

Bjørn Vetle Madsen Basma
Philip Olav Farstad Kunz

Skredsikring på Svalbard

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Arne Aalberg
Juni 2022

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk



Foto: DS Entreprenør AS

Bjørn Vetle Madsen Basma
Philip Olav Farstad Kunz

Skredsikring på Svalbard



Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Arne Aalberg
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Etter de tragiske ulykkene på Svalbard i 2015 og 2017 ble det satt i gang omfattende arbeider for å sikre lokalbefolkningen mot skred. Det er knyttet usikkerhet til om de lokale forholdene på Svalbard gir opphav til en endring i snøens mekaniske egenskaper, sammenlignet med blant annet Fastlands-Norge og Alpelandene. Snø er et komplekst materiale som er under kontinuerlig omvandling. Denne prosessen kalles metamorfose. De mekaniske egenskapene varierer med flere faktorer, blant annet temperatur, vanninnhold, densitet og kornform. Derfor er det ikke gitt at maksimalt snøtrykk opptrer når snødybden er på sitt maksimale.

For å undersøke om snøens mekaniske egenskaper er annerledes på Svalbard ble det i 2017 satt i gang et felteksperiment. En forsøksvegg utstyrt med lastceller ble plassert i skrånende terreng for å måle snøtrykket gjennom vintersesongen. Dataen fra disse målingene ble brukt som utgangspunkt for å sammenligne snøtrykket fra forsøksveggen med beregningsanvisninger fra Statens vegvesen og The Institute for Snow and Avalanche Research i Sveits. Basert på tidligere felteksperiment fra Island var det knyttet usikkerhet til om beregningsmetodene fra Sveits underestimerte snøtrykket fra den maritime snøen på Svalbard, sammenlignet med den alpine snøen i Alpelandene. Resultatene viser at mistankene var korrekte, og at beregningsmetodene fra Sveits underestimerer snøtrykket på Svalbard.

Beregningene fra Vegvesenet viser derimot god overensstemmelse med målingene fra felteksperimentet når det sees bort ifra endeeffekter i beregningene. Endeeffektene kan være opptil fem ganger større enn snøtrykket på en uendelig lang støtteforbygning, og det er derfor viktig å kontrollere disse nøye. Snøtrykket på en støtteforbygning stammer fra snøsig og glidning som er kvasi-statiske bevegelser i snødekket. På Svalbard er det observert neglisjerbare deformasjoner som følge av glidning. Det kan derfor forventes at endeeffektene er mindre i størrelsesorden, sammenlignet med områder hvor glideforholdene er gode. I dag viser Vegvesenet til beregningsmetoder i Sveits for å beregne endeeffektene, og dette virker å være i overkant konservativt. Det foreslås derfor å supplere formelgrunnet til Statens vegvesen med egne beregningsmetoder for beregning av endeeffekter.

For å kunne simulere bevegelser i snødekket i skrånende terreng kreves det en kompleks tredimensjonal modell som må kunne ta høyde for variasjoner i temperatur og densitet i snødekket. I samarbeid med ETH Zürich utviklet Martin Stoffel et tredimensjonalt simuleringsverktøy basert på elementmetoden, hvor materiallovene i programvaren er basert på triaksiale tester med snø i Sveits. Med utgangspunkt i egne feltmålinger fra Svalbard ble det utført en simulering for å vurdere presisjonen til programvaren. Brukergrensesnittet i programvaren er begrenset per dags dato, noe som førte til komplikasjoner i analysene. Resultatene fra simuleringen viste seg å være urealistiske ettersom meshet i DTM-filen var for grovt inndelt.

Abstract

Because of the tragic accidents in Svalbard in 2015 and 2017, extensive work was initiated to protect the population from avalanches. There is uncertainty as to whether the local conditions in Svalbard give rise to a change in the mechanical properties of the snow, compared with mainland Norway and the Alpine countries. Snow is a complex material that undergoes continuous transformations. This process is called metamorphosis. The mechanical properties of the snow vary with temperature, water content, density, and grain shape in addition to several other factors. Therefore, it is not a given that the maximum snow pressure occurs when the snow depth is at its maximum.

To investigate whether the mechanical properties of snow are different in Svalbard, a field experiment was initiated in 2017. A test wall equipped with load cells was placed in sloping terrain to measure snow pressure throughout the winter season. The data from these measurements were used to compare the snow pressure from the field experiment with calculations from The Norwegian Public Roads Administration and The Institute for Snow and Avalanche Research in Switzerland. Based on previous field experiments from Iceland, it was suspected that the calculation methods from Switzerland underestimated the snow pressure. The reason for this was the different behavior in the mechanical properties of snow in a maritime climate, compared to the snow in the Alps. The results show that the suspicions were correct and that the calculation methods from Switzerland underestimate the snow pressure in Svalbard.

The calculations from The Norwegian Public Roads Administration on the other hand show good agreement with the measurements from the field experiment when the end effects in the calculations are disregarded. The end effects can be up to five times greater than the snow pressure on an infinite long support structure, and it is therefore important to control these carefully. The snow pressure on a support structure arises from quasi-static movements in the snowpack called creeping and gliding. In Svalbard, it is observed negligible deformations due to gliding of the snowpack. It can therefore be expected that the end effects are smaller in magnitude, compared to areas where the gliding conditions are good. The Norwegian Public Roads Administration refers to calculation methods in Switzerland for calculating the end effects, and this seems to be too conservative for the terrain characteristics in Svalbard. It is therefore proposed to supplement the calculation methods in the Norwegian guidelines with its own methods for calculating end effects.

To be able to simulate deformations of the snowpack in sloping terrain, a complex three-dimensional model is required to consider variations in temperature and density in the snowpack. In collaboration with EHT Zürich, Martin Stoffel developed a three-dimensional simulation tool based on the finite element method, where the material laws in the software are based on triaxial tests with snow in Switzerland. Based on field measurements from Svalbard, a simulation was carried out to evaluate the precision of the software. As of today, the user interface in the software is limited, and this led to complications in the analyzes. The results from the simulation proved to be unrealistic due to a DTM file with a mesh that was too coarse.

Forord

Denne masteroppgaven er utført ved institutt for konstruksjonsteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim våsemesteret 2022. Gruppen ønsket å skrive om stål, og etter en samtale med Arne Aalberg falt valget på sikringskonstruksjoner for snøskred i Longyearbyen. Formålet med oppgaven er å kartlegge hvilke metoder som finnes for beregning av snøtrykk, og sammenligne disse med målinger fra et felteksperiment på Svalbard.

Vi ønsker å takke UNIS, og spesielt professor Aleksey Shestov og overingeniør Sebastian Sikora som har vært behjelpelige i forbindelse med felteksperimentet på Svalbard. Shestov har også vært til stor hjelp med å lage en Digital Terrain Model som vi trengte til simuleringene, og det setter vi stor pris på. Vi ønsker også å takke studentene Paul og Simon på UNIS som gjennom våsemesteret har hjulpet oss med feltmålinger som har vært viktige for oppgaven vår.

Takk til Perry Bartelt og Olga Gorynina fra SLF. Med deres hjelp fikk vi videreført oppgaven slik vi ønsket og vi setter stor pris på å få hjelp fra fageksperter med så mange års erfaring innenfor rassikring. Vi ønsker dere lykke til videre med videreutvikling av programvaren.

Tusen takk til Arne Aalberg som introduserte oss for denne oppgaven og som tok oss med til Svalbard i starten av mars. Vi hadde en lærerik tur hvor vi fikk utført de nødvendige målingene til oppgaven. Utover det følte vi oss utrolig heldige som fikk sett noe av det unike Longyearbyen har å by på, med Arne som guide. Takk også til Haldis for samarbeidet og kameratskapet. Vi ønsker deg masse lykke til videre med doktorgradsavhandlingen og gleder oss til å lese den. Sist, men ikke minst, takk til Storm for godt selskap og guiding gjennom isbjørnland på mange fine snøscooterturer. Lykke til med musikkutdanningen.

Vi ønsker dere masse lykke til videre.

Innhold

| | |
|---|------|
| Figurer | xii |
| Tabeller | xvii |
| Forkortelser | xvii |
| 1 Introduksjon | 1 |
| 1.1 Vinter og snøskred | 1 |
| 1.2 Snøskred som naturkatastrofe | 1 |
| 1.3 Snøskred på Svalbard | 2 |
| 1.4 Forskning | 3 |
| 1.5 Problemstilling | 4 |
| 2 Teori | 5 |
| 2.1 Snøens egenskaper | 5 |
| 2.1.1 Snødannelse | 5 |
| 2.1.2 Snøtransport og drivsnø | 5 |
| 2.1.3 Snødekkets utvikling | 6 |
| 2.1.4 Lagsinndeling i snødekket | 9 |
| 2.1.5 Snøens fysiske egenskaper | 11 |
| 2.2 Snøens bevegelser i terrenget | 12 |
| 2.2.1 Glidning | 12 |
| 2.2.2 Snøsig | 13 |
| 2.3 Klima på Svalbard | 14 |
| 2.3.1 Mørketid og midnattssol | 14 |
| 2.3.2 Permafrost | 14 |
| 2.3.3 Maritime forhold | 16 |
| 2.3.4 Klimaendringer i Arktis | 17 |
| 2.3.4.1 Temperatur | 17 |
| 2.3.4.2 Albedoeffekten | 17 |
| 2.3.4.3 Nedbør | 18 |
| 2.3.4.4 Permafrost | 19 |
| 2.4 Snøskred | 19 |
| 2.4.1 Skredbanen | 19 |
| 2.4.2 Skredfarlig terreng | 20 |
| 2.4.3 Skredtyper | 21 |
| 2.4.3.1 Flakskred | 21 |
| 2.4.3.2 Løssnøskred | 22 |
| 2.5 Sikringstiltak mot snøskred | 23 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.5.1 | Støtteforbygninger | 23 |
| 2.5.1.1 | Stive konstruksjoner | 24 |
| 2.5.1.2 | Fleksible konstruksjoner..... | 28 |
| 2.5.2 | Sikring i skredbanen | 30 |
| 2.5.2.1 | Ledevoller | 30 |
| 2.5.2.2 | Fangvoller | 32 |
| 2.5.3 | Snøskjermer..... | 33 |
| 2.5.4 | Valg av sikringstiltak..... | 37 |
| 3 | Beregningsmetoder for snøtrykk | 38 |
| 3.1 | Introduksjon..... | 38 |
| 3.2 | Beregningsanvisninger fra SLF..... | 39 |
| 3.2.1 | Snøtrykket normalt på konstruksjonens bæreflate..... | 39 |
| 3.2.2 | Endeeffekter..... | 40 |
| 3.2.3 | Tilleggs kraft for ikke-normal lastflate | 42 |
| 3.2.4 | Resultantkraft..... | 43 |
| 3.2.5 | Øvrige laster | 43 |
| 3.2.6 | SLF tilpasset forhold på Island/Fastland-Norge | 44 |
| 3.3 | Beregningsanvisninger fra Statens vegvesen | 45 |
| 3.3.1 | Snøtrykket normalt på konstruksjonens bæreflate..... | 45 |
| 3.3.2 | Øvrige laster | 47 |
| 4 | 3D Snowpack Simulation Tool | 48 |
| 4.1 | Introduksjon..... | 48 |
| 4.2 | Snøens mekaniske egenskaper | 49 |
| 4.2.1 | Tøyningstilstander | 49 |
| 4.2.1.1 | Elastisk tøyning | 50 |
| 4.2.1.2 | Forsinket elastisk tøyning | 50 |
| 4.2.1.3 | Viskøs tøyning..... | 51 |
| 4.3 | 3D Elementformulering | 52 |
| 4.3.1 | Generering av mesh | 52 |
| 4.3.2 | Diskretisering | 59 |
| 4.3.2.1 | Standard elastisk element | 59 |
| 4.3.2.2 | Viskøst element..... | 62 |
| 4.3.2.3 | Elementer i svake lag i snødekket | 63 |
| 5 | Feltekspesiment på Svalbard | 65 |
| 5.1 | Oppbygning av forsøksveggen | 65 |
| 5.2 | Forsøksområdet | 66 |
| 5.3 | Teknisk system – Snow Load Testing System | 68 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.4 | Egne målinger..... | 69 |
| 5.4.1 | Helning..... | 69 |
| 5.4.2 | Densitet og temperatur i snødekket..... | 70 |
| 5.4.3 | Lufttemperaturmålinger..... | 72 |
| 5.4.4 | Snødybdemålinger..... | 74 |
| 5.4.5 | Snøakkumulasjon ved støtteforbygningene på Sukkertoppen | 76 |
| 6 | Resultater..... | 78 |
| 6.1 | Målinger fra Svalbard | 78 |
| 6.1.1 | Resultater fra sesongen 2019/2020 | 78 |
| 6.1.2 | Resultater fra sesongen 2020/2021 | 82 |
| 6.2 | Resultater fra beregninger | 86 |
| 6.2.1 | Grunnlag for beregninger..... | 86 |
| 6.2.2 | Beregninger | 87 |
| 6.3 | Resultater fra 3D Snowpack Simulation Tool..... | 88 |
| 7 | Diskusjon | 93 |
| 7.1 | Sammenligning av målinger og beregninger | 93 |
| 7.2 | Faktorer som påvirker snøtrykket..... | 95 |
| 7.3 | Glidning..... | 99 |
| 7.4 | Endeeffekter..... | 101 |
| 7.5 | Effektiv trykksone..... | 104 |
| 7.6 | Lastfordeling..... | 108 |
| 7.7 | Sammenligning av simuleringen og snøtrykket på forsøksveggen..... | 112 |
| 8 | Konklusjon..... | 115 |
| 9 | Videre arbeid | 116 |
| | Referanser | 117 |
| | Vedlegg..... | 123 |

Figurer

| | |
|--|----|
| Figur 1: Topptur i Møre og Romsdal. Foto: Sindre Thoresen Lønnes, DNT. Hentet fra: (Haaland, 2016)..... | 1 |
| Figur 2: Døde i snøskred i Norge 1972-2020. Figuren er hentet fra: (NGI, u.å.-b)..... | 2 |
| Figur 3: Snøskredet i Longyearbyen 19. Desember 2015. Foto: Helge Carlsen, NRK. Hentet fra: (NRK, u.å.)..... | 3 |
| Figur 4: Snøen blir transportert fra erosjonssone til leside hvor det dannes snøfonner. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014)..... | 6 |
| Figur 5: Eksempel på hvordan et snødekke er delt inn i flere lag. Foto er hentet fra: (Morin, 2014). | 6 |
| Figur 6: Nedbrytende omvandling av to snøkrystaller ved -5 og -8 °C. Tallene representerer snøkrystallens alder i dager, og figuren viser at nedbrytningen går raskere ved varmere temperaturer. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014)..... | 7 |
| Figur 7: Begerkrystaller i snødekket. Foto: Thomas Stucki, SLF. Hentet fra: (SLF, u.å.-a). | 8 |
| Figur 8: Foto av snødekket med rimkrystaller. Foto er hentet fra: (Kvambekk, 2015). | 9 |
| Figur 9: Eksempel på hvordan snødekket kan være delt opp i flere lag med forskjellig fasthet. Figuren er hentet fra: (AVALANCHE, u.å.). | 10 |
| Figur 10: Lagene i et snødekke. Solen skinner gjennom de svake lagene bestående av luftig og lett snø. Foto: Markus Landrø. Hentet fra: (Varsom, u.å.-d)..... | 10 |
| Figur 11: Venstre figur viser sammenhengen mellom belastning og forskyvning for snø som har en viskoelastisk oppførsel, og et elastisk materiale. Høyre figur illustrerer hvordan forskyvning påvirker snøens struktur. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014). .. | 11 |
| Figur 12: Snøen foldes sammen som følge av glidning mot underlag av gress. Foto er hentet fra: (McClung & Schaerer, 2006) | 13 |
| Figur 13: Deformasjonene i snødekket som følge av snøsig. På bildet til høyre ses effektene av snøsig (glideeffekten her er neglisjerbar). Hentet fra: (Norem, 2014). | 13 |
| Figur 14: Total deformasjon i snødekket som følge av snøsig og glidning. Figuren er hentet fra: (McClung & Schaerer, 2006). | 14 |
| Figur 15: Skisse over permafrost i landmasser som viser hvordan det øvre laget tiner når sommeren kommer. Det nedre laget varmes fra jordens indre. Figuren er hentet fra: (Lilleøren, 2018). | 15 |
| Figur 16: Oversikt over ulik inndeling i permafrosten med varierende isinnhold og en islinse (Ice wedge) i midten. Figuren er hentet fra: (Wallace, 2019) | 16 |
| Figur 17: Densitetsmålinger fra 1976-1990. «Body force index» er produktet av densiteten, snødybden og tyngdekraftens akselerasjon. Tabellen er hentet fra: (Hjorth-Hansen et al., 2000). | 17 |
| Figur 18: Illustrasjon av hvordan Arktis får økt oppvarming på grunn av at lyse overflater og permafrosten forsvinner, og det blir større havområder. Figuren er hentet fra: (Winther et al., 2016). | 18 |
| Figur 19: Inndeling av skredbanen. Foto er hentet fra: (Norem, 2014). | 20 |
| Figur 20: Skredtyper som følge av terrenghelningen. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014)..... | 20 |
| Figur 21: Vinden transporterer snø i Lofoten. Foto: Ragnar Ekker. Hentet fra: (Varsom, u.å.-a) | 21 |
| Figur 22: Bruddkant etter flakskred. Foto: NGI. Hentet fra: (Jaedicke, 2021)..... | 21 |
| Figur 23: Spenningsfordeling for et flak i snødekket. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014)..... | 22 |

| | |
|---|----|
| Figur 24: Typisk bruddform for løssnøskred. Foto er hentet fra: (Varsom, 2021). | 23 |
| Figur 25: Tre rader med støtteforbygninger montert på Sukkertoppen på Svalbard. I løpet av 2021 og 2022 skal 15 nye rader med støtteforbygninger monteres til høyre for eksisterende konstruksjoner. Foto er hentet fra: (DS Entreprenør, 2018). | 24 |
| Figur 26: Støtteforbygninger på Sukkertoppen på Svalbard. Foto er hentet fra: (DS Entreprenør, 2018)..... | 25 |
| Figur 27: Avstandsfaktor. Figuren er hentet fra: (Margreth, 2007). | 26 |
| Figur 28: Konseptskisse av en støtteforbygning. Figuren er hentet fra: (Margreth, 2007). | 26 |
| Figur 29: Typisk fundamentløsning for støtteforbygninger i stål. Figuren er hentet fra: (Margreth, 2007). | 27 |
| Figur 30: Konseptskisse av en typisk nettkonstruksjon. Figuren viser også hvordan nettet kan deformeres som følge av snøtrykk. Figuren er hentet fra: (Margreth, 2007). Redigert av: Vetle Basma..... | 28 |
| Figur 31: Bildet viser fullskala test av ringnett i henhold til europeisk standard EAD 340059-00-0106. Foto er hentet fra: (Geobrudd, u.å.). | 29 |
| Figur 32: Stålnett på Sørøya i Finnmark. Veien mellom Sørvær og Hasvik var utsatt for steinras på sommerstid og snøskred på vinterstid. Hovednettet er supplert med et sekundærnett som har mindre maskestørrelse. Foto er hentet fra: (Geobrudd, 2019). . | 30 |
| Figur 33: En sammenhengende ledevoll i kombinasjon med en fangstvoll beskytter innbyggerne i Siglufjörður på Island fra mulige skredmasser. Figuren hentet fra: (NGI, u.å.-c). Redigert av: Vetle Basma. | 30 |
| Figur 34: Bilde som viser ledevoll i Loen i Gjølmunna kommune som styrer skredmasser vekk fra bebyggelse. Figuren er hentet fra: (Kristensen et al., 2017). Redigert av: Vetle Basma..... | 31 |
| Figur 35: Fangvoll bygd med løsmasser i Siglufjörður på Island, samme fangvoll som ses på figur 33. Figuren er hentet fra: (Landslag, 2003). | 32 |
| Figur 36: Figuren viser optimal plassering av snøskjerm for maksimal effekt av snølagring. Figuren er hentet fra: (Larsen, 2016). Redigert av: Vetle Basma..... | 33 |
| Figur 37: Platåfjellet på Svalbard. Her kan det være gunstige forhold for bruk av snøskjerm som sikringsmetode. Foto: Jan Otto Larsen. Hentet fra: (Larsen, 2016).... | 34 |
| Figur 38: Typisk utforming av en snøskjerm. Figur: Vetle Basma. | 35 |
| Figur 39: Figuren viser variasjonen i relativ maksimal vindhastighet foran, under og bak skjermene med varierende bakkeklaring og total skjermtetthet. Vindhastigheten er målt 20 cm over bakken. Figuren er hentet fra: (Tesaker, 1969). | 35 |
| Figur 40: Bilde av snøskjerm på nordsiden av Sukkertoppen ved Longyearbyen. Bakkeklaringen ble kontrollmålt til 85 cm som tilsvarer 21 % av den totale skjermhøyden på 4 meter (Jonsson et al., 2018). Foto: Vetle Basma..... | 37 |
| Figur 41: Statisk snøtrykk kan deles opp i to bidrag: Snøsig og glidning. Figur: Vetle Basma..... | 38 |
| Figur 42: Høydefaktor. Tabellen er hentet fra: (Margreth, 2007). | 39 |
| Figur 43: Snøsigfaktor K som funksjon av snøens densitet og helning. Tabellen er hentet fra: (Margreth, 2007)..... | 40 |
| Figur 44: Glidningsfaktor. Tabellen er hentet fra: (Margreth, 2007). | 40 |
| Figur 45: Figuren viser hvordan strømninger rundt et objekt kan skape dragkrefter. «Object» er den utsatte konstruksjonsdelen og «Direction of Motion» viser til snødekkets nedoverrettede glideretning, i overført betydning. Figuren er hentet fra: (Sciencefacts, 2020)..... | 41 |
| Figur 46: Figuren viser en støtteforbygning sett ovenfra med lastfordeling av endekrefter. Figuren er hentet fra: (Margreth, 2007). | 41 |

| | |
|--|----|
| Figur 47: Figuren viser støtteforbygningen tiltet nedover og tilleggskomponenten G' som oppstår når støtteforbygningen ikke står normalt på terrenget. Figur: Vetle Basma. | 43 |
| Figur 48: Siglufjörður, lokalisert nord på Island. I bakgrunnen ses rassikringskonstruksjoner i skråningen. Foto: Christopher Sturman. Hentet fra: (Robbins, 2015)..... | 44 |
| Figur 49: Trykkfordeling og resulterende krefter mot en støtteforbygning. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014). | 45 |
| Figur 50: Normalisert sigetrykk mot en støtteforbygning, σ_x , som funksjon av terrenghelningen. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014)..... | 46 |
| Figur 51: Det rektangulære grunnmeshet uten støtteforbygninger. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006)..... | 52 |
| Figur 52: Det rektangulære meshet med støtteforbygninger illustrert som tykkere linjer. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006)..... | 53 |
| Figur 53: Støtteforbygningens ekstra noder og kanter. Linjene ligger oppå hverandre som vist til venstre, men til høyre er de separert for å illustrere forskjellen. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006). | 53 |
| Figur 54: Det rektangulære grunnmeshet med høydeinformasjon fra en DTM. Punktene indikerer høydedata fra DTM-filen. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006)..... | 54 |
| Figur 55: Normalen til en node som gjennomsnitt av fire tilstøtende kanter. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006). | 54 |
| Figur 56: Til venstre ser man det kubiske meshet med konstant vertikal høyde. Samme mesh er presentert til høyre, men med en konstant høyde målt normalt på terrenget. Begge modeller er sett fra siden. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006)..... | 55 |
| Figur 57: Et kubisk mesh med ett lag. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006). | 55 |
| Figur 58: Et tetraedrisk mesh med ett lag. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006). | 56 |
| Figur 59: Hver kube i det kubiske meshet blir delt inn i fem tetraedre, med node-nummerering. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006)..... | 57 |
| Figur 60: Til venstre er det svake elementet med lokal nodenummerering og tilhørende tetraedre illustrert. Høyre del av figuren viser det svake elementet isolert med det lokale koordinatsystemet. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006). | 58 |
| Figur 61: Overgangselementer mellom svak og ikke-svak sone. Begge elementene utfyller hverandre i meshet. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006). | 58 |
| Figur 62: Lineært tetraederelement med fire noder og totalt tolv frihetsgrader. Figuren er hentet fra: (Mathisen, 2021c)..... | 59 |
| Figur 63: Pascals trekant (pyramide) i 3D. Formfunksjonene for tetraederelementet inneholder første trappetrinn i pyramiden. Figuren er hentet fra: (Mathisen, 2021c)..... | 60 |
| Figur 64: Lokalt koordinatsystem for et svakt element i 2D. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006)..... | 64 |
| Figur 65: Konseptskisse av forsøksveggen. Skissen viser snitt av vegg og detaljskisse av en lastcelle. Figur: Jan Are Jacobsen. Hentet fra: (Jacobsen, 2017). | 65 |
| Figur 66: Figuren viser lastcellene montert med kulelagrede ledd i hver ende. Foto: Jan Are Jacobsen. Hentet fra: (Jacobsen, 2017). | 66 |
| Figur 67: Forsøksveggen er plassert 78.23444°N, 15.46472°E. Figuren er hentet fra: (UNIS, 2021)..... | 67 |
| Figur 68: Forsøksveggen oppstilt ved tidligere plassering, veggen er flyttet i etterkant. Foto: Jan Are Jacobsen. Hentet fra: (Jacobsen, 2017)..... | 67 |
| Figur 69: Snow Load Testing System. Foto hentet fra: (UNIS, 2021). | 68 |
| Figur 70: SUUNTO PM-5 til venstre. Hentet fra: (SUUNTO, u.å.). Nikon Forestry Pro til høyre. Hentet fra: (Nikon, u.å.). | 69 |

| | |
|--|----|
| Figur 71: Terrenget foran vegg. Ved fem og ti meter er det en endring i helning. Hentet fra: vedlegg E. | 70 |
| Figur 72: Resultatene fra temperatur og densitetsmålingene. Hentet fra: vedlegg E. | 71 |
| Figur 73: Bilde av hvordan temperaturmålingene i snødekket blir målt. Foto: Philip Kunz. | 72 |
| Figur 74: Grafen over viser temperaturen fra lufttemperaturmåleren i perioden januar–juni 2020. Figuren er hentet fra: vedlegg C. Grafen under viser det samme for Svalbard Lufthavn og er hentet ut fra yr sin historikk. Figuren er hentet fra: (Yr, u.å.). | 73 |
| Figur 75: Bilde av vegg med snødybdemåleren på toppen. Vinkelen i hjørnet er tilnærmet 90 grader. Foto: Vetle Basma. | 74 |
| Figur 76: Bilde av hvordan snødybdemålingene ble tatt med søkestenger. Foto: Haldis Døvre Kalland. | 75 |
| Figur 77: Snødybdemålingene ovenfor forsøksveggen i tre linjer: venstre, midten og høyre. Hentet fra: vedlegg E. | 76 |
| Figur 78: Snøakkumulasjon bak øverste støtteforbygning på Sukkertoppen. Foto: Philip Kunz. | 77 |
| Figur 79: Snødybden for 2019/2020-sesongen. Hentet fra: vedlegg C. | 79 |
| Figur 80: Snøtrykk på de fire lastcellene til forsøksveggen. Hentet fra: vedlegg C. | 80 |
| Figur 81: Jevnt fordelt snøtrykk fra de fire lastcellene fordelt utover forsøksveggens bæreflate. Hentet fra: vedlegg C. | 80 |
| Figur 82: Temperaturer ved ulike dybder i snødekket. Hentet fra: vedlegg C. | 81 |
| Figur 83: Lufttemperaturen ved forsøksveggen fra november 2019 til juni 2020. Hentet fra: vedlegg C. | 82 |
| Figur 84: Snødybden for 2020/2021-sesongen. Hentet fra: vedlegg C. | 82 |
| Figur 85: Snøtrykket på de fire lastcellene for 2020/2021-sesongen. Figuren er hentet fra: vedlegg C. | 83 |
| Figur 86: Jevnt fordelt snøtrykk fra de fire lastcellene for 2020/2021-sesongen. Hentet fra: vedlegg C. | 84 |
| Figur 87: Temperaturer ved ulike dybder i snødekket. Hentet fra: vedlegg D. | 84 |
| Figur 88: Lufttemperaturen ved forsøksveggen fra april 2021 til august 2021. Hentet fra: vedlegg D. | 85 |
| Figur 89: Densitetsmålinger fra februar til og med mai. Merk at densiteten i mai er hentet fra Snøen sine målinger fra 2019 på grunn av mangelen på data. Data fra 2022 er markert med kryss, og målingen fra 2019 er markert med trekant. Figuren er hentet fra: Vedlegg F. | 86 |
| Figur 90: Forenkling av lastfordelingen til endeeffektene. Figur: (Margreth, 2007). Redigert av: Vetle Basma. | 87 |
| Figur 91: Densitet- og temperaturprofil. Målingene ble utført 04.03.2022 ved forsøksveggen på Svalbard. Figur: Vetle Basma. | 88 |
| Figur 92: DTM-fil av området rundt forsøksveggen. Utklipp: Aleksey Shestov. Redigert av: Vetle Basma. | 88 |
| Figur 93: Snøtrykket på de fire lastcellene på forsøksveggen. Grafen viser ca. 1.75, 2.05, 2.4 og 2.9 kN for henholdsvis lastcelle 1, 2, 3 og 4. Figuren er hentet fra: (UNIS, 2021). | 89 |
| Figur 94: Dekomponering av lastkomponenter ut ifra global X-, Y- og Z-retning for å finne normalkraften på forsøksveggen. Figur: Vetle Basma. | 90 |
| Figur 95: Figuren viser deformasjoner i snødekket i meter. Modelldomenet er 40x40 m. Høydekoordinatene etter det sveitsiske koordinatsystemet er vist i hjørnene og på midten av modellen for å visualisere hvordan forsøksveggen er orientert i terrenget (swisstopo, u.å.). Utklipp: Olga Gorynina. Redigert av: Vetle Basma. | 91 |

| | |
|---|-----|
| Figur 96: Oversikt over interpolasjonspunktene og nodene i meshet som er i kontakt med forsøksveggen. Figur: Vetle Basma..... | 92 |
| Figur 97: Snøtrykk fra felteksperimentet 2019/2020-sesongen sammenlignet med beregningene til SLF og Statens vegvesen, både med og uten endeeffekter. Hentet fra: vedlegg C. | 94 |
| Figur 98: Snøtrykk fra felteksperimentet 2020/2021-sesongen sammenlignet med beregningene til SLF og Statens vegvesen, både med og uten endeeffekter. Hentet fra: vedlegg C. | 94 |
| Figur 99: Snøtrykkberegninger uten endeeffekter fra SLF og SVV med varierende helning. Beregningene er utført med samme parametere som resultatene i kapittel 6. Hentet fra: vedlegg A..... | 95 |
| Figur 100: Snødybde og jevnt fordelt snøtrykk på forsøksveggen for 2019/2020-sesongen. Hentet fra: vedlegg J..... | 96 |
| Figur 101: Snødybde og jevnt fordelt snøtrykk på forsøksveggen for 2020/2021-sesongen. Hentet fra: vedlegg J..... | 97 |
| Figur 102: Jevnt fordelt snøtrykk for 2019/2020- og 2020/2021-sesongen. Hentet fra: vedlegg C. | 98 |
| Figur 103: Eksempel på forsøk for å vurdere bevegelsene i snødekket. Figur: Vetle Basma..... | 99 |
| Figur 104: Bilder viser plasseringen av de 20 lastcellene på støtteforbygningen. Bildet er hentet fra: (Hewes et al., 2016)..... | 100 |
| Figur 105: Snøtrykket fra slutten av desember 2014 til midten av mars 2015. Figuren er hentet fra: (Hewes et al., 2016)..... | 100 |
| Figur 106: Snøtrykket på lastcelle 4, 9, 14 og 19 gjennom vinteren 2015. Figuren er hentet fra: (Hewes, 2017). | 102 |
| Figur 107: Plassering av lastceller med PC4, PC9, PC14 og PC19 plassert på nest nederste rad. Det var ikke mulig å oppdrive figuren i bedre oppløsning. Figuren er hentet fra: (Hewes, 2017). | 103 |
| Figur 108: Plassering og avstand til støtteforbygningene sett ovenfra. Figur: Vetle Basma..... | 103 |
| Figur 109: Sammenhengen mellom høyden av snødekket og trykksonen for en en- og todimensjonal modell. Figuren er hentet fra: (McClung, 1982)..... | 105 |
| Figur 110: Figuren viser omfanget av trykksonen hvor støtteforbygningene påvirker deformasjonene i snøen. Trykksonen er markert i farger og nøytral sone i grått. Fargeskalaen til venstre viser deformasjoner i snøen i meter. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006)..... | 106 |
| Figur 111: Figuren viser hvordan varierende helning påvirker utbredelsen av influenssonen. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006). | 107 |
| Figur 112: Terrengprofil med varierende snødybde og helning i et snitt tatt ca. midt på forsøksveggen. Figuren viser ikke de eksakte forholdene, men er en tilnærming av målingene som er forklart i kapittel 5.4. Figur: Vetle Basma. | 108 |
| Figur 113: Antatt lastfordeling for øvre og nedre lastceller for en gitt snødybde. Figur: Vetle Basma. | 109 |
| Figur 114: Trykkfordeling som funksjon av konstruksjonshøyden for 2014/2015- og 2015/2016-sesongen. Figuren er hentet fra: (Hewes et al., 2016). | 109 |
| Figur 115: Lastfordeling over støtteforbygningens høyde med konstant densitet. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006)..... | 110 |
| Figur 116: Lastfordeling over støtteforbygningens høyde med lineært avtagende densitet fra 300 kg/m ³ i bunnen av snødekket, til 210 kg/m ³ i toppen. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006)..... | 111 |

| | |
|--|-----|
| Figur 117: Lastfordeling for snøtrykk med deformasjoner kun fra snøsig. Figur: Vetle Basma..... | 111 |
| Figur 118: Figuren viser plasseringen av forsøksveggen etter det sveitsiske koordinatsystemet. Figur: Vetle Basma. | 113 |
| Figur 119: Modellen viser snødekket inndelt i 25 000 tetraederelementer. Meshet er generert i Abaqus for visualisering. Figur: Vetle Basma. | 113 |

Tabeller

| | |
|--|----|
| Tabell 1: Klasseinndelingen av våt snø i prosent vanninnhold. Kilde: (Norem, 2014). | 8 |
| Tabell 2: Terrenghelning målt i tre avstander skrått oppover i terrenget fra veggen. | 70 |
| Tabell 3: Snødybdemålinger foran forsøksveggen, målt skrått oppover i terrenget i tre linjer. Hentet fra: vedlegg E. | 75 |
| Tabell 4: Snøtrykk for 2019/2020-sesongen med en densitet på 500 kg/m ³ . Lastverdiene er hentet fra: vedlegg A. | 87 |
| Tabell 5: Snøtrykk for 2019/2020-sesongen med en densitet på 500 kg/m ³ . Lastverdiene er hentet fra: vedlegg A. | 87 |

Forkortelser

| | |
|------|---|
| NGI | Norges Geotekniske Institutt |
| DSB | Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap |
| PBL | Plan- og bygningsloven |
| SVV | Statens vegvesen |
| SLF | The Institute for Snow and Avalanche Research |
| ACIA | Arctic Climate Impact Assessment |
| NVE | Norges vassdrags- og energidirektorat |
| WSL | The Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research |
| FEM | Finite Element Method |
| DTM | Digital Terrain Model |
| CST | Constant Strain Triangle |
| CPU | Central Processing Unit |
| Psi | pound-force per square inch |
| CSV | Character Separated Values |

1 Introduksjon

1.1 Vinter og snøskred

Snødekte fjelltopper, skiturer og turer på høyfjellet er noe av det fineste Norge har å by på. Hver vinter daler snøen ned i store deler av landet og dekker landskapet til et hvitt vinterparadis. Det sies at vi nordmenn er født med ski på beina, og at vi er flinke til å utnytte mulighetene det snødekte landskapet har å by på. Selv om vinteren byr på uendelig med muligheter, kommer den også med utfordringer som må tas hensyn til. I snødekte fjellområder kan det være stor risiko knyttet til snøskred ettersom de kan forårsake store ødeleggelser. Snøskred betegnes som en øyeblikkelig forflytning av store snømengder ned en skråning eller en fjellside. Disse kan oppstå helt uten forvarsel, og det er først og fremst denne uforutsigbarheten som gjør snøskred til et så farlig naturfenomen.

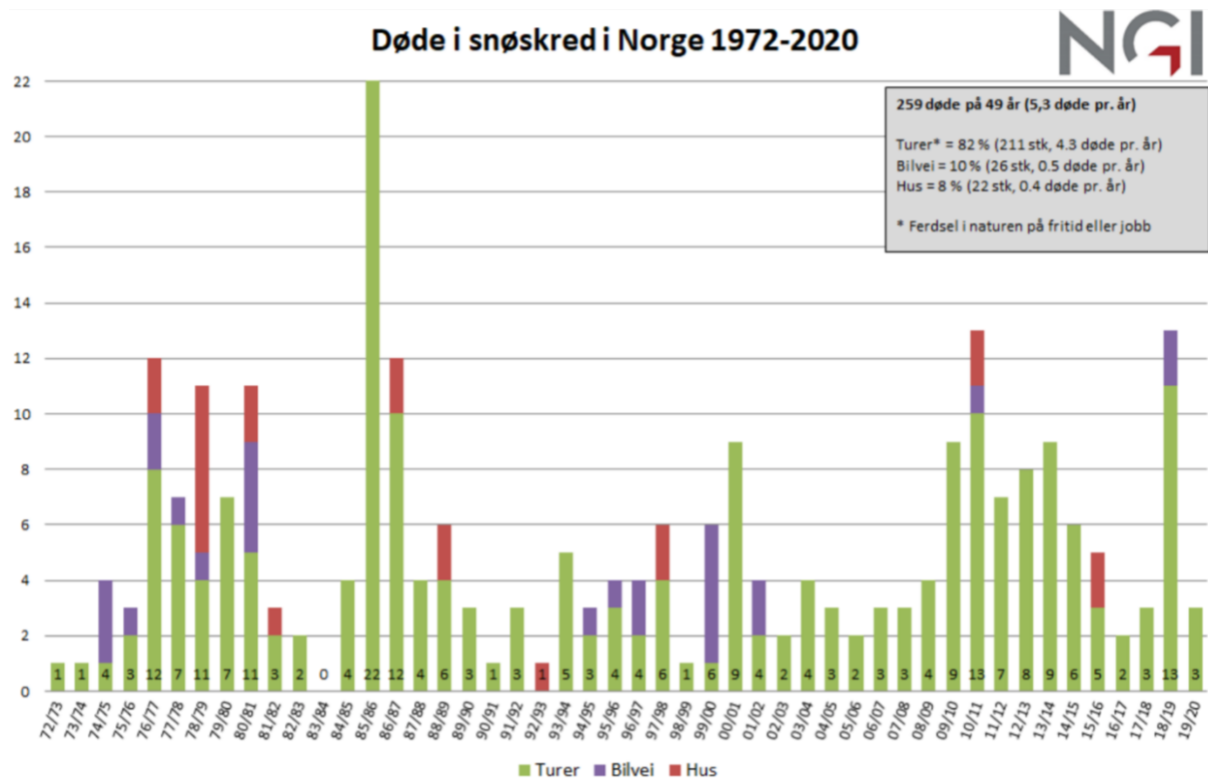


Figur 1: Topptur i Møre og Romsdal. Foto: Sindre Thoresen Lønnes, DNT. Hentet fra: (Haaland, 2016).

1.2 Snøskred som naturkatastrofe

Siden 1972 har Norges Geotekniske Institutt (NGI) ført statistikk over antall omkomne i forbindelse med snøskred i Norge. Totalt har 259 mennesker mistet livet sitt i snøskred fra 1972 til og med vinteren 2019/2020 (NGI, u.å.-b). Oversikten vises i figur 2, og statistikken skiller mellom tre ulike dødsårsaker: mennesker som har blitt truffet av snøskred på tur, når de har kjørt bil og snøskred som har truffet bebyggelse. Flertallet av

disse er skikjørere og folk som ferdes i bratt terreng. Det var blant annet tilfellet under tragedien i Vassdalen 5. mars 1986 hvor en tropp ingeniørsoldater ble tatt av snøskred under NATOs vinterøvelse. Skredet førte til at 16 soldater omkom (NGI, u.å.-b), og dette er bakgrunnen for at det høyeste antall omkomne i Norge i løpet av en sesong er vinteren 1985/1986. Videre minner snøskredene som rammet bebyggelse på Svalbard i 2015 og i Italia i 2017 oss på at snøskred ikke bare er en utfordring for friluftsfolk, men også for samfunnssikkerheten den dag i dag.



Figur 2: Døde i snøskred i Norge 1972-2020. Figuren er hentet fra: (NGI, u.å.-b).

1.3 Snøskred på Svalbard

Svalbard har gjennom historien vært offer for mange snøskred. Siden år 2000 har ni personer dødd i snøskred på Svalbard – fem på snøscooter, to skikjørere og to i bebyggelse. Det siste skredet som traff bebyggelse fant sted i Longyearbyen 19. desember i 2015 (Engeset et al., 2020; NGI, u.å.-b). Skredet førte til at flere personer ble skadet og to omkom. Snøskredet ble utløst i nedre del av Sukkertoppen, og gikk i retning mot spisshusene i Lia. Ifølge Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) ble elleve hus totalskadet og over 200 personer evakuert (DSB, 2016). Figur 3 viser skredutløsningsområdet og hvordan de enorme skredmassene forflyttet seg ned mot spisshusene i Lia. Skredvolumet var på omkring 20 000 m³, og bruddlinjen var rundt 200 meter bred med 2-3 meter høy bruddkant. Skredet hadde et langt utløp og ble i etterkant klassifisert som et skred i klasse 4 (DSB, 2016). I Norge og Europa deles skredstørrelser inn i fem klasser. De baserer seg på volumet til snøskredet der klasse 1 er minst og 5 er størst (Varsom, u.å.-c).

Det var flere faktorer som førte til at skredet gikk. I forkant av 18. desember var snødekket på Sukkertoppen tynt, og temperaturen var lav. Dette førte til at det ble

dannet et svakt snølag. Videre førte den sterke vinden og snøværet den 18. og 19. desember til stor snøakkumulasjon mot lesiden av Sukkertoppen. Denne tunge fokksnøen ble på grunn av temperaturendringer enda tyngre, noe som til slutt førte til at det svake snølaget under kollapset. For å unngå slike katastrofer i fremtiden eksperimenteres det i dag mye på snøskred. Det forskes på hvordan man kan forutse skred, optimalisere varslingsrutiner og på ulike tiltak som kan forhindre at snøskred utløses (DSB, 2016).



Figur 3: Snøskredet i Longyearbyen 19. Desember 2015. Foto: Helge Carlsen, NRK. Hentet fra: (NRK, u.å.).

1.4 Forskning

Forskningen i Norge startet i 1972 etter at Stortinget ga NGI det nasjonale ansvaret for forskningen på snøskred. NGI har brukt en fullskala skredrenne på Stryn, og utviklet metoder for å forstå de ulike mekanismene ved snøskred. Deriblant skredets rekkevidde og hvilke krefter et snøskred kan påføre et objekt som står i dets vei (NGI, u.å.-e). Arbeidet har også ført til nye sikkerhetskrav for snøskred i gjeldende Plan- og bygningslov (PBL). Kravet for boliger er at de ikke skal plasseres i områder med sannsynlighet for skred mindre enn 1:1000 per år. For blant annet sykehus, hoteller og barnehager er dette kravet 1:5000 (NGI, u.å.-a). Den omfattende forskningen har også ført til at man vet mer om ulike fysiske sikringstiltak, som for eksempel ledevoller og støtteforbygninger. Snøens oppførsel er imidlertid kompleks, og det brukes fortsatt mye tid på å forske på dette området. Etter skredet i 2015 i Longyearbyen ble det etablert en rekke lokale sikringstiltak mot snøskred. Tiltakene innebar blant annet utarbeidelse av risikokart og varslingsrutiner, samt at bebyggelse i rasutsatte områder ble revet. I tillegg ble det utarbeidet en plan for bruk av fysiske sikringstiltak for å sikre Longyearbyen mot skred.

1.5 Problemstilling

Gruppen ønsker å se nærmere på hvilke beregningsmetoder som finnes for å beregne snøtrykk mot støtteforbygninger, og sammenligne dette med data fra feltforsøk på Svalbard. Hensikten er å undersøke hvordan miljøet på Svalbard påvirker snøens mekaniske egenskaper, og om beregningsmetodene som er tatt i bruk i Alpelandene og Fastlands-Norge må tilpasses forholdene på Svalbard dersom de skal benyttes der. I tillegg vil gruppen gjennomføre simuleringer med et 3D-simuleringsverktøy som er utviklet i Sveits, hvor hensikten er å simulere feltforsøket på Svalbard. Problemstillingen er derfor todelt:

- 1) Hvordan påvirker miljøet på Svalbard snøens mekaniske egenskaper sammenlignet med Fastlands-Norge og Alpelandene? Hvilke tilpasninger må gjøres for å ta høyde for eventuelle ulikheter i beregningsanvisningene?*
- 2) Vil simuleringsverktøyet kunne simulere feltforsøket på Svalbard med tilstrekkelig presisjon?*

2 Teori

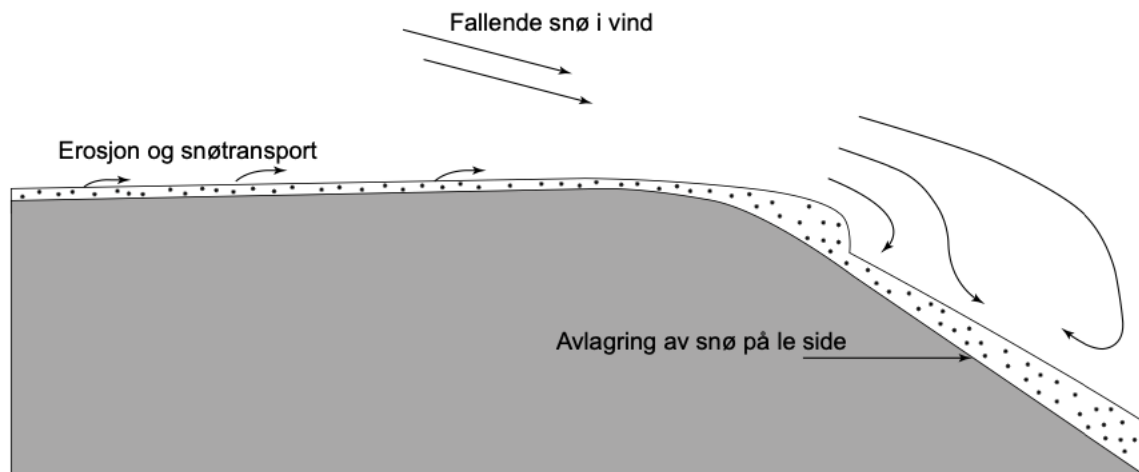
2.1 Snøens egenskaper

2.1.1 Snødannelse

I den laveste delen av atmosfæren dannes iskrystaller i kald, vannmettet luft ved at underkjølt damp fester seg til små frysekjerner (Norem, 2014). Disse vokser til bestemte snøkrystalltyper bestående av vanligvis plater og stjerner. Etter hvert som snøkrystallene vokser blir de for tunge til at oppadgående luft klarer å holde dem oppe, og de blir felt ut som nedbør. I en hastighet på rundt 1 m/s faller de mot bakken gjennom flere lag i atmosfæren. Dersom temperaturen er rundt 0 °C vokser de raskere, og ved lite vind kan snøkrystallene klumpe seg sammen til større flak. Så lenge temperaturen ikke er mye over null grader, vil ikke snøen smelte langs veien, og den legger seg på bakken som snø (Ólafsson et al., 2007). Mengden snø i et område avhenger av flere faktorer, som for eksempel temperatur og nedbør. Geografisk sett varierer dette ut ifra hvor man befinner seg. Det er for eksempel kaldere i høyden, noe som kan føre til lenger varighet på vintersesongen. Videre er det mer nedbør på Vestlandet enn på Østlandet på grunn av fjellene som skaper en skjermende effekt (Mamen, 2021). Temperaturen varierer imidlertid mer i Innlandet, med kaldere vintre og varmere somrer. Mot kysten er ikke variasjonen i temperatur like stor ettersom havet har en stabiliserende effekt. Derfor er det i snitt mindre snø på Vestlandet enn på Østlandet og i Innlandet.

2.1.2 Snøtransport og drivsnø

Når vinden påfører skjærspenninger større enn snøpartiklene kan motstå, blir den revet opp fra snødekket og ført med vinden. Dersom det er nysnø med lav fasthet, trenger vinden en hastighet på mellom 4 og 5 m/s. Har snøen en høyere fasthet, trengs det derimot hastigheter opp mot 6-8 m/s (Norem, 2014). Dersom vindens transportkapasitet er mettet, felles det ut snø når vindstyrken blir betydelig redusert over en viss avstand. Denne drivsnøen danner deretter snøfonner. Transportkapasiteten til vinden blir raskere mettet dersom den virker over store, åpne områder. Disse områdene kalles erosjonssoner eller strøklengder. For at vindstyrken skal bli betydelig redusert trengs det kun en liten hellingsendring i terrenget, men også hindre som bekkedaler og skogkanter har samme effekt. Alle disse hindrene er naturlige, men det finnes også mange menneskeskapte hindre, som for eksempel bygninger. Snøtransportens gang over terrenget er illustrert i figur 4, som viser hvordan fonnområdet vil fylles med drivsnø.



Figur 4: Snøen blir transportert fra erosjonszone til leside hvor det dannes snøfonner. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014).

2.1.3 Snødekkets utvikling

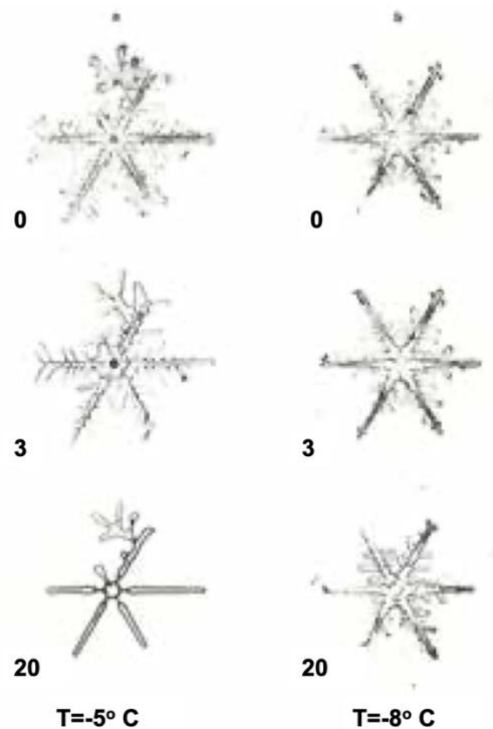
Snøens metamorfose handler om at snøen konstant undergår en omvandlingsprosess. Dette skjer umiddelbart etter at snøen har landet, og foregår helt til den smelter om våren (Norem et al., 2014). Denne omvandlingsprosessen påvirker hvordan snølagets fasthet, tetthet og lagdeling utvikler seg. Prosessen kan deles inn i fire hovedgrupper: nedbrytende, oppbyggende, smelteomvandling og overflateprosesser.



Figur 5: Eksempel på hvordan et snødekke er delt inn i flere lag. Foto er hentet fra: (Morin, 2014).

Nedbrytning av snøen starter med en gang snøen lander på bakken, uavhengig av temperatur. Dette skjer ved at forgreininger og skarpe kanter i krystallen brytes ned.

Proessen går raskere jo varmere det er, og derfor vil snøen under kuldeperioder holde på den løse og lette konsistensen over lenger tid. Når snøen brytes ned vil den først få en lavere fasthet ved at de fine forgreiningene brytes ned. Deretter bygges det isbroer mellom krystallene, og fastheten og tettheten øker (Norem, 2014). Den neste fasen skjer om våren når det blir varmere og hele snødekket får en temperatur på 0 °C. Da smelter isbroene og fastheten blir betydelig redusert. Dette kan føre til løssnøskred i bratte områder. Etter at snøen har sunket sammen, og isbroer dannes mellom krystallene, vil snødekket stabilisere seg på grunn av flere kontaktpunkter mellom krystallene (Rudolf-Miklau et al., 2015). Etter at snøen har sunket sammen har den også fått en høyere densitet.



Figur 6: Nedbrytende omvandling av to snøkrystaller ved -5 og -8 °C. Tallene representerer snøkrystallens alder i dager, og figuren viser at nedbrytningen går raskere ved varmere temperaturer. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014)

Den oppbyggende omvandlingen forekommer på grunn av vanntransport i snødekket. Dette skjer når temperaturforskjellen mellom bakken og overflaten av snødekket er over 10 °C per meter i tykkelsen av snødekket. Ifølge Institute for Snow and Avalanche Research (SLF) er temperaturen ved bakken vanligvis rundt 0 °C, og siden overflatetemperaturen på snødekket følger temperaturen i luften foregår denne omvandlingen ofte (SLF, u.å.-a). Vanntransporten skjer fra det varme opp til det kalde området i snødekket, og fører til kondensering på de kaldere krystallene. Disse vokser deretter i størrelse og danner kornsnø, og etter hvert begerkrystaller hvor begge har lav fasthet. *The Technical Avalanche Protection Handbook* forteller at vanntransporten mellom krystallene i snødekket er større enn tidligere antatt, og at ved store temperaturgradienter tar det kun tre dager før krystallene for det meste består av ny is (Rudolf-Miklau et al., 2015).



Figur 7: Begerkrystaller i snødekket. Foto: Thomas Stucki, SLF. Hentet fra: (SLF, u.å.-a).

Smelteomvandling foregår når lufttemperaturen går over 0 °C og snøen begynner å smelte. På våren er smelteomvandling derfor vanlig på grunn av varmere temperaturer og nedbør i form av regn (Rudolf-Miklau et al., 2015). Denne omvandlingen foregår sakte ettersom snødekket inneholder mye kald luft som bremser prosessen. Dersom det kommer nedbør vil prosessen gå kjappere ettersom vannet trenger ned i snøen før den fryser, for så å frigjøre varme som bidrar til en hurtigere oppvarming.

