

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet Fakultet for miljøvitenskap og teknologi Institutt for matematiske realfag og teknologi

Masteroppgave 2014 30 stp

Vindtunnelstudie av redistribusjon av snø på flate tak med solfangere

A Wind Tunnel Study of Snow Redistribution on Flat Roofs with Solar Collectors



Markus Fredrik Molnar

# Forord

Denne masteroppgaven er utført av Markus Fredrik Molnar våren 2014. Oppgaven avlegges som en avsluttende del av studiet Byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Arbeidet med oppgaven er utført i Ås og Coimbra, Portugal i tidsrommet 6. januar – 13. mai 2014.

En stor takk til min kjæreste Silje Thorsnes, som har vært hjelpsom underveis i prosessen og en viktig motivator. Min mor og far har bidratt med korrekturlesing og støtte under arbeidet med oppgaven, noe jeg er svært takknemlig for. Jeg retter en stor takk til Arnold Vinje Erichsen for god hjelp til bygging av skalamodell, utførelse av forsøk i vindtunnel og faglige diskusjoner tilknyttet oppgaven. Jeg ønsker også å takke Erichsen for godt selskap under oppholdet i Portugal.

Takk til University of Coimbra (UC) og forskningsinstitusjonen ADAI for tillatelse til bruk av vindtunnel i forbindelse med oppgaven. I tillegg ønsker jeg å takke Professor Almerindo Ferreira ved UC for hjelp i forbindelse med skalaforsøkene, faglig samt praktisk hjelp, og hyggelig samvær under oppholdet i Portugal.

Veileder for oppgaven var Professor Thomas K. Thiis ved NMBU. Jeg ønsker å takke Thiis for god veiledning gjennom oppfølgning på et høyt faglig nivå i forbindelse med oppgaven. Jeg vil også takke Thiis for hyggelig samvær under oppholdet i Portugal.

NMBU, Ås, 14.05.2014

Markus Fredrik Molnar

# Sammendrag

I denne oppgaven er det tatt sikte på å finne modeller for redistribusjon av snø på flate tak med solfangere. Videre er fokus er rettet mot sammenligning av resultater fra forsøk i vindtunnel med metoder for beregning av formfaktor for tak i henhold til snølaststandarden NS-EN 1991-1-3. Oppgaven er avgrenset til redistribusjon av snø på tak. Det er dermed ikke er tatt høyde for nedbør, transport av snø fra terreng til takflaten eller snømetamorfose.

Forsøksresultatene er fremstilt ved skalaforsøk i vindtunnel, og det er gjennomført referanseforsøk uten paneler som sammenligningsgrunnlag. Skalaforsøkene er gjennomført ut fra tre variabler: solfangernes vertikale avstand til takflaten, antall solfangerpaneler samt solfangernes orientering i forhold til vindretningen.

Ved lavere vindhastigheter vises en økt skjærhastighet langs modellens topplate ved forsøk med solfangere enn forsøk gjort uten solfangere. Overført til bygninger i fullskala gis økte påkjenninger på takkonstruksjonen, som kan føre til skjerpede krav til taktekking.

Resultater fra forsøk med vind mot panelenes absorbatorside viser at den totale mengden sand på modellen etter endt forsøker større enn for referanseforsøket, mens forsøk med vind mot panelenes bakside viser det motsatte. Det vises også at akkumulasjon av sand i større grad konsentreres mot modellens midtpunkt enn hva som er tilfelle for referanseforsøket. For reelle bygninger vil en økt lokal konsentrasjon av snø føre til uønskede lokale snølaster.

Forsøksresultatene viser en økt erosjon av sand ved en økning i antall paneler. Den økte erosjonen for forsøkene tilsier at for reelle bygg vil snølasten reduseres. Det beregnede dimensjonerende lasttilfellet for forsøkene gir videre en reduksjon i forhold til snølaststandardens formulering for snølast på flate tak.

Det dimensjonerende lasttilfellet for forsøkene ble også sammenlignet med snølaststandardens formuleringer for snølast på flate tak med projeksjoner. Formuleringen gjelder imidlertid kun for vertikalt stilte projeksjoner direkte på takflaten. Beregningene gjort etter snølaststandardens metode gir en betydelig økt snølast med øking i antall projeksjoner. Snølaststandardens formulering anses dermed som konservativ for beregningene gjort ut fra forsøksresultatenes verdier.

## Abstract

In this thesis, the aim is to determine models for snow redistribution on flat roofs with solar collectors. Furthermore, the focus is directed towards the comparison of results from wind tunnel experiments with the methods for calculation of the snow load shape coefficient presented in NS-EN 1991-1-3. Precipitation, snow transport from the surrounding terrain to the roof and snow metamorphosis is not taken into account, as the thesis is limited to snow redistribution.

The experimental results were obtained through wind tunnel experiments. Base case experiments without solar collectors were carried out for comparison. The scale model experiments are carried out through three variables: the collectors' vertical distance from the roof surface, the number of solar collectors and the orientation relatively to the wind direction.

The experiments show that the shear velocity along the rooftop for the experiments with solar collectors is larger compared to the base case experiments at lower wind velocities. For full-scale buildings, this will lead to an increase in the stress on the roof surface.

The results from the experiments with wind direction towards the solar panels' absorber side show that the amount of sand left on the model is greater than for the base case experiment. The results from the experiments with wind direction towards the backside of the panels show the opposite. It appears that the deposition of sand concentrates near the centre of the scale model. For buildings, an increasing concentration of snow leads to local snow loads.

The sand erosion increased with the number of solar collector panels. This increase in eroded sand indicates a reduction of the snow loads for buildings. The calculated load for the measured values from the experiments is less than the load for persistent design situations for flat roofs according to NS-EN 1991-1-3.

The design load calculated from the measured values from the experiments was also compared to the methods described in NS-EN 1991-1-3 for snow loads on flat roofs with projections. However, this method is only valid for projections directly onto the roof surface. The calculations according to NS-EN 1991-1-3, provide a significantly increased snow load with an increase in the number of projections. Thus the method described in NS-EN 1991-1-3 is considered conservative based on the calculated load for the measured values from the experiments

# Figurer

| Kapittel 2:  |
|--|
| Figur 1. Formfaktorer ved dimensjonering for snølast på tak med projeksjoner. Gjengivelse av figur 6.1 i   |
| Figur 2 Vekst og separasion av grenselaget i en strømning, som følge av den økende trykkgradienten   |
| Figure Einnemore & Franzini (2000)   |
| Figur 3 Trukkgradiender med verdi C for vind mot lo vegg (venstre) og tak (høvre) Figur: Proced m fl   |
| (2000) $(2000)$  |
| Figur 4 Luftstrømmer over bygg (2) uten og (b) med solfangere. Figur: Väsies m fl (2012)   |
| Figur 5. Fargediagrammer av vindhastighetene ved snittplan giennom (a) vestvendt fasade. (b) midten av   |
| modellen og (c) østvendt fasade Figur: Väsies m fl (2012)  |
| Figur 6 Koniske virvler ved vind 45° mot bygget Figur: Väsies m fl (2012)  |
| Figur 7 Kryp (1) saltasion (2) og suspension (3) Figur: Ramberg (2009)   |
| Figur 8 Snøfonndannelse ved et Wyoming snøgjerde med 50 % porøsitet 15° helning medvinds og en   |
| spalte tilsvarende 15 % av snøgjerdets høyde . Profil nr. 1 er registrert 01.11.83, nr. 2 den 30.11,   |
| nr. 3 den 07.12, nr. 4 den 12.12, nr. 5 den 20.12, nr. 6 den 01.01.84 og nr. 7 den 07.03. Figur:   |
| Tabler (1988)  |
| Figur 9. Sammenligning av likevektsprofiler ved to 3,8 m høye Wyoming-snøgjerder med 15° helning<br>medvinds, med avstand lik henholdsvis 30 cm (heltrukken linje) og 90 cm (stiplet linje) mellom<br>snøgjerdenes underkant og underlaget. Figur: Tabler (1986) |
| Figur 10. Effekten på snølagring av en spalte mellom underkant snøgjerde og underlag. Figur: Tabler (1994)   |
| Figur 11. Månedlig solinnstråling på horisontalplanet [W/m <sup>2</sup> ] for Oslo, Tromsø og Hamburg. Figur:<br>Andresen (2008)   |
| Figur 12. Venstre: solfangere sett fra siden. Høyre: solfangere sett ovenfra. Figur: M.F. Molnar etter<br>Affordable Solar (Ukjent dato)   |
| Figur 13. Vindprofil målt i vindtunnelen nær testobjektets plassering på testområdet. Figur: Ferreira & Sanchez (2009)   |
| Figur 14. Redistribusjon av tre partikkeltyper påmodellens nedre flate. Figur: Zhou m.fl (Upublisert)26  |
| Kapittel 3:  |
| Figur 15. Oversikt over vindtunnelens testområde   |
| Figur 16. Målsatt 3D-tegning av skalamodellen brukt i forsøkene  |
| Figur 17. Oversikt over innbyrdes avstander mellom solfangerpanelene   |
|  |

| Figur 18. Plassering av modell samt definisjon av aksesystemet brukt i forsøkene, sett ovenfra           | 31 |
|--|----|
| Figur 19. Definisjon av modellens orientering i forhold til vindretningen (vist med piler). Til venstre: |    |
| positiv orientering. Til høyre: negativ orientering  | 32 |
| Figur 20. Til venstre vises modellen like før registrering av viftefrekvens w = 225 rpm ved forsøk       |    |
| SC_E_5_8_N. Til høyre vises hvordan de forhåndsbestemte nivåene ble registrert for å kunne               |    |
| bearbeide data videre  | 34 |

Kapittel 4:

| Figur 21. Vindhastigheter ved innløpet. Den vertikale aksen vise  | er vindhastighet. Den horisontale aksen    |
|---|--|
| viser avstand fra innløpets nedre venstre hjørne sett fra te      | estområdet mot innløpet38                  |
| Figur 22. Vindhastigheter over testområdet og i utløpet           |  |
| Figur 23. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC_E_0_0             |  |
| Figur 24. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsø | øk SC_E_0_040                              |
| Figur 25. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC_E_2_8_N           |  |
| Figur 26. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for fors  | øk SC_E_2_8_N41                            |
| Figur 27. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC_E_2_8_P           |  |
| Figur 28. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsø | øk SC_E_2_8_P42                            |
| Figur 29. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC_E_2_16_N          |  |
| Figur 30. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forse | vk SC_E_2_16_N43                           |
| Figur 31. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC_E_2_16_P          |  |
| Figur 32. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forse | ۶k SC_E_2_16_P44                           |
| Figur 33. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC_E_2_24_N          |  |
| Figur 34. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for fors  | øk SC_E_2_24_N45                           |
| Figur 35. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC_E_2_24_P          |  |
| Figur 36. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for fors  | øk SC_E_2_24_P46                           |
| Figur 37. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC E 3 8 N           |  |
| Figur 38. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for fors  | øk SC_E_3_8_N47                            |
| Figur 39. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC E 3 8 P           |  |
| Figur 40. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for fors  | øk SC E 3 8 P48                            |
| Figur 41. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC_E_3_16_N          |  |
| Figur 42. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for fors  | øk SC_E_3_16_N49                           |
| Figur 43. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC E 3 16 P          |  |
| Figur 44. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for fors  | øk SC E 3 16 P50                           |
| Figur 45. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC E 3 24 N          |  |
| Figur 46. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for fors  | øk SC E 3 24 N                             |
| Figur 47. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC E 3 24 P          |  |
| Figur 48. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for fors  | øk SC E 3 24 P52                           |
| Figur 49. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC E 5 8 N           |  |
| Figur 50. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for fors  | øk SC E 5 8 N53                            |
| Figur 51. Erosionsdiagram i plan, for forsøk SC E 5 8 P           |  |
| Figur 52. Erosionsdiagram i snitt giennom senterlinien, for forse | øk SC E 5 8 P54                            |
| Figur 53. Erosionsdiagram i plan, for forsøk SC E 5 16 N          |  |
| Figur 54. Erosionsdiagram i snitt giennom senterlinien, for forse | % SC E 5 16 N                              |
| Figur 55. Erosionsdiagram i plan, for forsøk SC E 5 16 P          | 56   |
| Figur 56. Erosionsdiagram i snitt giennom senterlinien, for fors  | ok SC E 5 16 P                             |
| Figur 57. Erosionsdiagram i plan, for forsøk SC E 5 24 N          | 57   |
| Figur 58. Erosjonsdiagram i snitt giennom senterlinien, for forsø | % SC E 5 24 N                              |
| Figur 59. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC E 5 24 P          | 58   |
| Figur 60. Erosjonsdiagram i snitt giennom senterlinien for forse  | % SC E 5 24 P                              |
| Figur 61. Sandlagets høyde ved forsøk SC D 0 0 T0 og SC D         | 0.0 T6 (øverst), og differansen mellom     |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)                           | 0 0 10 (preist), og unteransen menom<br>61 |
| Figur 62 Skalamodell etter forsøk SC D 2 8 N Vindretning i        | nedenfra 62                                |
| i igai 02. Skalamodon edel totspk SC_D_2_0_11. V multuning i      |  |

| Figur 63. Skalamodell etter forsøk SC_D_2_8_N. Vindretning fra høyre                             |
|--|
| Figur 64. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_2_8_N (øverst), og differansen mellom  |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)63  |
| Figur 65. Skalamodell etter forsøk SC_D_2_8_P. Vindretning nedenfra                              |
| Figur 66. Skalamodell etter forsøk SC_D_2_8_P. Vindretning fra høyre64                           |
| Figur 67. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_2_8_P (øverst), og differansen mellom  |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)65  |
| Figur 68. Skalamodell etter forsøk SC_D_2_24_N. Vindretning nedenfra                             |
| Figur 69. Skalamodell etter forsøk SC_D_2_24_N. Vindretning fra høyre                            |
| Figur 70. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_2_24_N (øverst), og differansen mellom |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)67  |
| Figur 71. Skalamodell etter forsøk SC_D_2_24_P. Vindretning nedenfra                             |
| Figur 72. Skalamodell etter forsøk SC_D_2_24_P. Vindretning fra høyre                            |
| Figur 73. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_2_24_P (øverst), og differansen mellom |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)69  |
| Figur 74. Skalamodell etter forsøk SC_D_3_8_N. Vindretning nedenfra70                            |
| Figur 75. Skalamodell etter forsøk SC_D_3_8_N. Vindretning fra høyre70                           |
| Figur 76. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_3_8_N (øverst), og differansen mellom  |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)71  |
| Figur 77. Skalamodell etter forsøk SC_D_3_8_P. Vindretning nedenfra72                            |
| Figur 78. Skalamodell etter forsøk SC_D_3_8_P. Vindretning fra høyre72                           |
| Figur 79. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_3_8_P (øverst), og differansen mellom  |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)73  |
| Figur 80. Skalamodell etter forsøk SC_D_3_24_N. Vindretning nedenfra74                           |
| Figur 81. Skalamodell etter forsøk SC_D_3_24_N. Vindretning fra høyre74                          |
| Figur 82. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_3_24_N (øverst), og differansen mellom |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)75  |
| Figur 83. Skalamodell etter forsøk SC_D_3_24_P. Vindretning nedenfra76                           |
| Figur 84. Skalamodell etter forsøk SC_D_3_24_P. Vindretning fra høyre                            |
| Figur 85. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_3_24_P (øverst), og differansen mellom |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)77  |
| Figur 86. Skalamodell etter forsøk SC_D_5_8_N. Vindretning nedenfra78                            |
| Figur 87. Skalamodell etter forsøk SC_D_5_8_N. Vindretning fra høyre78                           |
| Figur 88. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_5_8_P (øverst), og differansen mellom  |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)  |
| Figur 89. Skalamodell etter forsøk SC_D_5_8_P. Vindretning nedenfra                              |
| Figur 90. Skalamodell etter forsøk SC_D_5_8_P. Vindretning fra høyre80                           |
| Figur 91. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_5_8_P (øverst), og differansen mellom  |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)  |
| Figur 92. Skalamodell etter forsøk SC_D_5_24_N. Vindretning nedenfra                             |
| Figur 93. Skalamodell etter forsøk SC_D_5_24_N. Vindretning fra høyre                            |
| Figur 94. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_5_24_N (øverst), og differansen mellom |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)  |
| Figur 95. Skalamodell etter forsøk SC_D_5_24_P. Vindretning nedenfra                             |

| Figur 96. Skalamodell etter forsøk SC_D_5_24_P. Vindretning fra høyre                               | .84 |
|---|-----|
| Figur 97. Sandlagets høyde ved forsøk SC_D_0_0 T0 og SC_D_5_24_P (øverst), og differansen mellor    | n   |
| sandlaget ved de to målingene (nederst)   | .85 |
| Figur 98. Prosentvis differanse mellom total erosjon for SC_D_0_0 T6, og øvrige akkumulasjonsforsøk |     |
| med 8 mm avstand mellom panelenes underkant og topplaten.   | .87 |
| Figur 99. Prosentvis differanse mellom total erosjon for SC_D_0_0 T6, og øvrige akkumulasjonsforsøk |     |
| med 24 mm avstand mellom panelenes underkant og topplaten.  | .87 |

# Tabeller

| Kapittel 2:   |    |
|---|----|
| Tabell 1. Et utvalg anbefalte vinkler for solfangere  | 22 |
| Tabell 2. Oversikt over de fysiske egenskaper til partikkeltypene brukt i Zhou m.fl. (Upublisert)     | 26 |
| Kapittel 3:   |    |
| Tabell 3. Oversikt over de totalt 19 erosjonsforsøkene gjennnomført i forbindelse med oppgaven        | 33 |
| Tabell 4. Oversikt over de totalt 13 akkumulasjonsforsøk gjennomført i forbindelse med oppgaven       | 35 |
| Kapittel 4:   |    |
| Tabell 5. Resultater fra kalibrering av vindtunnelens rotasjonshastighet mot de målte vindhastigheter | 37 |
| Tabell 6. Prosentvis differanse av total sanderosjon mellom SC_D_0_0 T6 og de øvrige                  |    |
| akkumulasjonsforsøk   | 86 |

# Innhold

| Forord      |  | I    |
|-------------|--|------|
| Sammendra   | g  | II   |
| Abstract    |  | III  |
| Figurer     |  | IV   |
| Tabeller    |  | VIII |
| 1.0 Innled  | ning   |      |
| 1.1 Bak     | grunn  |      |
| 1.2 Avg     | rensning og problemstilling                        |      |
| 1.3 Disp    | posisjon   |      |
| 2.0 Teori   |  | 3    |
| 2.0 1 COII. | sentasion av snølaststandarden                     | 3    |
| 2.1 110     | Restemmelse av snølast                             | 3    |
| 2.1.2       | Formfaktoren <b>u</b>                              |      |
| 2.2 Innf    | Føring i fluiddynamikk                             |      |
| 2.2.1       | Trvkk  |      |
| 2.2.2       | Densitet og viskositet                             |      |
| 2.2.3       | Laminær og turbulent strømning                     |      |
| 2.2.4       | Grenselag  |      |
| 2.2.5       | Fullt utviklet strømningsmønster                   | 6    |
| 2.2.6       | Strømninger med frie overflater                    | 7    |
| 2.2.7       | Separasjon   |      |
| 2.2.8       | Bernoullis ligning og Venturieffekten              |      |
| 2.2.9       | Pitotrør   | 9    |
| 2.3 Innf    | øring i vindteori                                  |      |
| 2.3.1       | Atmosfærisk trykk                                  |      |
| 2.3.2       | Geostrofisk vind                                   |      |
| 2.3.3       | Vind i grenselaget – det logaritmiske vindprofilet |      |
| 2.3.4       | Vind rundt bygninger                               |      |
| 2.4 Innf    | øring i snøteori                                   |      |
| 2.4.1       | Kryp   |      |
| 2.4.2       | Saltasjon  |      |
| 2.4.3       | Suspensjon   |      |
| 2.4.4       | Kombinasjoner                                      |      |
| 2.4.5       | Avsetting av vindtransportert snø                  |      |
| 2.4.6       | Redistribusjon av snø på tak ved snødriv           |      |
| 2.4.7       | Likevektsprofil ved snøfonner                      |      |
| 2.4.8       | Snøgjerder med spalte                              | 19   |
| 2.4.9       | Snøfluks   |      |
| 2.5 Solf    | angere   | 21   |
| 2.5.1       | Optimal vinkel for solfangere                      |      |
| 2.5.2       | Optimal avstand mellom rader med solfangerpaneler  | 23   |
| 2.6 Skal    | aforsøk  | 24   |
| 2.6.1       | Erosjonsforsøk                                     | 24   |

| 2.6.2       | Akkumulasjonsforsøk                                      | 25       |  |  |
|-------------|--|----------|--|--|
| 3.0 Metod   | e  |          |  |  |
| 3.1 Met     | ode, skalaforsøk i vindtunnel                            |          |  |  |
| 3.1.1       | 3.1.1 Om vindtunnelen                                    |          |  |  |
| 3.1.2       | Om skalamodellen   | 29       |  |  |
| 3.1.3       | Kalibrering av vindtunnel                                |          |  |  |
| 3.1.4       | Om forsøkene   |          |  |  |
| 3.1.5       | Gjennomføring av erosjonsforsøk                          |          |  |  |
| 3.1.6       | Gjennomføring av akkumulasjonsforsøk                     |          |  |  |
| 4.0 Result  | ater   |          |  |  |
| 4.1 Kali    | brering av vindtunnel                                    |          |  |  |
| 4.1.1       | Kalibrering av vindhastighet                             |          |  |  |
| 4.1.2       | Kalibrering av vindhastighet ved innløpet                |          |  |  |
| 4.1.3       | Kalibrering av vindhastighet over testområdet og utløpet |          |  |  |
| 4.2 Eros    | sjonsforsøk  |          |  |  |
| 4.2.1       | Erosjonsforsøk, 2 paneler                                |          |  |  |
| 4.2.2       | Erosjonsforsøk, 3 paneler                                |          |  |  |
| 4.2.3       | Erosjonsforsøk, 5 paneler                                | 53       |  |  |
| 4.2.2       | Sammenligning av resultater                              | 59       |  |  |
| 4.3 Akk     | umulasjonsforsøk   | 60       |  |  |
| 4.2.1       | Akkumulasjonsforsøk, 2 paneler                           | 62       |  |  |
| 4.2.2       | Akkumulasjonsforsøk, 3 paneler                           | 70       |  |  |
| 4.2.3       | Akkumulasjonsforsøk, 5 paneler                           |          |  |  |
| 4.3.2       | Sammenligning av resultater                              | 86       |  |  |
| 5.0 Diskus  | jon  |          |  |  |
| 5.1 Kali    | ,<br>brering av vindtunnel                               |          |  |  |
| 5.2 Eros    | sjonsforsøk  |          |  |  |
| 5.3 Akk     | umulasjonsforsøk   |          |  |  |
| 5.5 Feill   | xilder   |          |  |  |
| 5.5.1       | Kalibrering av vindhastighet i vindtunnel                |          |  |  |
| 5.5.2       | Skalaforsøk  |          |  |  |
| 6.0 Konklı  | ısjon og videre arbeid                                   | 94       |  |  |
| 7.0 Littera | turliste   |          |  |  |
| A Vadlar    | α  | 08       |  |  |
| 8.1 Ved     | eσσ kalihrering av vindtunnel                            | 90<br>98 |  |  |
| 8.2 Ved     | legg måledata akkumulasionsforsøk                        | 100      |  |  |
| 012 700     |  |          |  |  |

# 1.0 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

De siste årene har interessen for lavenergiboliger og –næringsbygg som passivhus, nullhus og plusshus økt. For å få klassifisert et bygg som passivhus, nullhus eller plusshus, stilles det krav til et lavt energiforbruk (Andresen 2008). I tillegg ønskes en større andel av energiforsyningen dekket av fornybar energi. Oppvarming av bygg gjennom solfangere er en miljøvennlig måte å dekke deler av varmebehovet på.

Solfangere vil påvirke den vindinduserte redistribusjonen av snø på tak som følge av de aerodynamiske egenskapene panelene tilfører taket. Dermed påvirkes også fordelingen av snølasten over takflaten. I snølaststandarden NS-EN 1991-1-3 formuleres metoder for beregning av dimensjonerende snølast for flate tak med projeksjoner. Formuleringen gjelder imidlertid kun for projeksjoner i direkte kontakt med takflaten. Solfangere monteres ofte på tak med en avstand fra solfangerpanelenes underkant til takflaten

Snølaststandarden tar høyde for vindens påvirkning på snølasten gjennom eksponeringsfaktor og formfaktor. For topografier med normal avskjerming av taket, settes formfaktoren lik 0,8 for flate tak, som tilsier at 20% av takets totale snømengde eroderes av takflaten.

Formfaktoren for flate tak med solfangere kan beregnes eksempelvis ved skalaforsøk. I denne oppgaven er det gjennomført skalaforsøk i vindtunnel ved ulike variabler; antall solfangerpaneler, panelenes orientering i forhold til vindretningen og panelenes vertikale avstand til takflaten. Det tas sikte på å sammenligne forskjellen i den totale lasten og lastfordelingen ved forsøksresultatene med standardens formulering for beregning av snølast på tak med projeksjoner. Dette er gjort for å undersøke om standardens metoder også kan benyttes for projeksjoner indirekte på takflaten.

