregne hydrostatisk trykk ved design av wirenett [18]. Konstanten k_{stat} kan da antas å være lik 1. En hydrostatisk modell passer best når Froude's tall er mindre enn 1, som vil si at hastigheten er lav [30].

2.4.4.2 Lichtenhahns metode

Lichtenhahn kontrollerte det hydrostatiske vanntrykket under et flomskred [23]. Han fant da ut at trykket var 7 – 10 ganger større under et flomskredet, sammenlignet med stille tilstand [23]. Det hydrostatiske trykket er størst ved bunnen av skredet, og minker lineært oppover. Trykket kan settes lik:

$$p_{licht,hyd} = k_{hyd}\rho_w g h_f \quad (2.25)$$

Hvor k_{hyd} er en faktor som har blitt registrert mellom 3–11. I praksis settes k_{hyd} mellom 7–10 [23]. ρ_w er tettheten til vann som settes til 1000 kg/m^3 [35]. Ettersom skredets hastigheten ikke direkte er tatt med i beregningene er metoden kalt for en statisk tilnærming med en dynamisk amplifikasjon. Metoden tar heller ikke hensyn til skredmassenes tetthet.

2.4.4.3 Hübl og Holzingers metode

En hydrodynamisk modell ble presentert av Hübl og Holzinger i 2003. Da ble støttrykket normalisert mot hydrodynamisk trykk fra ligning 2.18. Etter en regresjonsanalyse mellom det normaliserte trykket og Froude's tall ble følgende sammenheng funnet [30]:

$$p_{huho} = 4,5\rho v^{0,8}(gh_f)^{0,6} \quad (2.26)$$

Faktoren 4,5 var opprinnelig satt til 5, men har i senere tid blitt omjustert [23]. Hydrodynamiske beregningsmodeller passer best ved høye hastigheter, og Froudetall større enn 3 [30].

2.4.4.4 Coussot's metode

Coussot's metode inneholder både et hydrostatisk og et hydrodynamisk ledd [23]. Videre skiller metoden mellom skred som består av fine stoffer, kalt for *mudflow*, og skred som også består av grove partikler og steiner, kalt for *granular debris flow*. For skred av fine partikler kan trykket bestemmes til:

$$p_{cous} = \frac{1}{2}\rho g h_f \cos(\Theta) + \rho v^2 \quad \text{Pa} \quad (2.27)$$

Hvor Θ er terrengets helning. Ved å sette $\cos(\Theta) = 1$, og innføre Froude's nummer for hastigheten $v = Fr\sqrt{gh}$, omskrives uttrykket til:

$$p_{cous} = \frac{1}{2}\rho g h_f (1 + 2Fr^2) \quad \text{Pa} \quad (2.28)$$

Ligningen viser at trykket i stor grad er avhengig av det dynamiske leddet, og at for høye Froudetall kan det hydrostatiske leddet sløyfes.

2.5 Plateteori

2.5.1 Platens differensialligning

Følgende antakelser er gjort for å uttrykke platens differensialligning [36]:

- Platens materiale er elastisk og følger Hookes lov.
- Det antas plan-spenningstilstand.
- Det antas at plane tverrsnitt forblir plane (Bernoulli-Naviers Hypotese).
- Deformasjonene er små, og platens tykkelse er konstant.

På bakgrunn av disse antakelsene, kan platens differensialligning utledes ved å betrakte likevekt av et lite platevolum [36]. Platens differensialligning kan da uttrykkes som:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \quad (2.29)$$

Hvor:

$w = w(x, y)$ er platens utbøyningsfunksjon.

$q = q(x, y)$ er lasten som virker normalt på plateplanet.

$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ er platestivheten med elastisitetsmodul E , platetykkelse t og tverrkontraksjonstall ν .

Full utledning av platens differensialligning finnes i [37]. En entydig løsning av differensialligningen krever to foreskrevne randbetingelser på hver side av platens ender [36]. Randbetingelser kan være forskyvning, rotasjon eller spenningsresultanter.

I praksis løses de aller fleste plateproblemer via numeriske løsninger basert på elementmetoden (FEM) [36]. For enkle plategeometrier, randbetingelser og belastninger finnes det tabulerte løsninger av differensialligningen. Timoshenko og Woinowsky gir løsningen til en fritt opplagret kvadratisk plate med sidekant a , og en jevnt fordelt last [37]. En tilnærming av maksimal utbøyning er:

$$w_{max} = 0,00406 \frac{qa^4}{D} \quad (2.30)$$

En kvadratisk plate som er utsatt for hydrostatisk trykk, vil ha en tilnærmet utbøyning midt på platen lik [37]:

$$w_{midt} = 0,00203 \frac{q_o a^4}{D} \quad (2.31)$$

Hvor q_o er maksimalt hydrostatisk trykk.

2.5.2 Navier's plateløsning

Rektangulære fritt opplagte plater kan benytte seg av Navier's plateløsning for å beregne utbøyningen til en gitt last på formen $q = f(x, y)$ [37]. Lasten kan da uttrykkes som en dobbelt trigonometrisk serie:

$$q(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2.32)$$

hvor:

$$q_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q(x, y) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy dx \quad (2.33)$$

Om utbøyingsfunksjonen antas på formen:

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2.34)$$

vil derivering og innsetting i platens differensialligning, ligning 2.29, gi følgende utbøyingskoeffisient:

$$w_{mn} = \frac{q_{mn}}{D \left(\frac{m^2\pi^2}{a^2} + \frac{n^2\pi^2}{b^2} \right)^2} \quad (2.35)$$

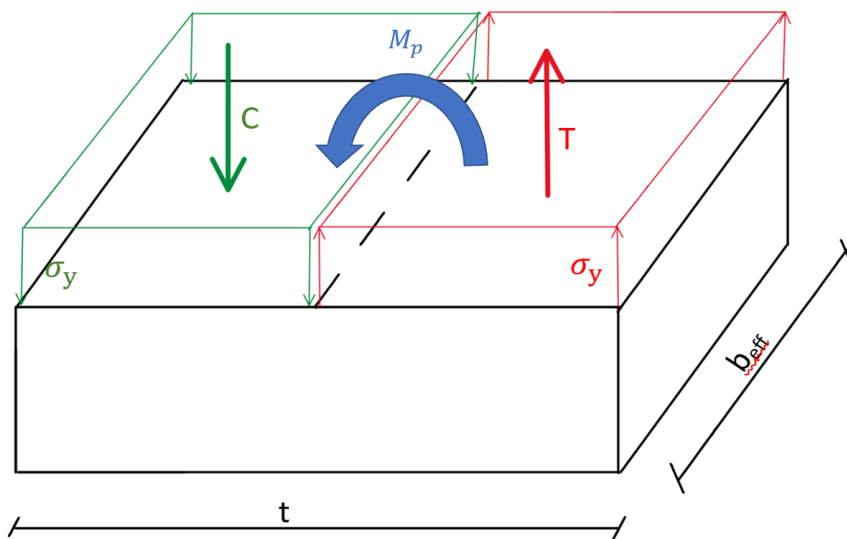
En full utledning av Navier's plateløsning, og bruksområder, er vist i [37].

2.6 Stålets flytegrense

Figur 2.29 viser et tversnitt som har blitt belastet hvor tversnittet opplever en jevnt fordelt spenningen σ_y . Resultantene T og C blir finnes ved å integrere spenningen over arealet [36]:

$$T = C = \int_A \sigma_y dA = A\sigma_y = \sigma_y b_{eff} \frac{t}{2} \quad (2.36)$$

Hvor b_{eff} er platens bredde, og t er tykkelsen.



Figur 2.29: Tversnitt som har blitt belastet til flyt.

Momentkapasiteten til tversnittet finnes ved å kreve indre likevekt [36]:

$$M_p = T \frac{1}{2} t + C \frac{1}{2} t = \sigma_y \frac{1}{4} b_{eff} t^2 = \sigma_y W_p \quad (2.37)$$

Hvor W_p kalles for plastisk motstandsmoment. Ved å sette spenningen σ_y lik stålets flytegrense f_y , er det mulig å finne ut hvor stort bøyemoment, og derav krefter, som trengs for å oppnå flyt:

$$f_y = \sigma_y = \frac{M}{W_p} \quad (2.38)$$

For en jevnt *jevnt fordelt last*, vist i figur 2.30, beregnes momentet om bunnen til:

$$M_{jevn} = \frac{p_{jevn} b h^2}{2} \quad (2.39)$$

Hvor b og h er henholdsvis bredden og høyden på lasten. Ved å sette inn i ligning 2.38 kan lasten p_{jevn} uttrykkes som:

$$p_{jevn} = \frac{2 f_y W_p}{b h^2} = \frac{f_y b_{eff} t^2}{2 b h^2} \quad (2.40)$$

For en *hydrostatisk fordelt last* kan momentet skrives som:

$$M_{hyd} = \frac{p_{hyd} b h^2}{6} \quad (2.41)$$

som innsatt i ligning 2.38 gir følgende last ved flyt:

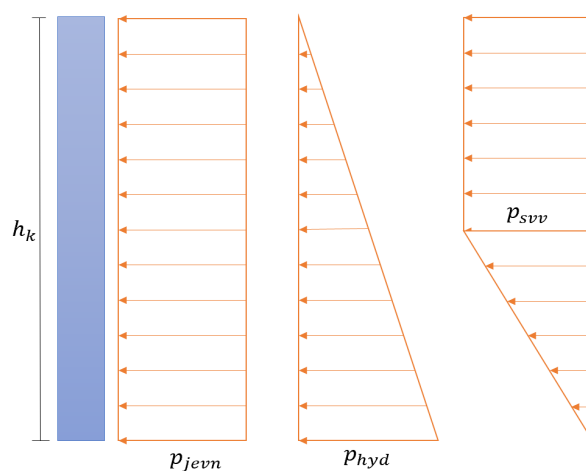
$$p_{hyd} = \frac{3 f_y b_{eff} t^2}{2 b h^2} = 3 p_{jevn} \quad (2.42)$$

Ved en lastfordeling tilsvarende *Statens vegvesens håndbok V138* (figur 2.22), antas høyden av snø som ligger allerede ligger på bakken $H_{snø}$ til å være 0. Momentet påført av det konstante og lineære området fra figur 2.30 er da henholdsvis:

$$M_{svv} = \frac{1}{2} b h p_{svv} \left(\frac{1}{2} h + \frac{1}{2 \cdot 2} h \right) + \frac{1}{2} b \frac{1}{2} h p_{svv} \cdot \frac{2}{3 \cdot 2} h = \frac{11}{24} b h^2 p_{svv} \quad (2.43)$$

Innsatt i ligning 2.38 gir det last før flyt lik:

$$p_{svv} = \frac{6 f_y b_{eff} t^2}{11 b h^2} \quad (2.44)$$



Figur 2.30: Skisse av jevn kraftfordeling, hydrostatisk kraftfordeling og kraftfordeling tilsvarende SVV håndbok V138.

2.7 Måleteknikk

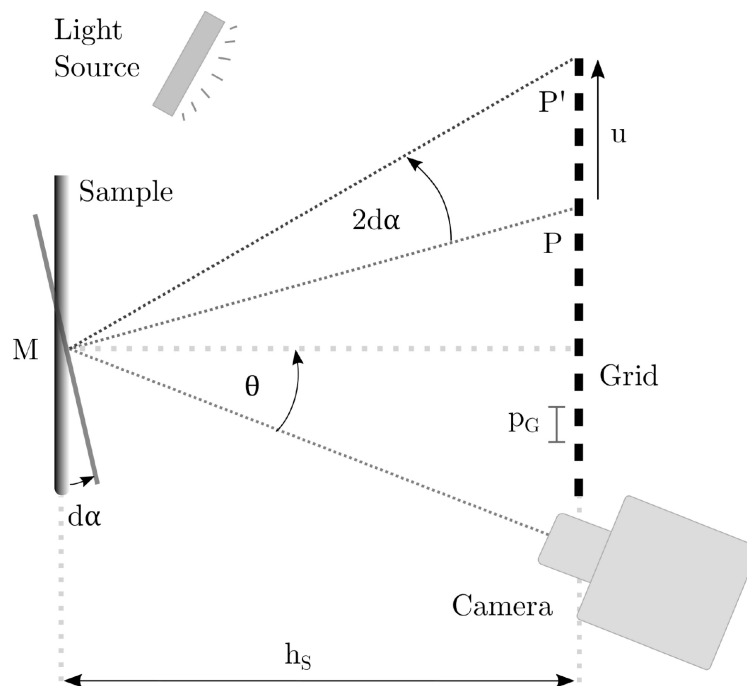
Ved design av konstruksjoner er det viktig å ha et godt bilde av hvilke krefter som kan inntreffe, og hvordan trykk fordeler seg over konstruksjonens overflate. Mens tradisjonelle målemetoder er gode på å måle trykkresultanter, gir de derimot et begrenset bilde av hvordan trykket fordeler seg [38]. En metode kalt for virtuelle felts metode gjør det mulig å rekonstruere overflatetrykk over en plate basert på overfltehelninger. Denne metoden har tidligere blitt brukt til å rekonstruere bølgelaster på en plate [38].

2.7.1 Lastceller

En populær måleteknikk for å måle kraft kalles for lastceller [38]. En lastcelle konverterer kraften om til et elektrisk signal som kan tolkes i et programvare [39]. Den mest vanlige innmaten i en lastcelle er strekkklapper. Strekkklapper virker ved at den elektriske resistansen endres når strekkklappen deformeres. Ved å sende strøm gjennom strekkklappen, for å så registrere endringene i det elektriske signalet ved last, vil det være mulig å bestemme lasten via endringen i signalet.

Dette er en populær og anerkjent målemetode, men den har også noen begrensninger. Lastcellene måler kun krefter i det punktet cellen er montert, og det gir ingen informasjon av hvordan trykket fordeler seg. Ved å plassere flere lastceller på den aktuelle overflaten kan dette gi et anslag på trykkfordelingen, men dette avgrenses blant annet av størrelsen på lastcellene, og plassen tilgjengelig. Enkelte lastceller krever at det borres hull i prøven, noe som kan endre den mekaniske egenskapen til konstruksjonen [38].

2.7.2 Oppsett virtuelle felts metode



Figur 2.31: Skisse av målemetode, hentet fra [38]

Figur 2.31 viser en konseptuell skisse av oppsettet ved virtuelle felts metode. Oppsettet baserer seg på deflektometri, som er en optisk måleteknikk for å måle overfltehelninger

[38]. Et kamera og et rutenett er plassert med en avstand, h_s , til en plate som har et speil mot rutenettet. Kameraet har en vinkel, θ , i forhold til normalen til platen. Før lasten er påført peker kameraet mot punktet M på platen, og blir reflektert så det viser punktet P på rutenettet. Etter lasten er påført får platen en utbøyning w . Denne utbøyningen vil i punktet M gi en helning $d\alpha$. Utbøyningen fører til at kameraet ser et nytt punkt P' , som er en avstand u fra det forrige punktet P . Bilder før, under og etter lastens påførsel viser hvordan helningen $d\alpha$ endrer seg underveis. For små deformasjoner er det antatt at stivlegemebevegelser normalt på plateplanet neglisjeres [38]. Størrelsen mellom samme punkt i to ruter på rutenettet kalles for p_G .

Forskyvningen u mellom punktet P og P' relateres til faseforskyvningen $d\phi$ mellom bilder fra rutenettet i udeformert og deformert tilstand [8]. Faseforskyvningen i x- og y-retning kan beregnes som følger:

$$d\phi_x = \frac{2\pi}{p_G} u_x, \quad d\phi_y = \frac{2\pi}{p_G} u_y \quad (2.45)$$

Basert på geometriske forhold og antakelse om at vinkelen θ er liten kan vinkelen $d\alpha$ beregnes ut fra:

$$d\alpha_x = \frac{u_x}{2h_s}, \quad d\alpha_y = \frac{u_y}{2h_s} \quad (2.46)$$

Rutenettet består av svarte ruter på et hvitt underlag. Ideelt for fasegjennkjenningsalgoritmen burde det vært printet en gråskala som brer seg ut i en sinusformasjon i begge retninger. Dette er en fordel da et slikt rutenett ikke vil gi uønskede høyfrekvente svigninger i fasegjennkjenningen [8]. Etttersom dette er vanskelig å få til, i god nok kvalitet med de fleste printere, blir rutenett heller printet med distinkte overganger mellom svart og hvitt. Ved å gjøre bildet ufokusert vil dette ha lignende effekt da de distinkte områdene vil bli mindre skarpe. Det kan være verdt å merke seg at signal-støy-forholdet, som forklarer styrken til ønsket signal vercus støy, går noe ned ved denne metoden.

2.7.3 Virtuelle felts metode

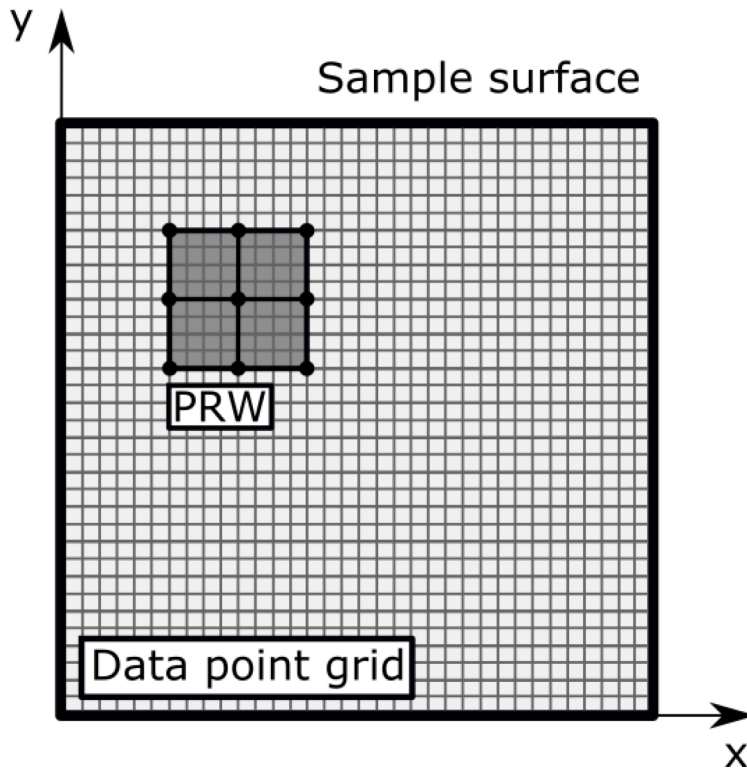
Virtuelle felts metode (VFM) er en anvendelse av prinsippet om virtuelt arbeid som gjennom målinger og kjente materialparametere kan finne belastningen på en overflate [38]. Prinsippet om virtuelt arbeid sier som følger: "Det virtuelle arbeid som utføres når en partikkel i likevekt gis en vilkårlig virtuell forskyvning er null" [40]. Med andre ord er summen av eksternt virtuelt arbeid lik summen av internt virtuelt arbeid og virtuelt arbeid fra akselerasjonen til systemet [41]. For tynne plater med liten utbøyning, og hvor tykkelsen t er mindre enn $1/10$ av bredden b og lengden L kan Love-Kirrhoff tynnplatedeori benyttes [42]. Ved å anta at platemateriale er lineært elastisk, isotropisk og homogent, kan global likevekt uttrykkes gjennom prinsippet om virtuelt arbeid som [8]:

$$\int_S p w^* dS = \rho t_S \int_S a w^* dS + D_{xx} \int_S (\kappa_{xx} \kappa_{xx}^* + \kappa_{yy} \kappa_{yy}^* + 2\kappa_{xy} \kappa_{xy}^*) dS + D_{xy} \int_S (\kappa_{xx} \kappa_{yy}^* + \kappa_{yy} \kappa_{xx}^* - 2\kappa_{xy} \kappa_{xy}^*) dS \quad (2.47)$$

Her er S definert som platens overflate, p er trykkraften, D_{xx} og D_{xy} er bøyestivheteskomponenter (isotropisk plate gir $D_{xx} = D_{yy}$), κ er kurvaturer, ρ er platematerialets tetthet, t_s er platetykkelsen og a er akselerasjonen. w^* og κ^* er virtuelle felt og kurvaturer. Venstre

side av ligningen er definert som eksternt arbeid, $W_{eksternt}$, første ledd til høyre definert som arbeid fra akselerasjon, $W_{treghet}$, og summen av de to siste leddene utgjør det interne arbeidet, $W_{internt}$. Paramterene D_{xx} , D_{xy} , ρ og t_S er gitt fra plateprodusentene, mens κ og a kommer fra beregninger av data fra deflektometrimålinger [8]. Valg av de virtuelle feltene, w^* og κ^* , avhenger av teoretiske og praktiske restriksjoner, som kontinuitet, randbetingelser samt sensitivitet mot støy [38].

Det kan være hensiktsmessig å dele overflaten inn i mindre områder, kalt for rekonstrueringsvinduer (Pressure Reconstruction Windows, fra nå av kalt PRW) [41]. De virtuelle feltene gis da kun verdi innad i PRW, og settes lik null utenfor [41]. Trykket blir beregnet i midtpunktet på hvert PRW, og ved å flytte PRW ett datapunkt om gangen til hele overflaten er dekket, vil trykket over hele overflaten bli beregnet [38, 41]. Se figur 2.32.



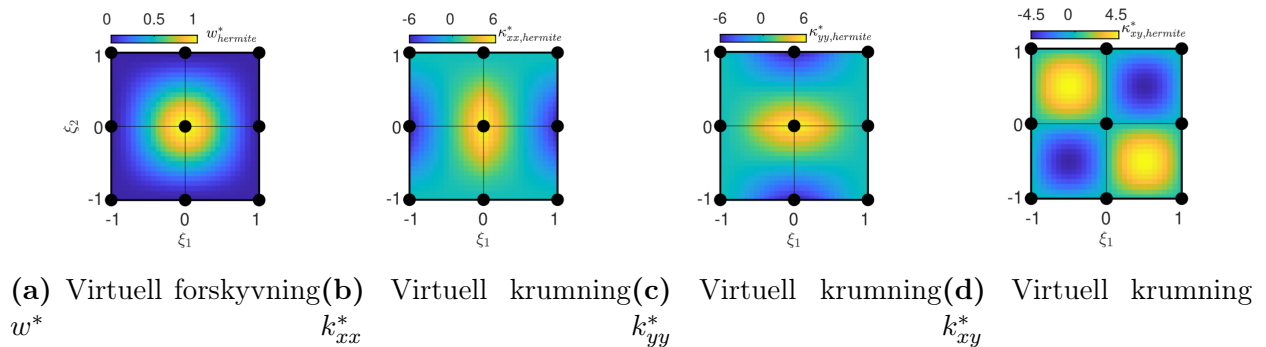
Figur 2.32: Skisse av rekonstrueringsvinduet, PRW, og overflaten. Hentet fra [38]

Ved å anta konstant trykk innad i hvert PRW kan integralet i ligning 2.47 bli gjort om til en diskret sum [38]:

$$p = \left(D_{xx} \sum_{i=1}^N (\kappa_{xx}^i \kappa_{xx}^{*i} + \kappa_{yy}^i \kappa_{yy}^{*i} + 2\kappa_{xy}^i \kappa_{xy}^{*i}) + D_{xy} \sum_{i=1}^N (\kappa_{xx}^i \kappa_{xx}^{*i} + \kappa_{yy}^i \kappa_{yy}^{*i} - 2\kappa_{xy}^i \kappa_{xy}^{*i}) + \rho t_S \sum_{i=1}^N a^i w^{*i} \right) \left(\sum_{i=1}^N w^{*i} \right)^{-1} \quad (2.48)$$

Hvor N er antall ledd. Ved å innføre virtuelle noder langs randen og i midten av PRW kan formfunksjoner fra FEM benyttes til å bestemme de virtuelle feltene [41]. Kontinuitetskravet fra FEM sier at elementet må være C^{m-1} kompatibel hvor m er derivasjonsorden i tøyingsmatrisen [42]. Etersom krumningen κ er andre deriverte av utbøyningen w er det et

krav om C^1 kontinuitet [8]. Formfunksjonene fra et Hermite 16 element oppfyller kravet om kontinuitet hvor det benyttes 9 noder med 4 frihetsgrad i hver node [41]. I tillegg reduserer disse formfunksjonene ukjente bidrag til det virtuelle arbeidet over PRW randen ved å sette alle frihetsgradene til null utenom den virtuelle utbøyningen til midtnoden som settes til en [38]. Figur 2.33 viser formfunksjonene.



Figur 2.33: Eksempel på Hermite 16 formfunksjoner hvor de svarte prikkene er virtuelle noder og ξ_1 og ξ_2 er parametriske koordinater. Hentet fra [38].