«Smelteomvandling er en kombinasjon av oppbyggende og nedbrytende omvandling der fritt vann er til stede» (Norem, 2014). 19). Det er fordi smelteomvandlingen kan føre til svakere kohesjon mellom iskrystallene samtidig som kapillærstyrken øker (Rudolf-Miklau et al., 2015). I tabellen nedenfor fremstilles de fire klassene som våt snø deles inn i. Hovedregelen er at desto større vanninnhold, desto mindre fasthet har snøen.

| | Fuktig snø | Våt | Veldig våt | Sørpe |
|------------------------|--|--|---|--|
| Fuktinnhold i % | 0–4 | 4–8 | 8–15 | Over 15 |
| Kjennetegn | Kram snø, liten film rundt hver krystall | Kan presse ut vann av snøen. Bindinger brutt | Kan presse ut større mengder vann av snøen. Bindinger brutt | Snøen overmettet av vann, krystaller flyter uten bindinger |

Tabell 1: Klasseinndelingen av våt snø i prosent vanninnhold. Kilde: (Norem, 2014).

Når snødekkets overflate utsettes for varierende temperatur, vind og konveksjon, omdannes det til spesielle snøtyper som for eksempel is, rim og skare. Etter hvert som det kommer nysnø, vil disse lagene forsvinne ned i snødekket, og man får et lagdelt snødekke med forskjellige egenskaper. Skare dannes når snøoverflaten blir varmet opp på dagtid og det blir smeltevann. Dette trekker deretter inn i snøen, før den våte overflatesnøen fryser når temperaturen faller under 0 °C. Dette skjer ofte om natten. Samme effekt oppnås når det kommer nedbør før det blir kaldere vær, eller under kraftig vind som sliper ned krystallene og skaper varme slik at de blir fuktige og sintrer sammen

(Norem, 2014). Når laget med skare forsvinner ned i snødekket blir det vanskelig å finne igjen, og det blir omvandlet til svake, grovkornede lag. Rim dannes i kaldt vær ved at vanddamp i luften kondenserer på snøoverflaten (NGI, u.å.-d). Da er temperaturen på overflaten lavere enn både 0 °C og duggpunktet. Rim, i likhet med skare, blir et svakt lag i snødekket ved at rimkrystallene beholder sin løse struktur i lang tid. Dette svekker bindingene mellom ny og gammel snø.

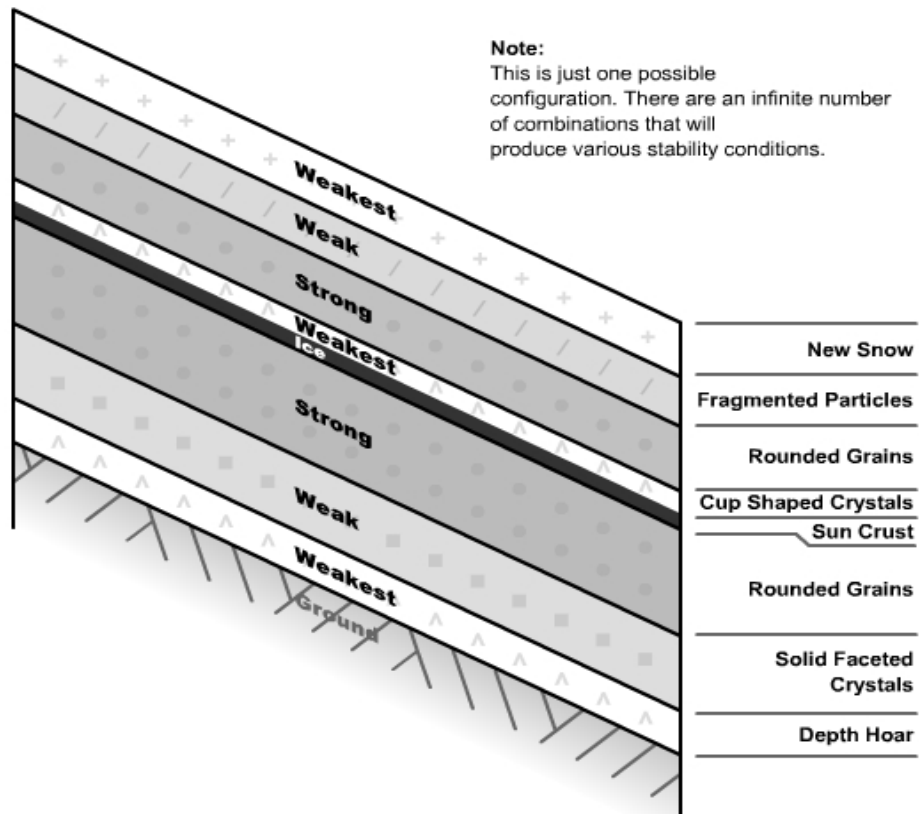


Figur 8: Foto av snødekket med rimkrystaller. Foto er hentet fra: (Kvambekk, 2015).

2.1.4 Lagsinndeling i snødekket

Både vind, temperatur og nedbør er med på å definere et lags tetthet og fasthet i snødekket. Når flere ulike lag legger seg over hverandre kan snødekket se ut som i figur 10. Det er som oftest et av de svake lagene som svikter når et snøskred utløses. Et vedvarende svakt lag vil kunne holde sin form og struktur i lang tid, og det vil derfor være farlig å ferdes i skredfarlig terreng. I slike situasjoner er det viktig å teste snøen for å identifisere disse lagene, og om snøen er trygg å ferdes på (Varsom, u.å.-b).

EXAMPLE OF LAYERS IN SNOWPACK:



Figur 9: Eksempel på hvordan snødekket kan være delt opp i flere lag med forskjellig fasthet. Figuren er hentet fra: (AVALANCHE, u.å.).



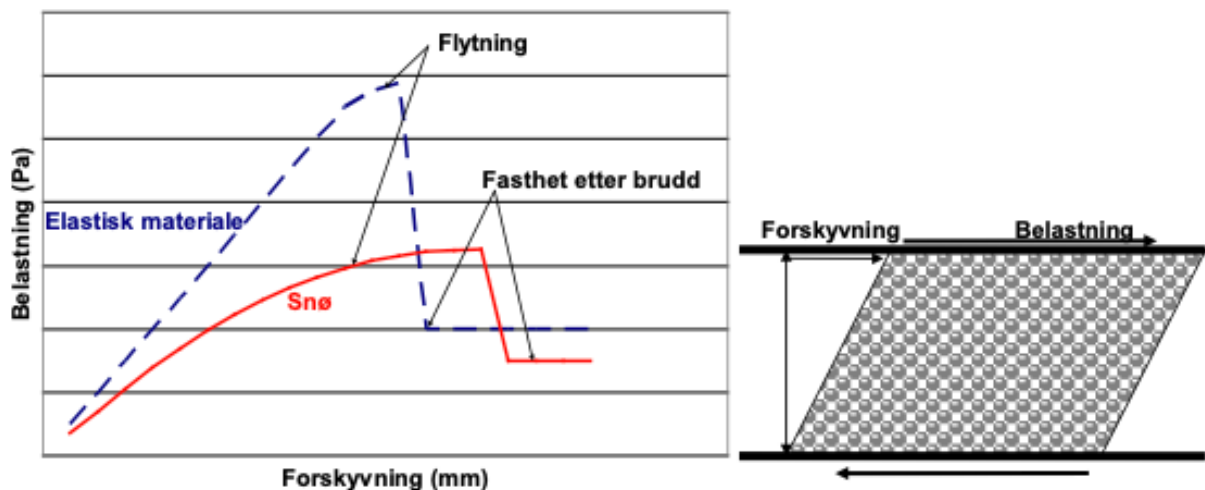
Figur 10: Lagene i et snødekke. Solen skinner gjennom de svake lagene bestående av luftig og lett snø. Foto: Markus Landrø. Hentet fra: (Varsom, u.å.-d).

2.1.5 Snøens fysiske egenskaper

Snøens densitet er sterkt varierende. Nysnø har en densitet på mellom 50 og 200 kg/m³, avhengig av hvor fuktig den er (Paterson, 1994). Når snøen brytes ned får den en større tetthet som ofte ligger mellom 200-300 kg/m³. Fokksnø som følge av vind har enda større tetthet, og kan bli opptil 500 kg/m³ (Norem, 2014). Tettheten i våt snø avhenger av vanninnholdet, og på våren kan den derfor ha en densitet mot 600 kg/m³. Is og vann har en densitet på henholdsvis ca. 950 og 1000 kg/m³.

Snøens fasthet omfatter dens trykk-, strekk- og skjærfasthet. Når en av disse overskrider bruddfastheten, går snøen til brudd. Strekkfastheten til snø er mindre kritisk sammenlignet med trykk- og skjærkapasiteten. Når snøen trykkes mot konstruksjoner, er snøens trykkfasthet en viktig faktor. Snøen må kunne påføre konstruksjonen et gitt trykk, og da må den kunne motstå den samme belastningen selv (Norem, 2014). Når man skal bedømme snødekkets stabilitet i forbindelse med skred er det som regel snøens skjærkapasitet som er utslagsgivende.

Snø betegnes som et ikke-lineært viskoelastisk materiale som betyr at snøen har en kombinasjon av viskøs og elastisk oppførsel. Når snøen påføres en spenning, vil den endre sin form og struktur (flyte), samtidig som deformasjonen øker (Scapozza, 2004). Dette gjør at snøen får varig reorganisering av krystallene (deformasjon) og går ikke tilbake til sin opprinnelige form slik elastiske materialer gjør. Snø har en relativt lav fasthet og vil undergå deformasjoner av små påkjenninger før den etter hvert går til brudd, og får en ny, redusert fasthet som vist i figur 11. I høyre del av figuren illustreres også hvordan deformasjonen påvirker strukturen i snøen. Hvor fort belastningen blir påført har stor betydning for hvor mye snøen deformeres, og hvor stor belastning den kan motstå. Dersom belastningen påføres over lengre tid vil snøen kunne motstå en større belastning sammenlignet med en brå belastning. Med andre ord oppnår snøen en høyere fasthet ved gradvis økende belastning.



Figur 11: Venstre figur viser sammenhengen mellom belastning og forskyvning for snø som har en viskoelastisk oppførsel, og et elastisk materiale. Høyre figur illustrerer hvordan forskyvning påvirker snøens struktur. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014).

Snøens skjærkapasitet er ofte kritisk ved skredutløsning, og er derfor av stor interesse når man skal kartlegge sannsynligheten for skred. I Statens vegvesens (SVV) *Håndbok 138, Veger og snøskred* blir skjærkapasiteten til snø, τ_f , bestemt med Mohr-Coulombs bruddkriterium:

$$\tau_f = c + \mu \cdot \sigma \quad \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (1)$$

der c er kohesjonen, altså bindingskreftene mellom snøkrystallene. Ligningen er oppgitt i N/m^2 . Kohesjonen avhenger sterkt av densiteten og styrken på isbroene, og en kan ha store variasjoner i et snødekke bestående av ulike lag. Løs nysnø kan ha en kohesjonsfaktor på så lavt som 0.1 kN/m^2 , mens den i homogen snø med tetthet på 600 kg/m^3 kan bli opp mot 1000 kN/m^2 (Norem, 2014). σ er opptredende normalspenning i snøen, oppgitt i N/m^2 . μ er den statiske friksjonskoeffesienten og varierer i mye mindre grad enn kohesjonsfaktoren. Friksjonskoeffesienten ligger normalt mellom 0.4 og 0.8 , noe som tilsvarer en friksjonsvinkel på 22° og 39° . Til sammenligning er friksjonsvinkelen 20° og 38° for henholdsvis bløt leire og grus (Statens vegvesen, 2009).

2.2 Snøens bevegelser i terrenget

For å danne et grunnlag for lastene som virker på en støtteforbygning i rasutsatte områder må man først forstå hvordan snøen oppfører seg i terrenget.

2.2.1 Glidning

Glidende snø er sakte, nedoverrettet bevegelse av hele snødekket som følge av tyngdekraften, over bakkens overflate. Hele snødekket har konstant glidehastighet over snødekkets høyde og snøen kan forflytte seg alt fra få millimeter til noen få meter per dag. For at snø skal gli, må følgende betingelser være oppfylt (SLF, u.å.-b):

- Jordoverflaten må ha relativt lav ruhet. Gress er eksempel på en overflate med lav ruhet og steiner/grus er eksempel på en overflate med høy ruhet.
- Skråningen må være tilstrekkelig bratt, men glidning av snødekket kan forekomme i en skråningsvinkel på bare 15° .
- Grensesjiktet mellom snødekket og bakken må være fuktig eller vått.

Et vått grensesjikt mellom snødekket og bakkens overflate dannes hvis bakken har en temperatur over frysepunktet. Snødekket har i tillegg en isolerende effekt, og det kan derfor oppstå gunstige glideforhold ved høy intensitet av nedbør i områder hvor overflatetemperaturen på bakken er over frysepunktet. Snødekkets isolasjonsevne vil gjøre at temperaturen ved bakkenivå holdes stabil samtidig som snødybden fortsetter å øke.

Snødekkets temperatur kan varmes både nedenfra og ovenfra. Dette innebærer at glideeffekten ofte er større på vårparten når økt lufttemperatur bidrar til temperaturøkning i snøen ovenfra, i tillegg til at bakken varmer nedenfra. På våren er snødekket fuktig, men snøen har ikke vært utsatt for varme temperaturer lenge nok til at større mengder av snøen har smeltet helt bort, slik det vil gjøre nærmere sommerstid. Derfor er den totale bevegelsen i snødekket fra snøsig og glidning ofte størst på vårparten.

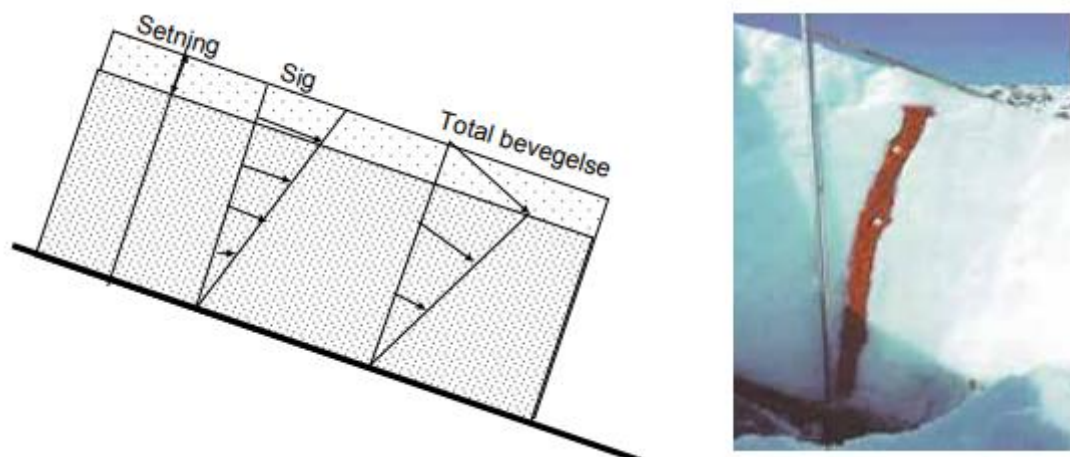
For underlag med lav ruhet må det vurderes om et inngrep i terrenget økonomisk sett er en mer fordelaktig løsning sammenlignet med å dimensjonere kostbare støttekonstruksjoner.



Figur 12: Snøen foldes sammen som følge av glidning mot underlag av gress. Foto er hentet fra: (McClung & Schaerer, 2006)

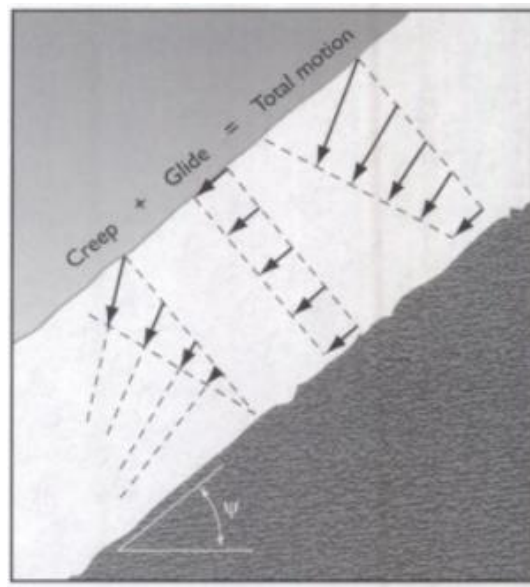
2.2.2 Snøsig

Som følge av tyngdekraften vil snøen trykke seg sammen. Dette defineres som snøsig. De viktigste faktorene for utvikling av deformasjoner som følge av snøsig er vekten av snødekket, helningen i terrenget, temperaturen i snøen og densiteten. Deformasjoner som følge av snøsig er størst når snødekket er isotermt med konstant temperatur på 0 °C, og ved lav densitet. Snøsiget gjennom en vinter er størst ved overflaten og reduseres lineært nedover i snødekket som vist i figur 13 (Norem, 2014). Snøsiget vil både gi en deformasjon parallelt med helningen i terrenget og normalt på terrenget som vist på figuren nedenfor.



Figur 13: Deformasjonene i snødekket som følge av snøsig. På bildet til høyre ses effektene av snøsig (glideeffekten her er neglisjerbar). Hentet fra: (Norem, 2014).

Totalt vil snøsig og glidning kunne gi store deformasjoner og/eller forflytning av snødekket i nedoverrettet retning, som vist i figuren nedenfor.



Figur 14: Total deformasjon i snødekket som følge av snøsig og glidning. Figuren er hentet fra: (McClung & Schaerer, 2006).

2.3 Klima på Svalbard

Klimaet på Svalbard skiller seg fra andre skredutsatte områder på ulike måter som kan påvirke snøens oppførsel og dermed også snøens lastvirkning på rassikringskonstruksjoner.

2.3.1 Mørketid og midnattssol

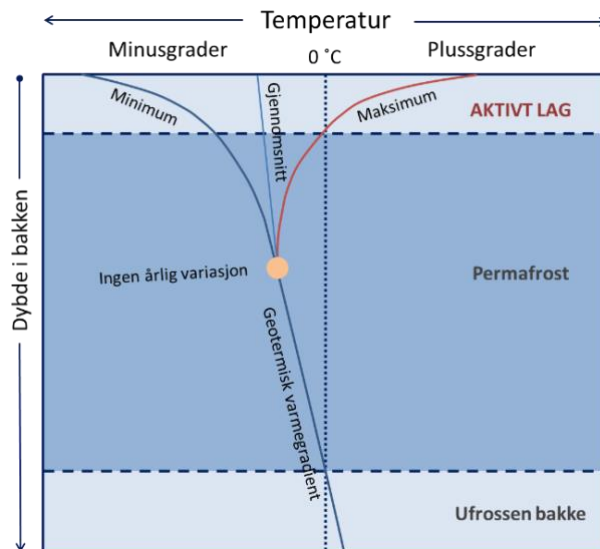
På Svalbard er store deler av året preget av midnattssol og mørketid. I Longyearbyen er det midnattssol fra 20. april til 23. august og mørketid fra 26. oktober til 16. februar (Svalbard Blues, 2015). Mørketid defineres som perioden der sola er under horisonten, men det kan likevel være noe lys fra sola som gjør at det ikke er fullstendig mørkt. Fra 11. november til 30. januar er det polarnatt i Longyearbyen, noe som innebærer at det er helt mørkt. Polarnatt defineres som perioden der sola er mer enn 6° under horisonten.

2.3.2 Permafrost

Permafrost defineres som landmasser der temperaturen ikke overstiger 0°C over to år (Lilleøren, 2021). Permafrost finnes både i polarområder og fjellområder. I Sør-Norge har man en nedre grense på rundt 1400 meter over havet for utvikling av permafrost.

Avhengig av utbredelsen defineres permafrosten som kontinuerlig, diskontinuerlig eller sporadisk. På Svalbard er det kun kontinuerlig permafrost med varierende dybder på opptil flere hundre meter oppe i fjellene. Den delen av bakken som tiner hver sommer kalles det aktive laget, se figur 15. Størrelsen på det aktive laget varierer fra noen få cm til flere titalls meter, avhengig av blant annet geografisk plassering og jordas geotekniske og termiske egenskaper. På Svalbard er dette laget 1-2 meter dypt (Larsen, 2016). Som følge av klimaendringene vil økende temperaturer føre til økt dybde av det aktive laget, og ved målestasjonen Jansonhaugen i Adventdalen på Svalbard har dybden på det aktive

laget økt fra 1.6 m til 1.9 m på 17 år. Det er forventet at dybden til det aktive laget økes videre til 2.5 meter mot slutten av dette århundret.

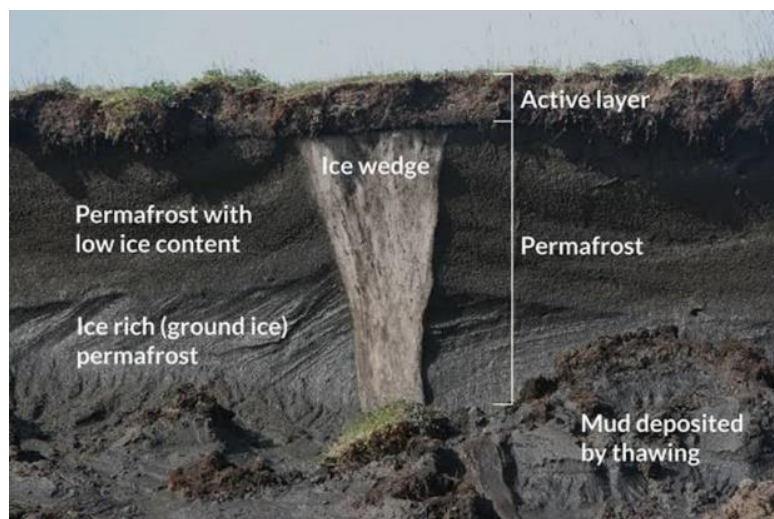


Figur 15: Skisse over permafrost i landmasser som viser hvordan det øvre laget tiner når sommeren kommer. Det nedre laget varmes fra jordens indre. Figuren er hentet fra: (Lilleøren, 2018).

Løsmasser i permafrost klassifiseres etter isinnholdet (Margreth, 2007):

1. Tørr permafrost (ikke noe is).
2. Undermettet permafrost (isen fyller ikke hulrommet i løsmassene 100 %).
3. Mettet permafrost (isen fyller hulrommet i løsmassene 100 %).
4. Overmettet permafrost (isinnholdet er større enn volumet til hulrommet i løsmassene).

Mettet og overmettet permafrost har en tendens til å deformeres som følge av deres viskøse oppførsel, og grunnforholdene må derfor vurderes nøye ved montering av konstruksjoner i områder med permafrost. For det første må dybden på det aktive laget kartlegges. Bakgrunnen er at den opptinte jorda sammen med isrik permafrost kan være utsatt for omfattende deformasjoner i bratt terreng, hvor ujevne setninger kan føre til store tilleggskrefter på konstruksjonene. Videre bør dannelse av islinser i bakken kartlegges. Islinser er et fenomen som oppstår når mindre iskjerner i bakken tiltrekker seg vann fra omgivelsene rundt og vokser til en kjegleformet, massiv ismasse. Når disse smelter kan det føre til store deformasjoner i terrenget.



Figur 16: Oversikt over ulike inndeling i permafrosten med varierende isinnhold og en islinse (Ice wedge) i midten. Figuren er hentet fra: (Wallace, 2019)

2.3.3 Maritime forhold

Som nevnt i kapittel 1.4 har NGI en forskningsstasjon ved Grasdalen i Strynfjellene. På 60- og 70-tallet var designgrunnlaget for dimensjonering av rassikringskonstruksjoner i Norge basert på sveitsisk veiledning. Store skader på konstruksjonene førte til en mistanke om underdimensjonering. I 1975 ble det derfor montert en støtteforbygning av stål og aluminium i 25 grader bratt terreng i Strynfjellene, rundt 1150 meter over havet (Hjorth-Hansen et al., 2000). Fra 1975-1990 ble det utført målinger på densitet, temperatur, snødybde og snøtrykk for å vurdere hvordan veiledningen fra Sveits kunne tilpasses det maritime miljøet langs kysten av Fastlands-Norge.

Siden Longyearbyen også befinner seg langs kysten er resultatene høyst interessante, og de samme tilpasningene kan være aktuelle på Svalbard.

Målingene av størst interesse med hensyn til dimensjonering er densitet og snødybde når snøtrykket når sitt maksimum i løpet av en sesong. Observasjonene viste at snøtrykket var størst på slutten av vintersesongen, vanligvis rundt slutten av april og starten av mai, når snødekket viste isotherm oppførsel (0 °C i hele snødekket).

Resultatene viser at gjennomsnittlig densitet rundt periodene med maks snøtrykk var omtrent 459 kg/m³. Disse resultatene er vist i figur 17. Målingene med høyest snøtrykk var i 1976, 1989 og 1990, hvor det også ble målt størst snødybder. I 1989 og 1990 viste temperaturmålingene at snødekket ble isothermt allerede i februar. Den varme snøen førte til større bevegelser i snødekket sammenlignet med de andre sesongene hvor de isotherme forholdene ikke oppsto i snødekket før utover i april.

| Year | Date | Snow dept D (cm) | Density kg/m ³ | Aver pres kPa | Max pres. kPa | Body force kPa | Max/min pressure |
|-----------|------------|---------------------|------------------------------|------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| 1976 | 14.- Apr. | 490 | 426 | 16 | 23 | 20.9 | 1.44 |
| | 18 - May | 370 | 520 | 13 | 20 | 19.2 | 1.54 |
| 1979 | 27.- Apr. | 250 | 395 | 8 | 11 | 9.9 | 1.38 |
| 1981 | 08.- May | 410 | 430 | 13 | 20 | 17.6 | 1.54 |
| 1982 | 19.- May | 230 | 388 | 6 | 9 | 8.9 | 1.50 |
| 1983 | 01.- Apr. | 350 | 397 | 9 | 11 | 13.9 | 1.22 |
| | 03.- May | 310 | 513 | 8 | 12 | 15.9 | 1.50 |
| 1984 | 13.- Apr. | 390 | 433 | 10 | 14 | 16.9 | 1.40 |
| | 30.- Apr. | 350 | 483 | 8 | 12 | 16.9 | 1.50 |
| | 05.- May | 330 | 508 | 11 | 16 | 16.8 | 1.45 |
| 1985 | 16.- May | 180 | 479 | 3 | 8 | 8.6 | 2.67 |
| 1987 | 11.- Apr. | 310 | 400 | 8 | 10 | 12.4 | 1.25 |
| | 14.- May | 250 | 448 | 6 | 9 | 11.2 | 1.50 |
| 1989 | 21.- March | 430 | 387 | 15 | 19 | 16.6 | 1.27 |
| | 11- Apr. | 490 | 488 | 15 | 18 | 23.9 | 1.20 |
| | 25.- Apr. | 370 | 494 | 13 | 15 | 18.3 | 1.15 |
| | 19.-May | 440 | 474 | 13 | 15 | 20.9 | 1.15 |
| | 26.- May | 360 | 531 | 12 | 15 | 19.1 | 1.25 |
| 1990 | 10.- Apr. | 480 | 456 | 15 | 21 | 21.9 | 1.40 |
| | 19.- Apr. | 480 | 465 | 15 | 21 | 21.4 | 1.40 |
| | 08.- May | 380 | 520 | 10 | 13 | 19.8 | 1.30 |
| Average | | 363.3 | 458.8 | 10.8 | 14.9 | 16.7 | 1.43 |
| Stand.dev | | 87.4 | 47.8 | 3.6 | 4.5 | 4.4 | 0.31 |

Figur 17: Densitetsmålinger fra 1976-1990. «Body force index» er produktet av densiteten, snødybden og tyngdekraftens akselerasjon. Tabellen er hentet fra: (Hjorth-Hansen et al., 2000).

Med bakgrunn i densitetsmålingene anbefaler Larsen å bruke en densitet på 500 kg/m³ ved beregning av snøtrykk.

Observasjonene fra Grasdalen viser imidlertid ingen effekt av glidning, og lignende observasjoner er gjort på Island (Johannesson & Margreth, 1999). Snøtrykket fra målingsstasjonen kommer derfor kun som følge av snøsig. Det er likevel viktig å poengtere at det burde gjøres observasjoner lokalt om hvorvidt effekten av glidning er neglisjerbar. Målingene viste heller ingen variasjon i densitet ved ulike høyder over havet.

2.3.4 Klimaendringer i Arktis

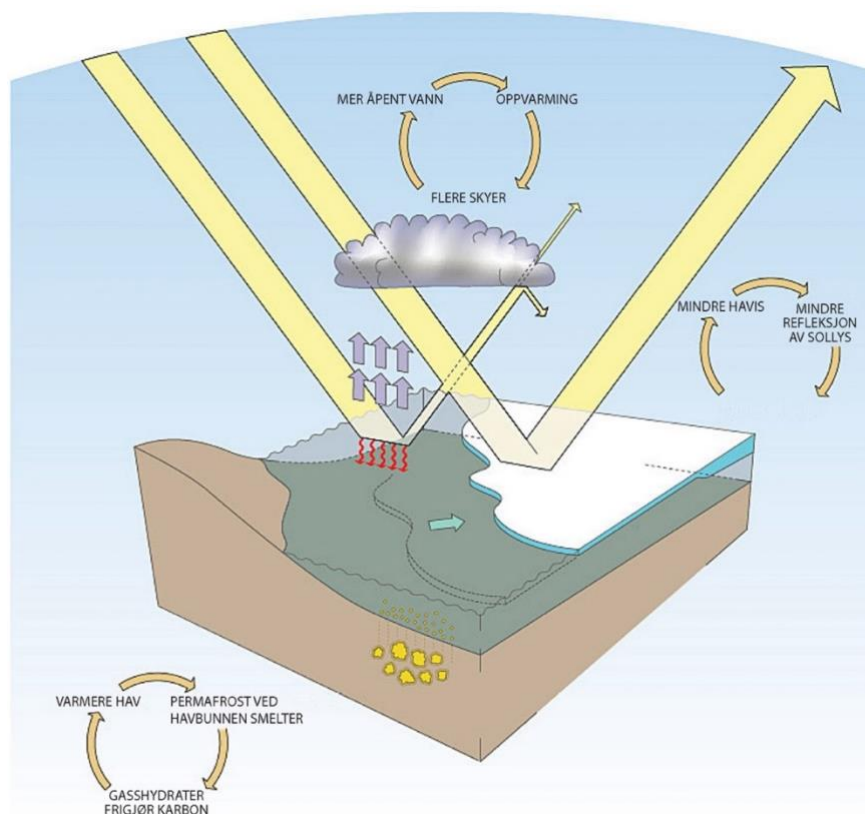
2.3.4.1 Temperatur

Temperaturen har siden 1980 steget dobbelt så raskt i Arktis sammenlignet med det globale gjennomsnittet. I Alaska har økningen vært 3-4 °C, og man vet at økningen på Svalbard og i omkringliggende områder ved Barentshavet også ligger over gjennomsnittet (Winther et al., 2016).

2.3.4.2 Albedoeffekten

Klimaendringene på Svalbard er mer ekstreme og foregår raskere fordi Svalbard har et arktisk klima med is og permafrost. I dag er rundt 60 % av Svalbards landareal dekket av isbreer (Humlum, u.å.). Disse isbreene har en kjølede egenskap ved at de kan reflektere 80-90 % av sollyset tilbake i atmosfæren. På oppdrag fra Arktisk Råd ble det i 2004 lagt frem en statusrapport om klimaet i Arktis: Arctic Climate Impact Assessment (ACIA). ACIA konkluderte med at utbredelsen av havis var redusert med åtte prosent fra 1979 til 2002. Reduksjonen var større på sommerstid (ca. 20 %) enn vinterstid (Winther

et al., 2016). Mørkere overflater som vegetasjon og åpent hav absorberer opptil 90 % av solenergien. På Svalbard er det lite vegetasjon på grunn av permafrosten, men derimot mye fjellområder. Om sommeren i Arktis er det ikke uvanlig at solinnstrålingen overstiger 500 W/m^2 . Dette betyr at dersom sjøis erstattes med åpent hav, som ACIA konkluderte med i 2004, vil absorpsjonen av solinnstrålingen gå fra 50 til 450 W/m^2 , noe som er en betydelig økning. Denne økningen fører til at lufttemperaturen stiger, noe som videre fører til mindre is. Dette gir en akselererende effekt. Økt lufttemperatur fører også til raskere omdanning av snøen til grovere krystaller som reflekterer lys dårligere. Overflatens refleksjonsevne (albedo) av sollyset reduseres derfor også i områder med økt lufttemperatur selv om ikke hele snødekket smelter.



Figur 18: Illustrasjon av hvordan Arktis får økt oppvarming på grunn av at lyse overflater og permafrosten forsvinner, og det blir større havområder. Figuren er hentet fra: (Winther et al., 2016).

2.3.4.3 Nedbør

Høyere temperaturer, lengre sommere og mindre havis har ført til mer nedbør i Arktis, og dette gjelder også Svalbard. «Årsnedbøren har økt med 20-30 % i Longyearbyen-området fra 1900 til i dag, og trenden forventes å fortsette mot slutten av århundret.» (Kristensen et al., 2017). I rapporten hvor Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) kartlegger dimensjonerende skred fra Sukkertoppen og faresoner for Lia i Longyearbyen, har de lagt til grunn en økning i nedbør på 30 %. Det forventes at store deler av denne nedbøren kommer som regn i stedet for snø om vinteren, og dette må derfor tas hensyn til i fremtidige prosjekter. Det er stor usikkerhet knyttet til predikasjoner om klimaet i fremtiden. Dataen er ufullstendig, man har begrenset kunnskap og klimamodellene har også flere begrensninger (Kristensen et al., 2017). Det er derfor desto viktigere å planlegge for økningen i nedbør, og at man inkluderer usikkerhetsfaktorer i fremtiden.

2.3.4.4 Permafrost

Permafrosten i Arktis har stor betydning for den globale klimautviklingen. Det skyldes at store mengder drivhusgasser, som for eksempel metan, er fanget i bakken og vil slippe ut dersom permafrosten smelter. Temperaturen i permafrosten er 2 °C høyere i dag enn for 20-30 år siden. Det er dokumentert at permafrosten også tiner på Svalbard (Winther et al., 2016). Det er vanskelig å beregne akkurat hvor stor påvirkning dette utslippet vil ha da det er mange usikkerhetsmomenter knyttet til tining av permafrost. FNs klimapanelts beste estimerte anslag for år 2100 ligger på mellom 50-250 milliarder tonn karbon. Til sammenligning ble det estimert et utslipp på 36.2 milliarder tonn CO₂ for hele verden i 2021 (Øvrebø, 2022). Tining av permafrost fører også til ustabile grunnforhold for bygninger og infrastruktur, samt økt erosjonssone langs kystlinjen. For eksempel måtte Sysselemannen på Svalbard i 2015 flytte den kjente fangsthytta Fredheim på grunn av faren for at hytta skulle havne i havet.

2.4 Snøskred

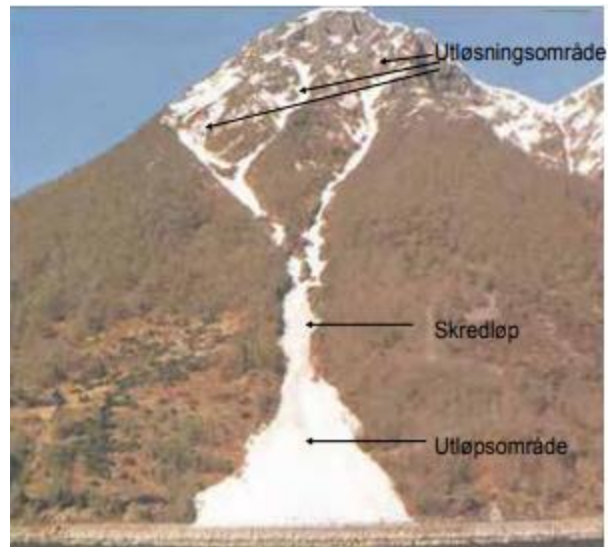
«Snøskred, også kalt snøras eller lavine, er en plutselig forflytning av store mengder snø nedover en fjellside eller en skråning.» (Jaedicke, 2021). Det skilles mellom naturlig og kunstig utløste snøskred. Naturlige årsaker til skredutløsning skyldes lokale vær- og klimatiske forhold, mens kunstige utløsningsfaktorer for eksempel kan være randonée-utøvere på topptur eller planlagt skredutløsning med bruk av eksplosiver.

Med utgangspunkt i snøskredets bruddform deles snøskred inn i to hovedgrupper: løssnøskred og flakskred. I tillegg er det en spesiell type snøskred som skiller seg fra disse gruppene: sørpeskred. Ved et sørpeskred er snøkornene mettet med vann. Dette fører til redusert fasthet som diskutert under kapittel 2.1.3, og massene har derfor lav kohesjon. Et sørpeskred kan nå høye hastigheter ettersom vannet i skredet trekkes mot bunnen. Dette gir gode glideegenskaper mot underlaget, og denne skredtypen kan derfor føre til store ødeleggelse. Sørpeskreds karakteristika er mer sammenlignbart med flomskred og omtales derfor ikke i nærmere detalj her.

2.4.1 Skredbanen

Skredbanen deles inn i tre hovedområder: utløsningsområdet, skredløpet og utløpsområdet.

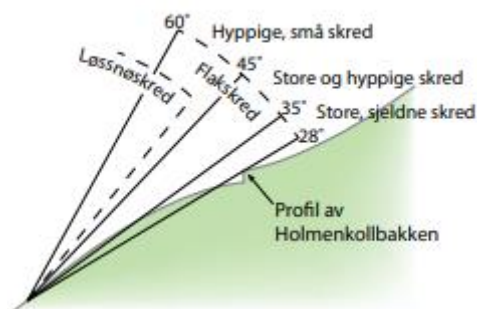
- Utløsningsområdet er området hvor skredet initieres, og varierer i størrelse (stort utløsningsområde er typisk for flakskred, mens lite utløsningsområde er typisk for løssnøskred).
- Skredløpet betegner delen av skredbanen hvor skredet har tilnærmet konstant hastighet eller øker i hastighet.
- Området hvor skredet taper hastighet og bres ut i en typisk vifteform, kalles utløpsområdet. Det er i dette området skred ofte treffer bebyggelse.



Figur 19: Inndeling av skredbanen. Foto er hentet fra: (Norem, 2014).

2.4.2 Skredfarlig terreng

Terrenghellingen er den aller viktigste faktoren som avgjør om skred utløses. Skjærspenningene som oppstår i snødekket kommer av tyngdekraftens virkning på snøen. Desto brattere terrenget er, desto større lastvirkning vil tyngdekraften ha på snødekket. Snøskred forekommer sjeldent ved helninger under 30° , og for helninger over 45° er det særlig løssnøskred som dominerer. Utløsingen av løssnøskred fører til redusert risiko for flaskred i veldig bratt terreng ettersom snømengdene reduseres. Som følge av at det er høyest risiko for ødeleggelser ved flaskred, er det særlig ved skred i terreng med helning mellom $35\text{--}45^\circ$ at det er høyest risiko for store ødeleggelser.



Figur 20: Skredtyper som følge av terrenghelningen. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014).

Terrengets form har stor innvirkning på terrengets evne til å samle store snømengder. Snøakkumulasjon som følge av drivsnø er en vanlig årsak til utløsning av snøskred, og leområder i forsenkinger i fjellsiden er eksempel på et typisk skredutsatt område. Vinden kan transportere store mengder snø, og kombinasjonen av drivsnø og nedbør kan gi høy snøakkumulasjon over kort tid. Dette øker risikoen for at skred utløses.



Figur 21: Vinden transporterer snø i Lofoten. Foto: Ragnar Ekker. Hentet fra: (Varsom, u.å.-a)

2.4.3 Skredtyper

2.4.3.1 Flaskred

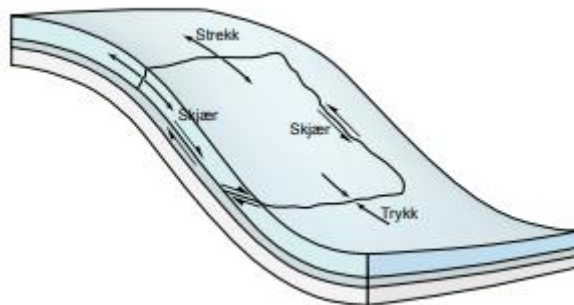
Alle skred av en viss størrelse forekommer som følge av at hele snøflak løsner fra snødekket, og i praksis viser det seg at alle skred som medfører skade av betydning er flaskred. Flaskred er derfor skredtypen som ligger til grunn ved dimensjonering av rassikringskonstruksjoner. Bruddkanten kan strekke seg over flere hundre meter, og kan være opptil 2-3 meter høy.



Figur 22: Bruddkant etter flaskred. Foto: NGI. Hentet fra: (Jaedicke, 2021)

Snødekket kan som nevnt være delt inn i flere ulike lag, og når et flakskred forekommer er det som oftest som følge av skjærbrudd i glidesjiktet mellom to snølag. Dette kan forekomme når et kompakt snølag ligger over et tynt, svakt lag med snø, og skjærkapasiteten til det svake glidesjiktet overgås av de opptredende skjærspenningene som følge av vekten av det øvre snølaget. Bruddet forplantes videre i alle retninger i snødekket, og det blir etter hvert også sprekkdannelse i det øvre snølaget (Margreth, 2007). Langs den øvre kanten av et snøflak vil det alltid finnes markerte strekkspenninger som følge av ulik sige-hastighet i øvre del av snøflaket. Dette gir en karakteristisk bruddkant normalt på terrenget som vist på figur 22. Ulik sige-hastighet avhenger blant annet av terrenghelling og tykkelse på snødekket (Norem, 2014).

Som diskutert i kapittel 2.1.2 kan vindtransport føre til stor snøakkumulasjon i leområder, noe som også kan være en typisk utløsningsårsak for flakskred. Da vil den vindtransporterte snøen danne harde eller myke flak i leområdene, og snøakkumulasjonen vil etter hvert føre til brudd i det svakeste laget.



Figur 23: Spenningsfordeling for et flak i snødekket. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014)

De opptredende skjærspenningene i snødekket er gitt av lastkomponenten parallelt med terrenget, fra vekten av snødekket:

$$\tau_{oppt} = \rho \cdot g \cdot z \cdot \sin(\alpha) \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2)$$

Hvor ρ er snødekkets densitet, g tyngdens akselerasjon, z dybden i snødekket og α er terrenghellingen. Med utgangspunkt i ligning 1 og 2 kan en beregne kritisk dybde, $z_{kritisk}$, hvor skjærkapasiteten til snødekket er fullt utnyttet og bruddlinjen dannes.

2.4.3.2 Løssnøskred

Løssnøskred oppstår i snø med svake bindinger mellom snøkrystallene, som for eksempel nysnø (tørre løssnøskred). Skredtypen kan også oppstå i snø som er eksponert for sol og varme temperaturer, eller regnvær. Dette fører til redusert kohesjon og fasthet i snøen ettersom den blir våtere, som diskutert i kapittel 2.1.3. Videre øker dette sjansen for våte løssnøskred. Løssnøskred karakteriseres ved punktutløsning, hvor skredet initieres i et lite område av stein eller snøklumper som faller ned på snødekket. Skredet utvikles typisk videre i en pæreform som følge av at nye snøkrystaller rives med, og snøskredet øker dermed i størrelse. Skredtypen kjennetegnes ved at skredene har lite volum og kort utløpslengde. Løssnøskred har derfor ofte et mindre skadeomfang sammenlignet med flakskred. Når løssnøskred utløses er ofte risikoen for flere skred høy, og man skal derfor være forsiktig i områder hvor løssnøskred nylig har blitt utløst.



Figur 24: Typisk bruddform for løssnøskred. Foto er hentet fra: (Varsom, 2021).

2.5 Sikringstiltak mot snøskred

Sikringsmetoder for snøskred har enten som hensikt å virke stabiliserende for å forhindre at et skred utløses og/eller dempe et skred i tilstrekkelig grad slik at utløpsbanen til skredet reduseres. Ulike konstruksjonstyper egner seg til ulike forhold, og det må gjøres en vurdering ut ifra de lokale snø-, terreng- og grunnforholdene.

2.5.1 Støtteforbygninger

Støtteforbygninger er betegnelsen på rassikringskonstruksjoner som plasseres i skredløseområdet, og disse skal virke stabiliserende for å forhindre at snøskred utløses. I tillegg vil støtteforbygningene virke dempende dersom et skred likevel skulle forekomme slik at utløpsbanen for skredet reduseres.

Støtteforbygninger er designet for å tåle kvasi-statiske laster fra snøsig og glidning, og i noen tilfeller også dynamiske laster fra et mulig skred. Konstruksjonene er forankret i bakken tilnærmet normalt til skråningen. Vanlig praksis i dag er å tilte konstruksjonene 10-15° nedover, som vist på figur 47. Tidligere var det vanlig å forankre konstruksjonene normalt til skråningen, men på 70-tallet ble det utviklet en ny forankringsløsning med V-formede trykkstaver som har en vinkel på 15 grader opp fra skråningen (Rudolf-Miklau et al., 2015). Hensikten var å redusere totalvekten av konstruksjonen og kreftene i fundamentene.

Det dannes en effektiv trykksone i området foran støtteforbygningene hvor deformasjonene fra snøsig og glidning av snødekket avtar gradvis nærmere konstruksjonen. Denne trykksonen brer seg utover et område på minst tre ganger den vertikale høyden på snødekket (Margreth, 2007), målt langs etter terrenget. Størrelsen på trykksonen avhenger i stor grad av glidebevegelsen til snødekket. Som følge av at støtteforbygningene motstår snøens ønske om å sige sammen eller gli mot underlaget, oppstår det trykkspenninger mot støtteforbygningene.

Trykkspenningene som oppstår i den effektive trykksonen er gunstige fordi de fører til en reduksjon i skjær- og eventuelle strekkspenninger i snødekket. Dette er fordelaktig med tanke på utløsning av skred ettersom det som oftest er skjærspenningene i svake lag i snødekket som fører til flakskred.

Hvis det likevel skulle oppstå bruddlinjer i snødekket, hindrer bærekonstruksjonen at snølaget blir dratt nedover. Dermed begrenses området hvor skjærsprekker kan forplante seg. Skredhastighet og skredvolum er de to viktigste variablene for et skreds omfang, og gjennom sin bremsende effekt sørger støtteforbygningene for at de mest katastrofale snøskredene unngås.

2.5.1.1 Stive konstruksjoner

Konstruksjoner som motstår laster med små deformasjoner betegnes som rigide eller stive konstruksjoner. Tidligere ble blant annet murer montert i skredløsneområder i Alpene. Disse var imidlertid lite effektive, og i dag er det flere ulike konstruksjonstyper som benyttes. Både stål og tre benyttes som byggemateriale, men i dag er det mest vanlig å bygge støttekonstruksjonene i stål. Dette er en anerkjent og godt dokumentert løsning.



Figur 25: Tre rader med støtteforbygninger montert på Sukkertoppen på Svalbard. I løpet av 2021 og 2022 skal 15 nye rader med støtteforbygninger monteres til høyre for eksisterende konstruksjoner. Foto er hentet fra: (DS Entreprenør, 2018).

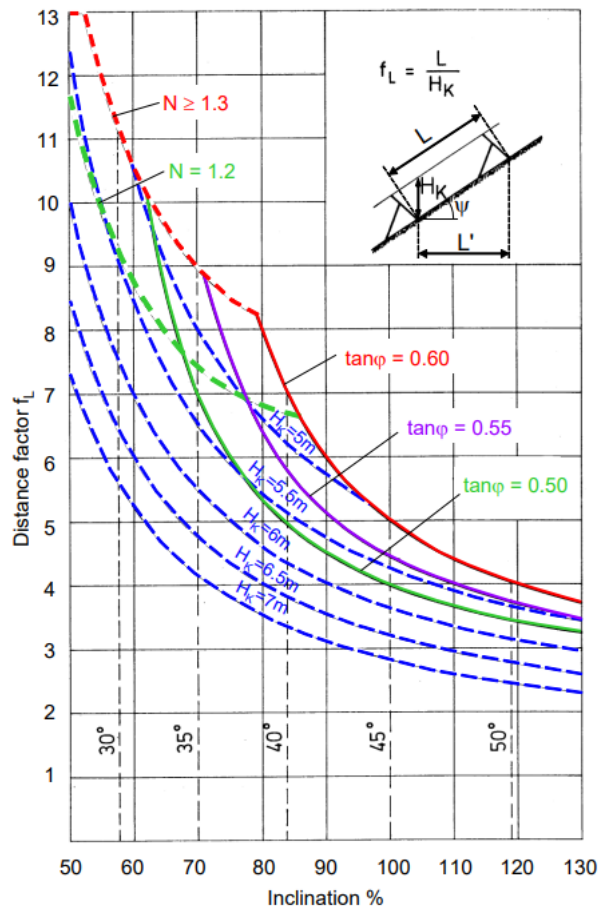


Figur 26: Støtteforbygninger på Sukkertoppen på Svalbard. Foto er hentet fra: (DS Entreprenør, 2018).

Som vist i figur 25 settes støtteforbygningene opp i parallelle rader nedover fjellsiden. Basert på observasjoner fra tidligere skred og simuleringer burde den øverste raden plasseres 10-15 meter nedenfor frakturlinjen til mulige skred. Avstanden mellom radene avhenger av helningen i terrenget, ruheten på overflaten og høyden på konstruksjonene. Avstanden tilpasses slik at potensielle skred ikke utløses mellom radene og at skredets hastighet begrenses til en forhåndsbestemt makshastighet. Makshastigheten bestemmes slik at de dynamiske kreftene som oppstår ikke er av stor nok karakter til at konstruksjonene skades. I henhold til sveitsiske retningslinjer (Margreth, 2007) begrenses avstanden til:

$$L = f_L \cdot H_K \quad [m] \quad (3)$$

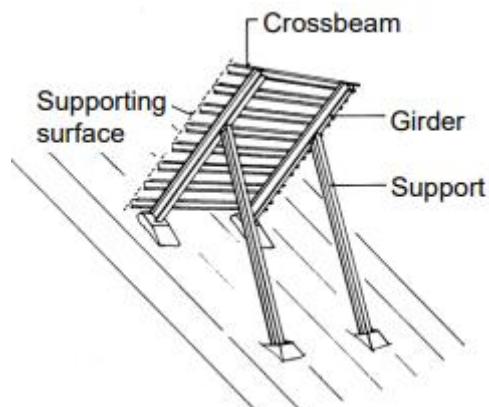
hvor H_K er konstruksjonens vertikale høyde og f_L en avstandsfaktor som bestemmes ut ifra figur 27:



Figur 27: Avstandsfaktor. Figuren er hentet fra: (Margreth, 2007).

For bakke med høy ruhet settes $\tan(\phi)$ lik 0.6 og ved lav ruhet lik 0.5-0.55. Det gir typisk avstander mellom 30-80 meter.

Vertikalhøyden til støtteforbygningen, H_K , må minst være lik maksimalhøyden til snødekket. Maksimalhøyden til snødekket burde observeres over en periode på flere år i det aktuelle området.



Figur 28: Konseptskisse av en støtteforbygning. Figuren er hentet fra: (Margreth, 2007).

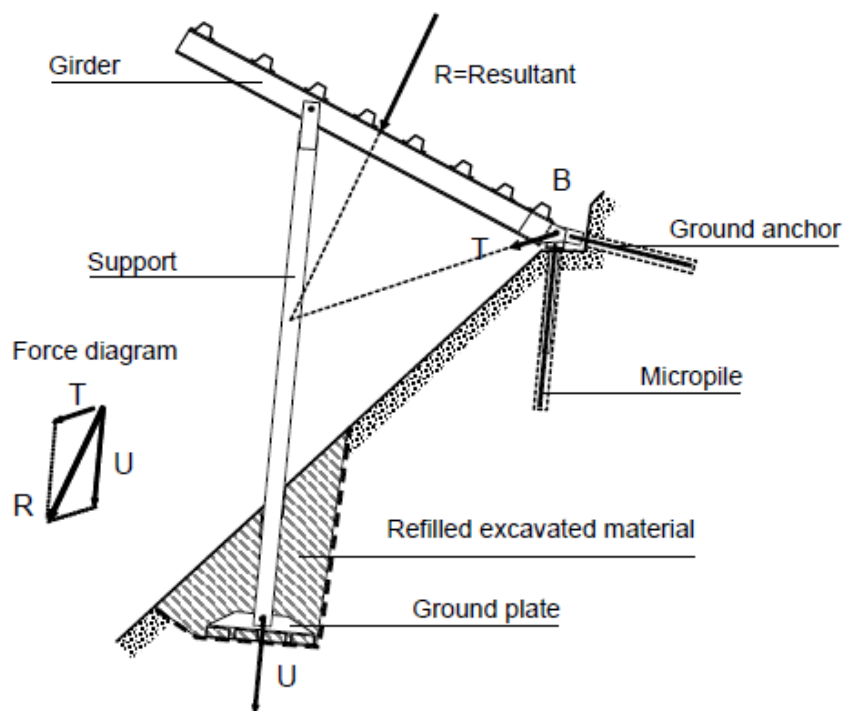
For skråelementene og bærebjelkene som de tverrgående bjelkene hviler på, er det vanlig å bruke standard varmvalsede IPE- eller HEA-profiler. Typiske dimensjoner på

profilene varierer fra HEA100 til HEA180 for skråelementene og IPE140 til IPE270 for bærebjelkene (Rudolf-Miklau et al., 2015).

For de tverrgående bjelkene er det vanlig å bruke kaldvalsede hatteprofiler eller omegaprofiler. Det er ikke nødvendigvis standard profiler og bredden kan variere mellom 210 og 242 mm. Bredden på den øvre flensen varierer mellom 58-97 mm, og den totale høyden varierer mellom 80 og 100 mm. Helningen på flensen varierer fra 10 til 25°, og tykkelsen på profilet er typisk 5-10 mm.

Stålkvaliteten på elementene kan variere fra S235JR til S355JR. I henhold til sveitsisk standard er klasse JR et minstekrav, og høyere stålkvalitetsklasse må vurderes slik at motstanden mot sprøbrudd er tilstrekkelig (Margreth, 2007).

Ved vurdering av ulike fundamenteringsløsninger er det viktig å få en oversikt over grunnforholdene. Blant annet dybde til fjell, hva slags masser bakken består av, mulig isinnhold og eventuelle bevegelser i løsmassene (solifluksjon), er relevant. En av de mer vanlige løsningene for støtteforbygninger er en treleddet stålramme (se figur 28) med en trykkplate i bunnen av skråelementene som støtter opp støtteforbygningen på baksiden. Størrelsen på trykkplaten varierer, men er typisk i størrelsesområde 400x400 – 800x800 mm (Rudolf-Miklau et al., 2015). Fundamentet på oversiden er utsatt for strekkrefter fra snødekket som forsøker å løfte konstruksjonen opp. En typisk løsning her består av mikropeler med en stålkjerne som fylles med sementmørtel av høy styrke for korrosjonsbeskyttelse. For mikropeler forankret til fjell er det krav om minimumslengde på 1.5 meter, samt krav til borehulldiameter på minimum 50 mm (Margreth, 2007). Ved forankring i løsmateriale skal mikropelene være minst tre meter og borehullet minst 90 mm. I motsetning til mikropeler som er forankret i fjell, vil ikke løsmassene kunne motstå tverrgående krefter. Løsningen er å bruke to mikropeler, plassert i en A-form, se figur 29.