## 1.2 Avgrensning og problemstilling

Et forslag til endring av snølaststandarden er ikke en del av målet med denne oppgaven. Hovedfokus i oppgaven er rettet mot forskjellen i redistribusjon av snø på flate tak med og uten solfangere. Det er flere faktorer som virker inn på redistribusjon av snø på tak: nedbør, transport av snø fra terrenget til takflaten, snøtransport fra et område av taket til et annet, og snømetamorfose. Denne oppgaven er begrenset til redistribusjon av snø på takflater. I forsøkene er det kun tatt høyde for to vindretninger og én bygningsform, og sand er brukt til å simulere snø. Hvis forsøksresultatene i denne oppgaven viser at plassering av solfangere på flate tak anses å ha betydning for vind- og snølastforholdene for flate tak, kan de benyttes i videre forskning for å eventuelt fremme et forslag til endring av snølaststandarden.

Oppgavens problemstilling gis ved følgende punkter:

- På hvilken måte vil solfangere påvirke vindforhold langs flate tak i forhold til uten solfangere?
- Hvordan vil snø redistribueres på flate tak med solfangere i forhold til ved flate tak?
- Hvordan er forskjellene mellom snølaststandardens formulering for beregning av dimensjonerende snølast på flate tak og den beregnede snølasten på flate tak med solfangere ut fra forsøksresultatene i oppgaven?
- Kan snølaststandardens formulering for beregning av dimensjonerende snølast på flate tak med projeksjoner benyttes for tilsvarende beregning for flate tak med solfangere, ut fra resultater fra skalaforsøk?

### 1.3 Disposisjon

Oppgaven består av 8 kapitler, og er bygget opp etter følgende oppsett:

- Kapittel 1 Innledning: Oppgavens bakgrunn og tema presenteres.
- Kapittel 2 Teori: I dette kapittelet presenteres oppgavens bakgrunn gjennom relevant teori, litteratur og forskning. Begreper innen fluiddynamik, vindfysikk, snøfysikk som senere vil bli diskutert blir vektlagt.
- Kapittel 3 Metode: De vitenskapelige metoder som er benyttet for å fremskaffe oppgavens resultater blir redegjort.
- Kapittel 4 Resultater: I dette kapittelet presenteres forsøksresultater gjennom diagrammer, samt forklaringer av diagrammene.
- Kapittel 5 Diskusjon: Resultatene fra kapittel 4 blir analysert og drøftet opp mot den presenterte teorien og oppgavens problemstilling.
- Kapittel 6 Konklusjon og videre arbeid: Resultatene oppsummeres, og det presenteres en endelig konklusjon av oppgaven.
- Kapittel 7 Litteraturliste: Dette kapittelet inneholder en liste over alle referanser brukt i forbindelse med oppgaven
- Kapittel 8 Vedlegg: Måledata fra forsøk og beregninger presenteres i form av tabeller og diagrammer.

# 2.0 Teori

### 2.1 Presentasjon av snølaststandarden

Alle konstruksjoner som oppføres i Norge skal ifølge Byggteknisk forskrift (TEK) gi sikkerhet mot sammenbrudd. I henhold til TEK10 skal byggverk *plasseres*, *prosjekteres og utføres slik at det oppnås tilfredsstillende sikkerhet for personer og husdyr, og slik at det ikke oppstår sammenbrudd eller ulykke som fører til uakseptabelt store materielle eller samfunnsmessige skader*.

Hvis Norsk Standards retningslinjer for belastninger og dimensjonering følges, vil krav til sikkerhet oppfylles. Ved avvik fra Norsk Standard, må sikkerhetskravene i TEK dokumenteres på et annet vis. Nåværende snølaststandard presentert i dette kapittelet er NS-EN 1991-1-3:2003, Eurokode 1 – Laster på konstruksjoner – Del 1: Allmenne laster – Snølaster.

Snølaststandardens relevans i denne oppgaven er knyttet til sammenligning av projeksjoner direkte på flate tak, og indirekte på takflaten. Det vil derfor bli fremlagt en kort introduksjon av snølaststandarden, og avsnittet om projeksjoner på flate tak.

### 2.1.1 Bestemmelse av snølast

Den dimensjonerende snølasten på tak s, skal ifølge snølaststandarden bestemmes ved

$$\mathbf{s} = \boldsymbol{\mu}_i \cdot \mathbf{C}_e \cdot \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{s}_k \tag{1}$$

hvor  $\mu_i$  er takets formfaktor, C<sub>e</sub> er eksponeringsfaktoren, C<sub>t</sub> er den termiske faktoren, og s<sub>k</sub> er den karakteristiske snølasten på mark.

Den karakteristiske snølasten på mark er en femtiårslast, som vil si at den overskrides i gjennomsnitt hvert femtiende år. Snølaststandardens nasjonale tillegg NA:2008 oppgir den karakteristiske snølasten på mark for alle kommuner i Norge. Eksponeringsfaktoren C<sub>e</sub> tar høyde for at vind kan blåse snø fra taket, og settes normalt lik 1,0. Den termiske faktoren C<sub>t</sub> tar høyde for snøsmelting, og settes normalt lik 1,0. Formfaktoren  $\mu_i$  bestemmes ur fra takets påvirkning på erosjon av snø av takflaten. Formfaktoren kan variere over takflatens utstrekning.

### 2.1.2 Formfaktoren µi

Dimensjonerende snølaster for tak vil variere med takutformingen og eventuelle lokale elementer som kan ha innvirkning på snølasten. For flate tak vil formfaktoren  $\mu_i$  være lik 0,8. Dette vil si at 20% av snøen drives av takflaten. Ved tak med projeksjoner, eksempelvis ventilasjonsrom eller reklameskilt, bestemmes takets formfaktor ved

$$\mu_1 = 0.8$$
 (2)

og

$$\mu_2 = \gamma \cdot h/s_k \tag{3}$$
  
forutsatt at 0,8 ≤  $\mu_2$  ≤ 2,0

hvor  $\gamma$  er snøens tyngdetetthet. For flate tak med projeksjoner settes denne normalt lik 2 kN/m<sup>3</sup>.



Figur 1. Formfaktorer ved dimensjonering for snølast på tak med projeksjoner. Gjengivelse av figur 6.1 i NS-EN 1991-1-3.

Snøfonnens lengde settes lik

 $l_s = 2h \label{eq:ls}$  for utsatt at 5 m  $\leq l_s \leq$  15 m

hvor h er projeksjonens høyde.

Den dimensjonerende snølasten for tak med projeksjoner vil dermed kreve bruk av to formfaktorer. For områdene av tak med avstand  $l_s > 2h$  vil formfaktoren være lik formfaktor for flate tak. For områdene nær projeksjonen vil den dimensjonerende snølasten avhenge av projeksjonens høyde. Vi ser at formfaktorens verdi øker lineært mot projeksjonen fra avstanden  $l_s$ .

(4)

### 2.2 Innføring i fluiddynamikk

Fluidmekanikk defineres i fysikken som læren om fluider, altså væsker og gasser. Fluidmekanikk kan igjen deles inn i fluidstatikk, studiet av fluider i ro; fluidkinematikk, studiet av fluider i bevegelse og fluiddynamikk, studiet av krefters effekt på fluiders bevegelse. Fluiddynamikk kan igjen deles i aerodynamikk, læren om gass i bevegelse og hydrodynamikk, læren om væsker i bevegelse. Hoveddelen av teorien i dette kapittelet er hentet fra Alexandrou (2001), Finnemore & Franzini (2009) og Morrison (2013).

### 2.2.1 Trykk

Trykk defineres i fysikken som kraft per overflateareal. Denne oppgaven avgrenses til trykk i forbindelse med fluider. Trykk i et fluid kommer som et resultat av atomenes kollisjoner innad i fluidet og mot flatene som avgrenser det.

Et fluid under trykk vil alltid utjevnes med omgivelsene såfremt det ikke blir hindret, for eksempel ved å oppbevares i en beholder. Hvis ingen andre krefter virker på systemet, vil utjevningen forekomme med retning lik trykkgradientens. En trykkgradient er en vektorstørrelse rettet mot den største endring i trykk.

### 2.2.2 Densitet og viskositet

Et fluids egenskaper avhenger blant annet av fluidets densitet og viskositet. Densiteten eller massetettheten  $\rho$  er en betegnelse for masse per volum, og benevnes kg/m<sup>3</sup>. Et legemes densitet er absolutt fordi det avhenger av massen, som igjen er uavhengig av sted. Derimot påvirkes et fluids densitet av trykk og temperatur.

Et fluids viskositet er et mål for motstanden mot skjær- og normaldeformasjon. Friksjonskrefter i strømmende fluider kommer av kohesjon og utveksling av bevegelsesmengde mellom molekyler. For gasser vil økning i temperatur føre til en økning i viskositet, mens densiteten vil minke. Den dynamiske viskositeten  $\mu$  har benevningen Ns/m<sup>2</sup>, eller kg/sm. Den kinematiske viskositeten finner man ved forholdet mellom et fluids dynamiske viskositet og densitet, og har benevningen m<sup>2</sup>/s.

### 2.2.3 Laminær og turbulent strømning

Ved laminære strømningsmønstre, strømmer fluidet i tynne lameller lagvis over strømmens tverrsnitt. På molekylnivå vil partiklene bevege seg langs en bane eller, strømlinje. Turbulente strømningsmønstre kjennetegnes ved at partiklene følger uregelmessige baner og ingen definert frekvens, som for eksempel i bølgebevegelser. Strømningshastigheten varierer, og virvler følger tilfeldige, brå bevegelser.

For en fluidstrøm i et fullt rør vil ikke gravitasjonskraften påvirke strømningsmønsteret. Det vil derimot treghetskrefter og fluidets viskositet. Treghetskreftene er grunnet at endringer i et fluids hastighet ikke forekommer øyeblikkelig, men at hastigheten endres over tid. For Reynoldstallet Re, altså forholdet mellom treghetskrefter og viskøse krefter, gjelder (Morrison 2013)

$$\operatorname{Re} \equiv \rho \cdot \langle \upsilon \rangle \cdot D/\mu \tag{5}$$

hvor  $\rho$  er fluidets densitet,  $\langle \upsilon \rangle$  er fluidstrømmens gjennomsnittshastighet, D er rørets hydrauliske diameter og  $\mu$  er fluidets viskositet. For strømninger i sirkulære rør vil D tilsvare rørets diameter.

Ved normale tilfeller av strømning i et sirkulært, rett rør med normal ruhet, vil kritisk verdi for Reynoldstallet  $\text{Re}_{\text{crit}} = 2000$  (Finnemore & Franzini 2009). Det vil altså normalt ikke oppstå turbulente strømninger ved Re < 2000. Morrison (2013) oppgir laminær strømning ved Re < 2100, turbulent strømning ved Re > 4000, og ustabil strømning ved 2100 < Re < 4000. Alexandrou (2001) oppgir laminær strømning ved Re < 2500 og turbulent strømning ved Re > 3000.

### 2.2.4 Grenselag

For en fluidstrøm over en flate, vil fluidets hastighet avta ved en viss avstand fra flaten, og inn mot flaten hvor hastigheten er 0. I fluidmekanikken defineres dette området som grenselaget (Morrison 2013). På grunn av den store hastighetsgradienten vil fluidets viskositet bestemme strømningshastigheten i grenselaget. Flatens ruhet vil også påvirke hastigheten i form av friksjon, som fører til skjærkrefter på fluidet. For en uniform luftstrøm med hastighet 10 m/s over en flate, vil grenselagets høyde være 0,5 cm, målt 0,5 m fra innføringspunktet.

### 2.2.5 Fullt utviklet strømningsmønster

For fluidstrømninger i rør kreves en minimumslengde fra rørets begynnelse til strømningen er fullt utviklet. På grunn av effekten av grenselag vil en hastighetsgradient utvikles langs rørets indre overflate til strømningen har nådd en kritisk distanse. Ved denne kritiske distansen kan strømningen sies å være fullt utviklet. Hastigheten i fluidstrømmens sentrum vil være uniform. Grenselagets høyde vil øke til strømningen har nådd denne kritiske distansen, også kalt inngangsavstanden. For laminære strømninger er inngangsavstanden L<sub>e</sub> gitt ved (Alexandrou 2001)

$$L_{e} = 0.058 \cdot D_{h} \cdot Re \tag{6}$$

og for turbulente strømninger;

$$L_e = 4.4 \cdot D_h \cdot Re^{1/6} \tag{7}$$

hvor Re er strømningens Reynoldstall og D<sub>h</sub> er rørets hydrauliske diameter.

For rør med sirkelformede tverrsnitt vil den hydrauliske diameteren være lik rørets innvendige diameter. For fluidstrømninger i rør med ikke-sirkulære tverrsnitt, er rørets hydrauliske diameter gitt ved (Franzini & Finnemore 2009)

$$D_{\rm h} = 4A/P \tag{8}$$

hvor A er rørets tverrsnittsareal og P andelen av rørets omkres som er i kontakt med fluidstrømmen.

Ved å anvende ligning 5 og 8, kan Reynoldstallet finnes for luftstrømmen i innløpets åpning i vindtunnelen brukt i forbindelse med denne oppgaven. Innløpets åpning måler 2 m x 2 m. For vindhastighet 5,1 m/s gis Re = 664 972, og for vindhastighet 13,6 m/s gis Re = 1 773 260. Her er det antatt at  $\rho = 1,18$  kg/m<sup>3</sup> og  $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5}$  kg/sm. Ettersom Reynoldstallet overskrider minimumsgrensen for turbulente strømninger, kan vi dermed si at strømningen i vindtunnelen er turbulent.

#### 2.2.6 Strømninger med frie overflater

For en strømning med en fri overflate, eller en åpen strømning, er det ikke nok å beskrive strømningsmønsteret med Reynoldstallet. Ved slike tilfeller innfører vi et forholdstall mellom fluidets treghetskrefter og gravitasjonskraften som virker på fluidet. Dette forholdstallet kalles Froudetallet Fr, og er gitt ved (Morrison 2013)

$$Fr \equiv V^2/g \cdot L \tag{9}$$

hvor V er fluidstrømmens gjennomsnittshastighet, g er gravitasjonskraften og L er en den hydrauliske dybden. L tilsvarer normalt strømningens dybde.

#### 2.2.7 Separasjon

Vi betrakter et fluid som strømmer over en konkavt krummende flate i strømningsretningen (se figur 2). A representerer et punkt hvor strømningen akselererer med en normal hastighetsdistribusjon i grenselaget, og B er punktet hvor hastigheten over grenselaget har nådd et

maksimum. Fra punkt B og videre nedstrøms vil hastigheten utenfor grenselaget avta, som resulterer i en trykkøkning (se ligning 10). Ved punkt D er hastigheten nær underlaget lik 0. Dermed vil grenselaget separeres fra underlaget. Ved punkt E oppstår det en resirkulasjon nær underlaget, drevet i retning av det lavere trykket. I dette tilfellet drives resirkulasjonen oppstrøms mot punkt D, for så å følge strømmen med **u**. Nedstrøms fra separasjonspunktet D dannes turbulente virvler. Merk at grenselagets høyde øker med avstanden fra punkt A.



Figur 2. Vekst og separasjon av grenselaget i en strømning, som følge av den økende trykkgradienten. Figur: Finnemore & Franzini (2009).

Området nedstrøms for separasjonspunktet betegnes som separasjonssonen, eller resirkulasjonssonen. Punktet hvor virvlene tas med i det normale strømningsmønsteret igjen kalles gjenkoblingspunktet. På grunn av virvlenes tilstedeværelse i separasjonssonen er både hastigheten og trykket lavere enn i resten av strømningen. Dermed kan partikler, som for eksempel snø, akkumuleres i separasjonssoner.

### 2.2.8 Bernoullis ligning og Venturieffekten

Bernoullis ligning kan utledes fra prinsippet om bevaring av energi. For et ukomprimerbart fluid kan Bernoullis ligning skrives som (Finnemore & Franzini 2009)

$$p + \gamma \cdot z + 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 = \text{konstant}$$
(10)

hvor p er det statiske trykket som virker på fluidet,  $\gamma$  er fluidets spesifikke vekt [N/m<sup>3</sup>], z er høyden over underlaget, V er fluidets gjennomsnittshastighet og  $\rho$  er fluidets densitet.

Det er viktig å merke seg antakelsene ved bruk av Bernoullis ligning. Ligningen gjelder kun under følgende antakelser (Finnemore & Franzini 2009):

- 1. Det antas at viskøse effekter er neglisjerbare.
- 2. Det antas at fluidet har en jevn strømning.
- 3. Likningen gjelder langs en strømlinje
- 4. Det antas at ingen energi legges til eller trekkes fra systemet.

Beregninger med Bernoullis ligning kan resultere i feil om antakelsene ikke gjelder. Likevel kan ligningen anvendes i situasjoner hvor effektene av friksjon er små.

En fluidstrøm som møter en kontraksjonsdel vil føre til en endring i strømningsmønsteret. På grunn av kontraksjonen vil strømlinjene samles, og vi får en økning i strømningshastigheten. Dette fenomenet kalles Venturieffekten, og kan beskrives ved kontinuitetsligningen

$$\mathbf{V}_1 \mathbf{A}_1 = \mathbf{V}_2 \mathbf{A}_2 \tag{11}$$

hvor V er fluidstrømmens gjennomsnittshastighet og A er tverrsnittsarealet fluidet strømmer gjennom. Indeksene 1 og 2 representerer to faste i fluidstrømmen.

### 2.2.9 Pitotrør

Den lokale hastigheten i et strømmende fluid kan måles ved hjelp av Pitotrør. Pitotrøret stilles opp parallelt med strømningsretningen, med retning oppstrøms. Det har to hull, et på enden rettet oppstrøms, og et på siden.

Trykket i stagnasjonspunktet  $p_0$  til et stillestående legeme i en fluidstrøm, kan skrives som  $p_0 = p + \rho \cdot V^2/2$ , hvor p og V er henholdsvis trykk og hastighet i et uforstyrret punkt oppstrøms fra legemet. Hvis  $p_0$  og p måles, kan vi bestemmes fluidstrømmens hastighet.

Hvis vi tar for oss ligning 10 for et Pitotrør, ser vi at siden målepunktet er fast vil høyden z være tilnærmet lik. Gravitasjonskraften er den samme for begge punkter, og hastigheten  $V_2$  er lik null i Pitotrøret. Fluidets strømningshastighet kan så beregnes ved å modifisere ligning 10:

$$V_{1} = \sqrt{2 \cdot (p_{2} - p_{1})/\rho}$$
(12)

Ved å anvende Pitotrør kan man altså måle både trykket i stagnasjonspunktet (i dette tilfellet i Pitotrøret) og i fluidstrømmen, og dermed beregne fluidets strømningshastighet.

### 2.3 Innføring i vindteori

Vind er den største bidragsyteren for redistribusjon av snø på flate tak. I dette kapittelet gjennomgås den grunnleggende vindteoriensom legges til grunn for redistribusjon av snø. Hoveddelen av teorien i dette kapittelet er basert på litteratur av Kind (1981), McIlveen (1992) og Arya (2001).

### 2.3.1 Atmosfærisk trykk

Som tidligere nevnt er trykk definert som kraft per areal. Vind skyldes i all hovedsak jordrotasjon samt trykkforskjeller i atmosfæren, som igjen er en følge av endringer i temperatur. Det atmosfæriske trykket i et punkt tilsvarer vekten av alle molekyler radielt utover i atmosfæren fra punktet. For to punkter med samme avstand fra terrenget og med ulikt trykk, vil altså det ene punktet ha større masse over seg enn det andre. Vi kan dermed si at det atmosfæriske trykket er et resultat av jordens gravitasjonskraft.

Lokal vind forårsakes av forskjeller i lufttemperatur. Et eksempel på dette er fenomenet solgangsbris. Ettersom vann har større spesifikk varmekapasitet enn landområder (Çengel & Ghajar 2011) varmes og avkjøles sjøen mer langsomt enn landområdene.

Luften ved land blir raskere varmet opp enn luften over sjøen, og vil stige som et resultat av mindre tetthet. Det etterlates dermed et lavere trykk over landoverflaten enn over sjøen, som utjevnes ved en luftstrøm fra sjøen mot land, også kalt sjøbris. Tidlig på dagen kan denne luftstrømmen ha en høyde på under 50 m. Mot slutten av dagen kan luftstrømmen nå en høyde på 300 m (Simpson 1994). Om natten avkjøles landoverflaten raskere enn vannet, og det dannes en luftstrøm fra land mot sjøen, også kalt landbris.

### 2.3.2 Geostrofisk vind

Vind fra 300-1000 m over jordens overflate påvirkes ikke av terrengets ruhet, og omtales som gradientnivået. Vind ved denne høyden har hastighet tilnærmet lik den geostrofiske vindhastigheten U<sub>g</sub>, som bestemmes av formelen (Berry 1981)

$$\mathbf{U}_{g} = \boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{\Delta} \mathbf{p} \cdot \mathbf{k} / \mathbf{f} \tag{13}$$

hvor  $\alpha$  er et gitt volum,  $\Delta p$  er den horisontale trykkgradienten, **k** er enhetsvektoren langs vertikalaksen og f er Coriolisparameteren, en konstant for en gitt høyde i atmosfæren.

Coriolisparameteren tas med i beregningen av den geostrofiske vindhastigheten på grunnlag av et fenomen kalt Corioliseffekten. For å forklare Corioliseffekten kan vi starte med å betrakte et roterende referansesystem, for eksempel en roterende plate. Om man triller en ball over platen, vil ballens bane sett fra referansesystemet være avbøyd. Dette fenomenet gjelder også for vind ved at vind blir avbøyd som følge av jordens rotasjon.

Den geostrofiske vinden strømmer med den horisontale trykkgradienten med en vindhastighet lik gradientens hastighet. På den nordlige halvkule vil lavtrykket dermed være på venstre side av den geostrofiske vindens retning, mens det blir omvendt på den sørlige halvkule.

### 2.3.3 Vind i grenselaget – det logaritmiske vindprofilet

Grenselag i strømmende fluider er forklart i 2.2.4. I atmosfæren befinner grenselaget seg under gradientnivået, og påvirkes av friksjonen fra terrengets topografi. Grenselaget strekker seg helt ned til de siste få meterne over terrenget. Grenselagets høyde kan variere mellom 100 m og 1 km (Arya 2001).

Luftstabiliteten er angitt ved den vertikale temperaturgradienten, og er gitt ved  $\delta T/\delta z$ , altså endringen i temperatur per endring i høyde over terrenget. Ved nøytrale forhold vil temperaturen avta med ~10°C for hver kilometer utover i atmosfæren.

Terrengruhetens innvirkning på vindhastigheten er komplisert grunnet sammenhengen mellom luftstabiliteten og vindhastigheten. Ved nøytrale forhold hvor  $\delta T/\delta z \sim -10^{\circ}C / km$ , kan vindhastigheten over jevne overflater opp til ca. 30 m bestemmes ved (Berry 1981)

$$U_{z} = U^{*} \cdot \ln\left(z/z_{0}\right) / k \tag{14}$$

hvor  $U_z$  er vindhastigheten ved høyden z over terrenget,  $z_0$  er effektiv ruhetshøyde, k er von Karmans konstant (vanligvis = 0,4). Friksjonshastigheten eller skjærhastigheten er en hypotetisk hastighet definert ved  $U^* \equiv \sqrt{\tau/\rho}$ . Her er  $\tau$  skjærkraften fra terrenget på vinden, og  $\rho$  er luftens densitet.

Terrengets effektive ruhetshøyde  $z_0$ , avhenger av terrengets ruhet. Denne høyden er ikke lik terrengruhetens faktiske høyde, og kan bestemmes ut fra flere metoder:

- z<sub>0</sub> kan bestemmes ved å lese av fra tabeller om man kjenner terrengets topografi. Eksempler er Vindlaststandarden NS 3491-4 og figur 10.5 (Arya 2001).
- z<sub>0</sub> kan bestemmes ved å kjenne vindhastigheten i to forskjellige høyder ved (Thiis m.fl. 1999a)

 $z_0 = \exp \{ [ u(z_2)\ln(z_1) - u(z_1)\ln(z_2) ] / [ u(z_2) - u(z_1) ] \}$ (15) hvor u(z<sub>1</sub>) er vindhastigheten ved høyden z<sub>1</sub>, og u(z<sub>2</sub>) er vindhastigheten ved høyden z<sub>2</sub>.

### 2.3.4 Vind rundt bygninger

Forskning gjort av Prasad m.fl. (2009) tok sikte på å undersøke vindhastigheter og vindlaster ved forskjellige takutforminger gjennom forsøk i vindtunnel. Det er først og fremst resultatene fra forsøk med flate tak som er relevant for denne oppgaven. Vindhastigheten brukt i forsøkene er 7 m/s, og målingene ble foretatt ved trykkmålere montert i noder på skalamodellene. De målte verdiene av det statiske trykket ble omregnet til den ubenevnte trykkparameteren C<sub>p</sub>, som er gitt ved

$$C_{p} = (P - P_{\infty})/(0.5 \cdot \rho \cdot U_{\infty}^{2})$$
<sup>(16)</sup>

hvor P er trykket i et gitt punkt,  $P_{\infty}$  er trykket i en fri luftstrøm,  $U_{\infty}$  er vindhastigheten i den frie luftstrømmen og  $\rho$  er luftens densitet.