Ettersom global likevekt i ligning 2.47 reduserer derivasjonsorden av utbøyningsfeltet fra fire ved lokal likevekt (ligning 2.29) til to, reduseres støyen betraktelig [38]. Som forklart i kapittel 2.7.2 måler deflektometriet overflatehelninger, og det trengs derfor kun første ordens integrert og derivert for å oppnå utbøyninger og krumninger. Ettersom derivasjon amplifiserer støy bør helningene filtreres før kurvaturer beregnes. Et 2D Gaussian filter benyttes som er karakterisert av lengden på standardavviket σ_α [8]. Filteret fungerer som et lavpassfilter, og reduserer tilfeldig støy, men vil ha en negativ effekt ved at den minimerer trykkamplituden.

Størrelsen på PRW sammen med filterstørrelsen er de viktigste parameterne for resultatet [38]. Størrelsen på PRW påvirker blant annet oppløsningen til trykkfordelingen, og sensitiviteten mot støy [38]. Store PRW gjør at resultatet blir mer utjevnet, og kan derfor i større grad jevne ut støy, mens små PRW er mer hensiktsmessig for å oppdage trykkforskjeller over små områder.

En åpen software kan fra [43] kan benyttes.

2.7.3.1 Feilkilder

Dersom antall ruter i det avbildet rutenettet ikke er heltall kan det føre til en feil i fasegjennkjenningen [8]. Dette kan skje dersom det er en feiljustering mellom kamera og rutenettet. Det vil også bli problemer med fasegjennkjenningen ved feil eller skader på rutenettet.

En annen feilkilde kan være feil ved platematerialet [8]. Feil ved E-modul og tverrrkontraksjonstallet fører til feil amplitude for trykket. Spesielt er tykkelsen til platen viktig da platestivheten er proporsjonal med 3. potensen til tykkelsen. Selv en liten feil på 0,1% på platetykkelsen kan i verste tilfelle føre til en feil på 3% av kraftamplituden [8]. Oppskrapet speil eller dersom selve speilet ikke er 100% rett kan føre til store feil.

Størrelsen på PWR har stor betydning for resultatet. Ettersom trykket beregnes i midten av PRW, vil det derfor ikke være mulig å beregne trykket før midtpunktet av PRW som står langs randen på platen. I praksis vil dette bety at det er umulig å beregne trykket på hele platen, og trykk langs rendene på platen kan ikke bli beregnet i detalj. Store PRW vil derfor miste mer informasjon langs alle rendene i forhold til små PRW.

Viktigheten stivlegemebevegelser inn og ut av planet bør også vurderes da denne neglisjeres. Metoden baserer seg også på tynnplatteteori som krever at tykkelsen er liten sammenlignet med de andre sidekantene. Den krever også tilstrekkelig små deformasjoner. Det er ikke fastsatt hva som menes med små deformasjoner, men en grense på $0,5 \cdot t$ kan antas [44].

2.8 Hydrostatisk trykk

Det hydrostatiske trykket i en væske er trykket et sted i væsken når væsken står i ro [35]. Det kan derfor også kalles for statisk trykk. Det hydrostatiske trykket øker lineært med dybden av væsken, og kan beregnes til [35]:

$$p = p_o + \rho_w g h \quad \text{Pa} \quad (2.49)$$

Hvor p_o er trykket ved overflaten av væsken og h er dybden under overflaten til væsken [35].

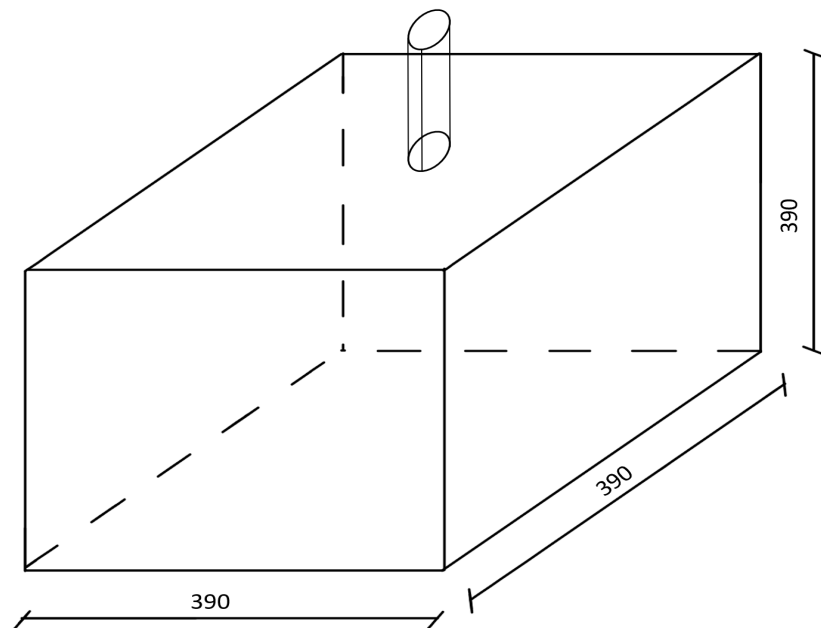
Hydrostatisk vanntrykk mot plate og måleteknikk

3.1 Vanntrykk mot plate

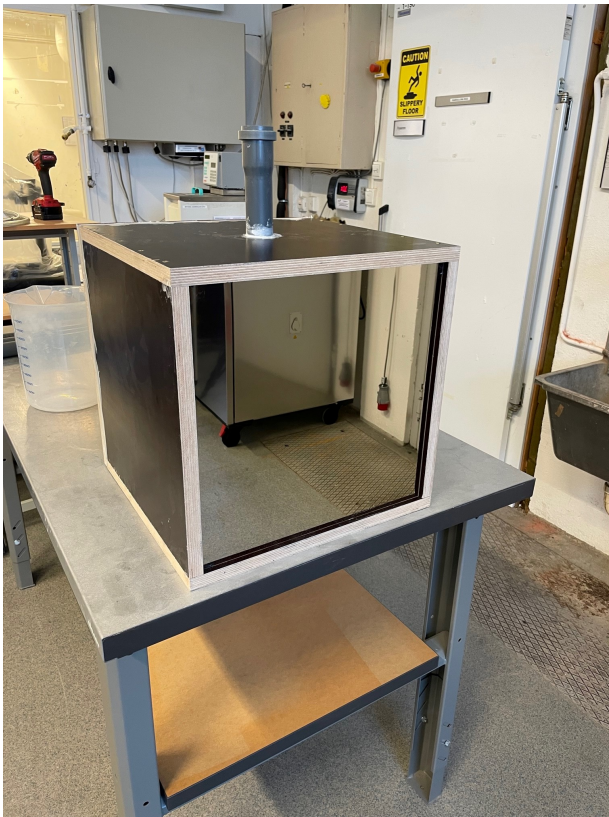
For å bli kjent med måleteknikken forklart i kapittel 2.7 ble det gjennomført et forsøk hvor en vanntett boks som ble fylt opp med vann. Hensikten med forsøket er å se om virtuelle felts metode kan bli brukt til å rekonstruere det hydrostatiske trykket på sidekantene.

3.1.1 Oppsett

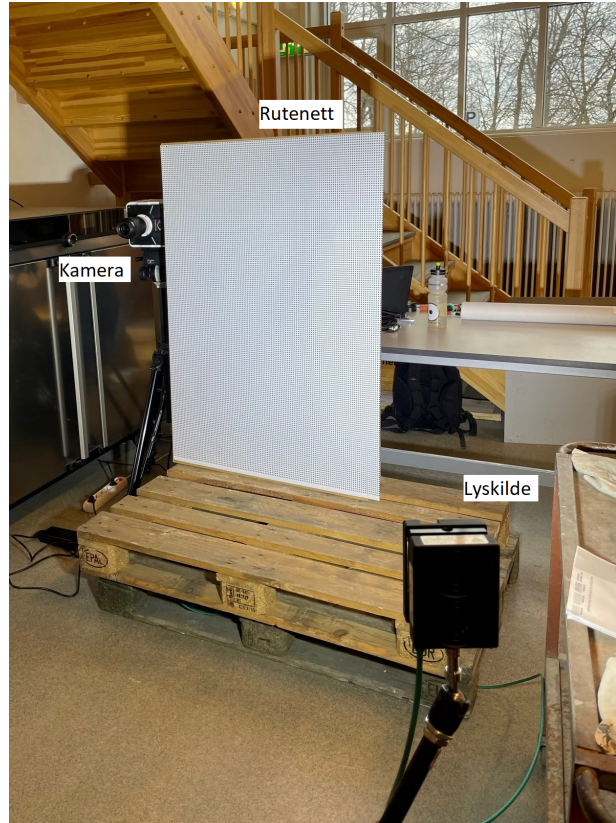
Figur 3.1 viser en skisse av boksen, hvor innvendige lengder ble målt til 390 mm . Den ene sidekanten av boksen har en speiloverflate vent utover slik at signalet fra kameraet blir reflektert mot rutenettet som står på siden av kameraet.



Figur 3.1: Skisse av boksen med sidekantlengder oppgitt i mm og rør på toppen.



(a) Vantett boks med speil vent mot kamera/rutenett.



(b) Rutenett, kamera og lyskilde.

Figur 3.2: Speilet er vent mot kameraet/rutenettet.

Figur 3.2 viser de ulike komponentene i oppsettet. Vannet fylles opp i boksen gjennom det grå plastrøret som stikker opp på toppen av boksen. Dette røret kan forlenges slik at det er mulig å øke vannsøylen utover boksens egen høyde. Etter at vannet er fylt oppi boksen vil speilet få en utbøyning, og dermed vil rutenettet få en forskyvning i forhold til referansebildet før lasten ble påført. Egenskaper og ulike komponenter brukt i forsøket er vist i tabell 3.1.

Komponent	Forklaring
Platestørrelse	400x400x3 mm (b/h/t)
Elastisitetsmodul plate	190 GPa
Tverrkontraksjonstall	0,3
Størrelse rutenett	841x1198 mm (b/h)
Størrelse ruter	7,0 mm

Tabell 3.1: Komponenter som ble benyttet under forøket.

3.1.2 Beregning av hydrostatisk trykk

Ligning 2.49 benyttes for å beregne det hydrostatiske vanntrykket på platen. Trykket på oversiden væsken er det samme på utsiden og innsiden av boksen, og p_0 settes derfor lik

null. Når boksen er full settes dybden h lik lengden av sidekanten som er $0,39\text{ m}$. På den måten beregnes trykket på bunnen av boksen lik:

$$p = 0 + 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,39 = 3825,9 \quad \text{Pa} \quad (3.1)$$

Kraften er lineært økende med dybden og lik null på toppen av plata.

3.1.3 Utbøyning av platen ved Naviers plateløsning

Naviers plateløsning, forklart i kapittel 2.5.2, ble også brukt til å kontrollere resultatene. Ut fra hydrostatisk formel er lasten $q(x, y)$ på platen gitt som konstant i x -retning og lineært økende i y -retning:

$$q(x, y) = \rho g(h + y) \quad (3.2)$$

Hvor y er høyden på vannsøylen over toppen av boksen. Innsatt i ligning 2.33 settes lastkoeffisienten q_{mn} lik:

$$q_{mn} = \frac{4\rho g}{ab} \int_0^a \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \int_0^b (h + y) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy \quad (3.3)$$

Ved å innføre like sidekanter ($a = b$) blir lastkoeffisienten etter at dobbeltintegrasjonen er utført lik:

$$q_{mn} = \frac{4\rho g}{nm\pi^2} (1 + \cos(m\pi))(h + (h + a)\cos(n\pi)) \quad (3.4)$$

Utbøyningskoeffisienten finnes ved å sette uttrykket over inn i ligning 2.35. Til slutt blir utbøyningen beregnet ved å sette utbøyningskoeffisienten inn i ligning 2.34. Dette ble løst som en løkke i Python og resultatet ble sammenlignet med analytisk løsning fra Timoshenko og Woinowsky. Koden for beregning av utbøyning w og last q midt på platen er vist under.

```
import numpy as np
#Dimensjoner platen:
a = 0.39 #sidekant
t = 3/1000 #tykkelse
mu = 0.3 # tverrkontraksjonstallet
E = 190000*10**6 #E-modul
D = E*t**3/(12*(1-mu**2)) #platestivhet

#Lastkoeffisienter
rho_v = 1000 #tetthet vann
g = 9.81 #tyngvekraft

#Grenseverdier integrasjon
dy = 1000 #antall punter i x-retning
y = np.linspace(0, a, dy)
x = y #kvadratisk
nterm = 100 #antall iterasjoner
h_vann = 0 #antall meter vann over boksen

def navier_plate(h_vann):
    h = h_vann
    w = 0 #startverdi
    q = 0 #startverdi

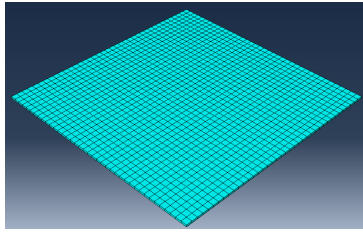
    for m in range(1, nterm+1):
        for n in range(1, nterm+1):
            x=y
            qmn = 4/(a**2)*np.trapz(np.sin(np.pi*x*m/a), x)*np.trapz(rho_v*g*(h+y)*np.sin(np.pi*y*n/a), y)
            wmn = qmn/(D*(m**2*np.pi**2/a**2+n**2*np.pi**2/a**2)**2)
            x = a/2
            w += wmn* np.sin(n*np.pi*y/a)*np.sin(m*np.pi*x/a)
            q += qmn*np.sin(n*np.pi*y/a)*np.sin(m*np.pi*x/a)

    return w, q
```

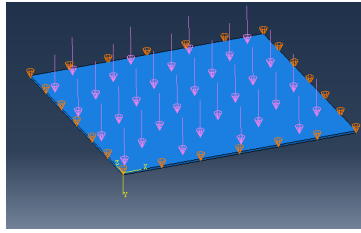
3.1.4 Modell i Abaqus

Platen ble modellert i analyseprogrammet Abaqus for å beregne utbøyning ved hydrostatisk trykk. Abaqus er et program som baserer seg på elementmetoden. Platen ble modellert med ulike volumelementer for å sammenligne egenskapene til elementene.

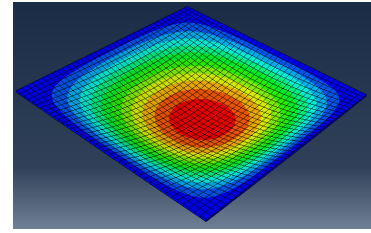
Alle meshene hadde kostant elementstørrelse på 10 mm , noe som vil si ett element over tykkelsen og 39 elementer i bredde/lengde. I tillegg ble det kjørt en analyse med $C3D8R$ elementer hvor størrelsen ble redusert til 5 mm og 4 elementer over tykkelsen.



(a) Mesh av elementer med størrelse 10 mm .



(b) Fritt opplagt plate, fastholdt i y -retning. Lasten er en hydrostatisk last.



(c) Utbøyning av platen.

Figur 3.3: Modell i Abaqus. Elementstørrelsen er på 10 mm , noe som vil si et element over tykkelsen og 39 elementer i over bredde/lengde.

3.1.4.1 Inkompatible elementer

Det ble benyttet element av typen $C3D8I$ for å modellere platen med relativt bra resultat. Dette er et 8-noders lineært volumelement som har inkompatible moder. De inkompatible modene gir bedre prestasjon for lineære elementer som er utsatt for bøyning da det legges til ekstra moder som kan bøyes [42].

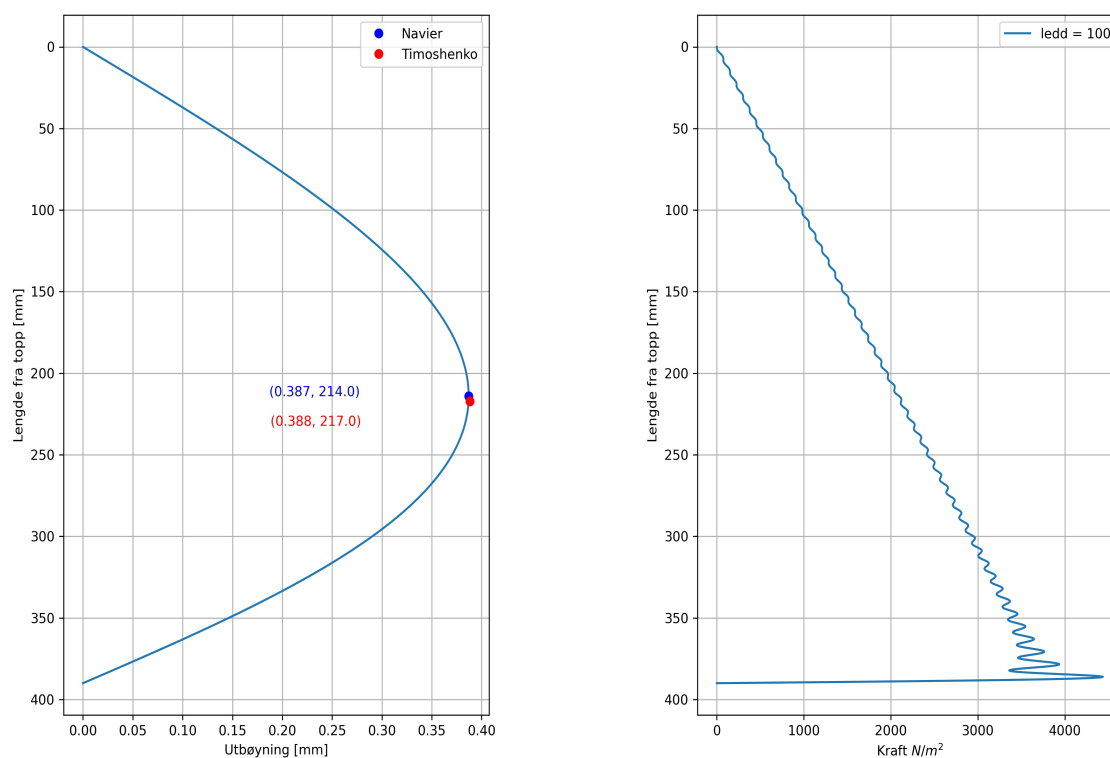
3.1.4.2 Elementer med redusert integrasjon

Det ble gjennomført to ulike elementanalyser med redusert integrasjon. De to elementene var $C3D8R$ og $C3D20R$. Dette er lineære volumelementer med henholdsvis 8 og 20 noder, som inkluderer redusert integrasjon og timeglasskontroll. Redusert integrasjon vil si at stivhetsmatrisen blir integrert med en integrasjonsregel som er en orden lavere enn full integrasjon [42]. Dette kan bedre nøyaktigheten, spesielt for lineære problemer, da redusert integrasjon gjør elementene mer fleksible, og elementmetoden generelt overestimerer stivheten [42]. Redusert integrasjon trenger også mindre prosessorkraft (CPU) som er viktig ved store analyser. Førsteordens elementer som $C3D8R$ har kun ett integrasjonspunkt, og trenger timeglasskontroll. Timeglasskontroll er viktig for er viktig for å unngå såkalte timeglassmoder hvor deformasjon skjer uten at det kreves tøyingsenergi [42]. Disse timeglassmodene kommer som en følge av singularer stivhetsmatrise \mathbf{K} [42].

3.2 Resultat ved hydrostatisk trykk

3.2.1 Utbøyning av platen

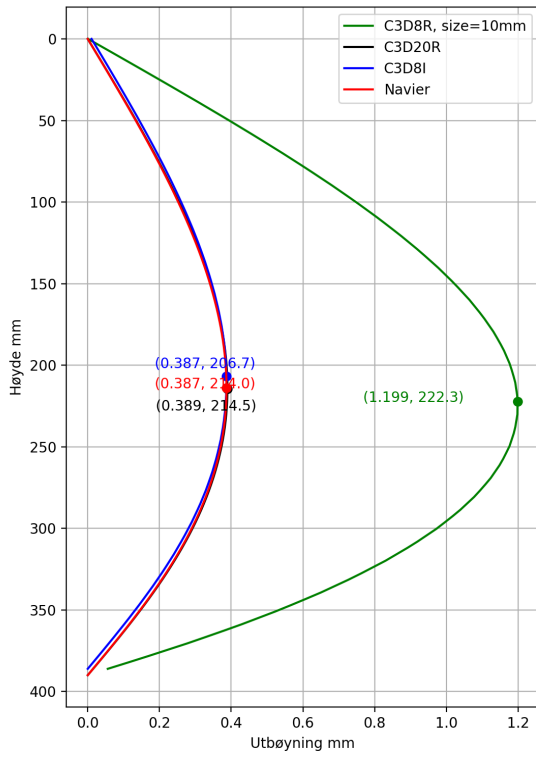
Naviers plateløsning og analytisk løsning til Timoshenko og Woinowsky er vist i figur 3.4. Her er det antatt at vanntrykket står til toppen av boksen. Etersom lasten bygges opp av trigonometriske serier, og utbøyningen er tilnærmet en halv sinusbølge, blir utbøyningen nøyaktig selv ved veldig få ledd. Kun ett ledd gir en utbøyning på $0,39\text{mm}$, men plasseringen blir midt på platen. Lasten derimot trenger fler ledd for å bli representert på en god måte.



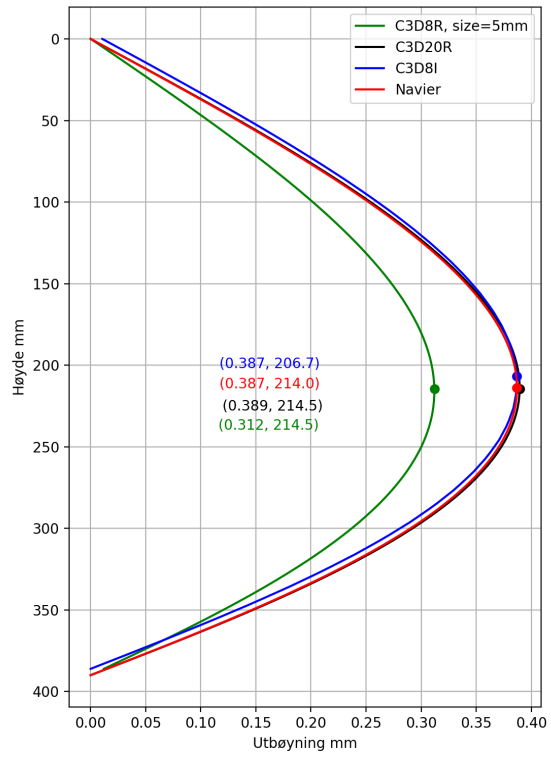
(a) Utbøyning fra Naviers plateløsning og analytisk tabulert løsning. (b) Hydrostatisk trykk beregnet ved Naviers plateløsning.

Figur 3.4: Utbøyning og fordelt trykk over høyden på platen beregnet med Naviers plate-løsning.

Figur 3.5 viser utbøyningen for de ulike modellene fra Abaqus sammenlignet med Naviers løsning. Ved figur 3.5a har alle modellene samme elementstørrelse på 10 millimeter. I figur 3.5b er elementet $C3D8R$ redusert til 5 millimeter med 4 elementer i tykkelsen. Figuren viser at $C3D20R$ elementet og $C3D8I$ elementet gir nøyaktig resultat selv med et relativt grovt mesh. Ved å redusere elementstørrelsen på $C3D8R$ elementet, gir det et bedre resultat.



(a) Alle elementene er 10mm store.

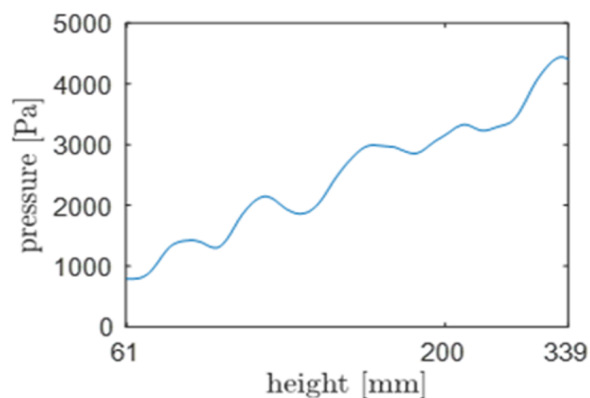


(b) C3D8R er 5mmx5mm og har 4 elementer i tykkelsen

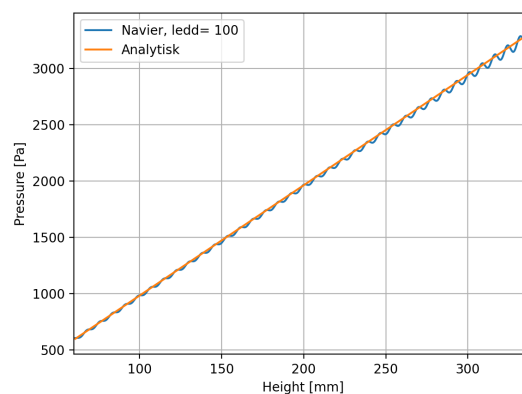
Figur 3.5: Utbøyning av Abaqusmodeller for hydrostatisk trykk.