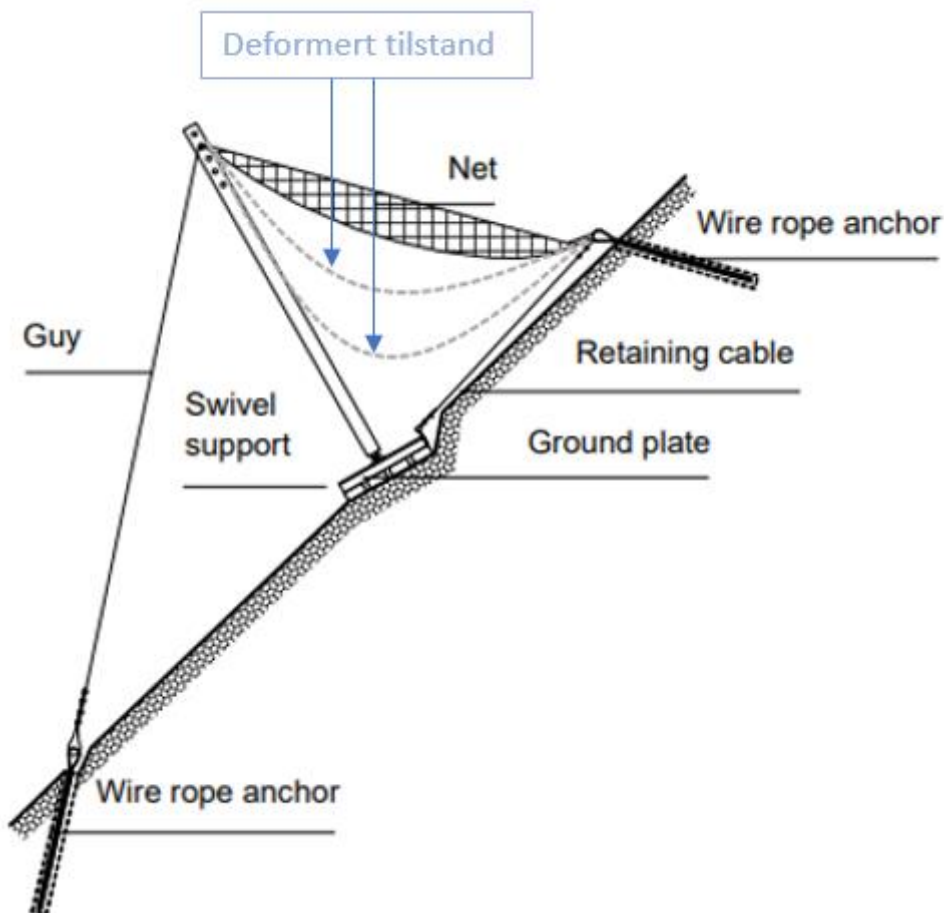


Figur 29: Typisk fundamentløsning for støtteforbygninger i stål. Figuren er hentet fra: (Margreth, 2007).

Fundamentering i permafrost er ekstra krevende. Ujevne setninger som følge av oppvarming av det aktive laget kan medføre store krefter på konstruksjonene. Konstruksjoner i bratt terreng bør være koblet sammen med stive forbindelser for å få samme bevegelse og deformasjon (Larsen, 2016). Ved forankring i permafrost er det viktig å ta hensyn til at bæreevnen sterkt reduseres i temperaturer nært frysepunktet. Fundamentet burde derfor settes så dypt i permafrosten at temperaturen ikke overstiger $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ i løpet av levetiden. Som nevnt i kapittel 2.3.2 er isinnholdet i underlaget av stor betydning for deformasjonene og dette må derfor kartlegges. I områder med høyt isinnhold anbefales det ikke støtteforbygninger, men heller bruk av stålnett.

2.5.1.2 Fleksible konstruksjoner

Konstruksjoner som kan ha relativt store deformasjoner som følge av snøens bevegelse mot bæreflaten uten å gå til brudd, betegnes fleksible konstruksjoner. Ved belastning vil noe av energioverføringen fra snøen transformeres til blant annet varmeenergi som følge av deformasjonen. Dette medfører at den totale belastningen på konstruksjonen vil reduseres sammenlignet med stive konstruksjoner. Videre er det viktig at skråstavene plasseres normalt på trykkplaten for å skape en jevn spenningsfordeling.



Figur 30: Konseptskisse av en typisk nettkonstruksjon. Figuren viser også hvordan nettet kan deformeres som følge av snøtrykk. Figuren er hentet fra: (Margreth, 2007). Redigert av: Vetle Basma.

Stålnett blir mye brukt i forbindelse med skredsikring ettersom stål er et duktilt materiale, og det egner seg derfor godt til fleksible konstruksjoner. Når stålet belastes utover sin elastiske kapasitet inn i plastisk sone, flyter stålet, og videre belastning fører

til permanente deformasjoner. Som nevnt vil den totale belastningen på stålnettet reduseres sammenlignet med stive konstruksjoner. SLF anbefaler derfor å bruke en reduksjonsfaktor ved beregning av snøtrykket. Verdien avhenger av flere ulike faktorer, blant annet snøens glideegenskaper mot underlaget, formen på nettene (rektangulære eller sirkulære masker), størrelsen på maskene i nettet og helningen i terrenget. For middels ruhet på underlaget anbefaler SLF en reduksjonsfaktor på 0.8, noe som innebærer en reduksjon av snøtrykket på 20 % sammenlignet med stive konstruksjoner.

Fundamenteringsløsningene er lignende som for støtteforbygninger, men på oversiden er det vanlig å forankre med stålvaier, se figur 30. For å stå imot tverrgående krefter suppleres vaierne med et stålrør eller et betongfundament.

Som følge av at stålnettene kan utsettes for permanente deformasjoner kreves det jevnlig vedlikehold. Særlig etter konstruksjonene har vært utsatt for store belastninger må reparasjoner gjennomføres for å kunne opprettholde kapasiteten.

Nettkonstruksjoner er optimalisert for å absorbere energi fra store dynamiske krefter i forbindelse med steinras. Mange av disse områdene er også utsatt for snølast og mulige snøskred på vinterstid, og de må derfor dimensjoneres for å tåle lastpåvirkninger gjennom hele året.



Figur 31: Bildet viser fullskala test av ringnett i henhold til europeisk standard EAD 340059-00-0106. Foto er hentet fra: (Geobrugg, u.å.).

Ulik form og størrelse på nettets mesh gir ulik oppførsel og kapasitet, og valget må vurderes ut ifra lastene det dimensjoneres for. Ringnett har vist seg å ha høyest styrke sammenlignet med andre typer nett og kan derfor være fordelaktig i områder hvor det forventes ekstreme dynamiske krefter fra store steiner eller lignende (*Rockfall-Ring Net*, u.å.). Størrelsen på maskene påvirker kapasiteten til nettet og må vurderes deretter. Maskestørrelsen på hovednettet kan typisk være i størrelsesorden 200-250 mm i diameter, mens et sekundærnett ofte har maskestørrelse på 50 mm (Margreth, 2007). Hovednettet suppleres ofte med et sekundærnett med mindre maskestørrelse for å blokkere mindre steiner og sedimenter.

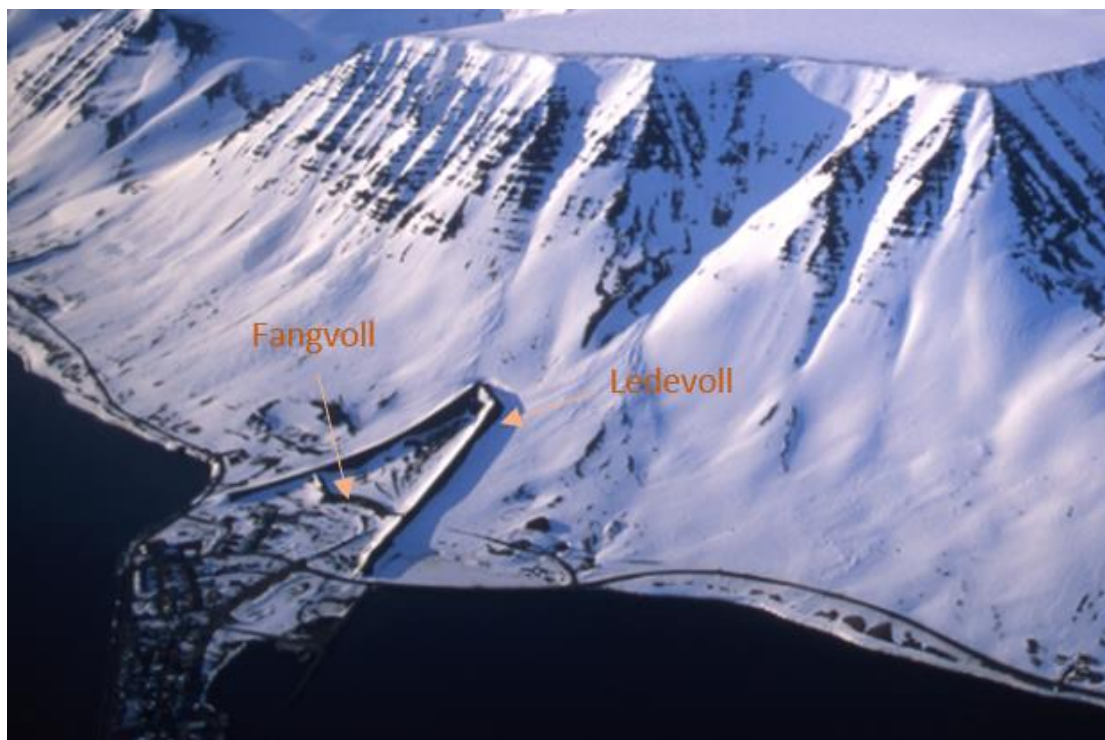


Figur 32: Stålnett på Sørøya i Finnmark. Veien mellom Sørvær og Hasvik var utsatt for steinras på sommerstid og snøskred på vinterstid. Hovednettet er supplert med et sekundærnett som har mindre maskestørrelse. Foto er hentet fra: (Geobrugg, 2019).

2.5.2 Sikring i skredbanen

2.5.2.1 Ledevoller

Ledevoller brukes for å styre et skred vekk fra områder hvor det kan gjøre skade. Skredets utløpsbane styres av terrengprofilen, og ved å bygge retningsendrende voller kan skredet gradvis styres vekk fra risikoområder som for eksempel bebyggelse.



Figur 33: En sammenhengende ledevoll i kombinasjon med en fangstvoll beskytter innbyggerne i Siglufjörður på Island fra mulige skredmasser. Figuren hentet fra: (NGI, u.å.-c). Redigert av: Vetle Basma.

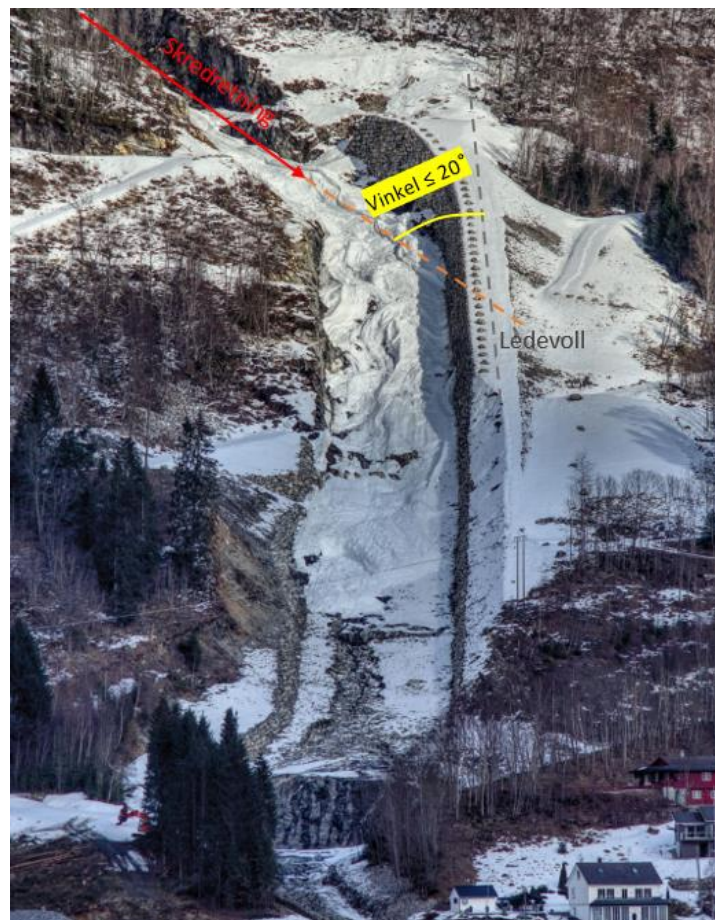
Skredets hastighet og størrelse er de viktigste parameterne ved dimensjonering av ledevoller. I tillegg må det tas hensyn til ledevollens vinkel i forhold til skredretningen som vist i figur 34, hvor det i Statens vegvesens *Håndbok 138* anbefales at vinkelen ikke er større enn 20 grader (Norem, 2014). Videre anbefales det en gradvis retningsendrende bueform av ledevollen slik at vinkelen ikke blir for stor mellom vollen og skredretningen. Hvis vinkelen er for stor kan det føre til at skredmassene bygger seg opp foran vollen og etter hvert går over ledevollen. Ledevollens dimensjonerende høyde kan beregnes ut ifra tre bidrag:

$$H_{voll} = H_{snø} + H_{skred} + H_{skredhastighet} \quad [m] \quad (4)$$

Hvor $H_{snø}$ er akkumulert snø foran ledevollen (fra nedbør eller tidligere snøskred), H_{skred} er skredets flyte høyde ved treff av vollen og $H_{skredhastighet}$ er overhøyden som oppstår når skredet kolliderer med ledevollen:

$$H_{skredhastighet} = \frac{(V \cdot \sin(\alpha))^2}{2 \cdot g \cdot \lambda} \quad [m] \quad (5)$$

V er skredhastigheten i m/s, α er vinkelen mellom skredet og ledevollen, g er tyngdekraftens akselerasjon (10 m/s^2) og λ er en energitapsfaktor som anbefales å sette lik 1.0-2.0 avhengig av skredtype. Energitalpene skyldes hovedsakelig friksjonstap langs vollsidene og tap i forbindelse med at skredet endrer retning (Larsen, 2016).



Figur 34: Bilde som viser ledevoll i Loen i Gjølmunna kommune som styrer skredmasser vekk fra bebyggelse. Figuren er hentet fra: (Kristensen et al., 2017). Redigert av: Vetle Basma.

2.5.2.2 Fangvoller

Fangvoller kan være et alternativ til ledevoller eller anvendes i kombinasjon som vist på figur 33. Disse brukes til å stoppe skred hvor hastigheten til skredet er lavere enn 20 m/s. Dimensjonering av fangvollens høyde er gitt av samme uttrykk som for ledevoller, men nå kan sinusuttrykket ved utregning av $H_{skredhastighet}$ neglisjeres og settes lik 1.0 ettersom skredet kolliderer normalt på fangvollen:

$$H_{skredhastighet} = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot \lambda} \quad [m] \quad (6)$$

Vanlig praksis er å bygge fangvollen med masser fra skredsiden av vollen for å minske transportbehovet. Da er det viktig å ta hensyn til at helningen foran fangvollen vil øke som en konsekvens av utgravingen, noe som videre vil gjøre at skredet får økt hastighet før det kolliderer med fangvollen.

Fangvollens viktigste funksjon er å stoppe skredet og den må derfor ha tilstrekkelig kapasitet til å lagre skredmassene. Forventet skredvolum kan beregnes ved simuleringer sammen med observasjoner fra tidligere skred. Det er viktig med systematisk vedlikehold av fangvollen så det ikke blir liggende masser foran vollen som kan gjøre at eventuelle løsmasser fra et skred passerer på oversiden.



Figur 35: Fangvoll bygd med løsmasser i Siglufjörður på Island, samme fangvoll som ses på figur 33. Figuren er hentet fra: (Landslag, 2003).

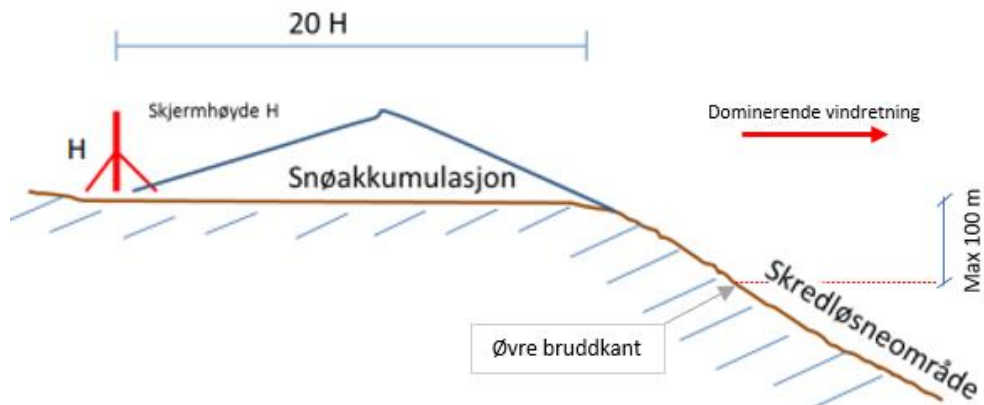
2.5.3 Snøskjermer

Gitt at de lokale forholdene tilfredstiller visse betingelser, kan bruk av snøskjerm være et effektivt virkemiddel for å forhindre eller redusere risikoen for snøskred.

Snøskjermene forhindrer at drivsnø som føres langs bakken som følge av vind legger seg i skredutsatte områder. Ofte utløses snøskred som følge av høy akkumuleringsintensitet over en kort periode, og skredets utløpslengde avhenger av skredvolumet. Bruk av snøskjerm kan derfor både forhindre skred, men også redusere konsekvensene av et snøskred. Snøskjermer kan benyttes i kombinasjon med andre sikringsmetoder, som for eksempel støtteforbygninger.

For at bruk av snøskjermer skal være effektivt må disse forholdene ligge til rette (Norem, 2014):

- Skredets utløsningsområde må ligge på lesiden i forhold til de dominerende vindretningene.
- Området på oversiden av utløsningsområde må være stort og flatt for å muliggjøre større ansamlinger av snø uten å øke skredfaren.
- Skjermene har en begrenset effektiv sone hvor ansamlingen av snø reduseres. For at bruk av snøskjermer skal være effektivt må derfor høydeforskjellen mellom snøskjermene og skredets utløsningsområde ha en øvre grense på 100 meter, se figur 36.
- Reduksjonen av vindhastigheten på leside av skjermen må være tilstrekkelig slik at det vesentlige av drivsnøen felles ut.
- Skjermen bør utformes slik at snøakkumuleringen på lovart side og under skjermen blir så liten som mulig for å forhindre store krefter fra snøsig på konstruksjonen.



Figur 36: Figuren viser optimal plassering av snøskjerm for maksimal effekt av snølagring. Figuren er hentet fra: (Larsen, 2016). Redigert av: Vetle Basma.



Figur 37: Platåfjellet på Svalbard. Her kan det være gunstige forhold for bruk av snøskjermer som sikringsmetode. Foto: Jan Otto Larsen. Hentet fra: (Larsen, 2016).

Snøskjermene består typisk av et rammeverk i tre eller stål, med stendere og tverrgående bjelker. Samleeffekten rundt en snøskjerm avhenger av skjermens utforming, og de viktigste faktorene er (Norem et al., 2014):

- Høyden på skjermen.
- Skjermens tetthet.
- Bakkeklaringen.
- Bredden og formen på skjermelementene.
- Terrengforholdene rundt skjermen.

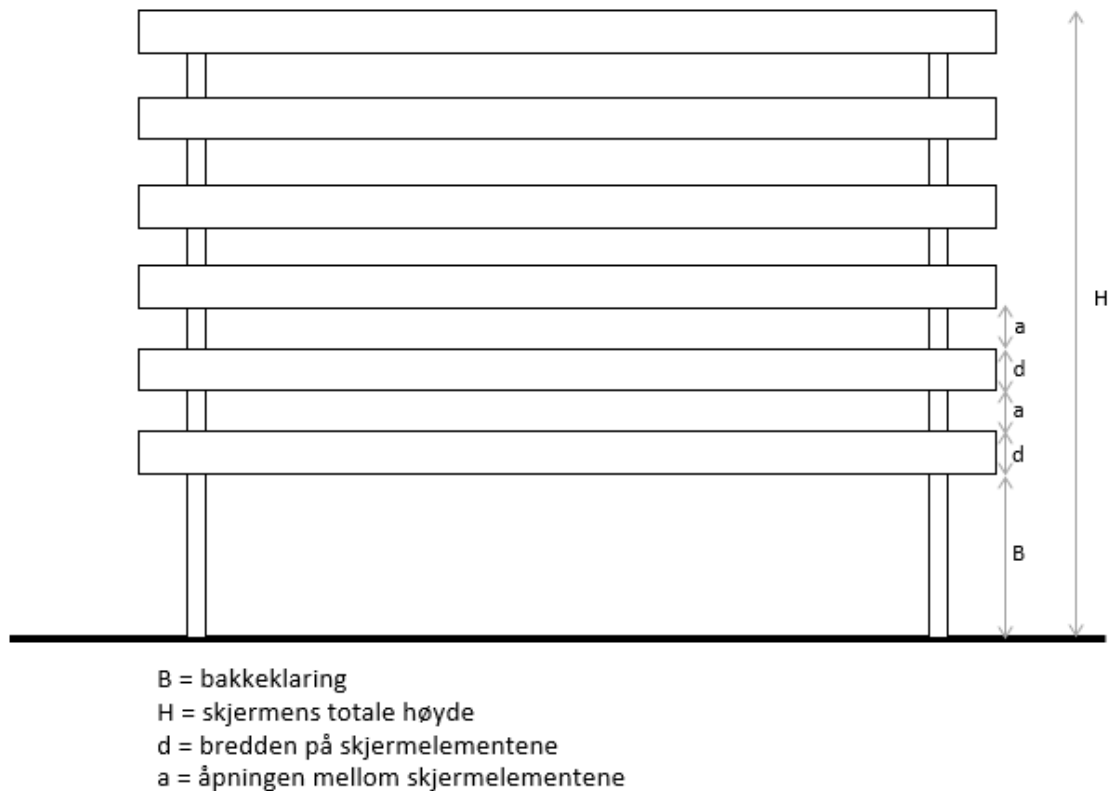
Ved beskrivelse av tettheten skilles det mellom to forskjellige tettheter; skjermtetthet og total skjermtetthet. Skjermtettheten angis som

$$Skjermtetthet = \frac{d}{a + d} \cdot 100 \% \quad (7)$$

og den totale tettheten angis som:

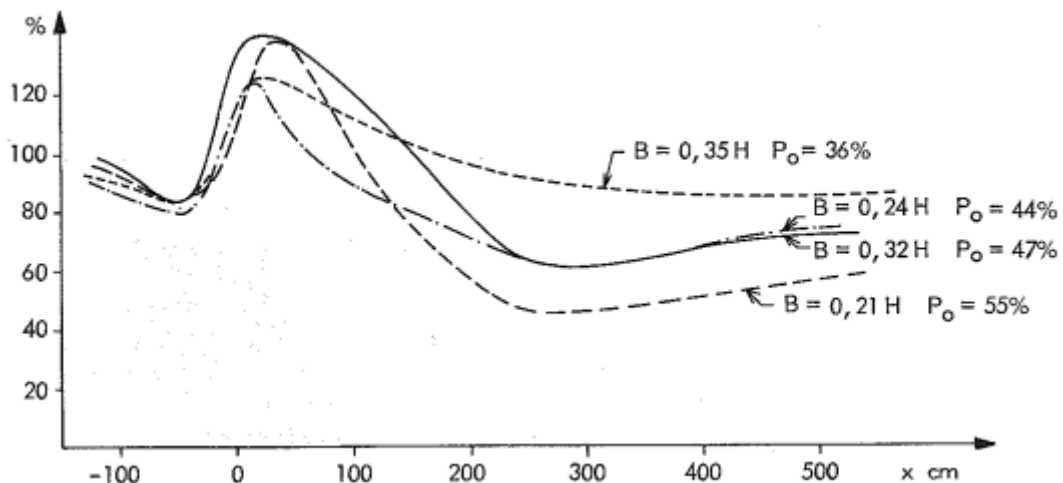
$$Total skjermtetthet = \frac{\Sigma d + B}{H} \cdot 100 \% \quad (8)$$

Figur 38 viser typisk utforming av en snøskjerm:



Figur 38: Typisk utforming av en snøskjerm. Figur: Vetle Basma.

For å undersøke effektiviteten ved forskjellige utforminger har det blitt gjennomført forsøk i vindtunnel med snøskjermer som har varierende tetthet og bakkeklaring (Tesaker, 1969):



Figur 39: Figuren viser variasjonen i relativ maksimal vindhastighet foran, under og bak skjermene med varierende bakkeklaring og total skjermtetthet. Vindhastigheten er målt 20 cm over bakken. Figuren er hentet fra: (Tesaker, 1969).

Resultatene fra undersøkelsen viser hvordan vindhastigheten øker opp mot 40 % når den passerer snøskjermen. Videre avtar hastigheten ned mot 50 % av opprinnelig hastighet ca. 2.5 meter etter snøskjermen, noe som fører til at det felles ut snø.

Resultatene viser at den totale skjermtettheten har større påvirkning på snøakkumulasjonen sammenlignet med skjermtettheten. Vindhastighetene for snøskjermene med bakkeklaring på 0.24 H og 0.32 H er nærmest identiske rundt 220 cm. bak skjermene. Skjermene har henholdsvis en total skjermtetthet på 44 og 47 % og en skjermtetthet på 53 og 69 %.

Forskning på snøskjermer har vist at de samler mest snø når skjermtettheten er på omtrent 50 % (Norem et al., 2014). Det vil si at bredden på skjermelementene er like store som luftrommet mellom dem. Lengden på en fullt utviklet fonn kan ved 50 % skjermtetthet bli opptil 15-20 ganger skjermens høyde, og snødybdene bak skjermen kan bli noe større enn skjermhøyden.

Når skjermene er mer åpne, vil ikke vindhastighetene reduseres i like stor grad, og det samles mindre snø. Høyere vindhastighet fører til at fonnen som dannes er lengre og lavere slik at den totale effekten av snøskjermene reduseres. Tilsvarende vil skjjermer med høyere tetthet redusere vindhastigheten i enda større grad. Dette høres gunstig ut, men fører til at den totale samlekapasiteten blir redusert ettersom fonnene bak en tettere skjerm blir kortere. Snøen vil også samles nærmere skjermen, og det kan føre til økt sigetrykk på konstruksjonene.

Avstanden mellom første skjermelement og bakken, bakkeklaringen, har stor påvirkning på hvordan snøen samler seg i området rundt skjermen. Er bakkeklaringen for liten samler snøen seg helt inntil skjermen, og det kan føre til store belastninger på de nedre skjermelementene nærmere våren. Tilsvarende vil en for stor bakkeklaring kunne føre til at skjermen samler mindre snø. Utførelse av modellforsøk og praktiske erfaringer viser at det er gunstig med en bakkeklaring på rundt 20 % av skjermhøyden i områder med jevnt terreng. Dette gjelder i områder hvor snødybden ikke overstiger 30 % av skjermens høyde. Da vil undersiden av skjermen holdes fri for snø, men det vil fortsatt samles store snømengder bak skjermen. I områder med mindre snø kan det være nødvendig å redusere bakkeklaringen ned mot 10 % av skjermhøyden. Tilsvarende kan bakkeklaringen økes i områder hvor det er store snødybder, opp mot 30 % av skjermhøyden. Da bør også den totale skjermtettheten økes til 45 %.

Høyden på en snøskjerm varierer ut ifra snømengdene og vindforholdene på stedet, og kan typisk være ca. 3-5 meter. Skjermelementene dimensjoneres for å motstå vindkrefter og mulige sigekrefter fra snøen som legger seg inntil skjermene.



Figur 40: Bilde av snøskjermer på nordsiden av Sukkertoppen ved Longyearbyen. Bakkeklaringen ble kontrollmålt til 85 cm som tilsvarer 21 % av den totale skjermhøyden på 4 meter (Jonsson et al., 2018). Foto: Vetle Basma.

2.5.4 Valg av sikringstiltak

Sikringstiltaket må velges i sammenheng med hva som skal beskyttes (for eksempel bebyggelse) og hva som vurderes som akseptabel gjenværende risiko ved et skred. Ofte er en kombinasjon av ulike sikringstiltak mest gunstig.

Ved vurderingen av hvilke sikringstiltak som gir best effekt, står de lokale forholdene sentralt. Støtteforbygninger er å foretrekke der underlaget består av løsmasser ettersom nettkonstruksjoner egner seg mindre godt grunnet problemer med fundamenteringsløsninger. Nettkonstruksjoner brukes derfor hovedsakelig i områder hvor det er fjell i dagen (Larsen, 2016).

Som nevnt i kapittel 2.3.2 kan permafrost føre til setninger ved forankring av fundamenter i det aktive laget, spesielt for løsmasser som inneholder mye is. For konstruksjoner er det særlig ujevne setninger langs konstruksjonens lengderetning som er mest problematisk. SLF anbefaler fleksible konstruksjonstyper i områder som er sårbare for ujevne setninger. Det er fordi nettkonstruksjoner er mindre sensitive mot setninger sammenlignet med stive konstruksjoner ettersom det er større muligheter for å tilpasse konstruksjonen i etterkant.

Nettkonstruksjoner kan være mer anvendelig i områder med store potensielle slagkrefter i forbindelse med steinras eller lignende, sammenlignet med stive konstruksjonstyper som risikerer større skader på konstruksjonselementer ved kollisjon. Videre skjer ofte montasje i fjellsiden med helikopter som transportmiddel, og nettkonstruksjoner har derfor praktiske fordeler ved montasje grunnet lav vekt.

Sikringstiltak som snøskjermer eller ledevoll og/eller fangvoller kan ofte brukes i kombinasjon med støtteforbygninger. I tillegg vil alltid økonomi være en faktor. Det anbefales derfor å gjøre en vurdering av flere ulike tiltak ettersom de lokale forholdene vil ha betydning for hvilket tiltak som økonomisk sett er mest fordelaktig.

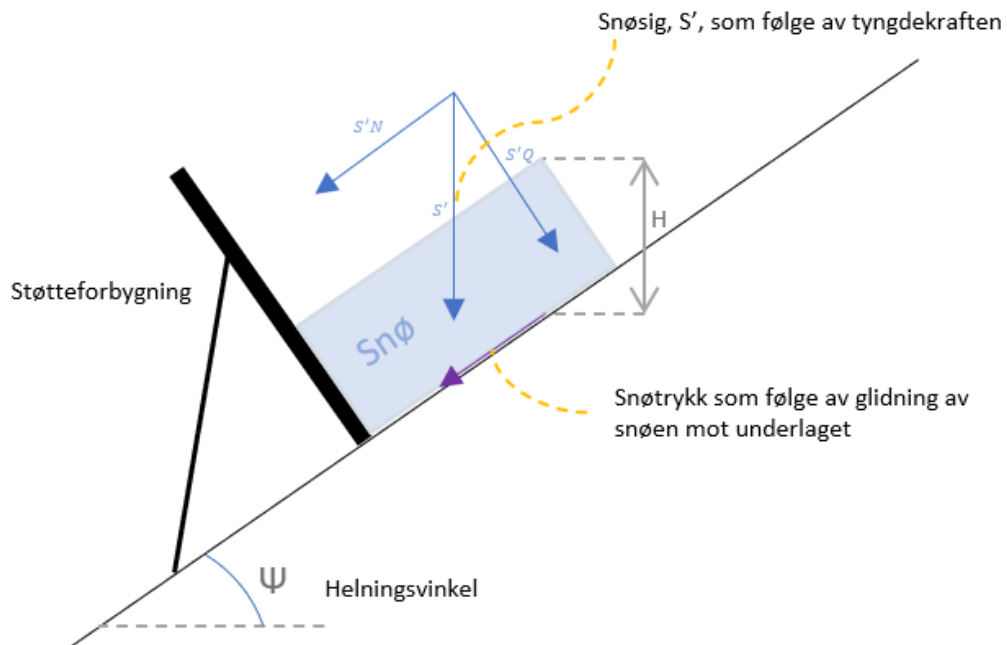
3 Beregningsmetoder for snøtrykk

3.1 Introduksjon

Effekten av snøtrykk på konstruksjoner er kompleks, og lastmodellene har derfor blitt forenklet i stor grad. I dette kapitlet er det kun statisk snøtrykk normalt på sikringskonstruksjonen, som følge av snøsig og glidning, som blir gjennomgått. Kapitlet gir derfor ikke et fullstendig grunnlag for alle lastene som potensielt virker på støttekonstruksjoner. Hensikten er å sammenligne resultatene fra ulike beregningsmetoder med lastmålinger fra en forsøksvegg på Svalbard montert i skrånende terreng. Dette vil gi et grunnlag for å vurdere om snøens mekaniske egenskaper på Svalbard i større eller mindre grad skiller seg fra Fastlands-Norge og/eller Alpelandene.

Det statiske snøtrykket blir til som følge av to ulike bevegelsestyper i snøen: snøsig og glidning, som er forklart nærmere i kapittel 2.2. Som følge av tyngdekraften vil snøen trykke seg sammen, og det blir derfor en lastkomponent normalt på støttekonstruksjonen i tillegg til en skjærkraft parallelt med bæreflaten.

I tillegg til normalkomponenten fra snøsig får vi et bidrag til normalspenningene fra glidning ved at hele snødekket glir langs bakken og presser mot konstruksjonen. Glidehastigheten til snøen avhenger av overflatens ruhet, helningen i terrenget og fuktighetsnivået i snødekket.



Figur 41: Statisk snøtrykk kan deles opp i to bidrag: Snøsig og glidning. Figur: Vetle Basma.

3.2 Beregningsanvisninger fra SLF

Innenfor rassikring har Norge siden midten av 1900-tallet sett til Alpelandene for veiledning. SLF utgjør en del av The Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL). Instituttet startet opp i 1936 og har i ettertid blitt ledende innenfor sitt fagfelt. SLF har utarbeidet en teknisk veiledning for planlegging og dimensjonering av sikringskonstruksjoner i skredsoner: *Defense structures in avalanche starting zones* (Margreth, 2007).

3.2.1 Snøtrykket normalt på konstruksjonens bæreflate

SLF angir følgende formel for beregning av snøtrykket normalt på en konstruksjons flate:

$$S_N = \rho \cdot g \cdot \frac{H^2}{2} \cdot K \cdot N \quad \left[\frac{kN}{m} \right] \quad (9)$$

hvor S_N er snøtrykket per meter langs lengderetningen av konstruksjonen. S_N antas å virke konstant langs høyden av konstruksjonen (begrenset av snødekkets høyde), noe som gir en kraft jevnt fordelt på støttekonstruksjonens flate:

$$S_{N,P} = \frac{S_N}{H} \quad \left[\frac{kN}{m^2} \right] \quad (10)$$

H betegner snødekkets vertikale høyde i meter, og g tyngdekraftens akselerasjon (10 m/s²).

Snøens gjennomsnittlige densitet, ρ , oppgis her i t/m³. I SLF sin veiledning tas det utgangspunkt i en densitet på 270 kg/m³ ved design. Densiteten gjelder for en høyde på 1500 meter over havet, og variasjonen i densitet ved andre høyder tas hensyn til ved en høydefaktor, f_c :

$$f_c = 1 + 0.02 \cdot \left(\frac{Z}{100} - 15 \right) \quad (11)$$

Hvor Z utgjør høydemeter over havet, og f_c har en minsteverdi på 1.0 og maksverdi på 1.3, som vist i tabellen under.

Tab. 4 > Altitude factor as a function of altitude.

For altitudes below 1500 m a.s.l., f_c is set to 1.00, and above 3000 m a.s.l. to 1.30.

| Z: | m a.s.l. | 1500 | 1600 | 1800 | 2000 | 2200 | 2400 | 2600 | 2800 | 3000 |
|---------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| f_c : | - | 1.00 | 1.02 | 1.06 | 1.10 | 1.14 | 1.18 | 1.22 | 1.26 | 1.30 |

Figur 42: Høydefaktor. Tabellen er hentet fra: (Margreth, 2007).

Snøsigfaktoren K er en funksjon av snøens densitet og helningsvinkelen Ψ :

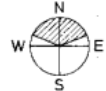
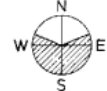
Tab. 6 > Creep factor K as a function of average snow density (ρ) and slope inclination (ψ).

| ρ [t/m^3] | 0.2 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 |
|--------------------|-----|------|------|------|------|
| $K/\sin 2\psi$ | 0.7 | 0.76 | 0.83 | 0.92 | 1.05 |

Figur 43: Snøsigfaktor K som funksjon av snøens densitet og helning. Tabellen er hentet fra: (Margreth, 2007).

Glidningsfaktoren N avhenger av ruheten på underlaget og hvor eksponert området er for sol. Dette er fordi våtere snø forbedrer glideegenskapene til snøen mot underlaget.

Tab. 5 > Ground classes and glide factors.

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

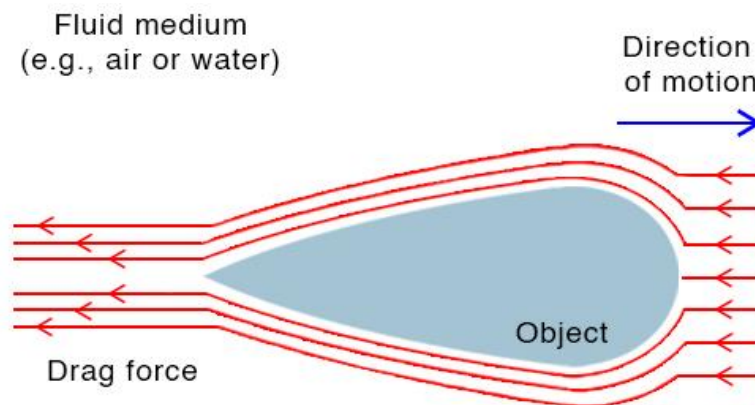
d^* is the boulder diameter characteristic of the roughness of the ground surface.

Figur 44: Glidningsfaktor. Tabellen er hentet fra: (Margreth, 2007).

3.2.2 Endeeffekter

Ved endene av rassirkingskonstruksjonen vil snøen kunne gli rundt og forbi konstruksjonen. Når snøen glir rundt for eksempel en stolpe, eller forbi enden på en kontinuerlig vegg, oppstår det en tilbakeholdende effekt som gir et tilleggstrykk på de utsatte konstruksjonsdelene. Det oppstår dragkrefter, på samme måte som når luftstrømninger beveger seg rundt bygninger. Størrelsen på disse endekreftene avhenger blant annet av geometrien på den utsatte konstruksjonsdelen. Dette kan ses i sammenheng med utviklingen av de aerodynamiske egenskapene til bilen, som har

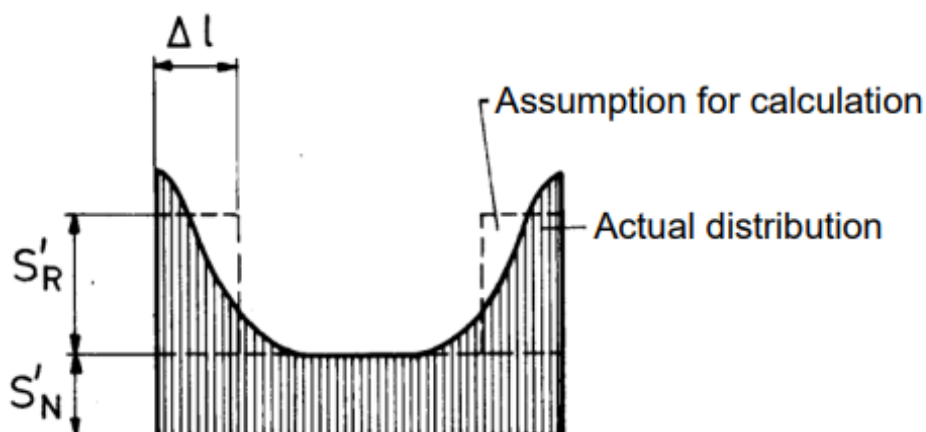
forbedret seg mye siden 1920-tallet og gir i dag et mer effektivt kjøretøy på grunn av reduserte dragkrefter. Det har vært utført få eksperimenter på hvordan geometrien til støtteforbygninger påvirker størrelsen på endeeffektene, men Larsen utførte på 90-tallet en rekke forsøk for master med varierende diameter (Hjorth-Hansen et al., 2000). Dragkreftene oppstår som følge av den relative forskjellen i hastighet mellom konstruksjonsdelen og snødekket, og glidehastigheten til snødekket har derfor stor påvirkning på størrelsen av endekreftene.



Figur 45: Figuren viser hvordan strømninger rundt et objekt kan skape dragkrefter. «Object» er den utsatte konstruksjonsdelen og «Direction of Motion» viser til snødekkets nedoverrettede glideretning, i overført betydning. Figuren er hentet fra: (Sciencefacts, 2020).

Endeeffektene kan være opptil 2-5 ganger større enn snøtrykket ellers på veggen (Norem, 2014). Det er derfor kritisk å inkludere disse når det skal sammenlignes med målingene fra forsøksveggen på Svalbard som har lastceller i hvert av de fire hjørnene, og derfor forventes å oppleve endeeffekter. Lastfordelingen av endeeffektene er forenklet til en konstant jevnt fordelt last over lengden Δl som vist i figur 46.

Fig. 17 > Snow pressure distribution on a supporting surface of finite width.



Figur 46: Figuren viser en støtteforbygning sett ovenfra med lastfordeling av endekrefter. Figuren er hentet fra: (Margreth, 2007).

Tilleggskraften på endene gis som følger:

$$S'_R = f_R \cdot S'_N \quad \left[\frac{kN}{m} \right] \quad (12)$$

hvor S'_N er snøtrykket normalt på konstruksjonens bæreflate og f_R er endefaktoren:

$$f_R = (0.92 + 0.65 \cdot N) \cdot \frac{A}{2} \leq (1.0 + 1.25 \cdot N) \quad (13)$$

Hvor N er glidningsfaktoren som vist i figur 44 og A er den laterale avstanden mellom eventuelle rassikringskonstruksjoner. Forsøksveggen på Svalbard er en separat konstruksjon som begrenser f_R til høyre del av ligning 13.

Endelasten S'_R antas å virke konstant over konstruksjonens høyde (begrenset av snødekkets vertikale høyde) og fordeles utover en lengde Δl som vist på figur 46:

$$\Delta l = 0.60 \cdot \frac{A}{2} \leq \frac{D_K}{3} \quad [m] \quad (14)$$

hvor D_K er effektiv konstruksjonshøyde:

$$D_K = H_K \cdot \cos(\psi) \quad [m] \quad (15)$$

og H_K er konstruksjonens vertikale høyde. Fordelt konstant over snødekkets høyde, H , gis tilleggskraften som:

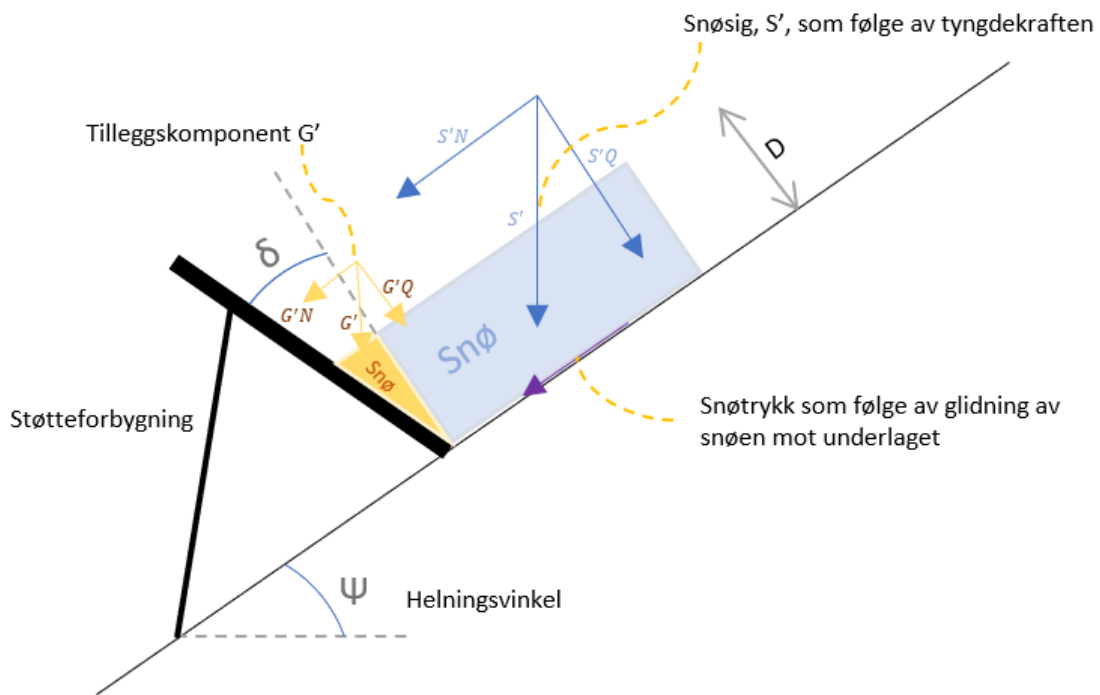
$$S'_{R_P} = \frac{S'_R}{H} \quad \left[\frac{kN}{m^2} \right] \quad (16)$$

3.2.3 Tilleggskraft for ikke-normal lastflate

Når sikringskonstruksjonen ikke står normalt på skråningen, må komponentene S'_N og S'_Q inkrementeres med vekten G' av det ekstra snølaget som dannes mellom støtteflaten og planet normalt på skråningen:

$$G' = \rho \cdot g \cdot \frac{D^2}{2} \cdot \tan(\delta) \quad \left[\frac{kN}{m} \right] \quad (17)$$

Hvor ρ er den gjennomsnittlige densiteten i snødekket i t/m^3 , g er tyngdekraftens akselerasjon (10 m/s^2), D er snødekkets høyde normalt på terrenget i meter og δ er vinkelen mellom terrengets normal og sikringskonstruksjonen i grader. Se figur 47. Forsøksveggen på Svalbard er montert normalt på skråningen og får derfor ikke en tilleggskraft som vist i ligning 17.



Figur 47: Figuren viser støtteforbygningen tiltet nedover og tilleggskomponenten G' som oppstår når støtteforbygningen ikke står normalt på terrenget. Figur: Vetle Basma.

3.2.4 Resultantkraft

Kreftene som virker normalt på støttekonstruksjonens lastflate kan summeres til en resultant:

$$R'_N = S'_N + S'_G + S'_R \quad \left[\frac{kN}{m} \right] \quad (18)$$

hvor S'_N er snøtrykket for en konstruksjon normalt på terrenget, S'_G tilleggskraften hvis konstruksjonen ikke står normalt på terrenget og S'_R tilleggskraften for konstruksjonsdel på enden.

Det må vurderes om de ulike delkomponentene gir bidrag til snøtrykket når det skal sammenlignes med målingene fra forsøksveggen på Svalbard.

3.2.5 Øvrige laster

Grunnet lastcellenes virkemåte kan kreftene kun måles normalt på forsøksveggenes bæreflate. Av den grunn neglisjeres øvrige laster som ellers måtte beregnes ved dimensjonering av en sikringskonstruksjon. Som vist i figur 41 gir snøsiget en lastkomponent parallelt med støtteforbygningen (normalt på skråningen):

$$S'_Q = S'_N \cdot \frac{a}{N \cdot \tan(\psi)} \quad \left[\frac{kN}{m} \right] \quad (19)$$

hvor S'_Q er skjærkraften som virker parallelt med konstruksjonen, N er glidefaktoren etter figur 44, ψ er helningsvinkelen og a er en faktor som varierer med snøtypen (nysnø, grovkornet snø etc.) og varierer mellom 0.2–0.5. S'_Q antas å virke jevnt fordelt over konstruksjonens høyde.

Som vist i figur 47 vil tilleggskomponenten G' også ha en komponent parallelt med konstruksjonens flate, G'_Q , som må tas høyde for ved en total vurdering. Av samme årsak som for S'_Q neglisjeres denne i videre kontrollberegninger ettersom lastcellene på forsøksveggen kun registrerer krefter normalt på dens bæreflate.

Andre øvrige laster som nevnes i SLF sin veiledning vurderes å ikke være nødvendige i denne oppgaven ettersom de ikke vil påvirke sammenligningsgrunnlaget med målingene fra forsøksveggen.

3.2.6 SLF tilpasset forhold på Island/Fastland-Norge

For å vurdere om SLF sin veiledning er anvendelig for islandske/norske forhold ble det i 1996 gjort et eksperiment ved Siglufjörður på Island (Johannesson & Margreth, 1999) for å vurdere designparameterne. I tillegg til felteksperimentet i Siglufjörður ble det gjort andre observasjoner på Island og Fastlands-Norge som bekreftet observasjonene som ble gjort under eksperimentet i Siglufjörður. Den viktigste forskjellen som ble funnet var ulikheten i snøens densitet. Som nevnt tidligere tas det i SLF sin veiledning utgangspunkt i en densitet på 270 kg/m^3 for snø 1500 meter over havet ved design, og variasjonen i densitet ved varierende høyde justeres ved en høydefaktor, f_c , som vist i ligning 11.



Figur 48: Siglufjörður, lokalisert nord på Island. I bakgrunnen ses rassikringskonstruksjoner i skråningen. Foto: Christopher Sturman. Hentet fra: (Robbins, 2015).

På Island observerte de en densitet på $400\text{--}450 \text{ kg/m}^3$, sammenlignet med 270 kg/m^3 i SLF sin veiledning. Som følge av at islandsk terreng bærer preg av større og mindre steiner på overflaten, observerte de en liten effekt av glidning av snødekket mot konstruksjonen. Lignende grunnforhold finnes også på Svalbard, og man kan derfor forvente at glidning av snødekket har liten betydning for det totale snøtrykket. Sammenlignet med SLF ble det heller ikke observert noen variasjon i densitet som følge av variasjon i høyde over havet.

Videre ble det gjort en tilpasning av glidefaktoren N for å ta hensyn til observasjonene beskrevet over. Som følge av lav ruhet i overflaten (store steiner) anbefales en faktor på 1.2 for glidefaktoren i SLF. For å ta høyde for en større densitet for islandske/norske forhold (Fastlands-Norge) anbefaler artikkelen en glidefaktor på 2.5. Det gir en økning på 108 %, noe som innebærer en densitet på 560 kg/m^3 dersom man heller skulle økt densiteten i tilsvarende grad. Artikkelen anbefaler derfor heller å øke glidefaktoren, samt å beholde SLF sitt utgangspunkt i snøens densitet på 270 kg/m^3 , enn å bruke en densitet på $400\text{-}450 \text{ kg/m}^3$ som ble observert. Dette gjør det enklere å tilpasse beregningene med SLF sin veiledning. Effekten av å øke glidefaktoren vil i praksis være lik som å øke densiteten på snøen det dimensjoneres for.

Som nevnt anvender SLF en variasjon i densitet basert på antall høydemeter over havet, men dette neglisjeres, og det anvendes heller en konstant høydefaktor på 1.1 (tilsvarende en høyde på 2000 meter over havet i henhold til SLF).

Det er viktig å presisere at observasjonene over er gjort på Island og Fastlands-Norge, og de samme effektene vil ikke nødvendigvis gjelde på Svalbard.

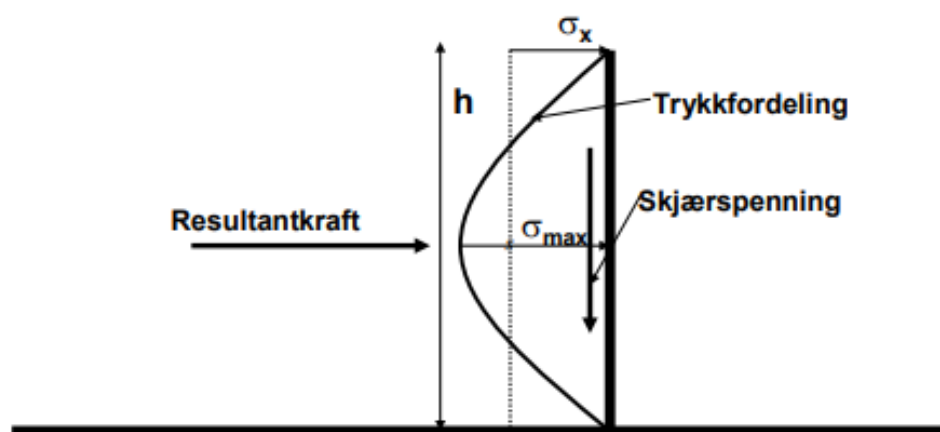
3.3 Beregningsanvisninger fra Statens vegvesen

Statens vegvesen har i lang tid vært en sentral aktør i Norge når det kommer til rassikring for skred. *Håndbok 138* ble skrevet av Harald Norem og utgitt i 2014 (Norem, 2014). Boken er en videreføring av *Håndbok 167 Snøvern* og erstatter denne. Håndboken gir informasjon om blant annet hvorfor snøskred opptrer, faktorer som skaper økende fare for skred og hvordan snøtrykk på stive konstruksjoner skal beregnes.

Beregningsgrunnlaget fra *Håndbok 138* baserer seg på felteksperimenter utført av blant annet Jan Otto Larsen. Felteksperimentene ble utført på målingsstasjonen til NGI ved Strynfjellene (Hjorth-Hansen et al., 2000), som nevnt under kapittel 2.3.3.

3.3.1 Snøtrykket normalt på konstruksjonens bæreflate

I *Håndbok 138* presenteres følgende spenningsfordeling som følge av snøtrykket normalt mot en støtteforbygning:



Figur 49: Trykkfordeling og resulterende krefter mot en støtteforbygning. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014).