Figur 3. Trykkgradienter med verdi  $C_p$  for vind mot lo vegg (venstre) og tak (høyre). Figur: Prasad m.fl. (2009).

Ved lo vegg vil det største trykket befinner seg ved høyde  $y/H \approx 0.35$  (se figur 3). Fra dette punket synker trykket jevnt mot side- og toppkantene. På takflaten observeres sug, med største verdier ved takflatens hjørner mot lo side, og laveste verdier ved  $y/H \approx 0.8$ . Det er også antydninger til en separasjonsboble i intervallet 0.3 < y/H < 0.8.

Ved å montere solfangere på bygg endres byggets aerodynamiske egenskaper. Dermed endres også fordelingen av trykk og sug på takflaten, som igjen påvirker erosjon og akkumulasjon av

snø. Văsieş m.fl. (2012) analyserte CFD-simuleringer for å kunne bestemme denne endringen. Simuleringene ble gjort for bygg med og uten parapet, med 7 solfangerrader,

Figur 4 a viser en bygning som eksponeres for vind. Vinden avledes når den møter bygningskroppen. Ved punktet SP<sub>1</sub> ved venstre takfot formes et aerodynamisk hopp, og det synes en resirkulasjonsboble over taket. Hvis takets lengde er langt nok vil luftstrømmene gjenkobles med takflaten. På figur 4 b illustreres solfangerpanelenes innvirkning strømningsmønstret over bygningen. Luftstrømmene forstyrres av panelene og vindhastigheten avtar, og det dannes virvler mellom panelene.



Figur 4. Luftstrømmer over bygg (a) uten og (b) med solfangere. Figur: Väsieş m.fl (2012).

I simuleringene er solfangernes absorbatorside sydvendte, med helning 35°, 0,2 m over takflaten. Vindretningen er fra nordøst, altså rettet 135° med urviseren for solfangernes absorbatorside. Vindhastigheten ved innløpet er 14 m/s, og turbulensintensiteten er satt til 10%. Figur 5 viser fargekonturer av vindhastighetene fra simuleringene uten parapet i tre snittplan.







С

*Figur 5. Fargediagrammer av vindhastighetene ved snittplan gjennom (a) vestvendt fasade, (b) midten av modellen og (c) østvendt fasade. Figur: Văsieş m.fl. (2012).* 

Som vist på figur 5, er det tendenser til en økning i vindhastigheten i underkant av panelene. Figur 5c viser konturer av resirkulasjonssoner mellom panelradene. Et annet fenomen Văsieş m.fl. peker på er effekten av koniske virvler som dannes ved skrå vind mot byggets hjørner. Virvler synes over panelraden mot venstre (figur 5), og illustrert ved røde linjer i figur 6.



Figur 6. Koniske virvler ved vind 45° mot bygget. Figur: Văsieş m.fl. (2012).

De koniske virvlene fører til en økning i turbulens over et relativt lite område langs takets kanter. Dette fører til sug nær hjørnene, men også oppløft langs takføttene ved loveggene.

### 2.4 Innføring i snøteori

Når partikler eksponeres for vind kan de forflyttes. Hvorvidt partiklene forflyttes avhenger av partiklenes egenskaper og vindhastigheten. I denne oppgaven er det transport og redistribusjon av snø aktuelt, eller snødriv.

Snøens terskelhastighet U\*<sub>th</sub> indikerer minimum skjærhastighet for at snø skal kunne transporteres. Terskelhastigheten bestemmes av partiklenes egenskaper: partiklenes størrelse, form og vekt, og de kohesive kreftene mellom partiklene. For eksempel vil terskelhastigheten for våt gammel snø være høyere enn for ny tørr snø. Normalt vil snøpartiklers terskelhastighet ligge mellom 0,1 og 0,2 m/s (Kind 1981).

Snøtransport er definert som mengde snø som transporteres av vinden over et gitt tidsrom og bredde, på tvers av vindretningen. Snøpartikler forflyttes ved tre typer snødriv: kryp, saltasjon og suspensjon (se figur 7).

Et annet viktig aspekt ved snødriv på tak er snømetamorfose, altså endring av snøens egenskaper. Orheim (1966) gjennomførte forsøk på snømetamorfose ved observasjoner og målinger av snø utsatt for smelting som følge av solinnstråling. Forsøkene viser at snø som er utsatt for solinnstråling og dermed smeltet, eroderes i mindre grad enn snø som ikke er utsatt for solinnstråling. Dette er grunnet en utvikling av hardheten i snøens overflate, som igjen fører til en økning i snøens terskelhastighet. Et eksempel er såkalt skaresnø.



Figur 7. Kryp (1), saltasjon (2) og suspensjon (3). Figur: Ramberg (2009).

### 2.4.1 Kryp

Partikler som er for store til å bli løftet fra underlaget ved vind, ruller eller *kryper* langs snølagets overflate. Denne formen for snøtransport former ofte snøbølger, eller snødyner. Partikler som følger denne formen for snøtransport utgjør opptil 25% av all snøtransport ved lavere vindhastigheter. De vil stanse ved mindre topografiske hindre og snøgjerder (Tabler 2003).

### 2.4.2 Saltasjon

Lettere partikler vil kunne *saltere* eller hoppe langs underlaget, men er fortsatt for tunge til å forbli i luften. De salterende partiklenes bane varierer med partikkelstørrelse, vindhastighet og underlagets forhold. En typisk bane for en salterende snøpartikkel følger en 1 cm høy og 25 cm lang parabolsk linje, og de fleste holdes under 5 cm over underlaget (Tabler 2003).

### 2.4.3 Suspensjon

Ved en økning i vindhastigheten, vil salterende snøpartikler transporteres av vindens turbulensvirvler. Når partiklenes fallhastighet er lavere enn den vertikale vindhastighetskomponenten, vil partiklene først transporteres opp, for så å forflyttes med vindretningen. (Thiis m.fl, 1999b). Dette kalles suspensjon.

For at snøpartikler suspenderes må friksjonshastigheten være 5 ganger større enn terskelhastigheten. Det er som oftest finere partikler, også kalt snøstøv, som transporteres ved suspensjon (Kind 1981). Suspenderte snøpartikler har i Antarktis blitt observert opp mot 300 m over terrengnivået (Thiis m.fl, 1999b), men de fleste holdes under 1 m over terrengnivået (Tabler 1988).

### 2.4.4 Kombinasjoner

Partiklene i et snødekke har ulike egenskaper. Dermed vil både kryp, saltasjon og suspensjon kunne forekomme samtidig. Ved vindhastigheter lavere enn  $U^*_{th}$  for de største partiklene, vil det kun være snøtransport i form av kryp. Hvis vindhastigheten øker og det observeres salterende partikler, vil det også som oftest være partikler som kryper. På samme måte vil det også kunne forekomme kryp og saltasjon ved observasjon av suspenderende partikler.

Når terskelhastighetene oppgis for snødekker, er de beregnet ut i fra gjennomsnittlig terskelhastighet for snøpartiklene. Type snøtransport ved skjærhastigheter er gitt ved (Kind 1981)

- Kryp når  $U^* < U^*_{th}$
- Saltasjon når  $U^*_{th} < U^* < 5U^*_{th}$
- Suspensjon når  $U^* > U^*_{th}$

### 2.4.5 Avsetting av vindtransportert snø

En fullt utviklet snøtransport oppnås hvis mengden snø som løftes av vinden er lik mengden som avsettes. Hvis vi betrakter en vindprofil fri for partikler, vil partiklene langs terrenget begynne å løftes opp og føres i vindens retning. Til å begynne med vil antallet partikler som løftes opp fra underlaget være større enn antall avsatte partikler. Etter en viss distanse vil det oppnås en likevekt mellom partikler som løftes opp og avsettes. Tabler (1988) anslår denne distansen til 150-300 m, mens O'Rourke m.fl. (2005) anslår distansen til 210 m.

I en gitt høyde over terrenget øker vindens evne til å transportere snø ved økning i vindhastigheten (Tabler 1991). På samme måte vil vindens evne til å transportere snø avta om vindhastigheten avtar. På grunn av naturlig turbulens vil vindhastigheten endres kontinuerlig, og det vil dermed oppstå akselerasjoner og retardasjoner i vindhastigheten. Disse endringene i vindhastighet betegnes som fluktuasjon. Akkumulasjon og erosjon av snøpartikler grunnet vindens fluktuasjon jevnes ut over tid. Likevel vil snø akkumuleres i områder hvor skjærhastigheten avtar. I områder hvor skjærhastigheten øker vil partikler eroderes. Dermed får vi

- Akkumulasjon når dU\*/ds < 0</li>
- Erosjon når  $dU^*/ds > 0$

hvor dU\*/ds er endring i skjærhastighet i vindens retning.

### 2.4.6 Redistribusjon av snø på tak ved snødriv

Snøavsetning på tak skjer ved to typer snødriv. Snøen kan løftes fra terrenget opp på takflaten, eller den kan redistribueres fra en del av taket til en annen. For snø som løftes fra terrenget er det hovedsakelig suspensjon som bidrar til avsetning av snø på takflaten. Vi har tidligere sett at de fleste suspenderte snøpartikler holder seg under 1 m over terrengoverflaten, og at konsentrasjonen av snøpartikler avtar med høyde over terrenget. Derfor vil mengde snø som redistribueres fra terreng til takflater minke med byggets høyde.

Redistribusjon av snø fra en del av taket til en annen har større viktighet for fordeling av snølast, og forekommer i størst grad ved saltasjon og suspensjon. Den dominerende type partikkeltransport ved redistribusjon av snø på tak er saltasjon. Ved saltasjon vil snøpartiklene holdes luftbårne lengre, og det er dermed større sannsynlighet for at de passerer takflaten.

### 2.4.7 Likevektsprofil ved snøfonner

Mens en snøfonn dannes, vil underlagets aerodynamiske egenskaper endre seg kontinuerlig. Dermed vil også vindens strømningsmønster og skjærhastighet endre seg, som igjen fører til en endring i partikkeltransporten. Som nevnt tidligere vil vi oppnå likevekt i akkumulerte og eroderte partikler etter en viss distanse. Dette kan relateres til snøfonner, og betegnes som en snøfonns likevektstilstand. Snøfonnens tverrsnitt parallelt med vindretningen kalles snøfonnens likevektsprofil.

Mengden snø som avsettes på og rundt en snøfonn avtar jo nærmere snøfonnen kommer likevektstilstanden. En snøfonns likevektsprofil sies å være fullt utviklet hvis videre eksponering for vind ikke endrer snøfonnens profil betydelig.

Et snøgjerde har som funksjon å fange snø, og er ofte tilknyttet infrastruktur. Et viktig aspekt Tabler (1988) beskriver i forbindelse snøfonndannelse, er det ujevne forholdet mellom utviklingen av snøfonnens høyde og lengde. Snøfonnen når maksimal høyde tidligere enn den når maksimal lengde. Et eksempel på dette illustreres i figur 8, hvor snøfonnen har nådd tilnærmet maksimal høyde ved profil 4, mens lengden ved samme måling kun er ca. 50 % av maksimal lengde. Merk at profil 1 og 6 ble registrert ved et like langt tidsintervall som profil 6 og 7.



Figur 8. Snøfonndannelse ved et Wyoming snøgjerde med 50 % porøsitet, 15° helning medvinds, og en spalte tilsvarende 15 % av snøgjerdets høyde . Profil nr. 1 er registrert 01.11.83, nr. 2 den 30.11, nr. 3 den 07.12, nr. 4 den 12.12, nr. 5 den 20.12, nr. 6 den 01.01.84 og nr. 7 den 07.03. Figur: Tabler (1988)

### 2.4.8 Snøgjerder med spalte

En spalte mellom terrengoverflaten og snøgjerdenes underkant bidrar til å holde de salterende partiklene nær bakken hvor de lettere stopper opp. Hensikten med dette er å redusere akkumulasjon av snø nær gjerdet, for dermed å opprettholde snøgjerdets lagringskapasitet. Snøgjerder som er helt eller delvis begravet i snø er ikke like effektive når det gjelder å stoppe luftbårne snøpartikler. Snøfonnenes vekt kan føre til skader på snøgjerdet, og det kan utvikles unormalt lange snødriv. Den optimale avstanden mellom snøgjerder og underlaget anslås å være 10-15% av snøgjerdets totale høyde (Tabler 2003).

Hvis spalten er større enn 15% av snøgjerdets totale høyde, vil lagringskapasiteten reduseres (se figur 9 og 10). Spaltens effekt vil variere med vindhastigheten. I områder med sterk vind vil et snøgjerde med spalte lik 25% av den totale høyden fange om lag 30% mindre snø enn et snøgjerde med spalte lik 10% av den totale høyden. Ved lavere gjennomsnittlig vindhastighet vil forskjellen være 10%.

Snøfonnens profil nedstrøms for gjerdet med spalte lik 5% av gjerdets totale høyde er vesentlig større på lo side av gjerdet, samt ved de første ca. 25 m på lesiden (se figur 9). Fra ca. 38 m på lesiden av snøgjerdet til snøfonnens ende ved ca. 114 m, akkumuleres snø i størst grad ved snøgjerdet med spalte med høyde lik 25% av snøgjerdets totale høyde. Merke at snølagringskapasiteten avtar lineært med økende avstand mellom snøgjerdet og underliggende terreng.



Figur 9. Sammenligning av likevektsprofiler ved to 3,8 m høye Wyoming-snøgjerder med 15° helning medvinds, med avstand lik henholdsvis 30 cm (heltrukken linje) og 90 cm (stiplet linje) mellom snøgjerdenes underkant og underlaget. Figur: Tabler (1986).



Figur 10. Effekten på snølagring av en spalte mellom underkant snøgjerde og underlag. Figur: Tabler (1994).

### 2.4.9 Snøfluks

I beregninger av snødriv og utvikling av snøfonner er det relevant å ha kjennskap til mengde luftbåren snø, og hvordan snøen transporteres. Dette betegnes som snøkonsentrasjon eller snøfluks, og er et mål på hvor mye snø som penetrerer et gitt areal over en gitt tid. I forbindelse med snødriv og redistribusjon av snø, er det den horisontale snufluksen som er aktuell.

Denne horisontale snøfluksen avhenger av høyden over terrengenivå. Dette skyldes terrengets innvirkning på vindhastigheten, og mengde luftbåren snø varierer deretter. Snøfluksen er ofte størst nær terrenget, grunnet mengden salterende partikler i dette sjiktet. Den kan bestemmes ved

målinger, for eksempel med snøsamlere. Font m.fl. (1998) illustrerer tre typer snøsamlere som alle består av beholdere montert på en vertikal konstruksjon, og samler snø i ulike høyder. Det er utviklet en regresjonsligning for den horisontale snøfluksen q(z), gitt ved (Mellor & Fellers 1986)

$$q(z) = \exp (10,089 - 0,41049x_1 - 122,03x_2 - 0,13856x_1^2 - 14,446x_1x_2 - 0,0059773x_1^3 + 3,2682x_1^2x_2 + 114,13x_1x_2^2 + 2290,0x_2^3$$
(17)

hvor  $x_1 = \ln(z)$  og  $x_2 = 1 / u_{10}$ , z er høyden over terrenget og  $u_{10}$  representerer vindhastigheten 10 m over terrengnivået.

Ligningen er gyldig for vindhastigheter over 10 m/s, og gir nøyaktige resultater ved høyder opptil 5 m. Den horisontale snøfluksen har benevning kg/m<sup>2</sup>s. Vi kan finne snøkonsentrasjonen [kg/m<sup>3</sup>] ved å dividere den horisontale snøfluksen med vindhastigheten.

### 2.5 Solfangere

Solfangere er avhengige av solinnstråling for å kunne produsere energi. Årlig solinnstråling på horisontalplanet i Norge varierer fra rundt 700 kWh/m<sup>2</sup> i nord i landet til rundt 1000 kWh/m<sup>2</sup> i sør (Andresen 2008). Figur 11 viser imidlertid at solinnstrålingen varierer vesentlig mellom årstidene. Vi ser også at den månedlige solinnstrålingen i Oslo og Hamburg er tilnærmet lik store deler av året.



*Figur 11. Månedlig solinnstråling på horisontalplanet [W/m<sup>2</sup>] for Oslo, Tromsø og Hamburg. Figur: Andresen (2008).* 

All informasjon om solfangere og solcellepaneler i de to neste avsnittene er hentet fra rapporten *Mulighetsstudie – Solenergi i Norge*, utført av SINTEF Byggforsk & KanEnergi (2011).

Det er viktig å kunne skille mellom begrepene *solfangere* og *solcellepaneler*. Solceller utnytter den fotoelektriske effekten til å omdanne strålingsenergi fra solen til elektrisk energi. Så lenge solcellen får sollys vil denne effekten opprettholdes. En solfanger, eller solvarmeanlegg, omgjør solenergi til termisk energi. De kan brukes til å produsere varmt tappevann og til romoppvarming. Solfangere kan også brukes til kjøling. I tillegg til solfangerpaneler og solcellepaneler finnes det kombinasjonssystemer, som genererer både varme og elektrisk energi.

Forholdet mellom den utnyttbare termiske produksjonen og mengden solinnstråling defineres som virkningsgraden. På grunn av varmetap til omgivelsene, avtar solfangernes virkningsgrad med økende temperatur. Om lag 20% av solinnstrålingens energi går tapt ved refleksjon av solinnstråling fra panelenes overflate.

### 2.5.1 Optimal vinkel for solfangere

Det finnes en rekke veiledere og retningslinjer samt beregningsmetoder for optimale vinkler for solfangere. Med solfangernes vinkel menes vinkelen mellom underlaget og solfangerpanelenes ikke-absorberende side. En tabell med beregnede optimale vinkler fra et utvalg forskningsrapporter er vist nedenfor

| Hottel, 1954                        | $\varphi + 20^{\circ}$  |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Heywood, 1971                       | $\varphi - 10^{\circ}$  |
| Kern & Harris, 1975                 | $\varphi + 10^{\circ}$  |
| El-kassaby, 1988; Gopinathan, 1991; |                         |
| Soulayman, 1991; Morcos, 1994       | φ                       |
| Yellott, 1973                       | $\phi \pm 20^{\circ} *$ |
| Lunde, 1980; Garg, 1982             | $\phi \pm 15^{\circ} *$ |
| Lewis, 1987                         | $\phi \pm 8^{\circ} *$  |

| Tabell 1. E | Et utvalg ar | nbefalte vinkle | r for solfan | gere. Tabell: H | Rehman & | Siddiqui ( | (2012) |
|-------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|----------|------------|--------|
|             |              | ./              |              |                 |          |            |        |

\* Sesongkorrigerte verdier.

hvor  $\phi$  er breddegraden solfangerne befinner seg på.

Solfangernes virkningsgrad avhenger av solinnstrålingens innfallsvinkel. Innfallsvinkelen defineres som vinkelen mellom den direkte solinnstrålingen og en tenkt normalvektor på solfangerpanelet. Den optimale innfallsvinkelen vil være 0°. I en samtale med Lars Erik Lunde ved Swecos avdeling Tekniske Installasjoner ble det lagt frem at innfallsvinkelen påvirker

produksjonsmengden i langt mindre grad for solfangere enn for solcellepaneler. Ifølge Lunde er optimal vinkel for solfangere i Danmark rundt 60°.

Solfangerprodusenten Catch Solar anbefaler 75° helningsvinkel fra horisontalplanet for sine produkter i Oslo-området, men at solfangernes vinkel ikke har stor betydning for utnyttelse av solenergi. Videre står det at både 22° og 90° også gir god effekt. Informasjonen er hentet fra Catch Solars hjemmesider (Ukjent dato). Andresen (2008) oppgir 50° som optimal helningsvinkel for solfangere i Oslo.

I en rapport utført av Bosanac & Nielsen (2001) presenteres den termiske effekten for væskebærende solfangere. Ettersom solens posisjon, og dermed solinnstrålingen, varierer i løpet av dagen vil energiproduksjonen variere deretter. Derfor brukes det en korreksjonsfaktor i beregningene. Denne tar høyde for solens posisjon og tapet i ytelse i forhold til optimal innfallsvinkel. Det kommer frem at det ikke er nødvendig å korrigere innfallsvinkelen hvis den er mindre enn 30°, fordi tapet i virkningsgrad kan ignoreres. I praksis betyr dette at effekttapet ved en innfallsvinkel mellom -30° og 30° er neglisjerbart.

### 2.5.2 Optimal avstand mellom rader med solfangerpaneler

Ved å kjenne en solfangers dimensjoner og hvor mange timer 100% av solfangerens absorbatorareal skal være eksponert for solinnstråling, kan den optimale avstanden mellom rader med solfangerpaneler regnes ut. Utregningsmetoden nedenfor er hentet fra solfangerdistributøren Affordable Solars hjemmesider, men samme metode finnes på Nordic Folk Center for Renewable Energys hjemmesider (se også figur 12)

$$D' = H/tan(\alpha)$$
(18)

hvor D' er den maksimale skyggeavstanden mellom panelene, H er panelenes vertikale høyde og  $\alpha$  er solinnstrålingens innfallsvinkel.

Videre beregnes avstanden mellom panelradene D, ved formelen

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}' \cdot \cos\left(180 - \psi\right) \tag{19}$$

hvor  $\psi$  er solens asimutvinkel. Asimutvinkelen er vinkelen den horisontale innfallsvinkelen og sør, målt med urviseren i horisontalplanet.



Figur 12. Venstre: solfangere sett fra siden. Høyre: solfangere sett ovenfra. Figur: M.F. Molnar etter Affordable Solar (Ukjent dato).

### 2.6 Skalaforsøk

Ved skalaforsøk simuleres virkeligheten gjennom forsøk med en forenklet modell i skala. Hensikten med å gjennomføre skalaforsøk kan være å undersøke reaksjoner og mekanismer knyttet til prototypen. For å kunne anse resultatene av et skalaforsøk som gyldige, stilles det krav til skalering, blant annet geometriske størrelser, hastigheter og partiklers egenskaper.

### 2.6.1 Erosjonsforsøk

Ferreira & Sanchez (2009) gjennomførte forsøk i vindtunnel, med hensikt å undersøke om trær kunne brukes for å skape ly for vind langs idrettsanlegget. I forbindelse med studiet ble både CFD-simuleringer og skalaforsøk i vindtunnel gjennomført. Tunnelens vindprofil ble målt til videre bruk i beregninger (se figur 13). Her er z høyden målt fra underlaget, H er en referansehøyde ut fra trærnes høyde (= 15 cm), u er målt vindhastighet og u<sub>max</sub> er høyeste målte vindhastighet. Dermed kan grenselagets høyde i vindtunnelen anslås til z  $\approx$  75 mm.

Ved forsøkene ble et sandlag med 1 mm høyde fordelt uniformt over hele modellens 1 m lange bredde. Sandens terskelhastighet ble funnet ved å først gjennomføre forsøk uten vindbeskyttelse for modellen. Vindtunnelen ble akselerert til en hastighet erosjon av sand ble observert. Denne vindhastigheten ble definert som sandens terskelhastighet  $U^*_{th}$ . Terskelhastigheten ble benyttet som referanse for alle andre vindhastigheter i forsøkene, for å oppnå ubenevnte forsøksresultater. Deretter ble det gjort forsøk med beskyttelse mot vind. Områder hvor sand ble erodert ved  $U > U^*_{th}$ , hvor U er vindhastigheten, indikerer beskyttede soner. Områder hvor sand ble erodert ved  $U < U^*_{th}$ , indikerer eksponerte soner.



Figur 13. Vindprofil målt i vindtunnelen nær testobjektets plassering på testområdet. Figur: Ferreira & Sanchez (2009).

Forsøkenes prosedyre bestod i å øke vindhastigheten til forhåndsbestemte nivåer. Sandens konturer ved hvert nivå ble registrert med digitalkamera. Deretter ble bildene behandlet i et bildebehandlingsprogram, hvor sandens konturer ble markert og fargelagt til et polygon. Polygonene for hvert nivå ble lagt på hverandre, slik at man endte opp med et fargediagram med sandens konturer ved alle de forhåndsbestemte nivåene.

### 2.6.2 Akkumulasjonsforsøk

Zhou m.fl (Upublisert) gjennomførte forsøk i forbindelse med et studie av redistribusjon av snø på flernivåtak. Det ble både gjort feltobservasjoner, samt forsøk med en modell skalamodell i målestokk 1:7,5 i vindtunnel. Hensikten med disse forsøkene var å

- 1. Gjennomføre forsøk med ulike partikkeltyper med ulike fysiske egenskaper for å bestemme hvilken partikkeltype som best egner seg til å simulere snø.
- 2. Hvordan redistribusjon av snø påvirkes av vindhastighet, taklengde og varigheten av eksponering for vind.