3.2.2 Lastrekonstruering ved virtuelle felts metode

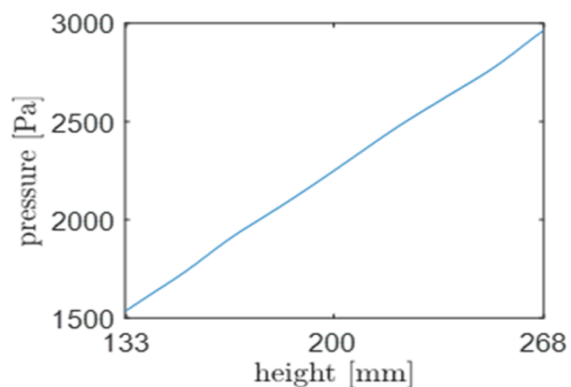
Figur 3.6 viser lastrekonstruering ved hjelp av virtuelle felts metode, last ved Naviers løsning samt eksakt analytisk last. Det er benyttet to forskjellige filterstørrelser på $\sigma = 1$ og $\sigma = 4$. Størrelsen på PRW er 20 ved $\sigma = 1$ og 60 ved $\sigma = 4$. Den rekonstruerte lasten ved virtuelle felts metode overestimerer lasten ved begge tilfellene.



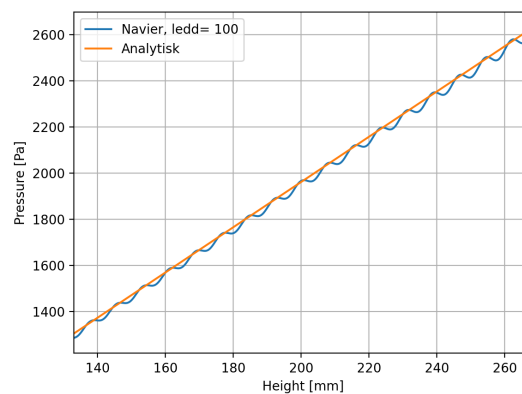
(a) Lastrekonstruering for $\sigma = 1$, figur: Rene Kaufmann



(b) Naviers løsning og eksakt løsning i området 61 mm til 339 mm



(c) Lastrekonstruering for $\sigma = 4$, figur: Rene Kaufmann



(d) Naviers løsning og eksakt løsning i området 133 mm til 268 mm

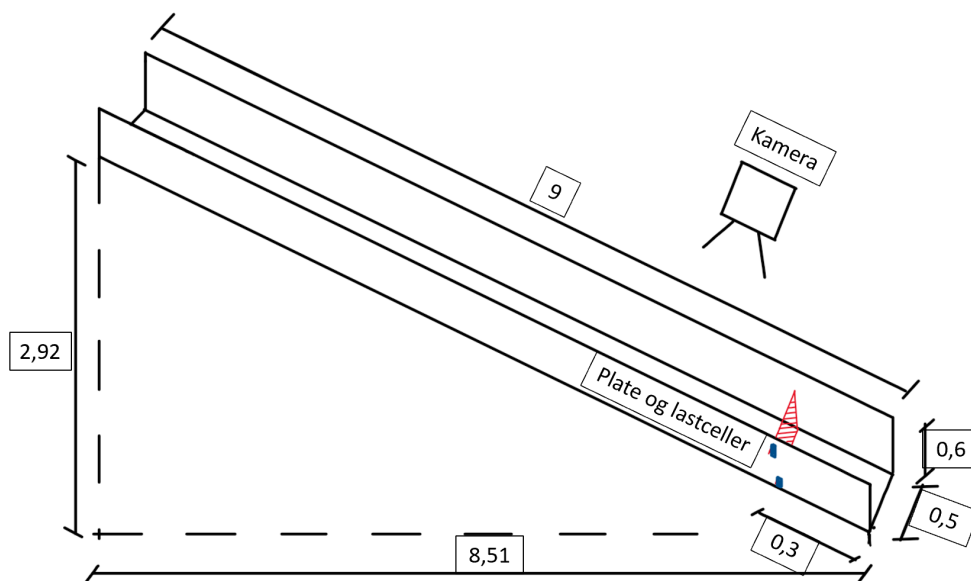
Figur 3.6: Rekonstruert og eksakt trykk for en plate påført hydrostatisk trykk.

Skredforsøk i renne

For å undersøke hvilke krefter som er involvert i et sørpeskred ble det laget en renne som det går an å sende sørpe ned i. I bunnen av rennen var det ved de fleste forsøkene montert en plate med lastceller montert i hvert hjørne.

4.1 Oppsett

Rennen var 9 m lang, $0,5\text{ m}$ bred og sideveggene var $0,6\text{ m}$ høy. Høydeforskjellen fra topp og bunn på rennen var på $2,92\text{ m}$ og rennen hadde en konstant helning på $18,9^\circ$. Ved toppen av rennen var sideveggene formet som en trakt for å gjøre det enklere å helle sørpen oppi. Skisse og bilde av renna er vist i figur 4.1 og 4.2.



Figur 4.1: Alle dimensjoner er i meter. Vinkelen på rennen er $18,9^\circ$.



Figur 4.2: Renna med trakt, før kamera og platen ble montert.

For å helle sørpa oppi renna ble det brukt *Tipcontainer AZURE 600*. Ved alle forsøkene ble containeren fylt helt opp til 600 liter. Figur 4.3 viser containeren med snø oppi.

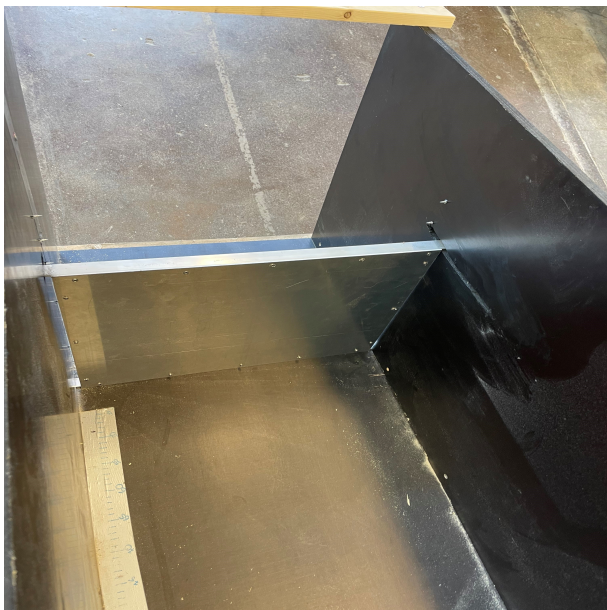


Figur 4.3: 600 liter snø i containeren.

Kombinasjonen av målebånd langs bunnen og siden av renna samt kamera på siden gjorde det mulig å estimere skredhastighet og flyte høyde. Bilder ble tatt med en frekvens på 250 bilder/sekund. Kameraet stod på venstre siden av renna sett ovenfra og ned.

Det ble totalt gjennomført 11 forskjellige forsøk. Ved de 8 første forsøkene ble en 0,49 m bred og 0,37 m høy plate plassert i renna. Platen dekket hele rennens bredde, mens høyden var litt over halve høyden til rennen. Platen var festet til en ramme som stikker ut av

rennen i hvert hjørne. Disse utstikkerne lå og hvilte på hver sin lastcelle som registrerte last gjennom forsøkene. Det var en lastcelle plassert hvert hjørne. Plate og lastceller er vist i figur 4.4. Utstikkerne holdes i posisjon på lastcellene ved hjelp av en strikk, som gir en liten forspenningskraft. Forspenningskraften nulles ut når lastmålingene starter. Lastcellene var av typen *HBM c9c sensor*, og loggefrekvensen var satt til 1200 målinger/sekund. Utenom strikkene var ikke platen festet til rennen på noen måte.



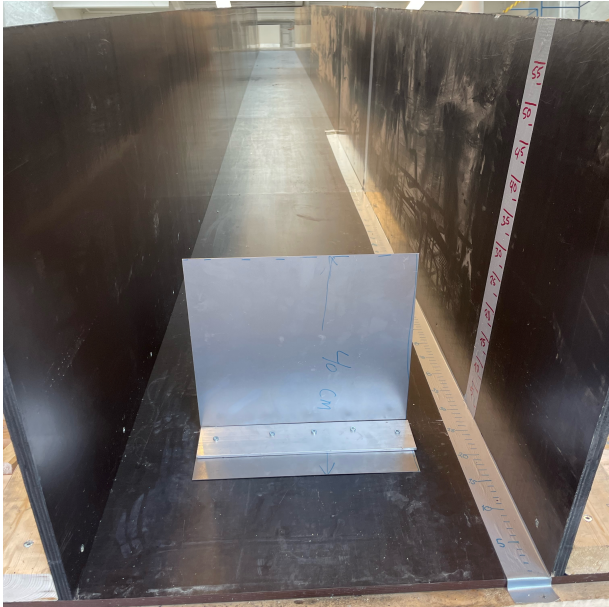
(a) Platen dekker store deler av rennens bredde, og er 0,37 m høy.



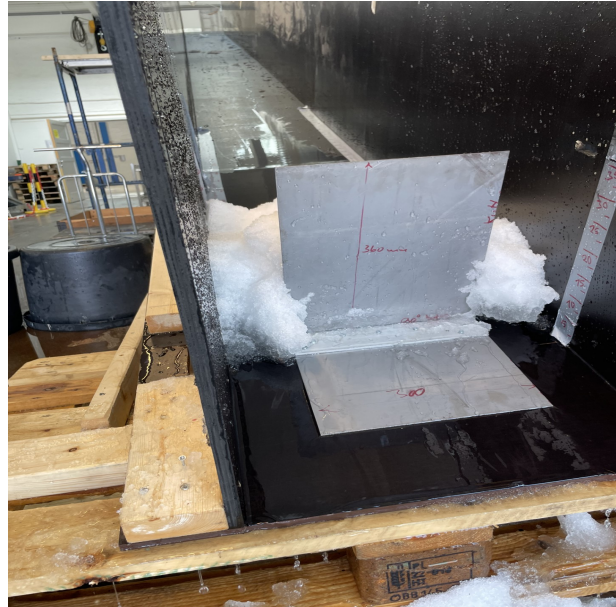
(b) Utstikkere fra rammen hviler på lastcellene, her på høyre side av renna.

Figur 4.4: Figuren viser platens plassering i rennen og utstikkerne på lastcellene.

Ved de 3 siste forsøkene ble det plassert en tynn utkraget plate i rennen. Hensikten med disse forsøkene var å se om platen gikk til flyt eller ikke. Platen var fast innspent i bunnen og fri langs de andre kantene. På bakgrunn av materialparametre, platedimensjoner og kraftfordeling på platen er det mulig å anslå hvor stor kraft som krevdes for at platen skulle flyte. Alle utkragerene var rektangulære med sidekanter lik 0,3 m. Den første utkrageren var 0,95 mm tykk, mens de to siste utkragerene var 2 mm tykke. Da det viste seg at den 2 mm tykke platen ikke gikk til flyt, ble den trimmet ned 7,5 cm på hver side. Den effektive bredden var da på 15 cm ved det siste forsøket. Figur 4.28a viser den 0,95 mm tykke platen før forsøk 9, mens figur 4.30b viser den 2 mm tykke uttrimmet platen etter forsøk 10. Figur 4.6 viser den 2 mm tykke platen etter den har blitt trimmet ned til 15 cm.



(a) 0,95 mm tykk plate før forsøk 9.



(b) 2 mm tykk plate etter forsøk 10.

Figur 4.5: 0,95 mm plate før forsøk 9 og 2 mm plate før forsøk 10.



Figur 4.6: Den 2 mm tykke platen ble trimmet 7,5 mm på hver side før forsøk 11.

4.2 Gjennomførelse av renneforsøk

Det ble hentet snø fire forskjellige dager fra to forskjellige lokasjoner. Dette førte til at snøen som ble brukt i de forskjellige forsøkene hadde forskjellige egenskaper. De to første gangene (forsøk flyt 0,95 mm og forsøk 1 – 3 med lastceller) ble snøen hentet fra en brøytehaug. Snøen bestod derfor av større blokker snø/is og steiner. De to siste gangene (forsøk 4 – 8

med lastcelle og flyt 2 mm) ble snøen hentet fra en skråning som er mindre påvirket av menneskelig aktivitet. Her bestod snøen av mindre klumper, og snøen var løsere. Mellom innhenting nummer 3 og 4 hadde snøen vært gjennom en betydelig smelteomvandling som førte til at snøen ved innhenting 4 igjen består av større isklumper. Figur 4.7a viser et utvalg av snøblandingen for forsøk 1 – 3, mens figur 4.7b viser et utvalg for forsøk 4 – 6.



(a) Snø hentet fra en brøytehaug. Diameter varierer mellom 0,5 – 10 cm.

(b) Snø hentet fra en avsidesliggende skråning. Største diameter er 3 cm, snøen er merkbart finere og løsere.

Figur 4.7: Forskjellige kornstørrelser ved ulike hentesteder.

Tettheten til snøen ved de ulike innhentingene varierte mellom $550 - 565 \text{ kg/m}^3$. Snøen var grovkornet og våt, men trengte mer vann for å få sørpeligende egenskaper. Etter at containeren ble fylt opp av snø ble det derfor tilsatt vann til ønsket tetthet. Trucken som løftet containeren registrerte vekten til containeren med sørpeblandingen. Massen m var vekten til containeren inkludert sørpe, mens containeren alene veide 80 kg . Tettheten ble da estimert til:

$$\rho = \frac{m - 80}{0,6} \quad \text{kg/m}^3 \quad (4.1)$$

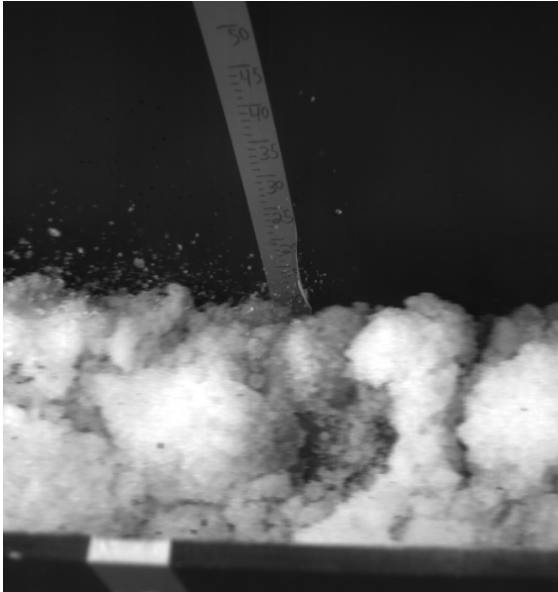
Hvor 0,6 er volumet til containeren (m^3). Figur 4.8 viser en full container av sørpe etter at snøen er tilsatt vann. Tettheten ved de ulike forsøkene varierte mellom 633 og 758 kg/m^3 , men de fleste forsøkene hadde en tetthet mellom $725 - 758 \text{ kg/m}^3$.

Ved forsøkene ble som regel snøen gjenbrukt fra forsøket før. Den gjenbrukte snøen hadde da tidligere vært tilsatt vann, men snøen har tilsynelatende god dreneringsevne, og virket upåvirket av det tidligere vannet.

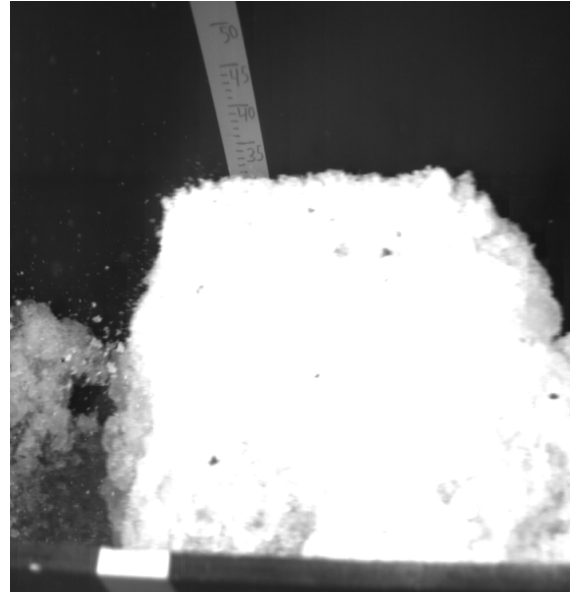


Figur 4.8: Ferdig blandet sørpe i tipcontaineren

I tillegg til forskjellige kornstørrelser ved de ulike innentingene (figur 4.7) ble det dannet større blokker av sørpe i containeren. De største klumpene ble anslått til ca 40 cm. Ettersom det ikke var en homogen sørpeblanding som kom ned rennen, var det umulig å definere en entydig flyte høyde. Det ble derfor definert en maksimal flyte høyde som tar hensyn til disse større blokkene, og en midlere flyte høyde som representerer den generelle høyden av skredet. Figur 4.9 viser forskjellen på en jevn strømning og større blokker. Figur 4.10 hvordan flyte høyden kan variere gjennom et forsøk.

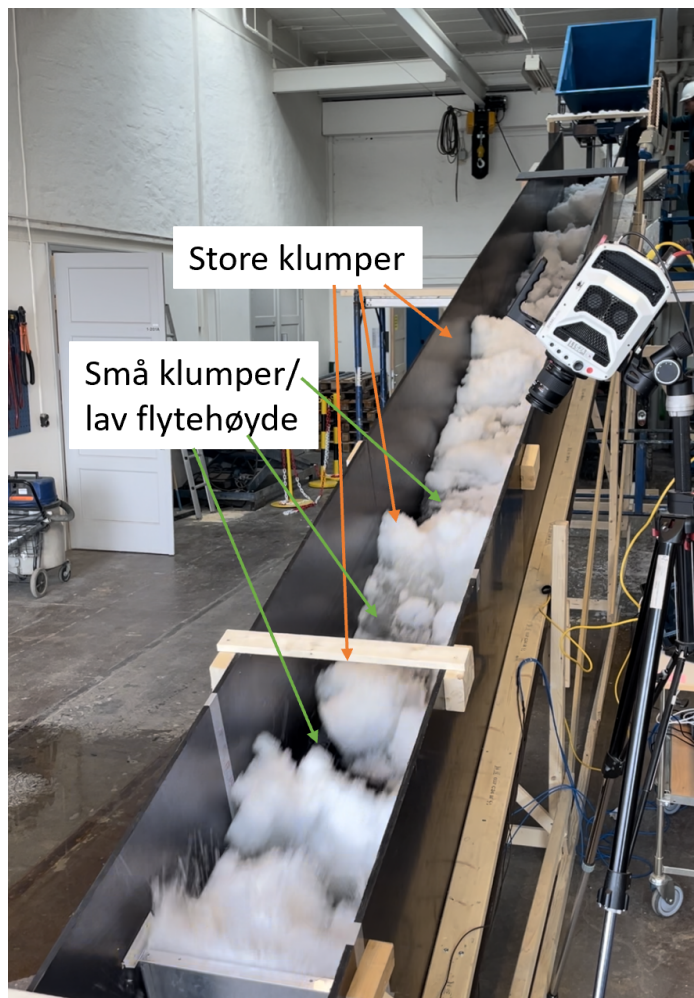


(a) Jevnere strøm, og derav midlere flyte-
høyde



(b) Større blokker av snø, derav stor flyte-
høyde

Figur 4.9: Forskjellig flyte-
høyde gjennom forsøkene, bildene er fra forsøk 2



Figur 4.10: Endring i flyte-
høyde sett forfra i forsøk4.

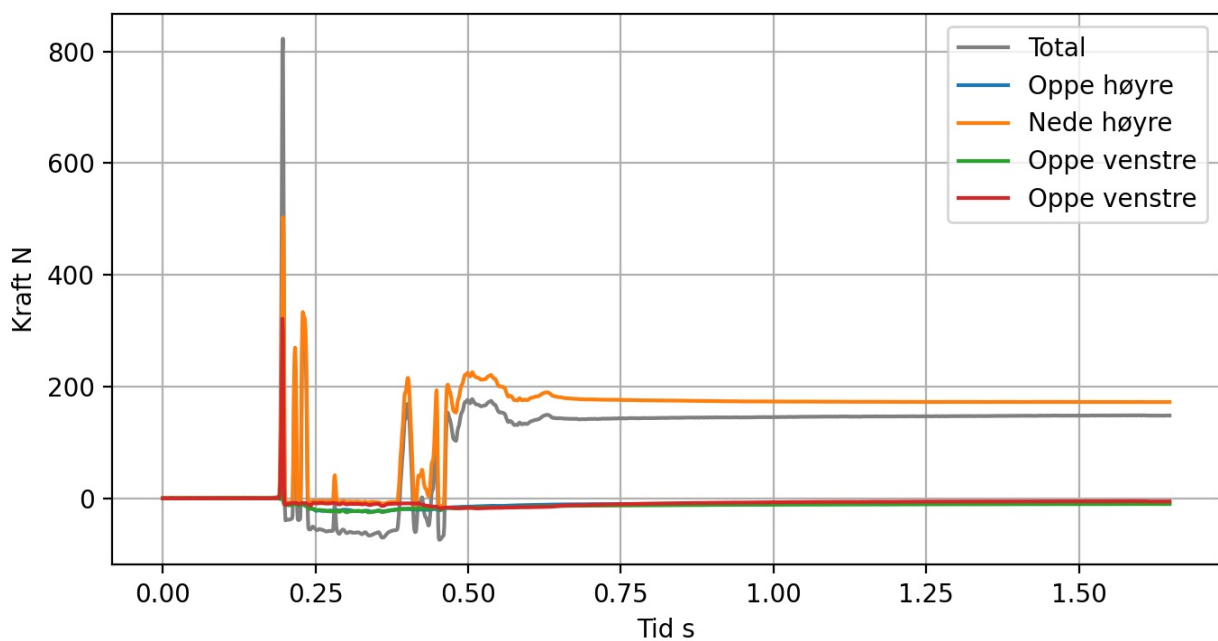
4.3 Resultat fra renneforsøk med plate

4.3.1 Forsøk 1

Ved forsøk 1 ble følgende data registrert:

- Tetthet $\rho_1 = 750,0 \text{ kg/m}^3$
- Skredhastighet $v_1 = 6,25 \text{ m/s}$
- Maksimal flyte høyde $h_{f1,maks} = 0,27 \text{ m}$
- Midlere flyte høyde $h_{f1,middel} = 0,15 \text{ m}$

Ved dette forsøket ble platen løftet av lastcellene, og målingene ble derfor ugyldig. Disse resultatene er derfor ikke tatt med i videre analyser. For at dette ikke skulle skje igjen, ble det montert en sperre for å hindre platen i å bevege seg i vertikal retning. Figur 4.11 viser lastmålingene fra forsøk 1.



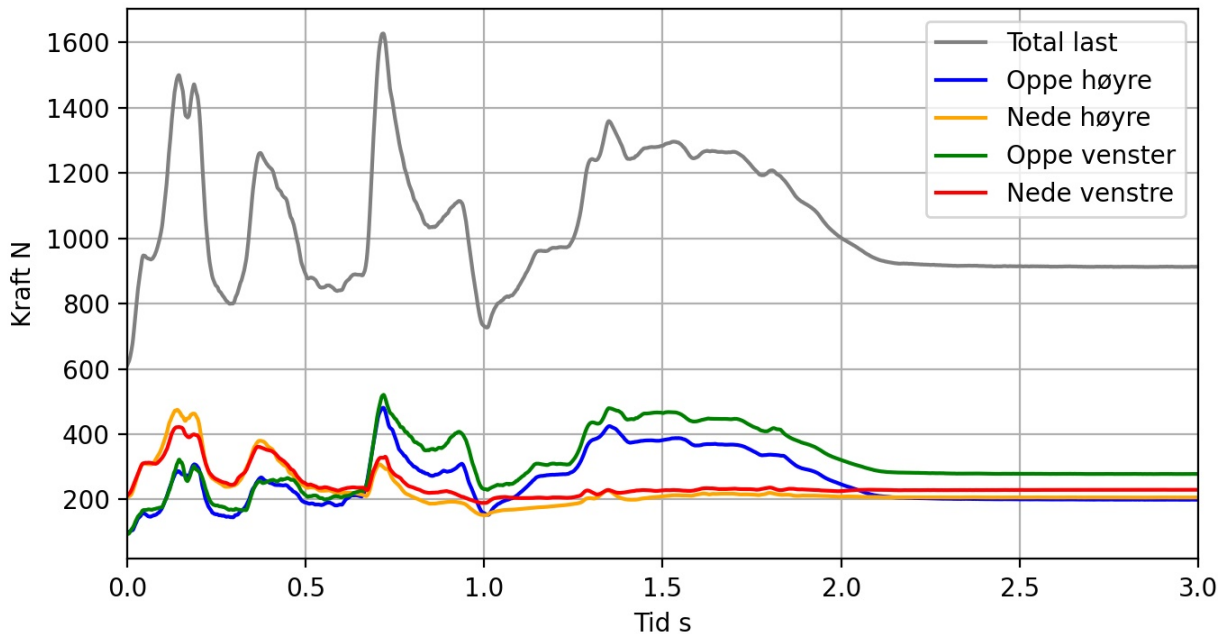
Figur 4.11: Lastmålinger fra forsøk 1.