Spenningsfordelingen varierer parabolisk med støtteforbygningens høyde. Snøtrykket varierer først og fremst som følge av snøsig. Norem hevder at «I Norge er glidningen mot bakken minimal og effekten av denne er derfor ikke tatt med i de videre analysene» (Norem, 2014). Denne antagelsen er trolig også gyldig for Svalbard ettersom terrenget stort sett består av et steinete underlag. Ruheten er dermed svært høy, og glidningen mot underlaget er minimal. Med en parabolisk fordeling som vist over kan maksimaltrykket finnes som 1.5 ganger gjennomsnittstrykket, σ_x :

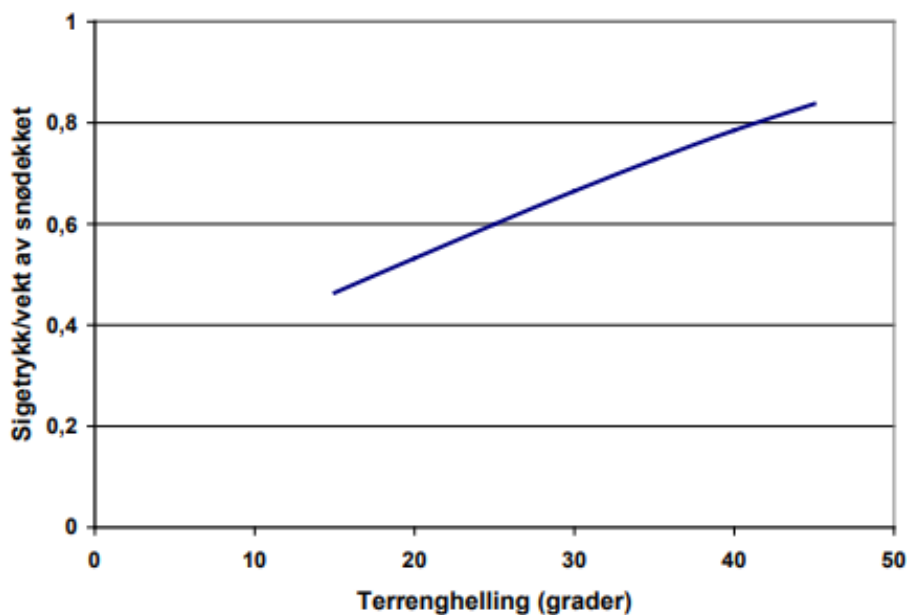
$$\sigma_{max} = 1.5 \cdot \sigma_x \quad \left[\frac{kN}{m^2} \right] \quad (20)$$

Gjennomsnittstrykket beregnes som følger:

$$\sigma_x = \rho \cdot g \cdot h \cdot \left(0.25 \cdot (\sin(\psi))^{\frac{1}{2}} + 0.05 \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sin(\psi) + 0.28 \cdot \cos(\psi) \quad \left[\frac{kN}{m^2} \right] \quad (21)$$

der ρ er snødekkets gjennomsnittlige densitet, g er tyngdekraftens akselerasjon, h er snødekkets høyde målt normalt på terrenget og ψ er terrenghellingen. Hos Vegvesenet anbefales det å bruke en densitet på 500 kg/m^3 ved beregninger.

Bakgrunnen for hvordan man kan anslå sigekreftene som vist i ligning 21 kommer fra teoretiske analyser og en rekke systematiske målinger i regi av NGI siden 1975 på Strynfjellene på Vestlandet.



Figur 50: Normalisert sigetrykk mot en støtteforbygning, σ_x , som funksjon av terrenghellingen. Figuren er hentet fra: (Norem, 2014).

3.3.2 Øvrige laster

Som vist i figur 41 vil snøsiget også gi en skjærkraft som virker parallelt på konstruksjonens bæreflate. SVV (Statens vegvesen) angir skjærkraften som følger:

$$\tau = 0.25 \cdot (\cos(\psi))^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 - 0.84 \cdot (\sin(\psi))^{\frac{1}{2}}\right) \left[\frac{kN}{m^2}\right] \quad (22)$$

Som nevnt tidligere vil lastcellene på forsøksveggen kun registrere normalkrefter, og skjærkraften er derfor ikke relevant i denne oppgaven.

For øvrige laster viser *Håndbok 138* til sveitsiske retningslinjer: «For mer detaljerte opplysninger henvises først og fremst for grunnlaget for dette arbeidet og til sveitsiske retningslinjer, BUWAL/WSL.» (Norem, 2014, s. 61). Derfor vil endeeffekter og eventuell tilleggskraft for konstruksjoner som ikke står normalt på terrenget beregnes etter sveitsisk veiledning, som vist i kapittelet over. Normalkraften som danner utgangspunkt for beregning av endeeffekter beregnes etter Vegvesenet sine beregningsmetoder, som vist i ligning 21.

Som nevnt under kapittel 2.3.3 observerte Larsen ingen deformasjon i snødekket som følge av glidning. Han anbefalte derfor å bruke den laveste glidefaktoren i SLF på 1.2, for deretter å multiplisere snøtrykket med 1.5 for å finne endeeffektene:

$$\sigma_r = (1 + 1.5 \cdot 1.2) \cdot \sigma_x \left[\frac{kN}{m^2}\right] \quad (23)$$

Endekreftene fordeles horisontalt på endene med lengde lik 1/3 av vertikal konstruksjonshøyde:

$$\Delta l = \frac{H_K}{3} \quad [m] \quad (24)$$

Ligning 23 kan være et mulig alternativ, men beregningsmetodene Larsen presenterer er nesten identiske med beregningene til SLF for endeeffekter som vist i ligning 12.

4 3D Snowpack Simulation Tool

4.1 Introduksjon

Snø er et svært komplekst materiale hvor materialegenskapene varierer med blant annet temperatur, densitet og kornstruktur. Det er derfor vanskelig å designe en programvare som tar høyde for alle de ulike faktorene som spiller inn. Martin Stoffel publiserte i 2006 doktorgradsavhandlingen *Numerical Modelling of Snow using Finite Elements* for *Swiss Federal Institute of Technology Zürich* (Stoffel, 2006). Målet til Stoffel var å utvikle et FEM-program (Finite Element Method) i både 2D og 3D for å undersøke mekanismene bak dannelsen av snøskred, i tillegg til å undersøke hvordan kvasi-statiske bevegelser i snøen påvirker snøtrykket på stive støtteforbygninger. For å undersøke hvordan programvaren håndterer utfordringen med å simulere snøtrykk på stive konstruksjoner, utførte gruppen en simulering med feltmålingene presentert i kapittel 5 som utgangspunkt. Resultatene fra simuleringen presenteres i kapittel 6.3, og sammenlignes deretter med snøtrykket fra felteksperimentet. Sammenligningen av snøtrykket fra simuleringen og felteksperimentet diskuteres i kapittel 7.7.

Stoffel beskriver snø som et porøst materiale sammensatt av is og luft, og definerer en stivhetsmatrise for is som tar høyde for påvirkningen fra temperaturvariasjoner i luften og i snødekket. Dette må gjøres for å kunne beskrive snøens metamorfose. Stoffel tar i tillegg hensyn til hvordan kornstrukturen i snøen varierer. Denne variasjonen fører til at snø med samme densitet kan ha ulik fasthet. I avhandlingen presenteres tre ulike tilnærminger for å undersøke mekanismene bak dannelsen av snøskred og snøtrykket fra kvasi-statiske bevegelser i snøen: todimensjonal bruddmekanikk, termomekanisk plan tøyning og tredimensjonal skademekanikk med bruk av metoden «N-directional approach». For å kunne etterligne komplekse terrengegenskaper, opplagerbetingelser, variasjoner i temperatur, fasthet og kornform i snødekket, samt ikke-lineære laster som vind og temperaturpåvirkninger er det nødvendig med en simulering i tre dimensjoner. I 3D baserer programvaren seg på metoden «N-Directional Approach», og det er denne programvaren som brukes videre i simuleringene. Metoden ble utviklet av Juan Muñoz og er presentert i *The N-Directional Approach to Constitutive Laws* (Muñoz & Francisco, 2002). Tøyningstilstanden beskrives kun ved normaltøyningskomponenten, delt inn i N antall jevnt fordelte retninger. Denne forenklingen gjør at man kan beskrive kompleks oppførsel i tre dimensjoner med endimensjonale materiallover og enkle fjærelementer. For detaljene rundt metoden henvises det til rapporten nevnt ovenfor (Muñoz & Francisco, 2002).

For å kontrollere kvaliteten til programvaren ble det utført en rekke simuleringer hvor resultatene ble sammenlignet med andre felteksperimenter. Blant annet ble arbeidet til M. De Quervain brukt som utgangspunkt for å undersøke effekten av snøsig (Quervain, 1945). De Quervain plasserte natursnø i en meter høye trekasser og plasserte de i rom med fire ulike temperaturer på -2 , -10 , -18.5 og -32.5 °C. Deretter observerte han deformasjonene i snøen over en periode på 100 dager. Resultatene fra simuleringen viste noe avvik etter fem dager, men relativt god overensstemmelse med programvaren etter 100 dager (Stoffel, 2006).

Gruppen presenterer kun det som anses å være relevant for denne oppgaven når det kommer til oppbyggingen av programvaren. I simuleringsverktøyet blir snøens mekaniske egenskaper formulert gjennom materiallover som gjennomgås i kapittel 4.2. I tillegg vil elementmodellen som anvendes i programvaren forklares i detalj i kapittel 4.3. For mer informasjon knyttet til programvaren, henvises det til Martin Stoffels avhandling (Stoffel, 2006).

4.2 Snøens mekaniske egenskaper

Snø er et ikke-lineært viskoelastisk materiale hvor responsen avhenger av lastens intensitet og varighet. De mekaniske egenskapene til snøen må derfor deles inn etter den induerte tøyningssraten. Sistnevnte varierer ut ifra flere ulike forhold, blant annet densitet og temperatur. Snø er et anisotrop materiale og de ulike lagene i snødekket har ulike mekaniske egenskaper. Snøens mekaniske oppførsel kan deles i tre deler: en elastisk, anelastisk og viskøs del. Den anelastiske delen beskriver den tidsavhengige responsen til snø under belastning.

De mekaniske egenskapene avhenger av flere ulike faktorer. Snøens densitet varierer fra 50 kg/m³ for nysnø og opptil 600 kg/m³ for våt snø. Snødekket er under kontinuerlige endringer og densiteten vil endre seg over tid. Nedre deler av snødekket vil pakkes sammen som følge av egenvekten til snøen over, og kan for eksempel ha en densitet som er ti ganger høyere enn nysnøen som ligger øverst. For å ta høyde for variasjonen i densitet i en 3D-simulering, må snødekket deles inn i flere lag. De ulike lagene antas å være isotrope selv om dette også er en forenkling av realiteten. Som følge av variasjonen i densitet vil stivheten og viskositeten til snøen også variere. Elastisitetsmodulen til snø spenner fra 0.1 MPa opptil 100 MPa, og små endringer i densitet vil derfor påvirke spennings- og tøyningfordelingen i snødekket i stor grad.

Temperaturfordelingen har også stor betydning for snøens viskositet, og temperaturene kan variere fra ca. -40 til 0 °C. Elastisitetsmodulen har vist seg å være uavhengig av temperatur (Scapozza, 2004), men snøens evne til å motstå deformasjoner vil variere som følge av at viskositeten endres. Siden de mekaniske egenskapene til snøen påvirkes betydelig av temperatur, er det viktig å inkorporere temperaturvariasjonene i snødekket i modellen. Den termodynamiske modellen som beskriver energioverføringene og hvordan temperaturen varierer over tid i snødekket drøftes i Stoffels avhandling, men diskuteres ikke i detalj her (Stoffel, 2006).

4.2.1 Tøyningstilstander

Snøens mekaniske oppførsel kan beskrives ut ifra spenningstilstanden. Spenningsene bestemmes av belastningen og tøyningene beskriver den resulterende deformasjonen. For snø i terreng som ikke er utsatt for annen belastning enn egenvekten til snødekket, vil tøyningssratene være i området fra 10⁻¹⁰ til 10⁻³.

Den resulterende tøyningen kan deles inn i to deler: en elastisk del og en viskøs del. De viskøse tøyningene er irreversible, noe som innebærer at tøyningene forblir etter endt belastning. Den viskøse deformasjonen i snø utvikler seg over tid og er høyst temperaturavhengig. De reversible elastiske tøyningene består av to deler: elastisk tøyning og en forsinket elastisk tøyning. Den totale tøyningen kan derfor beskrives som:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_d + \varepsilon_v \quad (25)$$

I noen tilfeller vil deformasjonen i belastet snø øke med tiden ettersom snø er et viskoelastisk materiale. Denne deformasjonen kalles kryp eller snøsig. Kryp defineres som deformasjoner som oppstår ved konstant belastning, etter den elastiske deformasjonen. Samme fenomen oppstår i for eksempel betong. Kryptøyningene beskrives ved viskøs tøyning og forsinket elastisk tøyning, ε_v og ε_d . Sammenlignet med tøyningene fra kryp vil den elastiske tøyningen i praksis være neglisjerbar.

I de neste delkapitlene vil materiallovene for de tre tøyingsdelene: elastisk tøyning, forsinket elastisk tøyning og viskøs tøyning bli presentert. Materiallovene er bestemt ut ifra et stort antall triaksiale tester utført av Scapozza og Bartelt (Scapozza & Bartelt, 2003a, 2003b) og von Moos (Moos et al., 2003) på tidlig 2000-tallet.

4.2.1.1 Elastisk tøyning

Den lineære elastiske normaltøyningen, ε_e , er direkte koblet til aksialspenninger gjennom elastisitetsmodulen E_0 :

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon_e \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (26)$$

hvor E_0 er blitt bestemt etter et stort antall triaksiale tester med varierende densitet, ρ , mellom 180 kg/m^3 og 450 kg/m^3 med følgende eksponentialfunksjon:

$$E_0(\rho) = 0.1873 \cdot e^{0.0149 \cdot \rho} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (27)$$

Forsøkene ble utført for finkornet snø, og materiallovene som presenteres er derfor ikke anvendelige for andre typer snø, som for eksempel våt snø. Elastisitetsmodulen ble funnet å være uavhengig av temperatur for feltforsøkene, som ble utført fra $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ til $-2 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.2.1.2 Forsinket elastisk tøyning

Feltforsøkene utført av Scapozza (Scapozza & Bartelt, u.å.) viste at den forsinkede elastiske tøyningen kunne være opptil 20 % av den totale elastiske tøyningen, avhengig av densitet og temperatur i snøen. Scapozza brukte resultatene fra felteksperimentene til Sinha (Sinha, 1984) som undersøkte effekten av kornstørrelse på stivheten til polykrystallinsk is, som utgangspunkt for formuleringen av den forsinkede elastiske tøyningen:

$$\varepsilon_d(T, \rho, t) = (\varepsilon_e)^s \cdot \frac{1}{K} \cdot \left[1 - e^{-(\alpha_T \cdot t)^b} \right] \quad (28)$$

ε_e er den totale elastiske tøyningen, s , b og K er dimensjonsløse konstanter, t er tid i sekunder og α_T er en temperatur-avhengig parameter i $1/s$. Scapozza modifiserte formuleringene til Sinha og bestemte s , b og K til henholdsvis 1.4, 0.12 og 0.03-0.06 etter egne feltforsøk.

Som nevnt varierer α_T med temperatur og Sinha bestemte α_T lik $1.94 \cdot 10^{-4}$ ved -10 °C. Skaleringen ved andre temperaturer gjøres med Arrhenius lov på følgende måte:

$$\alpha_T(T1) = \frac{\alpha_T(T2)}{S_{1,2}} \left[\frac{1}{S} \right] \quad (29)$$

hvor:

$$S_{1,2} = e^{\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T1} - \frac{1}{T2} \right)} \quad (30)$$

R er den universale gasskonstanten i kJ/mol·K, og Q er aktiveringsenergien i kJ/mol og varierer med temperatur:

$$Q = \begin{cases} 76 & \text{hvis } T < 263 \text{ K} \\ 10.73 \cdot T + 2747 & \text{hvis } T \geq 263 \text{ K} \end{cases} \quad (31)$$

Aktiveringsenergien er energibarrieren som må overkommes for å initiere en termodynamisk prosess som snøsig (Mitchell & Soga, 2005).

4.2.1.3 Viskøs tøying

Den elastiske og forsinkede elastiske delen av de totale deformasjonene er små sammenlignet med den irreversible viskøse delen. Den elastiske delen er likevel viktig da den bestemmer spenningsnivået som er nødvendig for å beregne den viskøse tøyingen, vist i ligning 32. Gjennom triaksiale tester med snø (Scapozza & Bartelt, u.å.) fant Scapozza og Bartelt ut at den viskøse tøyingen kan beregnes med en hyperbolsk funksjon:

$$\varepsilon_v = A_0 \cdot e^{\frac{Q}{R \cdot T_i}} \cdot \sin(\alpha \cdot \sigma)^n \quad (32)$$

hvor R er den universale gasskonstanten, og A_0 er en materialparameter som avhenger av densitet og temperatur:

$$\ln(A_0) = 1.707 \cdot 10^{-4} \cdot \rho^2 \quad \text{for } T_i = -11.3 \text{ °C} \quad (33)$$

hvor ρ er snøens densitet i kg/m³. Skaleringen ved andre temperaturer gjennom Arrhenius lov som i ligning 29:

$$A_0(T1) = \frac{A_0(T2)}{S_{1,2}} \quad (34)$$

$S_{1,2}$ beregnes på tilsvarende måte som i ligning 30. Eksponenten n i ligning 32 gis ved

$$n = a(T_i) \cdot \rho^2 + b(T_i) \cdot \rho + c(T_i) \quad (35)$$

hvor koeffisientene a, b og c bestemmes ved:

$$\begin{aligned} a &= 7.2042679 \cdot 10^{-7} \cdot T_i^2 - 3.7731919 \cdot 10^{-4} \cdot T_i + 4.9383224 \cdot 10^{-2}, \\ b &= -4.8868831 \cdot 10^{-4} \cdot T_i^2 + 2.5631217 \cdot 10^{-1} \cdot T_i - 3.3586996 \cdot 10^1, \\ c &= 7.6536355 \cdot 10^{-2} \cdot T_i^2 - 4.0231885 \cdot 10^1 \cdot T_i + 5.2827215 \cdot 10^3. \end{aligned} \quad (36)$$

Ligning 35 er gyldig for densiteter fra 180 kg/m^3 til 450 kg/m^3 . For $\rho < 180 \text{ kg/m}^3$ settes n lik 1.4 og for $\rho > 450 \text{ kg/m}^3$ settes n lik 3.7.

De to siste parameterne er aktiveringsenergien Q som er gitt i ligning 31 og α som gis ved:

$$\alpha = 2.65489 \cdot 10^9 \cdot \rho^{-4.6497} \quad (37)$$

Med utgangspunkt i ligning 26 og 32 kan en beregne seg frem til snøens viskositet:

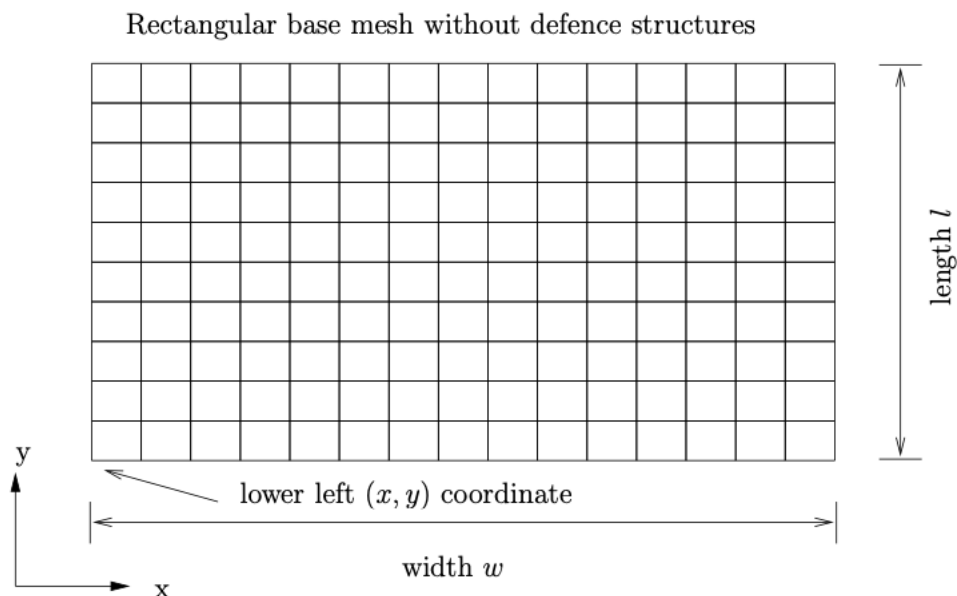
$$\eta = \frac{\sigma}{\varepsilon_v} \quad (38)$$

4.3 3D Elementformulering

4.3.1 Generering av mesh

Modelldomenet består av en tredimensjonal modell av snø i terreng. Domenet er diskretisert med bruk av tetraederelementer og under gis det en beskrivelse av hvordan meshet produseres. I tillegg gjennomgås hvordan stive rassikringskonstruksjoner introduseres i modellen.

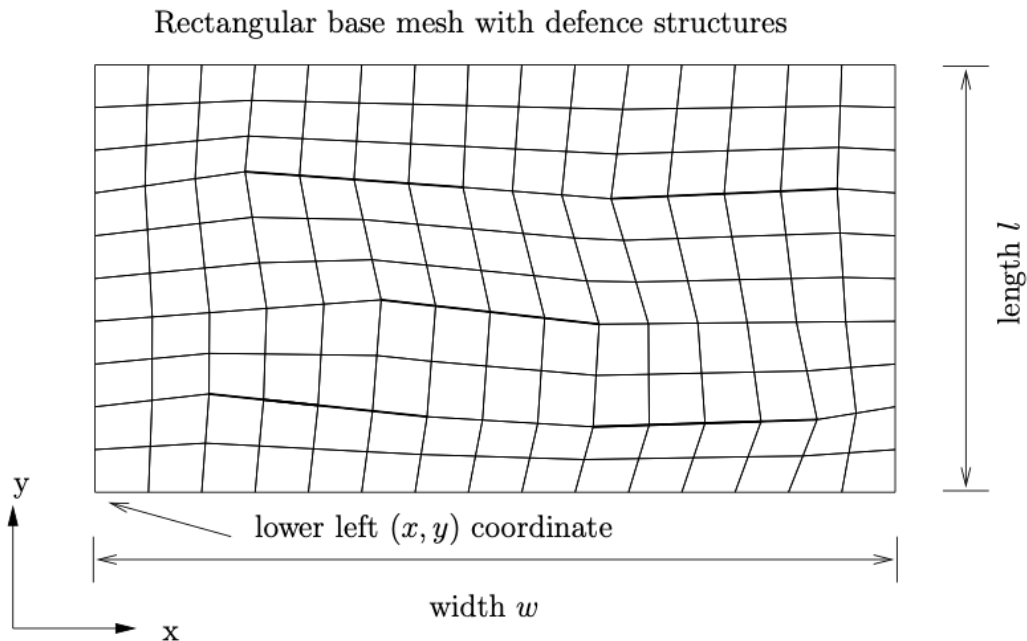
Utgangspunktet for snødekket er et rektangulært grunnmesh uten støtteforbygninger, som vist under.



Figur 51: Det rektangulære grunnmeshet uten støtteforbygninger. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

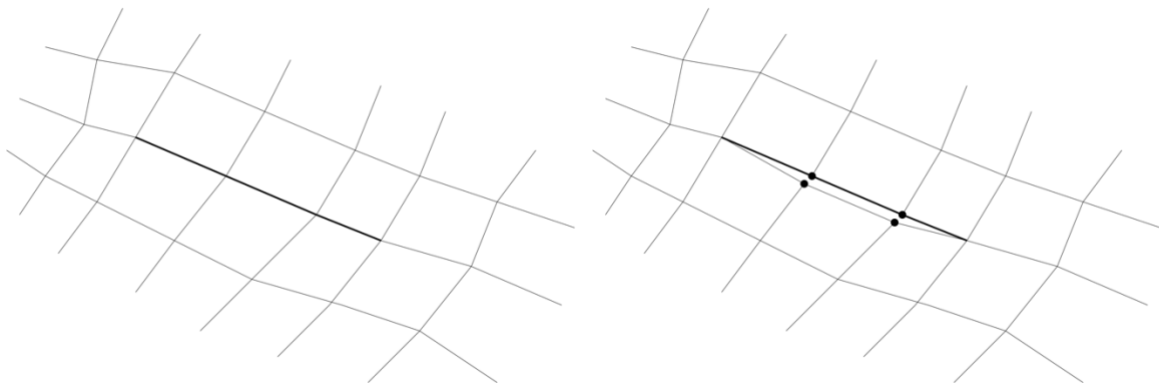
Først genereres modellen i XY-planet uten informasjon om høyden til snødekket, hvor meshet deles inn i rektangler med en brukerspesifisert størrelse. Deretter legges støtteforbygningene inn ved å definere start- og endepunktene for hver støtteforbygning. Dette gir en hovedretning hvor forventet snøtrykk defineres til venstre for støtteforbygningen når en står i startpunktet og ser mot sluttunktet. Videre blir meshet

tilpasset støtteforbygningene ved at sidene på rektanglene legges på linjen til støtteforbygningen. Figuren under viser samme mesh som over, men med støtteforbygninger som tykke linjer. Kantene til støtteforbygningen blir deretter koblet sammen med rektanglene rundt.



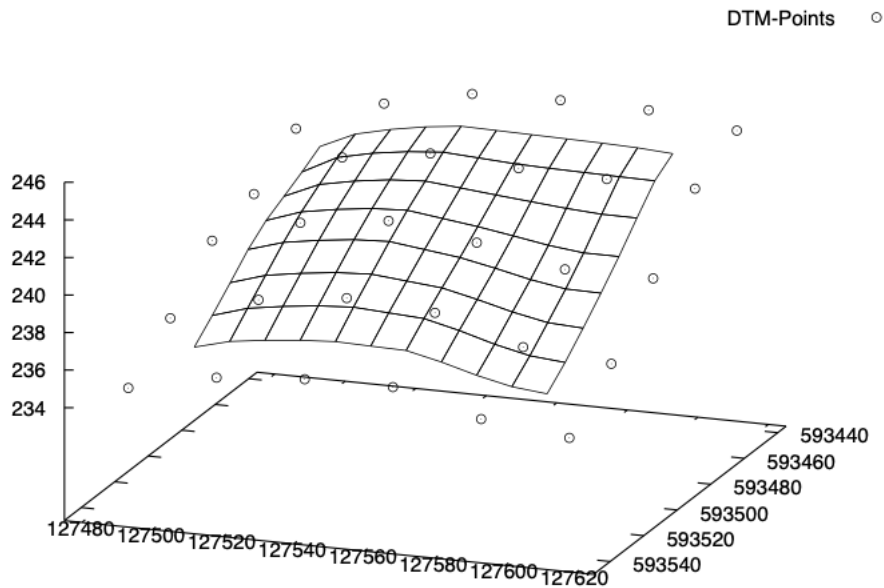
Figur 52: Det rektangulære meshet med støtteforbygninger illustrert som tykkere linjer. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

Støtteforbygningene blir modellert med ekstra noder og kanter som vist nedenfor.



Figur 53: Støtteforbygningens ekstra noder og kanter. Linjene ligger oppå hverandre som vist til venstre, men til høyre er de separert for å illustrere forskjellen. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

I det neste steget legges informasjon om høydevariasjonene i terrenget inn i modellen. Informasjonen hentes fra en DTM-fil (Digital Terrain Model) som også blir delt inn i et jevnt fordelt mesh. Meshet i DTM-filen består ofte av en mye grovere inndeling enn grunnmeshet. Derfor må høyden til nodene i grunnmeshet interpoleres bi-lineært mellom punktene i DTM-filen. Figuren under viser hvordan høydeinformasjonen fra DTM-filen inkorporeres i modellen.



Figur 54: Det rektangulære grunnmeshet med høydeinformasjon fra en DTM. Punktene indikerer høydedata fra DTM-filen. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

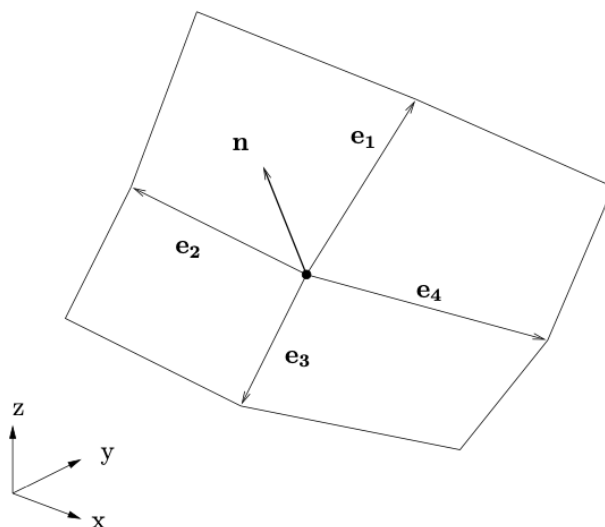
Med det rektangulære grunnmeshet som utgangspunkt skal det genereres et tetraedrisk mesh. Det første steget innebærer å lage et kubisk mesh. Overflatenormalene til rektanglene i grunnmeshet beregnes for å definere retningen rektangelet skal ekstruderes. Hver node i det rektangulære grunnmeshet er koblet til minst to andre kanter med tilhørende noder. For hvert tilhørende par med kanter e_i og e_j , blir normalen regnet ut med kryssproduktet:

$$n_{ij} = e_i * e_j \quad (39)$$

hvor i og j telles mot klokken. Disse normalene summeres for å finne gjennomsnittsnormalen til noden:

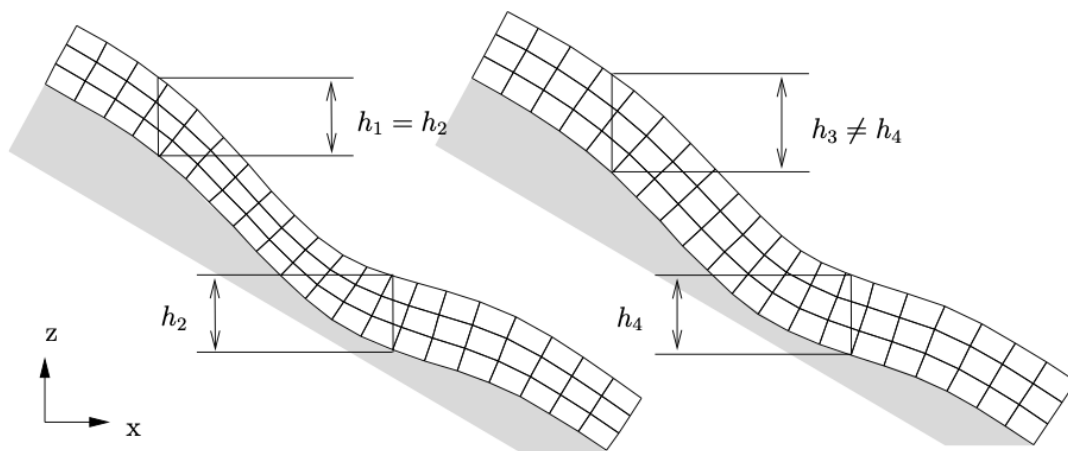
$$n = n_{12} + n_{23} + n_{34} + n_{41} \quad (40)$$

Dette er illustrert i figur 55:



Figur 55: Normalen til en node som gjennomsnitt av fire tilstøtende kanter. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

Deretter genereres kubene ved å ekstrudere gjennomsnittsnormalene til rektanglene en spesifisert høyde h_l , som blir høyden på ett lag i snødekket. Dette resulterer i et kubisk mesh med konstant tykkelse målt normalt på terrenget som vist til høyre i figuren under.



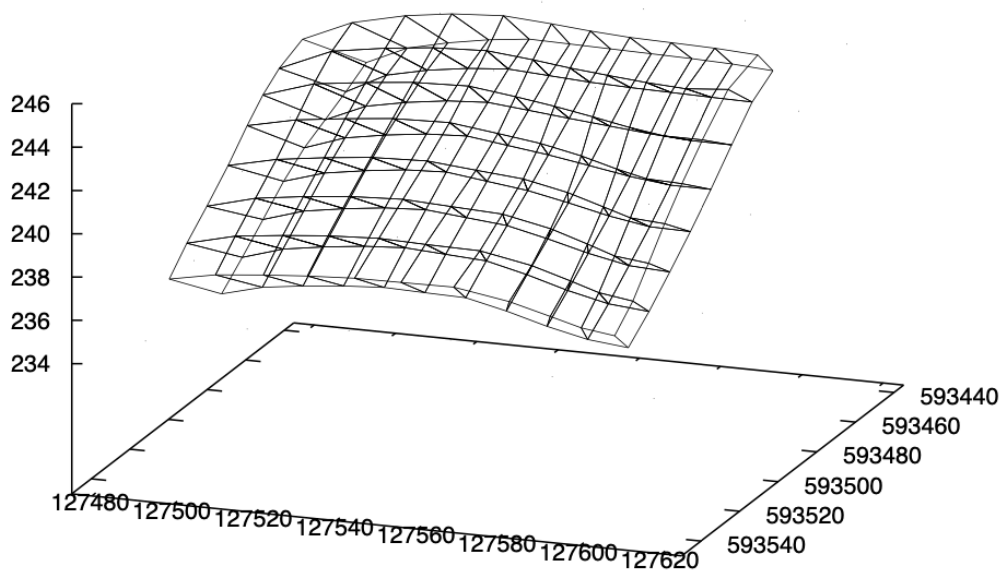
Figur 56: Til venstre ser man det kubiske meshet med konstant vertikal høyde. Samme mesh er presentert til høyre, men med en konstant høyde målt normalt på terrenget. Begge modeller er sett fra siden. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

Alternativt kan den vertikale høyden anvendes som vist til venstre i figuren over ved å regne ut den vertikale høyden til hver terrengnormal:

$$l = h_l \cdot n_z \quad (41)$$

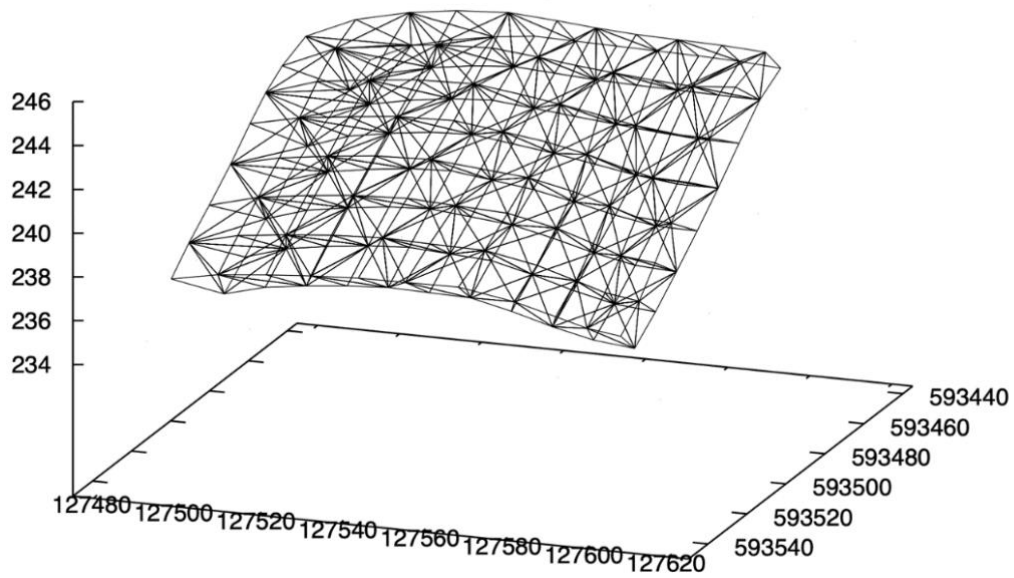
Hvor n_z er z-komponenten til normalvektoren hvor ekstruderingslengden, l , skal bli regnet ut.

Figur 57 viser hvordan ett lag i snødekket ser ut etter at det kubiske meshet er generert.



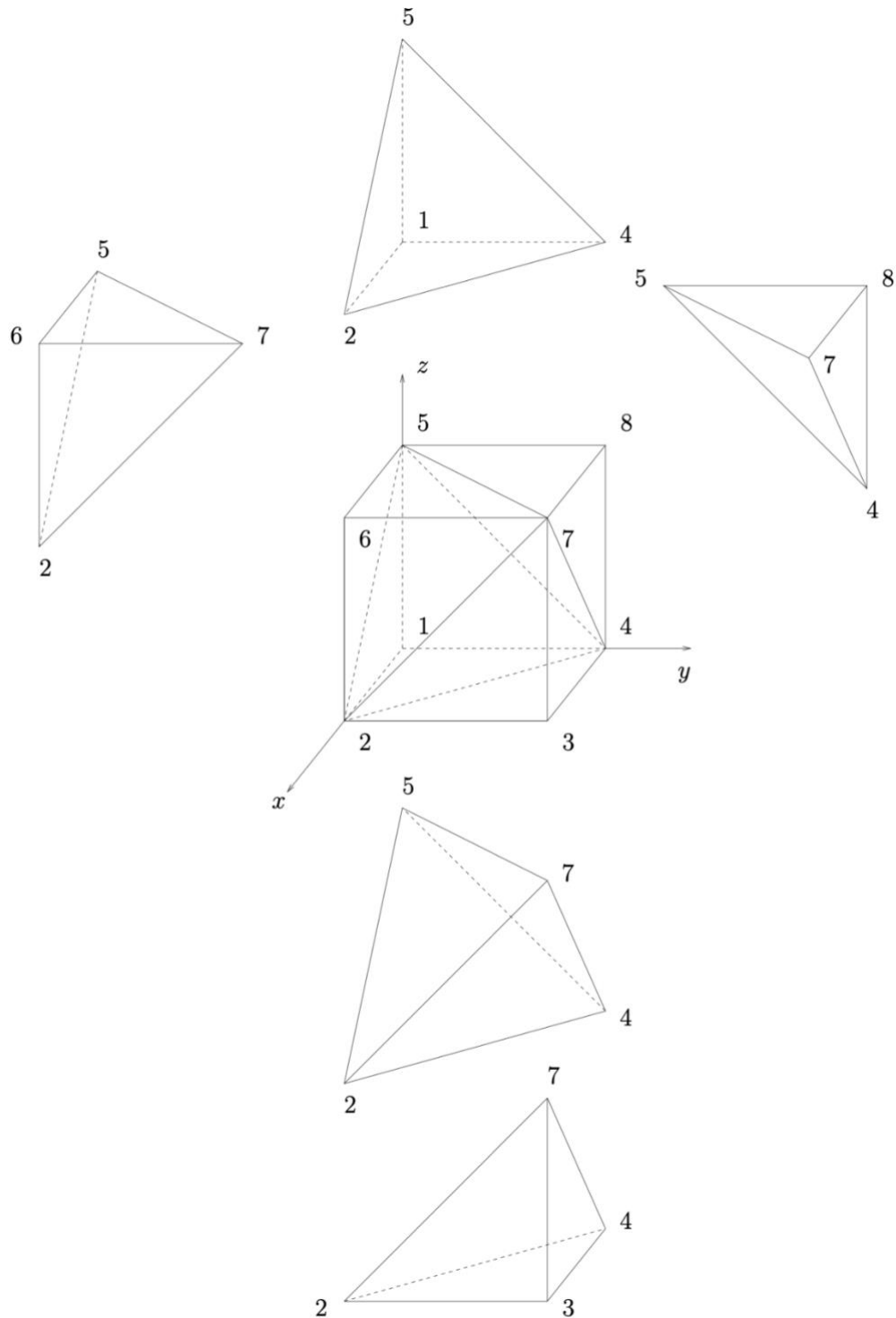
Figur 57: Et kubisk mesh med ett lag. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

Det neste steget er å dele hver kube inn i fem tetraedre som vist i figuren under.



Figur 58: Et tetraedrisk mesh med ett lag. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

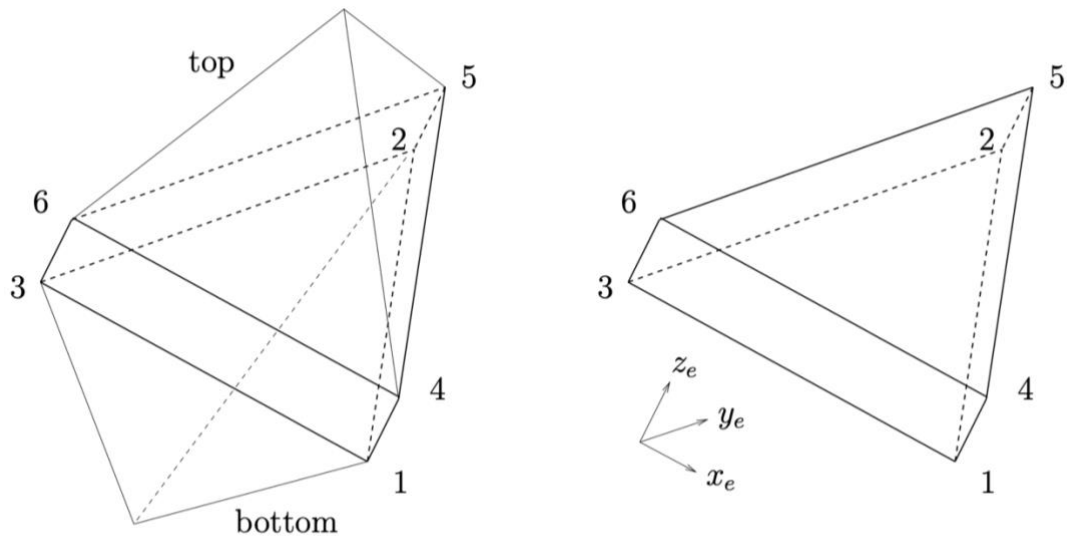
Figur 59 viser hvordan hver kube blir inndelt i fem tetraederelementer, med node-nummerering:



Figur 59: Hver kube i det kubiske meshet blir delt inn i fem tetraedre, med node-nummerering. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

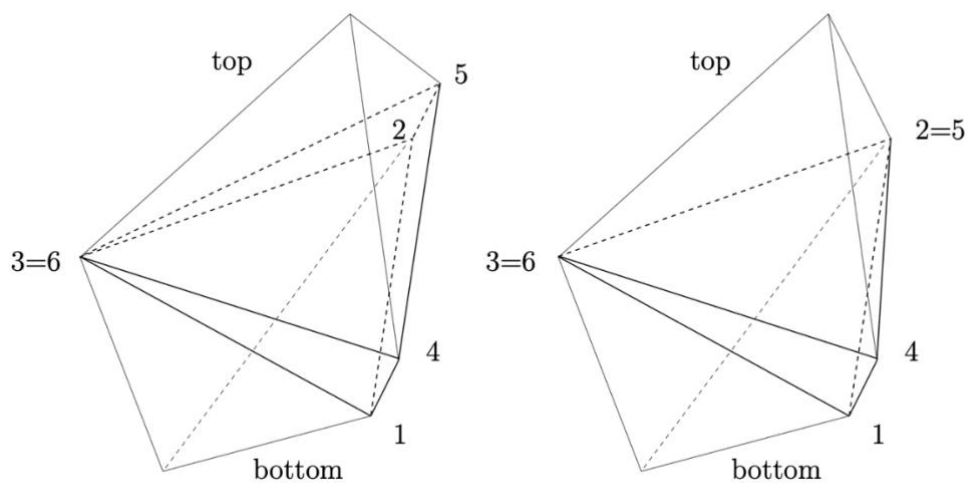
Det siste steget er å plassere de «svake» elementene som skal tilsvare svake lag i snødekket. Disse elementene legges inn som en polygonregion mellom to snølag som vist i figur 60. Med utgangspunkt i det tetraedriske meshet plasseres denne regionen

mellom grunnflaten til to tilstøtende tetraedre. Regionens flate defineres av den trekantede grunnflaten. Deretter ekstruderes den en definert høyde og danner et prisme. Figuren nedenfor viser hvordan begge de trekantede flatene til prismet tilhører et tetraeder, over eller under. Hvordan de svake elementene defineres i programvaren og skiller seg fra standardelementene, diskuteres i kapittel 4.3.2.3.



Figur 60: Til venstre er det svake elementet med lokal nodenummerering og tilhørende tetraedre illustrert. Høyre del av figuren viser det svake elementet isolert med det lokale koordinatsystemet. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

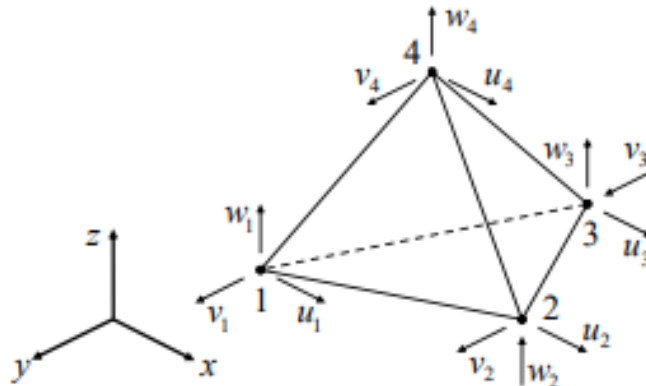
Det er nødvendig med overgangselementer langs kantene til det svake laget for å sikre kompatibilitet mellom elementene i de ulike lagene. Figur 61 viser overgangselementene fra ikke-svak sone til svak sone, der node 3 og 6, samt 2 og 5 kondenseres vekk. Forskjellen i forskyvning til disse nodene settes lik null, det betyr at $u_3 = u_6$ og $u_2 = u_5$.



Figur 61: Overgangselementer mellom svak og ikke-svak sone. Begge elementene utfyller hverandre i meshet. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

4.3.2 Diskretisering

I programvaren anvendes lineære tetraederelementer med fire noder og tre frihetsgrader i hver node, hvor de tre frihetsgradene beskriver forskyvning i tre ulike retninger.



Figur 62: Lineært tetraederelement med fire noder og totalt tolv frihetsgrader. Figuren er hentet fra: (Mathisen, 2021c).

4-noders tetraederelementer er det enkleste 3D-elementet som tilfredstiller de nødvendige konvergeringsbetingelsene (Mathisen, 2021c), og er en utvidelse av CST-elementet i 2D (Constant Strain Triangle). Forskyvningsfeltet varierer tri-lineært og tøyningene er konstante over elementet ettersom forskyvningsfeltet må deriveres en gang for å beregne tøyningene.

4.3.2.1 Standard elastisk element

Ettersom elementet har fire noder, fullfører elementet kravet om at formfunksjonene som minimum må kunne beskrive et lineært forskyvningsfelt:

$$u = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{qo} & 0 & 0 \\ 0 & N_{qo} & 0 \\ 0 & 0 & N_{qo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} \quad (42)$$

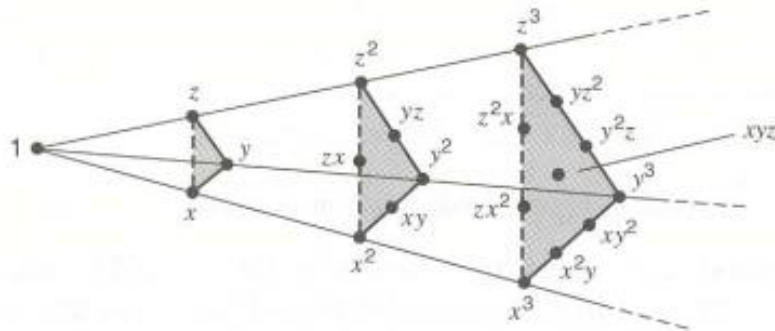
hvor:

$$N_{qo} = [1 \quad x \quad y \quad z] \quad (43)$$

og korresponderende sett med generaliserte koordinatene er gitt ved:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_x^T &= [q_{x1} \quad q_{x2} \quad q_{x3} \quad q_{x4}] \\ \mathbf{q}_y^T &= [q_{y1} \quad q_{y2} \quad q_{y3} \quad q_{y4}] \\ \mathbf{q}_z^T &= [q_{z1} \quad q_{z2} \quad q_{z3} \quad q_{z4}] \end{aligned} \quad (44)$$

Formfunksjonene, N_{q0r} , inneholder alle polynomleddene i et komplett lineært felt og oppfyller derfor minstekravet med et komplett første ordens polynom i Pascals pyramide:



Figur 63: Pascals trekant (pyramide) i 3D. Formfunksjonene for tetraederelementet inneholder første trappetrinn i pyramiden. Figuren er hentet fra: (Mathisen, 2021c).

Elementet oppfyller derfor fullstendighetskriteriet (Mathisen, 2021b):

- Elementet må kunne representere alle stivlegemebevegelser.
- Elementet må kunne representere alle konstante tøyingsmoder.

Tetraederelementet har totalt seks «Rigid-body modes», tre stivlegemetranslasjoner i x-, y- og z-retning og tre stivlegemerotasjoner. I tillegg til å oppfylle fullstendighetskriteriet, består elementet «Patch»-testen (Zienkiewicz & Taylor, 1997) og vil derfor konvergere mot eksakt løsning ved forfining av mesh. Etersom elementet kun er av første orden vil resultatet likevel konvergere sakte mot eksakt løsning, og et fint mesh vil være nødvendig for å oppnå et resultat med tilstrekkelig presisjon.

Analogt med arealkoordinater for CST-elementet er det praktisk å anvende volumkoordinater for tetraederelementet. Gevinsten er enklere integraler og formfunksjoner som er invariante med hensyn til elementets form og orientering. Elementene krever derfor mindre CPU-tid (Central Processing Unit).

Ett punkt inne i elementet deler volumet inn i fire sub-volum:

$$V1 + V2 + V3 + V4 = V, \quad (45)$$

Volumkoordinatene defineres som ratioer av totalvolumet:

$$\zeta_i = \frac{V_i}{V}; \quad i = 1,2,3,4$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^4 \zeta_i = \frac{V1 + V2 + V3 + V4}{V} = 1 \quad (46)$$

Forholdet mellom kartetiske koordinater x, y og z og volumkoordinatene kan uttrykkes på matrisform:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Ved å invertere forholdet kan volumkoordinatene uttrykkes slik:

$$\begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (48)$$

hvor a_i , b_i og c_i er konstanter og volumet av elementet er gitt ved:

$$6V = \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Volumkoordinatene i ligning 48 varierer lineært med de kartesiske koordinatene, og de kan derfor brukes som formfunksjoner for det tri-lineære tetraederelementet:

$$u = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_0 & 0 & 0 \\ 0 & N_0 & 0 \\ 0 & 0 & N_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = Nv \quad (50)$$

$$N_0 = [\zeta_1 \quad \zeta_2 \quad \zeta_3 \quad \zeta_4]$$

hvor:

$$\begin{aligned} v_x^T &= [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4] \\ v_y^T &= [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4] \\ v_z^T &= [z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z_4] \end{aligned} \quad (51)$$

Ettersom tøyningene er den deriverte av forskyvningen presentert i ligning 50 vil det assosierte tøyingsfeltet være konstant innenfor elementet:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^4 \begin{bmatrix} \frac{\delta N_i}{\delta x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\delta N_i}{\delta y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\delta N_i}{\delta z} \\ \frac{\delta N_i}{\delta y} & \frac{\delta N_i}{\delta x} & 0 \\ 0 & \frac{\delta N_i}{\delta z} & \frac{\delta N_i}{\delta y} \\ \frac{\delta N_i}{\delta z} & 0 & \frac{\delta N_i}{\delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ z_i \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^4 \mathbf{B}_i v_i \quad (52)$$

hvor:

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \zeta_{i,x} & 0 & 0 \\ 0 & \zeta_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_{i,z} \\ \zeta_{i,y} & \zeta_{i,x} & 0 \\ 0 & \zeta_{i,z} & \zeta_{i,y} \\ \zeta_{i,z} & 0 & \zeta_{i,x} \end{bmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & d_i \\ c_i & b_i & 0 \\ 0 & d_i & c_i \\ d_i & 0 & b_i \end{bmatrix} \quad (53)$$

Stivhetsmatrisen kan videre etableres på følgende vis:

$$K = \int [\mathbf{B}]^T [\mathbf{C}] [\mathbf{B}] dV = V [\mathbf{B}]^T [\mathbf{C}] [\mathbf{B}] \quad (54)$$

ettersom integranden er konstant. Elastisitetmatrisen, $[\mathbf{C}]$, gir forholdet mellom tøyning og spenning i tre dimensjoner og er analog med elastisitetsmodulen i 1D:

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (55)$$

der λ og μ er Lamé konstanter, definert som:

$$\mu = \frac{E_0(\rho)}{2(1 + \nu)} \quad \text{og} \quad \lambda = \frac{E_0(\rho) \cdot \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \quad (56)$$

hvor E_0 er elastisitetsmodulen etter ligning 27 og ν er Poisson's ratio.

Det er også en praktisk formel for integrasjon av volumkoordinater over volumet til tetraederet:

$$\int \zeta_1^m \zeta_2^n \zeta_3^p \zeta_4^q dV = 6V \frac{m! n! p! q!}{(m + n + p + q + 3)!} \quad (57)$$

4.3.2.2 Viskøst element

Som nevnt tidligere oppfører snø seg som et viskøst materiale. Analogt til det elastiske forholdet mellom spenning og tøyning, finnes det et forhold mellom viskøs tøyning og spenning:

$$\sigma_v = [\mathbf{V}] \cdot \varepsilon_v \quad (58)$$

hvor:

$$[V] = \eta \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{m} & \frac{1}{m-2} & \frac{1}{m-2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m-2} & 1 + \frac{1}{m} & \frac{1}{m-2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m-2} & \frac{1}{m-2} & 1 + \frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (59)$$

Viskositeten, η , beregnes etter ligning 38 i kapittel 3.2.1.3, og m er den viskøse analogien til Poisson's ratio. Diskretiseringen gjøres på samme måte som for det standard elastiske elementet i kapittel 4.3.2.1.

4.3.2.3 Elementer i svake lag i snødekket

Som nevnt i kapittel 2.4.3.1 er det svake lag i snødekket som forårsaker initiering av flaskred. I tillegg til å beregne snøtrykk på stive konstruksjoner i terrenget, undersøker programvaren hvordan en kan forutse når et snøskred vil forekomme og hvorfor det skjer. For å simulere dannelsen av snøskred introduseres et spesielt element som videre omtales som «svakt element». Elementet brukes til å etterligne de mekaniske egenskapene til et svakt grensesjikt i snødekket. I tillegg anvendes elementet for å kunne simulere glidning av snødekket.