Punkt 1 i størst grad relevant i forbindelse med denne oppgaven, og som dermed blir gjennomgått. Forsøkene ble gjennomført med samme ubenevnte vindhastighet og varighet for alle forsøk med ulike partikler. De forskjellige typer partikler brukt i forsøkene var sagmuggaske, skumplast og silicasand.
|   | Snøpartikkel | Silicasand | Skumplast | Sagmuggaske |
|---|--------------|------------|-----------|-------------|
| Diameter [mm]                           | 0,15~0,2     | 0,2        | 0,4       | 0,5         |
| Densitet [kg/m3]                        | 50~700       | 2784       | 1223      | 297         |
| Terskelhastighet ved 1 m høyde<br>[m/s] | 3,25~7,81    | 7,16       | 4,77      | 3,25        |
| Terskelfriksjonshastighet [m/s]         | 0,15~0,36    | 0,33       | 0,22      | 0,15        |
| Friksjonsvinkel [°]                     | 50           | 34         | 21        | 43          |
| Sedimenteringshastighet [m/s]           | 0,2~0,5      | 0,6        | 0,5       | 0,2         |



Figur 14. Redistribusjon av tre partikkeltyper påmodellens nedre flate. Figur: Zhou m.fl (Upublisert).

Det presenteres videre skaleringskriterier for partikler brukt i forsøk i vindtunnel. For hver partikkeltype må skaleringskriteriet tilfredsstilles for å kunne benytte partikkeltypen i skalaforsøk:

- Likhet i forhold for modell, terreng og strømningsfelt.
- Likhet i forholdet mellom partiklenes saltasjonsbaner.
- Likhet i forhold for akkumulasjonsmønstre.
- Likhet i tidsforhold.

Forsøkene viset at det er større likhetsparametre mellom resultatene fra forsøkene gjort med silicasand og fullskalaforsøk med snø, sammenlignet med resultatene fra forsøkene med de øvrige partikkeltypene (se figur 14).

Det blir videre nevnt at likhetsparameterne ved forsøkene med silicasand ikke bare ligner mest på fullskalaforsøkene med snø, men at de også tilfredsstiller skaleringskriteriene i størst grad. Det konkluderes med at silicasand, sammenliknet med to skumplast og sagmuggaske, simulerer mer nøyaktig redistribusjon av snø som følge av vind på tak.

# 3.0 Metode

Det er mulig å belyse oppgavens problemstilling ved observasjon av faktiske forhold utendørs, forsøk med skalamodeller under kontrollerte forhold, og numeriske simuleringer. De numeriske simuleringene kan for eksempel utføres med ANSYS CFD.

# 3.1 Metode, skalaforsøk i vindtunnel

Det ble besluttet å gjennomføre forsøk på skalamodell under kontrollerte forhold i vindtunnel, ettersom resultater fra slike forsøk anses som nøyaktige (se 2.6.1 og 2.6.2). Forsøkene ble gjennomført i Coimbra, Portugal perioden 27.01.2014 – 27.02.2014, hvor den første uken ble brukt til å bygge skalamodellene. De gjenværende fire ukene gjennomførte vi totalt 33 forsøk i forbindelse med denne oppgaven, hvorav 32 blir presentert.

# 3.1.1 Om vindtunnelen

Vindtunnelen brukes av UC så vel som den delvis frittstående forskningsinstitusjonen Association for the Development of the Industrial Aerodynamics (ADAI). UCs bruksområder for vindtunnelen er som oftest tilknyttet mastergradsoppgaver, doktorgradsavhandlinger og annen forskning.

Vindtunnelen virker ved at luft først drives fra en vifte gjennom to sett filtere med heksagonale åpninger for å redusere effekten av virvling fra viften. Deretter følger en kontraksjonsdel mot inntaket til det åpne testområdet. Deretter føres luften gjennom uttaket, en returkanal, og tilbake til luftinntaksrommet hvor viften befinner seg.

Inntakets åpning måler 2m x 2m. Uttaket har samme mål, men med en utvidelse på ca. 0,5 m over, på høyre og venstre side. Vindtunnelens testområde måler 5m x 5m. På midten av testområdet er en roterende skive som manøvreres manuelt (se figur 15).

Vindtunnelen styres gjennom et kontrollpanel plassert inntil luftinntaksrommet. Kontrollpanelet betjenes ved å akselerere viften til ønsket rotasjonshastighet, w [rpm], som vises på et display på kontrollpanelet. Over testområdet er det en lasermåler som måler avstander, og betjenes gjennom en datamaskin tilknyttet måleren.



Figur 15. Oversikt over vindtunnelens testområde.

## 3.1.2 Om skalamodellen

Modellen representer en 3 etasjer høy bygning med solfangere på taket. Den er laget i skala 1:26 med målene H x B x L = 30 cm x 120 cm x 60 cm. Det ble gjort undersøkelser av ulike solfangerprodusenters typiske dimensjoner for solfangere. Ut i fra disse undersøkelsene, og av praktiske årsaker, ble det bestemt at en representativ høyde og tykkelse i fullskala til bruk i denne oppgaven kunne være henholdsvis 1950 mm og 130 mm. Dette tilsvarer høyde 75 mm og tykkelse 5 mm i skalaforsøkene.

For å kunne bestemme hvordan avstanden mellom solfangernes underkant og topplaten påvirker redistribusjon av sand, ble forsøkene gjennomført ved tre ulike avstander. I denne oppgaven ble 8 mm, 16 mm og 24 mm valgt, som tilsvarer henholdsvis 208 mm, 416 mm og 624 mm i fullskala.

Solfangernes vinkel ble bestemt på grunnlag av flere informasjonskilder nevnt i 2.5.1. Med bakgrunn i nevnt litteratur og samtale, ble solfangernes helningsvinkel i denne oppgaven satt til 70°.

Solfangernes innbyrdes avstand ble bestemt ut fra ligning 18 og 19. For utregningen forutsettes det at solfangerne er sydvendte. Det ble først brukt en solkalkulator fra hjemmesidene til U.S National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). Ved å plotte inn koordinater og klokkeslett oppgis solens vinkel i forhold til horisontalplanet samt asimutvinkelen.

Med input 1. mars og 7 timer uten skygge på solfangerne, gis innbyrdes avstand 5676 mm, som tilsvarer 218 mm i skala 1:26. Med denne utregningen til grunn ble det bestemt at 3 paneler, ett mot hver kant av topplaten og et på midten, er optimalt. Se figur 16 og 17 for mer utfyllende opplysninger om modellen.

Modellens indre konstruksjoner og rammeverket til solfangerne ble gjennomført i tre, mens sideog topplatene bestod av trefiberplater. Solfangerne ble laget av en 8 mm tykk pleksiglassplate som ble saget til i emner. Modellen ble posisjonert 153,7 cm nedstrøms fra inntaket, på grunn av lasermålerens plassering (se figur 18). Gulvet ble markert med kritt for å sikre lik posisjonering i forsøkene.



Figur 16. Målsatt 3D-tegning av skalamodellen brukt i forsøkene.



Figur 17. Oversikt over innbyrdes avstander mellom solfangerpanelene.



Figur 18. Plassering av modell samt definisjon av aksesystemet brukt i forsøkene, sett ovenfra.

## 3.1.3 Kalibrering av vindtunnel

For å kunne anse forsøksresultatene som gyldige var vi avhengige at vindhastigheten er uniform i innløpets tverrsnitt samt på testområdet. Det ble derfor gjort kalibreringer av vindtunnelen i form av totalt tre tester. Alle ble gjort ved å anvende Pitotrør, og lese av målingene manuelt fra den tilhørende trykkmåleren. Deretter ble vindhastigheten ved Pitotrørets posisjon funnet ved ligning 12. Nedenfor er en oversikt over de ulike kalibreringene som ble gjort i forbindelse med skalaforsøkene.

- Kalibrering av vindhastighetens uniformitet ved innløpet: Vindhastigheten ble målt for hver 0,25 m i et rutenett over innløpets tverrsnitt. Dette ble gjort ved å montere fast Pitotrøret til en stålramme med justerbare deler. Testen ble gjort ved w = 300 rpm, 0,15~0,2 m fra innløpet.
- 2. Kalibrering av vindhastighetens uniformitet på testområdet og i utløpet: Vindhastigheten ble målt 0,2 m over gulvet i et rutenett mellom innløpet og utløpet. Det ble foretatt målinger for hver 0,25 m langs tre linjer parallelt med vindretningen. Vindhastigheten ble også testet 1,0 m og 2,0 m inn i utløpet. Testen ble gjort ved w = 300 rpm.
- 3. Kalibrering av viftens rotasjonshastighet og tilhørende vindhastighet: Etter forsøkene var gjennomført ble viftens vindhastighet målt opp mot viftens rotasjonshastighet, målt 0,15~0,2 m fra innløpet ved høyde 0,3 m og 1,0 m over testområdets flate.

## 3.1.4 Om forsøkene

Utregnet optimalt antall rader med solfangere er 3. Det var relevant å undersøke redistribusjon av sand ved et høyere og lavere antall paneler. Det ble dermed besluttet at det også skulle gjøres forsøk med 2 og 5 rader.

Forsøkene ble altså gjort med følgende tre variabler:

- 1. Modellens orientering i forhold til vindretningen.
- 2. Antall rader med solfangerpaneler.
- 3. Avstand mellom underkant panel og topplaten.

Sand ble brukt til å simulere snø i forsøkene, ettersom snø ikke var tilgjengelig. Viser til kapittel 2.6.2 hvor sand anses å tilfredsstille skaleringskriteriene presentert av Zhou m.fl. (Upublisert).

For å skille mellom forsøkene og gjøre etterarbeidet enklere, ble det gitt kodenavn til hvert enkelt forsøk. De følger oppsettet

#### SC\_A\_B\_C\_D

hvor SC står for Solar Collector, A angir type forsøk [E = erotion (erosjon), D = deposition (akkumulasjon)], B angir antall rader med solfangerpaneler (2, 3 eller 5), C angir solfangerpanelenes høyde over modellens topplate i mm (8, 16 eller 24), og D angir modellens orientering i forhold til vindretning (P = positiv, N = negativ). For akkumulasjonsforsøkene vil det stå T0 eller T6 etter forsøkstittelen. T0 indikerer 0 minutter, altså at målingen er gjort før eksponering av vind, og T6 indikerer at modellen har blitt eksponert for vind i 6 minutter før målingen ble gjort.



*Figur 19.* Definisjon av modellens orientering i forhold til vindretningen (vist med piler). Til venstre: positiv orientering. Til høyre: negativ orientering.

Før oppstart av forsøk ble det gjennomført et erosjonsforsøk og et akkumulasjonsforsøk. Resultatene fra forsøkene ble brukt som referanse for de øvrige forsøk med solfangerpaneler.

#### 3.1.5 Gjennomføring av erosjonsforsøk

For å kunne fastslå hvor modellens topplate er mest eksponert for vind og hvor separasjonssoner dannes, ble det gjennomført sanderosjonsforsøk. Forsøkene følger samme prinsipp som forsøk gjort av Ferreira og Sanchez (2009), forklart i 2.6.2.

Det ble gjort testforsøk i forkant som viste at sand ikke begynte å erodere før viften hadde nådd w = 150 rpm, og det ble dermed besluttet at første registrering skulle gjøres ved nevnte rotasjonshastighet. Høyeste rotasjonshastighet ble bestemt til w = 400 rpm, da det ble observert ved referanseforsøket at sand i liten grad eroderte ved denne rotasjonshastigheten.

| Forsøk      | Antall rader | Høyde [mm] | Orientering |
|-------------|--------------|------------|-------------|
| SC_E_0_0    | 0            | 0          | -           |
| SC_E_2_8_N  | 2            | 8          | Negativ     |
| SC_E_2_8_P  | 2            | 8          | Positiv     |
| SC_E_2_16_N | 2            | 16         | Negativ     |
| SC_E_2_16_P | 2            | 16         | Positiv     |
| SC_E_2_24_N | 2            | 24         | Negativ     |
| SC_E_2_24_P | 2            | 24         | Positiv     |
| SC_E_3_8_N  | 3            | 8          | Negativ     |
| SC_E_3_8_P  | 3            | 8          | Positiv     |
| SC_E_3_16_N | 3            | 16         | Negativ     |
| SC_E_3_16_P | 3            | 16         | Positiv     |
| SC_E_3_24_N | 3            | 24         | Negativ     |
| SC_E_3_24_P | 3            | 24         | Positiv     |
| SC_E_5_8_N  | 5            | 8          | Negativ     |
| SC_E_5_8_P  | 5            | 8          | Positiv     |
| SC_E_5_16_N | 5            | 16         | Negativ     |
| SC_E_5_16_P | 5            | 16         | Positiv     |
| SC_E_5_24_N | 5            | 24         | Negativ     |
| SC_E_5_24_P | 5            | 24         | Positiv     |

Tabell 3. Oversikt over de totalt 19 erosjonsforsøkene gjennnomført i forbindelse med oppgaven.

Erosjonsforsøkene fulgte følgende fremgangsmåte:

- 1. Modellen ble plassert på testområdet, og solfangerpanelenes rammeverk ble montert.
- 2. Et sandlag med 1 mm høyde ble fordelt over modellens topplate.
- 3. Videokameraet og vindtunnelen ble startet opp.

- 4. Viftens rotasjonshastighet økte til de forhåndsbestemte nivåene. Modellen ble eksponert for vind i tid T = 2 minutter for hvert nivå og konturene ble registrert (se figur 20), før viftens rotasjonshastighet ble økt til neste nivå.
- 5. Etter forsøket var ferdig ble videoopptaket stoppet og overført til datamaskin, og modellen ble gjort klar til neste forsøk.



Figur 20. Til venstre vises modellen like før registrering av viftefrekvens w = 225 rpm ved forsøk  $SC\_E\_5\_8\_N$ . Til høyre vises hvordan de forhåndsbestemte nivåene ble registrert for å kunne bearbeide data videre.

Etterarbeidet bestod i å gå gjennom videoklippene fra hvert enkelt forsøk, og hente ut bilder ved hver registrering (se figur 20). Enkeltbildene ble bearbeidet i Photoshop ved å lage et polygon som fulgte sandens konturer, og fylle polygonet med farge for den respektive hastigheten konturen ble registrert ved. Deretter ble polygonene lagt lagvis på hverandre. På denne måten fikk man et fargediagram for hvert forsøk med sandens konturer ved hver vindhastighet.

Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen ble laget ved å benytte programmet Grapher. De ferdige fargediagrammene importert inn i programmet, og man definerte et aksesystem. Deretter kunne man hente ut koordinatene til konturlinjene til hver enkelt vindhastighet manuelt. Dataene ble så bearbeidet i Excel og importert tilbake til Grapher, hvor et diagram ble laget ut fra hvert enkeltforsøks data.

## 3.1.6 Gjennomføring av akkumulasjonsforsøk

Akkumulasjonsforsøk ble gjennomført for å kunne fastslå den totale eroderte mengden sand langs modellens senterlinje, samt fordelingen av sanden over modellens lengde som følge av vind. Det ble bestemt at akkumulasjonsforsøkene ikke skulle gjøres ved 8 mm og 24 mm høyde.

Tabell 4. Oversikt over de totalt 13 akkumulasjonsforsøk gjennomført i forbindelse med oppgaven.

| Forsøk      | Antall rader | Høyde [mm] | Orientering |
|-------------|--------------|------------|-------------|
| SC_D_0_0    | 0            | 0          | -           |
| SC_D_2_8_N  | 2            | 8          | Negativ     |
| SC_D_2_8_P  | 2            | 8          | Positiv     |
| SC_D_2_24_N | 2            | 24         | Negativ     |
| SC_D_2_24_P | 2            | 24         | Positiv     |
| SC_D_3_8_N  | 3            | 8          | Negativ     |
| SC_D_3_8_P  | 3            | 8          | Positiv     |
| SC_D_3_24_N | 3            | 24         | Negativ     |
| SC_D_3_24_P | 3            | 24         | Positiv     |
| SC_D_5_8_N  | 5            | 8          | Negativ     |
| SC_D_5_8_P  | 5            | 8          | Positiv     |
| SC_D_5_24_N | 5            | 24         | Negativ     |
| SC_D_5_24_P | 5            | 24         | Positiv     |

Den nevnte forsøksmetoden er basert på prinsippene beskrevet i Zhou m.fl. (Upublisert), og fulgte følgende fremgangsmåte:

- 1. Modellen ble plassert på testområdet, og rammeverket til solfangerpanelene ble montert
- 2. Et sandlag med 20 mm høyde ble fordelt ut over modellens topplate.
- 3. Viften ble deretter stilt til w = 333 rpm. Mens viftens frekvens økte til det forhåndsbestemte nivået, ble en trefiberplate holdt mellom inntaket og modellen for å hindre eksponering for vind utenfor forsøkets definerte tidsrammer. Når viften hadde nådd w = 333 rpm, ble platen fjernet, og forsøket startet.
- 4. Etter T = 6 minutter ble platen igjen satt mellom inntaket og modellen, av samme grunn som i punkt 3.
- 5. Målinger ble foretatt av lasermåleren, som målte sandhøyden ut i fra et forhåndsdefinert rutenett. Måledata kunne deretter hentes fra datamaskinen tilknyttet måleren.

Etterarbeidet bestod først i å importere data fra alle forsøk i Excel. Sandlagets høyde for hvert målte punkt ble funnet ved formelen

$$z = H_L - H - z_M \tag{20}$$

hvor z er sandlagets høyde etter endt forsøk,  $H_L$  er lasermålerens høyde over testområdets underlag (= 2779 mm), H er høyden til modellens topplate over testområdets underlag (= 31 cm) og  $z_M$  er den målte avstanden fra lasermåleren til sandlagets overflate. Differansen  $\boldsymbol{z}_{\text{diff}}$  mellom sandhøyden før og etter eksponering for vind gis ved

$$\mathbf{z}_{\rm diff} = \mathbf{z}_0 - \mathbf{z} \tag{21}$$

hvor  $z_0$  er sandlagets høyde før modellen ble eksponert for vind.

Dataene ble deretter importert til Grapher, og det ble laget en graf for hvert forsøk for de utregnede verdiene for z, og en graf ut i fra de utregnede verdiene for  $z_{diff}$ .

# 4.0 Resultater

I dette kapittelet presenteres resultatene fra kalibreringen av vindtunnelen samt resultater fra forsøkene gjort i forbindelse med oppgaven. Resultater fra forsøkene vil presenteres med forsøkstittel i henhold til definisjonene forklart i kapittel 3.1.4, 3.1.5 og 3.1.6. Aksesystemet brukt i forbindelse med forsøkene er definert i figur 18, ved positiv X-akse med vindretningen. Positiv Y-akse er mot høyre, sett mot innløpet. Panelene er nummerert fra 1 til 5, hvor panel 1 er lengst oppstrøms og panel 5 lengst nedstrøms.

# 4.1 Kalibrering av vindtunnel

Resultatene fra kalibreringen av vindtunnelen beskrevet i delkapittel 3.1.4 presenteres i dette delkapittelet. Vindtunnelens uniformitet i innløpet, vindhastigheten over testområdet, samt test av viftens rotasjonshastighet og de tilhørende vindhastighetene vil presenteres. Alle målinger er gjort med Pitotrør, og vindhastighetene er funnet ved formel 8. I beregningene av vindhastigheter luftens densitet antatt lik 1,18 kg/m<sup>3</sup>.

# 4.1.1 Kalibrering av vindhastighet

Test av vindhastigheter ved de ulike rotasjonshastighetene ble gjort etter at alle forsøk var gjennomført. Nedenfor er en tabell med resultatene fra målingene. Ut fra beregninger gjort ved ligning 11, er det valgt å bruke den lineære sammenhengen dV/dw = 0,034 som grunnlag for beregning av vindhastigheter ved vindtunnelens rotasjonshastigheter.

Tabell 5. Resultater fra kalibrering av vindtunnelens rotasjonshastighet mot de målte vindhastighetene.

| w [rpm] | V [m/s] |
|---------|---------|
| 150     | 5,1     |
| 175     | 6,0     |
| 200     | 6,8     |
| 225     | 7,7     |
| 250     | 8,5     |
| 275     | 9,4     |
| 300     | 10,2    |
| 325     | 11,1    |
| 350     | 11,9    |
| 375     | 12,8    |
| 400     | 13,6    |

#### 4.1.2 Kalibrering av vindhastighet ved innløpet

Test av vindhastighetens uniformitet ved innløpet ble gjort før forsøkene. Vindhastighetene ble målt over hele innløpets tverrsnitt, bortsett fra ved høyde lik 0. Målingene er gjort i et rutenett på 0,25 m for begge aksene.



### 4.1.3 Kalibrering av vindhastighet over testområdet og utløpet

Vindhastighetens uniformitet over testområdet ble testet før forsøkene ble gjennomført. Vindhastighetene ble målt langs 3 linjer fra innløpet, over testområdet og i utløpet.



Figur 22. Vindhastigheter over testområdet og i utløpet.

# 4.2 Erosjonsforsøk

Skalamodellen er delt i tre soner (se figur 16). Ved presentasjon av erosjonsforsøkene defineres sonen hvor Y er positiv som den øvre sonen, sonen hvor Y er negativ som den nedre sonen, og sonen hvor X-aksen skjærer gjennom senterlinjen som den midtre sonen.

Resultater fra erosjonsforsøkene presenteres etter følgende oppsett: På hver side vises figurer fra ett forsøk. Den øvre figuren viser et erosjonsdiagram i plan, som ble produsert etter metoden forklart i 3.1.6. Hver farge i diagrammet representerer sandens konturer ved fargens tilhørende vindhastighet vist til høyre for diagrammet. Ved alle forsøk med solfangerpaneler ble fargediagrammene laget ut ifra erosjonen mellom panelenes rammeverk. Dette betyr at de ytterste ca. 12 cm på hver side av rammeverkets ytterkanter ikke kommer med. Derfor ser diagrammet fra SC\_E\_0\_0 noe smalere og høyere ut enn for de andre forsøkene.

Den nedre figuren er et erosjonsdiagram laget ut ifra et snitt gjennom modellens senterlinje, forklart i 3.1.5. Solfangerpanelenes posisjon er markert over diagrammene. Merk at de kun er ment for å indikere solfangerpanelenes omtrentlige posisjon.

# SC\_E\_0\_0:

Figurene viser resultatet fra erosjonsforsøk gjort uten paneler. Resultatet fra dette forsøket er brukt som referanse for erosjonsforsøkene gjort med paneler. Fargediagrammet viser en relativt jevn erosjon over modellens bredde, med noen uregelmessigheter.



Figur 23. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_0\_0.



*Figur 24. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_0\_0.* 

### 4.2.1 Erosjonsforsøk, 2 paneler

#### SC\_E\_2\_8\_N:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 2 paneler 8 mm over topplaten, med negativ orientering i forhold til vindretningen. Det synes en relativt jevn erosjon over modellens bredde. Det er erodert tilnærmet like mengder sand oppstrøms som nedstrøms for det fremste panelet. For det bakre panelet er det erodert nærmest utelukkende oppstrøms for panelets underkant.



Figur 25. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_2\_8\_N.



Figur 26. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_2\_8\_N.

SC\_E\_2\_8\_P:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 2 paneler 8 mm over topplaten, med positiv orientering i forhold til vindretningen. Erosjonen er relativt jevn over modellens bredde. Ved det fremste panelet er størst mengde sand erodert nedstrøms for panelets bunnpunkt, mens for det bakre panelet er sand i størst grad erodert oppstrøms for panelets bunnpunkt.



Figur 27. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_2\_8\_P.



Figur 28. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_2\_8\_P.

SC\_E\_2\_16\_N:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 2 paneler 16 mm over topplaten, med negativ orientering i forhold til vindretningen. Sanden er erodert noe ujevnt, mest i den midtre sonen og minst i den nedre sonen. Ved det fremste panelet er sand erodert mer nedstrøms enn oppstrøms for panelets underkant. Ved det bakre panelet eroderte adskillig mer sand oppstrøms enn nedstrøms for panelets underkant.



Figur 29. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_2\_16\_N.



*Figur 30. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_2\_16\_N.* 

SC\_E\_2\_16\_P:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 2 paneler 16 mm over topplaten, med positiv orientering i forhold til vindretningen. Sanden eroderte jevnt over modellens bredde. Nedstrøms for det fremste panelets underkant eroderte sanden både før og i større grad enn oppstrøms. Ved det bakre panelet eroderte sanden oppstrøms for panelets underkant.



Figur 31. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_2\_16\_P.



*Figur 32. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_2\_16\_P.* 

SC\_E\_2\_24\_N:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 2 paneler 24 mm over topplaten, med negativ orientering i forhold til vindretningen. Sanden eroderte noe ujevnt, i større grad og tidligst ved den midtre sonen og minst ved den nedre sonen. Ved det fremste panelet er det tendenser til lik erosjon ved de lavere vindhastighetene oppstrøms og nedstrøms for panelets underkant. Ved høyere vindhastigheter viser figuren at det eroderes mest nedstrøms for panelets underkant.



Figur 33. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_2\_24\_N.



*Figur 34. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_2\_24\_N.* 

SC\_E\_2\_24\_P:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 2 paneler 24 mm over topplaten, med positiv orientering i forhold til vindretningen. Sanden eroderte relativt jevnt over modellens bredde, dog noe mindre i den nederste sonen enn de to øvre. Figuren viser klare tendenser til erosjon nedstrøms for det fremste panelets underkant. Det er i liten grad erodert sand ved det bakre panelet.