4.3.2 Forsøk 2

Ved forsøk 2 ble følgende data registrert:

- Tetthet $\rho_2 = 750,0 \text{ kg/m}^3$
- Skredhastighet $v_2 = 5,92 \text{ m/s}$
- Maksimal flyte høyde $h_{f2,maks} = 0,30 \text{ m}$
- Midlere flyte høyde $h_{f2,middel} = 0,15 \text{ m}$

På grunn av tekniske problemer ble lastmålingene startet underveis i påkjenningen. Det er uvisst om maksimal last er registrert eller ikke. Lastmålingene er vist i figur 4.12, mens tabell 4.1 viser maksimal totallast for forsøk 2 og hvordan denne kraften fordeler seg på de nedre og øvre lastcellene.



Figur 4.12: Lastmålinger ved forsøk 2. Legg merke til hvordan kreftene ikke starter på 0, og lastmålingene startet derfor på en uvisst tid inn i forsøket.

Totallast [N]	Last nede [N]	Last oppe [N]
1627	626	1001

Tabell 4.1: Maksimal kraft og fordeling av denne kraften på de nedre og øvre lastcellene.

Store deler av snøen ved forsøk 2 var gjenbruk av snø fra forsøk 1. Sørpen ble oppfattet som våt, og hadde en stor sørpesprut etter at sørpen traff platen. Sørpen virket relativt homgen, med innslag av enkelte større blokker. Den store toppen på lastmålingene rundt 1,5 s skyldes den store blokken vist i figur 4.9b. Det ble observert en stor oppstuing av skredmasser bak platen etter at skredet stoppet opp.

Problemet med lastmålingene i starten av påkjenningen ble fikset ved å starte lastmålingene lenge før sørpen traff platen. For å unngå store mengder data ble kun data fra og med to sekunder før lasten traff platen lagret. Dataen fra disse to sekundene ble senere filtrert bort.

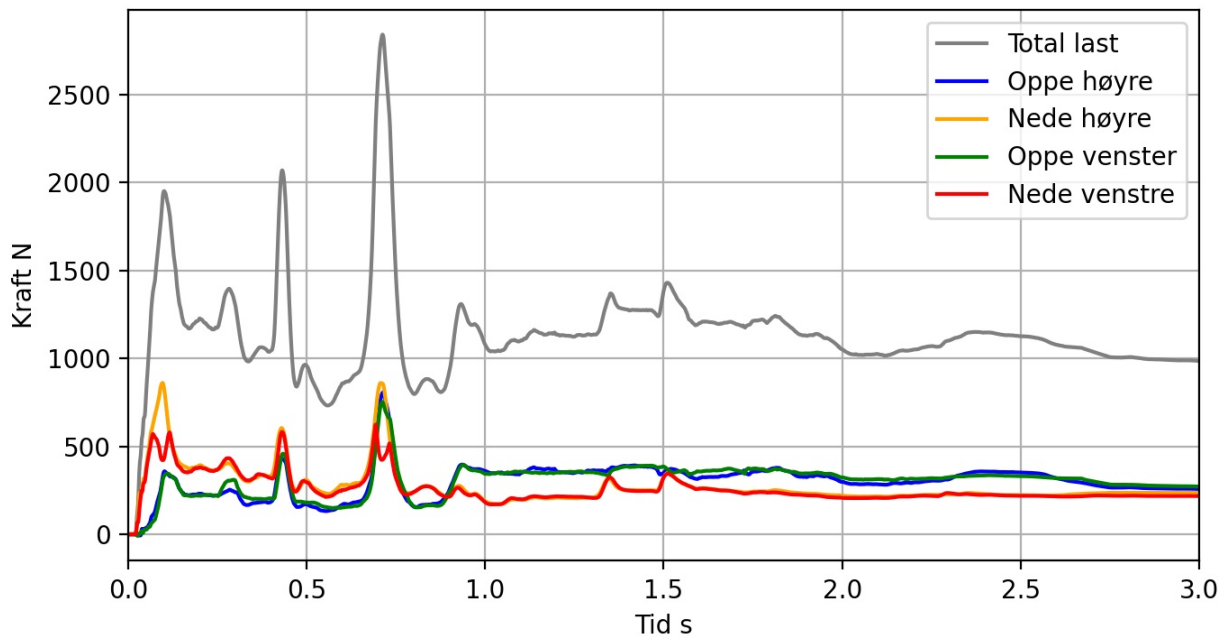
4.3.3 Forsøk 3

Ved forsøk 3 ble følgende data registrert:

- Tetthet $\rho_3 = 758,3 \text{ kg/m}^3$
- Skredhastighet $v_3 = 5,23 \text{ m/s}$

- Maksimal flyteøyde $h_{f3,maks} = 0,35 \text{ m}$
- Midlere flyteøyde $h_{f3,middel} = 0,20 \text{ m}$

Dette var forsøket som registrerte størst totallast. Figur 4.13 viser hvordan lasten fordelte seg på de ulike lastcellene de 3 første sekundene. Figuren viser at trykket er størst nede i starten, og blir størst på toppen når skredet nærmer seg å stoppe opp. Tabell 4.2 viser maksimal kraft og fordelingen av denne kraften på de øverste og nederste lastcellene.



Figur 4.13: Lastmålinger ved forsøk 3.

Totallast [N]	Last nede [N]	Last oppe [N]
2842	1283	1558

Tabell 4.2: Maksimal kraft og fordeling av denne kraften på de nedre og øvre lastcellene.

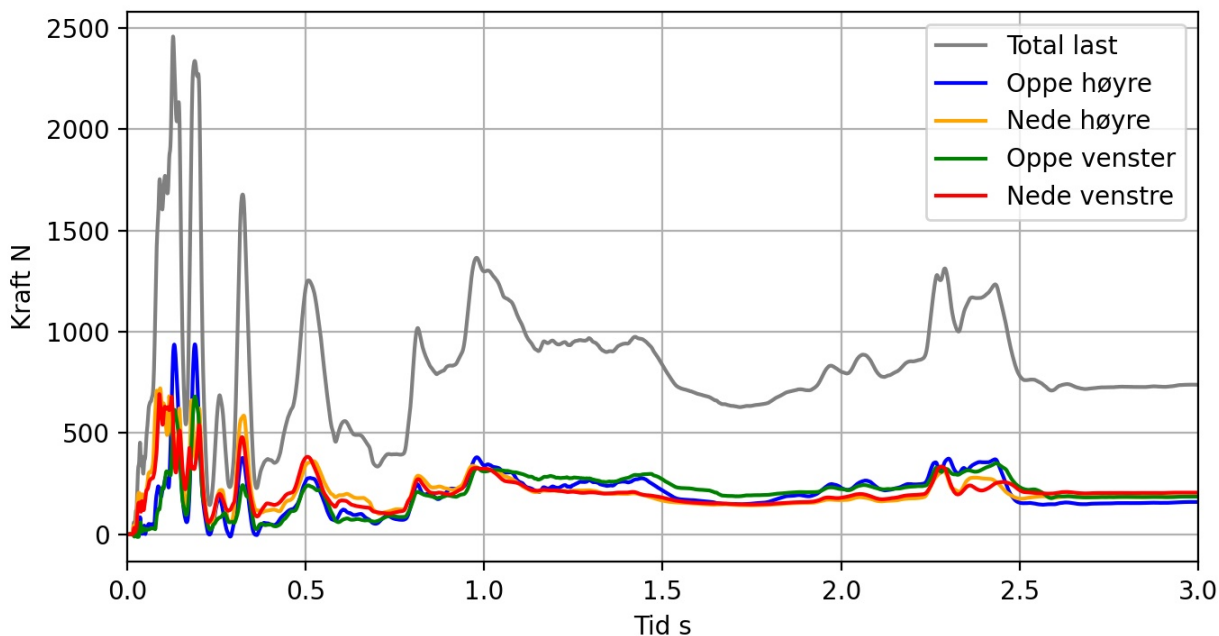
Det ble ikke gjenbrukt snø ved dette forsøket, og sørpen ble oppfattet som våt. I starten av skredet var det en jevn høy flyteøyde rundt 0,20 meter det første sekundet. Etter sørpen stoppet opp oppstod det en stor oppstuing bak platen.

4.3.4 Forsøk 4

Ved forsøk 4 ble følgende data registrert:

- Tetthet $\rho_4 = 683,3 \text{ kg/m}^3$
- Skredhastighet $v_4 = 4,90 \text{ m/s}$
- Maksimal flyteøyde $h_{f4,maks} = 0,35 \text{ m}$
- Midlere flyteøyde $h_{f4,middel} = 0,15 \text{ m}$

Dette forsøket var det forsøket med nest størst totallast til tross og en lav tetthet og en lav skredhastighet. Figur 4.14 viser lastmålingene ved dette forsøket. Figuren viser at alle lastmålingene får høye laster relativt tidlig i skredet. Tabell 4.3 viser maksimal kraft på platen og hvordan den fordeler seg på de øvre og nedre lastcellene.

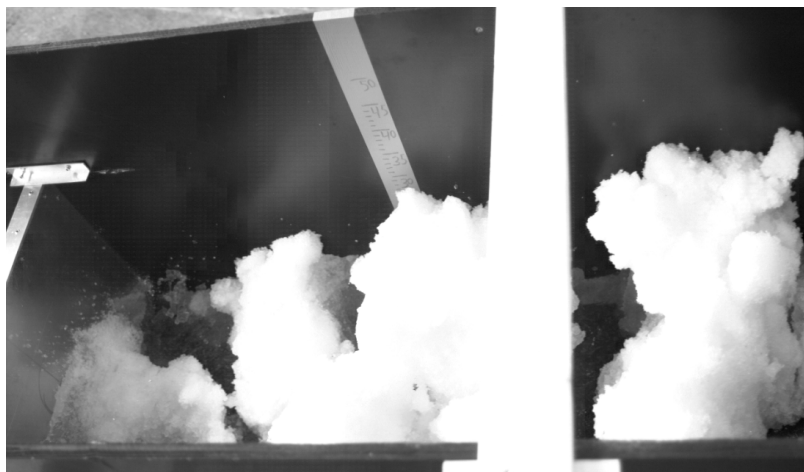


Figur 4.14: Lastmålinger ved forsøk 4.

Totallast [N]	Last nede [N]	Last oppe [N]
2457	1018	1439

Tabell 4.3: Maksimal kraft og fordeling av denne kraften på de nedre og øvre lastcellene.

Det ble observert mange store blokker i skredfronten som er grunnen til store laster i starten av skredet. Flyte høyden de første 0,2 sekundene er jevnt høy, og kan settes til 0,35 meter. Figur 4.15 viser starten av skredet.



Figur 4.15: Store blokker ble observert i starten av skredet.

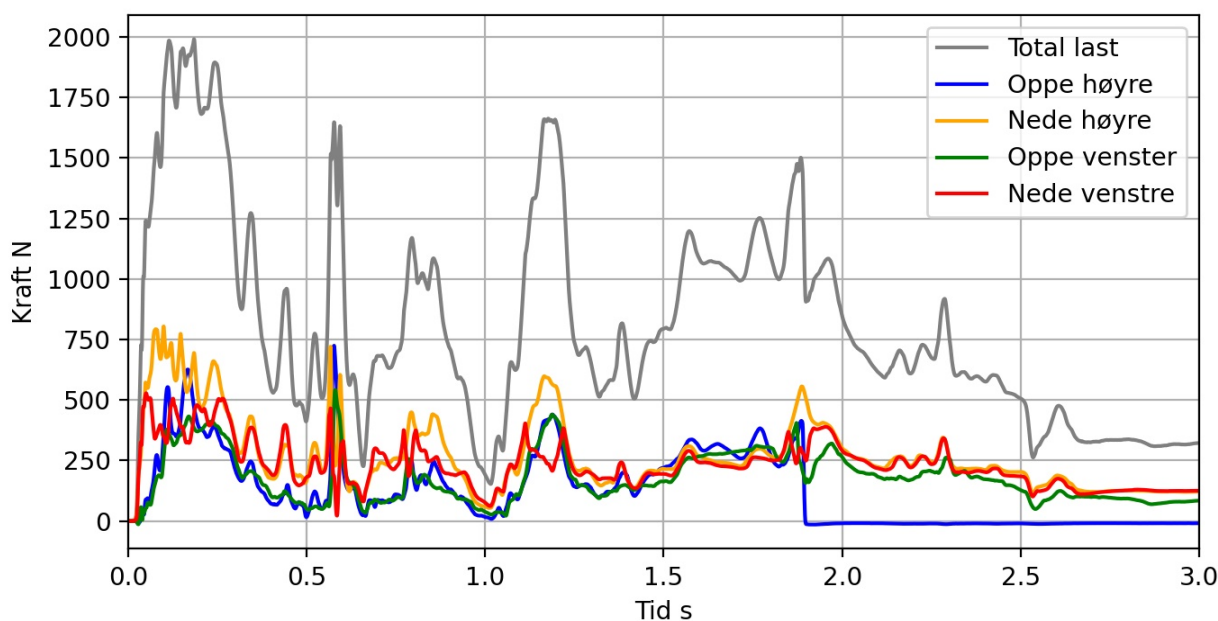
4.3.5 Forsøk 5

Ved forsøk 5 ble følgende data registrert:

- Tetthet $\rho_5 = 725,0 \text{ kg/m}^3$
- Skredhastighet $v_5 = 6,25 \text{ m/s}$
- Maksimal flyte høyde $h_{f5,maks} = 0,30 \text{ m}$
- Midlere flyte høyde $h_{f5,middel} = 0,12 \text{ m}$

Lastmålingene for dette forsøket er vist i figur 4.16. Snøen ved dette forsøket virket veldig våt. Etter sørpen traff platen ble det observert en veldig høy sørpesprut. Når sørpen stoppet opp, var det lite oppstuingen bak platen. Dette grunnet to større blokker på slutten av skredet som skjøv den oppstuede snøen over platen. De to blokkene kan ses som en topp på lastmålingene etter cirka 1,8 sekund. Figuren viser en lav statistisk last etter av skredet stoppet opp. Tabell 4.4 viser maksimal totalkraft på platen og hvordan den fordeler seg på de nedre og øvre lastcellene.

Det kan være verdt å merke seg at lastmålingene oppe høyre sluttet å virke etter cirka 1,8 sekund. Det er uvisst hvorfor dette skjedde da utstikkerne ble hindret i å flytte på seg vertikalt etter forsøk 1. Det er ingen grunn til å tro at lasten plutselig går blir 0 ett sted på platen under forsøket. Disse verdiene vil derfor bli behandlet som feilmålinger. Ved analysering av resultatene i kapittel 4.4.1 blir disse antatte feilmålingene filtrert ut.



Figur 4.16: Lastmålinger ved forsøk 5.

Totallast [N]	Last nede [N]	Last oppe [N]
1991	1135	855

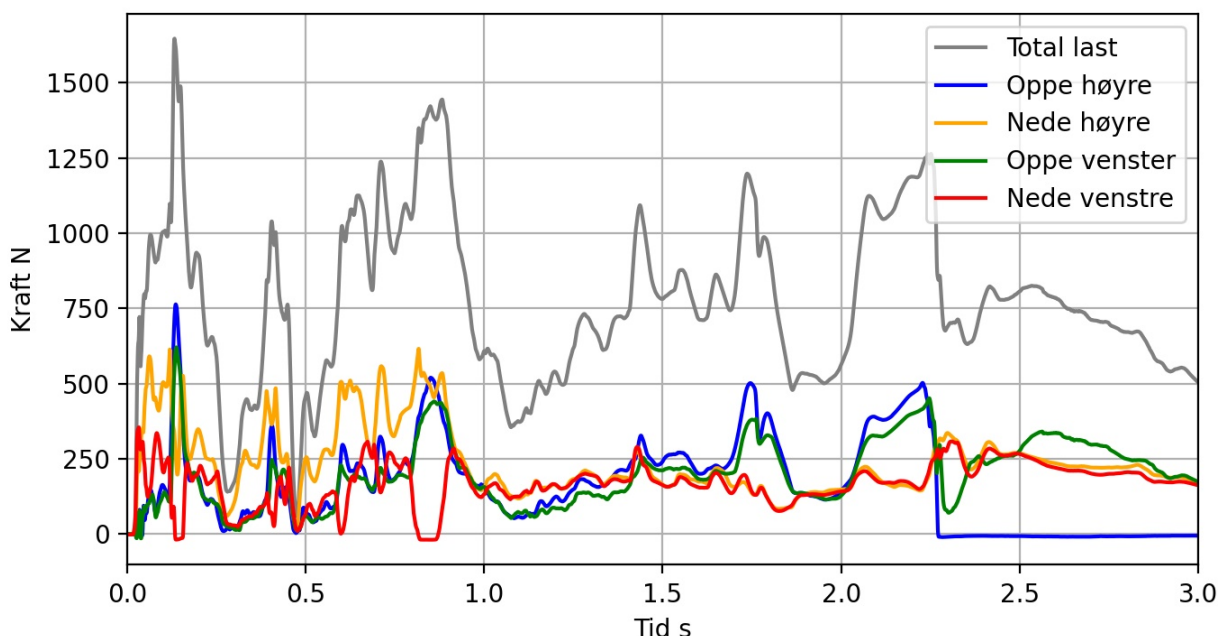
Tabell 4.4: Maksimal kraft og fordeling av denne kraften på de nedre og øvre lastcellene.

4.3.6 Forsøk 6

Ved forsøk 6 ble følgende data registrert:

- Tetthet $\rho_6 = 750,0 \text{ kg/m}^3$
- Skredhastighet $v_6 = 6,25 \text{ m/s}$
- Maksimal flyteøyde $h_{f6,maks} = 0,25 \text{ m}$
- Midlere flyteøyde $h_{f6,middel} = 0,15 \text{ m}$

Målingene fra dette forsøket er vist i figur 4.17. Bilder fra forsøket viser en jevn strøm av sørpe med lav flyteøyde, med innslag av større blokker jevnt fordelt i skredets lengderetning. Disse blokkene kan forklare den store variasjonen av last. Tabell 4.5 viser maksimal totalkraft på platen og hvordan denne kraften fordeler seg på de nedre og øvre lastcellene.



Figur 4.17: Lastmålinger ved forsøk 6.

Totallast [N]	Last nede [N]	Last oppe [N]
1647	363	1284

Tabell 4.5: Maksimal kraft og fordeling av denne kraften på de nedre og øvre lastcellene.

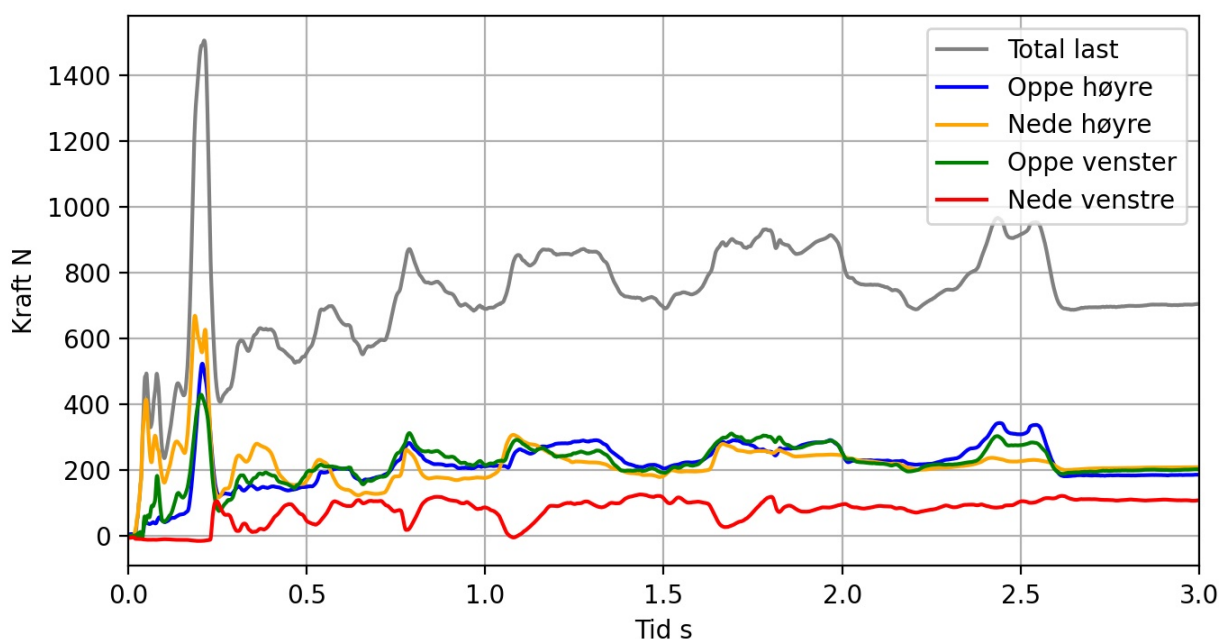
Som i forsøk 5 stoppet lastmålingen oppe høyre å virke under forsøket. Lastcellen nede til venstre dropper også ned til 0 en liten periode rundt 0,8 sekund. Dette blir behandlet som feilmålinger, og filtrert ut.

4.3.7 Forsøk 7

Ved forsøk 7 ble følgende data registrert:

- Tetthet $\rho_7 = 633,3 \text{ kg/m}^3$
- Skredhastighet $v_7 = 5,43 \text{ m/s}$
- Maksimal flyteøyde $h_{f7,maks} = 0,40 \text{ m}$
- Midlere flyteøyde $h_{f7,middel} = 0,12 \text{ m}$

Dette forsøket var det tørreste forsøket, og tettheten ble målt til $633,3 \text{ kg/m}^3$. Det ble observert lite snøsprut etter at sørpen traff platen, og sørpeblandingen så vesentlig tørrere ut enn sørpen ved de andre forsøkene. Dette var også det forsøket hvor den laveste maksimale totallasten ble registrert. Lastmålingene er vist i figur 4.18. Det er usikkert hvorfor lastmålingen nede venstre er vesentlig lavere enn de andre. Tabell 4.6 viser maksimal totallast på platen og hvordan kraften fordelte seg på de øvre og nedre lastcellene.



Figur 4.18: Lastmålinger ved forsøk 7.

Totallast [N]	Last nede [N]	Last oppe [N]
1505	595	909

Tabell 4.6: Maksimal kraft og fordeling av denne kraften på de nedre og øvre lastcellene.

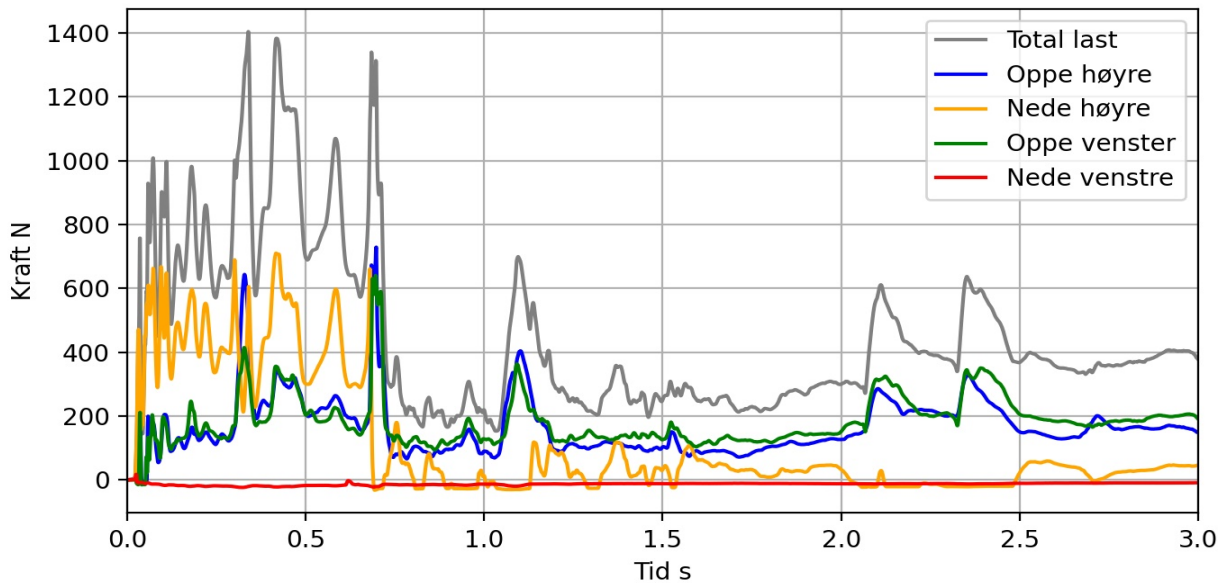
4.3.8 Forsøk 8

Ved forsøk 8 ble følgende data registrert:

- Tetthet $\rho_8 = 758,3 \text{ kg/m}^3$
- Skredhastighet $v_8 = 5,95 \text{ m/s}$
- Maksimal flyteøyde $h_{f8,maks} = 0,25 \text{ m}$

- Midlere flyte høyde $h_{fs,middel} = 0,10 \text{ m}$

Ved dette forsøket gikk rammen, som platen var festet på, til brudd. Dette førte til at lastcellen nede til venstre ikke registrerte last. Figur 4.19 viser lastmålingene ved forsøk 8. Figur 4.20 viser hvordan rammen ser ut, og hvordan utstikkeren ikke påfører noe kraft på lastcellen etter forsøket. Dette forsøket blir derfor ikke tatt med i videre analyser. Det kan likevel være verdt å merke seg at dette sørpen ved dette forsøket var veldig våt, og de tre andre lastcellene har tidvis høye laster.