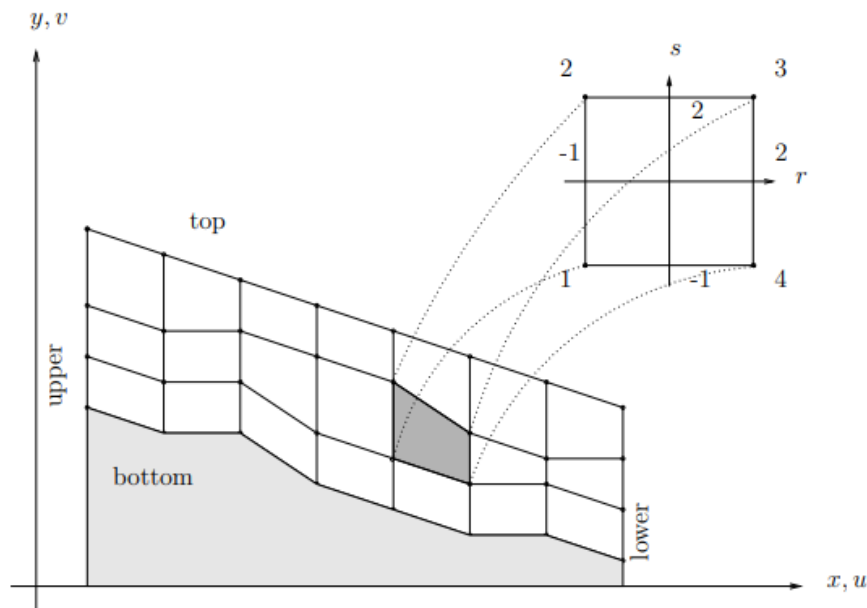
Geometrien til et svakt element er som beskrevet i kapittel 4.3.1. Elementet har seks noder med tre frihetsgrader i hver node, og dermed 18 frihetsgrader totalt. Det lokale koordinatsystemet til elementet er definert slik at z_e -aksen er normalt på trekantene på figur 60, og x_e - og y_e -aksen danner planet på overflaten av trekantene. Ideen går ut på å endre oppførselen til et standard elastisk element slik at de fysiske egenskapene langs tykkelsen av elementet (lokal z_e -retning) overføres mellom standard-elementene i overkant og underkant. Egenskapene overføres dermed på samme måte som hvis elementet ikke hadde eksistert. Stivheten i lokal z-retning settes derfor lik uendelig, og elementet vil ikke deformeres, men heller overføre kreftene direkte fra omkringliggende elementer.

I figur 64 har vi det svake elementet i 2D hvor aksene langs tykkelsen av elementet er definert som s-retningen, og aksene langs lengderetningen av terrenghelningen er definert som r-retningen. Tykkelsen i s-retning er ved definisjon satt lik null. Det antas at egenskapene i de to retningene er uavhengige av hverandre. Ettersom det antas at det ikke er noen interaksjon mellom de to retningene settes Poisson's ratio lik null.

Tilsvarende for den viskøse delen settes viskositeten, m , også lik null. På matriseform kan egenskapene til det svake elementet defineres som følger:

$$E_{weak} = \begin{bmatrix} E_R & 0 & 0 \\ 0 & E_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad og \quad V_{weak} = \begin{bmatrix} \eta_R & 0 & 0 \\ 0 & \eta_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (60)$$

Ved å sette E_s og η_s lik ∞ vil elementet være uendelig stift i lokal s -retning. Elementet vil derfor ikke deformeres, men derimot overføre kreftene direkte fra omkringliggende elementer. For E_R og η_R settes verdiene lik null. Dette resulterer i at det ikke er noen friksjon mellom lagene i overkant og underkant av det svake grensesjiktet. Den relative bevegelsen av nodene fra elementene over og under det svake elementet foregår derfor uavhengig av hverandre. Videre kan også andre verdier enn null rettfærdiggjøres basert på eksperimentelle data som kan gi informasjon om friksjonen mellom lagene. Teorien er her presentert i 2D, men de samme antagelsene og definisjonene videreføres til tre dimensjoner.



Figur 64: Lokalt koordinatsystem for et svakt element i 2D. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

Elementet også kan enkelt brukes til å simulere glidning av snødekket. Dette gjøres ved å justere parameterne E_R og η_R på best mulig måte for å etterligne de lokale friksjonsegenskapene mellom snødekket og underlaget. Verdien kan fastsettes ved hjelp av feltmålinger, eller ved å bruke en friksjonskoeffisient basert på materialene underlaget består av. Ved å sette E_R og η_R lik uendelig vil det etterlignes en situasjon hvor det er forventet null effekt fra glidning av snødekket.

5 Felteksperiment på Svalbard

For å vurdere om snøens mekaniske egenskaper er annerledes på Svalbard sammenlignet med Fastlands-Norge og Alpelandene, sammenlignes beregninger hos Vegvesenet og SLF med målinger fra et felteksperiment på Svalbard.

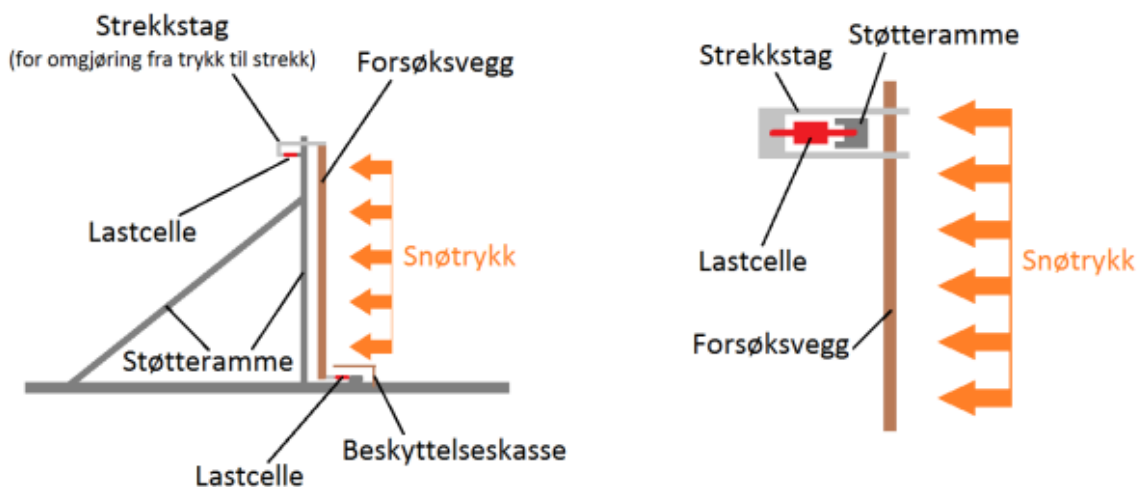
Montasje og bygging av forsøksveggen ble påbegynt våren 2017 i forbindelse med masteroppgaven til Jan Are Jacobsen (Jacobsen, 2017). Det ble gjort målinger fra mai til juli 2017. Der ble det blant annet registrert en snøprofil med høyde på snødekket, densitet, temperatur, kornform og lagfordeling. I tillegg ble det registrert målinger på kreftene fra snøtrykket på de fire lastcellene.

I etterkant av arbeidet som ble gjort våren og sommeren 2017 har målesystemet til veggen blitt utbedret. Forsøksveggen har også byttet plassering grunnet ønske om å plassere veggen i brattere terreng. Målingene fra forsøksveggen har i større grad blitt automatisert og man har et større og mer presist sammenligningsgrunnlag enn tidligere. Blant annet registreres det i dag målinger automatisk fra lastcellene hver hele time gjennom hele sesongen. Det innebærer en stor forbedring sammenlignet med tidligere da målingene måtte leses av manuelt fra forsøksveggen.

I dette kapitlet beskrives plasseringen av forsøksveggen, detaljer rundt oppbygningen og hvilke målinger som registreres. Det gis også en kort beskrivelse av det tekniske systemet som registrerer og behandler målingene. I tillegg presenteres resultater fra egne målinger i forbindelse med en feltekskursjon til Svalbard i starten av mars 2022.

5.1 Oppbygning av forsøksveggen

Målestasjonen består av en tett vegg som er 3 meter bred og 1.5 meter høy. Veggen er en selvstendig konstruksjon bygget opp som et rammeverk av stendere og topp- og bunnsvill. Fronten er kledd med forskalingsplater. For å gjøre det mulig å sveise på innfesting til lastcellene, er hjørnene på forskalingsplaten forsterket med aluminiumsprofiler. I tillegg er det skrudd inn aluminiumsprofiler i stenderverket rundt hele veggen. Oppsettet er illustrert i figur 65:



Figur 65: Konseptskisse av forsøksveggen. Skissen viser snitt av vegg og detaljskisse av en lastcelle. Figur: Jan Are Jacobsen. Hentet fra: (Jacobsen, 2017).

Lastcellene er plassert i veggens fire hjørner og er av typen HBM S9M (HBM, u.å.) som tåler opptil 2000 kg hver (20 kN). Denne typen lastceller registrerer strekk- og trykkrefter, noe som innebærer at eventuelle momentbidrag vil kunne forstyrre målingene. Lastcellene er derfor montert rotasjonsfrie med kulelagrede ledd i hver ende slik at de ikke kan ta opp momentkrefter, se figur under. For at lasten skal virke gjennom senteraksen på lastcellen, er cellene montert i strekk som gjør dem selvopprettende (Jacobsen, 2017).



Figur 66: Figuren viser lastcellene montert med kulelagrede ledd i hver ende. Foto: Jan Are Jacobsen. Hentet fra: (Jacobsen, 2017).

5.2 Forsøksområdet

Som nevnt ble veggens plassering flyttet etter ønske om å plassere den i et område med brattere terreng. Veggens nye plassering er ca. fire km nordvest for Longyearbyen, mellom Svalbards globale frøhvelv og skytebanen til Longyearbyen jeger- og fiskeforening. Forsøksveggen står utenfor faresone for skred, og det forventes derfor ikke forstyrrelser i målingene fra dynamiske lastvirkninger.



Figur 67: Forsøksveggen er plassert 78.23444°N, 15.46472°E. Figuren er hentet fra: (UNIS, 2021).

Underlaget veggen står på består av større og mindre steiner, og helningen er kontrollmålt til ca. 21°. For å unngå tilleggs kraften som ble diskutert i kapittel 3.2.3 er forsøksveggen forsøkt plassert vinkelrett på terrenget. Det er som nevnt vanlig praksis at støtteforbygningen står 10-15 grader tiltet nedover (Margreth, 2007), men en vinkelrett plassering var ønskelig for å få et enklere sammenligningsgrunnlag.



Figur 68: Forsøksveggen oppstilt ved tidligere plassering, veggen er flyttet i etterkant. Foto: Jan Are Jacobsen. Hentet fra: (Jacobsen, 2017).

På Svalbard er det beskjedent med nedbør slik det ofte er i arktiske områder. Utenom den sørøstlige delen hvor det er mest nedbør, ligger normalen på omkring 200-500 millimeter nedbør i året (Thuesen & Barr, 2021). Det er følgelig også lite snø på bakken generelt på Svalbard, og maks snødybde på Svalbard Lufthavn de ti siste vintrene har ligget på mellom 11 og 35 cm. Det blåser derimot mye på Svalbard, og hele øygruppen har polare østavinder med en dominerende vindretning fra nordøst. Sistnevnte gjelder også rundt Longyearbyen. Ettersom forsøksveggen er plassert i le for dominerende vindretning vil vinden felle ut betydelige mengder snø, og det dannes store snøfonner i forsøksområdet. Det kan derfor akkumuleres store mengder snø foran forsøksveggen. Denne fokksnøen er hardpakket med relativt høy densitet, noe som er av stor betydning når snøtrykk skal beregnes senere.

5.3 Teknisk system – Snow Load Testing System

Snow Load Testing System (SLTS) er betegnelsen for det tekniske systemet som registrerer målingene på forsøksveggen. SLTS består av følgende komponenter:

- Loggeenhet: Campell Science logger CR1000 (Campbell Scientific, u.å.-b).
- Lastceller: fire lastceller HBM type S9M/20 kN (HBM, u.å.).
- Temperatursonder: 5 x thermistor thermometer type 107 Campbell Science med 10 m. kabler (Campbell Scientific, u.å.-a).
- Temperatur og fuktighetssonde: Vaisala HMP155A (Vaisala, u.å.).
- Snødybdemåler: Campbell Science sonic distance sensor SR50A (Campbell Scientific, u.å.-c).

Testsystemet styres av Arktisk Teknologi på Universitet på Svalbard (UNIS) og loggføres kontinuerlig. Datamålingene føres i tabellform hver hele time døgnet rundt, og det er blitt samlet inn data siden høsten 2019. Dette gir to fulle vintersesonger med data: 2019/2020- og 2020/2021-sesongen.

De fire lastcellene er som nevnt plassert i hvert hjørne og navngis: lastcelle 1, 2, 3 og 4. Plasseringen av lastcellene, og bilde av forsøksveggen med de ulike komponentene er vist under. Videre vil dette omtales som feltforsøket/feltekspperimentet.



Figur 69: Snow Load Testing System. Foto hentet fra: (UNIS, 2021).

5.4 Egne målinger

Gruppen var fem dager på Svalbard fra 2. til 7. mars for å gjennomføre målinger og kontrollere resultatene fra målesystemet til feltforsøket. Det ble utført målinger av helningen hvor forsøksveggen er plassert, og laget en helningsprofil i området foran forsøksveggen. En densitet- og temperaturprofil av snødekket ble gjennomført i tillegg til en kartlegging av snødybdene i et område foran forsøksveggen. Måleinstrumentene ble også kontrollert med manuelle målinger av snødybde og lufttemperatur.

5.4.1 Helning

Helningen på veggen ble målt med et klinometer av typen SUUNTO PM-5. Klinometeret ble lagt oppå stålrammen som omkranser veggen, og helningen ble målt på høyre side, venstre side og på midten. Målingene viste 21, 20.75 og 21 grader, og gjennomsnittet rundes opp til 21°. At verktøyet ble lagt oppå stålrammen kan være en feilkilde hvis det er uregelmessigheter i forbindelsen mellom platen og aluminiumsrammen, men det var ikke mulig å måle på noen annen måte ettersom snødybden var såpass stor. Som nevnt tidligere i kapittelet er veggen montert vinkelrett på terrenget etter beste evne, og det estimeres en feilmargin på to grader.



Figur 70: SUUNTO PM-5 til venstre. Hentet fra: (SUUNTO, u.å.). Nikon Forestry Pro til høyre. Hentet fra: (Nikon, u.å.).

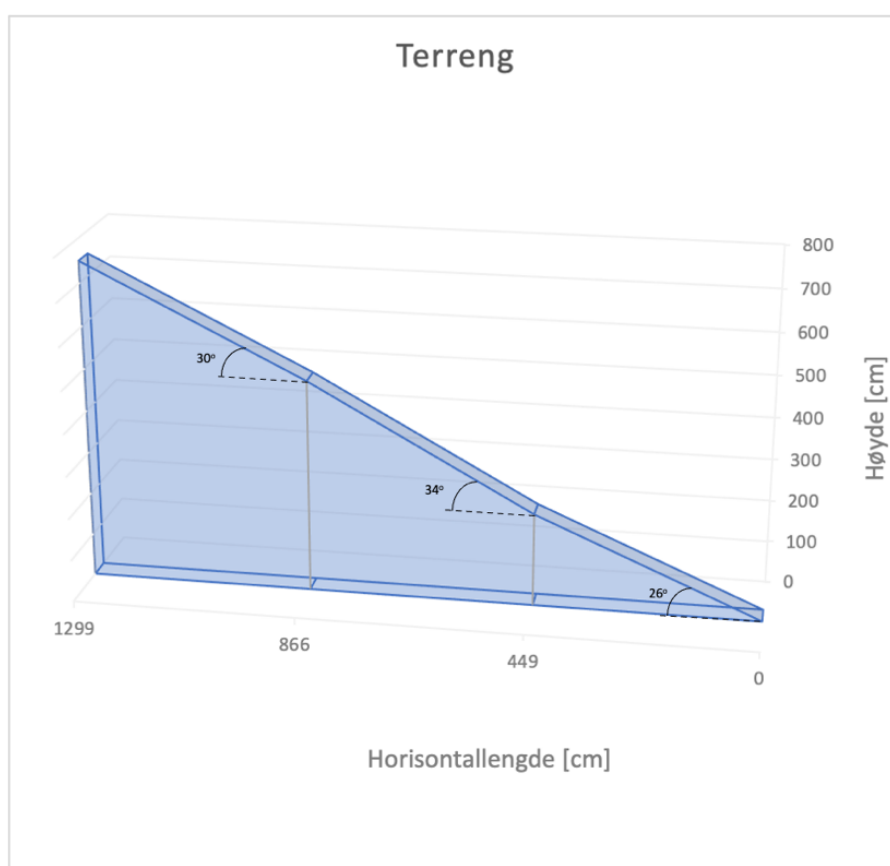
Terrenghelningen foran veggen ble målt med en laseravstandsmåler av typen Nikon Forestry Pro. For å måle helningen ble det satt ned en skredstang vertikalt i snødekket rett foran veggen, og en annen skredstang 15 m oppover i terrenget. Deretter ble laseravstandsmåleren satt oppå den første stangen, og skutt mot en håndflate på toppen av stangen 15 meter lenger opp. Dette ble gjort for å øke presisjonen da siktepunktet forskyves noen centimeter opp når instrumentet legges oppå stangen. For å sikre at helningen ble korrekt ble det utført flere kontrollmålinger. Prosessen ble repetert for 5 og 10 meter, målt skrått oppover i terrenget over forsøksveggen. Dette medfører at resultatene fremstiller et gjennomsnitt av helningen over den gitte avstanden. Resultatene er presentert nedenfor i tabell 2. Noen målinger ble også verifisert med klinometeret som ble brukt til å måle helningen på veggen. Ettersom bakkeoverflaten i området rundt forsøksveggen stort sett består av stein, er det mulig at søkestangen som ble brukt kan ha målt feil høyde. Det kan ha skjedd ved at den traff toppen av en stein, som ville ført til en slakere helning, eller at den gikk dypt mellom noen steiner og dermed førte til en brattere helning. For å minimere risikoen for dette så mye som mulig ble det

stukket ut flere punkter i samme området. Søkestengene var av samme type og 270 cm høye. Resultatene nedenfor viser at helningen i terrenget foran forsøksveggen relativt jevn, men slakest i området nærmest veggen.

| | 0-5 m | 0-10 m | 0-15 m |
|---------|-------|--------|--------|
| Helning | 26° | 30° | 30° |

Tabell 2: Terrenghelning målt i tre avstander skrått oppover i terrenget fra veggen.

Fordi helningen måles som gjennomsnitt over avstanden vil det bety at helningen fra 5 - 10 m vil være brattere enn 30° fordi helningen ved veggen og frem til 5 m er 26°, se figur 71. Helningsprofilen i området vil påvirke trykkmålingene ettersom forsøksveggen har en effektiv trykksone hvor snøen presser mot veggen. Hvis helningen varierer i den effektive trykksone må resultatene tolkes deretter, og dette diskuteres nærmere i kapittel 7.5.

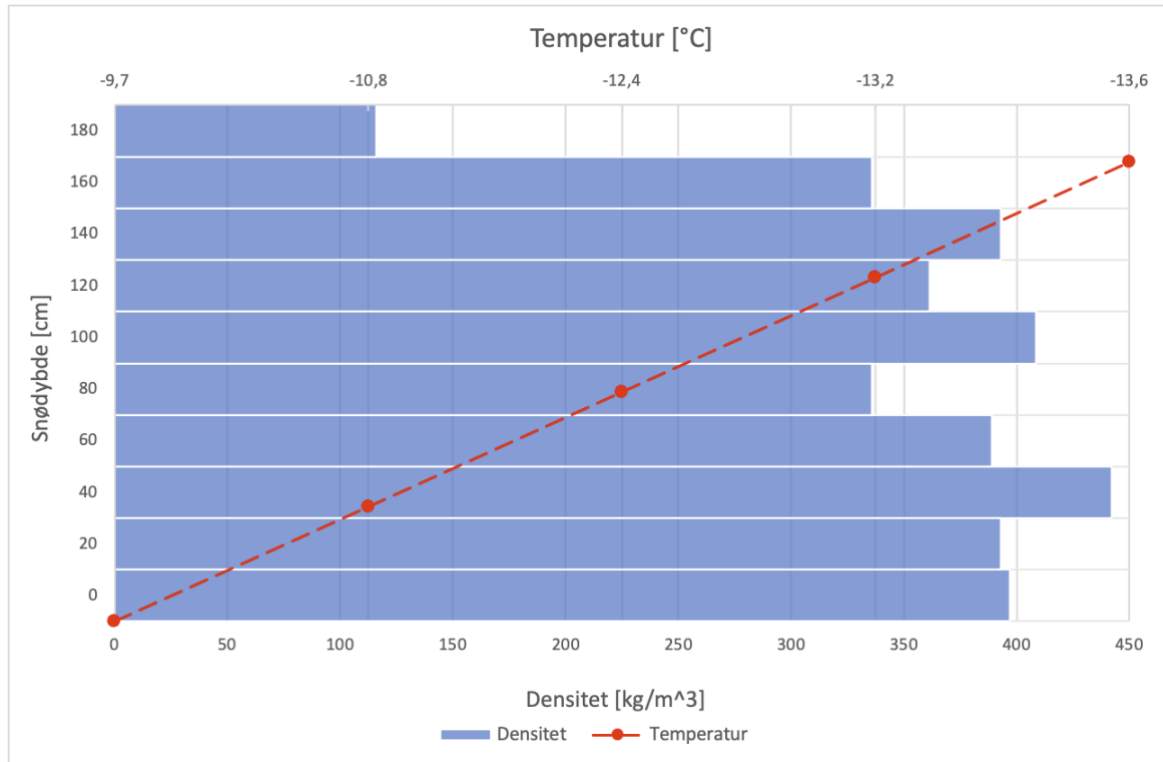


Figur 71: Terreng foran veggen. Ved fem og ti meter er det en endring i helning. Hentet fra: vedlegg E.

5.4.2 Densitet og temperatur i snødekket

Det ble utført en densitetsmåling for å få et bedre grunnlag ved valg av densitet når resultatene fra målingene skal sammenlignes med beregninger fra SLF og Vegvesenet. Gruppen gravde et vertikalt hull ned til bakken rett ved siden av forsøksveggen med en stålspace. Deretter målte gruppen densiteten for hver 20. cm oppover i snødekket. Dette ble gjort ved at en sylindere av stål ble dyttet inn i snøen og trukket ut igjen, full av snø. Vekten av selve sylindere ble trukket fra, og med vekten av snøen og volumet av

sylindren, ble densiteten beregnet. Resultatene fra densitetsmålingene presenteres i figur 72 sammen med temperaturmålinger i snødekket. Som følge av at snøen var svært hardpakket var det vanskelig å få dyttet inn målesylindren. Dette kan ha ført til at snøen i sylindren ble enda hardere pakket da den ble dyttet på bakfra, og dette er en mulig feilkilde.



Figur 72: Resultatene fra temperatur og densitetsmålingene. Hentet fra: vedlegg E.

Figur 72 viser hvordan densiteten varierer mellom 330 og 450 kg/m³ for alle lagene utenom det øverste, som besto av lettere nysnø fra samme dag som målingene ble tatt. Der ble densiteten målt til rundt 100 kg/m³. Gjennomsnittsdensiteten ble regnet ut til 357 kg/m³ for hele snødekket.

Temperaturen i snødekket ble målt for hver 40. cm med en digital termometer av typen Milwaukee TH310 (Milwaukee, u.å.). Temperaturen synker tilnærmet lineært oppover i snødekket. Dette er en konsekvens av at lufttemperaturen i perioden før målingene var lav. Når lufttemperaturene øker nærmere sommeren vil snødekket varmes opp ovenfra, noe som videre vil føre til varmere temperaturer i de øvre lagene.

I feltforsøket var det knyttet usikkerhet til hvordan temperaturen i snødekket ble målt. Gruppen hadde derfor som mål å kontrollere dette under turen på Svalbard. Etter å ha gravd et hull rett bak vegg ble det observert temperatursensorene går gjennom vegg bakfra, se figur 73. Det er totalt fem sensorer i hele veggens høyde av typen 107 Campbell Science som nevnt i kapittel 5.3.

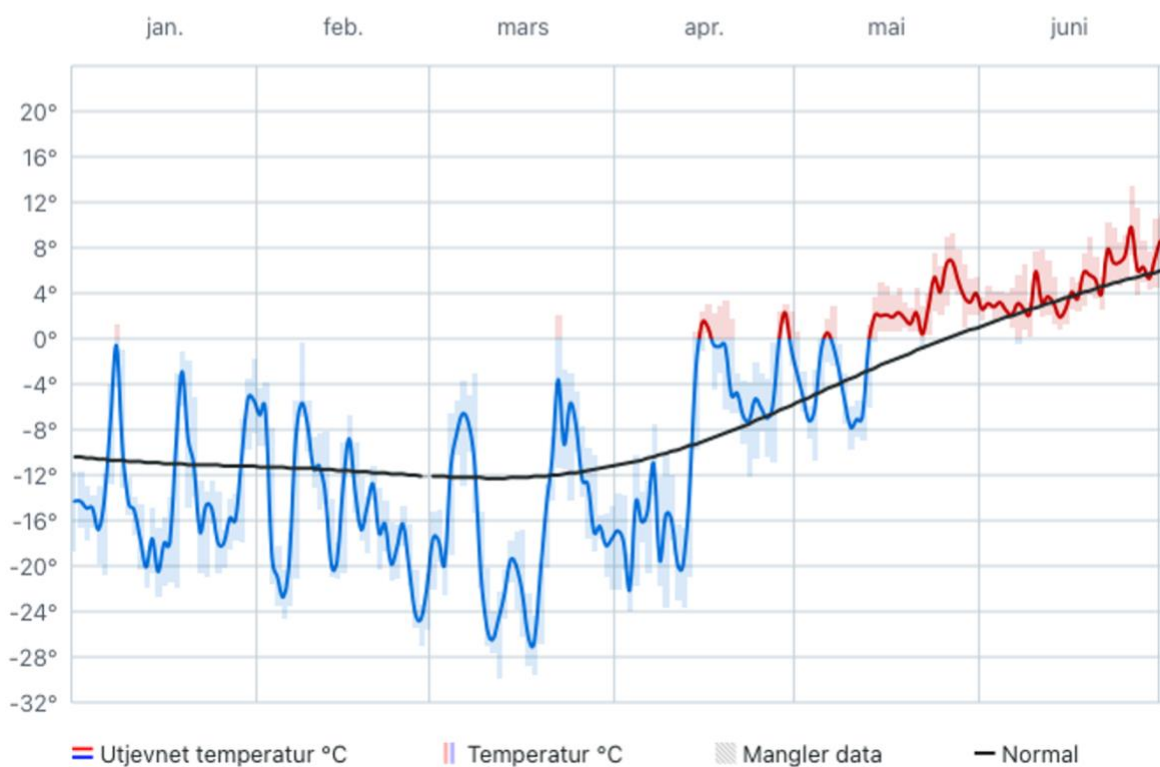
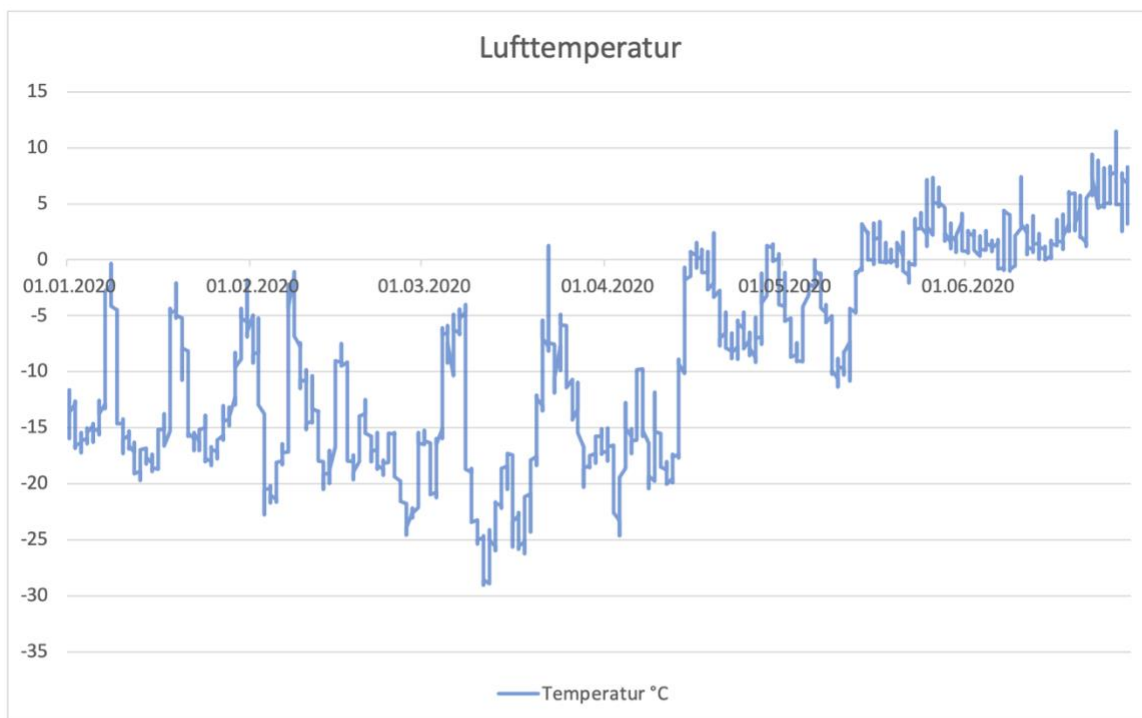


Figur 73: Bilde av hvordan temperaturmålingene i snødekket blir målt. Foto: Philip Kunz.

5.4.3 Lufttemperaturmålinger

Lufttemperaturen ble kontrollmålt til $-9.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ med samme temperaturmåler som ble brukt til å måle temperaturen i snødekket. Temperaturen samme tid på Svalbard Lufthavn viste $-8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Svalbard Lufthavn ligger veldig nærme forsøksområdet, men kun 28 meter over havet. Forsøksveggen ligger derimot 253 moh., og det virker derfor fornuftig at denne høydeforskjellen er bakgrunnen for differensen i temperatur.

I øvre del av figuren nedenfor, er lufttemperaturen fra sensoren plottet fra januar og ut juni 2020. Nedre del viser temperaturen på Svalbard Lufthavn for samme periode, hentet fra yr sin historikkfunksjon. Grafene viser god overenstemmelse i både mønster og ekstremverdier, og dataen fra lufttemperaturmåleren er derfor å anse som korrekt.



Figur 74: Grafen over viser temperaturen fra lufttemperaturmåleren i perioden januar-juni 2020. Figuren er hentet fra: vedlegg C. Grafen under viser det samme for Svalbard Lufthavn og er hentet ut fra yr sin historikk. Figuren er hentet fra: (Yr, u.å.).

5.4.4 Snødybdemålinger

Det var knyttet usikkerhet til hvordan snødybdemåleren målte snødybden, enten vertikalt eller normalt på terrenget. Som figur 75 viser, måles snødybden normalt på terrenget. For å verifisere at måleren registrerer korrekt data, ble det tatt snødybdemålinger normalt på terrenget med en søkestang rett i underkant av måleenheten. Målingene viste at det var god overenstemmelse med ca. fem cm feilmargin, og data fra snødybdemåleren er derfor troverdig.



Figur 75: Bilde av veggen med snødybdemåleren på toppen. Vinkelen i hjørnet er tilnærmet 90 grader. Foto: Vetle Basma.

Som nevnt tidligere har støtteforbygninger en effektiv trykksone et område i forkant hvor snøen påvirker trykket på konstruksjonene. For å kunne estimere hvor mye snø som ligger i forkant av veggen, tok gruppen vertikale dybdemålinger av snøen. Det ble utført snødybdemålinger i tre linjer oppover i terrenget fra veggen: midten, høyrekant og venstrekant av veggen. Bredden på forsøksveggen er tre meter, og det ble derfor utført målinger 1.5 meter til hver side for midten. Langs hver linje ble det utført ti dybdemålinger med søkestang, opptil 15.3 meter unna forsøksveggen. Resultatene vises i tabell 3 nedenfor.

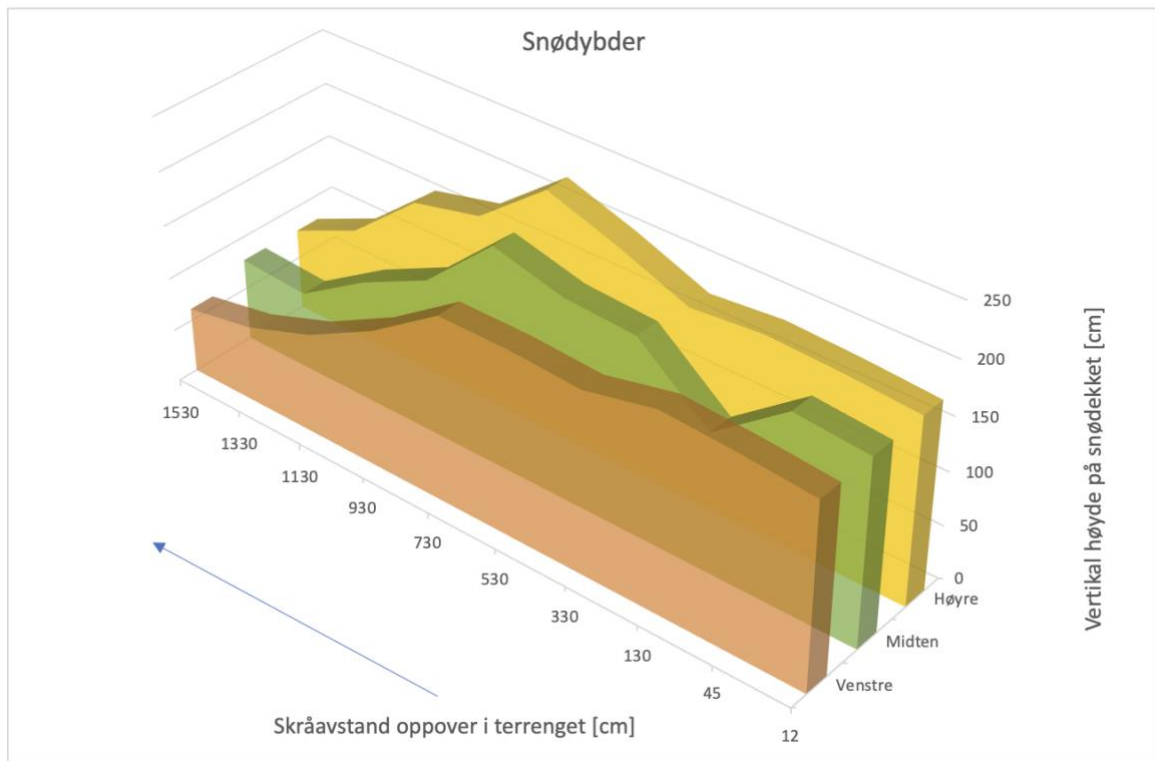


Figur 76: Bilde av hvordan snødybdemålingene ble tatt med søkestenger. Foto: Haldis Døvre Kalland.

Tabellen nedenfor viser at snødybdene er relativt jevne frem til 7-8 meter, før de avtar og er på sitt laveste lengst vekk fra forsøksveggen. Det virker fornuftig ettersom det befinner seg en liten kulle i dette området. Det er også i snitt noe mindre snø langs venstre linje sammenlignet med målingene langs midten og høyre side. Årsaken til en større snøakkumulasjon på høyre side kan være kollen på oversiden. Med utgangspunkt i dominerende vindretning vil kollen vil ha en skjermende effekt, og bremse opp vinden i større grad for linjen til høyre. Dette vil videre føre til at det felles ut mer snø fra vinden på den siden.

| Snødybde (cm) | | | |
|-------------------|---------|------|-------|
| Cm opp fra veggen | Venstre | Midt | Høyre |
| 10 | 175 | 175 | 175 |
| 45 | 181 | 181 | 180 |
| 130 | 185 | 130 | 183 |
| 330 | 170 | 184 | 177 |
| 530 | 174 | 188 | 203 |
| 730 | 174 | 205 | 225 |
| 930 | 130 | 145 | 174 |
| 1130 | 96 | 114 | 159 |
| 1330 | 73 | 74 | 105 |
| 1530 | 61 | 78 | 77 |

Tabell 3: Snødybdemålinger foran forsøksveggen, målt skrått oppover i terrenget i tre linjer. Hentet fra: vedlegg E.



Figur 77: Snødybdemålingene ovenfor forsøksveggen i tre linjer: venstre, midten og høyre. Hentet fra: vedlegg E.

5.4.5 Snøakkumulasjon ved støtteforbygningene på Sukkertoppen

I forbindelse med feltekskursjonen i starten av mars 2022 tok gruppen seg opp på Sukkertoppen for å se på støtteforbygningene som nylig hadde blitt montert. På det tidspunktet var det montert tre rader med støtteforbygninger øverst på Sukkertoppen. Snøen fokket seg mellom radene som vist på figur 78 og snøakkumulasjonen hadde en tydelig sammenheng med dominerende vindretning. Svalbard omtales som en arktisk ørken med en beskjeden årlig nedbørsmengde på rundt 300 mm. Ansamlingen av snø på Sukkertoppen skyldes vanligvis også drivsnø, og en mulig teori er at støtteforbygningene til en viss grad fungerer som snøskjermer. Det kan føre til økte snødybder sammenlignet med hvordan det hadde vært uten støtteforbygningenes tilstedeværelse. Snødybdemålingene som ble utført før støtteforbygningene ble montert kan derfor avvike fra opptredende snødybde, og dimensjonerende lastverdier kan potensielt være ikke-konservative.

Det ble også observert at snøen som fokket seg mellom radene av støtteforbygninger ikke la seg inntil bæreflaten, men at det var en viss avstand mellom snøen og støtteforbygningene. Som nevnt i kapittel 2.5.1 vil det danne seg en effektiv trykksone i forkant av støtteforbygningene dersom snøen hviler mot konstruksjonene. En slik trykksone kan være gunstig og bidra til å forhindre eventuelle utløsninger av skred ettersom flaskred utløses som følge av skjærbrudd i snødekket og trykkspenningene som oppstår. Hvis snøen derimot ikke hviler mot konstruksjonen, vil ikke disse gunstige trykkspenningene oppstå, og støtteforbygningene vil delvis virke mot sin hensikt. Støtteforbygningene vil likevel fungere som en sikringskonstruksjon mot snøskred ettersom videre forplantning av bruddlinjen i snøen forhindres, og dermed reduseres

størrelsen på et eventuelt skred. Det er derfor viktig at støtteforbygningene er dimensjonert for eventuelle mindre skred som kan oppstå.

Sett i lys av dette burde det gjennomføres videre observasjoner av snøakkumulasjonen rundt støtteforbygningene på Sukkertoppen for å vurdere dimensjonerende lastverdier.



Figur 78: Snøakkumulasjon bak øverste støtteforbygning på Sukkertoppen. Foto: Philip Kunz.

6 Resultater

I dette kapitlet blir resultatene fra feltforsøket på Svalbard og beregningene fra SLF og SVV presentert. I kapittel 6.1 presenteres resultatene fra målingene på Svalbard for 2019/2020- og 2020/2021-sesongen. Resultatene fra beregningene for snøtrykk i henhold til beregningsanvisninger fra SVV og SLF er presentert i kapittel 6.2, og resultatene fra simuleringen er presentert i kapittel 6.3. Resultatene drøftes videre i kapittel 7.

6.1 Målinger fra Svalbard

Målingene fra Svalbard er utført med oppsettet som forklart i kapittel 5.3. Hver time har snøtrykket i de fire lastcellene, snødybden, temperaturen i snødekket og lufttemperaturen blitt målt og registrert for to sesonger. Disse målingene presenteres nedenfor.

Noen av resultatene som presenteres har blitt korrigert i ulik grad. Snødybdesensoren som benyttes er som nevnt en sonisk avstandsmåler av typen SR50A. Snødybden bestemmes ved at sensoren sender ut en ultrasonisk puls for deretter å måle tiden pulsen bruker på å returnere tilbake (Campbell Scientific, u.å.-c). Målingene viste noen store hopp. Disse vurderes som avvik som følge av kraftige vindkast som fører til at sensoren vibrerer, og videre forårsaker urealistiske svingninger i målingene. Disse store hoppene er justert ved å anvende lineær interpolasjon av data i forkant og etterkant av de store svingningene. Resultatene som presenteres vurderes likevel som representative ettersom avvikene var få og kun punktvis, sammenlignet med den totale datamengden.

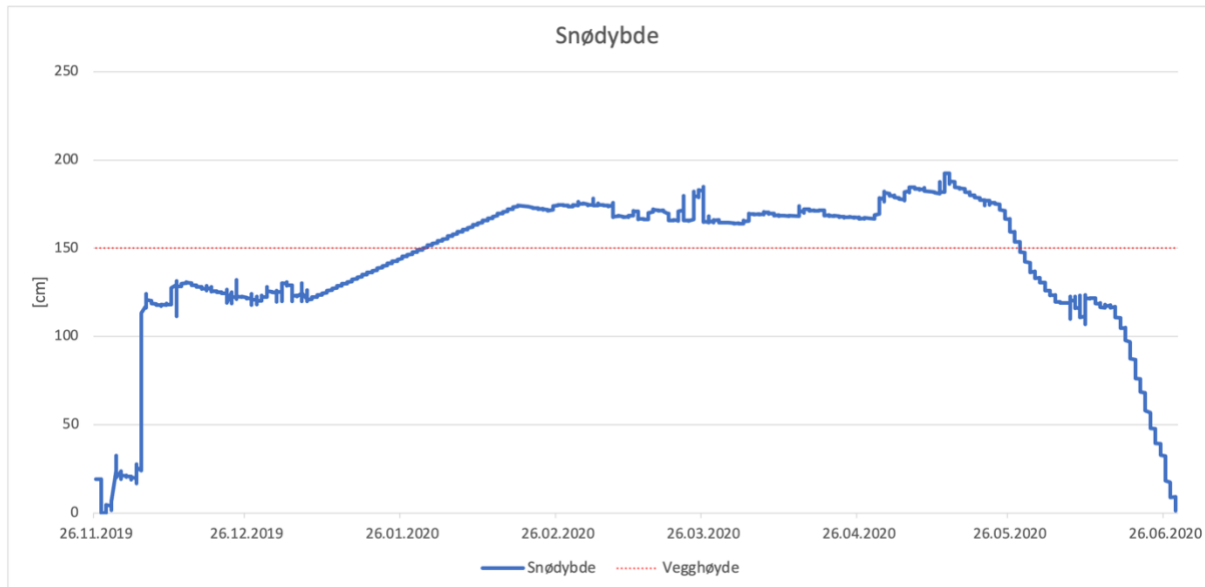
For lastmålingene fra lastcellene var det ingen store hopp, men under noen tidsperioder viste målingene ingen resultater. Resultatene i disse periodene er derfor korrigert ved å anta en lineær interpolasjon mellom nærmeste resultat i forkant og etterkant. Resultatene vurderes likevel som representative ettersom målingene uten resultater kun utgjør en liten del av den totale datamengden. I tillegg var disse målingene utenfor tidsperioden hvor snøtrykket var størst, og de er derfor mindre viktige ved sammenligning mot beregninger.

Nærmere sommeren smeltet mye av snøen foran forsøksveggen. Som følge av høyere temperaturer og soleksponering, førte opphetingen av veggen til at det oppsto en luftspalte mellom forsøksveggen og snødekket foran veggen. Derfor representerer ikke målingene fra lastcellene i denne perioden realistiske verdier av snøtrykket.

6.1.1 Resultater fra sesongen 2019/2020

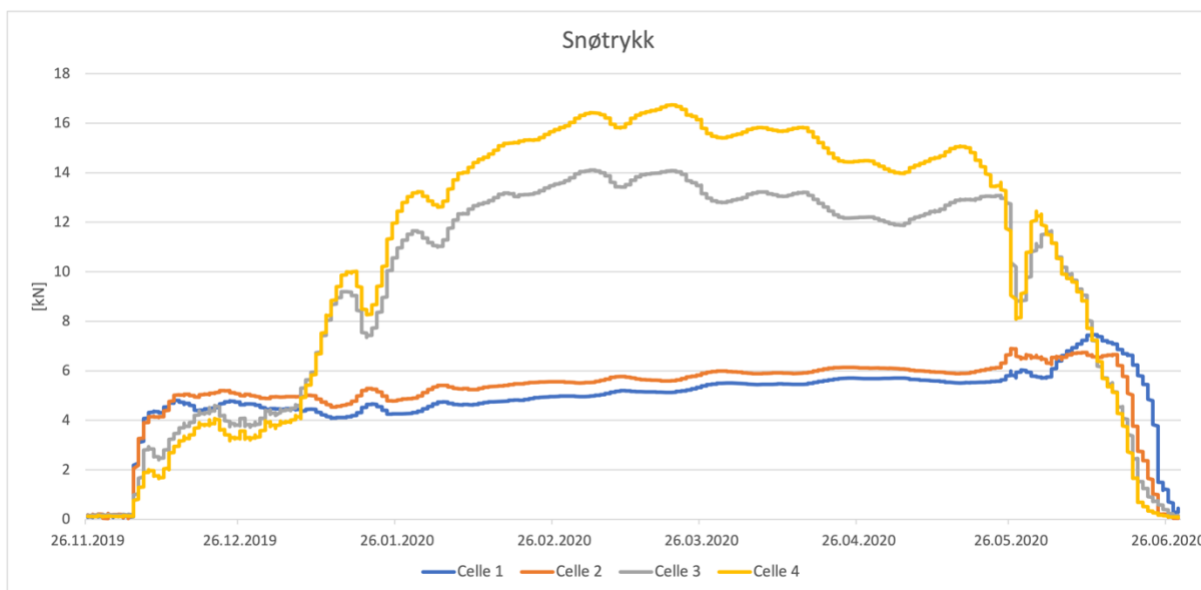
Snødybden for 2019/2020-sesongen er illustrert nedenfor i figur 79 sammen med høyden på forsøksveggen. Dataen for sesongen begynner 26.11.2019 hvor det ikke er noe snø foran veggen. Snødybden øker jevnt i starten av desember, og den ligger relativt stabilt på ca. 1.25 meter til midten av januar. Frem til slutten av februar var det derimot store hopp i resultatene. Som forklart innledningsvis er derfor dataen i denne perioden interpolert lineært. Snømengden ligger deretter ganske stabilt på rundt 1.75 meter frem til midten av mai, før den synker betydelig. Gjennom sesongen er det to bølgetopper, en i slutten av mars og en i midten av mai, med henholdsvis 1.85 og 1.92 meter snø.

Maksimal snødybde for 2019/2020-sesongen er derfor 1.92 meter snø 14. mai 2020. Varmere lufttemperaturer og smelting av snødekket gjør at snødybden minsker jevnt mot null i slutten av juni.



Figur 79: Snødybden for 2019/2020-sesongen. Hentet fra: vedlegg C.

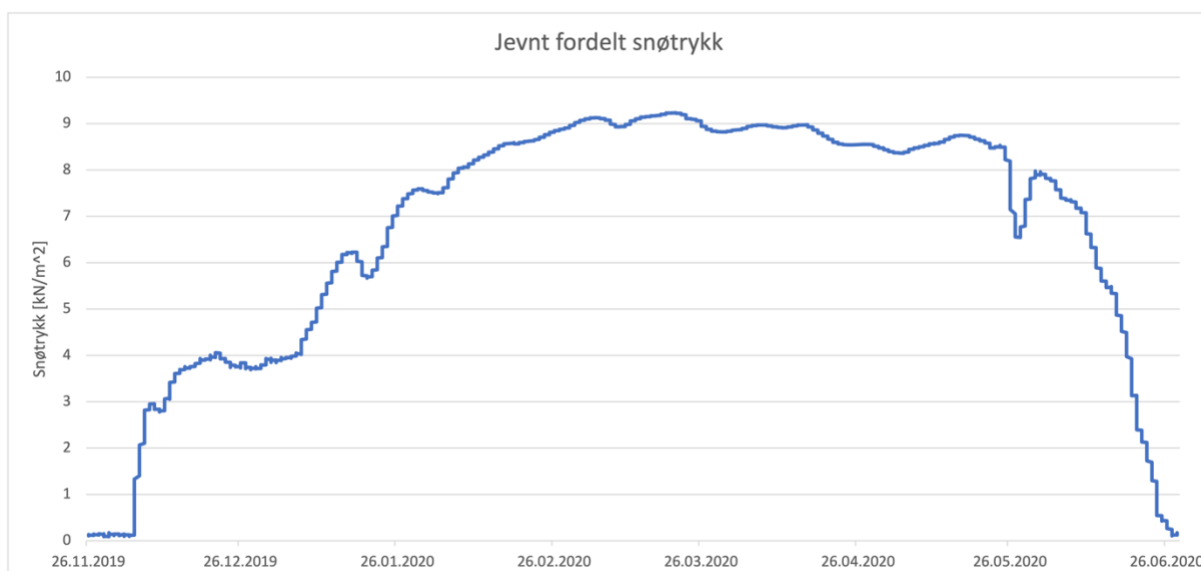
Figur 80 viser hvordan snøtrykket varierer for de fire lastcellene i hvert hjørne av forsøksveggen. I den første perioden uten snø viser lastcellene som forventet ingen last. Deretter øker de til ca. 2 kN og 4 kN for henholdsvis de øvre og nedre lastcellene når snødybden begynte å øke i starten av desember. Som vist i figur 69 er lastcelle 1 og 2 nederst, mens lastcelle 3 og 4 er øverst. Frem til nyåret er lastverdiene størst for de to nedre lastcellene, men etter dette øker lasten betraktelig på de to oppe. Verdiene stabiliserer seg i februar og holder seg mellom 14 og 16 kN med en maksverdi for lastcelle fire 20. mars på 16.7 kN. De to nedre lastcellene har betydelig lavere verdier og ligger stabilt mellom 4-6 kN frem til slutten av sesongen. Mot slutten av mai ses et kraftig fall i lastverdi på de to øvre lastcellene. Noe av årsaken kan skyldes at det oppstår en luftspalte mellom forsøksveggen og snødekket når veggen varmes opp, som nevnt innledningsvis. Nærmere sommeren er lastverdiene tilnærmet like for alle lastcellene og minsker gradvis når snøen smelter.



Figur 80: Snøtrykk på de fire lastcellene til forsøksveggen. Hentet fra: vedlegg C.

For å kunne sammenligne snøtrykket fra felteksperimentet med beregningene fra SVV og SLF, ble lastene fra de fire lastcellene summert og fordelt jevnt utover forsøksveggenes bæreflate. Antagelsen om at snøtrykket er jevnt fordelt er en forenkling av realiteten, men gjøres som nevnt for å kunne sammenligne målingene med beregningsmetodene.

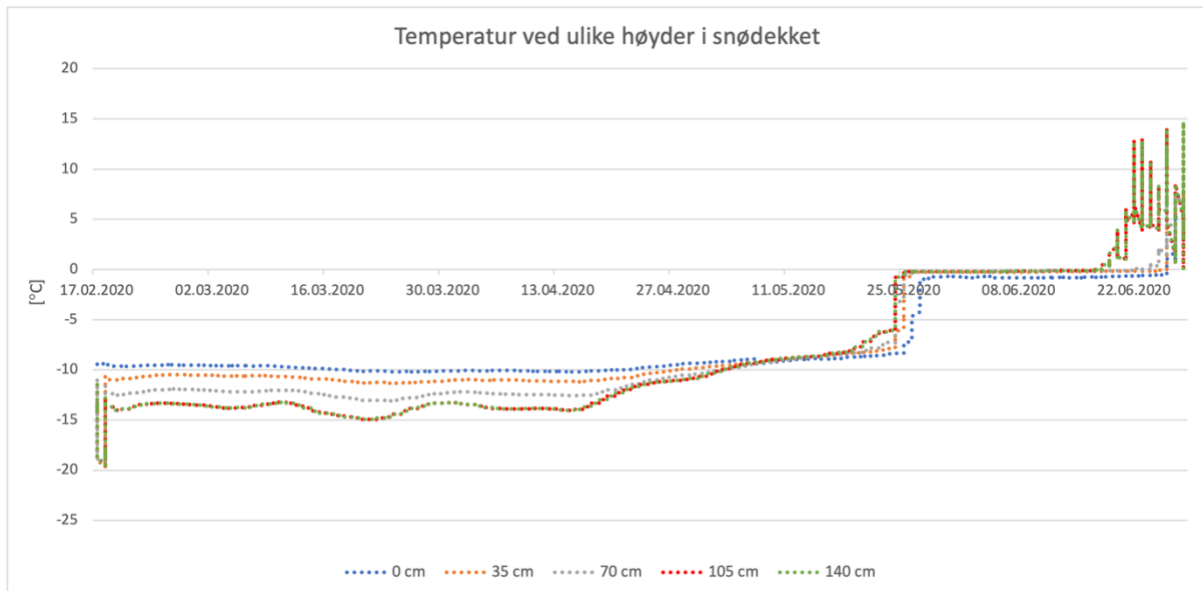
Snøtrykket er målt fra november 2019 til juni 2020, og figur 81 viser hvordan snøtrykket varierer gjennom sesongen. I november ligger snøtrykket på null som følge av at det ikke er noe snø, men snøtrykket øker betydelig i desember. Snøtrykket stiger deretter jevnt og får en maksimalverdi på 9.2 kN/m² 20.03.2020. Mot slutten av sesongen reduseres snøtrykket gradvis til null i slutten av juni.



Figur 81: Jevnt fordelt snøtrykk fra de fire lastcellene fordelt utover forsøksveggenes bæreflate. Hentet fra: vedlegg C.

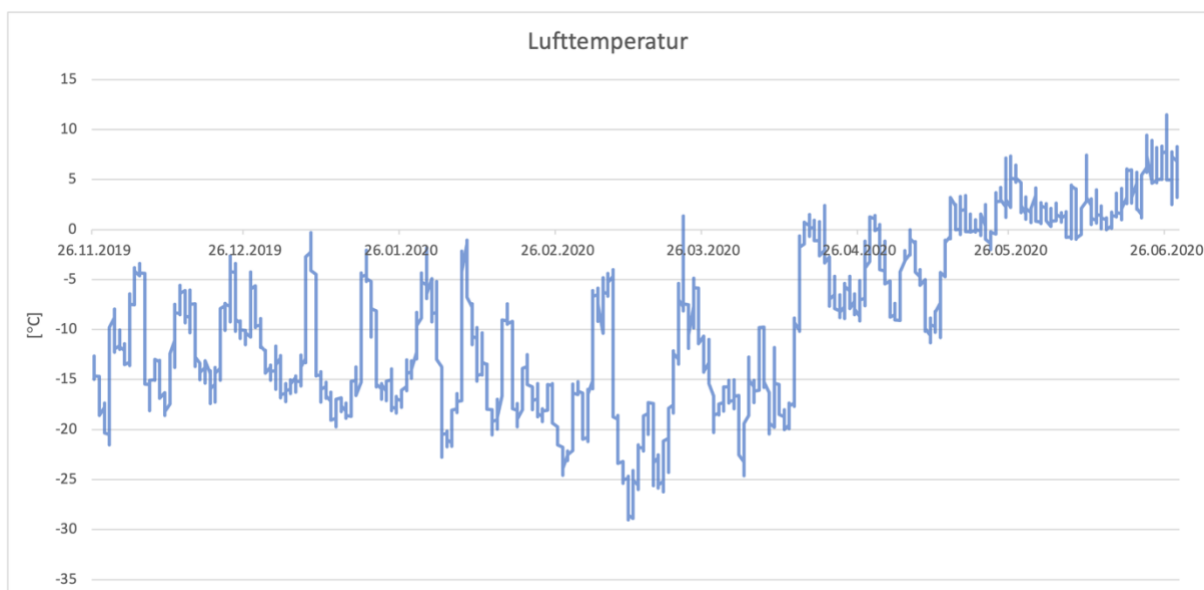
Figur 82 viser hvordan temperaturen varierer fra februar 2020 til slutten av juni 2020 ved ulike dybder i snødekket: 0 cm, 35 cm, 70 cm, 105 cm og 140 cm over bakken. Temperaturen ble målt med fem sensorer av typen Campbell Scientific 107 Temperature

Probe plassert som vist i kapittel 5.4.2. Fra februar og til slutten av april er temperaturen høyest i nedre deler av snødekket. Da ligger temperaturen på rundt -10 °C. Deretter begynner temperaturen å øke i hele snødekket, før det går over frysepunktet rundt 25. mai. Mot slutten av måleperioden viser resultatene store svinginger. Da måler sensorene som er plassert høyest temperaturer opp mot 15 °C. Som følge av snøsmelting i juni vil imidlertid de øvre målerne ligge over toppen av snødekket og derfor påvirkes direkte av lufttemperatur og soleksponering. Resultatene for de øvre målerne i denne tidsperioden er derfor ikke relevante.