Figur 35. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_2\_24\_P.



Figur 36. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_2\_24\_P.

#### 4.2.2 Erosjonsforsøk, 3 paneler

#### SC\_E\_3\_8\_N:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 3 paneler 8 mm over topplaten, med negativ orientering i forhold til vindretningen. Sanden har erodert relativt jevnt over modellens bredde. Merk at sanden har erodert noe mer oppstrøms enn nedstrøms for det fremste panelets underkant. For de to bakre panelene har det erodert minimalt med sand nedstrøms for panelenes underkant, men det er erodert betydelig oppstrøms for underkantet.



Figur 37. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_3\_8\_N.



Figur 38. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_3\_8\_N.

## SC\_E\_3\_8\_P:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 3 paneler 8 mm over topplaten, med positiv orientering i forhold til vindretningen. Erosjonen er relativt jevn over modellens bredde. Ved de to fremste panelene er det erodert mer nedstrøms for panelenes underkant, mens for det bakre panelet er det erodert mest oppstrøms for panelets underkant.



Figur 39. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_3\_8\_P.



*Figur 40. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_3\_8\_P.* 

SC\_E\_3\_16\_N:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 3 paneler 8 mm over topplaten, med negativ orientering i forhold til vindretningen. Sanden har erodert noe ujevnt over modellens bredde, det er erodert minst ved den nedre sonen, og mest ved den midtre. Sanden eroderte omtrent like mye oppstrøms som nedstrøms for panelets underkant. Ved de to bakre panelene er sanden erodert tilnærmet utelukkende oppstrøms for panelenes underkant.



Figur 41. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_3\_16\_N.



*Figur 42. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_3\_16\_N.* 

SC\_E\_3\_16\_P:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 3 paneler 16 mm over topplaten, med positiv orientering i forhold til vindretningen. Sanden har erodert relativt jevnt over modellens bredde. Det er erodert tidligst og mest mellom det fremste panelets toppunkt til det midtre panelets underkant. Det er også noe erosjon nedstrøms for det midtre panelets underkant, men minimalt ved det bakre panelet.



Figur 43. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_3\_16\_P.



*Figur 44. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_3\_16\_P.* 

## SC\_E\_3\_24\_N:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 3 paneler 24 mm over topplaten, med negativ orientering i forhold til vindretningen. Ved det fremste panelet, er det erodert mer i den midtre sonen enn ved de øvrige. Ved det bakre panelet er det også erodert mest i den midtre sonen, og ingen erosjon i den nedre sonen. Det er erodert mer sand nedstrøms enn oppstrøms for det fremste panelets underkant. Det er tilnærmet ingen erosjon ved det midtre panelet. Ved det bakre panelet er det erodert sand oppstrøms for panelets underkant.



Figur 45. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_3\_24\_N.



*Figur 46. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_3\_24\_N.* 

SC\_E\_3\_24\_P:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 3 paneler 24 mm over topplaten, med positiv orientering i forhold til vindretningen. Sanden er erodert relativt jevnt over modellens bredde. Sanden eroderte fra omtrent ved det fremste panelets toppunkt til det bakre panelets toppunkt, og tidligst mellom det fremste panelets underkant og det midtre panelets toppunkt. Det er tilnærmet ingen erosjon nedstrøms fra det bakre panelets toppunkt.



Figur 47. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_3\_24\_P.



*Figur 48. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_3\_24\_P.* 

#### 4.2.3 Erosjonsforsøk, 5 paneler

#### SC\_E\_5\_8\_N:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 5 paneler 8 mm over topplaten, med negativ orientering i forhold til vindretningen. Sanden eroderte relativt jevnt over modellens bredde, med unntak av nedstrøms for det bakre panelet. Ved det fremste panelet er det erodert omtrent like mye oppstrøms og nedstrøms for panelets underkant. Ved de øvrige panelene er det i størst grad erodert oppstrøms for panelenes underkanter.



Figur 49. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_5\_8\_N.



Figur 50. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_5\_8\_N.

SC\_E\_5\_8\_P:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 5 paneler 8 mm over topplaten, med positiv orientering i forhold til vindretningen. Sanden har erodert relativt jevnt over modellens bredde, bortsett fra ved det midtre panelet, hvor det er erodert mindre i den nedre sonen. Det er erodert først i området mellom det første panelets underkant og det andre panelets toppunkt. Ved de to bakre panelene er det i størst grad erodert oppstrøms for panelenes underkanter.





*Figur 52. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_5\_8\_P.* 

### SC\_E\_5\_16\_N:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 5 paneler 16 mm over topplaten, med negativ orientering i forhold til vindretningen. Sanden er erodert relativt likt over modellens bredde. Imidlertid er sand erodert noe tidligere og i større grad i den midtre sonen, og i minst grad i den nedre sonen ved panel 3, 4 og 5. Ved panel 2 ble det ikke erodert sand i den midtre sonen, mens ved de to ytre sonene er det erodert noe sand mot ytterkantene. Ved det fremste panelet eroderte sanden tilnærmet likt oppstrøms og nedstrøms for underkantet, mens for de øvrige panelene eroderte sanden mest oppstrøms for panelenes underkant.



Figur 53. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_5\_16\_N.



*Figur 54. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_5\_16\_N.* 

SC\_E\_5\_16\_P:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 5 paneler 16 mm over topplaten, med positiv orientering i forhold til vindretningen. Ved dette forsøket eroderte sanden ujevnt over modellens bredde. Det er imidlertid noen mønstre som går igjen i de tre sonene; sanden eroderte først nedstrøms for det fremste panelets underkant, og deretter øker det eroderte området jevnt med økende vindhastighet. Det er tendenser til senere erosjon like oppstrøms for panelenes underkanter.



Figur 55. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_5\_16\_P.



*Figur 56. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_5\_16\_P.* 

SC\_E\_5\_24\_N:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 5 paneler 24 mm over topplaten, med negativ orientering i forhold til vindretningen. Ved dette forsøket har sanden erodert jevnt over modellens bredde. Det har imidlertid erodert noe mer i den midtre sonen ved de fremste panelene. Ved modellens bakre panel er det erodert noe over hele den midtre sonens bredde, mens det er noe erosjon i den øvre sonen, og ingen erosjon i den nedre sonen.



Figur 57. Erosjonsdiagram i plan, for forsøk SC\_E\_5\_24\_N.



*Figur 58. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_5\_24\_N.* 

SC\_E\_5\_24\_P:

Figurene viser resultatet fra forsøk med 5 paneler 24 mm over topplaten, med positiv orientering i forhold til vindretningen. Sanden er erodert noe ujevnt over modellens bredde, men det er likevel store likheter over sonene. Erosjonen startet ved det fremste panelets underkant, og omtrent til ved det midtre panelets toppunkt. Videre nedstrøms er sand erodert relativt jevnt over modellens lengde.





*Figur 60. Erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinjen, for forsøk SC\_E\_5\_24\_P.* 

#### 4.2.2 Sammenligning av resultater

#### Negativt orienterte paneler:

Det er klare tendenser til like erosjonsmønstre ved det fremste panelet for forsøk med negativt orienterte paneler. Erosjonen startet ved panelenes underkant, og ved lavere vindhastigheter eroderes tilnærmet like mye oppstrøms som nedstrøms for dette punktet. Deretter eroderte sanden lengre nedstrøms enn oppstrøms. Ved de øvrige panelene eroderte sanden tilnærmet utelukkende oppstrøms for panelenes underkanter.

For forsøk med to paneler eroderte sanden ved høyere vindhastigheter men ved større utstrekning, med økende avstand mellom panelenes underkant og topplaten. Nær det bakre panelet eroderte sanden ved høyere vindhastigheter og over mindre utstrekning, med økende avstand mellom panelenes underkant og topplaten.

Forsøkene gjort med tre paneler deler likheter med forsøkene gjort med to. Erosjon ved det fremste panelet følger samme mønster som for forsøkene med to paneler. Ved det bakre panelet eroderte sanden ved høyere vindhastigheter og over mindre utstrekning, med økende avstand mellom panelenes underkant og topplaten. Erosjonen ved det midtre panelet synes å følge formen til erosjonen ved det bakre panelet. Sand eroderte imidlertid ved høyere vindhastigheter, og over mindre areal enn ved det bakre panelet.

For forsøk med fem paneler eroderte sanden nær det fremste panelet på samme måte som med to og tre paneler, ved økning i avstand mellom panelenes underkant og topplaten. Nær de øvrige panelene eroderte sand ved høyere hastigheter og over mindre utstrekning ved økende avstand mellom panelenes underkant og topplaten.

### Positivt orienterte paneler:

Ved forsøk med panelene positivt orientert er det også klare tendenser til like erosjonsmønstre nær det fremste panelet. For alle forsøk startet erosjonen nedstrøms for panelenes underkanter. For de øvrige panelene synes det også å ha erodert noe tidligere nedstrøms for panelenes underkant. Dette gjelder imidlertid ikke den bakre panelraden, hvor det var tendenser til erosjon oppstrøms for hvert panels underkant. Ved de høyere vindhastighetene var det også tendenser til erosjon nedstrøms for de bakre panelenes underkanter.

For forsøk med to paneler eroderte sanden nær det fremste panelet over større areal og ved lavere hastigheter, med økende avstand mellom panelenes underkant og topplaten. Nær det bakre panelet eroderte sanden ved høyere hastighet, og med mindre utstrekning med økende avstand mellom panelenes underkant og topplaten.

Ved forsøk med tre paneler, følger erosjon nær det fremste panelet samme mønster som i forsøkene gjort med to paneler. Det samme gjelder erosjon nær det bakre panelet. Sand eroderte nær det midtre panelet ved lavere hastigheter og med større utstrekning med økende avstand mellom panelenes underkant og topplaten. For forsøk med fem paneler eroderte sand ved lavere hastigheter og med større utstrekning ved alle paneler, med økning i avstand mellom panelenes underkant og topplaten.

# 4.3 Akkumulasjonsforsøk

Resultater fra akkumulasjonsforsøkene presenteres etter følgende oppsett: Ett forsøk presenteres på to sider. På den første siden vises to bilder samt en beskrivelse av observasjonene ved forsøket. På den neste siden presenteres to diagrammer. Det øvre diagrammet viser målte sandhøyder. Linjene i diagrammet representerer sandhøyden ved de ulike Y-verdiene (illustrert til høyre for diagrammet). For akkumulasjonsforsøkene defineres sonene som henholdsvis den positive sonen (Y = positiv), den negative sonen (Y = negativ) og den midtre sonen.

Det antas at sandlagets tykkelse før eksponering for vind er den samme for alle forsøkene. Derfor ble sandhøyden ved SC\_D\_0\_0, før den ble eksponert for vind, vist med de andre forsøksresultatene som en referanse. Det nedre diagrammet viser differansen mellom sandlagets høyde ved SC\_D\_0\_0 T0, og de respektive forsøkene som er presentert. Ved alle diagrammene som presenteres vil den horisontale aksen ha verdi fra 0 til 1. Verdiene langs aksen er forholdstall mellom målingenes X-verdi dividert med modellens totale lengde.

Diagrammene er laget ved å benytte ligning 20 og 21 for de vedlagte målte verdiene til de respektive forsøk.. Noen målinger ble utelatt fra diagrammene, og er merket med farger i vedlagte tabeller. Målinger som ble gjort utenfor modellens flate (rødt), målinger som ga urealistiske verdier (grått) og målinger gjort på solfangerpaneler (blått) er utelatt fra diagrammene (se vedlagte tabeller).

Ved enkelte av diagrammene er linjene ikke-kontinuerlige. Dette skyldes at målingene ble gjort over panelene, og ga urealistiske verdier av sandlagets høyde på grunn av delvis refleksjon fra pleksiglasset. Dermed måtte disse verdiene utelates. Dette gjelder imidlertid kun hvor ville blitt forstyrret om panelene ble fjernet. Etter endt forsøk hvor panelene ikke var i kontakt med sanden, ble panelene fjernet før sandlagets høyder ble målt.

Det ble først antatt at redistribusjonen av sand ville være symmetrisk over modellens bredde. For disse forsøkene ble det gjort målinger ved to Y-verdier. Prosedyren ble endret da usymmetrisk redistribusjon ble observert, og det ble foretatt målinger ved tre Y-verdier.

# SC\_D\_0\_0:

Diagrammene nedenfor viser at etter eksponering for vind har sand akkumulert fra i intervallet  $\sim 0.18 < X/L < 0.24$ . Ved de øvrige målingene over modellens lengde er det erodert sand.



Figur 61. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 T0 og SC\_D\_0\_0 T6 (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).
#### 4.2.1 Akkumulasjonsforsøk, 2 paneler

#### SC\_D\_2\_8\_N:

Sanden er redistribuert relativt uniformt over modellens bredde. Ved dette forsøket har sand erodert helt ned til modellens topplate langs senterlinjen i intervallet  $\sim 0.7 < X/L < 0.12$ . Like nedstrøms for panelet er det akkumulert noe sand ved måling Y = 0. Fra like bak det fremste panelet til det bakre panelet er det erodert jevnt.



*Figur* 62. *Skalamodell etter forsøk SC*\_*D*\_2\_8\_*N*. *Vindretning nedenfra*.



*Figur 63. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_2\_8\_N. Vindretning fra høyre.* 



Figur 64. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 T0 og SC\_D\_2\_8\_N (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).

## SC\_D\_2\_8\_P:

Ved dette forsøket er sanden redistribuert relativt uniformt ved den midtre og den positive sonen, men ved den negative sonen eroderte sanden mindre. Ved den negative sonen er sanden erodert ned til topplaten i intervallet  $\sim 0,15 < X/L < 0,2$ . I de to øvrige sonene er sanden erodert ned til topplaten i intervallet  $\sim 0,1 < X/L < 0,4$ . Vi ser også at sand har akkumulert i intervallet  $\sim 0,28 < X/L < 0,55$ .



*Figur 65. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_2\_8\_P. Vindretning nedenfra.* 



*Figur 66. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_2\_8\_P. Vindretning fra høyre.* 



Figur 67. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 T0 og SC\_D\_2\_8\_P (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).

#### SC\_D\_2\_24\_N:

I dette forsøket er sanden redistribuert relativt uniformt i de tre sonene. I intervallet  $\sim 0.05 < X/L < 0.18$  har sanden erodert ned til topplaten langs senterlinjen. Vi ser også at sand har akkumulert i intervallet  $\sim 0.2 < X/L < 0.5$ , med toppunkt på 32,025 mm ved X/L = 0.25.



*Figur* 68. *Skalamodell etter forsøk SC*\_*D*\_2\_24\_*N*. *Vindretning nedenfra*.



*Figur 69. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_2\_24\_N. Vindretning fra høyre.* 



Figur 70. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 TO og SC\_D\_2\_24\_N (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).

## SC\_D\_2\_24\_P:

Ved dette forsøket er sanden redistribuert tilnærmet identisk over modellens bredde. Sanden eroderte ned til modellens topplate fra ~ 0,12 < X/L < 0,5. I intervallet ~ 0,55 < X/L < 0,9 er sand akkumulert, med toppunkt 38,925 mm ved X/L = 0,57.



Figur 71. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_2\_24\_P. Vindretning nedenfra.



*Figur 72. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_2\_24\_P. Vindretning fra høyre.* 



*Figur 73. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 T0 og SC\_D\_2\_24\_P (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).* 

#### 4.2.2 Akkumulasjonsforsøk, 3 paneler

#### SC\_D\_3\_8\_N:

Erosjons- og akkumulasjonsmønstrene er relativt uniforme for målingene i de to snittplanene, men ved Y = 0 er det akkumulert sand i intervallet ~ 0,2 < X/L < 0,37. Fra X/L = 0,37 og videre nedstrøms har sanden erodert jevnt økende.



*Figur 74. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_3\_8\_N. Vindretning nedenfra.* 



*Figur 75. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_3\_8\_N. Vindretning fra høyre.* 



Figur 76. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 T0 og SC\_D\_3\_8\_N (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).

## SC\_D\_3\_8\_P:

Ved dette forsøket er sanden redistribuert likt i den midtre og positive sonen, hvor sand er erodert ned til topplaten i intervallet ~ 0,07 < X/L < 0,32. I den negative sonen har det blitt erodert mindre sand, og her er sanden erodert ned til topplaten i intervallet ~ 0,14 < X/L < 0,22. Nedstrøms for det midtre panelet er sanden erodert jevnt.



*Figur 77. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_3\_8\_P. Vindretning nedenfra.* 



*Figur 78. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_3\_8\_P. Vindretning fra høyre.* 



*Figur 79. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 T0 og SC\_D\_3\_8\_P (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).* 

## SC\_D\_3\_24\_N:

Sanden er redistribuert uniformt over modellens bredde, og erodert ned til topplaten i intervallet  $\sim 0.1 < X/L < 0.2$ , altså frem til like nedstrøms for det fremste panelet. Det er akkumulert sand i intervallet  $\sim 0.23 < X/L < 0.5$ .



*Figur* 80. *Skalamodell etter forsøk SC*\_*D*\_3\_24\_*N*. *Vindretning nedenfra*.



*Figur 81. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_3\_24\_N. Vindretning fra høyre.* 



*Figur* 82. *Sandlagets høyde ved forsøk* SC\_D\_0\_0 TO og SC\_D\_3\_24\_N (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).

## SC\_D\_3\_24\_P:

Sanden er redistribuert relativt uniformt over modellens bredde. I intervallet  $\sim 0.1 < X/L < 0.4$  er sanden erodert ned til topplaten. Deretter bygger sandlaget seg opp til det midtre panelet. Nedstrøms fra det midtre panelet er det erodert noe sand for målingene i den positive sonen, mens det er akkumulert for den negative sonen. I den midtre sonen er sandlagets høyde tilnærmet uendret.



*Figur 83. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_3\_24\_P. Vindretning nedenfra.* 



*Figur 84. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_3\_24\_P. Vindretning fra høyre.* 



*Figur 85. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 T0 og SC\_D\_3\_24\_P (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).* 

## 4.2.3 Akkumulasjonsforsøk, 5 paneler

#### SC\_D\_5\_8\_N:

Sanden er redistribuert noe ujevnt mellom de tre sonene. Det er imidlertid tendenser til større mengde erodert enn akkumulert sand over modellen, bortsett fra intervallet  $\sim 0.05 < X/L < 0.15$  for den midtre sonen.



*Figur* 86. *Skalamodell etter forsøk SC*\_*D*\_5\_8\_*N*. *Vindretning nedenfra*.



Figur 87. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_5\_8\_N. Vindretning fra høyre.



Figur 88. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 TO og SC\_D\_5\_8\_P (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).

## SC\_D\_5\_8\_P:

I dette forsøket er sanden redistribuert noe ujevnt. Det er likevel tendenser likheter mellom de tre sonene. I intervallet  $\sim 0.05 < X/L < 0.21$  er det erodert sand, mens mellom de øvrige panelene er sand akkumulert.



*Figur* 89. *Skalamodell etter forsøk SC*\_*D*\_5\_8\_*P*. *Vindretning nedenfra*.



Figur 90. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_5\_8\_P. Vindretning fra høyre.



Figur 91. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 T0 og SC\_D\_5\_8\_P (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).

### SC\_D\_5\_24\_N:

Sanden er redistribuert relativt uniformt over modellens bredde. I intervallet ~ 0,05 < X/L < 0,2 er sanden erodert ned til topplaten of den midtre sonen. Deretter øker sandlagets høyde til det når maksimal høyde nær panel nummer 2. Nedstrøms for panel 2 til X/L = 1, er det tendenser til noe erosjon.



*Figur 92. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_5\_24\_N. Vindretning nedenfra.* 



*Figur 93. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_5\_24\_N. Vindretning fra høyre.* 



*Figur 94. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 T0 og SC\_D\_5\_24\_N (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).* 

## SC\_D\_5\_24\_P:

Sanden er redistribuert relativt uniformt over modellens bredde. Det er erodert noe mer sand i den midtre sonen enn de to øvrige, mellom det midtre og det fjerde panelet. I intervallet  $\sim 0.2 < X/L < 0.42$  er sanden erodert ned til topplaten i den midtre sonen.



Figur 95. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_5\_24\_P. Vindretning nedenfra.



*Figur 96. Skalamodell etter forsøk SC\_D\_5\_24\_P. Vindretning fra høyre.* 



Figur 97. Sandlagets høyde ved forsøk SC\_D\_0\_0 T0 og SC\_D\_5\_24\_P (øverst), og differansen mellom sandlaget ved de to målingene (nederst).

#### 4.3.2 Sammenligning av resultater

Akkumulasjonsforsøkene med negativt orienterte paneler synes å like redistribusjonsmønstre. Etter alle forsøk er det en fonn oppstrøms for det fremste panelet på mellom 8 og 15 mm høyde. Deretter er sanden erodert ned til topplaten frem til like nedstrøms for det fremste panelet. Forsøkene viser at området hvor sand er erodert ned til topplaten øker med avstand mellom panelenes underkant og topplaten. Sand akkumuleres mer lokalt, med høyere maksimumshøyde.

Forsøk med positivt orienterte paneler har flere likhetstrekk som forsøk med negativt orienterte paneler. Det dannes en fonn oppstrøms for det fremste panelet. Fra fonnen er sanden erodert ned til topplaten. Det er tendenser til økte områder hvor sand er erodert ned til topplaten med økning i avstand mellom underkant panel og topplaten. Diagrammene viser også at sanden akkumuleres med høyere maksimumshøyde for sanden.

Differansen mellom den totale erosjonsmengden ved referanseforsøket og de øvrige forsøkene omtales heretter som differansen i erosjon. Tabellen og diagrammene nedenfor viser forholdet mellom differansene i erosjon og antall paneler, ved forsøk med 8 mm (figur 98), og 24 mm (figur 99) avstand mellom underkant panel og topplaten. Positiv differanse indikerer større total erosjon i forhold til referanseforsøket, mens negativ differanse indikerer mindre total erosjon i forhold til referanseforsøket. Den grønne linjen representerer forsøk med panelene positivt orientert, og den oransje linjen representerer forsøk med panelene negativt orientert. Den sorte linjen representerer middelverdiene av disse. Alle beregninger av differanse i erosjon er gjort i snittplanet langs modellens senterlinje.

|             | Differanse i erosjon, | Gjennomsnittlig differanse |
|-------------|-----------------------|----------------------------|
| Forsøk      | prosentvis            | i erosjon, prosentvis.     |
| SC_D_2_8_N  | -30,5                 |                            |
| SC_D_3_8_N  | -13,6                 | -21,9                      |
| SC_D_5_8_N  | -21,6                 |                            |
| SC_D_2_8_P  | 28,9                  |                            |
| SC_D_3_8_P  | 17,2                  | 26,5                       |
| SC_D_5_8_P  | 33,2                  |                            |
| SC_D_2_24_N | -43,0                 |                            |
| SC_D_3_24_N | -42,8                 | -42,1                      |
| SC_D_5_24_N | -40,4                 |                            |
| SC_D_2_24_P | 41,1                  |                            |
| SC_D_3_24_P | 47,8                  | 53,2                       |
| SC_D_5_24_P | 70,8                  |                            |

*Tabell 6. Prosentvis differanse av total sanderosjon mellom SC\_D\_0\_0 T6 og øvrige akkumulasjonsforsøk.* 

Av grafene kan man lese at det eroderes mer sand for forsøk med panelene positivt orientert, enn for tilsvarende forsøk med panelene negativt orientert. Merk at erosjonsmengden ved SC\_D\_3\_8\_N og SC\_D\_3\_8\_P er betydelig mer lik erosjonsmengden ved SC\_D\_0\_0 T6, enn de øvrige forsøkene.



*Figur 98. Prosentvis differanse mellom total erosjon for SC\_D\_0\_0 T6, og øvrige akkumulasjonsforsøk med 8 mm avstand mellom panelenes underkant og topplaten.* 



*Figur 99. Prosentvis differanse mellom total erosjon for SC\_D\_0\_0 T6, og øvrige akkumulasjonsforsøk med 24 mm avstand mellom panelenes underkant og topplaten.* 

# 5.0 Diskusjon

Hensikten med denne oppgaven er å undersøke mønstre for redistribusjon av snø på flate tak med solfangere og sammenligne forsøksresultatene med snølaststandardens formuleringer. I dette kapittelet drøftes de presenterte forsøksresultatene opp mot teori og annen relevant forskning.

# 5.1 Kalibrering av vindtunnel

Resultatene fra kalibrering av vindtunnelen viser en uniformitet i vindhastighet ved modellens plassering. Den største prosentvise differansen mellom vindhastigheter målt ved innløpet er 4,2%, og for målinger gjort over testområdet er den største prosentvise differansen 1,9%.

Variasjonen i vindhastigheten ved punktene vurdert ovenfor er neglisjerbare, og strømningsmønsteret i vindtunnelen ved modellens plassering anses som uniformt. Forsøkene er dermed gjort under like forhold, og kan repeteres.