Figur 4.19: Lastmålinger ved forsøk 8.



(a) Her har rammen gått til brudd.



(b) Utstikkeren har ikke i kontakt med lastcellen.

Figur 4.20: Rammen og lastcellen ved forsøk 8.

4.4 Analyse av resultatene

4.4.1 Oppsummering

Tabell 4.7 viser en oppsummering av forsøkene med lastcellene, mens tabell 4.8 gir en beskrivelse av sørpen og sørpens bevegelse. Maks totalkraft er maksimalt målte verdi når alle lastcellene er summert.

Forsøk nr	Maks totalkraft [N]	Jevn flyte­høyde [m]	Hastighet [m/s]	Tetthet [kg/m ³]
1	-	0,15	6,25	750
2	1628	0,15	5,92	750
3	2842	0,20	5,23	758
4	2457	0,15	4,90	683
5	1991	0,12	6,25	725
6	1647	0,15	6,25	750
7	1505	0,12	5,43	633
8	-	0,08	5,95	758

Tabell 4.7: Oppsummering av viktige hovedpunkt.

Forsøk	Blokker	Våt/Tørr	Sørpesprut	Oppstuing
1		Relativt vått	Relativt høy sørpesprut	Relativt stor oppstuing
2	Innslag av større blokker	Relativt vått	Relativt høy sørpesprut	Stor oppstuing
3	Innslag av noen større blokker	Vått	Relativt høy sørpesprut	Stor oppstuing
4	Mange store blokker	Relativt tørt	Relativt høy sørpesprut	Stor oppstuing
5	Mange mellomstore blokker	Vått	Høy sørpesprut	Liten oppstuing
6	Innslag av mellomstore blokker	Vått	Høy sørpesprut	Lite oppstuing
7	Mange store blokker	Veldig tørt	Liten sørpesprut	Relativt liten oppstuing
8		Veldig vått	Høy sørpesprut	

Tabell 4.8: Beskrivelse av sørpen.

4.4.2 Beskrivelse av sørpens bevegelse

Figur 4.21 viser sørpens bevegelse forfra. Figuren viser hvordan sørpen går fra en strømmende masse (figur 4.21a), til sørpesprut (figur 4.21b), og til slutt en oppstuing bak platen (figur 4.21c). Figur 4.22 viser samme forsøk hvor vinkelen er skrått bak platen. Figur 4.22a er rett før det første sammenstøtet. Etter sammenstøtet oppstår det en sørpesprut som vist i

figur 4.22b. Sørpen som kommer ned rennen i dette tidspunktet treffer platen over skredets flyte høyde. Figur 4.22b er tatt 2 sekunder etter sammenstøtet. Her er det tydelig at det ligger skredmasser foran platen. Sørpen kommer fortsatt inn og treffer skredmassen med den samme flyte høyden, men sørpen taper energi på å akselerere de oppstuede skredmassene. Den blå pila i figur 4.22b viser retningen som den innkomne sørpen og skredmassene får, etter at store blokker treffer skredmassene. Tapet av energi fører til å redusere de dynamiske topplastene. Tiden det tar fra sørpen treffer platen til skredmassene har stabilisert seg varierer mellom 2 – 2,5 sekund for de fleste forsøkene. De største punktlastene oppstår derimot innen det første sekundet.



(a) Rett før sammenstøt.

(b) Sørpesprut.

(c) Nedfallsområdet til sørpen.

Figur 4.21: Sørpens bevegelse sett forfra.

(a) Rett før sammenstøt.

(b) Sørpesprut.

(c) Retning på den innkomne sørpen.

Figur 4.22: Sørpens bevegelse sett bakfra.

4.4.3 Filtrering av feilmålinger

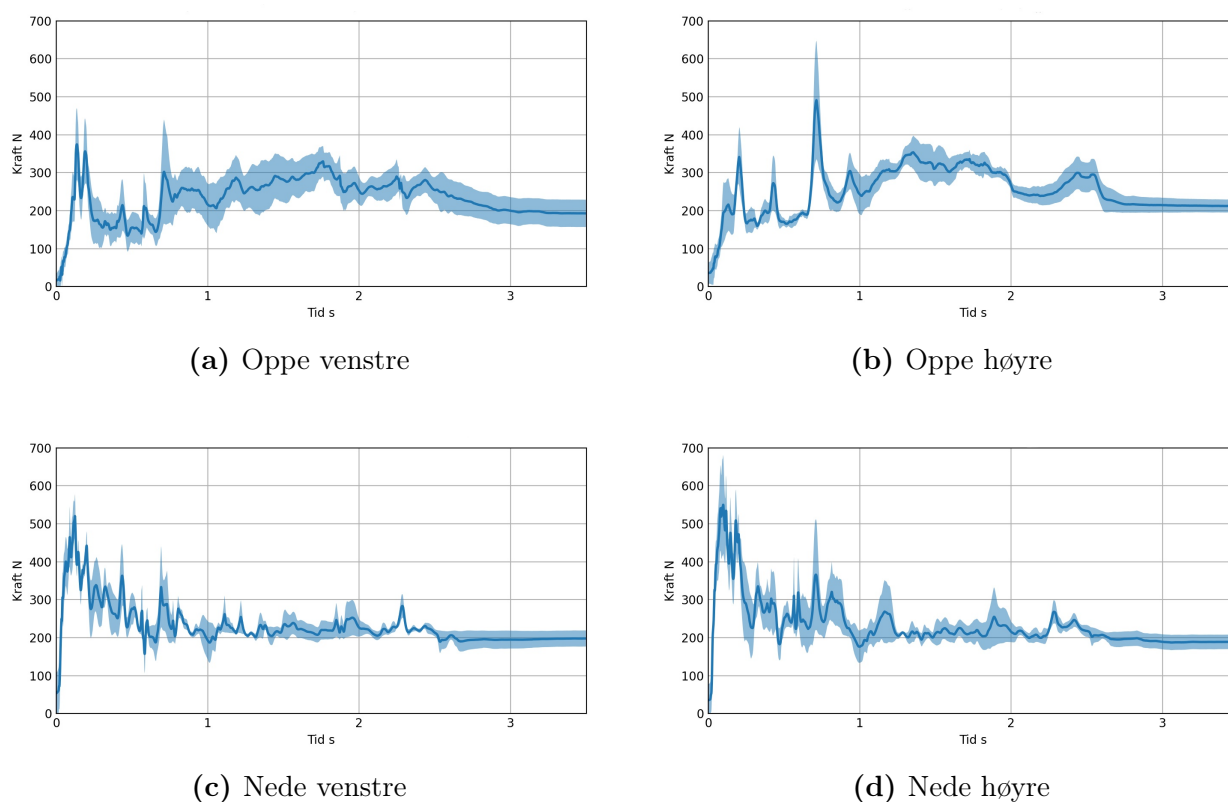
Ved beregning av gjennomsnittsmålinger og standardavvik er det nødvendig å filtrere bort feilmålinger fra forsøk 5 og forsøk 6. Dette gjøres ved å anta at en måling er en feilmåling dersom verdien er under en minsteverdi på $10 N$. Målinger etter $0,05 s$ eller mer, som i tillegg er under denne verdien blir ikke tatt med i beregning av gjennomsnitt og standardavvik. Dette gjelder hovedsaklig for forsøk 5 og 6.

Ved måling av det statiske trykket er verdien på lastcellen oppe høyre satt lik verdien til lastcellen oppe venstre for forsøk 5 og 6. Sammenlignet med de andre forsøkene er dette en grei antakelse.

4.4.4 Gjennomsnittsverdier og standardavvik

Ettersom de maksimale lastene endrer seg mye mellom hvert forsøk, utfra blokkstørrelse, hastighet og tetthet, kan det være fordelaktig å se på et gjennomsnitt over mange forsøk. Dersom det skal opparbeides en designkode mot sørpeskred, vil det være naturlig å se på et gjennomsnitt, for å så legge til en sikkerhetsfaktor for å dekke ekstremtilfeller.

Figur 4.23 viser gjennomsnittet og standardavviket for hver lastcelle de 3, 5 første sekundene. Lasten øker raskt på de to nederste lastcellene, før de tidlig i skredet når sin maksimale verdi. Etter dette synker kraften nede på platen, og kraften tilnærmer seg en statisk last etter 2,5 sekund. På toppen av platen er trenden at det trykket bygger seg opp over tid. Dette kan skyldes den oppstuede skredmassen og den oppadrettede bevegelsen til sørpen.

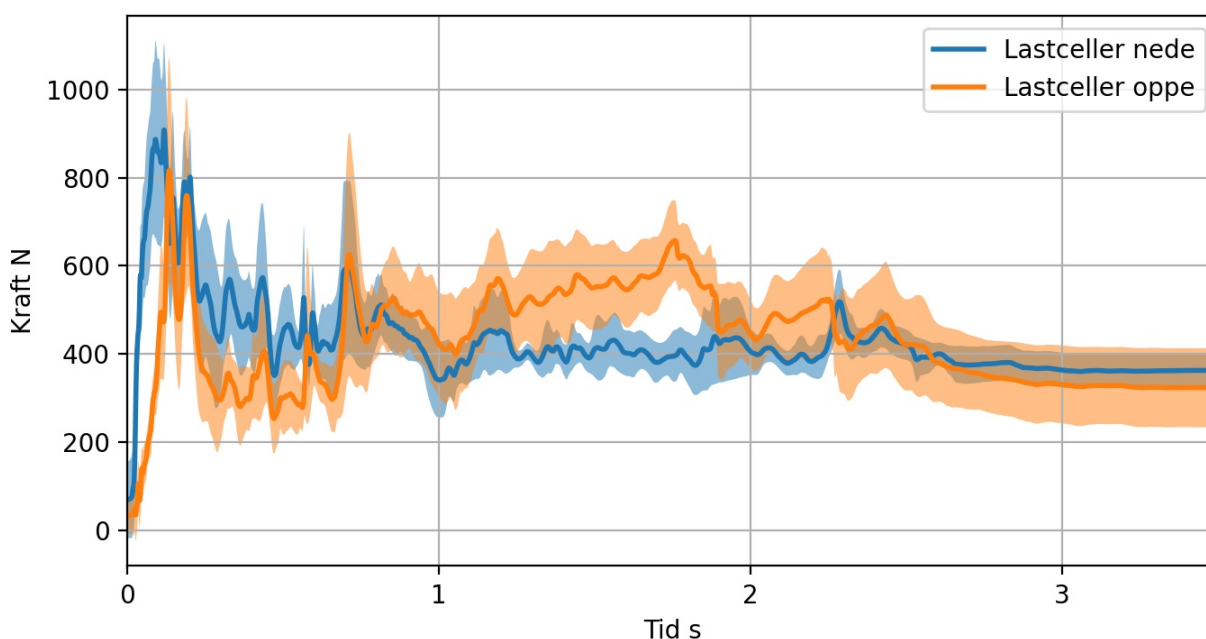


Figur 4.23: Gjennomsnitt og standardavvik for de ulike lastcellene. Standardavviket er det skraverte området.

Figur 4.24 viser gjennomsnitt og standardavvik av lastcellene oppe og nede. Lasten for de

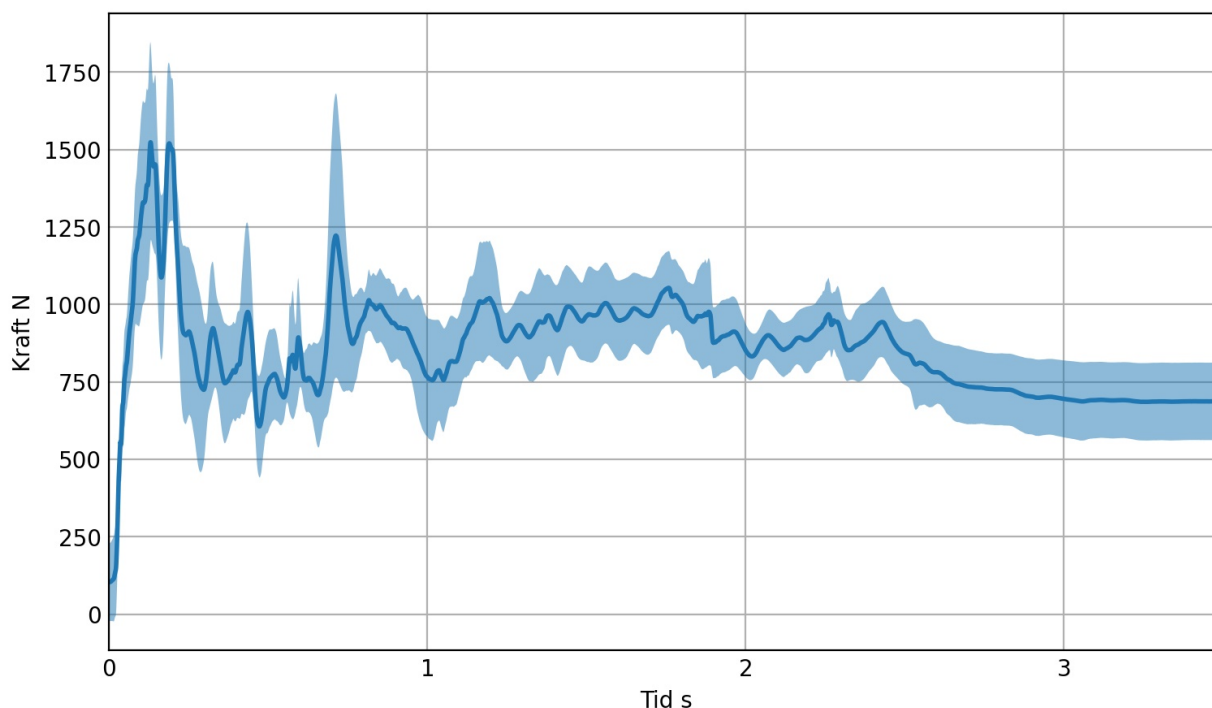
to nedre og de to øvre lastcellene er summert for hvert forsøk før det er beregnet gjennomsnitt og standardavvik av alle forsøkene. Figuren viser at lasten øker noe raskere nede på platen, og maksimal kraft nede på platen skjer etter 0,12 sekund og er på 908 Newton. På toppen av platen tar det 0,13 sekund før maksimal kraft oppnås på 816 Newton.

Figuren viser også hvordan kreftene raskt avtar etter å ha nådd sitt maksimale. På toppen av platen begynner derimot kreftene å øke igjen etter cirka 0,3. Denne økningen skyldes, som nevnt over, oppstuingen av skredmassene som ligger og dekker platen. Den innkomne skredmassen bruker da energi på å skyve unna den oppstuede skredmassen, og ettersom rennen og platen er tett, må den oppstuede massen bevege seg oppover.



Figur 4.24: Gjennomsnitt og standardavvik for lastcellene oppe og nede.

Ved å summere alle lastcellene i hvert forsøk til en totallast, er gjennomsnittet og standardavviket av forsøkene vist i figur 4.25. Figuren viser at totallasten øker raskt før den når sitt maksimale etter 0,13 sekund på 1524 Newton. Etter å ha nådd maksimal totallast dropper lasten fort ned igjen og fluktuerer mellom 900 – 1000 Newton før den etter 2,5 sekund tilnærmer seg en statisk last. Det jevne droppet av totallast etter 2,5 s skyldes et dropp i det hydrostatiske trykket da vannet bak platen forsvinner. Maksimal totallast og fordelingen av den på de øvre og nedre lastcellene er gitt tabell 4.9. Tabellen viser at lasten er omtrent jevnt fordelt for de øvre og nedre lastcellene. Ved å dividere maksimal totallast på platens areal finnes en jevnt fordelt totallast på 8,52 *kPa*.



Figur 4.25: Gjennomsnitt og standardavvik av totallast.

Maksiamal totallast [N]	Last nede [N]	Last oppe [N]	Jevnt fordelt [kPa]
1524	744	780	8,52

Tabell 4.9: Totallast og lastfordeling for gjennomsnittslast.

4.4.5 Trykkbelastninger fra beregningsmodeller

For å finne det fordelte trykket på platen er det nødvendig å definere hvilket areal kraften virker over. Som lastmålingene viser, fordeler kraften seg ulikt over platens høyde gjennom tid. Ved det første sammenstøtet kan skredets midlere flyte høyde være definert som påkjent høyde. Figur 4.24 viser at trykket øker raskest nede på platen rett etter det første sammenstøtet. Som vist ved hvert forsøk (kapittel 4.3.2 - 4.3.7) er maksimal totallast ofte fordelt slik at det er størst last på de øverste lastcellene. Ved maksimal gjennomsnittslast er lasten fordelt omtrent likt på lastcellene oppe og nede.

Når skredet stopper opp viser figur 4.24 at det statiske trykket virker omtrent like mye oppe som nede. Det er da naturlig å velge hele platens areal som påkjent areal.

4.4.5.1 Dynamiske beregningsmodeller for snøskred

Beregningsmodellene beskrevet i kapittel 2.4.3 gjelder for snøskred. Tabell 4.10 viser maksimalt målt trykk for de ulike forsøkene, og beregnet trykk for de ulike beregningsmodellene. I beregningene er det tatt hensyn til de aktuelle tetthetene og skredhastighetene gitt i kapittel 4.3.

Fordelt trykk over platens høyde, p_{plate} , i tabell 4.10 er definert som:

$$p_{plate} = \frac{F_{maks}}{A} = \frac{F_{maks}}{0,49 \cdot 0,37} = \frac{F_{maks}}{0,179} \quad \text{Pa} \quad (4.2)$$

Hvor F_{maks} er definert som den målte maksimale totallasten ved hvert forsøk. Til sammenligning er p_{middel} den fordelte lasten fra maksimal totallast dividert på midlere flyte høyde for hvert forsøk $p_{middel} = F_{maks}/h_{f,middel}$. Koeffisienten k er beregnet etter formel 2.17.

Forsøk nr	p_{plate}	p_{middel}	p_{svv}	p_{bred}	k_{plate}	k_{jevn}
2	9,1	22,1	52,6	26,3	0,35	0,84
3	15,9	29,0	41,5	20,7	0,77	1,40
4	13,7	33,4	32,8	16,4	0,84	2,03
5	11,1	33,9	56,6	28,3	0,39	1,20
6	9,2	22,4	58,6	29,3	0,31	0,79
7	8,4	25,6	37,4	18,6	0,45	1,37

Tabell 4.10: Fordelt trykk fra målinger og beregningsmodeller for snøskred. Verdier for trykk er i kPa .

4.4.5.2 Beregningsmodeller for løsmasseskred

Tabell 4.11 viser beregnet krefter for beregningsmodellene tilpasset løsmasseskred beskrevet i kapittel 2.4.4. Tettheter, flyte høyder og skredhastigheter er hentet fra de aktuelle forsøkene. Beregningsmodellene p_{huho} og p_{cous} inneholder begge leddet h_f , og i tabellen er denne satt til $h_{f,plate}$ ettersom maksimal totallast opptrer med lik kraft oppe og nede. De empiriske faktorene k_{stat} og k_{hyd} er funnet ved å dividere det målte trykket på den aktuelle tettheten, gravitasjonskonstanten og påkjent høyde. k_{stat} blir da:

$$k_{stat} = \frac{p_{plate}}{\rho g h_{plate}} \quad (4.3)$$

mens k_{hyd} blir:

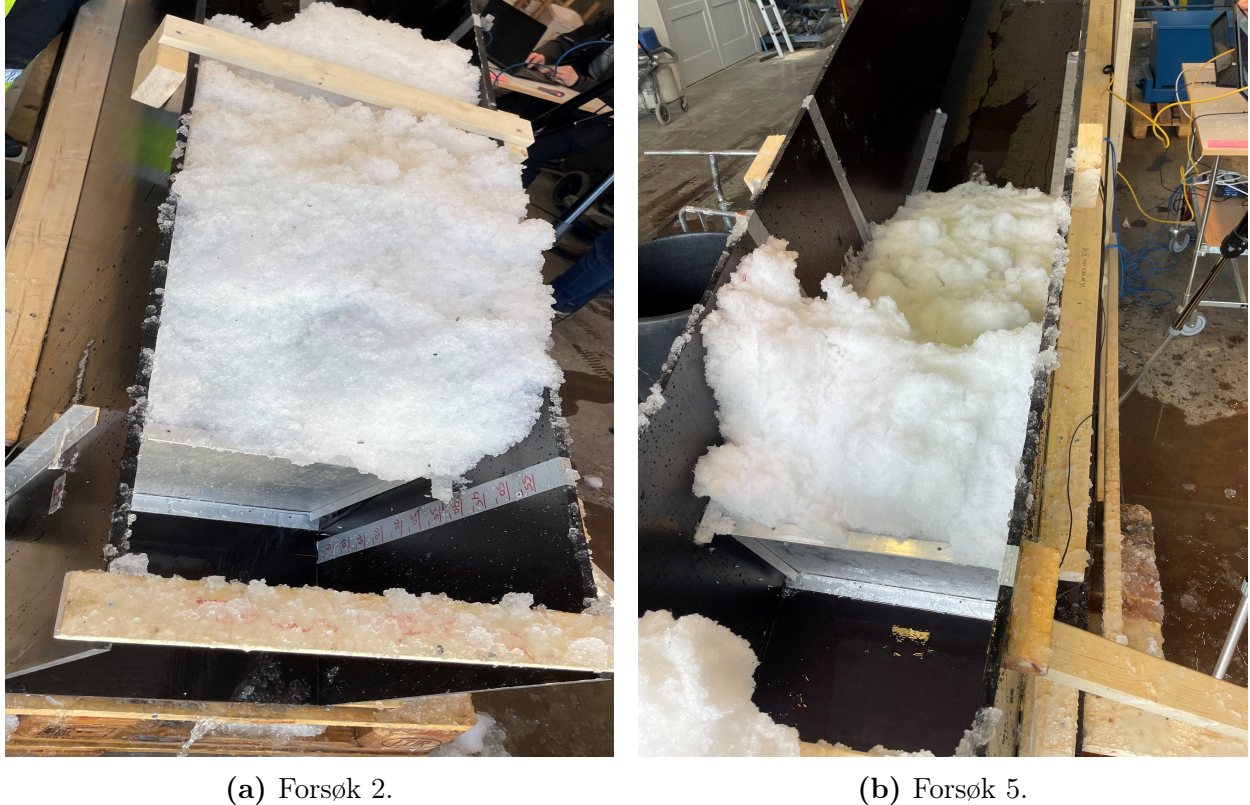
$$k_{hyd} = \frac{p_{plate}}{\rho_w g h_{plate}} \quad (4.4)$$

Forsøk nr	p_{plate}	p_{jevn}	p_{huho}	p_{cous}	k_{stat}	k_{hyd}
2	9,1	22,1	30,1	27,6	3,39	2,54
3	15,9	29,0	27,6	22,0	5,85	4,44
4	13,7	33,4	23,6	17,6	5,62	3,84
5	11,1	33,9	30,4	29,6	4,29	3,11
6	9,2	22,4	31,4	30,6	3,43	2,57
7	8,4	25,6	23,7	19,8	3,71	2,35

Tabell 4.11: Fordelt trykk fra målinger og beregningsmodeller for løsmasseskred. Verdier for trykk er i kPa .

4.4.5.3 Statiske beregningsmodeller snøskred

Etter snøen har stabilisert seg etter 2 – 3 sekund er det påført et statisk trykk på platen. Denne lasten kommer som følge av oppstuingen av skredmasser bak platen. Figur 4.26 viser oppstuingen bak platen fra forsøk 2 og 5.