Figur 82: Temperaturer ved ulike dybder i snødekket. Hentet fra: vedlegg C.

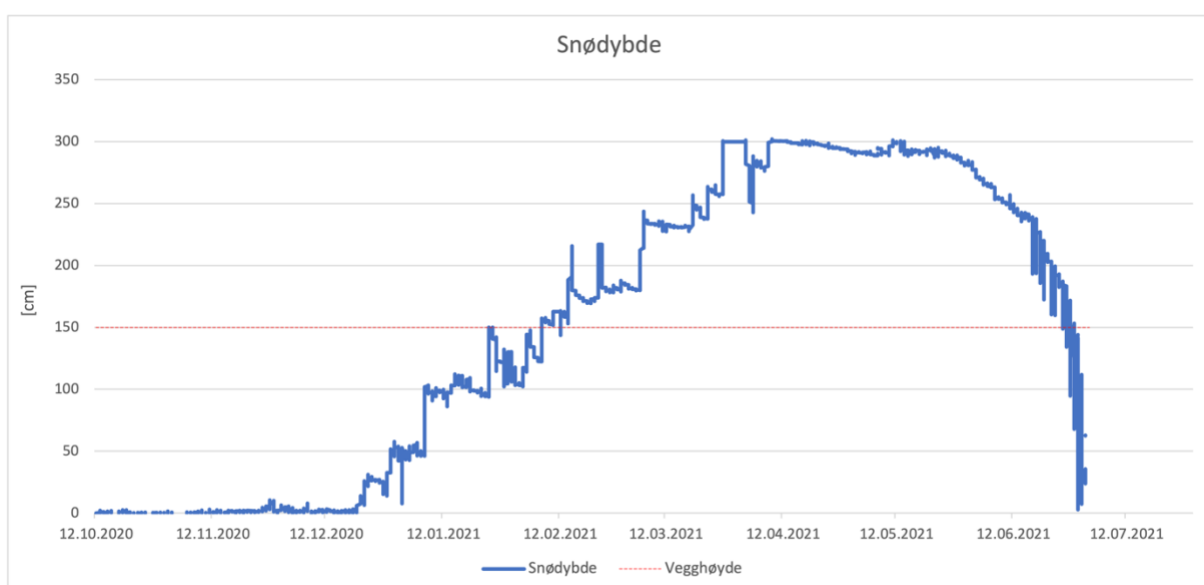
Lufttemperaturen ble målt ved forsøksveggen, og figur 83 viser hvordan temperaturen varierer fra slutten av november 2019 til starten av juli 2020. Målingene ble tatt med temperatur- og fuktighetsmåleren Vaisala HMP155A. På det kaldeste var det ned mot -30 °C, og på det varmeste ca. 12 °C, henholdsvis i starten av mars og slutten av juni. Ettersom sola gir varme på dagtid viser grafen store daglige fluktuasjoner i temperatur. Grafen viser imidlertid også store ukentlige variasjoner. For eksempel var det i midten av mars en kort periode med plussgrader kun en uke etter at temperaturen var nede i nesten -30 °C. Nærmere april og mai varierte temperaturen mellom 0 og -10 °C. Mot slutten av mai steg temperaturene over frysepunktet og holdt seg på plussiden ut sesongen.



Figur 83: Lufttemperaturen ved forsøksveggen fra november 2019 til juni 2020. Hentet fra: vedlegg C.

6.1.2 Resultater fra sesongen 2020/2021

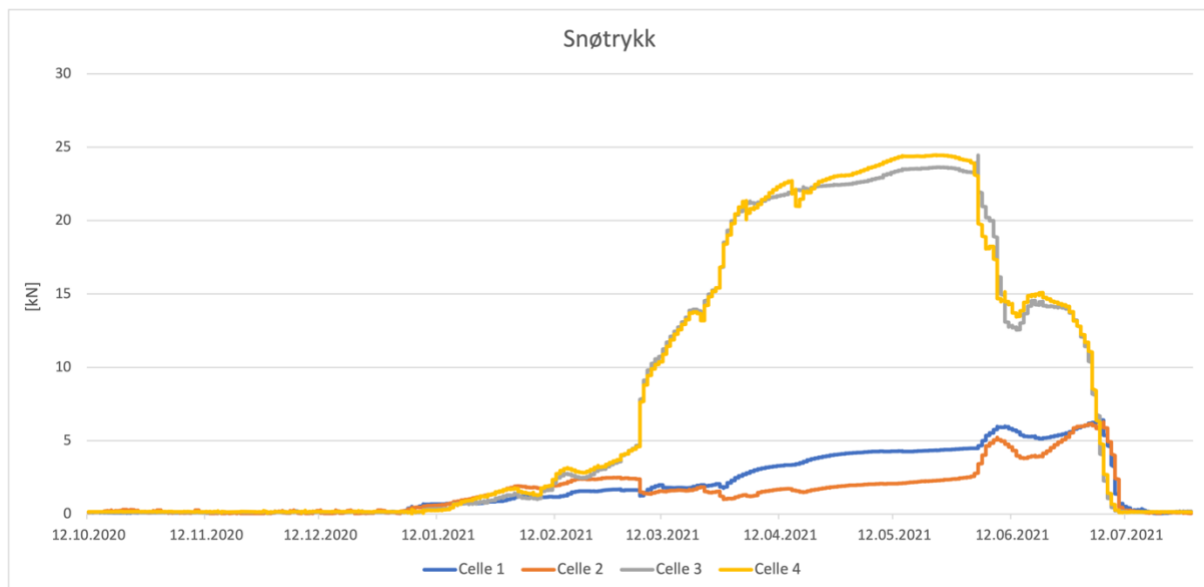
Snødybden for 2020/2021-sesongen er presentert i figur 84. Målingene har blitt registrert fra 12. oktober 2020 til og med 29. juli 2021. Figuren viser at det er lite snø frem til slutten av desember. Deretter øker snødybden gradvis til starten av april, hvor snødybden når sitt maksnivå på 302 cm den 9. april. Dette er dobbelt så høyt som forsøksveggen på 150 cm. Etter dette holder snødybden seg på et stabilt nivå frem til snøen begynner å smelte mot slutten av mai. Det fører til at snødybden synker raskt og går ned mot null i slutten av juni.



Figur 84: Snødybden for 2020/2021-sesongen. Hentet fra: vedlegg C.

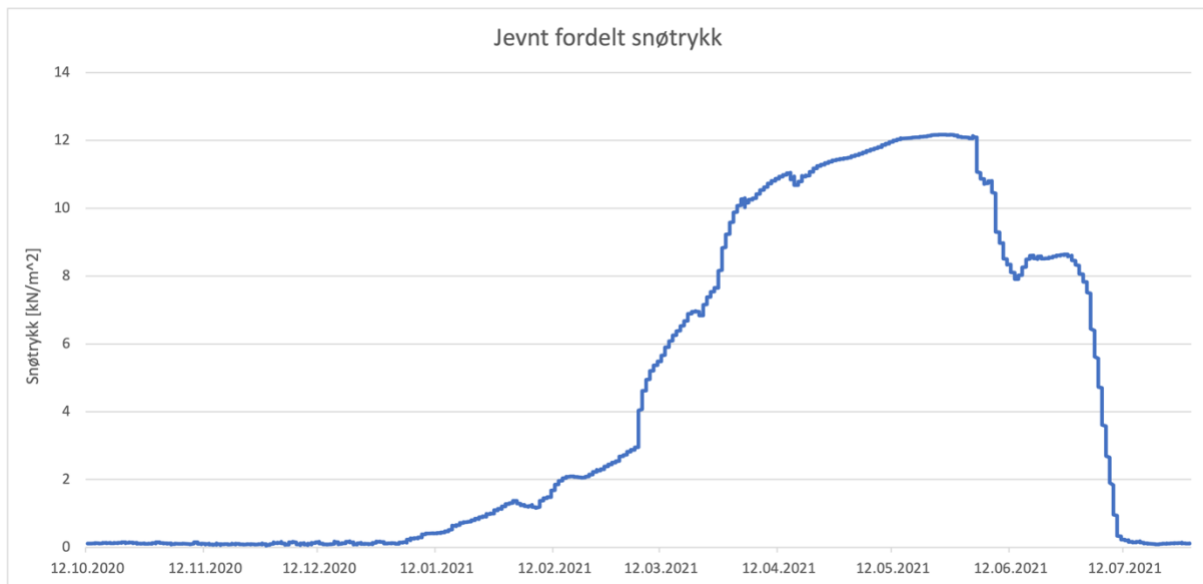
Det ble registrert lastmålinger fra oktober 2020 til juli 2021 for snøtrykket på de fire lastcellene. I starten av perioden viser figur 85 at det ikke er trykk på veggen, ettersom

det ikke har begynt å snø enda. Når lastmålingene begynner å øke i starten av januar er, snøtrykket noe større på de nedre lastcellene. I starten av mars øker snøtrykket derimot betydelig for de øvre lastcellene. Lastverdiene ligger deretter mellom 20-25 kN, før lastcelle fire når maksverdien på 24.5 kN 24. mai 2021. Lastverdiene for de nedre lastcellene er betydelig mindre, og ligger stabilt i underkant av 5 kN. I starten av juni viser resultatene en bølgetopp for de nedre lastcellene, og kort tid etter er det et tilsvarende dropp i snøtrykk for de øvre. Mot slutten av måleperioden går snøtrykket ned mot null for alle fire lastcellene når snøen smelter bort.



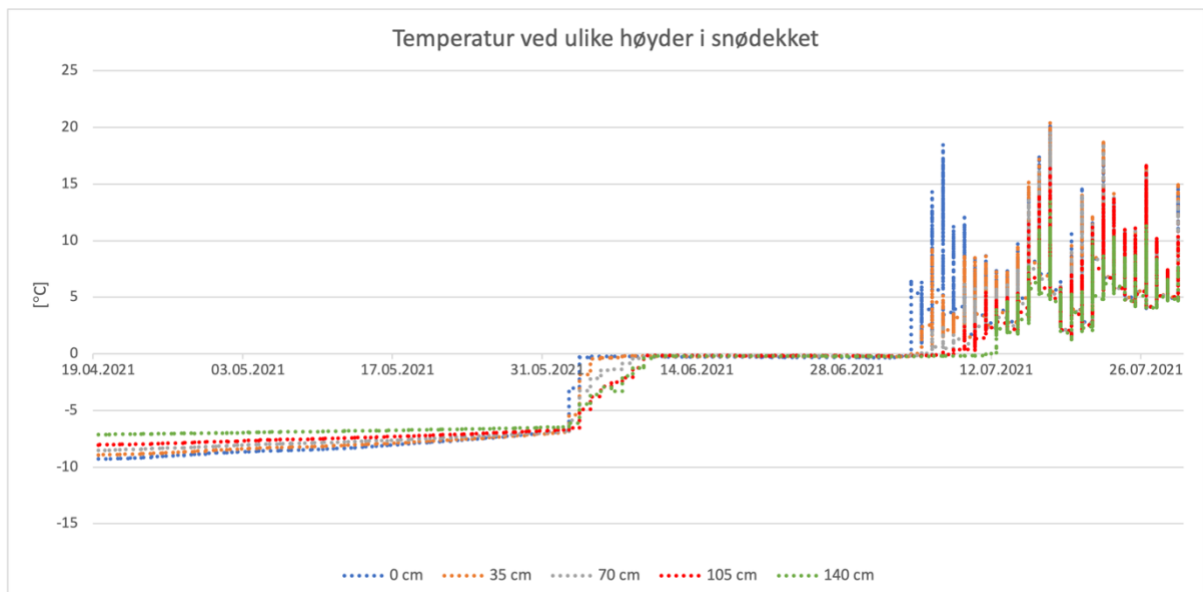
Figur 85: Snøtrykket på de fire lastcellene for 2020/2021-sesongen. Figuren er hentet fra: vedlegg C.

Lastmålingene fra de fire lastcellene er summert og fordelt utover bæreflaten til forsøksveggen som en jevnt fordelt belastning. Figur 86 viser at snøtrykket er rundt null frem til nyåret hvor snøtrykket stiger gradvis. I midten av mars er det en kraftig økning, og snøtrykket stiger jevnt til det oppnår en maksverdi 25.05.2021 på 12.2 kN/m². Deretter synker snøtrykket i juni og faller ned mot null.



Figur 86: Jevnt fordelt snøtrykk fra de fire lastcellene for 2020/2021-sesongen. Hentet fra: vedlegg C.

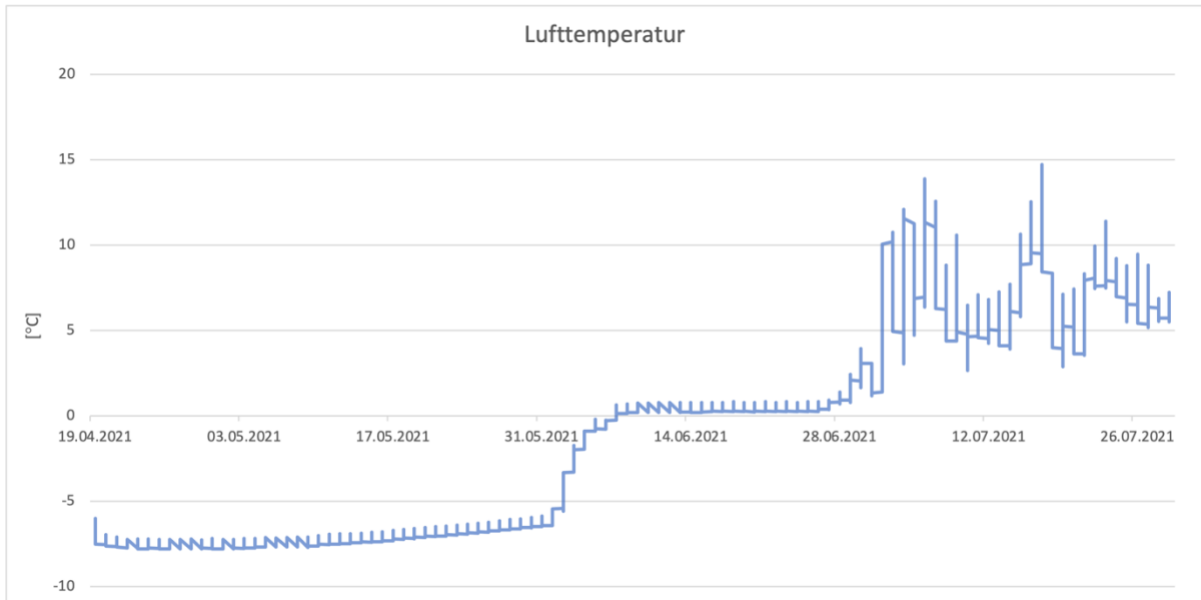
Figuren nedenfor viser temperaturen i snødekket ved fem ulike høyder i snødekket. Det ble gjort målinger fra april til og med juli 2021. Figuren viser at det er varmere lenger opp i snødekket, og kaldere mot bunnen. I starten av juni endrer imidlertid mønsteret seg, og snødekket blir varmest nederst. Temperaturene stiger opp mot frysepunktet, og snødekket blir isotermt 10. juni. Det holder seg isotermt og smelter resten av sesongen. Når sensorene ikke lenger er tildekket med snø, blir de direkte påvirket av solvarming og lufttemperaturen. Det vises i figuren ved at grafene begynner å hoppe over null grader, og noen helt opp til 20 °C. Dataen etter dette anses som irrelevante.



Figur 87: Temperaturer ved ulike dybder i snødekket. Hentet fra: vedlegg D.

Lufttemperaturen fra midten av april til august er presentert i figuren nedenfor. Grunnet problemer med den opprinnelige temperaturmåleren ble det byttet til loggeenhets temperaturmåler. Sistnevnte kan være en feilkilde, men resultatene er likevel tilstrekkelig nøyaktige for formålet til oppgaven. Loggeproblemene er også grunnen til at

det ikke finnes noen målinger før april for 2020/2021-sesongen. Figuren viser daglige flukturasjoner i temperatur, noe som er forventet ettersom temperaturen øker på dagtid og synker nattetid. Temperaturen holder seg stabilt under fem minusgrader frem til starten av juni, hvor den går over frysepunktet. Lufttemperaturen er deretter rett i overkant av null grader frem til begynnelsen av juli, hvor den øker drastisk, og ligger mellom 3 og 15 °C i siste del av måleperioden.



Figur 88: Lufttemperaturen ved forsøksveggen fra april 2021 til august 2021. Hentet fra: vedlegg D.

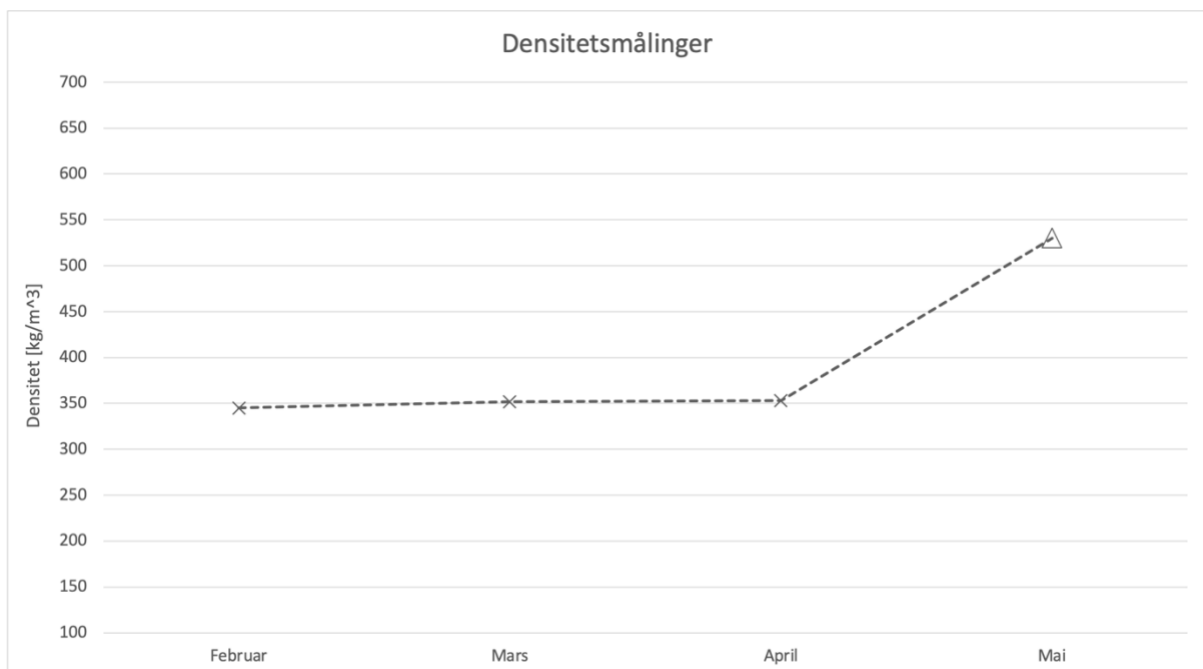
Gjennom vårsemesteret observerte gruppen hvordan snøtrykket varierte for sesongen 2021/2022. Snøtrykket viste en lignende utvikling som 2020/2021-sesongen med et jevnt økende trykk nærmere sommeren når temperaturene steg. En tydelig økning i lastverdiene ble registrert i siste halvdel av mars. Det var ingen betydelig økning i snødybde, men det ble derimot satt varmerecord på Svalbard for marsmåned med 5.5 °C (NRK, 2022). Varmerekorden, kombinert med nedbørsmengder opp mot 43 mm regn i døgnet, var hovedårsakene til den store økningen i snøtrykk. Mot midten av mai viser målingene et jevnt fordelt snøtrykk på 9.3 kN/m² sammenlignet med 9.2 og 12.2 kN/m² de to foregående sesongene. Ettersom oppgaven leveres tidlig i juni vil ikke målingene representere en full sesong. Dataen fra sesongen 2021/2022 presenteres derfor ikke her, men legges ved i vedlegg B.

6.2 Resultater fra beregninger

I dette kapittelet presenteres beregninger i henhold til beregningsanvisninger fra SLF og Statens vegvesen. Før resultatet fra beregningene presenteres, gjennomgås begrunnelsene for valg av ulike parametere i beregningsgrunnlaget.

6.2.1 Grunnlag for beregninger

Vegvesenet anbefaler en densitet på 500 kg/m^3 for Fastlands-Norge ved dimensjonering av rassikringskonstruksjoner, og dette samsvarer bra med målingene fra Island (Johannesson & Margreth, 1999). SLF anbefaler å ta utgangspunkt i en densitet på 270 kg/m^3 , med økende densitet desto høyere over havet en befinner seg, ved bruk av en høydefaktor som vist på figur 42. I tillegg til densitetsmålingene gjennom vinteren/våren 2022 ble det utført en densitetsmåling i området rundt forsøksveggen av Aleksey Shestov ved UNIS i juli 2021, og av Kjersti Buraas Snøen i mai 2019. Shestovs målinger viste en gjennomsnittsdensitet på 560 kg/m^3 (se vedlegg G), mens Snøens målinger viste en densitet på 530 kg/m^3 (Snøen, 2019). Med dette grunnlaget ble det valgt en densitet på 500 kg/m^3 i beregningene til SLF og SVV, uavhengig av høyde over havet.



Figur 89: Densitetsmålinger fra februar til og med mai. Merk at densiteten i mai er hentet fra Snøen sine målinger fra 2019 på grunn av mangelen på data. Data fra 2022 er markert med kryss, og målingen fra 2019 er markert med trekant. Figuren er hentet fra: Vedlegg F.

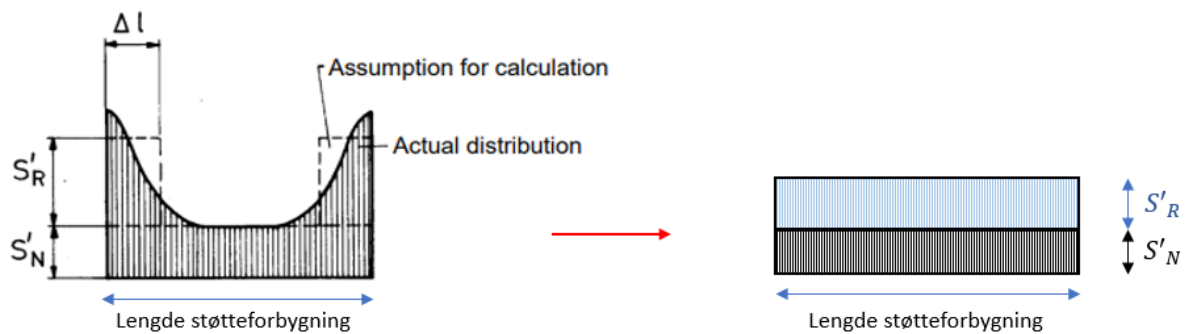
Glidefaktoren settes til 1.2 etter figur 44 i kapittel 3.2.1. Forsøksveggen er plassert i en nordvendt skråning og underlaget hvor forsøksveggen er plassert består av steiner i ulike størrelser. Helningen er kontrollmålt av gruppen til å være 21 grader. Sigefaktoren, K , avhenger av helningen i terrenget, og bestemmes etter figur 43.

Snødybden som anvendes i beregningene er valgt ut ifra maksimalt målt snødybde fra målingene for begge sesongene. Et alternativ hadde vært å anvende snødybdene som ble målt samme dato som maksimalt snøtrykk ble målt, men i SLF og Vegvesenet står det at det skal anvendes maksimal snødybde målt i området over en periode på flere år. Som

nevnt i kapittel 6.1 viser målingene at maksimal snødybde er 192 cm for 2019/2020-sesongen, og 302 cm for 2020/2021-sesongen.

6.2.2 Beregninger

Det er kun montert lastceller i hjørnene på forsøksveggen, og ikke på midten hvor endeeffektene er neglisjerbare. Derfor blir det vanskelig å bestemme hvor stor betydning endeeffektene har for snøtrykket. For å sammenligne med beregninger smøres derfor endeeffektene utover veggens bæreflate slik at den totale lasten blir en jevnt fordelt last, som vist på figur 90.



Figur 90: Forenkling av lastfordelingen til endeeffektene. Figur: (Margreth, 2007). Redigert av: Vetle Basma.

Beregningene er utført i henhold til ligningene beskrevet i kapittel 3, og er vedlagt i vedlegg A. Resultatene presenteres nedenfor i tabell 4 og 5.

| Snøtrykk for 2019/2020 [kN/m ²] | | |
|---|-------------------|------------------|
| Feltekspériment | 9.2 | |
| | Uten endeeffekter | Med endeeffekter |
| SLF | 3.8 | 7.0 |
| Statens vegvesen | 7.3 | 13.4 |

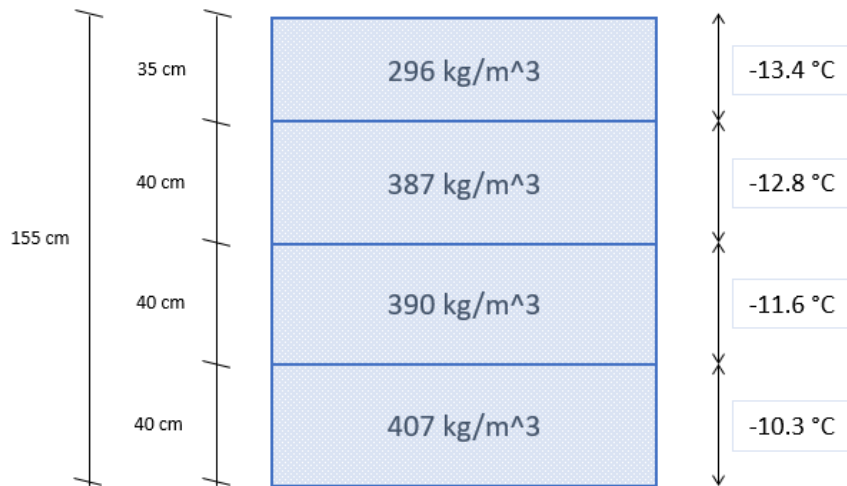
Tabell 4: Snøtrykk for 2019/2020-sesongen med en densitet på 500 kg/m³. Lastverdiene er hentet fra: vedlegg A.

| Snøtrykk for 2020/2021 [kN/m ²] | | |
|---|-------------------|------------------|
| Feltekspériment | 12.2 | |
| | Uten endeeffekter | Med endeeffekter |
| SLF | 6.0 | 11.0 |
| Statens vegvesen | 11.5 | 21.1 |

Tabell 5: Snøtrykk for 2019/2020-sesongen med en densitet på 500 kg/m³. Lastverdiene er hentet fra: vedlegg A.

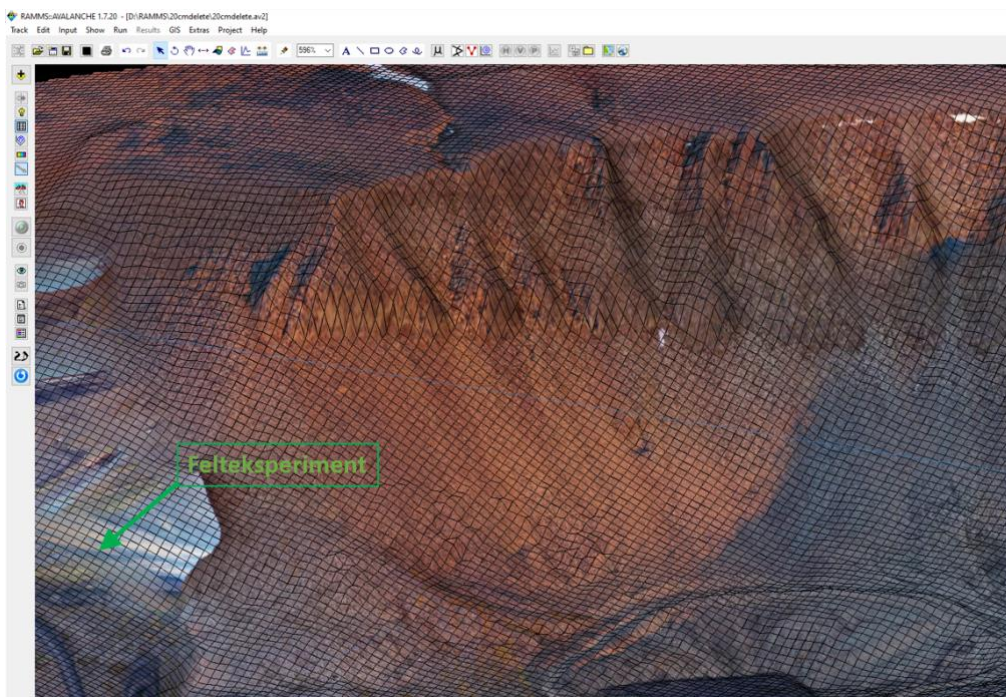
6.3 Resultater fra 3D Snowpack Simulation Tool

I dette kapittelet presenteres de ulike inputverdiene i modellen samt resultater fra simuleringen. Inputverdiene er valgt med utgangspunkt i egne målinger 04.03.2022 i området ved forsøksveggen, som vist i figur 72. Snøens temperatur og densitet påvirker snøtrykket i stor grad, og snødekkets temperatur- og densitetsprofil som ble benyttet i simuleringen, er vist i figur 91. På grunn av begrensninger i programvaren ble snødekket redusert til fire lag. Total høyde på snødekket er som vist 155 cm.



Figur 91: Densitet- og temperaturprofil. Målingene ble utført 04.03.2022 ved forsøksveggen på Svalbard. Figur: Vetle Basma.

Simuleringene ble utført som diskutert i kapittel 4 med en DTM-fil. Drone ble anvendt for å skanne terrenget med laser, og filen ble konvertert via programmene RiSCAN og ArcGIS til DTM. Inndeling av mesh i DTM-filen er som vist nedenfor, og størrelsen på hver rute i meshet er 0.8x0.8 m.

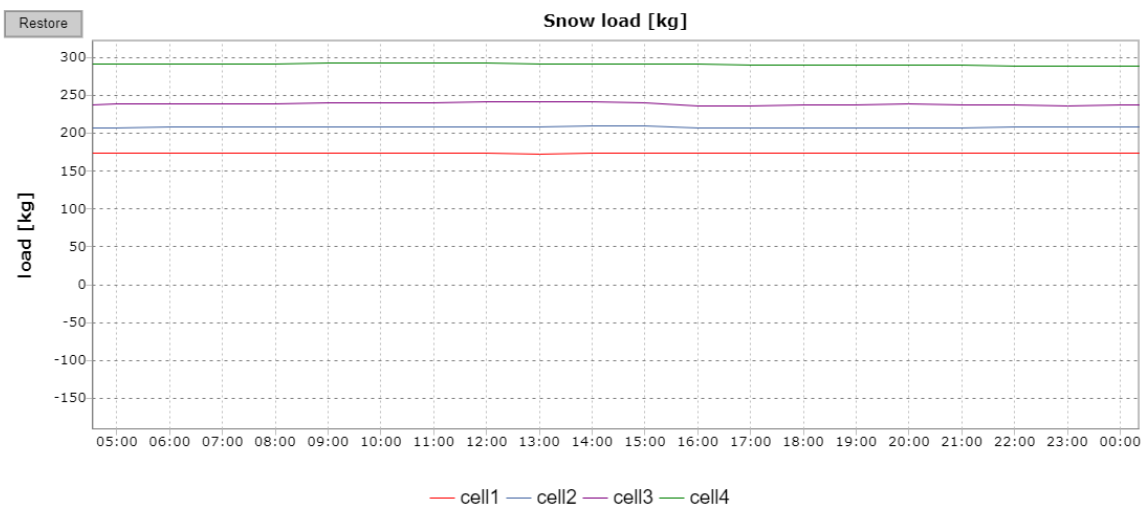


Figur 92: DTM-fil av området rundt forsøksveggen. Utlipp: Aleksey Shestov. Redigert av: Vetle Basma.

Snødekket blir deretter delt inn i et mesh i programmet, som forklart i kapittel 4. Størrelsen på modellen er 40x40 meter med elementstørrelse på 0.8 meter, tilsvarende som for DTM-filen. Det gir et mesh med totalt 25 000 elementer fordelt over to lag i snødekkets høyde. De svake elementene i kapittel 4.3.2.3, som kan brukes til å simulere glidning av snødekket, blir ikke anvendt i modellen ettersom gruppen ønsker å simulere snøtrykket uten påvirkning fra glidning. Dette gjøres for å etterligne forholdene fra felteksperimentet på en best mulig måte.

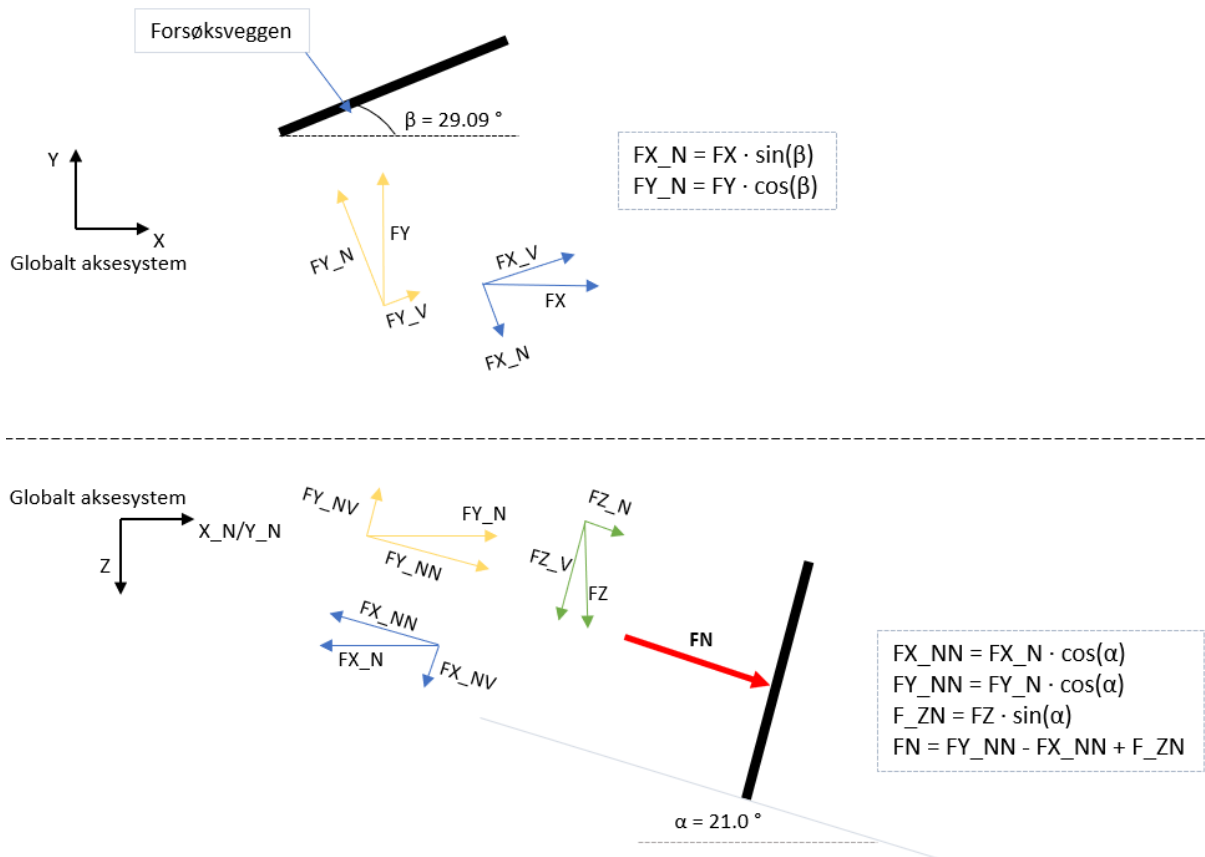
I figuren under vises målingene fra felteksperimentet 04.03.2022. Figuren viser snøtrykket på de fire lastcellene, og det jevnt fordelte snøtrykket beregnes til 2.02 kN/m²:

$$S = \frac{\sum S_i}{A_{vegg}} = \frac{1.7 \text{ kN} + 2.1 \text{ kN} + 2.4 \text{ kN} + 2.9 \text{ kN}}{4.5 \text{ m}^2} = 2.02 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right] \quad (61)$$



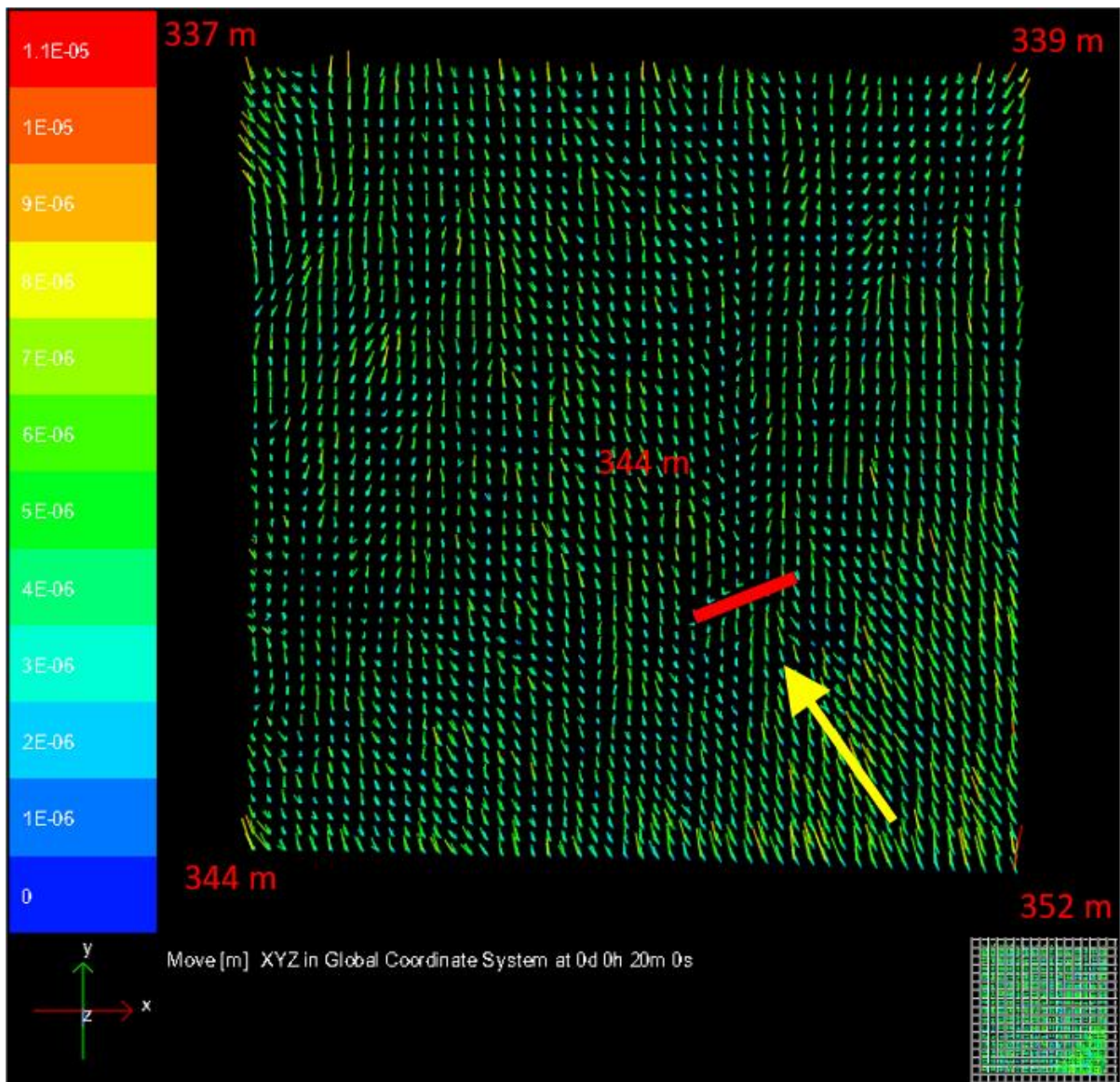
Figur 93: Snøtrykket på de fire lastcellene på forsøksveggen. Grafen viser ca. 1.75, 2.05, 2.4 og 2.9 kN for henholdsvis lastcelle 1, 2, 3 og 4. Figuren er hentet fra: (UNIS, 2021).

Det er ikke gjort noen endringer i 3D-programvaren siden 2006, og output fra simuleringen besto av CSV-filer (Character Separated Values) med elementkrefter/deformasjoner og koordinater, se vedlegg H og I. Kraftene i programvaren var gitt i henhold til globalt aksesystem. For å kunne sammenligne lastverdiene fra simuleringen med målingene fra felteksperimentet måtte derfor kreftene først dekomponeres til en resultant, F_N , som virket normalt på forsøksveggen, se figur 94.



Figur 94: Dekomponering av lastkomponenter ut ifra global X-, Y- og Z-retning for å finne normalkraften på forsøksveggen. Figur: Vetle Basma.

Figur 95 viser deformasjonene i snødekket i meter, og orienteringen av forsøksveggen i terrenget. Deformasjonene som presenteres er en resultantvektor, og retningen/resultantdeformasjonen varierer ut ifra delkomponentene i global X-, Y- og Z-retning. Z-koordinatene på midten og i hjørnene av snødekket er plottet i figuren for å vise hvordan snøen trykker mot veggflaten. Maksverdi for deformasjonene er 0.011 mm i nedre høyre hjørne. Vedlegg I viser en total oversikt over deformasjonene i snødekket.

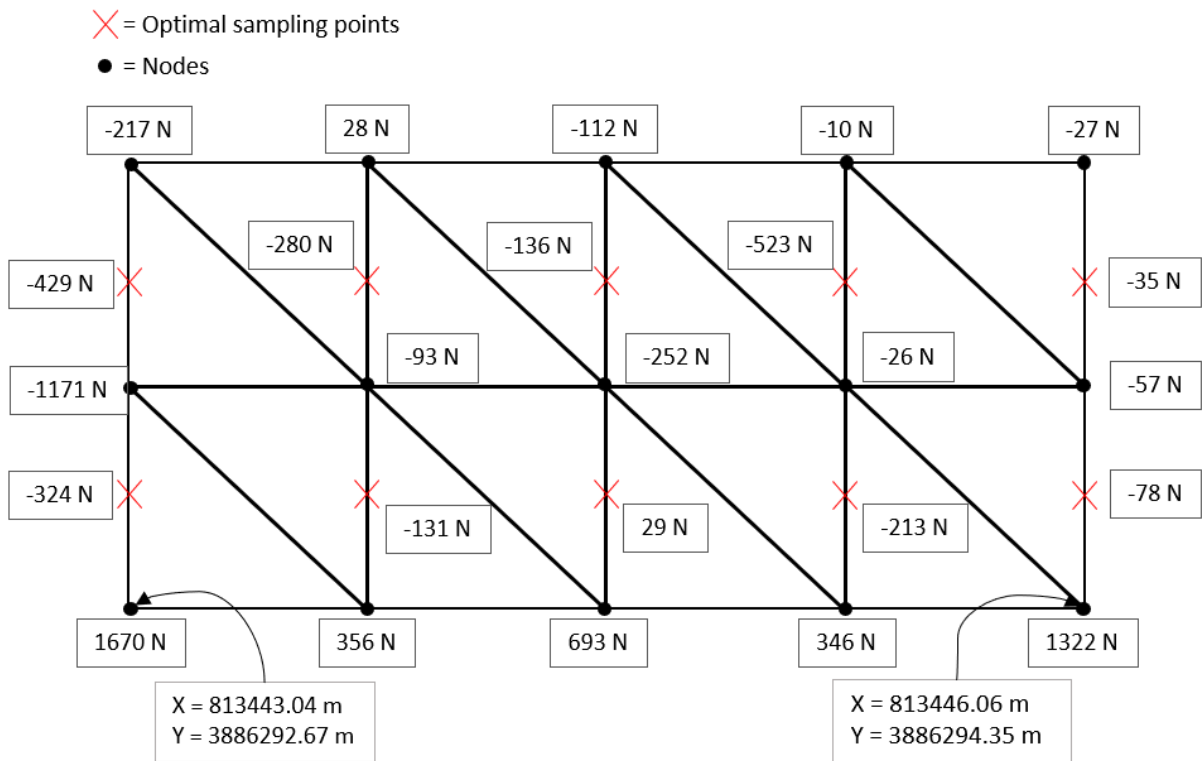


Figur 95: Figuren viser deformasjoner i snødekket i meter. Modelldomenet er 40x40 m. Høydekoordinatene etter det sveitsiske koordinatsystemet er vist i hjørnene og på midten av modellen for å visualisere hvordan forsøksveggen er orientert i terrenget (swisstopo, u.å.). Utklipp: Olga Gorynina. Redigert av: Vetle Basma.

Det var kun elementene som var i kontakt med forsøksveggen som registrerte lastverdier. For alle andre elementer viste resultatene null i lastverdi, se vedlegg H. Punktene med lastverdier ble filtrert ut og fordelt etter globale X-, Y- og Z-koordinater, se vedlegg I. Punktene samsvarer ikke nødvendigvis eksakt med koordinatene til forsøksveggen. Nedre venstre node i figur 96 er derfor trolig noe forskjøvet sammenlignet med venstre hjørne på forsøksveggen. For å få en bedre oversikt over lastfordelingen langs forsøksveggen, burde en simulering med et finere mesh av snødekket vært utført. Det var derimot ikke mulig å forfine meshet i programvaren med brukergrensesnittet som er tilgjengelig per dags dato.

Det er knyttet usikkerhet til hvordan kreftene fordeles over elementene i programvaren, men en anbefalt løsning er å hente ut spenningene i «optimale punkter». De optimale punktene vil være de samme punktene på elementet som tilsvarer Gauss interpolasjon med redusert integrasjon (Mathisen, 2021a). For tetraederelementene i programvaren vil dette tilsvare ett punkt per element, plassert i sentrum av elementet. Figur 96 viser de

optimale punktene hvor kreftene beregnes før de ekstrapoleres videre til nodene. De optimale punktene er som vist ikke plassert i sentrum av elementene, og det er derfor usikkert hvilke punkter som blir brukt til å beregne kreftene. I nodene beregnes en gjennomsnittsverdi fra alle elementene som er tilkoblet den aktuelle noden.



Figur 96: Oversikt over interpolasjonspunktene og nodene i meshet som er i kontakt med forsøksveggen. Figur: Vetle Basma.

For å sammenligne elementkreftene, F_N^i , med snøtrykket fra felteksperimentet må lastene summeres og fordeles over arealet til forsøksveggen:

$$F_N = \frac{\sum F_N^i}{A_{vegg}} = \frac{0.6 \text{ kN}}{4.5 \text{ m}^2} = 0.13 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right] \quad (62)$$

7 Diskusjon

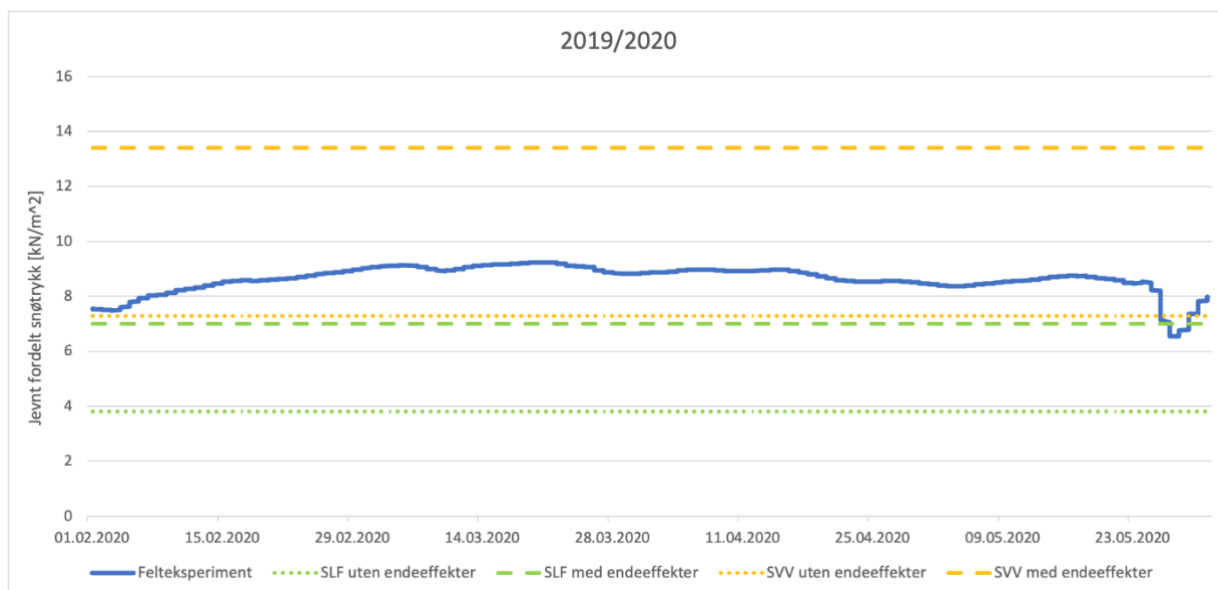
I dette kapitlet diskuteres resultatene som ble presentert i kapittel 6. Hensikten er å trekke frem forskjeller og likheter i resultatene, og begrunne det med teori og resultater fra felteksperimenter. Videre diskuteres hvordan lokale forholdene på Svalbard påvirker snøtrykket og skiller seg fra Fastlands-Norge og Alpelandene. Sammenhenger mellom snøtrykk og temperatur, samt andre faktorer, blir også trukket fram sammen med fenomener som endeeffekter og glidning.

7.1 Sammenligning av målinger og beregninger

Her sammenlignes snøtrykket fra målingene på Svalbard med beregninger fra SLF og Statens vegvesen. Hensikten er å vurdere om beregningsmetodene som er presentert hos SLF og Vegvesenet er anvendelige for de lokale forholdene på Svalbard.

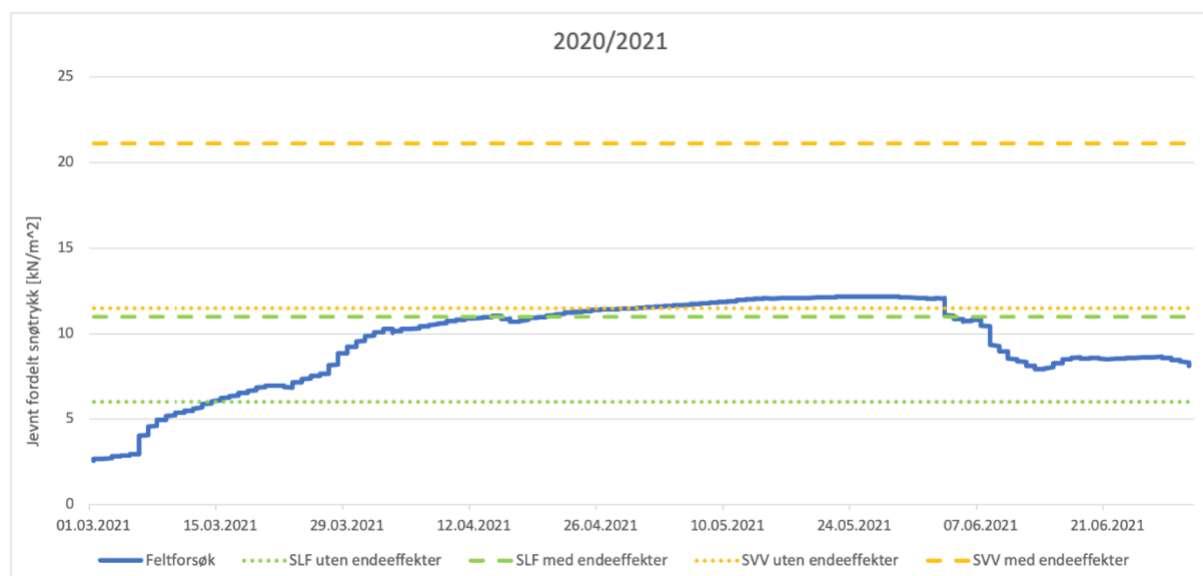
Resultatene fra målinger og beregninger er presentert i kapittel 6. Figurene nedenfor viser hvordan snøtrykket fra felteksperimentet varierer i perioden hvor snøtrykket var på sitt største. Snøtrykket fra målingene er plottet sammen med beregnet snøtrykk fra SLF og SVV i henhold til kapittel 3, både med og uten endeeffekter. Valg av parametere i beregningene hos SLF og SVV er begrunnet i kapittel 6.

Figur 97 viser at beregningene fra SLF og SVV varierer i presisjon sammenlignet med målingene fra 2019/2020, avhengig av om endeeffekter er inkludert eller ikke. Snøtrykket beregnet med anvisningene fra SLF og SVV er henholdsvis 59 og 21 % mindre enn maksimalt snøtrykk fra 2019/2020-sesongen, når endeeffekter er ekskludert. Beregningene inkludert endeeffekter viser seg å være i overkant konservative for beregningene fra SVV med 46 % større lastverdi. Beregningene fra SLF er derimot fortsatt ikke-konservative, og undervurderer snøtrykket med 24 %. Betydningen av endeeffekter er stor, og i kapittel 7.4 diskuteres det nærmere hvorvidt de lokale forholdene på Svalbard påvirker størrelsen på endeeffektene.



Figur 97: Snøtrykk fra felteksperimentet 2019/2020-sesongen sammenlignet med beregningene til SLF og Statens vegvesen, både med og uten endeeffekter. Hentet fra: vedlegg C.