# 5.2 Erosjonsforsøk

Forsøksresultatene viser at med solfangere eroderes sand initielt på motsatt side av taket av det som er tilfelle for referanseforsøket. Dette kan delvis forklares ved Venturieffekten, forklart i 2.2.8. Når luftstrømmen møter panelenes toppunkt føres den via en kontraksjon ned til panelenes bunnpunkt. Ved anvendelse av ligning 11 for paneler 8 mm over topplaten får vi at vindhastigheten øker med en faktor på 9,8 ved panelenes bunnpunkt i forhold vindhastsigheten før kontraksjonen. I tillegg vil en ruhet i form av de øvrige panelene eliminere luftstrømmen og topplatens gjenkoblingspunkt mot le side av modellen.

Prasad m.fl (2009) viser at det laveste trykket på takflaten vil være ved loveggens hjørner. Ettersom luft strømmer fra høyere mot lavere trykk vil det føre til økt vindhastighet nær modellens hjørner (se figur 3). Dermed vil det eroderes ved lavere vindhastigheter i disse områdene. Dette er også tilfelle for forsøkene. Når vind treffer et hjørne dannes koniske virvler som avbøyes med en vinkel fra hjørnet (Väsieş m.fl. 2012). Disse virvlene vil i forbindelse med erosjonsforsøkene føre til erosjon fra modellens hjørner, og vi ser ved forsøk SC\_E\_0\_0 at sand initielt eroderes ved hjørnene med en vinkel på ~45° mot takets senterlinje.

Utelates erosjon ved hjørnene, viser resultatet fra forsøk SC\_E\_0\_0 at sand initielt eroderes på le side av topplaten. Dette er i tråd med Văsieş m.fl. (2012), som viser luftstrømmen og takflatens gjenkoblingspunkt nær le vegg, og at vindhastigheten over takflaten dermed vil være størst nedstrøms for dette punktet. Prasad m.fl. (2009) viser at suget langs takflatens midtlinje er størst

mot lo side av taket. Dette samsvarer ikke med resultatene fra forsøk SC\_E\_0\_0, hvor sand nær lo side eroderte i liten grad.

Ved vindhastighet 6,8 m/s eroderte sand ved modellens senterlinje i gjennomsnitt 192,6% mer ved forsøkene med positivt orienterte paneler enn ved forsøk med negativt orienterte paneler. Dette kan skyldes at panelenes orientering leder mer av luftstrømmen ned mot modellens topplate. Samtidig viser erosjonsdiagrammene i plan økte områder uten erosjon av sand etter endt forsøk enn for SC\_D\_0\_0 ved høyere vindhastigheter. Overført til reelle bygninger vil det i soner hvor sand ikke er erodert akkumuleres snø, og dermed føre til ujevn avsetting. På denne måten vil taket utsettes for uønskede skjeve lastfordelinger.

# 5.3 Akkumulasjonsforsøk

Resultatene viser like mønstre i redistribusjon av sand ved forsøk med paneler likt orientert i forhold til vindretningen. For akkumulasjonsforsøkene antas at skaleringskriteriene presentert av Zhou m.fl. (Upublisert) er tilfredsstilt, på grunnlag av likheter mellom partikkeltypene brukt i forsøkene i forbindelse med denne oppgaven og i forsøkene til Zhou m.fl. (Upublisert).

Ifølge snølaststandardens formuleringer for flate tak eroderes 20% av snøen fra takflaten. Ved forsøk SC\_D\_0\_0 ble 21,2% av den totale mengden sand erodert fra modellens topplate etter endt forsøk. Denne verdien er brukt som referanse for de øvrige forsøkene, og tilsvarer formfaktoren  $\mu_1$  for flate tak i snølaststandarden.

Gjennomsnittlig erodert sand ble beregnet for forsøk med like antall solfangere i forhold til referanseforsøket. Beregningene viser at forholdet mellom erosjon ved forsøk gjort med paneler og referanseforsøket er

- -0,9% for tak med to solfangerpaneler.
- 2,2% for tak med tre solfangerpaneler.
- 10,5% for tak med fem solfangerpaneler.

Det dimensjonerende tilfellet etter forsøksresultatene vil være for to solfangerpaneler montert på takflaten. Den totale snølasten vil, ifølge forsøksresultatene, være tilnærmet lik snølasten ved flate tak uten solfangere.

Det er i utgangspunktet ikke mulig å sammenligne forsøksresultatene med snølaststandarden, grunnet modellens skalering. Dette fører til at ligning 4 ikke oppfylles. Justeres målestokken til 1:36, kan man utføre kontroll av modellens formfaktor etter snølaststandardens formulering. Formfaktorene er beregnet etter formler presentert i 2.1.2.

Ved beregning av snølast antas solfangerne å være montert direkte på takflaten, og at de står vertikalt. For flate tak med solfangerpaneler øker snølasten i forhold til flate tak med

- $\sim 22\%$  for tak med to solfangerpaneler.
- $\sim 41\%$  for tak med tre solfangerpaneler.
- $\sim$  56% for tak med fem solfangerpaneler.

Forsøkene viser at erosjon av sand øker med antall paneler. Ved bruk av snølaststandardens metode for beregning av snølast med projeksjoner, øker snølasten med økning i antall projeksjoner. En grunn til avviket kan være at ved forsøkene ble det kun tatt hensyn til redistribusjon av snø på takflaten, og ikke fra arealer omkring modellen, nedbør og snømetamorfose.

Det er ikke tatt høyde for solfangernes egenlast ved beregningene. Typisk vekt for solfangere kan være 31 kg/m<sup>2</sup> (Catch Solar, udatert). For modellen brukt i forsøkene omregnet til fullskala blir den totale vekten av tre rader med solfangere 4712 kg. Det er heller ikke tatt høyde for snømetamorfose i forsøkene. Orheim (1966) viser at snø som tines og fryser til, får en økt overflatehardhet som dermed fører til en større terskelhastighet. Sandens egenskaper er like gjennom forsøkenes forløp. Snøens egenskaper vil variere gjennom vinterhalvåret, og skaresnø vil kunne dannes på takflaten.

For forsøk med positivt orienterte paneler 8 mm over topplaten, er den økte erosjonen 21,0% større enn den reduserte erosjon for negativt orienterte paneler. Tilsvarende tall for forsøk med 24 mm høyde er 26,3%. Forsøkene tar kun høyde for to vindretninger, og er dermed ikke representativ for erosjon av snø under naturlige forhold, da vindretningen endres gjennom vinteren. Likevel viser forsøksresultatene at den totale erosjonen avtar ved solfangere montert på modellen.

Sandlagets profil etter forsøk SC\_D\_0\_0 viser at sandlagets profil langs senterlinjen er relativt jevn, med liten mengde akkumulert sand. Maksimal sandhøyde for SC\_D\_0\_0 er 0,5 mm. Ved de øvrige forsøkene er sanden erodert ned til topplaten, og har en maksimal akkumulasjonshøyde for målinger gjort langs senterlinjen på mellom 3,7 mm og 16,4 mm. En økning i maksimal sandhøyde og reduksjon i den totale sandmengden fører en ujevn fordelt last over takflaten, som igjen kan føre til krav om økt kapasitet for de bærende konstruksjoner.

Resultatene samsvarer ikke med Tablers (2003) modell om lagringskapasiteten til snøgjerder med spalte mellom snøgjerdets underkant og underlaget. Snølagringskapasiteten skal minke lineært med en økning i spaltens høyde over 10% av snøgjerdets totale høyde. De mest nærliggende forsøkene å sammenligne med modellen Tabler presenterer, er SC\_D\_2\_8\_N, og SC\_D\_2\_24\_N. Dette fordi snøgjerdet har en vinkel tilsvarende negativ vinkel i forsøkene presentert i denne oppgaven.

Av figur 64 og 70 synes større mengder akkumulert sand nær det fremste panelet ved forsøk gjort med 24 mm avstand mellom panelenes underkant og topplaten. Akkumulasjonen nær panelet skal etter figur 10 minke med ~24% fra SC\_D\_2\_8\_N til SC\_D\_2\_24\_N. Forsøksresultatene viser en økning på 426,1%. Forsøkene er gjort under betydelig store forhold. Tablers (2003) modell gjelder for snøgjerder plassert på terreng, og det tas blant annet høyde for nedbør samt ulikheter i partiklenes egenskaper. I forsøkene utført i forbindelse med denne oppgaven er det et element, i form av skalamodellen, som utgjør en vesentlig forskjell for strømningsmønsteret. I tillegg er resultatene presentert av Tabler (2003) gjort ved oppnådd likevekt for snøfonndannelsen, som ikke er tilfelle for forsøkene gjort i forbindelse med denne oppgaven.

## 5.5 Feilkilder

Ettersom oppsett av alle forsøk ble gjort manuelt, og alle registreringer ved erosjonsforsøkene ble gjort manuelt, vil det være feilkilder knyttet til oppgavens resultater. Nedenfor drøftes feilkilder som kan virke inn på resultater fra kalibreringer og forsøk.

#### 5.5.1 Kalibrering av vindhastighet i vindtunnel

Alle målinger av vindhastigheter ble gjort med Pitotrør. Ettersom målingene måtte leses av manuelt, er det noe usikkerhet tilknyttet verdiene brukt i videre beregninger. Måleinstrumentet fluktuerte ved alle målinger. Dette ble løst ved å registrere middelverdiene. Målingene som ble benyttet til videre beregninger har dermed en usikkerhet på  $\pm 0,005$  kPa. Det ble også gjort målinger med større fluktuasjon, men disse målingene ble ansett som ugyldige.

Resultatene fra kalibreringen av vindhastigheten mot viftens rotasjonshastighet viste en tilnærmet lineær sammenheng, som er i tråd med en veiledende oversikt ved vindtunnelen. Likevel er sammenhengen ikke helt lineær (se vedlagte tabell 5 og 6, og figur 97). Dermed er det noe usikkerhet knyttet til de faktiske vindhastighetene presentert i tabell 5. Denne usikkerhetens relevans anses som liten ved bruk av vindhastighetene, og er dermed neglisjerbar.

Test av vindhastigheten i innløpet viste seg å gi relativt like innbyrdes vindhastigheter ved alle høyder med unntak av målinger ved høyde = 2,0 m (se figur 10, og vedlagte tabell 7 og 8). En forklaring på avviket mellom målingene ved høyde = 2,0 m og de øvrige målingene, kan være turbulente virvler forårsaket av innløpets kant. Siden testområdet er åpent, vil forstyrrelser utenfor innløpets tverrsnitt påvirke strømningen. Vindhastighetene for alle målinger avtar fra avstand 0,25 m fra sidekantene, og utover. Resultatene viser også større fall i målte vindhastigheter på venstre side av innløpet. Dette kan skyldes en løfteinnretning plassert skjevt i forhold til innløpet. De målte vindhastighetene over testområdet er relativt uniforme frem til utløpets åpning. Målingene gjort inne i utløpet viser en lavere vindhastighet, noe som kan skyldes at vind avledes av utvidelsene langs utløpets åpning. Målingene gjort ved Y = 1,0 m og Y = -1,0 m viser en betydelig lavere vindhastighet enn målingene nærmere vindstrømmens senterlinje. Dette skyldes mest sannsynlig det samme som ved de ujevne målingene ved innløpets ytterkanter. I tillegg forstyrrer løfteinnretningen plassert nær innløpet strømningen.

#### 5.5.2 Skalaforsøk

Ved enkelte av forsøkene var erosjons- og akkumulasjonsmønstrene ujevne over modellens bredde. Dette gjelder erosjonsforsøkene SC\_E\_2\_24\_N, SC\_E\_3\_16\_N, SC\_E\_3\_24\_N, SC\_E\_5\_16\_N, og akkumulasjonsforsøkene SC\_D\_2\_8\_P, SC\_D\_3\_8\_P, SC\_D\_5\_8\_P, og delvis SC\_D\_5\_24\_N. Modellens posisjon ble merket med kritt, men det var vanskelig å sikre nøyaktig lik posisjonering av modellen ved alle forsøkene. Dermed kan en årsak til ujevnhetene være at modellen ble stilt skjevt. Det er også usikkerheter rundt bruk av vindtunnelen. Den manøvreres manuelt, det var derfor variasjoner i tidsbruk for å nå de forhåndsbestemte vindhastighetene.

Erosjonsdiagrammene i plan viser et noe ufullstendig bilde av erosjonsmønstre nær rammeverket langs modellens lengde, ettersom lyssettingen over testområdet var noe mangelfull. Dermed ble 2-3 cm på venstre side av hver ramme skyggelagt, sett fra innløpet. Under bearbeiding av bildene var det vanskelig å se sandens konturer i disse områdene. Erosjonsdiagrammene i plan kan dermed være noe unøyaktige nær modellens rammeverk.

For hvert akkumulasjonsforsøk ble det laget et diagram som viser differansen mellom sandlagets initielle høyde og sandlagets høyde etter endt forsøk. Det ble tatt en avgjørelse ut ifra tidsbruk om å bruke den initielle sandhøyden ved forsøk SC\_D\_0\_0 som sammenligningsgrunnlag for alle forsøkene. Det ble brukt forskjellige instrumenter for å fordele sanden over modellens flate ved SC\_D\_0\_0 og de øvrige forsøkene, på grunn av utilgjengelighet mellom solfangernes rammeverk. Dermed vil den reelle initielle sandhøyden variere mellom forsøkene, noe som kan føre til noe avvikende resultater.

Det ble gjort manuelle målinger for å undersøke likheten mellom sandhøydene ved bruk av de ulike instrumentene, og det var tilnærmet ingen forskjell. Målingene ved SC\_D\_0\_0 T0 ble gjort for hver 25 mm over modellens lengde, mens målingene ved de øvrige forsøkene ble gjort for hver 10 mm. Det var ønskelig å få et tilstrekkelig grunnlag for diagrammene for differansen mellom før og etter eksponering for vind. Derfor ble verdier for hver 10 mm for SC\_D\_0\_0 funnet ved interpolasjon, noe som medfører økt usikkerhet for forsøksresultatene.

Det er også en usikkerhet knyttet til modellens faktiske mål. Ettersom den ble laget for hånd er ikke modellens mål nøyaktige i henhold til figur 16 og 17. Unøyaktighetene anses likevel som neglisjerbare.

De målte verdiene gjort av lasermåleren varierer ved enkelte verdier. Flere målinger kan sies å være urealistiske, og har blitt utelatt fra diagrammene. De utelatte verdiene er markert i vedlagte tabeller med målinger, i henhold til fargekodene forklart i 4.3. Ved enkelte punkter ble sandlagets høyde målt til ~74 mm, mens ved andre punkter er sandlagets høyde målt til ~340 mm under modellens topplate. Slike urealistiske verdier har blitt utelatt under fremstilling av resultater. Måling Y = -340 ved forsøk SC\_D\_3\_24\_N gir en sandhøyde på ± 6 mm i intervallet ~ 0,12 < X/L < 0,2, mens i realiteten er all sand erodert ned til topplaten. Modellen ble plassert noe skjevt i forhold til lasermåleren, slik at den målte sandhøyden ved positiv og negativ Y-verdi er forskjøvet.

# 6.0 Konklusjon og videre arbeid

Oppgavens hovedformål var å fastslå modeller for redistribusjon av snø på flate tak med solfangere. Videre skulle forsøksresultatene sammenlignes med snølaststandardens metoder for beregning av formfaktor for flate tak og flate tak med projeksjoner.

Sandlagets profiler etter akkumulasjonsforsøk med paneler er i større grad konsentrert mot modellens midtpunkt enn hva som er tilfelle for referanseforsøket. Sand er dermed akkumulert i større lokale opphopninger. For reelle bygg vil solfangere føre til mer konsentrerte snølaster.

Resultater fra erosjonsforsøk med paneler viser en økt skjærhastighet langs modellens topplate ved lavere vindhastigheter. Det vises også at den maksimale skjærhastighet ved lavere vindhastigheter forekommer på motsatt side av hva som er tilfelle for referanseforøket. En økning i vindhastigheter langs bygningers takflate gir økte påkjenninger på takkonstruksjonen, som kan føre til skjerpede krav til taktekking.

Sandlagenes profiler ved akkumulasjonsforsøkene ble sammenlignet med snølaststandardens formulering for snølast på flate tak. Det vises tilnærmet like totale laster for det dimensjonerende lasttilfellet.

Ved sammenligning med snølaststandardens metoder for beregning av snølast på flate tak med projeksjoner, gis en betydelig mindre beregnet totale snølast ved forsøkene. Avviket kan skyldes at snølaststandardens metode kun gjelder for projeksjoner direkte på takflaten, i tillegg til at den gjelder for vertikalt stilte projeksjoner. Etter resultatene presentert i denne oppgaven vil snølaststandardens metode for beregning av dimensjonerende snølast for tak med projeksjoner anses som konservativ for tilfeller med solfangere på takflaten.

Forsøk gjort under kontrollerte forhold i vindtunnel vil alltid gi et forenklet bilde av virkeligheten, og oppgaven er avgrenset til redistribusjon av snø på tak. Det er dermed ikke tatt høyde for nedbør, transport av snø fra arealer rundt bygg til takflaten, eller snømetamorfose.

Det vil likevel være nyttig å forske videre på dette feltet. Ved å gjennomføre CFD-simuleringer, vil problemstillingen kunne belyses fra flere sider, og dermed gi ytterligere forklaringer av resultatene. Spesielt tofasesimuleringer, hvor det er mulig å simulere vind med snøpartikler, vil kunne bidra til en økt forståelse av solfangeres effekt på redistribusjon av snø for flate tak.

# 7.0 Litteraturliste

- NS-EN 1991-1-3, 1. utgave, november 2003. Eurokode 1, Laster på konstruksjoner, Del 1-3: Allmenne laster, Snølaster.
- Affordable Solar (Ukjent dato, sist kontrollert 13.05.2014). *Calculating Tilted Array Spacing*. Tilgjengelig fra: <u>http://www.affordable-solar.com/Learning-Center/Building-a-</u> <u>System/Calculating-Tilted-Array-Spacing</u>.

Alexandrou, A. N. (2001). Principles of fluid mechanics: Prentice Hall.

- Andresen, I. (2008). Planlegging av solvarmeanlegg for lavenergiboliger og passivhus. En introduksjon: SINTEF Byggforsk.
- Arya, P. S. (2001). *Introduction to micrometeorology*, b. 79: Academic press. ISBN 0-12-059354-8.
- Berry, M. (1981). Snow and climate. *The handbook of snow*. *Principles, processes, management and use*. *Pergamon, Toronto, Canada*: 51-60. ISBN 0-08-025375-X.
- Bosanac, M. N., Nielsen, J. E. (2001). Måling af solfangereffektivitet. *SolEnergiCentret*, *Teknologisk Institut*, 2000 (1).
- Catch Solar. (Ukjent dato, sist kontrollert 13.05.2014). Tilgjengelig fra: http://www.catchsolar.no/pages/solenergi\_qa\_spmsvar.php.
- Çengel, Y. A., Ghajar, A. J. (2011). Heat and mass transfer: fundamentals & applications: McGraw-Hill. ISBN 0-07-125739-X.
- Ferreira, A., Sanchez, P. (2009). Numerical and experimental evaluation of the wind-field behind living shelterbelts.
- Finnemore, E. J., Franzini, J. B. (2009). Fluid Mechanics with Engineering Applications. New York: McGraw-Hill. ISBN 978-007-127011-3.
- Font, D., Mases, M., Vilaplana, J. M. (1998). Experimental mass-flux measurements: a comparison of different gauges with estimated theoretical data.
- Kind, R. J. (1981). Handbook of snow, Pergamon Press, ISBN 0-08-025375-X.
- McIlveen, R. (1992). Fundamentals of weather and climate: Chapman & Hall, ISBN 0-412-41160-1.
- Mellor, M., Fellers, G. (1986). Concentration and flux of wind-blown snow: DTIC Document.

Morrison, F. A. (2013). *An Introduction to Fluid Mechanics*: Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-00353-8

Mott, R. L. (2000). Applied Fluid Mechanics. New Jersey: Prentice Hall. ISBN 0-13-023120.

- Nordic FolkCenter for Renewable Energy (2012, sist kontrollert 13.05.2014). Distance between solar cells.
- O'Rourke, M., DeGaetano, A., Tokarczyk, J. D. (2005). Analytical simulation of snow drift loading. *Journal of structural engineering*, 131 (4): 660-667.
- Orheim, O. (1966). Surface snow metamorphosis on the Antarctic Plateau. Norsk Polarinstitutt, Årbok: 84-91.
- Prasad, D., Uliate, T., Ahmed, M. R. (2009). Wind Loads on Low-Rise Building Models with Different Roof Configurations. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 36 (3).
- Ramberg, J. F. (2007). Vindpåvirket avsetting og redistribusjon av snø på tak En evaluering av snølaststandarden NS-EN 1991-1-3. Ås: Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB).
- Rehman, N. U., Siddiqui, M. A. (2012). Development of simulation tool for finding optimum tilt for solar collectors.
- Simpson, J. E. (1994). *Sea breeze and local winds*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-452112.
- SINTEF Byggforsk, KanEnergi. (2011). Mulighetsstudie Solenergi i Norge.
- Tabler, R., Schmidt, R. (1986). Snow erosion, transport and deposition in relation to agriculture. Proceedings of the Symposium, Snow Management for Agriculture, Great Plains Agric. Counc. Publ. 11-58 s.
- Tabler, R. D. (1988). Snow Fence Handbook: (release 1.1): Tabler & Associates.
- Tabler, R. D. (1991). Snow transport as a function of wind speed and height. Cold Regions Engineering (1991): ASCE. 729-738 s.
- Tabler, R. D. (1994). Design guidelines for the control of blowing and drifting snow: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Tabler, R. D. (2003). Controlling Blowing and Drifting with Snow Fences and Road Design.
- Thiis, T. K., Gjessing, Y. (1999a). Large-scale measurements of snowdrifts around flat-roofed and single-pitch-roofed buildings. *Cold regions science and technology*, 30 (1): 175-181.

- Thiis, T. K., Jaedicke, C., Dahl-Grøntvedt, M., Johnsen, J. (1999b). The new mess building in Ny-Ålesund - Effects on snowdrifts. *Meteorological Report Series - University of Bergen* (5).
- Văsieş, G. m.fl. (2012). Numerical Simulation of Wind Action on Solar Panel Placed on Flat Roofs with and without Parapet.
- Zhou, X. m.fl. (Upublisert). Natural Hazards Research of wind tunnel test on snow loads on a stepped flat roof.
## 8.0 Vedlegg

## 8.1 Vedlegg, kalibrering av vindtunnel

Tabell V1. Målte verdier av dp ved gitte nivåer av w for høyde 1,0 m over testområdet.

| w [rpm] | dp [kPa] | V [m/s] | dV/dw | Σ(dV/dw)/n |
|---------|----------|---------|-------|------------|
| 50      | 1,35     | 1,51    |       |            |
| 100     | 6,4      | 3,29    | 0,04  |            |
| 200     | 26,72    | 6,73    | 0,03  |            |
| 300     | 55,16    | 9,67    | 0,03  |            |
| 400     | 106,18   | 13,42   | 0,04  | 0,034      |

Tabell V2. Målte verdier av dp ved gitte nivåer av w for høyde 0,3 m over testområdet.

| w [rpm] | dp [kPa] | V [m/s] | dV/dw | Σ(dV/dw)/n |
|---------|----------|---------|-------|------------|
| 50      | 1,6      | 1,65    |       |            |
| 100     | 6,75     | 3,38    | 0,03  |            |
| 200     | 28       | 6,89    | 0,04  |            |
| 300     | 57,93    | 9,91    | 0,03  |            |
| 400     | 110,74   | 13,70   | 0,04  | 0,034      |



Figur V1. Sammenheng mellom viftens rotasjonshastighet og vindhastighet.

| Y [cm] |       |       |       |       |        |       |       |       |        |        |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 200    | 0,006 | 0,018 | 0,026 | 0,038 | 0,041  | 0,042 | 0,044 | 0,026 | 0,011  |        |
|        |       |       |       |       |        |       |       |       |        |        |
| 175    | 0,04  | 0,063 | 0,059 | 0,06  | 0,061  | 0,063 | 0,063 | 0,064 | 0,052  |        |
|        |       |       |       |       |        |       |       |       |        |        |
| 150    | 0,045 | 0,062 | 0,061 | 0,059 | 0,06   | 0,06  | 0,06  | 0,062 | 0,052  |        |
|        |       |       |       |       |        |       |       |       |        |        |
| 125    | 0,065 | 0,061 | 0,059 | 0,059 | 0,06   | 0,059 | 0,058 | 0,06  | 0,051  |        |
| 100    | 0.044 |       | 0.0.6 |       | 0.0.50 | 0.076 |       | 0.06  | 0.0.48 |        |
| 100    | 0,064 | 0,062 | 0,06  | 0,059 | 0,059  | 0,056 | 0,057 | 0,06  | 0,042  |        |
| 75     | 0.042 | 0.06  | 0.050 | 0.050 | 0.050  | 0.057 | 0.050 | 0.061 | 0.045  |        |
| 15     | 0,045 | 0,00  | 0,039 | 0,039 | 0,039  | 0,037 | 0,039 | 0,001 | 0,043  |        |
| 50     | 0.027 | 0.059 | 0.06  | 0.059 | 0.06   | 0.058 | 0.06  | 0.062 | 0.056  |        |
| 50     | 0,027 | 0,057 | 0,00  | 0,057 | 0,00   | 0,050 | 0,00  | 0,002 | 0,050  |        |
| 25     | 0.03  | 0.061 | 0.058 | 0.06  | 0.061  | 0.062 | 0.063 | 0.062 | 0.061  |        |
|        | ,     | ,     | ,     | ,     | ,      | ,     | ,     | ,     | ,      |        |
| 0      |       |       |       |       |        |       |       |       |        |        |
|        | 0     | 25    | 50    | 75    | 100    | 125   | 150   | 175   | 195    | X [cm] |

Tabell V3. Målte trykkforskjeller i innløpets tverrsnitt.