Figur 4.26: Oppstuing av skredmasser bak platen. Oppstuingen ved forsøk 2 var betydelig større enn ved forsøk 5.

Platens påkjenning som følge av setninger kan beregnes etter formel 2.12. Den vertikale snøhøyden, h_s varierer ved de forskjellige forsøkene, og er gitt i tabell 4.12.

Verdier av sigefaktor og glidefaktor kan bestemmes i henhold til [34]. Utfra sørpens tetthet og rennens helning beregnes sigefaktor $k = 0,64$. Ettersom sørpen ved dette forsøket ikke er eksponert for sol, og platene antas glatte, settes glidefaktoren til $N = 2,6$. Setningskraften kan da settes lik:

$$S'_N = \rho g \frac{h_s^2}{2} KN \frac{b}{A} = 9,81 \cdot \frac{h_s^2}{2} 0,64 \cdot 2,6 \cdot \frac{0,49}{0,18} \cdot \rho = 22,36 h_s^2 \rho \quad (4.5)$$

Ettersom den statiske lasten beregnes etter at snøen har stoppet opp, kommer det ikke ny snø på toppen av skredmassene. Derfor settes vekt av nye skredmasser $\sigma = 0$.

Det aktive snøtrykket, forklart i kapittel 2.4.2.5, kan beregnes til:

$$p_{aktiv} = \rho g h_s k_a = 9,81 \cdot 0,65 \cdot h_s \rho = 6,38 h_s \rho \quad (4.6)$$

Statiske krefter for de ulike beregningsmodellene er gitt i tabell 4.12. Det målte statiske trykket blir beregnet ved å dividere den statiske totalkraften på platens areal, og kalles $p_{statisk}$.

Forsøk	$p_{statisk}$	h_s	ρ	S'_N	p_{aktiv}
2	5,11	0,60	750	6,04	2,87
3	5,42	0,60	758	6,10	2,90
4	4,15	0,60	683	5,50	2,61
5	2,74	0,37	725	2,26	1,69
6	2,98	0,55	750	5,07	2,63
7	3,99	0,60	633	5,10	2,43

Tabell 4.12: Målte verdier og beregnede verdier for statisk snøtrykk i kPa .

Til sammenligning er det hydrostatiske trykket p fra ligning 2.49, dersom vanntrykket stor over hele platens høyde lik:

$$p = \rho_w g h_{plate} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,37/1000 = 3,58 \quad \text{kPa} \quad (4.7)$$

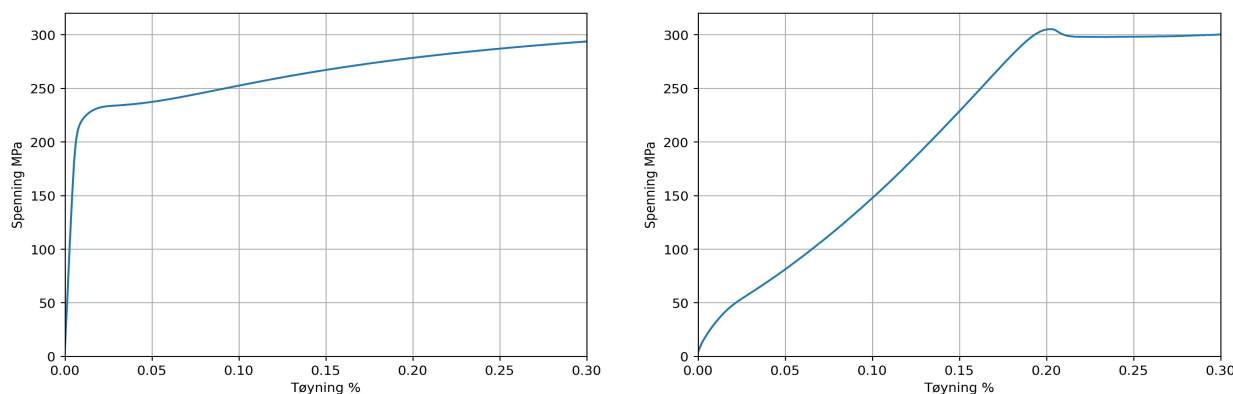
4.5 Resultater fra utkrager i renne

Ved forsøk 9, 10 og 11 ble en utkraget plate plassert i rennen for å se om den gikk til flyt eller ikke. Tabell 4.13 viser viktig data registrert ved forsøk 9, 10 og 11.

Forsøk	Tetthet	Skredhastighet	Midlere flyte høyde	Maksimal flyte høyde
9	683,4	5,70	0,15	0,30
10	733,3	7,14	0,15	0,33
11	733,3	5,62	0,25	0,35

Tabell 4.13: Tetthet, skredhastighet og flyte høyde til forsøk 9, 10 og 11.

En strekktest av de to platene gav flytespenningen til de forskjellige platematerialene. Spenning-tøyningsdiagrammet til 0,95 mm og 2 mm platene er vis i figur 4.27. Flytespenningen er på henholdsvis 233 MPa og 305 MPa.



(a) Spenning-tøyningsdiagramm for forsøk 9. (b) Spenning-tøyningsdiagramm for forsøk 10 og 11.

Figur 4.27: Spenning-tøyningsdiagramm for de ulike platene.

På bakgrunn av ligningene utledet i kapittel 2.6 er det mulig å beregne hvilket trykk som skulle til for at platen skulle flyte. Ved å sette $b_{eff} = b = 0,3 m$ for forsøk 9 og 10, og $b_{eff} = b - 2 \cdot 0,075 = 0,15 m$ for forsøk 11, er minste trykk før flyt vist i tabell 4.14. Det er beregnet minste trykk for $h_f = h_{f,middel}$ og $h_f = h_{f,plate}$.

Forsøk	Belastet høyde	p_{jevnt} [kPa]	p_{hyd} [kPa]	p_{svv} [kPa]
9	$h = h_{f9,middel}$	4,67	14,02	5,10
9	$h = h_{f9,plate}$	1,17	3,50	1,27
10	$h = h_{f10,middel}$	27,11	81,33	29,58
10	$h = h_{f10,plate}$	6,78	20,33	7,39
11	$h = h_{f11,middel}$	4,88	14,64	5,32
11	$h = h_{f11,plate}$	3,39	10,17	3,70

Tabell 4.14: Minste trykk før flyt i forhold til belastet høyde og trykkfordeling.

4.5.0.1 0,95 millimeter plate

Figur 4.28 viser den 0,95 millimeter tykke platen plassert i rennen før og etter forsøk 9 er gjennomført, mens figur 4.29 viser forsøk 9 rett før og etter første sammenstøt. Det er tydelig at platen gikk til flyt, og fikk store deformasjoner tidlig i skredet.

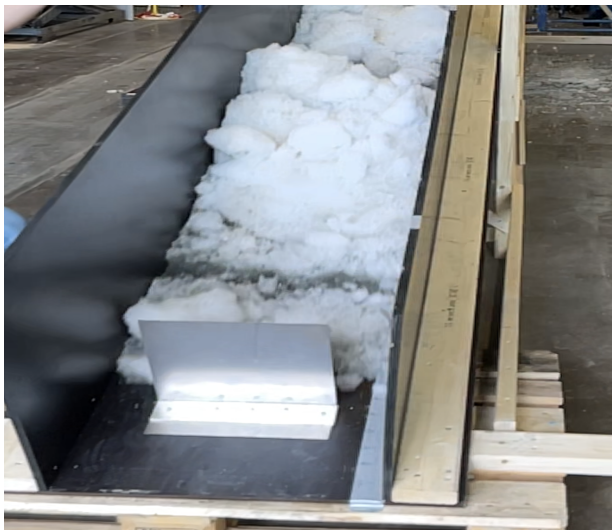


(a) 0,95 millimeter plate før forsøk 9.

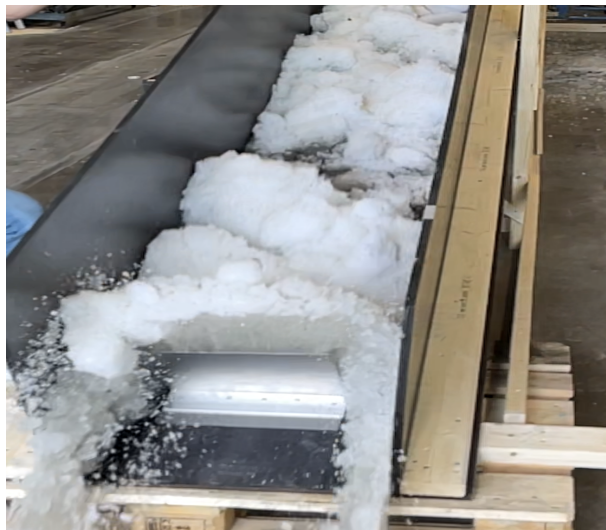


(b) 0,95 millimeter plate etter forsøk 9.

Figur 4.28: Den 0,95 mm tykke platen før og etter forsøk 9.



(a) 0,95 millimeter plate før første sammenstøt.



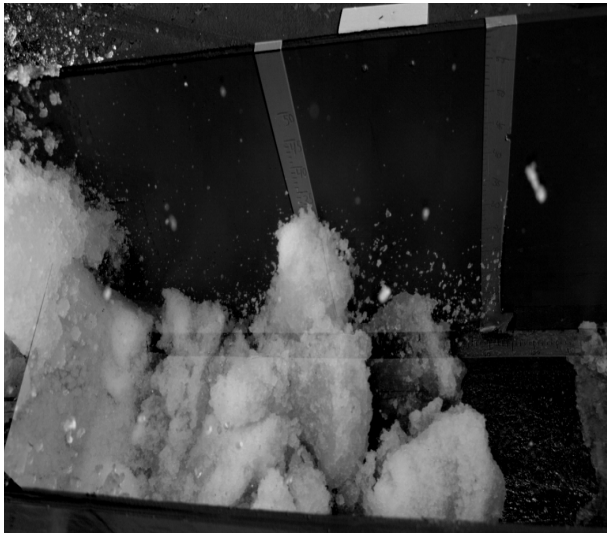
(b) 0,95 millimeter plate etter første sammenstøt.

Figur 4.29: Store deformasjoner i starten av skredet.

4.5.0.2 2 millimeter utrimmet plate

Ved forsøk 10 gikk ikke den 2 millimeter tykke platen til flyt. I dette forsøket ble det observert at sørpen hadde større muligheter til å bevege seg rundt platen. Figur 4.30 viser hvordan sørpen går rundt platen. Selv om det var tendenser til større blokker ved forsøk

10, var blokkene vesentlig mindre massive sammenlignet med forsøk 11. Figur 4.31 viser skredfronten til forsøk 10 og 11. Etersom sørpen kunne bevege seg rundt platen oppstode det ingen oppstuing foran platen.

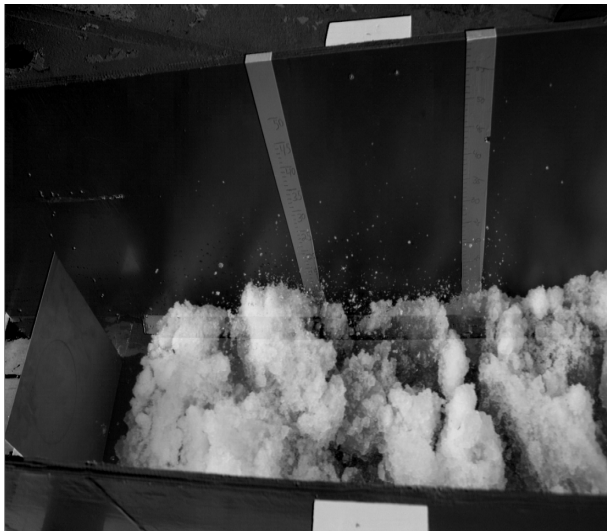


(a) Det oppstår lite oppstuing foran platen.

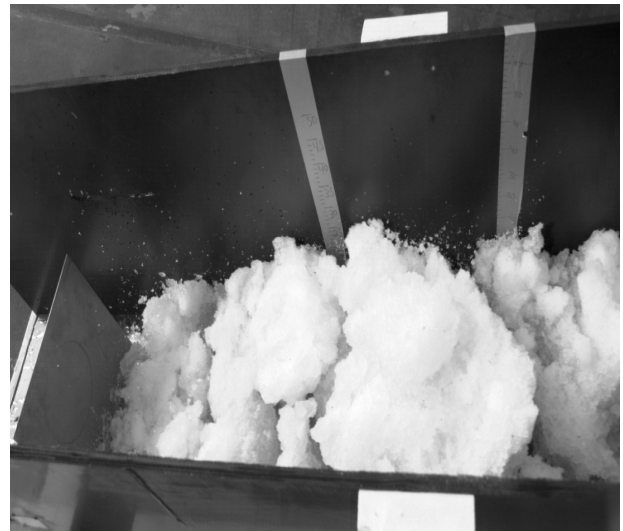


(b) Sørpen beveger seg på siden og over platen. Foto: Haldis Døvre Kalland

Figur 4.30: Bilder fra forsøk 10.



(a) Ved forsøk 10 var det lite massive blokker.



(b) Ved forsøk 11 var det massive blokker ved starten av skredet.

Figur 4.31: Starten av skredet ved forsøk 10 og 11.

4.5.0.3 2 millimeter trimmet plate

Ved forsøk 11 gikk platen til flyt som vist i figur 4.32. I forsøket ble det observert store massive blokker av sørpe ved starten av skredet. Figur 4.31 viser skredfronten av forsøk 10 og 11. Ved dette forsøket bevegede også skredet seg rundt platen uten å legge igjen en

betydelig skredmasse. Video av forsøket viser at platen tidlig fikk store utbøyninger grunnet den høye flyte høyden.



Figur 4.32: Trimmet plate etter forsøk 11. Platen har her gått til flyt.

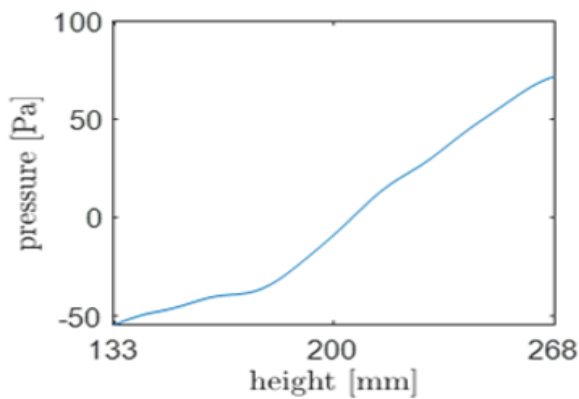
5.1 Rekonstruering av hydrostatisk trykk

De fleste modellene i Abaqus stemte godt med Naviers plateløsning. Både løsningen for 20-noders elementet med redusert integrasjon og 8-noders elementet med inkompatible moder gav godt resultat.

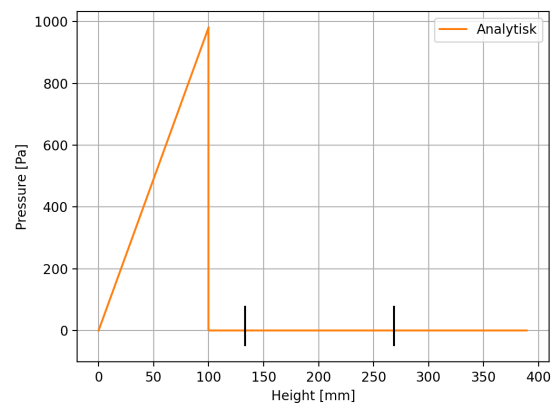
8-noders elementet med redusert integrasjon gav et dårlig resultat, og er alt for mykt ved få elementer. Dette skyldes at elementet kun har et integrasjonspunkt, og opplever timeglassmoder ved bøyingsproblem. Dersom platen er utsatt for bøyning, som det er her, bør elementstørrelsen reduseres, spesielt over høyden. Når elementstørrelsen ble halvert, og det ble innført 4 elementer over tykkelsen, gav det et betydelig bedre resultat.

Rekonstrueringen av trykket ved virtuelle felts metode gav et ok resultat for filterstørrelse $\sigma = 4$ og $PRW = 60$. Mulige forbedringer ved dette forsøket kunne vært og redusere størrelsen på rutene på rutenettet. Disse var ved forsøket satt til 7 mm . En annen mulig forbedring er å øke størrelsen på PRW . En bakside med dette er at det da blir mistet mer informasjon langs rendene, som forklart i kapittel 2.7.3.

Figur 5.1 viser et eksempel av hvordan metoden ikke er egnet til å rekonstruere trykket langs rendene på platen. Her er boksen fylt opp med vann til 100 mm , noe som er utenfor ”synsfeltet” (Field Of View, kalt for FoV) ved virtuelle felts metode. Den analytiske løsningen (figur 5.1b) viser at det ikke er et trykk mellom 133 mm og 268 mm . Etersom virtuelle felts metode baserer seg på overflatehelninger, som det vil være på platen grunnet trykket mellom 0 mm og 100 mm , vil dette bli registrert som et trykk innenfor FoV ved virtuelle felts metode (figur 5.1a).



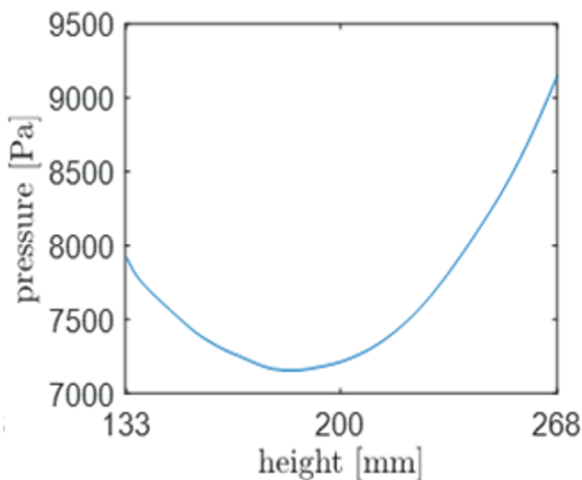
(a) Trykkrekonstruering ved virtuelle felts metode. Figur: Rene Kaufmann



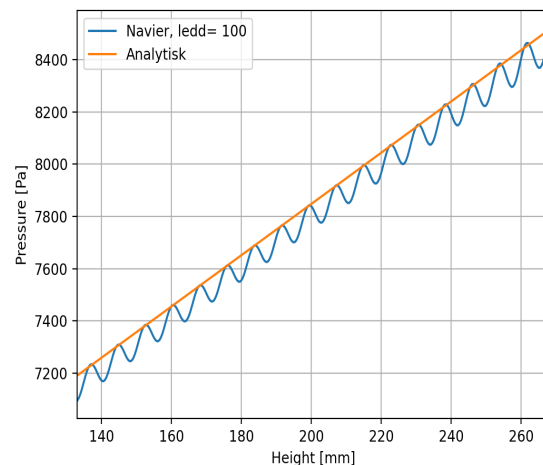
(b) Analytisk trykkfordeling.

Figur 5.1: Trykkfordeling på platen utenfor FoV til virtuelle felts metode.

Figur 5.2 viser rekonstruering av trykket, når vannsøylen er $0,6\text{ m}$ over boksen. Største utbøyning skjer da midt på platen, og er på $1,6\text{ mm}$ i henhold til Naviers plateløsning. Figuren viser tydelig begrensninger ved virtuelle felts metode, og metoden krever små utbøyninger for at ligningene for tynnplateteori skal være gyldige. Etersom platen er 3 mm tykk, er tynnplateteori gyldig inntil en tykkelse på $1,5\text{ mm}$ i henhold til [44].



(a) Trykkrekonstruering ved virtuelle felts metode. Figur: Rene Kaufmann



(b) Naviers løsning og analytisk løsning.

Figur 5.2: Trykkrekonstruering ved vannsøyle over boksen lik $0,6\text{ m}$. Her er det for store utbøyninger for tynnplateteori.

Grunnen til at det ble brukt mye tid på å lære denne metoden, og teorien bak, er at det var ønskelig å benytte denne metoden ved sørpeskred. Dette ble ikke gjort i denne gang grunnet tidshensyn etter at rennen ble satt opp. Ved fremtidige renneforsøk kan denne metoden gjøre det mulig å å finne trykkfordelingen innad i et sørpeskred. Dette vil stå som fremtidig arbeid.

5.2 Forsøk med renne

5.2.1 Usikkerheter

Det er flere usikkerheter knyttet til forsøkene. Både flyte høyde og hastighet baserer seg på menneskelig avlesning, som i seg selv er en usikkerhet.

5.2.1.1 Flyte høyde

Som nevnt varierer flyte høyden gjennom forsøket. Det er derfor umulig å definere en entydig flyte høyde til hvert forsøk. Maksimal flyte høyde er satt til maksimalt avlest høyde på de største blokkene, mens den midlere flyte høyden er basert på høyden til en jevn strøm, ofte i løpet av det første sekundet av skredet. Spesielt er det en usikkerhet knyttet til denne midlere flyte høyden, og den bør behandles som en omtrentlig verdi.

Ettersom lastcellene kun viser punktlaster, og ikke hvordan trykket fordeler seg mellom lastcellene, er det ved sammenligning med beregningsmodeller viktig å definere påkjent areal. Ved de fleste forsøkene fordelte maksimal last seg like mye last oppe og nede. Det kan derfor antas at lasten er jevnt fordelt over platens høyde. I tillegg antas det at hele platens bredde er påkjent lik last. Dette avhenger i stor grad av plasseringen til de største blokkene.

Derimot ble det ikke observert blokker som både var like høye som platen, og samtidig dekket hele platens bredde. Det kan derfor tenkes at lasten ikke eksakt fordeler seg over platens areal, uten at dette kan bevises med lastcellene i dette forsøket. Et alternativ er som beskrevet i [32] og sette flyte høyden til $1,5 \cdot h_f$.

5.2.1.2 Hastighet

Skredhastigheten er lest av foran til høyre i skredet. Det er ikke tatt hensyn til variasjon av hastighet gjennom skredets bredde, høyde eller lengde. Ettersom mange beregningsmodeller for skredtrykk inneholder kvadratet av hastigheten har denne verdien stor betydning for resultatet. Mer nøyaktige målinger av hastigheten, og målinger av hastighetsprofilen, kan gi et bedre sammenligningsgrunnlag mellom krefter og hastigheter.

5.2.1.3 Tetthet

Tettheten til sørpen er beregnet ut fra vekt måleren på gaffeltrucken. Usikkerhet ved tettheten er derfor knyttet til usikkerheten til vekt måleren til gaffeltrucken. Ved tilføring av vann i sørpeblandingen tok det ofte tid før vekten økte, og den kunne gjerne hoppe $10 - 20 \text{ kg}$ om gangen. Det antas derfor at vekt måleren er innenfor en nøyaktighet på $\pm 20 \text{ kg}$. Dette kan gi tettheter mellom 600 kg/m^3 , for forsøket med lavest tetthet (forsøk 7), til 790 kg/m^3 for forsøk 3 som hadde størst tetthet.

Når sørpeblandingen lå i containeren var det få muligheter til å røre rundt i blandingen. Dette førte til blokkdannelse i containeren, og derav større blokker i rennen. Denne fordelingen av store og små blokker fører til variasjon av tetthet innad i sørpeblandingen.

5.2.2 Kraft fra store legemer

Lastmålingene ved de forskjellige forsøkene har ofte store variasjoner i trykk over kort tid. Dette skyldes store blokker som påfører impuls laster på platen. Eksempelvis er det ved forsøk 4 og 5 observert store blokker i starten av skredet, som samsvarer med høye lastmålinger

tidlig. Ved forsøk 6 er det observert jevnt fordelte blokker over skredets lengderetning, som kan forklare stor variasjon av last over det første sekundet.

Etter det første sammenstøtet er det fortsatt stor variasjon i lasten, men topplastene er som regel lavere. Dette skyldes at det allerede ligger skredmasser foran platen. De nye blokkene som kommer inn taper energi på å komprimere og akselerere skredmassen foran platen.

Det ble forsøkt å unngå disse blokkene ved å blande sørpeblandingen i containeren med en mørtelblander, uten at det gav resultat. I tillegg ble det forsøkt å knuse disse blokkene ved å slippe ut sørpen fra containeren med en liten høyde over rennen. Hensikten var at blokkene skulle knuse i sammenstøtet med rennen.

5.2.2.1 Fordeling av dynamisk og statisk last

Den blå linjen i figur 5.3 viser gjennomsnittet av totallasten fra forsøk 2-7. Fra figuren ses det at topplastene etter topplasten ved 0,13 s er lavere. Den oransje stiplede linjen følger topplastene utover i skredet.