For 2020/2021-sesongen er det større differanse i resultatene fra beregningene til Vegvesenet når endeeffekter er inkludert. Sammenlignet med målingene er beregningene konservative, og avviket er på 73 %. Beregningene fra SLF er mer presise, men fortsatt ikke-konservative, og underestimerer snøtrykket med 10 %. For beregningene ekskludert endeeffekter er avviket betydelig mindre for SVV med 6 %. SLF underestimerer snøtrykket med hele 51 %.



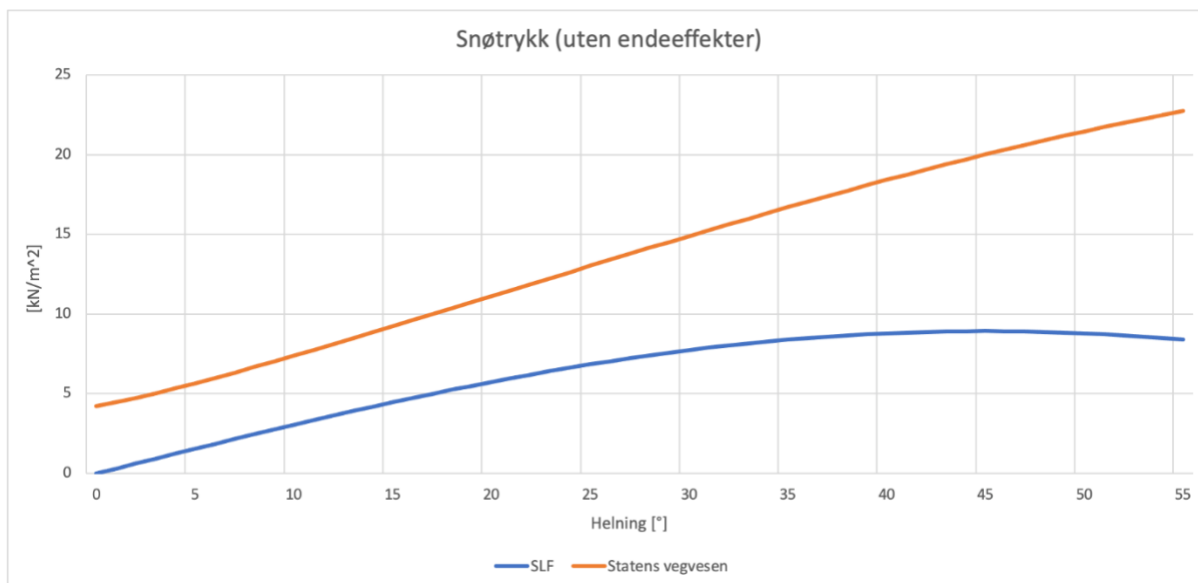
Figur 98: Snøtrykk fra felteksperimentet 2020/2021-sesongen sammenlignet med beregningene til SLF og Statens vegvesen, både med og uten endeeffekter. Hentet fra: vedlegg C.

For begge sesongene er avviket for beregningene med endeeffekter betydelig større for SVV, sammenlignet med beregningene uten endeeffekter. I gjennomsnitt er feilmarginen på 60 og 14 %, henholdsvis med og uten endeeffekter. Selv om resultatene fra SVV uten endeeffekter er mest presise, bør det tas med i betraktning at resultatene er ikke-

konservative for begge sesongene. For tilsvarende beregninger fra SLF er feilmarginen på ca. 17 og 55 %, henholdsvis med og uten endeeffekter. Både beregningene med og uten endeeffekter fra SLF underestimerer størrelsen på snøtrykket sammenlignet med målingene fra Svalbard.

En ulikhet i beregningsanvisningene til SLF og SVV er hvordan variasjonen av helning tas med i beregningene av snøtrykk. Som sett i ligning 9 varierer snøtrykket som funksjon av snøsigfaktoren, K , hos SLF. Snøsigfaktoren beregnes i henhold til figur 43, og varierer som funksjon av $\sin(2 \cdot \psi)$. Den har derfor maksverdi ved en helning på 45 grader. Selv om snøtrykket teoretisk sett dermed vil minke ved brattere terreng enn 45 grader, som er urealistisk, er det lite sannsynlig at det vil samle seg store mengder snø i så bratt terreng. Snøsigfaktoren varierer også med densitet som vist i figur 43, og øker ved høyere densitet.

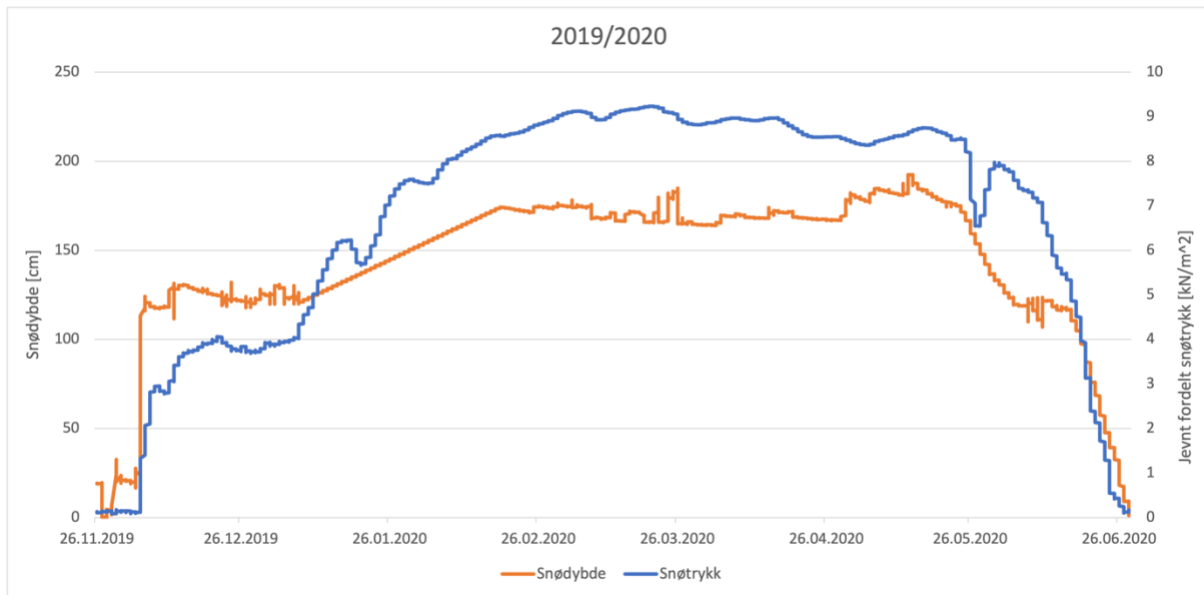
Hos SVV varierer snøtrykket med helningen som en funksjon av både sinus og cosinus, som vist i ligning 21. Det fører til at snøtrykket har en minsteverdi, selv for en helning lik null grader. Figur 99 viser hvordan snøtrykket varierer med helningen for SVV og SLF. Uavhengig av snødybde og densitet vil beregningene hos SVV være konservative sammenlignet med SLF. Dette gjelder for de lokale terrengforholdene som råder på Svalbard med en glidefaktor, N , på 1.2 etter figur 44. For svært gode glideforhold (gress), kan SLF sine beregningsanvisninger være mer konservative.



Figur 99: Snøtrykkberegninger uten endeeffekter fra SLF og SVV med varierende helning. Beregningene er utført med samme parametere som resultatene i kapittel 6. Hentet fra: vedlegg A.

7.2 Faktorer som påvirker snøtrykket

Det maksimale snøtrykket i løpet av en sesong er av høyest interesse fordi det gir grunnlag for hvilken last rassikringskonstruksjonene må dimensjoneres for. Blant faktorene som påvirker snøtrykket, er snødybden av stor betydning. Snøtrykket påvirkes også av snøens densitet, temperatur og fuktighetsnivå i tillegg til de lokale terrengforholdene. Resultatene viser at maksimalt snøtrykk nødvendigvis ikke opptrer samtidig som maksimal snødybde, se figur 100 og 101.



Figur 100: Snødybde og jevnt fordelt snøtrykk på forsøksveggen for 2019/2020-sesongen. Hentet fra: vedlegg J.

For 2019/2020-sesongen var snødybden størst 14. mai med 192 cm. Snøtrykket på samme tidspunkt var relativt høyt, men maksimalt snøtrykk på forsøksveggen ble målt et par måneder tidligere, 20. mars. Til sammenligning var snødybden 166 cm den 20. mars, altså 14 % mindre enn maksimal snødybde målt senere i sesongen.

Som nevnt i kapittel 2.2.2 forventes snøsiget å være størst når hele snødekket er isotermt ved 0 °C. Når temperaturen nærmer seg frysepunktet smelter isbroene mellom snøkrystallene, og snøen får en lavere fasthet. Densiteten vil også øke som følge av temperaturøkningen når snøen blir våtere. Med utgangspunkt i resultatene presentert i figur 82, som viser temperaturfordelingen i snødekket, kunne man derfor forventet større snøtrykk mot slutten av mai. Det er fordi snødekket ble isotermt samtidig som snødybden opprettholdt seg på rundt 150 cm, sammenlignet med snøtrykket i mars da temperaturene var langt under frysepunktet. Resultatene fra denne perioden viser derimot et signifikant dropp i målt snøtrykk.

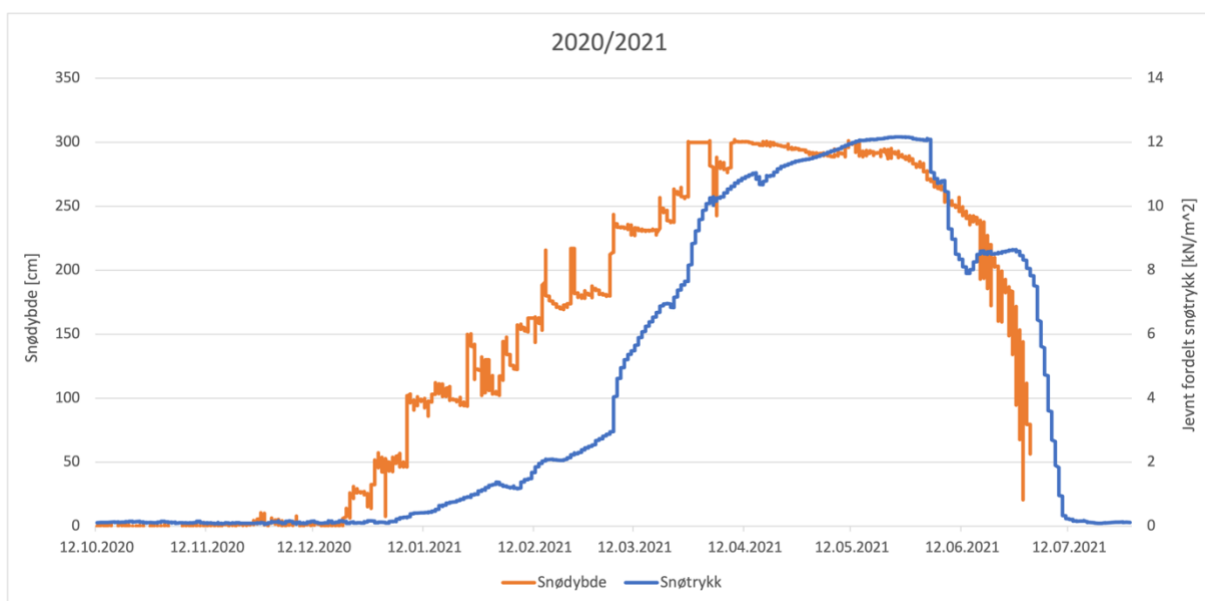
Glidning av snødekket mot underlaget kunne også forventes å øke nærmere sommeren. Det er fordi fuktighetsnivået i grensesjiktet mellom snødekket og underlaget øker som følge av økt lufttemperatur. Dette diskuteres nærmere i kapittel 7.3.

Det er ikke utført målinger på variasjonen i densitet gjennom sesongen 2019/2020. Det ble utført én densitetsmåling ved forsøksveggen i starten av mai 2019, og denne viste en gjennomsnittsdensitet på 530 kg/m³ (Snøen, 2019). Som det fremgår av figur 17, viser densitetsmålinger fra NGI sitt forsøksområde på Strynfjellene en trend ved at densiteten øker nærmere våren og sommeren. Lignende observasjoner kan forventes på Svalbard når lufttemperaturen stiger over frysepunktet nærmere sommeren. Det er fordi snøen får en høyere densitet ved at luftrommene i snødekket fylles med vann, samtidig som snøen får en lavere fasthet og blir mer hardpakket når den siger sammen. Sammenlignet med alpin snø som er porøs og har et høyt luftinnhold, er mye av snøen på Svalbard hardpakket ettersom snøakkumuleringen i stor grad skyldes drivsnø. Drivsnø kan som nevnt i kapittel 2.1.5 oppnå en densitet på 500 kg/m³, og våt snø kan oppnå en densitet på opptil 600 kg/m³. Det kan bety at densiteten varierer i mindre grad gjennom sesongen ettersom det er mindre luftinnhold i snøen på Svalbard sammenlignet med

steder hvor snøakkumulasjonen kun skyldes nedbør. Densitetsmålinger vist i figur 89 viser variasjonen i densitet fra februar til mai, og målingene viser liten variasjon for februar-april. Det er en betydelig økning i mai og det er sannsynlig at det vil være like høy densitet eller høyere, når temperaturene stiger ytterligere i juni og juli. Snøtrykket kan allikevel reduseres ettersom snøen vil smelte nærmere sommeren.

Densitetsmålingene i figur 89 er hovedsakelig fra 2022 og det burde blitt utført egne densitetsmålinger for sesongene 2019/2020 og 2020/2021 for å kunne vurdere hvordan snøtrykket varierer med densitet. At snøen har en relativt høy densitet tidlig kan føre til mindre forskjeller i snøtrykk gjennom sesongen, som figur 100 viser.

Det at snøen er hardpakket påvirker også effekten snøsig har på deformasjoner i snødekket. Det er størst potensial for snøsig i snø med mye luftrom og lav fasthet, som for eksempel nysnø. Snøsig avtar nedover i snødekket som følge av at de nedre lagene er mer kompakte og mindre utsatt for at de siger sammen.



Figur 101: Snødybde og jevnt fordelt snøtrykk på forsøksveggen for 2020/2021-sesongen. Hentet fra: vedlegg J.

Som figur 101 viser ble det målt snødybder på over 300 cm i løpet 2020/2021-sesongen. Dette innebærer mer enn en meter mer snø, sammenlignet med sesongen året før. Snødybden var størst 9. april for 2020/2021-sesongen med 302 cm. På samme dato ble snøtrykket målt til 10.6 kN/m². Maksimalt snøtrykk ble derimot målt til 12.2 kN/m² den 25. mai, og på samme tidspunkt var snødybden 290 cm. Det vil si at snøtrykket mot slutten av mai var 15 % høyere selv om snødybden var redusert med 4 % sammenlignet med maksimal snødybde i april.

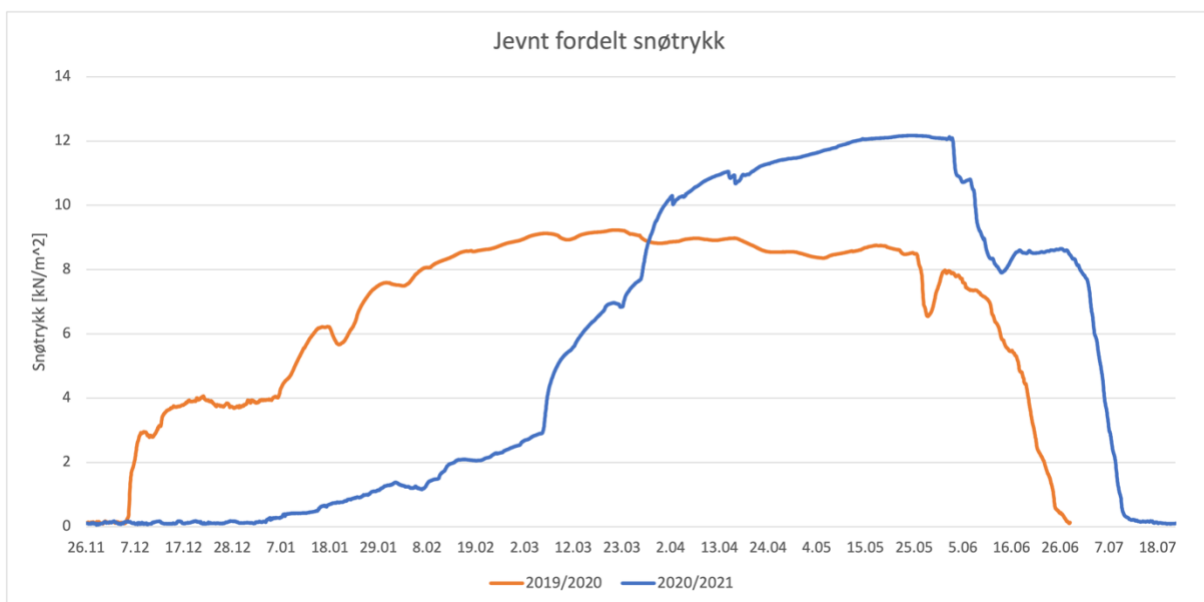
Sammenlignet med resultatene fra 2019/2020, hvor snøtrykket var størst allerede i mars, ble maksimalt snøtrykk målt mot slutten av mai for 2020/2021-sesongen. Som nevnt forventes snøtrykket å være størst nærmere sommeren som følge av økt vanninnhold, tyngre snø og større deformasjoner i snødekket. Det virker derfor fornuftig at snøtrykket er på sitt største nærmere sommeren.

Temperaturen i øvre deler av snødekket krysset frysepunktet i begynnelsen av juni, men det var ikke før 10. juni at hele snødekket ble isotermt. Gitt at snødybden ikke er betydelig redusert forventes som nevnt snøtrykket å være størst når hele snødekket er

isotermt. Observasjonene stemmer imidlertid ikke overens med forventningene. Maksimalt snøtrykk ble registrert 25. mai, og det holdt seg stabilt frem til 3. juni. I dagene frem mot 10. juni viser målingene en betydelig reduksjon av snøtrykket, i motsetning til en forventet økning som følge av at snødekket ble isotermt samtidig som snødybden holdt seg stabil.

Figur 102 viser hvordan snøtrykket varierer for begge sesongene. For sesongen 2020/2021 var snødybdene opp mot det dobbelte sammenlignet med 2019/2020. Selv om snødybden var 60 % større i 2020/2021, var det målte snøtrykket kun ca. 30 % større. Noe av årsaken til en relativt liten økning skyldes at forsøksveggen måler 150 cm i høyden, og maksimal snødybde for sesongen 2020/2021 var 302 cm. De øvre 152 cm presser derfor ikke direkte inn på veggen, men vil likevel gi et bidrag til snøtrykket ved at det presser ned på lagene under. Når snølaget glir forbi på oversiden kan det diskuteres hvorvidt dette vil gi opphav til en økning av endeeffekter for de øvre lastcellene. En vurdering av om denne økningen av endeeffekter er neglisjerbar, eller i det hele tatt eksisterende, er svært komplisert. Gruppen er imidlertid ikke kjent med at det er gjort forskning på dette tidligere.

Hadde forsøksveggen vært høy nok til at maksimal snødybde ikke overgikk vegghøyden, ville det trolig vært større forskjeller i snøtrykk for de to sesongene.



Figur 102: Jevnt fordelt snøtrykk for 2019/2020- og 2020/2021-sesongen. Hentet fra: vedlegg C.

Figur 102 viser et betydelig dropp i snøtrykk i starten og midten av juni for henholdsvis sesongen 2019/2020 og 2020/2021. Dette kan skyldes luftspalter som oppstår mellom forsøksveggen og snødekket når lufttemperaturene stiger, og varmer opp veggen. Videre øker snøtrykket igjen, og årsaken kan være nedbør i form av regn. Dette vil føre til redusert fasthet i snøen, og dermed øker deformasjonene som fører til at luftspalten tettes igjen.

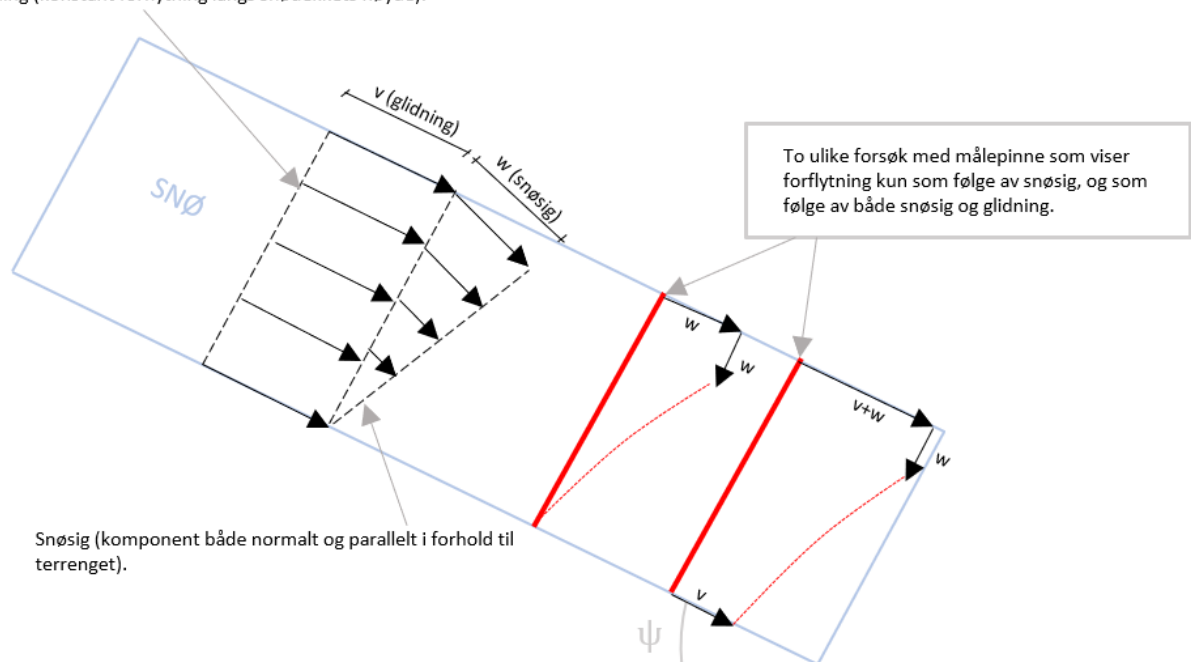
7.3 Glidning

Som nevnt i kapittel 2.2 kan snø i skrånende terreng oppleve to ulike bevegelsestyper: snøsig og glidning. Glidningen av snødekket mot underlaget skjer når snøen varmes opp og blir fuktig. Bevegelsen er konstant over hele snødekkets høyde.

I Alpene er mye av landskapet dekket av gress som gir gode glideegenskaper for snødekket. På Svalbard består derimot underlaget stort sett av større og mindre steiner som gir mindre gode glideforhold. En annen viktig faktor er permafrosten. I Sveits er det permafrost i områder høyere enn 2300 meter over havnivå, mens hele Svalbard er dekket med permafrost gjennom vintersesongen. Derfor vil snøen kun varmes opp ovenfra. Det gjør at øvre deler av snødekket vil varmes opp først og oppnå høyere fuktighet, mens temperaturen i lavere deler av snødekket fortsatt vil være under frysepunktet når våren/sommeren kommer. Kombinasjonen av underlag med høy ruhet og permafrost fører til at snødekket låser seg til bakken. Glidning vil derfor trolig ikke gi noe bidrag til bevegelse av snødekket med de lokale forholdene på Svalbard.

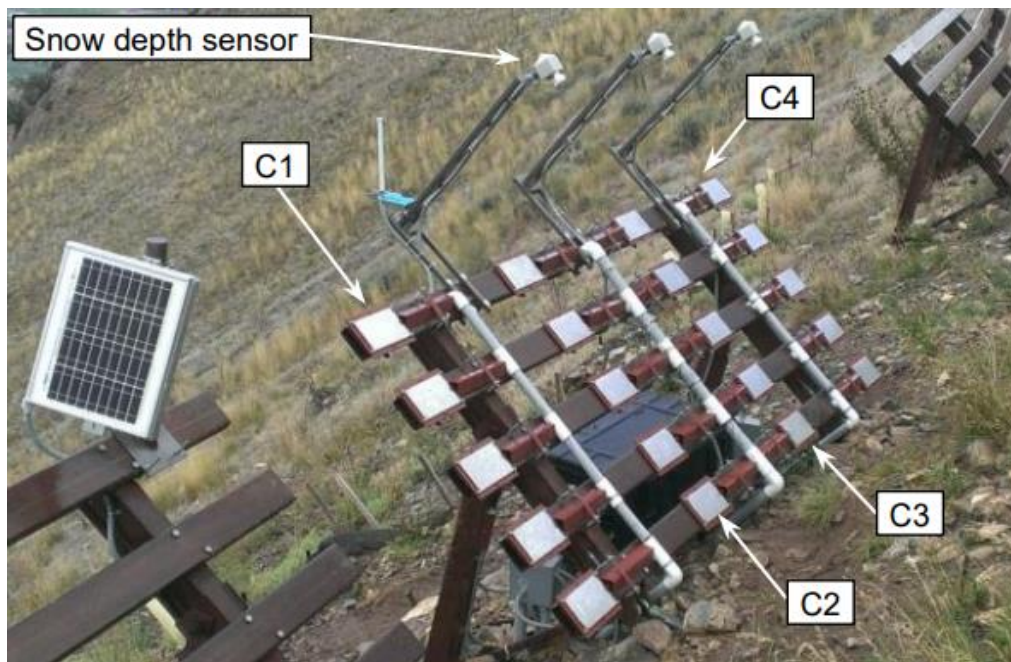
Lignende observasjoner ble gjort på Island som nevnt i kapittel 3.2.6. I henhold til figur 44 råder den sveitsiske veiledningen til å bruke en glidefaktor på 1.2 for steinete underlag i områder som i liten grad er eksponert for sol. Dette gir en økning på 20 % av snøtrykket som følge av glidning. Gruppen mener derfor det burde vurderes en glidefaktor på 1.0 under de rådende forholdene hvor forsøksveggen befinner seg, og generelt andre områder hvor det er permafrost og steinete underlag. Det burde imidlertid gjennomføres forsøk i det aktuelle området for å vurdere om bevegelsen i snødekket kun skyldes snøsig eller om det også er bidrag fra glidning, se figur 103:

Glidning (konstant forflytning langs snødekkets høyde).



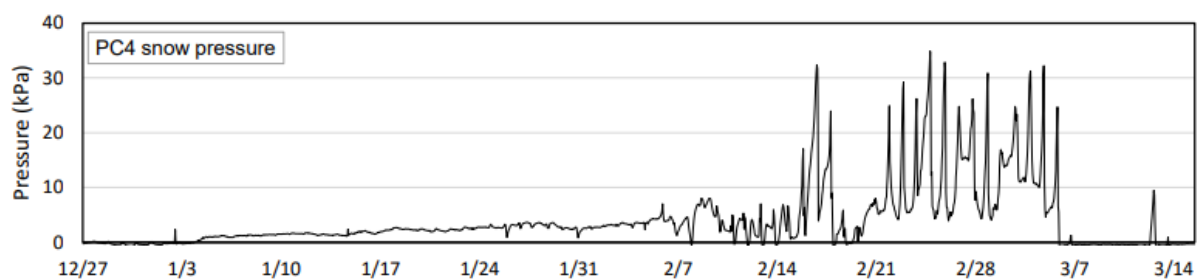
Figur 103: Eksempel på forsøk for å vurdere bevegelsene i snødekket. Figur: Vetle Basma.

I Jackson i Wyoming ble det registrert målinger på en støtteforbygning som var montert i en fjellside med en helning på 37 grader, som lå rundt 2150 meter over havet (Hewes et al., 2016). Lastmålingene ble utført med 20 lastceller som var plassert i et rutenett på støtteforbygningen, se figur under.



Figur 104: Bilder viser plasseringen av de 20 lastcellene på støtteforbygningen. Bildet er hentet fra: (Hewes et al., 2016).

Resultatene fra målingene begge sesongene viste store daglige fluktuasjoner for snøtrykket. Sett i sammenheng med temperaturen, viser det tydelig at snøtrykket på lastcellene øker på dagtid når temperaturen og fuktigheten øker i snødekket. Dette skjedde nærmere våren når lufttemperaturen steg over frysepunktet. Tilsvarende nedgang i snøtrykk observeres på nattestid når lufttemperaturen synker under frysepunktet, og snødekket fryser og låses fast mot underlaget. Snøtrykket var opptil syv ganger større på dagtid da verdien var 35 kN/m^2 , sammenlignet med nattestid da verdien var 5 kN/m^2 , se figur 105. Resultatene som presenteres nedenfor er fra lastcellen nest nederst på første kolonne, C1, som vist på figur 104.



Figur 105: Snøtrykket fra slutten av desember 2014 til midten av mars 2015. Figuren er hentet fra: (Hewes et al., 2016).

Selv om snødybden sank noe i midten av februar, økte lastverdiene kraftig med store variasjoner i løpet av døgnet. Temperaturen nederst mot bakken økte opp mot $5 \text{ }^\circ\text{C}$, noe som førte til økt fuktighet i grensesjiktet mellom snøen og bakken. Den økte fuktigheten, i kombinasjon med underlag av gress, ga gode glideforhold på dagtid. Resultatene fra

eksperimentet illustrerer viktigheten av å ta hensyn til glideforholdene i områder hvor det vurderes bruk av rassikringskonstruksjoner. Målingene fra Svalbard viste ikke lignende observasjoner med store fluktuasjoner gjennom døgnet. Selv om lufttemperaturen på dagtid nærmere sommeren steg over frysepunktet, sørget permafrosten for at temperaturen i bunnen av snødekket var godt under 0 °C. Dette ga derfor lav fuktighet og dårlige glideforhold. Underlaget på Svalbard består i tillegg av steiner som er ugunstig for glidning av snødekket.

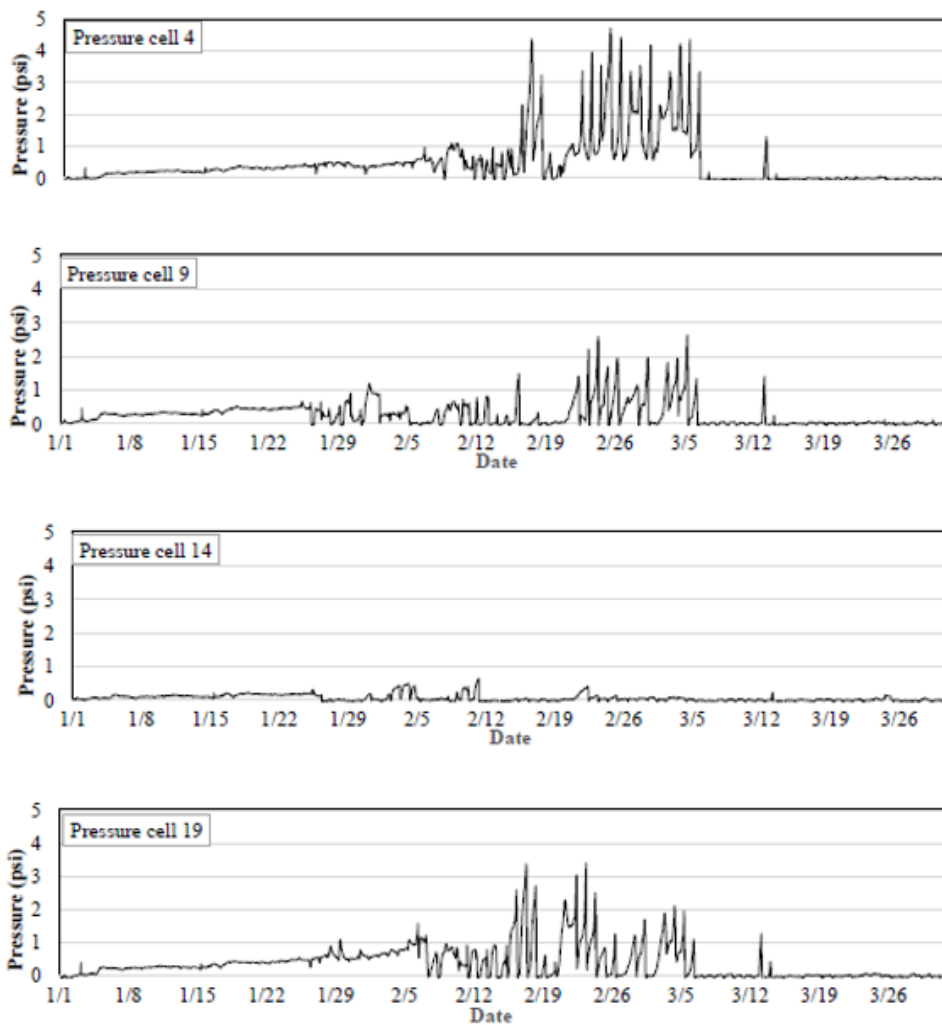
Det burde nevnes at noe av økningen i snøtrykk på dagtid fra felteksperimentet også skyldes at lastcellen PC4 er montert på enden av konstruksjonen. Det betyr at noe av økningen i lastverdi kan skyldes endeeffekter som følge av gode glideforhold, som diskutert i kapittel 7.4.

7.4 Endeeffekter

Endeeffekter kan ha stor betydning for snøtrykket på en konstruksjon. Som nevnt i kapittel 3.2.2, kan snøtrykket på en konstruksjonsdel som er utsatt for endeeffekter være opptil 2-5 ganger høyere enn på en uendelig lang konstruksjon. Det er derfor avgjørende å ta hensyn til denne effekten. Lastcellene på forsøksveggen på Svalbard er montert i veggens fire hjørner, og de forventes derfor å være utsatt for endeeffekter.

En faktor av stor betydning for størrelsen på endeeffektene, er glideforholdene i området hvor konstruksjonen er montert. Når snøen glir forbi endene av konstruksjonen vil det oppstå en tilbakeholdende effekt som prøver å trekke med seg konstruksjonen nedover i terrenget, og det vil derfor oppstå trykkrefter. Som nevnt i kapittel 7.3 ble det i Jackson i Wyoming utført et felteksperiment med en støtteforbygning montert med 20 lastceller (Hewes et al., 2016). Figur 107 viser plasseringen av lastcellene med C1, C2, C3 og C4 som betegnelse på de ulike kolonnene. Det er fem lastceller i hver kolonne, fordelt over støtteforbygningens høyde.

Resultatene fra 2014/2015-sesongen viser hvordan snøtrykket varierer for lastcellene plassert mot enden av konstruksjonen. Lastcellene som er plassert nærmere midten antas å ikke påvirkes av endeeffekter. Resultatene fra felteksperimentet er gjengitt i figur 106.



Figur 106: Snøtrykket på lastcelle 4, 9, 14 og 19 gjennom vinteren 2015. Figuren er hentet fra: (Hewes, 2017).

Kreftene er her vist i psi (pound-force per square inch) og multipliseres med en faktor på 6.89 for å konvertere til kN/m^2 . Lastcelle 4, 9, 14 og 19 befinner seg på nest nederste rad og er henholdsvis plassert i kolonne 1, 2, 3 og 4. Kolonne 1 og 4 er plassert på endene av støtteforbygningen. Se figur 107 for plassering av lastcellene.

Som ligning 13 viser, påvirker avstanden mellom konstruksjonene, A , størrelsen på endeeffekt-faktoren, f_R . Forventningene stemmer derimot ikke overens med observasjonene fra forsøket. I figur 107 er PC4 hentet ut fra C1. Den viser trykkmålinger opp mot 35 kN/m^2 , som er ca. 60 prosent større sammenlignet med maksimalt trykk målt for PC19. Det målte snøtrykket er derfor større for C1, selv om trykkcellene på denne enden er plassert nærmere stålkonstruksjonen ved siden av, sammenlignet med trykkcellene i C4. En mulig forklaring til denne observasjonen kan være skjevfordeling i snødekket foran støtteforbygningen.

Resultatene fra 2016-sesongen viste mindre tegn til endeeffekter sammenlignet med resultatene fra 2015-sesongen som vist over. Det er uvisst hvorfor resultatene for de to sesongene er ulike.

Som nevnt tidligere er gode glideforhold av stor betydning for størrelsen på endeeffektene. På Svalbard er det som følge av permafrost og steinete underlag ikke forventet noen effekt av glidning mot underlaget. Det betyr at mulige endeeffekter kun skyldes bevegelser i snøen som følge av sig i snødekket. Som diskutert i kapittel 7.3 skyldes de store hoppene i figur 106 gode glideforhold under varme perioder på dagtid. Uten denne glidningen av snødekket på dagtid hadde trolig målingene fra felteksperimentet vist at endeeffektene var mindre dominerende. Det gir grunnlag for å forvente mindre påvirkning av endeeffekter på forsøksveggen på Svalbard, sammenlignet med områder med gode glideforhold.

Siden lastcellene kun er montert i hjørnene på forsøksveggen er det vanskelig å vurdere hvor stor betydning endeeffektene har. Det er gjort lite forskning på endeeffektens betydning i områder hvor det er en svært liten antydning til glidning av snødekket mot underlaget. I henhold til SLF, som beskrevet i ligning 13, velges en endefaktor, f_R , på 2.5. Da er det lagt til grunn den laveste glidefaktoren, N , på 1.2 for underlag med store steiner og sørvendt fjellside som vist på figur 44. Som nevnt i kapittel 3.3.2 foreslo Jan Otto Larsen en lignende måte å beregne endefaktorer på som i SLF, og i henhold til ligning 23 beregnes endefaktoren til 2.8. Det anbefales å montere lastceller på midten av forsøksveggen for å kontrollere endeeffektens betydning for snøtrykket i områder hvor deformasjonene som følge av glidning er neglisjerbar.

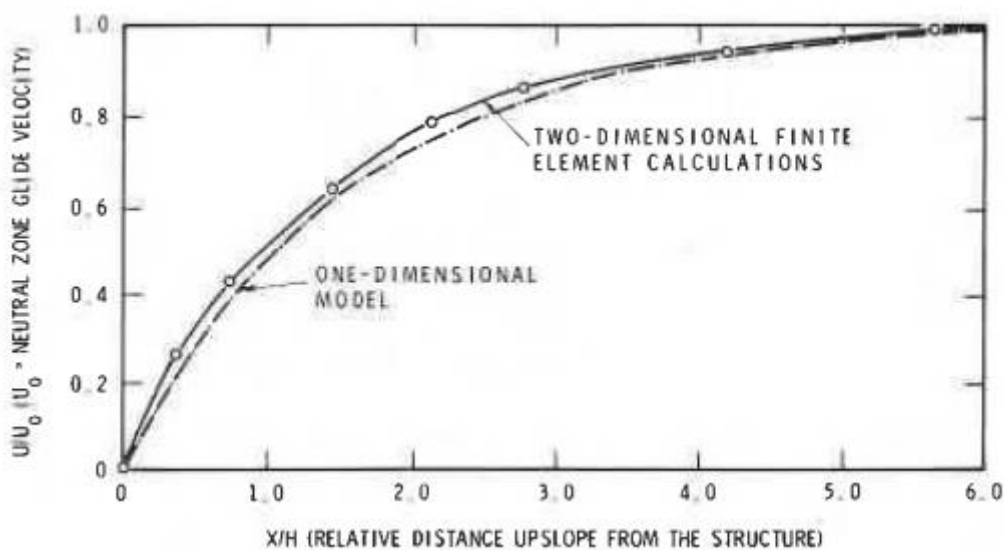
7.5 Effektiv trykksone

Det er ikke bare terrenget rett i nærheten av rassikringskonstruksjonene som påvirker snøtrykket. Området i forkant av støtteforbygningene hvor snøens bevegelser reduseres, betegnes som den effektive trykksonen. Størrelsen på den effektive trykksonen vil variere ut fra de lokale forholdene, og den er derfor vanskelig å stadfeste uten feltdata. Som nevnt i kapittel 2.5.1 står det i veiledningen til SLF at lengden på trykksonen, målt oppover i terrenget, er sterkt avhengig av glideforholdene på stedet. Som minstekrav burde man anta en lengde på minst tre ganger den vertikale snøhøyden, målt fra rett i forkant av konstruksjonen og oppover i terrenget. Områder utenfor den effektive trykksonen omtales videre som nøytral sone.

Beregningene for snøtrykk i SLF er presentert i ligning 9. Formelgrunnlaget er basert på Haefeli sitt arbeid med sin endimensjonale analytiske modell for beregning av snøtrykk på stive konstruksjoner. Haefeli hadde den effektive trykksonen som utgangspunkt for modellen (Haefeli et al., 1939).

Häefeli var den første som introduserte en endimensjonal modell som kunne brukes til å beregne plane tøyninger og spenninger fra kvasi-statiske bevegelser i snøen. Formuleringene har blitt gjenstand for en av de mest klassiske problemene i snømekanikken. Beregningene har varierende presisjon, men brukes fortsatt som utgangspunkt for beregningsanvisningene i SLF (McClung, 1982).

McClung utviklet en analytisk modell til å beregne snøtrykket parallelt med terrenghelningen. Modellen beregner snøtrykket på midten av en stiv konstruksjon uten påvirkning av endeeffekter, og gir også en approksimasjon av lengden til den effektive trykksonen. Resultatene ble sammelignet med arbeidet til Häefeli og simuleringer fra et 2D-program, kalt PLANE 2, som baserer seg på elementmetoden. Figur 109 viser hvordan lengden av trykksonen varierer som funksjon av høyden av snødekket. Resultatene viser at lengden av trykksonen, målt oppover i terrenget, er opptil 4-6 ganger snødybden.



Figur 109: Sammenhengen mellom høyden av snødekket og trykksonen for en en- og todimensjonal modell. Figuren er hentet fra: (McClung, 1982).

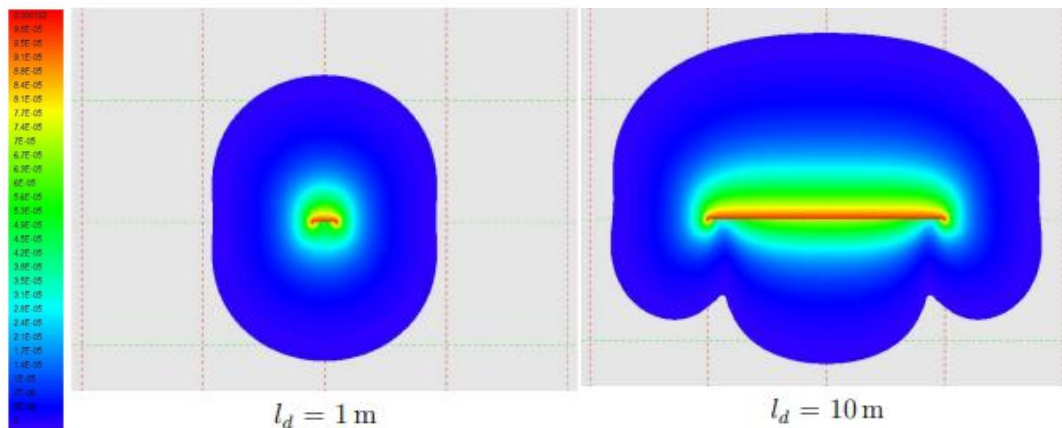
Størrelsen på den effektive trykksonen påvirkes som nevnt av mange faktorer, og den må derfor vurderes ut i fra de lokale forholdene. Resultatene fra forsøket over er utført med en helning på 45 grader, en densitet på 550 kg/m³ og Poisson's ratio på 0.3.

Basert på felteksperimenter på snøens mekaniske materialegenskaper utført av SLF og Universitetet i Zürich, utviklet Martin Stoffel numeriske analysemodeller i 2D og 3D (Stoffel, 2006), som nevnt i kapittel 4. 2D- og 3D-modellen er begge basert på elementmetoden. 2D-modellen benytter lineær bruddmekanikk, mens 3D-modellen baserer seg på en metode som kalles *The N-Directional Approach to Constitutive Laws* (Muñoz & Francisco, 2002). Materiallovene som anvendes i programvarene er blant annet basert på omfattende triaksiale tester med snø (Moos et al., 2003; Scapozza & Bartelt, 2003b). Forskningseksperimentene er utført med alpin snø og kan derfor avvike fra oppførselen i den maritime snøen som er på Svalbard.

Stoffel utførte numeriske simuleringer for å vurdere størrelsen på trykksonen. Glidning av hele snødekket ble ikke inkludert i simuleringene, som vil si at deformasjonene i snøen kun var som følge av snøsig. Simuleringene er derfor i tråd med forholdene på Svalbard ettersom det er ingen eller svært liten effekt av glidning i området rundt

forsøksveggen. Snødekket ble modellert med dimensjoner på 30x30 meter, og en konstant snødybde på to meter. En støtteforbygning med varierende lengde ble plassert i sentrum av modellen. Snødekket hadde en konstant densitet og temperatur på henholdsvis 250 kg/m^3 og $-4 \text{ }^\circ\text{C}$.

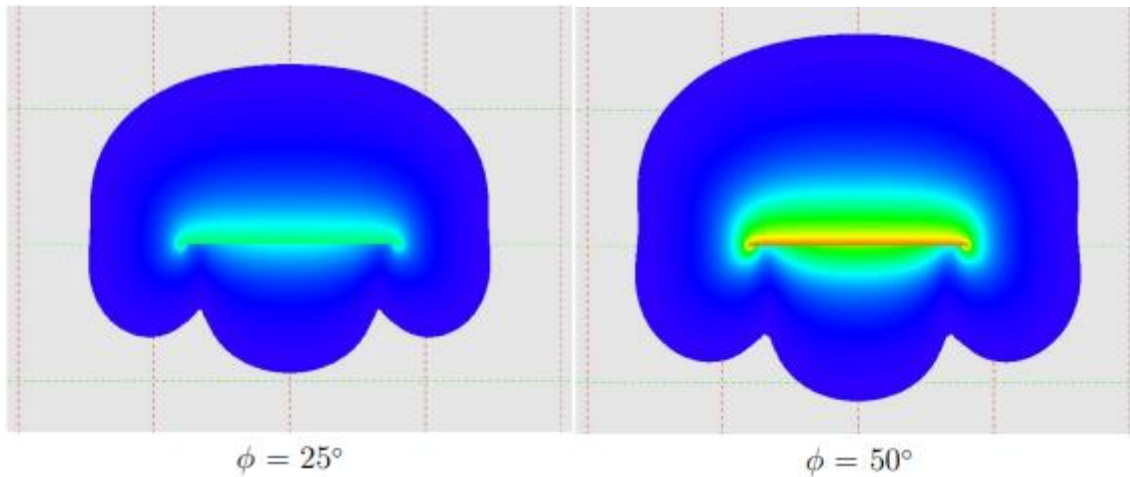
Simuleringene ble utført med varierende helning og lengde på støtteforbygningene. Høyden på støtteforbygningene var lik høyden på snødekket, konstant på to meter gjennom alle forsøkene. I tillegg ble det utført simuleringer med to ulike rader støtteforbygninger med varierende lateral avstand. Influenssone er synonymt med effektivt trykksone, og defineres som området hvor deformasjonene i snødekket er redusert, sammenlignet med nøytral sone.



Figur 110: Figuren viser omfanget av trykksone hvor støtteforbygningene påvirker deformasjonene i snøen. Trykksone er markert i farger og nøytral sone i grått. Fargeskalaen til venstre viser deformasjoner i snøen i meter. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

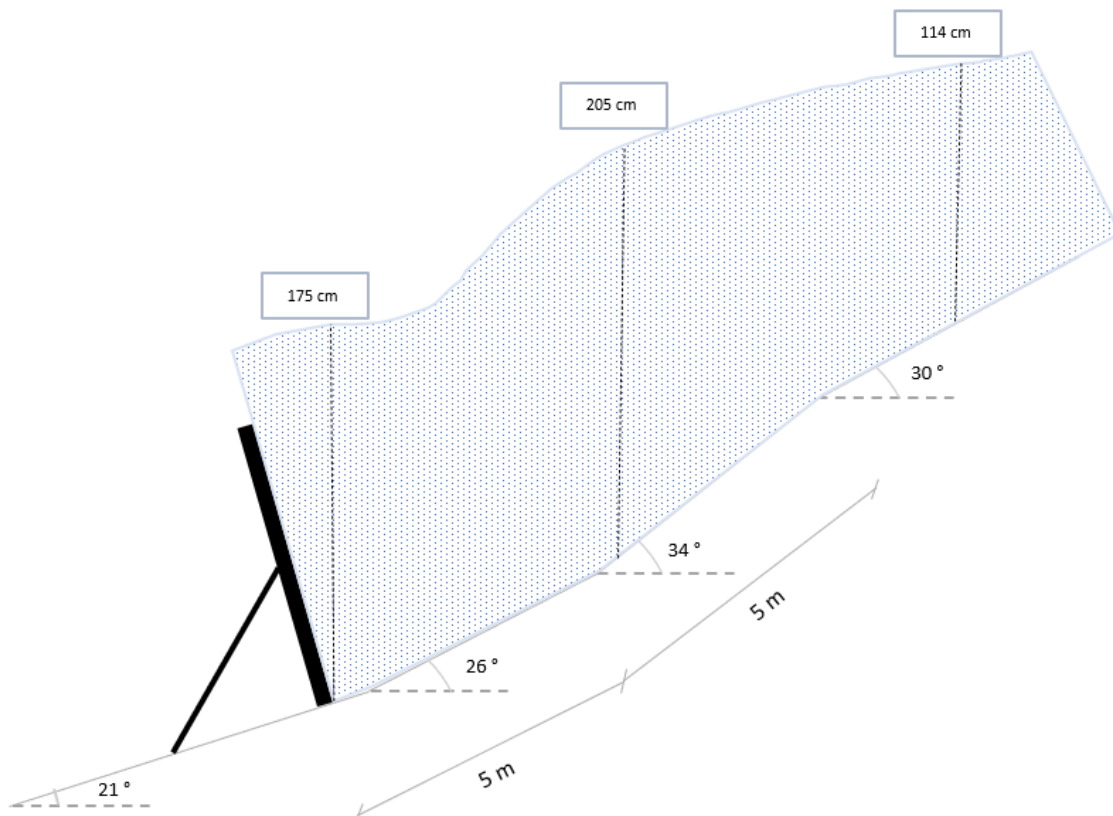
Figur 110 viser hvordan lengden av konstruksjonen påvirker størrelsen på influenssone. Forsøkene er utført med en konstant helning på 40° . Det må nevnes at simuleringene ble utført for $t=0$, det vil si at resultatene kun viser de umiddelbare deformasjonene fra snøsigg. På grunn av den viskøse deformasjonen til snødekket over tid vil influenssone øke sakte, men simuleringer viser relativt liten økning med en simuleringstid på ti dager (Stoffel, 2006). Forsøkene resulterer i en lateral lengde på 2-4 meter, og viser derfor at lengden av konstruksjonen påvirker størrelsen av influenssone på endene i liten grad. I veiledningen til SLF er det en øvre begrensning på lateral avstand mellom rader med støtteforbygninger, betegnet A , på to meter. Ut ifra forsøksresultatene tolkes den øvre grensen som rimelig, men som noe konservativ. Lengden oppover i terrenget påvirkes noe mer av lengden på konstruksjonene. Den er rundt seks meter for støtteforbygningen på én meter, og ni meter for støtteforbygningen som er ti meter lang.

Det virker naturlig at større helning gir et større snøtrykk på konstruksjonen. Når det gjelder påvirkningen av influenssone, er det derimot ikke slik at økende helning gir større influenssone. Som figur 111 viser, er resultatene fra forsøkene med 3D-simuleringer at varierende helning påvirker influenssone i liten grad. Ved brattere helning vil snøtrykket normalt på konstruksjonen øke. Lastkomponenten som virker parallelt med konstruksjonen (skjærkraften) øker imidlertid ikke i like stor grad ettersom lastkomponenten varierer med cosinus. Deformasjonene i normalretningen avtar raskere enn deformasjonene parallelt med konstruksjonen (Stoffel, 2006), og de påvirker derfor influenssone i mindre grad.



Figur 111: Figuren viser hvordan varierende helning påvirker utbredelsen av influenssonen. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

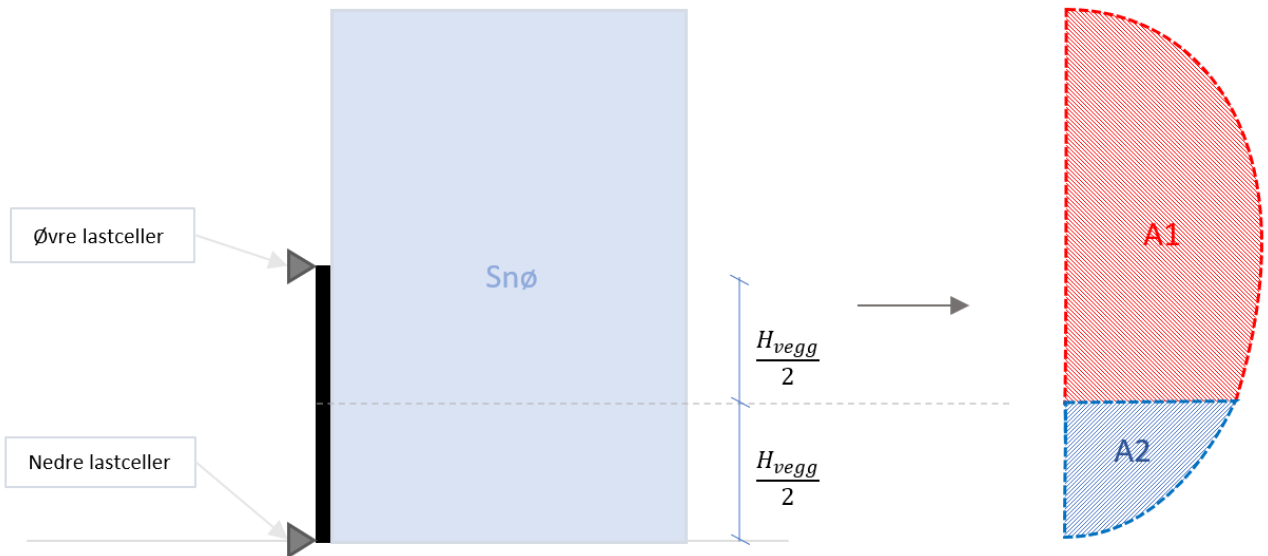
Basert på resultatene fra McClung og Stoffel kan det antas at trykksonen foran forsøksveggen brer seg ut 5-15 meter oppover i terrenget, og 2-3 meter til siden for hver av endene (McClung, 1982; Stoffel, 2006). For å vurdere snøtrykket på forsøksveggen ble det derfor utført målinger på helning og snødybde i et område foran forsøksveggen. Resultatene fra disse målingene er presentert i kapittel 5.4, og et snitt fra midten av veggen er vist i figur 112. Figuren viser hvordan helningen varierer mellom 21° og 34°, samtidig som snødybden reduseres betraktelig lenger unna veggen. Variasjonene i snødybde og helning vil påvirke snøtrykket på veggen. Det burde derfor alltid gjøres en vurdering av de lokale forholdene i et større område rundt rassikringskonstruksjonen, og ikke bare akkurat der hvor konstruksjonen er plassert. Hvis helningen der støtteforbygningen skal plasseres er betydelig lavere sammenlignet med området ellers i trykksonen, burde helningen som anvendes i beregningene velges med omhu. Helningen ved forsøksveggen ble målt til 21°. Figur 112 viser hvordan helningen øker fra 26° til 34° innenfor de første fem meterne, samtidig som snødybden øker. Dette må tas med i betraktning for å få en mer helhetlig forståelse for snøtrykket som måles på forsøksveggen.