Tabell V4. Beregnede vindhastigheter i innløpets tverrsnitt.

| Y [cm] |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 200    | 3,19  | 5,52  | 6,64  | 8,03  | 8,34  | 8,44  | 8,64  | 6,64  | 4,32      |
| 175    | 8,23  | 10,33 | 10,00 | 10,08 | 10,17 | 10,33 | 10,33 | 10,42 | 9,39      |
| 150    | 8,73  | 10,25 | 10,17 | 10,00 | 10,08 | 10,08 | 10,08 | 10,25 | 9,39      |
| 125    | 10,50 | 10,17 | 10,00 | 10,00 | 10,08 | 10,00 | 9,91  | 10,08 | 9,30      |
| 100    | 10,42 | 10,25 | 10,08 | 10,00 | 10,00 | 9,74  | 9,83  | 10,08 | 8,44      |
| 75     | 8,54  | 10,08 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 9,83  | 10,00 | 10,17 | 8,73      |
| 50     | 6,76  | 10,00 | 10,08 | 10,00 | 10,08 | 9,91  | 10,08 | 10,25 | 9,74      |
| 25     | 7,13  | 10,17 | 9,91  | 10,08 | 10,17 | 10,25 | 10,33 | 10,25 | 10,17     |
| 0      |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
|        | 0     | 25    | 50    | 75    | 100   | 125   | 150   | 175   | 195 X [cm |



Tabell V5. Målte trykkforskjeller over testområdet og i utløpet.





## 8.2 Vedlegg, måledata akkumulasjonsforsøk

Tabell V7. Målinger av sandlagets høyde ved akkumulasjonsforsøk.

| SC_D_0_ | 0 T 0  |                     |  | SC_D_0_0 T6 |        |                     |  |
|---------|--------|---------------------|--|-------------|--------|---------------------|--|
| X [mm]  | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] |  | X [mm]      | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] |  |
| 0       | 0      | 4,425               |  | -10         | 0      | 2778,78             |  |
| 25      | 0      | 20.9                |  | 0           | 0      | 2465,55             |  |
| 50      | 0      | 21.175              |  | 25          | 0      | 2460,93             |  |
| 75      |        | 21 275              |  | 50          | 0      | 2455,28             |  |
| 100     |        | 21,275              |  | 75          | 0      | 2450,65             |  |
| 100     | 0      | 20,425              |  | 100         | 0      | 2448,5              |  |
| 125     | 0      | 21,2                |  | 125         | 0      | 2447,3              |  |
| 150     | 0      | 21,275              |  | 150         | 0      | 2447,25             |  |
| 175     | 0      | 21,425              |  | 175         | 0      | 2447,88             |  |
| 200     | 0      | 21,25               |  | 200         | 0      | 2449,05             |  |
| 225     | 0      | 21                  |  | 225         | 0      | 2450,15             |  |
| 250     | 0      | 21,175              |  | 250         | 0      | 2451,65             |  |
| 275     | 0      | 21,175              |  | 275         | 0      | 2452,2              |  |
| 300     | 0      | 22.175              |  | 300         | 0      | 2453,1              |  |
| 325     | 0      | 21,725              |  | 325         | 0      | 2453,68             |  |
| 350     | 0      | 22.025              |  | 350         | 0      | 2453,65             |  |
| 375     | 0      | 21.8                |  | 375         | 0      | 2452,93             |  |
| 400     |        | 22,025              |  | 400         | 0      | 2453,15             |  |
| 400     |        | 22,025              |  | 425         | 0      | 2452,18             |  |
| 425     | 0      | 21,/5               |  | 450         | 0      | 2452,93             |  |
| 450     | 0      | 21,325              |  | 475         | 0      | 2452,33             |  |
| 475     | 0      | 21,6                |  | 500         | 0      | 2452,33             |  |
| 500     | 0      | 21,35               |  | 525         | 0      | 2452,85             |  |
| 525     | 0      | 22,05               |  | 550         | 0      | 2453,53             |  |
| 550     | 0      | 21,05               |  | 575         | 0      | 2456,15             |  |
| 575     | 0      | 21,6                |  | 600         | 0      | 2460,35             |  |
| 600     | 0      | 17,35               |  | 625         | 0      | 2778,23             |  |

| x  mm:   x  mm:<  | SC_D   | _2_8_  | N                   |        |        |          | SC_D   | _2_8_  | Р        |        |        |                   |      |        |        |                      |
|--|--------|--------|---------------------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|-------------------|------|--------|--------|----------------------|
| 150   0   2403_16   640   2441_1   650   2462_135   10   940   241_35   10   340   241_35   10   340   241_35   10   340   241_35   10   340   241_35   10   340   241_35   10   340   241_35   10   340   241_35   10   340   241_35   10   340   241_35   10   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   20   340   241_35   30   340   241_35   30   340   241_35   30   340   241_35   30   341_35   30   341_35   30   341   | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z., [mm] | X [mm] | Y [mm] | z., [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [m | m]   | X [mm] | Y [mm] | z <sub>.m</sub> [mm] |
| 0   0   2464.1   610   2462.285   10   0   2462.285   10   340   2451.725   20   340   2457.725   20   340   2457.725   20   340   2457.725   20   340   2457.725   20   340   2455.755   20   340   2455.75   30   340   2455.77   30   340   2455.77  | -10    | 0      | 2603,9              | 620    | 245    | 2467,05  | -10    | 0      | 2605,65  | 620    | 340    | 2451,             | 35   | 0      | -340   | 2777,45              |
| 10 0 2460.775 600 2462.175 600 2462.175 600 2455.275 20 2455.155 20 2455.155 20 245  | 0      | 0      | 2464,1              | 610    | 245    | 2465,325 | 0      | 0      | 2412,85  | 610    | 340    | 245               | 1    | 10     | -340   | 2718,101             |
| 20   0   245:9   30   245:9.7   30   0   245:9.7   30   0   245:9.7   30   0   245:9.7   30   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340   245:9.7   350   340  | 10     | 0      | 2460,775            | 600    | 245    | 2462,15  | 10     | 0      | 2460,175 | 600    | 340    | 2451,7            | 725  | 20     | -340   | 2603,55              |
| 30   0   2458,2   30   0   2452,7   580   340   2456,7   40   3440   2456,7     50   0   2464,2   50   245,2   570   340   2453,3   50   340   2453,3   50   340   2453,37   50   340   2453,37   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,77   50   340   2453,75   50   340   2453,75   50   340   2453,75   50   340   2453,75   50   340   2454,75   50   340   2454,75   50   340   2453,75   50   340   2453,75   | 20     | 0      | 2457,9              | 590    | 245    | 2455,875 | 20     | 0      | 2456,1   | 590    | 340    | 2451,8            | 325  | 30     | -340   | 2459,675             |
| 40 0 2465,2 570 246 245,12 40 0 2455,25 560 340 2455,35 50 340 2455,35 50 340 2455,35 50 340 2455,35 50 340 2455,35 50 340 2455,35 50 340 2455,35 30 2455,35 30 2455,35 30 2465,35 340 2452,35 30 340 2452,35 30 340 2452,35 30 340 2452,35 30 340 2452,35 30 340 2452,35 30 340 2452,35 30 340 2452,35 30 340 2452,35 30 340 2453,35 30 340 2453,35 30 340 2453,35 30 340 2453,35 30 340 2453,35 30 340 2453,35 30 340 2453,35 30 340 2453,35 30 340 2453,35 30 340 2453,35 30 340 2453,35 30 30 340 340 340 340 34   | 30     | 0      | 2458,825            | 580    | 245    | 2452     | 30     | 0      | 2452,75  | 580    | 340    | 2456,             | 75   | 40     | -340   | 2456,75              |
| 50   0   2464,24   50   2462,35   50   340   2465,37   70   340   2465,37   70   340   2465,37   70   340   2455,37   70   340   2455,37   70   340   2455,37   70   340   2455,37   70   340   2455,37   70   340   2455,37   70   340   2455,37   70   340   2455,37   70   340   2455,37   70   340   2455,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2453,37   70   340   2445,37   70   340   2445,37   70   340   2453,37   | 40     | 0      | 2465,2              | 570    | 245    | 2451,25  | 40     | 0      | 2455,725 | 570    | 340    | 2455,             | 35   | 50     | -340   | 2451,9               |
| B0   0   2444, 25   300   245, 25   70   0   2445, 27   50   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   2445, 27   70   -340   245, 27   70   -340   245, 27   70   -340   245, 27   70   -340   245, 27   70   -340   245, 27   70   -340   245, 27   70   30   300   245, 27   73   30   300   245, 27   73   30   300   245, 27   73   30   300   246, 37   300   300   340   340   340   340   340   340   340   340   340   340   340   340   340   | 50     | 0      | 2464,4              | 560    | 245    | 2451,025 | 50     | 0      | 2462,95  | 560    | 340    | 2455,             | 85   | 60     | -340   | 2448,925             |
| 10   0   2485,05   350   248,04   248,05   350   340   242,15   80   340   242,15   80   340   242,15   80   340   242,15   80   340   242,15   80   340   242,15   80   340   242,15   80   340   242,15   80   340   242,15   80   340   242,15   80   340   242,15   80   340   242,15   100   340   242,15   100   340   242,15   100   340   242,15   100   340   242,15   100   340   242,15   100   340   242,15   100   340   242,15   100   340   242,15   100   340   242,15   100   2445,14   100   2445,14   100   2445,15   100   2446,25   440   245,25   100   2446,25   440   245,25   100   2445,25   100   2445,25   100   2445,25   100   2445,15   100   | 60     | 0      | 2464,625            | 550    | 245    | 2451,425 | 60     | 0      | 2464,975 | 550    | 340    | 2455,9            | 375  | 70     | -340   | 2449,125             |
| B   O   AMB, JAN   BO   O   AMB, JAN   BO   O   AMB, JAN   BO   D   AMB, JAN   BO   D   AMB, JAN   BO   D   AMB, JAN   BO   D   AMB, JAN   D   AMB, JAN   D   AMB, JAN   AMB, JAN   JAN<   | - /0   | 0      | 2465,35             | 540    | 245    | 2451,5   | /0     | 0      | 2465,075 | 540    | 340    | 2451,             | ./5  | 80     | -340   | 2456,2               |
| 10   0   2484,875   500   2462,275 </td <td></td> <td>0</td> <td>2405,05</td> <td>530</td> <td>245</td> <td>2409,975</td> <td></td> <td></td> <td>2400,470</td> <td>530</td> <td>340</td> <td>2452,0</td> <td>225</td> <td>100</td> <td>-340</td> <td>2402,975</td> |        | 0      | 2405,05             | 530    | 245    | 2409,975 |        |        | 2400,470 | 530    | 340    | 2452,0            | 225  | 100    | -340   | 2402,975             |
| 110   0   2445,55   500   246,217   120   7440   7400   7460 <th< td=""><td>100</td><td>ő</td><td>2453.85</td><td>510</td><td>245</td><td>2454 975</td><td>100</td><td>ő</td><td>2405,225</td><td>510</td><td>340</td><td>2451,5</td><td>95</td><td>110</td><td>-340</td><td>2462,725</td></th<>  | 100    | ő      | 2453.85             | 510    | 245    | 2454 975 | 100    | ő      | 2405,225 | 510    | 340    | 2451,5            | 95   | 110    | -340   | 2462,725             |
| $  \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$   | 110    | ő      | 2445.85             | 500    | 245    | 2454.825 | 110    | ő      | 2465.525 | 500    | 340    | 2452.1            | 75   | 120    | -340   | 2463.2               |
|  | 120    | 0      | 2444,275            | 490    | 245    | 2458.75  | 120    | 0      | 2466.075 | 490    | 340    | 2451.7            | 25   | 130    | -340   | 2462.175             |
|  | 130    | 0      | 2445,4              | 480    | 245    | 2452,175 | 130    | 0      | 2464,875 | 480    | 340    | 2452,             | 35   | 140    | -340   | 2454,125             |
| 150 0 2446,8 460 245 245,22 160 -246,22 460 340 245,27 160 -340 2445,25 340 2445,27 170 -340 2444,37   170 0 2446,65 440 245 2453,31 170 0 2466,55 420 340 245,45 180 -2467,175 430 340 245,45 180 -2467,175 430 340 245,45 190 -340 2445,05 120 -340 2445,05 120 -340 2445,07 200 0 2447,31 410 245 2450,75 210 0 2447,35 400 340 2451,125 220 -340 2445,07   220 0 2448,315 390 245 2450,75 250 0 2441,125 360 340 2450,275 2460,17 340 2445,07 340 2445,07 340 2445,07 340 2445,07 340 2445,07 340 2445,07 340 2445,07 340 2445,07 340 2446,07 340  | 140    | 0      | 2445,6              | 470    | 245    | 2452,775 | 140    | 0      | 2465,225 | 470    | 340    | 2452              | ,3   | 150    | -340   | 2447,85              |
| 100 0 2446,6 450 245 2453 160 0 2466,7 440 340 2452,7 170 -340 2444,3   190 0 2446,55 430 245 2452,15 180 0 2467,17 430 340 2452,14 200 -340 2445,14 200 -340 2445,14 200 -340 2445,14 200 -340 2445,14 200 -340 2445,15 220 -340 2445,15 220 -340 2445,15 220 -340 2445,15 220 -340 2445,15 220 -2448,375 390 245 2450,15 220 2447,3 380 340 2450,25 230 -2449,11 370 340 2450,25 240 -340 2446,21 2460,75 250 2444,127 350 340 2446,21 2460,75 240 2444,137 350 340 2446,21 240 340 2446,21 240 340 2446,17 340 2446,17 340 2446,17 340 2446,17 340 2446,17 </td <td>150</td> <td>0</td> <td>2446,3</td> <td>460</td> <td>245</td> <td>2453,225</td> <td>150</td> <td>0</td> <td>2466,025</td> <td>460</td> <td>340</td> <td>2452</td> <td>2</td> <td>160</td> <td>-340</td> <td>2443,425</td>   | 150    | 0      | 2446,3              | 460    | 245    | 2453,225 | 150    | 0      | 2466,025 | 460    | 340    | 2452              | 2    | 160    | -340   | 2443,425             |
| $  \begin{array}{ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$  | 160    | 0      | 2446,6              | 450    | 245    | 2452,725 | 160    | 0      | 2466,525 | 450    | 340    | 2451              | ,7   | 170    | -340   | 2444,3               |
| 180 0 2446,25 430 245 1430 2451,45 190 -340 2445,10   190 0 2447,4 410 245 2452,12 190 0 2451,05 210 -340 2445,10   210 0 2448,17 340 2451,05 210 -340 2445,15 210 -340 2445,15 210 -340 2445,15 210 -340 2445,15 210 -340 2445,15 210 -340 2445,15 210 -340 2445,15 210 -340 2445,15 210 -340 2445,15 210 -340 2446,07 -340 2446,07 -340 2446,17 340 2450,15 240 -340 2446,17 340 2450,15 240 -340 2446,17 340 2450,15 240 -340 2446,17 340 2450,15 240 -340 2446,17 340 2446,17 340 2446,17 340 2446,17 340 2446,17 340 2446,17 340 2446,17 340 2446,17 340 <td< td=""><td>170</td><td>0</td><td>2446,6</td><td>440</td><td>245</td><td>2453</td><td>170</td><td>0</td><td>2466,7</td><td>440</td><td>340</td><td>2452,</td><td>05</td><td>180</td><td>-340</td><td>2444,975</td></td<>  | 170    | 0      | 2446,6              | 440    | 245    | 2453     | 170    | 0      | 2466,7   | 440    | 340    | 2452,             | 05   | 180    | -340   | 2444,975             |
| 190 0 2447,3 420 245 2452,12 190 0 2462,65 420 340 2451,65 210 -340 2451,55 220 -340 2451,55 220 -340 2451,55 220 -340 2451,55 220 -340 2455,55 220 -340 2455,55 220 -340 2455,25 220 -340 2455,25 220 -340 2455,25 220 -340 2455,25 230 -340 2455,25 250 -340 2445,25 340 2450,255 250 -340 2446,57 250 2448,425 350 340 2445,15 250 -340 2446,57 270 -340 2446,57 270 -340 2446,57 270 -340 2446,57 340 2446,57 340 2444,27 330 340 2447,1 290 -340 2446,57 310 340 2447,1 290 -340 2446,57 310 340 2445,25 310 340 2445,25 310 340 2445,25 310 340 2446,72 340  | 180    | 0      | 2446,55             | 430    | 245    | 2452,45  | 180    | 0      | 2467,175 | 430    | 340    | 2451,             | 45   | 190    | -340   | 2445,15              |
| 200 0 2444,74 410 245 245,05 210 -340 245,155 210 -340 245,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 220 -340 2445,155 200 -340 2445,055 250 -340 2445,055 250 -340 2446,375 350 340 2446,15 340 2446,17 330 340 2446,15 340 2446,17 330 340 2447,1 330 340 2447,1 340 2446,17 330 340 2447,1 300 340 2447,1 300 340 2447,1 300 340 2447,1 300 340 2447,1 300 340 2447,1 300 340 2447,1 300 340 2  | 190    | 0      | 2447,3              | 420    | 245    | 2452,1   | 190    | 0      | 2460,65  | 420    | 340    | 2451              | ,4   | 200    | -340   | 2445,075             |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 200    | 0      | 2447,4              | 410    | 245    | 2452,125 | 200    | 0      | 2453,8   | 410    | 340    | 2451,             | 05   | 210    | -340   | 2445,95              |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 210    | 0      | 2448,1              | 400    | 245    | 2450,875 | 210    | 0      | 2447,35  | 400    | 340    | 2451,             | 55   | 220    | -340   | 2445,575             |
| 220   0   2439   240   0   2439   240   2445,25   370   245   2450,075   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2450,25   250   340   2445,25   250   340   2445,25   250   340   2446,75   300   2446,75   300   340   2446,25   300   2446,75   300   340   2446,25   300   2446,75   300   340   2446,25   300   340   2446,25   300   2446,75   300   340   2446,25   300   340   2446,25   300   340   2446,25   300   340   2446,25   | 220    | 0      | 2448,375            | 390    | 245    | 2450,75  | 220    | 0      | 2439,525 | 390    | 340    | 2451,1            | 25   | 230    | -340   | 2445,35              |
| 250   0   2448,223   360   245   2450,075   250   0   2448,25   360   2440,075   260   2448,655   270   340   2446,37     270   0   2448,425   350   245   2450,07   270   0   2448,55   270   340   2446,37     280   0   2448,675   310   245   2450,07   270   0   2443,35   340   2447,1   300   340   2446,37     300   0   2448,675   310   245   2450,07   300   0   2444,2   330   340   2444,2   320   340   2446,73     310   0   2448,575   310   245   2450,8   320   0   2444,2   320   340   2444,2   320   340   2444,2   320   340   2444,2   320   340   2444,2   320   340   2444,2   320   340   2446,73     330   0   2448,72   340 </td <td>240</td> <td>0</td> <td>2447,3</td> <td>370</td> <td>245</td> <td>2450,5</td> <td>230</td> <td></td> <td>2439</td> <td>370</td> <td>340</td> <td>2450.6</td> <td>10</td> <td>240</td> <td>-340</td> <td>2440,05</td>  | 240    | 0      | 2447,3              | 370    | 245    | 2450,5   | 230    |        | 2439     | 370    | 340    | 2450.6            | 10   | 240    | -340   | 2440,05              |
| 260   0   2448,425   350   245   2450,45   200   0   2441,875   350   340   2448,65   270   340   2446,17     270   0   2448,975   330   245   2450,07   270   0   2443,35   340   340   2446,17   290   4248,975   330   245   2450,07   280   0   2444,1   330   340   2447,1   300   440   2446,17     300   0   2448,975   310   245   2450,07   300   0   2444,2   330   340   2447,11   300   440   2446,7     330   0   2448,725   280   245   2450,68   310   0   2444,25   330   340   2444,25   330   340   2444,25   340   2446,73     340   0   2449,625   270   245   2450,48   350   0   2449,77   340   2446,73   340   2444,71   340   2446,73   | 250    | ő      | 2448.325            | 360    | 245    | 2450.075 | 250    | 0      | 2440,1   | 360    | 340    | 2450,0            | 175  | 250    | -340   | 2443,0               |
| 270   0   2448,45   340   245   2450,7   270   0   2443,35   340   340   2449   280   -340   2446,17     280   0   2448,075   320   245   2450,02   280   0   2444,25   320   340   2447,1   300   340   2447,1   300   340   2447,1   300   340   2447,1   300   340   2447,1   300   340   2446,17   300   340   2446,17   300   340   2446,17   300   340   2446,17   300   340   2446,17   300   340   2446,17   300   340   2446,17   300   340   2446,17   300   340   2446,17   300   340   2446,17   300   340   2447,13   300   340   2446,17   300   340   2447,13   300   340   2446,17   300   2446,17   300   2446,17   300   2446,17   300   2446,17   300   2446,   | 260    | 0      | 2448.425            | 350    | 245    | 2450.45  | 260    | ő      | 2441.875 | 350    | 340    | 2448              | 65   | 270    | -340   | 2446.375             |
| 280   0   2449,075   330   245   2450,05   280   0   2444,2   330   340   2447,4   290   -340   2445,8     280   0   2448,975   310   245   2450,075   300   0   2448,55   310   340   2445,8   310   340   2444,2   320   340   2447,1   300   340   2446,87     310   0   2448,755   300   245   2450,8   310   0   2444,25   330   340   2446,77     320   0   2448,75   280   245   2450,475   330   0   2449,77   290   340   2446,73   340   2446,73     330   0   2449,675   260   245   2449,8   350   0   2449,75   340   2446,75   360   2446,725   360   340   2447,12   380   340   2447,12   380   340   2447,13   380   24449,75   380   340 <t< td=""><td>270</td><td>0</td><td>2448,45</td><td>340</td><td>245</td><td>2450.7</td><td>270</td><td>0</td><td>2443.35</td><td>340</td><td>340</td><td>2449</td><td>9</td><td>280</td><td>-340</td><td>2446.175</td></t<>   | 270    | 0      | 2448,45             | 340    | 245    | 2450.7   | 270    | 0      | 2443.35  | 340    | 340    | 2449              | 9    | 280    | -340   | 2446.175             |
| 290   0   2448,975   320   245   2450,075   300   0   2448,675   310   245   2450,075   300   0   2448,755   300   2445,255   310   340   2446,77     310   0   2448,755   300   245   2450,075   300   0   2447,075   300   340   2444,2   320   -340   2446,73     320   0   2448,725   280   245   2450,475   330   0   2447,075   300   340   2440,9   340   -340   2446,73     330   0   2448,175   250   245   2450,475   330   0   2449,175   350   -340   2447,07     360   0   2449,67   250   245   2450,05   360   0   2449,72   340   2440,23   300   -2449,72   360   2449,72   360   2449,72   360   2446,72   370   -340   2447,72     370   0   2449,87<   | 280    | 0      | 2449,075            | 330    | 245    | 2450,05  | 280    | 0      | 2444,2   | 330    | 340    | 2447              | 4    | 290    | -340   | 2445,8               |
| 300   0   2448,675   310   245   2450,075   300   0   2448,705   310   340   2448,525   310   340   2448,525     310   0   2448,575   300   245   2450,6   310   0   2447,7   290   340   2444,25   330   340   2444,25   330   340   2444,25   330   340   2444,25   330   340   2444,25   330   340   2446,17   340   2446,17   340   2446,17   360   2449,17   260   2449,17   360   2449,17   360   2449,17   260   340   2447,11   360   2449,17   360   2449,17   360   2449,17   360   2449,17   360   2449,17   360   2449,17   360   2449,17   360   2449,17   380   340   2447,12   340   2447,13   380   340   2447,13   380   340   2447,13   380   340   2446,13   340   2447,13 <td< td=""><td>290</td><td>0</td><td>2448,975</td><td>320</td><td>245</td><td>2450,2</td><td>290</td><td>0</td><td>2445,25</td><td>320</td><td>340</td><td>2447</td><td>1</td><td>300</td><td>-340</td><td>2446,3</td></td<>   | 290    | 0      | 2448,975            | 320    | 245    | 2450,2   | 290    | 0      | 2445,25  | 320    | 340    | 2447              | 1    | 300    | -340   | 2446,3               |
| $ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$  | 300    | 0      | 2448,675            | 310    | 245    | 2450,075 | 300    | 0      | 2445,8   | 310    | 340    | 2445,5            | 525  | 310    | -340   | 2446,875             |
| 320   0   2448,725   290   245   2450,8   320   0   2448,225   280   340   2442,15   330   -340   2447,12     330   0   2449,175   240   245   2450,475   330   0   2448,225   280   340   2440,375   350   -340   2446,7     360   0   2449,475   260   245   2450,0425   360   0   2449,075   360   -340   2446,725   360   -340   2447,12     370   0   2449,975   240   245   2449,055   370   0   2449,725   380   -340   2447,12     380   0   2449,975   240   245   2449,775   380   0   2449,82   210   245   2449,775   380   2445,225   210   340   2466,33   390   -340   2447,57     410   0   2449,85   190   245   2449,175   300   2445,25   210   340 </td <td>310</td> <td>0</td> <td>2448,55</td> <td>300</td> <td>245</td> <td>2450,6</td> <td>310</td> <td>0</td> <td>2447,075</td> <td>300</td> <td>340</td> <td>2444</td> <td>,2</td> <td>320</td> <td>-340</td> <td>2446,75</td>   | 310    | 0      | 2448,55             | 300    | 245    | 2450,6   | 310    | 0      | 2447,075 | 300    | 340    | 2444              | ,2   | 320    | -340   | 2446,75              |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 320    | 0      | 2448,725            | 290    | 245    | 2450,8   | 320    | 0      | 2447,7   | 290    | 340    | 2442,             | 55   | 330    | -340   | 2447,125             |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 330    | 0      | 2449,1              | 280    | 245    | 2450,475 | 330    | 0      | 2448,325 | 280    | 340    | 2440              | ,9   | 340    | -340   | 2446,7               |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 340    | 0      | 2449,625            | 270    | 245    | 2450,425 | 340    | 0      | 2449,2   | 270    | 340    | 2440,3            | 375  | 350    | -340   | 2446,9               |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 350    | 0      | 2449,475            | 260    | 245    | 2449,8   | 350    | 0      | 2449,05  | 260    | 340    | 2446,7            | /25  | 360    | -340   | 2447,15              |
| $\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $   | 360    | 0      | 2449,6              | 250    | 245    | 2450,05  | 360    | 0      | 2450,05  | 250    | 340    | 2454,2            | 225  | 370    | -340   | 2447,125             |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 380    | 0      | 2449,975            | 240    | 245    | 2449,373 | 370    | 0      | 2449,7   | 240    | 340    | 2460,9            | 125  | 380    | -340   | 2447,675             |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 390    | ő      | 2443,773            | 220    | 245    | 2449,775 | 300    | 0      | 2449,725 | 230    | 340    | 2408              | 05   | 400    | -340   | 2447,323             |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 400    | ő      | 2449.9              | 210    | 245    | 2449.25  | 400    | ő      | 2443,0   | 210    | 340    | 2400,             | 4    | 410    | -340   | 2447,05              |
| $ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$   | 410    | 0      | 2449,925            | 200    | 245    | 2449.8   | 410    | ő      | 2449.55  | 200    | 340    | 2467              | 9    | 420    | -340   | 2447.9               |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 420    | 0      | 2449,85             | 190    | 245    | 2449,15  | 420    | 0      | 2450.125 | 190    | 340    | 2468              | 3    | 430    | -340   | 2447.95              |
| $ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $  | 430    | 0      | 2450,075            | 180    | 245    | 2449,925 | 430    | 0      | 2450,225 | 180    | 340    | 2468              | 7    | 440    | -340   | 2447,675             |
| $ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$   | 440    | 0      | 2449,675            | 170    | 245    | 2449,1   | 440    | 0      | 2449,975 | 170    | 340    | 2468,1            | 175  | 450    | -340   | 2447,975             |
| $ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$   | 450    | 0      | 2450,125            | 160    | 245    | 2449,5   | 450    | 0      | 2450,225 | 160    | 340    | 2467,             | 85   | 460    | -340   | 2447,8               |
| $ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$   | 460    | 0      | 2450,5              | 150    | 245    | 2449,275 | 460    | 0      | 2450,85  | 150    | 340    | 2467,7            | /25  | 470    | -340   | 2448,325             |
| 480 0 2449,625 130 245 2449,35 480 0 2449,675 130 340 2467,35 490 -340 2448,12   490 0 2448,675 110 245 2448,6 490 0 2450,675 120 340 2467,35 490 -340 2448,12   500 0 2448,675 110 245 2448,6 500 0 2450,675 120 340 2467,225 510 -340 2448,35   510 0 2456,175 100 245 2448,6 510 0 2450,675 100 340 2467,225 530 -340 2448,45   520 0 2451,4175 500 0 2450,675 100 340 2465,375 520 -340 2448,00   530 0 2452,075 70 245 2445,175 530 0 2488,975 80 340 2451,425 540 -340 2448,0   540 0 2465,975 540 0 2468,975 50   | 470    | 0      | 2450,575            | 140    | 245    | 2449,25  | 470    | 0      | 2450,8   | 140    | 340    | 2467              | ,6   | 480    | -340   | 2448,225             |
| 490 0 2449,2 120 245 2448,5 490 0 2450,675 110 340 2467,025 500 -340 2448,2   500 0 2456,675 110 245 2448,7 500 0 2467,225 510 -340 2448,2   510 0 2456,175 100 245 2448,6 510 0 2450,610 340 2467,225 510 -340 2448,2   520 0 2453,775 90 245 2447,175 520 0 2451,375 90 340 2458,125 530 -340 2448,0   540 0 2456,2075 70 245 2446,175 530 2458,125 530 -340 2448,0   550 0 2452,249,75 540 2466,75 550 340 2458,125 530 -340 2448,0   550 0 2452,2465,975 540 2466,875 550 340 2452,246,375 540 2448,3   560 0 2450,125 60 2452,2   | 480    | 0      | 2449,625            | 130    | 245    | 2449,35  | 480    | 0      | 2449,675 | 130    | 340    | 2467,             | 35   | 490    | -340   | 2448,125             |
| 500   0   2448,675   110   2448,7   500   0   2450   110   340   2467,225   510   -340   2448,3     510   0   2456,175   100   245   2448,7   500   0   2450   110   340   2467,225   510   -340   2448,3     520   0   2453,775   90   245   2447,175   520   0   2451,375   90   340   2465,375   520   -340   2448,0     530   0   2452   2447,175   530   0   2488,975   80   340   2454,425   540   -340   2448,0     540   0   2462,075   70   245   2465,925   550   0   2456,125   60   340   2457,5   550   -340   2448,3     560   0   2450,455   50   245   2466,925   550   0   2455,457   50   340   2451,375   570   -340   2451,375   570<  | 490    | 0      | 2449,2              | 120    | 245    | 2448,6   | 490    | 0      | 2450,675 | 120    | 340    | 2467,0            | 025  | 500    | -340   | 2448,2               |
| 510 0 2435,175 100 243 2448,6 510 0 2450,6 100 340 2465,375 520 -340 2448,6   520 0 2453,775 90 245 2447,175 520 0 2451,375 90 340 2458,125 530 -340 2448,6   530 0 2454,425 80 245 2449,175 530 0 2458,975 90 340 2458,425 530 -340 2448,8   540 0 2462,075 70 245 2456,975 540 0 2469 70 340 2457,5 550 -340 2448,3   560 0 2450,125 60 240 70 340 2462 560 -340 2459,87   560 0 2450,125 50 2452,425,925 550 0 2455,45 50 340 2462 560 -340 2459,87   570 0 2450,125 50 2466,825 560 0 2455,45 40 340 <td< td=""><td>500</td><td>0</td><td>2448,675</td><td>110</td><td>245</td><td>2448,7</td><td>500</td><td>0</td><td>2450</td><td>110</td><td>340</td><td>2467,2</td><td>225</td><td>510</td><td>-340</td><td>2448,3</td></td<>   | 500    | 0      | 2448,675            | 110    | 245    | 2448,7   | 500    | 0      | 2450     | 110    | 340    | 2467,2            | 225  | 510    | -340   | 2448,3               |
| 530   0   2435,775   50   2435,775   50   2431,775   500   2431,775   500   2431,775   500   2448,175   530   0   340   2456,125   540   -340   2448,8     540   0   2462,075   70   245   2456,975   540   0   2469,775   550   340   2456,425   540   -340   2448,3     550   0   2450,325   60   245   2465,925   550   0   2456,125   60   340   2457,5   550   -340   2448,3     560   0   2450,255   50   245   2466,825   560   0   2455,45   50   340   2462   560   -340   2451,37     580   0   2455,45   50   340   2781,25   590   -340   2451,37     580   0   2455,475   50   340   2781,25   590   -340   2453,67     590   0   2455,475   <  | 520    | ő      | 2450,175            | 100    | 245    | 2446,0   | 510    | 0      | 2450,6   | 100    | 340    | 2465,3            | \$75 | 520    | -340   | 2448,4               |
| 540   0   2452,075   70   245   2456,975   540   0   2466,975   500   2466,975   500   2466,975   500   2466,975   500   2452,125   550   0   2452,125   550   0   2452,125   550   0   2466,975   550   2462,255   550   340   2448,355   550   2462,255   550   340   2448,355   550   340   2448,35   550   340   2448,35   550   340   2448,35   550   340   2448,35   550   340   2448,35   550   340   2448,35   550   340   2448,35   570   340   2448,35   570   340   2448,35   570   340   2453,675   570   340   2453,675   570   340   2453,675   570   340   2453,675   580   340   2781,25   590   340   2453,675   590   340   2453,675   590   340   2453,675   590   340   2453,675   | 530    | ŏ      | 2453,775            | 80     | 245    | 2447,175 | 520    |        | 2451,375 | 90     | 340    | 2458,1            | 125  | 530    | -340   | 2448,05              |
| 550   0   2450,325   60   245   2466,825   550   0   2456,125   60   340   247,3   530   5340   2448,3     560   0   2450,55   50   245   2466,825   550   0   2455,675   50   340   2462   560   -340   2451,67     570   0   2450,125   40   245   2466,825   570   0   2455,675   50   340   2482,15   -340   2451,67     580   0   2450,675   570   0   2450,675   580   -340   2451,67   570   0   2452,675   580   -340   2451,67   590   -340   2451,67   590   -340   2451,67   590   -340   2451,67   590   -340   2451,67   590   -340   2451,67   590   -340   2451,67   590   -340   2451,67   590   -340   2451,67   590   -340   2451,67   590   -340   2451,6   | 540    | õ      | 2462 075            | 70     | 245    | 2456.975 | 540    | 0      | 2468,975 | 70     | 340    | 2434,4            | 5    | 550    | -340   | 2446                 |
| 560   0   2450,55   50   245   2466,825   560   0   2455,675   50   340   2787,35   570   -340   2451,67     570   0   2450,125   40   245   2466,875   570   0   2455,675   50   340   2787,35   570   -340   2451,67     580   0   2450,675   30   245   2466,875   570   0   2455,675   50   340   2787,35   570   -340   2451,67     580   0   2450,675   20   245   2466,85   580   0   2458,15   30   340   2781,25   590   -340   2451,67     600   0   2450,675   20   245   2466,75   590   0   2457,075   20   340   2781,475   600   -340   2453,67     600   0   2459,275   10   245   2464,875   590   0   2449,795   10   340   2781,8   61  | 550    | 0      | 2450.325            | 60     | 245    | 2465.925 | 550    | 0      | 2456 125 | 60     | 340    | 2437              | 2    | 560    | -340   | 2459 875             |
| 570   0   2450,125   40   245   2466,475   570   0   2455,45   40   340   2606,55   580   -340   2451,37     580   0   2450,375   30   245   2466,85   580   0   2458,45   40   340   2606,55   580   -340   2451,37     590   0   2450,675   20   245   2466,85   590   0   2457,075   20   340   2781,475   600   -340   2453,67     600   0   2455,275   10   245   2466,875   590   0   2457,075   20   340   2781,475   600   -340   2447,5     610   0   2449,775   0   340   2781,8   610   -340   2446,17     620   0   2461,975   0   340   2781,975   620   -340   2446,72     620   0   2461,975   0   2450,05   0   340   2781,975   620 <td>560</td> <td>Ó</td> <td>2450.55</td> <td>50</td> <td>245</td> <td>2466.825</td> <td>560</td> <td>0</td> <td>2455.675</td> <td>50</td> <td>340</td> <td>2787</td> <td>35</td> <td>570</td> <td>-340</td> <td>2451.675</td>   | 560    | Ó      | 2450.55             | 50     | 245    | 2466.825 | 560    | 0      | 2455.675 | 50     | 340    | 2787              | 35   | 570    | -340   | 2451.675             |
| 580   0   2450,375   30   245   2466,85   580   0   2458,15   30   340   2781,25   590   -340   2453,6     590   0   2450,675   20   245   2466,775   590   0   2457,075   20   340   2781,475   600   -340   2447,5     600   0   2455,275   10   245   2464,875   600   2449,925   10   340   2781,475   600   -340   2447,5     610   0   2449,975   0   340   2781,875   620   -340   2446,1     620   0   2461,975   0   340   2781,975   620   -340   2446,72     620   0   2461,975   0   340   2781,975   620   -340   2446,72     620   0   2450,05   0   2450,05   0   340   2781,975   620   -340   2446,72   | 570    | 0      | 2450,125            | 40     | 245    | 2466,475 | 570    | ő      | 2455.45  | 40     | 340    | 2606              | 55   | 580    | -340   | 2451.375             |
| 590   0   2450,675   20   245   2466,775   590   0   2457,075   20   340   2781,475   600   -340   2447,5     600   0   2455,275   10   245   2464,875   600   0   2449,925   10   340   2781,475   600   -340   2447,5     610   0   2460,625   0   245   2460,1   610   0   2449,775   0   340   2781,975   620   -340   2446,72     620   0   2450,05   520   0   2450,05   520   -340   2446,72  | 580    | 0      | 2450,375            | 30     | 245    | 2466,85  | 580    | 0      | 2458.15  | 30     | 340    | 2781              | 25   | 590    | -340   | 2453.65              |
| 600   0   2455,275   10   245   2464,875   600   0   2449,925   10   340   2781,8   610   -340   2446,12     610   0   2460,625   0   245   2460,1   610   0   2449,975   0   340   2781,8   610   -340   2446,12     620   0   2451,975   0   340   2781,975   620   -340   2446,72   | 590    | 0      | 2450,675            | 20     | 245    | 2466,775 | 590    | 0      | 2457,075 | 20     | 340    | 2781.4            | 175  | 600    | -340   | 2447,55              |
| 610   0   2460,625   0   245   2460,1   610   0   2449,775   0   340   2781,975   620   -340   2446,72     620   0   2451,975   620   0   2450,05   620   -340   2446,72   | 600    | 0      | 2455,275            | 10     | 245    | 2464,875 | 600    | 0      | 2449,925 | 10     | 340    | 2781              | ,8   | 610    | -340   | 2446,1               |
| 620 0 2461,975 620 0 2450,05   | 610    | 0      | 2460,625            | 0      | 245    | 2460,1   | 610    | 0      | 2449,775 | 0      | 340    | 2781,9            | 975  | 620    | -340   | 2446,725             |
|  | 620    | 0      | 2461,975            |        |        |          | 620    | 0      | 2450,05  |        |        |                   |      |        |        |                      |