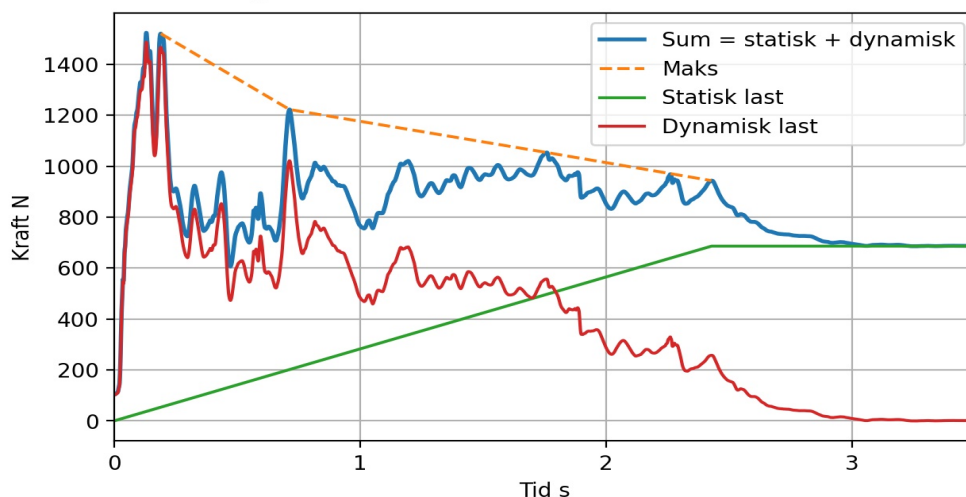
Oppstuingen bak platen fører til en statisk last på platen, og det kan antas at denne bygger seg opp lineært over tid. Dette er en forenkling da den i realiteten vil øke eksponentielt i starten ettersom store deler av skredfronten ikke legger seg foran platen, men får en oppadrettet sørpesprut og forsvinner ut av rennen. Den statiske lasten kan i figur 5.3 ses på som den grønne linjen.

Som figur 5.3 viser, reduseres den dynamiske lasten på platen, som vist ved rød linje, i takt med økende statisk last (økende mengde oppstuede skredmasser). Selv om de innkomne skredmassene kan antas å være like store, ha like høy hastighet og samme tetthet, de første 2,5 s (se figur 4.10), reduseres den dynamiske lasten på platen. Dersom det ikke hadde bygget seg opp skredmasser foran platen, kan det antas at alle toppene de første 2,5 s hadde vært omtrent like store som topplasten i starten.

Ved design av en rigid konstruksjon, kan det derfor være anbefalt å lage et system hvor det allerede ligger noen masser foran konstruksjonen. For et slikt system vil også skredfronten måtte bruke energi på å komprimere og akselerere massene i front, og topplasten i starten blir redusert. Fra figur 5.3 kan det tenke seg at topplasten på 1500 N kan reduseres til 1000 N som totallasten ligger rundt mellom 1 – 2 s. Massene kan være hva som helst, så lenge det tapper skredfronten for energi. En viktig bemerkelse er at en husvegg, altså en rigid konstruksjon, må dimensjoneres mot disse impulslastene dersom det ikke er gjort sikringstiltak i front.

5.2.2.2 Reduksjon av impulslast

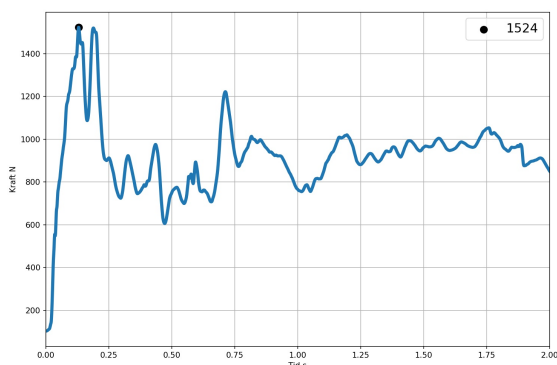
En annen måte å redusere maksimal impulslast, kan være gjennom treghet. Ved å lage et tregt system som demper støtet, og derav unngår maks impulslast, kan det dimensjoneres mot mindre krefter. Dette er som nevnt i kapittel 2.2.5 et viktig konsept ved design av wirenett. Tabell 5.1 viser største gjennomsnittskraft av alle målingene over henholdsvis 0,1, 0,3 og 0,5 sekunder. Tabellen viser at et system som tar opp kraften over 0,5 sekunder opplever kun 752 N på toppen av platen. Dette kun 46,5% av maksimal kraft på 1618 N. Nede blir lasten redusert med hele 56% fra 1397 N til 754 N. Tabellen gjelder for maksimal verdi av alle forsøkene, mens figur 5.4 viser hvordan dette kan redusere totallasten.



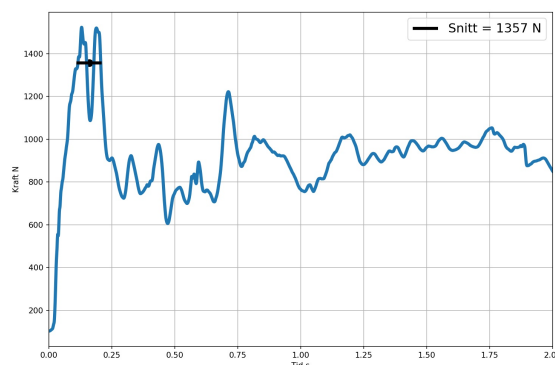
Figur 5.3: Fordeling av statistisk og dynamisk last.

Tid	Maks	0,1 maks	0,1 %	0,3 maks	0,3 %	0,5 maks	0,5 %
Nede	1397	1041	74,5	910	65,1	754	54,0
Oppe	1618	904	55,9	809	50,0	752	46,5

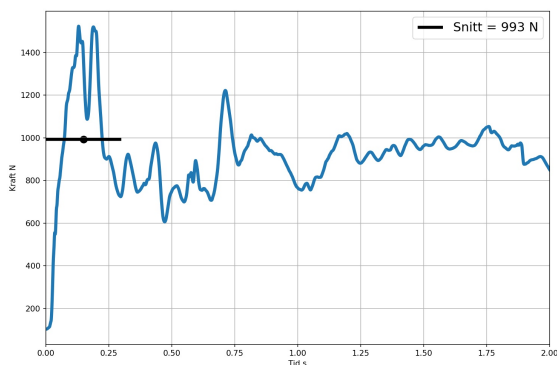
Tabell 5.1: Reduksjon av krefter som følge av treghet.



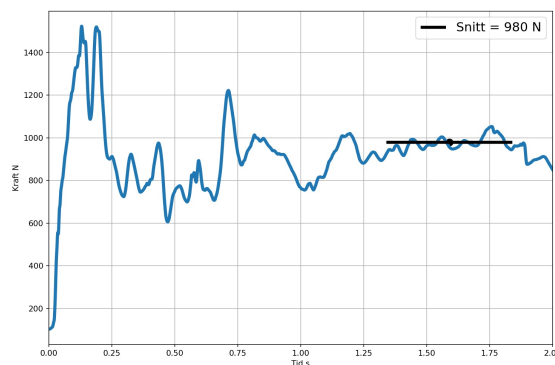
(a) Maks punktlast.



(b) Maks gjennomsnitt 0,1 sek.



(c) Maks gjennomsnitt 0,3 sek.



(d) Maks gjennomsnitt 0,5 sek.

Figur 5.4: Reduksjon av gjennomsnittlig maksimale last som følge av treghet.

5.2.3 Fordelt trykk fra vann i renne

Et tenkt scenario kunne vært å ha sendt vann ned i renna. Det antas at vannet er tilnærmet friksjonsfritt mot de glatte platene. Hastigheten ved platen ($0,3\text{ m}$ opp fra bunnen av rennen) kan da beregnes ut fra bevaring av energi, gitt i ligning 2.10:

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (2,92 - 0,3 \cdot \sin(18,9))} = 7,43 \quad \text{m/s} \quad (5.1)$$

Ut fra ligninger som beskriver væskestrøm mot plater normalt på strømmen, som ligning 2.18, blir trykket som vannet påfører platen:

$$p_{vann} = \rho_w v^2 = 1000 \cdot 7,43^2 = 55205 \text{ Pa} \quad (5.2)$$

Dersom det antas en flyte høyde på $0,15\text{ m}$ (snittet av midlere flyte høyde er $0,148\text{ m}$) vil påført last bli:

$$F_{vann} = p_{vann} A = 55205 \cdot 0,15 \cdot 0,49 = 4059 \text{ N} \quad (5.3)$$

Dersom hastigheten settes lik $5,66\text{ m/s}$, som er gjennomsnittet av hastigheten ved forsøk 2-7, blir kraften:

$$F_{vann} = \frac{4059 \cdot 5,66^2}{7,43^2} = 2357 \text{ N} \quad (5.4)$$

Dette stemmer godt overens med resultatene fra kapittel 4.3, noe som kan forventes da sørpe inneholder mye vann. Det kan antas at vannet vil påføre en relativt jevn last over tid. Ved sørpeskred er det derimot de større blokkene som påfører impulslaster på lastcellene.

I forsøkene varierte hastigheten mellom $4,90 - 7,14\text{ m/s}$. Det ble for de våteste forsøkene observert et vannsjikt langs bunnen av rennen, som forklart i 2.2.3. Ettersom sørpen hadde hastigheter nær hastigheten til bevaring av energi, er det grunn til å tro at selv de større blokkene flyter på dette vannsjiktet.

5.2.4 Beregningsmodeller

5.2.4.1 Prosentvis avvik

Prosentvis avvik kan beregnes til:

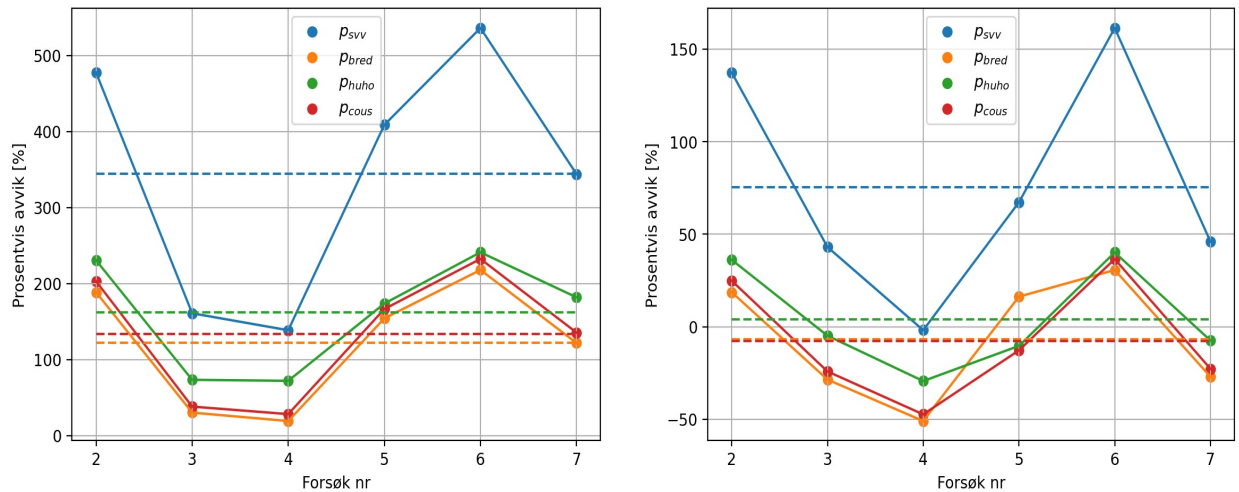
$$\text{Prosentvis avvik} = \frac{\text{Beregnet verdi} - \text{Målt verdi}}{\text{Målt verdi}} \cdot 100\% \quad (5.5)$$

Figur 5.5 viser prosentvis avvik mellom beregningsmodellene og målte trykk for henholdsvis platens høyde og skredets midlere flyte høyde.

Som vist i figur 5.5a gir alle beregningsmodellene et alt for stort trykk dersom trykket fordeles over platens areal. Grunnen til det store avviket kan være blokkene som forklares i neste underkapittel. Mange av beregningsmodellene inneholder også leddet kvadratet av hastigheten. Ved å plote hastighet mot fordelt trykk på platen viser det en negativ korrelasjon, som ikke passer inn med beregningsmodellene. Figur 5.6 viser denne negative korrelasjonen mellom hastigheten og normalisert fordelt trykk.

Beregningsmodellen gitt i statens vegvesens håndbok V139 er veldig høy for de aller fleste forsøkene. Ettersom denne beregningsmodellen gjelder for dimensjonering av bruer, er det sannsynlig at modellen ønsker å være svært konservativ.

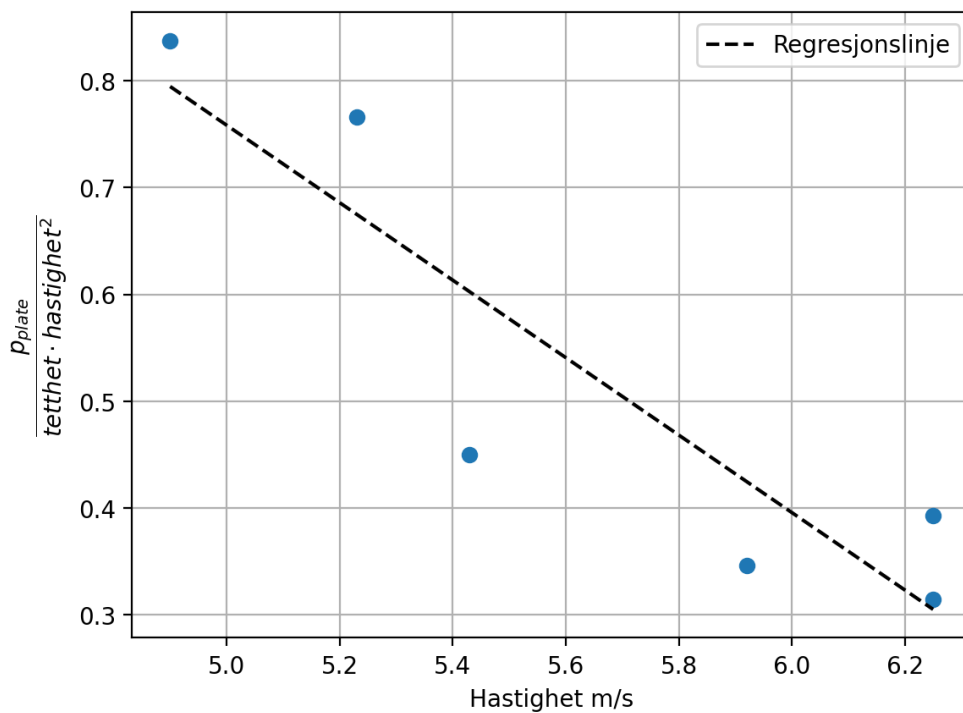
Figur 5.5b viser at beregningsmodellene passer bedre når den målte kraften fordeles over jevn flyte høyde $h_{f,middel}$. Da er det kun p_{svv} sitt snitt som har et stort avvik, mens snittet av de andre beregningsmodellene ligger nærme p_{middel} .



(a) Prosentvis avvik når målt kraft fordeles over hele platens areal.

(b) Prosentvis avvik når målt kraft fordeles over skredets midlere flytehøyde.

Figur 5.5: Prosentvis avvik for de ulike beregningsmodellene sammenlignet med målte verdier.



Figur 5.6: Lineær regresjon mellom hastighet og normalisert fordelt trykk over platens areal.

5.2.4.2 Skalering av sørpeblokker

Ved forsøkene er det observert at de største blokkene er ofte dobbelt så store som den midlere flytehøyden. Dette kan føre til en feil ved skalering gjennom geometrisk likhet. Ettersom de fleste ekte sørpeskred har en flytehøyde mellom 1 – 2 m [2], vil det være usannsynlig at

store sørpeblokker mellom 2 – 4 m glir upåvirket ned skredbanen uten å bli knust til mindre biter. De største sørpeblokkene vil mest sannsynlig være omtrent like store som skredets flyte høyde. Blokkene ved forsøkene vil derfor ikke representere ekte sørpeblokker på en god måte.

Et naturlig sørpeskred har også stor eroderende effekt, og kan ta med seg store legemer som steiner eller trær. Disse legemene vil som nevnt påføre store impulslaster. Det er derimot stor forskjell i fasthet på steiner, trær og sørpeblokker. I virkeligheten vil sørpeblokker mest sannsynlig knuses til mindre biter i sammenstøt mot en konstruksjon, og kraften vil bli tatt opp over en større tidsperiode. Store steiner vil bli knust i liten grad, og påfører derfor en større impulslast på konstruksjoner. Impulslasten fra steiner og trær vil derfor bli mye større sammenlignet med blokker av sørpe. Sørpeblokkene i de ulike forsøkene vil derfor ikke representere impulslaster fra virkelige legemer på en god måte.

Det er derfor vanskelig å si noe om overførbarheten av sørpeblokkene til virkeligheten. Allikevel viser målingene viktigheten av å ta hensyn til store legemer, og impulslaster, da maksimal last ofte er knyttet til disse.

Dersom sørpeblokkene hadde blitt knust på vei ned rennen, ville det vært mer masse fordelt over skredets midlere flyte høyde. Dette kunne ført til økning av last nede på platen, og en reduksjon av last på toppen. Dersom dette er tilfelle er det ikke utenkelig å fordele total kraft over skredets flyte høyde, og ikke de største blokkenes flyte høyde.

5.2.4.3 k-verdier

Figur 5.7 viser de ulike empiriske k faktorene. Som nevnt i kapittel 2.4.3 kan verdien av k_{plate}/k_{middel} for tørre snøskred være helt opp mot tre i perioden rett etter støtet. Denne verdien sies å være svært varierende, og avhenger blant annet av større legemer som steiner. Det kan derfor tenkes at en verdi over tre er sannsynlig for et fullskala sørpeskred.

Fra figuren ses det at k_{hyd} har ett snitt på 3,15. Dette betyr at det målte trykket er drøye 3 ganger større enn hydrostatisk vanntrykket over samme høyde. Til sammenligning ligger k_{hyd} mellom 3 – 11 for flomskred, hvor det kan forventes høyere tetthet.

Ved målingene har k_{stat} et snitt på 4,38. Dette er gitt en tetthet på 717 kg/m^3 . Fra litteraturen om flomskred, ligger k_{stat} rundt 3,7 for tettheter rundt 1130 kg/m^3 . I naturen kan sørpeskred ha større tetthet da det kan inneholde mer vann eller store steiner og høyere hastighet, og en større verdi for k_{stat} kan oppstå.

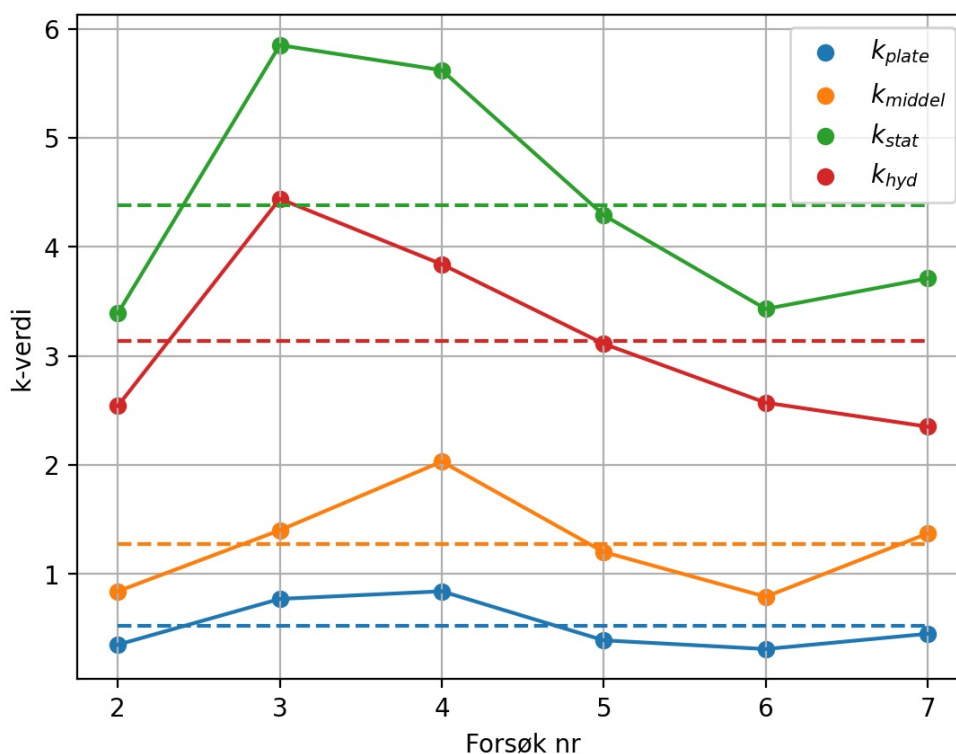
Ved tilbakeberegning av trykkintensitet, blir trykket fordelt over platens areal lik:

$$p_{plate} = k_{plate} \rho_{snitt} v_{snitt}^2 = 0,52 \cdot 716,7 \cdot 5,67^2 / 1000 = 11,95 \quad \text{kPa} \quad (5.6)$$

Til sammenligning var maksimalt trykk fra gjennomsnittsmålingene $8,52 \text{ kPa}$ når kraften ble fordelt over platens areal. Grunnen til at disse tallene ikke er like er at k_{plate} verdiene er tatt fra topplasten på hvert forsøk, og ikke etter 0,13 s ved hvert forsøk. Dette kan føre til en unaturlig høy, men konservativ verdi.

5.2.4.4 Hydrodynamisk og hydrostatisk metode

Som vist ved figur 2.23 deles hydraulisk trykk inn i hydrostatisk og hydrodynamisk trykk. I kapittel "Fordeling av dynamisk og statisk last", kapittel 5.2.2.1, vises det at det dynamiske trykket reduseres når det statiske trykket øker. Det kan derfor tenke seg at en slik inndeling av lastene stemmer.



Figur 5.7: k-verdier for hvert forsøk og gjennomsnittsverdi.

Når beregningene sammenlignes med trykket fordelt over platens areal, viser det seg at dynamiske beregningsmodeller alene gir et alt for høyt trykk. Det å legge til et hydrostatisk trykk i bunn gir derfor ingen mening ved målingene her.

Det kan derimot tenke seg at ved større og høyere konstruksjoner, som sikringskonstruksjoner utendørs, vil skredmassene i bygge seg oppover høyden over tid. Skredet vil da flyte oppå disse skredmassene, og det dynamiske trykket vil treffe konstruksjonen med en høyere høyde. Hvis dette er tilfelle, gir det mening å dele lastene inn i hydrostatisk og hydrodynamisk trykk.

Det skal nevnes at for de fleste forsøkene med lastceller var lasten større på toppen av platten enn lasten nede ved tidspunktet for størst totallast. Derimot trengs det bedre målinger av hvordan lasten fordeler seg på platen gjennom tid for å kunne konkludere noe nærmere på dette området.

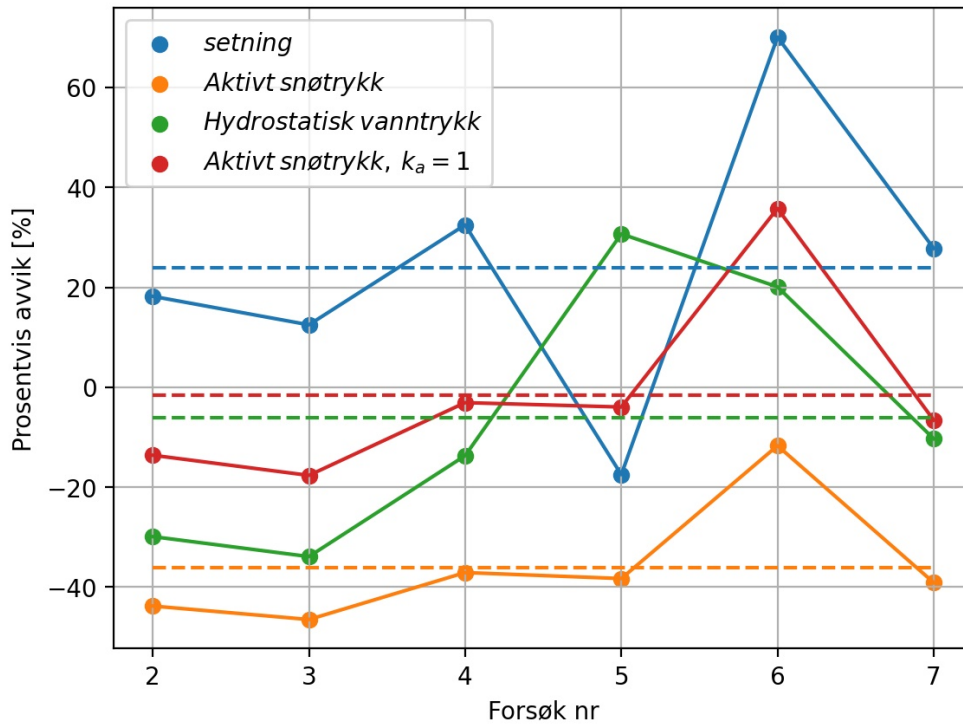
5.2.5 Statisk snøtrykk

Ved beregning av statisk snøtrykk er det antatt at tettheten er uendret gjennom forsøket. Ettersom skredmassene komprimeres i sammenstøtet foran platen, vil dette øke tettheten. En prøve av tettheten til forsøk 7 gav en tetthet på snøen lik 550 kg/m^3 før tilsetning av vann. Etter at vannet var tilsatt hadde blandingen en tetthet på 633 kg/m^3 . Noen minutter etter at forsøket var ferdig ble tettheten til de oppstuede skredmassene målt til 590 kg/m^3 . Dette var da etter at store deler av vannet i sørpeblandingen hadde drenert bort.