Figur 112: Terrengprofil med varierende snødybde og helning i et snitt tatt ca. midt på forsøksveggen. Figuren viser ikke de eksakte forholdene, men er en tilnærming av målingene som er forklart i kapittel 5.4. Figur: Vetle Basma.

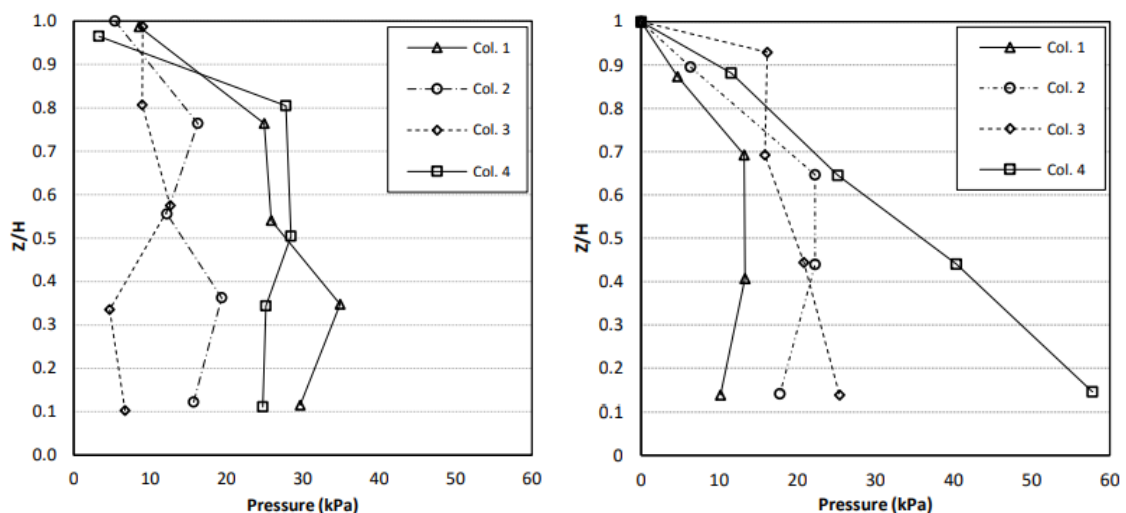
7.6 Lastfordeling

Målingene for de fire lastcellene vist i figur 80 og 85 viser relativt like lastverdier for celler på samme høyde, men store forskjeller mellom øvre og nedre rad. I starten av sesongen når snødekket er lavere enn forsøksveggen høyde er det noe større verdier for lastcellene på nedre rad. Dette gjelder for begge sesongene. Utover i vintersesongen øker forskjellen mellom øvre og nedre rad gradvis. Lastverdiene på øvre rad er på det meste fire ganger større for 2019/2020-sesongen, og ti ganger større for 2020/2021-sesongen, sammenlignet med nedre rad. Når man ser snøtrykket i sammenheng med snødybden, ser man et tydelig mønster begge sesonger. Lastverdiene på de øvre cellene får først en relativt stor økning når snødybden nærmer seg veggghøyden på 150 cm. Når snødybden øker videre, vil de øvre lastcellene tilegne seg en større andel av lasten sammenlignet med de nedre lastcellene. Ved å anta en parabolisk fordeling av snøtrykket som nevnt i kapittel 3.3.1 kan man forvente en lastfordeling som vist på figur 113.



Figur 113: Antatt lastfordeling for øvre og nedre lastceller for en gitt snødybde. Figur: Vetle Basma.

En parabolisk fordeling av snøtrykket er en forenklet lastfordeling. Denne er basert på målinger utført av blant annet Jan Otto Larsen på NGI sin forskningsstasjon på Stryn på 70-, 80- og 90-tallet (Hjorth-Hansen et al., 2000). Som nevnt tidligere ble det utført et forskningsprosjekt i Jackson i Wyoming, med en støtteforbygning montert i skrånende terreng som var 3.7 meter bred og 1.6 meter (Hewes et al., 2016). Det ble utført målinger gjennom to fulle vintersesonger, 2014/2015 og 2015/2016. Støtteforbygningen var utstyrt med 20 lastceller, fire rader med fem lastceller langs stålbroens høyde, som vist på figur 107. Resultatene viser hvordan snøtrykket varierer langs høyden av konstruksjonen, og disse er gjengitt i figur 114. For alle lastcellene er det maksimalverdiene gjennom sesongen som presenteres.

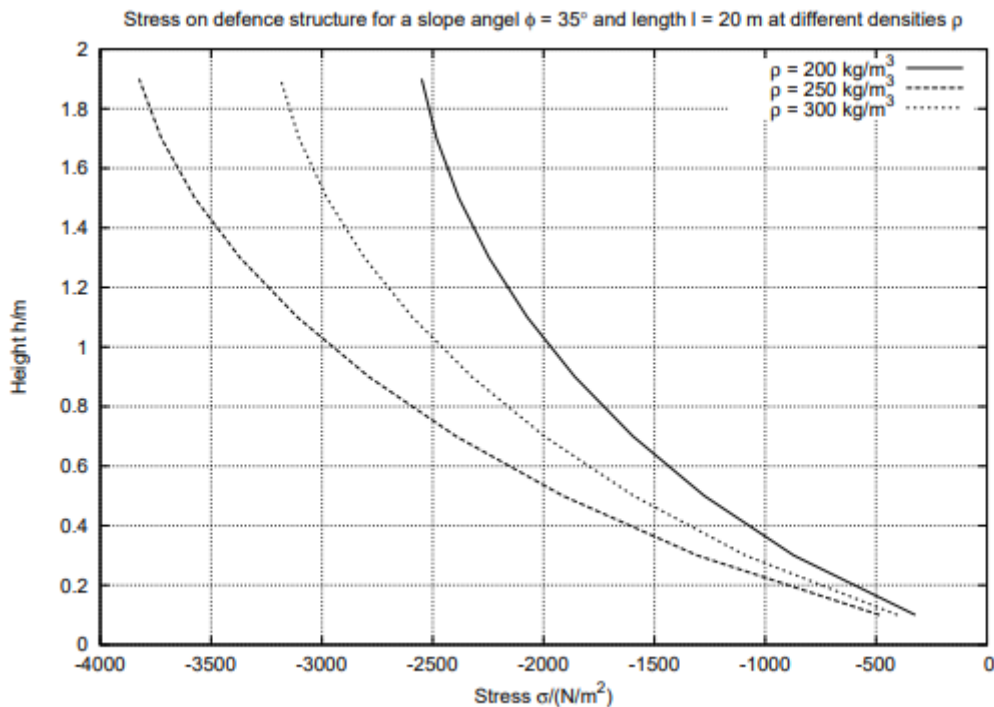


Figur 114: Trykkfordeling som funksjon av konstruksjonshøyden for 2014/2015- og 2015/2016-sesongen. Figuren er hentet fra: (Hewes et al., 2016).

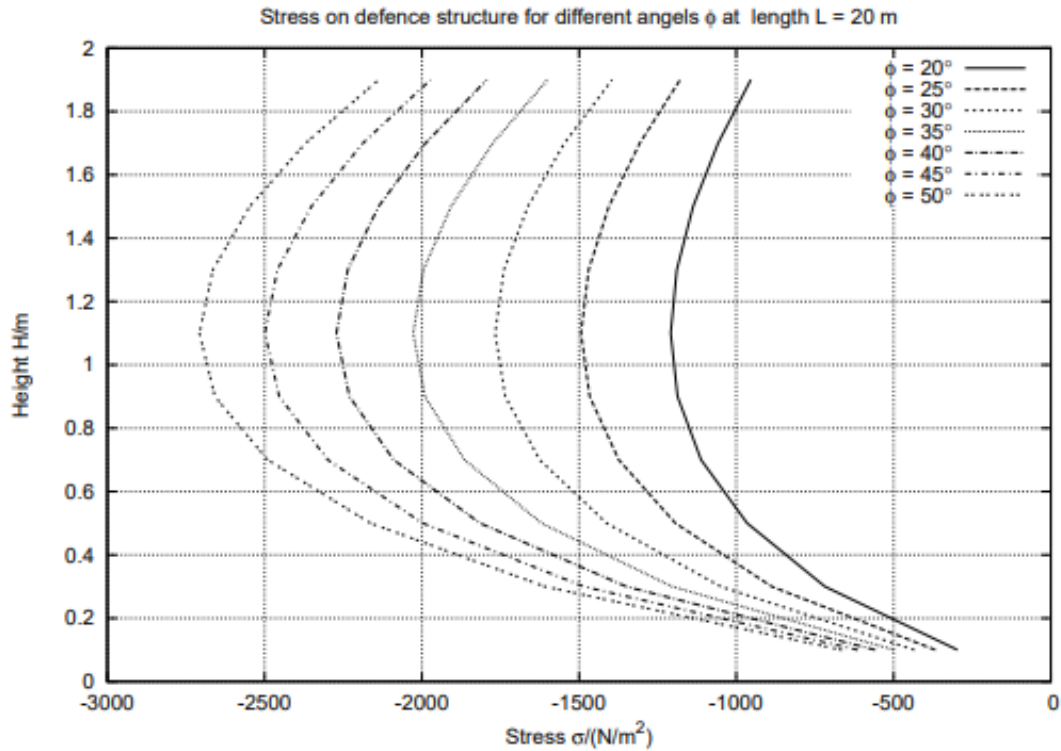
Resultatene viser maksimaltrykk nær midten, og avtagende trykk mot topp og bunn av støtteforbygningen for majoriteten av resultatene. Målingene for kolonne 4 i 2015/2016-sesongen skiller seg ut med en tilnærmet lineær lastfordeling med maksimaltrykk målt nederst. Trykkmålingene for endekolonnene 1 og 4 viser noe høyere verdier

sammenlignet med de midtre lastcellene. Dette skyldes trolig endeeffekter, som diskutert i kapittel 7.4. Resultatene fra felteksperimentet i USA viser at lastfordelingen for snøtrykk mot en stiv konstruksjon er komplisert. En parabolisk lastfordeling er derfor en betydelig forenkling av realiteten, og den representerer ikke nødvendigvis de faktiske forholdene. I områder hvor glidning av snødekket er aktuelt kan det være en annen lastfordeling sammenlignet med områder hvor deformasjonene i snødekket kun skyldes snøsig. For felteksperimentet i USA var glidning av snødekket en dominerende faktor for maksimalverdiene fra snøtrykket. I motsetning sørger de lokale forholdene på Svalbard for at glidning av snødekket er neglisjerbart som følge av steinete underlag og permafrost.

Simuleringer fra Stoffel viser ulik lastfordeling langs støtteforbygningens høyde, med konstant og varierende densitet (Stoffel, 2006). Resultatene fra disse simuleringene vises i figur 115 og 116. I områder hvor snøakkumulasjon i hovedsak skyldes nedbør kan det forventes høyest densitet lengst nede i snødekket ettersom lagene over vil komprimere sammen lagene under. På Svalbard skyldes derimot snøakkumulasjonen i hovedsak drivsnø hvor vinden fører til at snøen pakkes sammen umiddelbart. Det vil føre til en mer konstant fordeling av densitet over snødekkets høyde, og densitetsmålingene presentert i figur 72 bekrefter en tilnærmet jevn fordeling av densitet. En konstant densitet over snødekkets høyde vil kunne påvirke lastfordelingen sammenlignet med en avtagende densitet mot toppen av snødekket, som vist i figurene nedenfor. Vegvesenet antar som nevnt en parabolisk fordeling etter egne feltforsøk på Strynfjellene, men der skyldes ansamlingen av snø i all hovedsak nedbør, og ikke drivsnø. En parabolisk fordeling virker derfor fornuftig for de lokale forholdene på Strynfjellene, men det vil ikke nødvendigvis være korrekt for forholdene på Svalbard. En lastfordeling som vist i figur 115 vil føre til en økt belastning på de øvre lastcellene sammenlignet med en parabolisk lastfordeling, og dette kan være en av årsakene til de store forskjellene i målt snøtrykk for øvre og nedre lastceller.

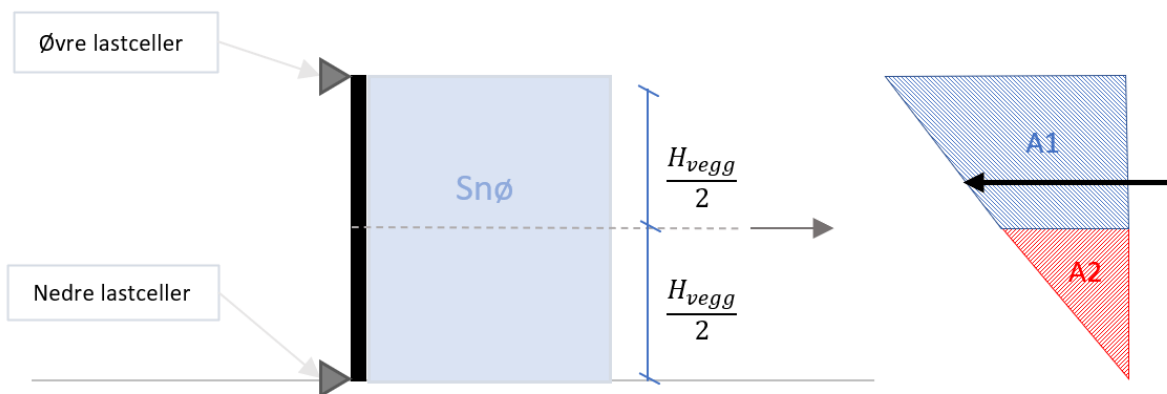


Figur 115: Lastfordeling over støtteforbygningens høyde med konstant densitet. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).



Figur 116: Lastfordeling over støtteforbygningens høyde med lineært avtagende densitet fra 300 kg/m³ i bunnen av snødekket, til 210 kg/m³ i toppen. Figuren er hentet fra: (Stoffel, 2006).

I henhold til Norem, og McClung og Schaerer, vil deformasjonene fra snøsig være lineært økende oppover i snødekket, som vist i figur 13 og 14 (McClung & Schaerer, 2006; Norem, 2014). Ved å anta at deformasjonene fra glidning er neglisjerbare kan følgende lastfordeling antas fra snøsig med en resultant i tredels-punktet:



Figur 117: Lastfordeling for snøtrykk med deformasjoner kun fra snøsig. Figur: Vetle Basma.

En lineært økende lastfordeling vil skape en skjevfordeling av lasten som vist på figuren ovenfor. Lastfordelingen viser likhetstrekk med lastfordelingen presentert i figur 115 for en konstant densitet over snødekkets høyde. For en snødybde på 150 cm, lik vegghøyden, vil de øvre lastcellene teoretisk sett ta 2/3 av lasten, og den resterende 1/3

vil fordeles på de nedre lastcellene. For større snødybder vil en større andel fordeles til de øvre lastcellene.

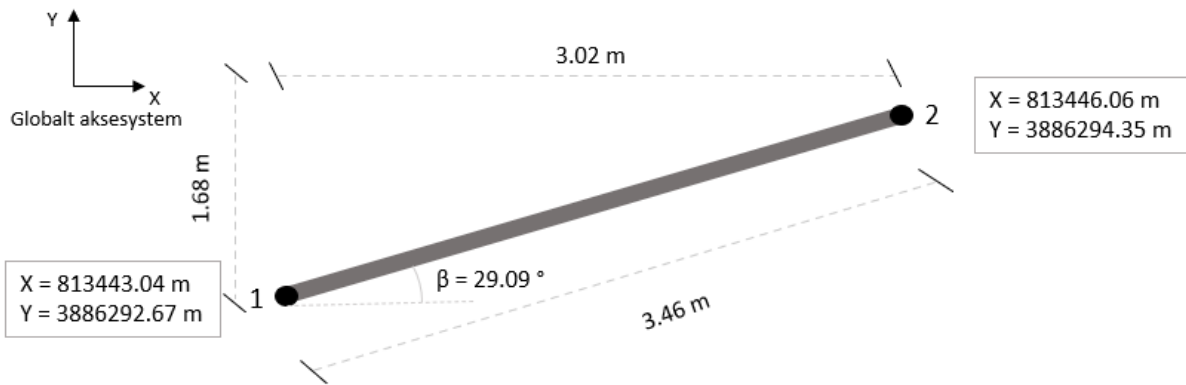
Snødekket på Svalbard inneholder mye kald luft, og dette er med på å sinke smelteomvandlingen. Dette kommer som nevnt tidligere av at snødekket på Svalbard kun blir varmet ovenfra grunnet permafrost. Som følge av dette synker temperaturen lenger ned i snødekket, som figur 72 viser. Dermed vil den oppbyggende omvandlingen av snøen kunne skje nedover i snødekket, og ikke oppover som forklart i kapittel 2.1.3. Når fukttransporten foregår nedover i snødekket, vil det danne seg svake, grovkornede lag nærme bakken med lavere fasthet. En slik massetransport vil også bety at de nedre lagene blir mer vannmettet, og de vil derfor oppnå en høyere densitet sammenlignet med øvre deler av snødekket. En høyere densitet og lavere fasthet vil kunne bety at de nedre lagene er mer utsatt for snøsig, og dette gir opphav til en usikkerhet knyttet til lastfordelingen vist i figur 117.

I tillegg til forskjeller i lastverdi for øvre og nedre lastceller, viser målingene noen ulikheter også for lastverdiene på samme høyde. Et skjevfordelt snødekke vil kunne bidra til en asymmetrisk lastfordeling langs konstruksjonens lengde, sammen med de lokale forskjellene i terrenget. Forskjellene kan være store, og figur 78 viser hvordan snødybden varierer langs støtteforbygningen på Sukkertoppen. Snødybdemålingene presentert i kapittel 5.4.2 viser også hvordan snødybden kan variere. Resultatene fra felteksperimentet i USA viser betydelige forskjeller mellom lastceller på samme høyde. Lastcellene på endene opplever endeffekter som nevnt i kapittel 7.4, og de må derfor ikke sammenlignes direkte uten å ta høyde for dette.

7.7 Sammenligning av simuleringen og snøtrykket på forsøksveggen

Den største begrensningen i simuleringen er inndelingen av meshet i DTM-filen. Inndelingen med 0.8x0.8 meter viste seg å være altfor grov, og resultatene presentert i figur 96 viser derfor urealistiske verdier med blant annet strekkrefter i mange punkter langs forsøksveggen. En terrengskanning med finere inndeling må derfor utføres før nye simuleringer gjennomføres i programvaren.

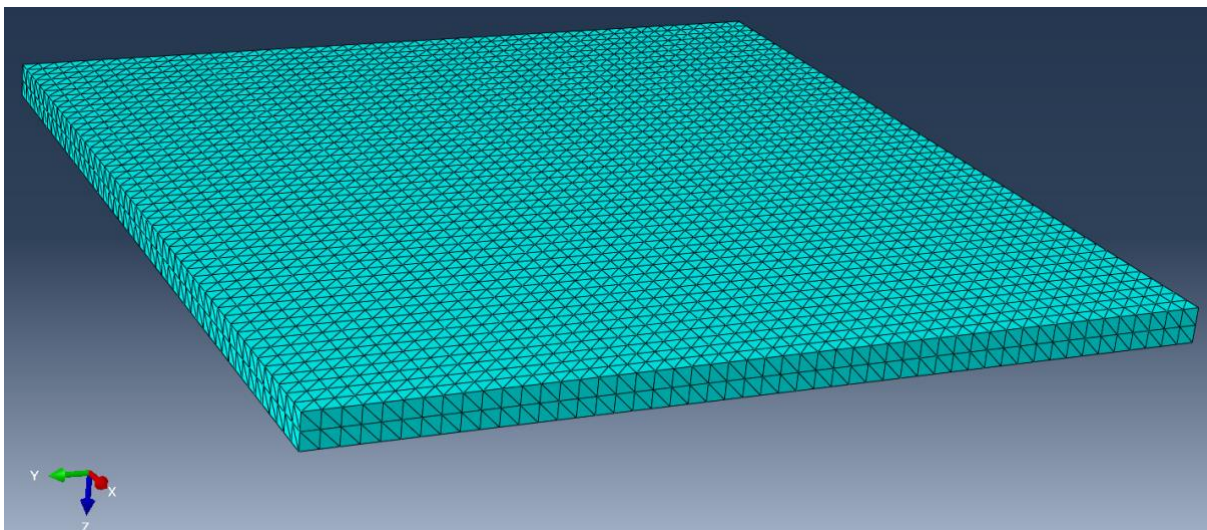
I tillegg til en for grov inndeling av terrenget i DTM-filen, er koordinatene til forsøksveggen unøyaktige. For å definere støtteforbygningen i programvaren, må koordinatene fra hver av endepunktene legges inn. Ett av koordinatene ble hentet ut fra nettsiden til SLTS (UNIS, 2021), og det andre koordinatet ble definert basert på veggens geometri. Programvaren benytter koordinater etter det sveitsiske koordinatsystemet, og koordinatene til forsøksveggen måtte derfor konverteres. Figur 118 viser koordinatene til veggens endepunkter i et globalt XY-plan. Veggens lengde ble beregnet til 3.46 meter og dette belyser unøyaktigheten til koordinatene ettersom veggens faktiske lengde er 3.0 meter.



Figur 118: Figuren viser plasseringen av forsøksveggen etter det sveitsiske koordinatsystemet. Figur: Vetle Basma.

Elementnettet av snødekket er som vist i figur 119. Meshet består av 25 000 tetraederelementer fordelt over to lag i snødekkets høyde. Som nevnt i kapittel 4, er det lineære tetraederelementer som anvendes. Tøyningene og spenningene vil derfor i utgangspunktet være konstante innenfor elementet. Det er som nevnt i kapittel 6.3 knyttet usikkerhet til hvilke punkter som er brukt til å beregne kreftene på elementene, men ut ifra resultatene virker det som at det er beregnet fem punkter langs veggens høyde, som vist i figur 96. Det gir en punktvis konstant FEM-løsning. For å øke presisjonen i simuleringen kunne høyere ordens elementer blitt brukt, for eksempel det lineære tetraederelementet med ti noder ettersom det ville gitt et lineært spenningsfelt.

Hvis DTM-filen hadde hatt en tilstrekkelig fin mesh slik at resultatene fra simuleringen hadde vært realistiske, burde det blitt utført et konvergenstudie for å undersøke om meshet av snødekket er fint nok. Et konvergenstudie utføres ved at flere simuleringer gjennomføres, og meshet forfines før hver simulering. Størrelsen på elementene er tilstrekkelig fine når avviket fra resultatene ved hver simulering er innenfor en forhåndsbestemt toleransegrense.



Figur 119: Modellen viser snødekket inndelt i 25 000 tetraederelementer. Meshet er generert i Abaqus for visualisering. Figur: Vetle Basma.

Deformasjonene i snødekket var relativt små. Dette virker fornuftig ettersom et snødekke med lave temperaturer og høy densitet er mindre utsatt for deformasjoner sammenlignet med et porøst snødekke med høyere temperaturer. For å undersøke

hvordan høyere temperaturer og lavere densitet ville påvirket resultatene, bør det gjennomføres en ny simulering med nye inputverdier.

Snøtrykket på forsøksveggen ble beregnet til 2.02 kN/m^2 med utgangspunkt i målingene. Simuleringen resulterte i et snøtrykk på 0.13 kN/m^2 , noe som kun er $1/15$ av det målingene viser. Denne store differansen og urealistiske resultater i simuleringen gjør det derfor vanskelig å vurdere andre interessante aspekter i programvaren. Det hadde for eksempel vært naturlig å vurdere om materiallovene som defineres basert på forsøk med alpin snø hadde gitt fornuftige resultater for den maritime snøen på Svalbard.

8 Konklusjon

Resultatene fra feltforsøket på Svalbard og beregningene fra Vegvesenet viser god overensstemmelse når endeeffekter er ekskludert, og resultatene underestimerer snøtrykket med 14 % i snitt for sesongene 2019/2020 og 2020/2021. Vegvesenet foreslår å anvende en densitet på 500 kg/m^3 , og dette virker fornuftig også på Svalbard. For resultatene med endeeffekter, overestimerer beregningene fra SVV snøtrykket med 60 % i snitt, og de er dermed svært konservative. Resultatene fra SLF viser at beregningsmetodene fra Sveits er ikke-konservative da de underestimerer snøtrykket med 17 og 55 %, henholdsvis med og uten endeeffekter.

Resultatene fra beregningsmetoder hos Vegvesenet hvor endeeffekter er ekskludert viser derfor best overensstemmelse med målingene fra feltforsøket. Vegvesenet har ikke egne beregningsanvisninger for utregning av endeeffekter, men viser til SLF sine metoder. Glidning av snødekket har stor betydning for størrelsen på endeeffektene, og det er hverken observert glidning av snødekket i feltforsøket til Vegvesenet på Strynfjellene, eller feltforsøket på Svalbard. Snøtrykket på konstruksjonsdeler som er utsatt for endeeffekter kan i henhold til SLF være opptil fem ganger så stort som snøtrykket på en uendelig lang vegg. Gruppen anbefaler derfor å vurdere om Vegvesenets beregningsanvisninger burde suppleres med et eget formelgrunnlag for å vurdere størrelsen på endeeffektene i områder hvor glidning av snødekket er neglisjerbart. Det burde utføres egne feltforsøk med dette som formål.

Ifølge Vegvesenet og SLF er det forventet størst snøtrykk nærmere sommeren når snødekket er isotermt, men før snøsmeltingen har ført til stor reduksjon i snødybde. Ettersom snøakkumulasjonen på Svalbard i hovedsak skyldes drivsnø, er det mulig at snøtrykket varierer i mindre grad ettersom densiteten er relativt høy gjennom hele sesongen. Likevel forventet gruppen størst snøtrykk nærmere sommeren ettersom våt snø har en høy densitet, samtidig som fastheten avtar. Resultatene fra målingene viste størst snøtrykk 20. mars for sesongen 2019/2020 og 25. mai for sesongen 2020/2021.

Resultatene fra målingene viste store forskjeller i lastverdier for de øvre og nedre lastcellene. En av årsakene til dette er arealfordelingen av lasten, og det virker derfor fornuftig at de øvre lastcellene har større lastverdier når snødybdene er større enn høyden til forsøksveggen. I tillegg vil en konstant densitet over snødekkets høyde føre til en økt skjevfordeling av snøtrykket med større trykk på øvre lastceller.

Resultatene fra simuleringen viste seg å være urealistiske ettersom meshet i DTM-filen var for grovt inndelt. Det burde derfor gjennomføres nye simuleringer med en DTM-fil som har en finere inndeling for å vurdere presisjonen til programvaren.

9 Videre arbeid

Underveis i denne oppgaven har det dukket opp flere interessante problemstillinger som gruppen ikke har hatt mulighet til å studere nærmere. De presenteres som ideer til videre arbeid innenfor fagfeltet:

- Montere lastceller på midten av forsøksveggen for å vurdere størrelsen på endeeffektene. Snøtrykket på endene kan være i størrelsesorden fem ganger større enn snøtrykket på en uendelig lang flate. Vil neglisjerbare deformasjoner fra glidning føre til at endeeffektene har mindre betydning på Svalbard, sammenlignet med Alpelandene?
- Se på hvordan støtteforbygningene på Svalbard også fungerer som snøskjermer. Vil støtteforbygningene gjøre at det akkumuleres større snømengder i området, sammenlignet med hvor mye snø som hadde samlet seg uten støtteforbygninger til stede?
- Undersøke hvilke valg som er gjort ved design av støtteforbygningene på Sukkertoppen. Hvilke laster er støtteforbygningene dimensjonert for?
- Videreføre arbeidet presentert i denne oppgaven ved å observere snøtrykket på forsøksveggen i årene fremover.
- Gjennomføre flere simuleringer i 3D Snowpack Simulation Tool med en DTM-fil med tilstrekkelig fint mesh for å vurdere presisjonen til programvaren.

Referanser

- AVALANCHE. (u.å.). *LAYER, SNOW*. Hentet 01.02.2022 fra <https://avalanche.org/avalanche-encyclopedia/layer-snow/>
- Campbell Scientific. (u.å.-a). 107. Hentet 09.02.2022 fra <https://www.campbellsci.com/107>
- Campbell Scientific. (u.å.-b). *CR1000*. Hentet 17.02.2022 fra <https://www.campbellsci.cc/cr1000>
- Campbell Scientific. (u.å.-c). *SR50A-L*. Hentet 08.02.2022 fra <https://www.campbellsci.com/sr50a>
- DS Entreprenør. (2018). *Svalbard, Longyearbyen*. Hentet 08.02.2022 fra <https://dsen.no/project/svalbard-longyearbyen-2018/>
- DSB. (2016). *Skredulykken i Longyearbyen 19. desember 2015*. https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/rapporter/skredulykke_longyearbyen_2015_september2016_web.pdf
- Engeset, R. V., Landrø, M., Indreiten, M., Müller, K., Mikkelsen, O. A. & Hoseth, K. I. A. (2020). *Avalanche warning in Svalbard (35)*. NVE. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2020/rapport2020_35.pdf
- Geobruigg. (u.å.). *Rocco Rockfall Barriers*. Hentet 08.02.2022 fra https://www.geobruigg.com/file-105993/downloadcenter/level1-brochures/ROCCO-barrier/ROCCO_product_profile_210901-EN.pdf
- Geobruigg. (2019). *Sørøya I*. Hentet 08.02.2022 fra <https://www.geobruigg.com/en/Soroya-I-160050.html>
- Haefeli, R., Bader, H., Neher, J., Eckel, O., Thams, C. & Bucher, E. (1939). *Der schnee und seine metamorphose*. Bern, Kommissionsverlag Kümmerly & Frey, Druck von Aschmann & Scheller a.-g.
- HBM. (u.å.). *S-Type S9M Load Cell: Measurements From 500 N To 50 kN*. Hentet 17.02.2022 fra <https://www.hbm.com/en/2425/s9m-high-precision-s-type-load-cell-at-a-low-price/>
- Hewes, J. T. (2017). *Performance Evaluation of Rigid Snow Supporting Structures at the Milepost 151 Avalanche, Jackson, Wyoming (WY-18/01F)*. <https://rosap.nsl.bts.gov/view/dot/42487>
- Hewes, J. T., Decker, R. & Stevens, M. (2016). *SNOW PRESSURES ON A RIGID SNOW SUPPORTING STRUCTURE AT THE MILEPOST 151 AVALANCHE, JACKSON, WYOMING INTERNATIONAL SNOW SCIENCE WORKSHOP 2016 IN BRECKENRIDGE, CO*. International Snow Science Workshop. Hentet 02.03.2022 fra https://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/ISSW16_P1.23.pdf
- Hjorth-Hansen, E., Holand, I., Løset, S. & Norem, H. (2000). *Snow Engineering Recent Advances and Developments*. A.A. Balkema.

- Humlum, O. (u.å.). *ISBREER*. Svalbard Museum. Hentet 05.02.2022 fra <https://svalbardmuseum.no/no/natur/isbreer/>
- Haaland, T. D. (2016, 1. januar). *TIL TOPPS I VINTERFJELLET*. Den Norske Turistforening. Hentet 21.01.2022 fra <https://www.dnt.no/artikler/turtips/7125-til-topps-i-vinterfjellet/>
- Jacobsen, J. A. (2017). *Måling av snøsig i et snødekke i den sentrale delen av Svalbard, Spitsbergen* [Master]. Norge miljø- og biovitenskapelige universitet. <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2500302/Masteroppgave%20-%20Jan%20Jacobsen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jaedicke, C. (2021, 26. august). snøskred. I *Store norske leksikon*. Hentet 08.02.2022 fra <https://snl.no/sn%C3%B8skred>
- Johannesson, T. & Margreth, S. (1999). *Adaptation of the Swiss Guidelines for supporting structures for Icelandic conditions* (VÍ-G99013-ÚR07). Veðurstofa Íslands. <https://www.vedur.is/gogn/snjoflod/varnarvirki/stodvstd-19990715.pdf>
- Jonsson, A., Gauer, P., Jaedicke, C. & Nerland, Ø. (2018). *Detaljprosjektering av sikringstiltak - Lia mellom veg 230 og 228* (20170299-01-R). NGI. https://www.lokalstyre.no/getfile.php/4395526.2046.malmjsskkmkjqmz/20170299-01-R_Prosjekteringsrapport+for+snosamleskjerm.PDF
- Kristensen, K., Gauer, P. & Sverdrup-Thygesen, K. (2017). *Skredsikringstiltak i Gjølmunna, Stryn kommune* (20160581-01-R). NGI. <https://webfileservice.nve.no/API/PublishedFiles/Download/201836959/2465345>
- Kvambekk, S. (2015, 16. februar). *Topptur i Vigdalen med HiSF (16.02.2015)*. peakbook. Hentet 01.03.2022 fra <https://peakbook.org/no/tour/117769/Topptur+i+Vigdalen+med+HiSF.html>
- Landslag. (2003). *SNJÓFLÓÐAVARNIR Á SIGLUFIRÐI*. Hentet 09.02.2022. fra <https://www.landslag.is/verkefni/snjoflodavarnir-a-siglufirdi/#jp-carousel-2360>
- Larsen, J. O. (2016). *Skredsikring og fundamentering i permafrost*. Longyearbyen Lokalstyre. <https://www.lokalstyre.no/skredsikring-og-fundamentering-i-permafrost.6203298-488045.html>
- Lilleøren, K. (2021, 5. august). Permafrost. I *Store norske leksikon*. Hentet 08.02.2022 fra <https://snl.no/permafrost>
- Lilleøren, K. (2018, 14. desember). Aktivt lag (permafrost). I *Store norske leksikon*. Hentet 08.02.2022 fra https://snl.no/aktivt_lag_-_permafrost
- Mamen, J. (2021, 19. mars). klima i Norge. I *Store norske leksikon*. Hentet 30.01.2022 fra https://snl.no/klima_i_Norge
- Margreth, S. (2007). *Defense structures in avalanche starting zones*. Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/natural-hazards/publications-studies/publications/defense-structures-in-avalanche-starting-zones.html>
- Mathisen, K. M. (2021a). *Lecture note 13 "Stress Recovery and Smoothing" in course TKT4192 Finite Element Methods in Strength Analysis*. NTNU. ntnu.blackboard.com

- Mathisen, K. M. (2021b). *Lecture note 16 "Finite Element Formulations for Solid Problems"* in course TKT4192 *Finite Element Methods in Strength Analysis*. NTNU. ntnu.blackboard.com
- Mathisen, K. M. (2021c). *Lecture note 4 "Convergence and Continuity of the FE Solution"* in course TKT4192 *Finite Element Methods in Strength Analysis*. NTNU. ntnu.blackboard.com
- McClung, D. (1982). *A One-dimensional analytical model for snow creep pressures of rigid structures*. NRC Publications Archive. Hentet 22.03.2022 fra <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=c19d30e9-1be1-450b-95ac-d0507637f6ba>
- McClung, D. & Schaerer, P. (2006). *The Avalanche Handbook* (3. utg. utg.). Cordee.
- Milwaukee. (u.å.). *Milwaukee TH310 Digital Thermometer*. Hentet 10.04.2022 fra <https://milwaukeeinstruments.com/milwaukee-th310-digital-thermometer/>
- Mitchell, J. K. & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behaviour* (3rd Edition. utg.). Wiley.
- Moos, M., Bartelt, P., Zweidler, A. & Bleiker, E. (2003). Triaxial tests on snow at low strain rate. Part I. Experimental device. *Journal of Glaciology*, 49 (164), 81-90. <https://doi.org/10.3189/172756503781830881>
- Morin, S. (2014). Observation and numerical modeling of snow on the ground: use of existing tools and contribution to ongoing developments. https://www.researchgate.net/publication/281074449_Observation_and_numerical_modeling_of_snow_on_the_ground_use_of_existing_tools_and_contribution_to_ongoing_developments
- Muñoz, R. & Francisco, J. (2002). *The N-directional approach to constitutive laws* (3-7281-2833-3). vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. <http://hdl.handle.net/20.500.11850/146045>
- NGI. (u.å.-a). *Gode resultater av sikring mot snøskred*. Hentet 21.01.2022 fra <https://www.ngi.no/Nyheter/Aktuelt-fra-NGI/Gode-resultater-av-sikring-mot-snoeskred>
- NGI. (u.å.-b). *Snøskredulykker med død*. Hentet 18.01.2022 fra <https://www.ngi.no/Tjenester/Fagekspertise/Snoeskred/snoskred.no2/Snoeskredulykker-med-dod>
- NGI. (u.å.-c). *Sikringstiltak mot snøskred på Island*. Hentet 09.02.2022 fra <https://www.ngi.no/Prosjekter/Sikringstiltak-mot-snoeskred-paa-Island>
- NGI. (u.å.-d). *Hva skjer med snøen når vi har kaldt, stabilt vintervær?* Hentet 23.01.2022 fra <https://www.ngi.no/Tjenester/Fagekspertise/Snoeskred/snoskred.no2/Laer-om-snoeskred/Hva-skjer-med-snoen-naar-vi-har-kaldt-stabilt-vintervaer>
- NGI. (u.å.-e). *Snøskredforskning*. Hentet 11.01.2022 fra <https://www.ngi.no/Prosjekter/Snoeskredforskning>
- Nikon. (u.å.). *Forestry Pro*. Hentet 08.03.2022 fra <https://imaging.nikon.com/lineup/sportoptics/laser/forestrypro/>

- Norem, H. (2014). *Veger og snøskred*. Statens vegvesen.
https://files.motocross.io/trafikksiden/HB_V138_Veger_snoskred_2014.pdf
- Norem, H., Thordarson, S. & Thøring, E. (2014). *Veger og drivsnø*. Statens vegvesen.
<https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-v137.pdf>
- NRK. (2022, 17. mars). *Ny varmere rekord for Svalbard*. Hentet 12.05.2022 fra
<https://www.nrk.no/nyheter/ny-varmere-rekord-for-svalbard--1.15897455>
- NRK. (u.å.). *To omkom i skred på Svalbard*. Hentet 18.01.2022 fra
<https://www.nrk.no/nyheter/to-omkom-i-skred-pa-svalbard-1.12712496>
- Ólafsson, H., Furger, M. & Brümmer, B. (2007). The weather and climate of Iceland. *Meteorologische Zeitschrift - METEOROL Z*, 16, 5-8.
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2007/0185>
- Paterson, W. S. B. (1994). *The Physics of Glaciers* (3. utg.). Pergamon.
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-14802-X>
- Quervain, M. (1945). *Die Setzung der Schneedecke* (Bd. Nr. 11 (SLF)). Interner Bericht.
- Robbins, T. (2015, 27. oktober). *Exploring Siglufjörður, Iceland, The Best Ski Destination You Can't Pronounce*. Conde Nast Traveler. Hentet 09.02.2022 fra
<https://www.cntraveler.com/stories/2015-10-27/exploring-siglufjordur-iceland-the-best-ski-destination-you-cant-pronounce>
- Rockfall-Ring Net*. (u.å.). Bianchini Ingegnieri Maccaferri. Hentet 08.02.2022 fra
<https://abianchini.es/en/rock-fall-panels-and-lea-panels-ring-net/>
- Rudolf-Miklau, F., Sauer Moser, S. & Mears, A. I. (2015). *The Technical Avalanche Protection Handbook*. Wilhelm Ernst & Sohn.
- Scapozza, C. (2004). *Entwicklung eines dichte- und temperaturabhängigen Stoffgesetzes zur Beschreibung des visko-elastischen Verhaltens von Schnee* [Doctoral]. ETH Zürich.
- Scapozza, C. & Bartelt, P. (2003a). The influence of temperature on the small-strain viscous deformation mechanics of snow: a comparison with polycrystalline ice. *Annals of Glaciology*, 37, 90-96.
<https://doi.org/https://www.cambridge.org/core/journals/annals-of-glaciology/article/influence-of-temperature-on-the-small-strain-viscous-deformation-mechanics-of-snow-a-comparison-with-polycrystalline-ice/15AC18BC2158259E1B53416DE1FCF645>
- Scapozza, C. & Bartelt, P. (u.å.). The influence of temperature and density on the elastic, anelastic and viscous deformation of snow for strain-rates approaching the critical ductile/brittle fracture limit. *Journal of Glaciology*.
- Scapozza, C. & Bartelt, P. (2003b). Triaxial tests on snow at low strain rate. Part II. Constitutive behaviour. *Journal of Glaciology*, 49 (164), 91-101.
<https://doi.org/10.3189/172756503781830890>
- Sciencefacts. (2020, 5. desember). *Drag Force*. Hentet 09.02.2022. fra
<https://www.sciencefacts.net/drag-force.html>
- Sinha, N.K. (1984). ROLE OF TRANSIENT CREEP IN HIGH TEMPERATURE

- TENSILE FAILURE OF ICE. *Scripta Metallurgica*, 18, 777-782. <https://nrc-publications.canada.ca/fra/voir/td/?id=0af56854-5692-4a6e-ba43-39ca2b83c42e>
- SLF. (u.å.-a). *Snow metamorphism*. Hentet 22.01.2022 fra <https://www.slf.ch/en/snow/snow-as-a-material/snow-metamorphism.html>
- SLF. (u.å.-b). *Gliding avalanche*. Hentet 08.02.2022 fra <https://www.slf.ch/en/avalanches/avalanche-science-and-prevention/avalanche-types/gliding-avalanche.html>
- Snøen, B. K. (2019). *Snow pit investigation in relation to snow pressure calculations*. UNIS.
- Statens vegvesen. (2009). *Geoteknikk i veibygging*. http://www.eiendomsinformasjon.no/files/handbok_016.pdf
- Stoffel, M. (2006). *Numerical modelling of snow using finite elements* [Doctoral]. ETH Zürich. <http://hdl.handle.net/20.500.11850/149293>
- SUUNTO. (u.å.). *SUUNTO PM-5 / 360 PC CLINOMETER*. Hentet 08.03.2022 fra <https://www.suunto.com/nb-no/Products/Compasses/Suunto-PM-5/Suunto-PM-5360-PC/>
- Svalbard Blues. (2015, 14. september). *Klima og lysforhold på Svalbard*. <https://www.svalbardblues.com/svalbard/klima-og-lysforhold/>
- swisstopo, Federal Office of Topography. (u.å.). *The Swiss coordinates system*. Hentet 02.06.2022 fra <https://www.swisstopo.admin.ch/en/knowledge-facts/surveying-geodesy/coordinates/swiss-coordinates.html>
- Tesaker, E. (1969). *Uniform Turbidity Current Experiments* [Doctor]. Norwegian Institute of Technology.
- Thuesen, N. P. & Barr, S. (2021, 8. november). Svalbard. I *Store norske leksikon*. Hentet 11.03.2022 fra https://snl.no/Svalbard#-Klima_og_miljø
- UNIS. (2021). *Snow Load Testing System*. Hentet 09.02.2022. fra http://158.39.149.181/Snow_wall/index.html
- Vaisala. (u.å.). *HUMICAP® Humidity and Temperature Probe HMP155*. Hentet 17.02.2022 fra <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/weather-stations-and-sensors/hmp155>
- Varsom. (u.å.-a). *Wind-drifted snow (slab avalanches)*. Hentet 08.02.2022 fra <https://www.varsom.no/en/avalanche-bulletins/avalanche-problems/wind-drifted-snow-slab-avalanches/>
- Varsom. (u.å.-b). *Hva er det svake laget? Og hvilke egenskaper har dette laget?* Hentet 03.02.2022 fra <https://varsom.no/snoskredskolen/del-informasjon/skredproblem/>
- Varsom. (u.å.-c). *Snøskredstørrelser*. Hentet 16.02.2022 fra <https://varsom.no/snoskredskolen/snoskredvarselet-forklaring/snoskredstørrelser/>
- Varsom. (2021, 9. desember). *Varmt vær gir økende snøskredfare*. Hentet 08.02.2022 fra <https://www.varsom.no/nytt/nyheter-snoskred/varmt-vaer-gir-okende-snoskredfare/>

- Varsom. (u.å.-d). *Vedvarende svake lag*. Hentet 02.02.2022 fra <https://www.varsom.no/snoskredskolen/skredfarevurdering-og-faretegn/vedvarende-svake-lag/?ref=mainmenu>
- Wallace, K. (2019, 4. juli). *Beyond frozen*. The Star. Hentet 08.02.2022 fra <https://projects.thestar.com/climate-change-canada/nunavut/>
- Winther, J. G., Gerland, S., Gabrielsen, G. W., Moholdt, G. & Sundfjord, A. (2016). Klimaendringer i Arktis. *Naturen*, 140 (5), 202-218. <https://doi.org/10.18261/issn.1504-3118-2016-05-04>
- Yr. (u.å.). *Svalbard LH*. Hentet 17.03.2022 fra <https://www.yr.no/nb/historikk/graf/5-99840/Norge/Svalbard/Svalbard/Svalbard%20LH?q=2020>
- Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L. (1997). The finite element patch test revisited a computer test for convergence, validation and error estimates. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 149, 223-254. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045782597000856?via%3Dihub>
- Øvrebø, O. A. (2022, 10. mars). *De totale utslippene*. Energi og Klima. Hentet 08.04.2022 fra <https://energiogklima.no/klimavakten/global-utslipp/>

Vedlegg

Vedlegg A: Beregningsmetoder snøtrykk.xlsx

Vedlegg B: Resultater fra sesongen 2021/2022

Vedlegg C: Korrigert data.xlsx

Vedlegg D: 2021 snow temperature.xlsx

Vedlegg E: Målinger Svalbardtur.xlsx

Vedlegg F: Densitetsmålinger UNIS-studenter.xlsx

Vedlegg G: Densitetsmåling 07.07.2021.xlsx

Vedlegg H: Krefter.xlsx

Vedlegg I: Deformasjoner.xlsx

Vedlegg J: Snøtrykk_vs_snødybde.xlsx

Vedlegg A: Beregningsmetoder snøtrykk.xlsx

A.1: 2019/2020-sesongen

| | A | B |
|----|---------------------------------|--------------|
| 1 | SLF | |
| 2 | | |
| 3 | Høyde forsøksvegg | 1,50 |
| 4 | | |
| 5 | Factors | Value |
| 6 | N | 1,20 |
| 7 | $K/\sin(2*\alpha)$ | 0,92 |
| 8 | K | 0,62 |
| 9 | H (m) | 1,92 |
| 10 | H_vertical | 2,06 |
| 11 | ρ (t/m ³) | 0,50 |
| 12 | g (m/s ²) | 10 |
| 13 | α | 21 |
| 14 | | |
| 15 | S'N (kN/m) | 7,81 |
| 16 | | |
| 17 | S'N_P (kN/m ²) | 3,80 |
| 18 | | |
| 19 | | |
| 20 | END EFFECTS | |
| 21 | | |
| 22 | | |
| 23 | | |
| 24 | | |
| 25 | Factors | Value |
| 26 | S'N_P (kN/m ²) | 3,80 |
| 27 | fr | 2,5 |
| 28 | DK(m) | 1,50 |
| 29 | ΔL (m) | 0,50 |
| 30 | B_vegg (m) | 3,00 |
| 31 | | |
| 32 | S'R (kN/(m* ΔL)) | 9,50 |
| 33 | S'R_P (kN/m ²) | 3,17 |
| 34 | | |
| 35 | | |
| 36 | Total (kN/m²) | 6,96 |

| | A | B |
|----|---------------------------------|----------------------------|
| 1 | SLF | |
| 2 | | |
| 3 | Høyde forsøksvegg | 1,5 |
| 4 | | |
| 5 | Factors | Value |
| 6 | N | 1,2 |
| 7 | $K/\sin(2*\alpha)$ | 0,92 |
| 8 | K | =B7*SIN(RADIANER((2*B13))) |
| 9 | H (m) | 1,92 |
| 10 | H_vertical | =B9/(COS(RADIANER(B13))) |
| 11 | ρ (t/m ³) | 0,5 |
| 12 | g (m/s ²) | 10 |
| 13 | α | 21 |
| 14 | | |
| 15 | S'N (kN/m) | =B6*B8*B10^2*B11*B12*0,5 |
| 16 | | |
| 17 | S'N_P (kN/m ²) | =B15/B10 |
| 18 | | |
| 19 | | |
| 20 | END EFFECTS | |
| 21 | | |
| 22 | | |
| 23 | | |
| 24 | | |
| 25 | Factors | Value |
| 26 | S'N_P (kN/m ²) | =B17 |
| 27 | fr | =1+1,25*B6 |
| 28 | DK(m) | =1,5 |
| 29 | ΔL (m) | =B28/3 |
| 30 | B_vegg (m) | 3 |
| 31 | | |
| 32 | S'R (kN/(m* ΔL)) | =B26*B27 |
| 33 | S'R_P (kN/m ²) | =(2*B32*B29/B30) |
| 34 | | |
| 35 | | |
| 36 | Total (kN/m²) | =B33+B17 |

| | A | B |
|----|---|--------------|
| 1 | Vegvesenet | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | Faktorer | Verdi |
| 5 | ρ | 500 |
| 6 | g | 10 |
| 7 | h | 1,92 |
| 8 | α | 21,00 |
| 9 | N | 1,2 |
| 10 | | |
| 11 | | |
| 12 | σ_x (kN/m²) | 7,31 |
| 13 | | |
| 14 | | |
| 15 | | |
| 16 | END EFFECTS ARE CALCULATED | |
| 17 | IN THE SAME MANNER AS SLF | |
| 18 | | |
| 19 | | |
| 20 | Factors | Value |
| 21 | S'N (kN/m) | 7,31 |
| 22 | f_r | 2,5 |
| 23 | DK(m) | 1,50 |
| 24 | ΔL (m) | 0,50 |
| 25 | B_vegg (m) | 3,00 |
| 26 | | |
| 27 | S'R (kN/(m*ΔL)) | 18,28 |
| 28 | S'R_P (kN/m²) | 6,09 |
| 29 | | |
| 30 | | |
| 31 | Total (kN/m²) | 13,41 |

| | A | B |
|----|---|--|
| 1 | Vegvesenet | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | Faktorer | Verdi |
| 5 | ρ | 500 |
| 6 | g | 10 |
| 7 | h | 1,92 |
| 8 | α | 21 |
| 9 | N | 1,2 |
| 10 | | |
| 11 | | |
| 12 | σ_x (kN/m²) | =$3,125 * \sin(\text{RADIANTER}(B8)) * (0,25 * (\sin(\text{RADIANTER}(B8)))^{0,5} + 0,05)^{0,5} + 0,28 * \cos(\text{RADIANTER}(B8))) * B5 * B6 * B7 * 10^{-3}$ |
| 13 | | |
| 14 | | |
| 15 | | |
| 16 | END EFFECTS ARE CALCULATED | |
| 17 | IN THE SAME MANNER AS SLF | |
| 18 | | |
| 19 | | |
| 20 | Factors | Value |
| 21 | S'N (kN/m) | = $3,125 * \sin(\text{RADIANTER}(B8)) * (0,25 * (\sin(\text{RADIANTER}(B8)))^{0,5} + 0,05)^{0,5} + 0,28 * \cos(\text{RADIANTER}(B8))) * B5 * B6 * B7 * 10^{-3}$ |
| 22 | f_r | = $1 + 1,25 * B9$ |
| 23 | DK(m) | 1,5 |
| 24 | ΔL (m) | = $B23 / 3$ |
| 25 | B_vegg (m) | 3 |
| 26 | | |
| 27 | S'R (kN/(m*ΔL)) | = $B21 * B22$ |
| 28 | S'R_P (kN/m²) | = $(2 * B27 * B24 / B25)$ |
| 29 | | |
| 30 | | |
| 31 | Total (kN/m²) | = $B28 + B12$ |

A.2: 2020/2021-sesongen

| | A | B |
|----|---|--------------|
| 1 | SLF | |
| 2 | | |
| 3 | Høyde forsøksvegg | 1,50 |
| 4 | | |
| 5 | Factors | Value |
| 6 | N | 1,20 |
| 7 | $K/\sin(2*\alpha)$ | 0,92 |
| 8 | K | 0,62 |
| 9 | H (m) | 3,02 |
| 10 | H_vertical | 3,23 |
| 11 | ρ (t/m ³) | 0,50 |
| 12 | g (m/s ²) | 10 |
| 13 | α | 21 |
| 14 | | |
| 15 | S'N (kN/m) | 19,33 |
| 16 | | |
| 17 | S'N_P (kN/m²) | 5,97 |
| 18 | | |
| 19 | | |
| 20 | END EFFECTS | |
| 21 | | |
| 22 | | |
| 23 | | |
| 24 | | |
| 25 | Factors | Value |
| 26 | S'N_P (kN/m ²) | 5,97 |
| 27 | fr | 2,5 |
| 28 | DK(m) | 1,50 |
| 29 | ΔL (m) | 0,50 |
| 30 | B_vegg (m) | 3,00 |
| 31 | | |
| 32 | S'R (kN/(m*ΔL)) | 14,94 |
| 33 | S'R_P (kN/m²) | 4,98 |
| 34 | | |
| 35 | | |
| 36 | Total (kN/m²) | 10,95 |

| | A | B |
|----|---|--------------|
| 1 | Vegvesenet | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | Faktorer | Verdi |
| 5 | ρ | 500 |
| 6 | g | 10 |
| 7 | h | 3,02 |
| 8 | α | 21,00 |
| 9 | N | 1,2 |
| 10 | | |
| 11 | | |
| 12 | σ_x (kN/m²) | 11,50 |
| 13 | | |
| 14 | | |
| 15 | | |
| 16 | END EFFECTS ARE CALCULATED | |
| 17 | IN THE SAME MANNER AS SLF | |
| 18 | | |
| 19 | | |
| 20 | Factors | Value |
| 21 | S'N (kN/m) | 11,50 |
| 22 | fr | 2,5 |
| 23 | DK(m) | 1,50 |
| 24 | ΔL (m) | 0,50 |
| 25 | B_vegg (m) | 3,00 |
| 26 | | |
| 27 | S'R (kN/(m*ΔL)) | 28,76 |
| 28 | S'R_P (kN/m²) | 9,59 |
| 29 | | |
| 30 | | |
| 31 | Total (kN/m²) | 21,09 |

Vedlegg B: Resultater fra sesongen 2021/2022