Prosentvis avvik for statisk snøtrykk er vist i figur 5.8. Figuren viser at det er en relativt god overstemmelse mellom målte verdier og beregnede verdier.

Ettersom sørpen har et høyt vanninnhold, er det interessant å sammenligne det statiske

trykket med hydrostatisk vanntrykk. Dette er tatt med som den grønne stiplede linjen. Figuren viser at snittet til hydrostatisk vanntrykk ikke er langt unna det målte statiske trykket. Det er også tatt med aktivt snøtrykk hvor den aktive snøtrykkskoeffisienten settes $k_a = 1$. Den empiriske faktoren $k_a = 0,65$ gir et alt for lavt resultat, og det kan derfor tenkes at denne verdien kan økes når snøen har et høyere vanninnhold.



Figur 5.8: Prosentvis avvik for statisk trykk på platen.

Figur 5.8 stemmer godt overens med observert mengde oppstuing bak platen. Forsøk 2, 3 og 4 har betydelig større oppstuing sammenlignet med forsøk 5 og 6. Det virker litt tilfeldig hvilke forsøk som får stor oppstuing, da det ved noen forsøk kommer store blokker sent i skredet som skyver den oppstuede skredmassen over platen.

Ved beregning av statisk snøtrykk er det ikke tatt hensyn til skredmassens oppstuede lengde i skredets lengderetning. Dette vil si at det ikke er et uendelig langt snødekke som hviler på platen, og det kan derfor gi mening av beregnede verdier er lavere enn målte verdier. Beregnede verdier av setningstrykk avhenger blant annet av glide- og sigefaktor, og det er usikkert hvordan disse faktorene passer til et nedskalert forsøk i laboratoriet.

5.2.6 Forsøk med utkrager

Resultatene fra forsøkene med utkrager viser at den 0,95 mm tykke platen og 2 mm tykke, trimmet platen, gikk til flyt. Den 2 mm tykke platen uten trimmede sidekanter gikk ikke til flyt.

For å beregne hvilke trykk platene skal tåle, er det viktig å definere hvilken høyde trykket virker over. Som vist i figur 4.30a har skredet en større frihet til å bevege seg rundt eller over platen. Det oppstår derfor ikke like stor oppstuing foran platen, og trykket fordeler seg derfor ikke like godt over platens høyde som vist i figur 4.22c. Som diskutert over, er det

allikevel de store snøblokkene som påfører de største lastene. Lastmålingene viste at disse blokkene fordelte trykket over platens høyde. Ved beregning av trykkekapasitet i forsøk 9, 10 og 11 er det derfor naturlig å sette høyden $h = h_{f,plate}$.

Tabell 5.2 viser en oppsummering av utkragerforsøket hvor målt trykk fra kapittel 4.4.1 er satt opp mot trykkekapasiteten, når platen er påkjent over snøblokkenes høyde. Det er også konkludert om platen burde flyte eller ikke.

Forsøk	Målt trykk [kPa]	p_{plate} [kPa]	Antakelse	Resultat
9	8,52	1,17	Flyt	Flyt
10	8,52	6,78	Flyt	Ikke flyt
11	8,52	3,39	Flyt	Flyt

Tabell 5.2: Antatt trykk i skredet og nødvendig trykk ved flyt.

Som nevnt i kapittel 4.5, ble det ikke observert de mest massive sørpeblokkene ved forsøk 10. Det kan derfor antas at de største impulslastene, og påkjent høyde, ikke er fullt så høy ved dette forsøket. Ved å sette påkjent høyde lik $1,5 \cdot h_{f,jevn}$ blir trykk før flyt for en jevnt fordelt last lik:

$$p_{jevn} = \frac{f_y b_{eff} t^2}{2bh^2} = \frac{305 \cdot 10^6 \cdot 0,3 \cdot 0,002^2}{2 \cdot 0,3 \cdot (1,5 \cdot 0,15)^2} / 1000 = 12,0 \quad \text{kPa} \quad (5.7)$$

Og det kan da antas at platen ikke skulle flyte.

Et annet viktig punkt ved forsøk 10 var at platen hadde betydelige elastiske deformasjoner. Dette førte til at angrepslinjen fra sørpen ikke lengre var normalt på plateplanet. Trykket som sørpen påfører platen må da dekomponeres, i henhold til kapittel 2.4.3.3, til en normal og en tangentiell komponent, som reduserer trykket på platen. Dette gjelder selvfølgelig også for forsøk 9 og 11 etter at platen har fått deformasjon, men for forsøk 10 kan dette være en forklaring på hvorfor platen ikke gikk til flyt.

Virtuelle felts metode ble brukt på et forsøk for å rekonstruere hydrostatisk trykk. Resultatene fra trykkrekonstruering viser at virtuelle felts metode kan benyttes til å rekonstruere et hydrostatisk trykk med grei nøyaktighet. I forsøket overestimerte metoden trykket sammenlignet med analytisk løsning. Metoden har også store begrensninger som tillat utbøyning og synsfelt (FoV).

Resultatene fra "skredforsøk i renne"-forsøkene, viser viktigheten av å ta hensyn til større legemer som kan påføre konstruksjoner impulslaster. Selv om skredet foregikk over 2 s, oppstod de største lastene i løpet av det første sekundet. I virkeligheten vil dette være enda viktigere da store uelastiske legemer, som store steiner, ofte vil påføre destruktive laster. Det vises også at ved design av sikringskonstruksjoner kan det gjøres tiltak for å dempe disse impulslastene.

Ved design av selve konstruksjonen er det anbefalt å gjøre konstruksjonen fleksibel, slik at den kan ta opp kreftene over en større tidsperiode. På toppen av platen ble kreftene redusert fra 1618 N til 752 N, som er en reduksjon på 53,5% når kraften ble tatt opp over en tidsperiode på 0,5 s. På bunnen av platen ble lasten redusert med 46,0%.

Et annet tiltak kan være å legge masser foran en konstruksjon. Resultatet viser at maksimalt dynamisk trykk minker i takt med økt statisk trykk, som følge av masser foran konstruksjonen. Topplasten fra det dynamiske trykket ble redusert fra 1500 N til overkant av 1000 N. Dersom det designes en konstruksjon, hvor det plasseres masser foran konstruksjonen, kan dimensjonerende last reduseres.

Forsøkene viser også viktigheten av å definere påkjent areal. I forsøk 2 mm uttrimmet utkrager burde platen flyte dersom påkjent høyde settes lik skredets maksimale flyte høyde. Dette skjedde ikke, og det kan derfor konkluderes med at enten var lasten mindre enn antatt, eller så var påkjent høyde mindre enn antatt. Ved lastmålingene gav alle beregningsmodellene et alt for høyt trykk, om det målte trykket fordeles over hele platen. Dersom det målte trykket fordeles over skredets midlere flyte høyde, var det flere beregningsmodeller som gav for lavt trykk. Det bør alltid gjøres konservative valg ved dimensjonerer av konstruksjoner i skredterreng.

6.1 Videre arbeid

6.1.1 Målinger

Det anbefales mer nøyaktige målinger av hastighet, samt hastighetsprofilen over sørpens høyde. Dette kan eksempelvis gjøres ved å plassere flere optiske hastighetssensorer over skredets flyte høyde. Det er derav ikke kjent om noen eksperimenter fra nyere tid hvor dette har blitt gjort med god nøyaktighet for sørpeskred.

Det er anbefalt å koble lastcellene og kameraet sammen, slik at bildene kan kobles opp mot lasten. Dette vil gi et bedre bilde av hvilke situasjoner som gir størst påkjenning på platen. I tillegg vil det gi mer informasjon om sørpeblokkene som påfører impulslast på platen. Ved å slisse inn et plexiglass i den ene sideplaten på rennen rett ved den belastede platen, er det mulig å studere den oppstuede skredmassen sin påvirkning på den dynamiske lasten.

I tillegg anbefales det å knuse sørpeblokkene i mindre biter slik at høyden på blokken er omtrent lik skredets midlere flyte høyde. Dette antas å gi en bedre representasjon av sørpen i en virkelig skredhendelse.

6.1.2 Virtuelle felts metode

Det anbefales å gjøre flere forsøk hvor det benyttes virtuelle felts metode på en kjent last. På et så enkelt trykk som hydrostatisk trykk, burde metoden kunne beskrive trykket tilnærmet eksakt.

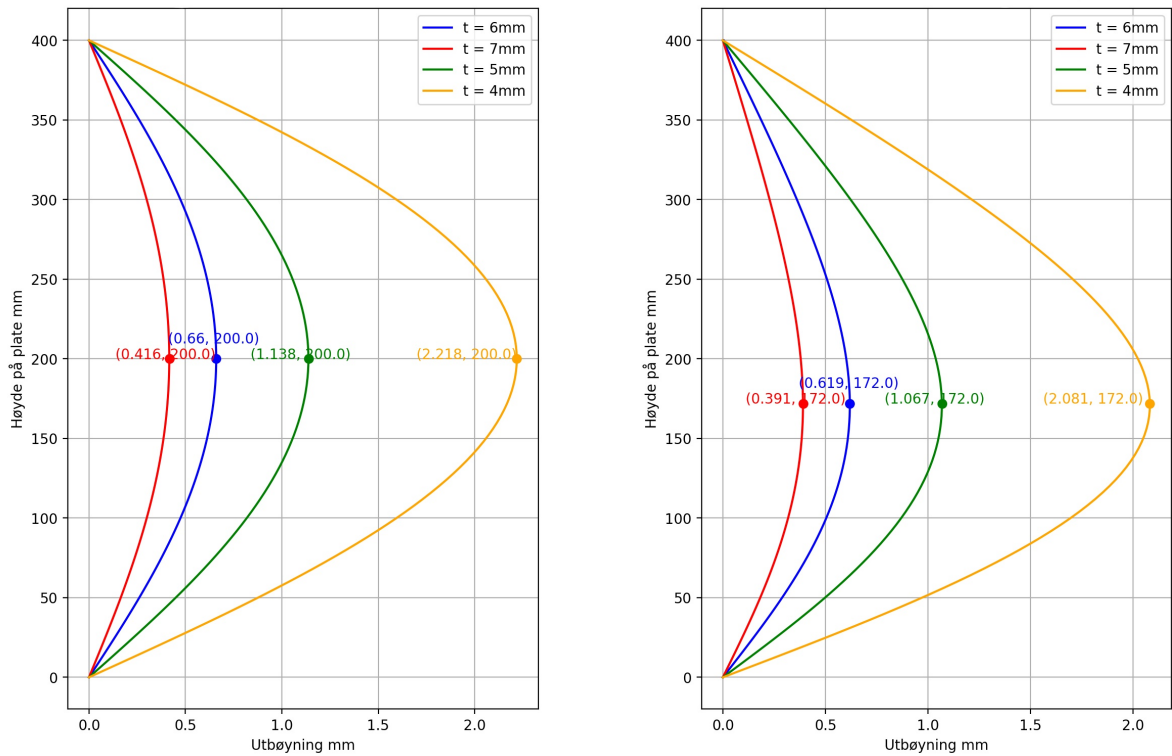
Dersom metoden skal brukes til målinger av sørpeskred er det flere hensyn å ta. Forsøkene i denne rapporten gir et godt grunnlag for videre design av et eventuelt oppsett. Ved impulslast som kan forekomme i et sørpeskred, er det viktig å ta hensyn til størrelsen på filteret og PRW. Både størrelsen til filter og PRW virker som lavpassfilter, og vil utjevne høyfrekvente amplituder, som forekommer ved impulslast. Det anbefales å implementere lastceller på den eventuelle platen som skal undersøkes, slik at det er mulig med en enkel kontroll av totallast på platen. Rent praktisk trenger kameraet fri sikt mot platen med speil, som reflekterer signalet mot rutenettet. Det trengs derfor en løsning i enden av rennen som fører sørpespruten bort fra nedfallsområdet hvor speil/rutenett skal stå.

6.1.3 Abaqus-modell med relevante skredtrykk

Dersom virtuelle felts metode skal benyttes for trykkrekonstruering innad i et sørpeskred, er det som vist viktig å sørge for at kriteriene til tynnplatedeori er oppfylt.

Ved å anta at det blir benyttet en stålplate med dimensjoner $500/400/t$ [mm] (bredde/høyde/tykkelse) med E-modul lik $190 GPa$ og tverrkonstruksjonstall $\nu = 0,3$, er ulike utbøyninger for ulike tykkelser vist i figur 6.1. Modellene er modellert i Abaqus med C3D20R-elementene, som tidligere har vist gode resultater for bøyingsproblemer. Platens render er fritt opplagt langs alle sider. Det er innført to ulike lasttilfeller, begge hentet fra forsøk 3. Ved det første tilfellet er det antatt et jevnt fordelt trykk på $29,0 kPa$ over en flyte høyde på $20 cm$. Ved det andre tilfellet er det brukt et jevnt fordelt trykk på $15,9 kPa$ over hele platens høyde. Selv om både forsøk 4 og 5 har høyere trykk over flyte høyden på $33 kPa$, hadde de også lavere flyte høyde, noe som viste seg å gi mindre utbøyning.

For å holde seg innenfor tynnplatedeori, som er gyldig for utbøyninger under halvparten av tykkelsen, anbefales det en tykkelse på minimum $5 mm$ er anbefalt.



(a) Utbøyninger for ulike tykkelser ved $15,9\text{ kPa}$ (b) Utbøyninger for ulike tykkelser ved $29,0\text{ kPa}$ over en flyte høyde på 20 cm .

Figur 6.1: Utbøyning av en stålplate ved ulike tykkelser påført snøtrykk.

-
- [1] Hestnes E. *Slushflow hazard — where, why and when? 25 years of experience with slushflow consulting and research*. *Annals of Glaciology*. 1996;26:370–376.
- [2] Norem H. Sandersen; F. *Flom- og sørpeskred*. Statens vegvesens håndbokserie V139. Oslo: Vegdirektoratet; 2014. ISBN: 978-82-7207-676-3.
- [3] Jaedicke C., Kalsnes B. og Solheim A. *Sørpeskred, Egenskaper, historikk og sikringsløsninger*. Trondheim: SINTEF Community; 2022. Nr. 38. Tilgjengelig fra: URL: https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/3043827/klima2050_Report%2038.pdf?sequence=1.
- [4] Sund M. *Hva er sørpeskred?* Oslo: NVE, Seksjon for varsling av flom og jordskredfare. 9. nov. 2018. Tilgjengelig fra: URL: http://publikasjoner.nve.no/faktaark/2013/faktaark2013_06.pdf.
- [5] Hestnes E. “SØRPESKRED - LIKE DESTRUKTIVE SOM SNØSKRED. MEN «LITE KJENT»”. I: *FRA JORDAS INDRE TIL ATMOSFÆRENS YTRE Utviklingen i geofysikken de senere år*. Oslo geofysikeres forening, 1999, s. 104–116.
- [6] Gytri A. *Ulike forklaringar på sørpeskred*. 26. mar. 2011. URL: <https://www.nrk.no/vestland/ulike-forklaringar-pa-sorpeskred-1.7566714>.
- [7] Sund M, Grønsten H. A. og Skuset S. *Varsling av regional sørpeskredfare*. Norges Vassdrags- og energidirektorat; 2020. Nr. 42. Tilgjengelig fra: URL: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2020/rapport2020_42.pdf.
- [8] Kaufmann R., Ganapathisubramani B. og Pierron F. “Full-Field Surface Pressure Reconstruction Using the Virtual Fields Method”. I: *Experimental Mechanics* 59.8 (2019), s. 1203–1221. Tilgjengelig fra: DOI: 10.1007/s11340-019-00530-2.
- [9] Rudolf-Miklau F., Sauermoser S. og Mears A. I. *The Technical Avalanche Protection Handbook*. Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co, 2015. ISBN: 978-3-433-60386-4.
- [10] Halleraker J. H. og Askheim S. *naturkatastrofe i Store norske leksikon*. Aug. 2021. Tilgjengelig fra: URL: <https://snl.no/naturkatastrofe>.
- [11] Norem H. *Veger og snøskred*. Statens vegvesens håndbokserie V138. Oslo: Vegdirektoratet; 2014. ISBN: 978-82-7207-675-6.

- [12] Jaedicke C. *snøskred i Store norske leksikon*. 2022. Tilgjengelig fra: URL: <https://snl.no/sn%C3%B8skred>.
- [13] Lied K. og Kristensen K. *Snøskred. Håndbok om snøskred*. Forlaget Vett og Viten, Nesbru, Norway, pp.200, 2003.
- [14] McClung D. og Schaerer P. *The Avalanche Handbook*. Third Edition. Seattle, United States of America: The Mountaineers Books, 2006.
- [15] Müller K. og Larsen H. T. *Snøomvandling*. NVE, Norges vassdrags- og energidirektorat; feb. 2020. Nr. 01. Tilgjengelig fra: URL: http://publikasjoner.nve.no/faktaark/2020/faktaark2020_01.pdf.
- [16] C. Fierz mfl. *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*. Paris: IHP-VII Technical Documents in Hydrology N°83, IACS Contribution N°1, UNESCO-IHP, 2009.
- [17] Hestnes E. og Kristensen K. "THE DIVERSITIES OF LARGE SLUSHFLOWS ILLUSTRATED BY SELECTED CASES". I: International Snow Science Workshop. Norwegian Geotechnical Institute, 2010.
- [18] Berger C., Denk M., Denk C., Stieglitz L og Wendeler C. *Practical guide for debris flow and hillslope debris flow protection nets*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow og Landscape Research WSL. 2021. Tilgjengeig fra: URL: <https://www.wsl.ch/de/publikationen/default-d17f18e4e2.html>.
- [19] Issler P., Gauer P. og Jóhannesson T. *The design of avalanche protection dams : recent practical and theoretical developments*. Publications Office: European Commission, Directorate-General for Research og Innovation. 2009. Tilgjengelig fra: URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/12871>.
- [20] Volkwein A. *Flexible debris flow barriers. Design and applications*. WSL Berichte, 18. Birmensdorf: Swiss Federal Institute for Forest, Snow og Landscape Research WSL, 29 p. 2014. Tilgjengelig fra: URL: <https://www.wsl.ch/de/publikationen/flexible-debris-flow-barriers-design-and-application.html>.
- [21] Jaedicke C., Kern M.A., Gauer P., Baillifard M.-A. og Platzter K. "Chute experiments on slushflow dynamics". I: *Cold Regions Science and Technology* 51.2 (2008). International Snow Science Workshop (ISSW) 2006, 156–167. Tilgjengelig fra: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.03.011>.
- [22] Herberg T. S. S. "Fleksible nettkonstruksjoner som sikringstiltak mot sørpeskred i Vannledningsdalen". Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet. 2021. Tilgjengelig fra: URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2824714?show=full>.
- [23] Wendeler C. 2016. *Debris-Flow Protection Systems for Mountain Torrents – Basic Principles for Planning and Calculation of Flexible Barriers*. WSL Berichte, 44. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow og Landscape Research WSL. 267 p. Tilgjengelig fra: URL: www.wsl.ch/publikationen/pdf/15501.pdf.
- [24] Hákonardóttir K. M. og Ágústsdóttir K. H. *The design of slushflow barriers: Laboratory experiments*. 2019. Tilgjengelig fra: URL: https://www.vedur.is/gogn/snjoflod/varnarvirki/snow2019abstracts/Snow2019_HAKONARDOTTIR_eabstract.pdf.
- [25] Gauer P. *Numerical Modeling of a Slushflow Event*. red. Proceedings of the 2004 International Snow Science Workshop At: Jackson Hole, Wyoming, sep. 2004.

- [26] Walberg N. A. K. *Skredfarevurdering for sjølageret til Sysseimannen*. Nr. 19224-01-3. Skred AS. jun. 2019. Tilgjengelig fra: URL: <https://www.lokalstyre.no/fagrappporter.488045.no.html>.
- [27] Kalle Kronholm, Arni Jonsson og Hallvard S. Nordbrøden. *Forprosjektering av nettløsning mot sørpeskred i Vannledningsdalen*. 18241-25-1. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), 13. apr. 2021.
- [28] *Vedlegg 3 - Jord-, flom- og sørpeskred, høringsdokument. Bransjestandard for kartlegging av fare for jord-, flom- og sørpeskred*. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE). aug. 2018. Tilgjengelig fra: URL: <https://www.nve.no/media/8359/vedlegg-3-jord-flom-og-s%C3%B8rpeskred.pdf>.
- [29] Håland G., K. I. Orset, M. H. Frekhaug og H. Norem. *Sammenligning av modelleringverktøy for norske snøskred*. Norges vassdrags- og energidirektorat. nov. 2015. Nr. 107-2015. Tilgjengelig fra: URL: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_107.pdf.
- [30] Proske D., Suda J. og Hübl J. “Debris flow impact estimation for breakers”. I: *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 5.2 (2011), 143–155. Tilgjengelig fra: DOI: 10.1080/17499518.2010.516227.
- [31] *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning: Kapittel 7 Sikkerhet mot naturpåkjenninger*. 2022. Tilgjengelig fra: URL: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/7/7-3>.
- [32] Hungr O., Morgan G. og Kellerhals R. “Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures”. I: *Canadian Geotechnical Journal* 21 (jan. 2011), 663–677. Tilgjengelig fra: DOI: 10.1139/t84-073.
- [33] Sovilla B., Schaer M., Kern M. og Bartelt P. *Impact pressures and flow regimes in dense snow avalanches observed at the Valle e de la Sionne test site*. I: *J. Geophys. Res.*, 113, F01010. Tilgjengelig fra: DOI: 10.1029/2006JF000688.
- [34] Margreth S. *Defense structures in avalanche starting zones*. Federal Office for the Environment, Bern; WSL Swiss Federal Institute for Snow og Avalanche Research SLF, Davos. 134 pp. 2007. Tilgjengelig fra: URL: https://www.slf.ch/fileadmin/user_upload/SLF/Permafrost/Bauen_im_Permafrost/Lawinenverbau_im_Anbruchgebiet_E.pdf.
- [35] Grøn Ø. *hydrostatisk trykk i Store norske leksikon*. 2019. Tilgjengelig fra: URL: https://snl.no/hydrostatisk_trykk.
- [36] Larsen P. K. *Dimensjonering av stålkonstruksjoner*. 3. utgave. Bergen: Vigmostad & Bjørke AS, 2020. ISBN: 978-82-450-3391-5.
- [37] Timoshenko S. og Woinowsky-Krieger S. *Theory of Plates and Shells*. Second Edition. McGraw-Hill Book Company 32. ISBN: 0-07-064779-8.
- [38] Kaufmann R., Olufsen S. N., Fagerholt E. og Aune V. “Reconstruction of surface pressures on flat plates impacted by blast waves using the Virtual Fields Method”. I: *International Journal of Impact Engineering* 171 (2023), s. 104369. ISSN: 0734-743X. Tilgjengelig fra: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104369>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X2200210X>.
- [39] Andersen P. B. *strekklapp i Store norske leksikon*. 2017. Tilgjengelig fra: URL: <https://snl.no/strekklapp>.

- [40] Bell K. *Konstruksjonsmekanikk*. 4. opplag. Del 1 Likevektslære. Bergen: Vigmostad & Bjørke AS, 2020. ISBN: 978-82-450-1685-7.
- [41] Pierron F. og Grédiac M. *The Virtual Fields Method*. New York, USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2012. ISBN: 978-1-4614-1823-8.
- [42] Bell K. *An engineering approach to FINITE ELEMENT ANALYSIS of linear structural mechanics problems*. Fagbokforlaget Vigmostad & Bjørke AS. ISBN: 978-82-321-0268-6.
- [43] Olufsen S. N., Kaufmann R., Fagerholt E. og Aune V. “RECOLO: A Python package for the reconstruction of surface pressure loads from kinematic fields using the virtual fields method (2022)”. I: *Journal of Open Source Software*, 7(71), 3980, (). URL: <https://doi.org/10.21105/joss.03980>.
- [44] Bores A. P., Schmidt. R. J. og Sidebottom O. M. *ADVANCED MECHANICS OF MATERIALS*. Fifth Edition. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: ISBN 0-47 1-55 157-0.