Tabell V8 og V9. Målinger av sandlagets høyde ved akkumulasjonsforsøk.

| SC_D   | _2_24  | _N                  |        |        |                     |        |        |                     |
|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|
| X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] |
| -10    | 0      | 2589,85             | 620    | 340    | 2597,1              | 0      | -340   | 2777,1              |
| 10     | 0      | 2464,1              | 610    | 340    | 2/84,075            | 10     | -340   | 2588,95             |
| 20     | 0      | 2400,9              | 590    | 340    | 2407,725            | 30     | -340   | 2457,05             |
| 30     | 0      | 2401,05             | 580    | 340    | 2401,95             | 40     | -340   | 2436,13             |
| 40     | 0      | 2464 925            | 570    | 340    | 2450,775            | 50     | -340   | 2454.1              |
| 50     | 0      | 2464.85             | 560    | 340    | 2450.8              | 60     | -340   | 2459.13             |
| 60     | 0      | 2465.175            | 550    | 340    | 2451.025            | 70     | -340   | 2463.73             |
| 70     | 0      | 2465.4              | 540    | 340    | 2451.025            | 80     | -340   | 2463.45             |
| 80     | 0      | 2465,55             | 530    | 340    | 2450,5              | 90     | -340   | 2463,75             |
| 90     | 0      | 2465,65             | 520    | 340    | 2450,75             | 100    | -340   | 2463,2              |
| 100    | 0      | 2466,1              | 510    | 340    | 2451,35             | 110    | -340   | 2463,25             |
| 110    | 0      | 2462,6              | 500    | 340    | 2454,35             | 120    | -340   | 2456,45             |
| 120    | 0      | 2456,1              | 490    | 340    | 2454,125            | 130    | -340   | 2449,4              |
| 130    | 0      | 2447,775            | 480    | 340    | 2452,95             | 140    | -340   | 2442,55             |
| 140    | 0      | 2440,6              | 470    | 340    | 2451,4              | 150    | -340   | 2437,03             |
| 150    | 0      | 2436,975            | 460    | 340    | 2450,4              | 160    | -340   | 2438,25             |
| 160    | 0      | 2438,35             | 450    | 340    | 2449,575            | 170    | -340   | 2439,13             |
| 170    | 0      | 2439,5              | 440    | 340    | 2449,725            | 180    | -340   | 2439,95             |
| 180    | 0      | 2440,275            | 430    | 340    | 2450                | 190    | -340   | 2440,5              |
| 190    | 0      | 2441                | 420    | 340    | 2449,9              | 200    | -340   | 2441,58             |
| 200    | 0      | 2441,175            | 410    | 340    | 2450,25             | 210    | -340   | 2442,13             |
| 210    | 0      | 2442,3              | 400    | 340    | 2449,775            | 220    | -340   | 2442,45             |
| 220    | 0      | 2443,025            | 390    | 340    | 2449,925            | 230    | -340   | 2443,23             |
| 230    | 0      | 2443,625            | 380    | 340    | 2450,025            | 240    | -340   | 2444,03             |
| 240    | 0      | 2444,5              | 370    | 340    | 2449,85             | 250    | -340   | 2444,5              |
| 250    | 0      | 2444,725            | 360    | 340    | 2449,95             | 260    | -340   | 2444                |
| 260    | 0      | 2445,675            | 350    | 340    | 2449,375            | 270    | -340   | 2445                |
| 270    | 0      | 2445,75             | 340    | 340    | 2449,225            | 280    | -340   | 2444,8              |
| 280    | 0      | 2446,225            | 330    | 340    | 2449,575            | 290    | -340   | 2445,28             |
| 290    | 0      | 2446,35             | 320    | 340    | 2449,425            | 300    | -340   | 2445,98             |
| 300    | 0      | 2446,8              | 310    | 340    | 2449,025            | 310    | -340   | 2446,13             |
| 310    | 0      | 2447,05             | 300    | 340    | 2449,45             | 320    | -340   | 2446,3              |
| 320    | 0      | 2447,325            | 290    | 340    | 2448,925            | 330    | -340   | 2446,08             |
| 330    | 0      | 2447,925            | 280    | 340    | 2448,45             | 340    | -340   | 2446,75             |
| 340    | 0      | 2447,95             | 270    | 340    | 2448,725            | 350    | -340   | 2446,53             |
| 350    | 0      | 2448,1              | 260    | 340    | 2448,075            | 360    | -340   | 2447,1              |
| 360    | 0      | 2448,35             | 250    | 340    | 2447,95             | 3/0    | -340   | 2440,8              |
| 370    | 0      | 2448,475            | 240    | 340    | 2448,2              | 380    | -340   | 2447,13             |
| 300    | 0      | 2446,323            | 230    | 340    | 2447,373            | 400    | -340   | 2440,93             |
| 400    | 0      | 2443,1              | 210    | 340    | 2447,3              | 410    | -340   | 2447,13             |
| 410    | 0      | 2446,725            | 200    | 340    | 2447,1              | 420    | -340   | 2447,33             |
| 420    | 0      | 2446,373            | 190    | 340    | 2440,25             | 430    | -340   | 2447,03             |
| 430    | 0      | 2448.6              | 180    | 340    | 2445 125            | 440    | -340   | 2447.65             |
| 440    | 0      | 2449.125            | 170    | 340    | 2444.4              | 450    | -340   | 2447.8              |
| 450    | 0      | 2448 725            | 160    | 340    | 2443.25             | 460    | -340   | 2447.55             |
| 460    | 0      | 2448.65             | 150    | 340    | 2442.55             | 470    | -340   | 2447.55             |
| 470    | 0      | 2449.5              | 140    | 340    | 2441.4              | 480    | -340   | 2447,48             |
| 480    | 0      | 2451.65             | 130    | 340    | 2440.9              | 490    | -340   | 2447.85             |
| 490    | 0      | 2454,75             | 120    | 340    | 2441,325            | 500    | -340   | 2448,43             |
| 500    | 0      | 2454,5              | 110    | 340    | 2448,65             | 510    | -340   | 2448,25             |
| 510    | 0      | 2453,1              | 100    | 340    | 2455,7              | 520    | -340   | 2447,8              |
| 520    | 0      | 2449,3              | 90     | 340    | 2463,025            | 530    | -340   | 2447,7              |
| 530    | 0      | 2448,7              | 80     | 340    | 2468,725            | 540    | -340   | 2449,03             |
| 540    | 0      | 2448,9              | 70     | 340    | 2467,8              | 550    | -340   | 2449,85             |
| 550    | 0      | 2449,1              | 60     | 340    | 2467,475            | 560    | -340   | 2450,63             |
| 560    | 0      | 2449,375            | 50     | 340    | 2467,175            | 570    | -340   | 2448,2              |
| 570    | 0      | 2450,725            | 40     | 340    | 2467,3              | 580    | -340   | 2448,78             |
| 580    | 0      | 2456,35             | 30     | 340    | 2467,275            | 590    | -340   | 2448,05             |
| 590    | 0      | 2461,575            | 20     | 340    | 2462,225            | 600    | -340   | 2448,7              |
| 600    | 0      | 2467,275            | 10     | 340    | 2461,275            | 610    | -340   | 2448,18             |
| 610    | 0      | 2782,225            | 0      | 340    | 2464,7              | 620    | -340   | 2448,58             |
| 620    | 0      | 3737.076            |        |        |                     |        |        |                     |

| SC_D_  | 2_24   | Р                   |        |        |                     |        |        |                     |
|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|
| X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] |
| -10    | 0      | 2589,975            | 620    | 340    | 2462,75             | 0      | -340   | 2588,05             |
| 0      | 0      | 2454,025            | 610    | 340    | 2457,725            | 10     | -340   | 2778,5              |
| 10     | 0      | 2460,65             | 600    | 340    | 2451,925            | 20     | -340   | 2458,4              |
| 20     | 0      | 2457,025            | 590    | 340    | 2450,625            | 30     | -340   | 2453,825            |
| 40     | 0      | 2404,30             | 570    | 340    | 2450,15             | 40     | -340   | 2449,075            |
| 50     | 0      | 2432,873            | 560    | 340    | 2450,025            | 60     | -340   | 2440,323            |
| 60     | 0      | 2464 775            | 550    | 340    | 2452.6              | 70     | -340   | 2451.85             |
| 70     | 0      | 2464.975            | 540    | 340    | 2451.925            | 80     | -340   | 2458.925            |
| 80     | 0      | 2465.6              | 530    | 340    | 2449.025            | 90     | -340   | 2463.125            |
| 90     | 0      | 2465,6              | 520    | 340    | 2449,1              | 100    | -340   | 2463,55             |
| 100    | 0      | 2465,525            | 510    | 340    | 2448,675            | 110    | -340   | 2463,575            |
| 110    | 0      | 2466,1              | 500    | 340    | 2447,85             | 120    | -340   | 2463,675            |
| 120    | 0      | 2466,175            | 490    | 340    | 2447,025            | 130    | -340   | 2463,65             |
| 130    | 0      | 2466,025            | 480    | 340    | 2446,975            | 140    | -340   | 2463,85             |
| 140    | 0      | 2466,425            | 470    | 340    | 2446,775            | 150    | -340   | 2464                |
| 150    | 0      | 2466,575            | 460    | 340    | 2445,6              | 160    | -340   | 2464,525            |
| 160    | 0      | 2467,425            | 450    | 340    | 2444,975            | 170    | -340   | 2464,35             |
| 170    | 0      | 2467,275            | 440    | 340    | 2444                | 180    | -340   | 2464,95             |
| 180    | 0      | 2467                | 430    | 340    | 2443,125            | 190    | -340   | 2464,55             |
| 190    | 0      | 2468,05             | 420    | 340    | 2442,975            | 200    | -340   | 2465,375            |
| 200    | 0      | 2467,5              | 410    | 340    | 2441,775            | 210    | -340   | 2464,925            |
| 210    | 0      | 2467,75             | 400    | 340    | 2441,175            | 220    | -340   | 2465,6              |
| 220    | 0      | 2468,05             | 390    | 340    | 2439                | 230    | -340   | 2465,45             |
| 230    | 0      | 2467,8              | 380    | 340    | 2438,2              | 240    | -340   | 2465,325            |
| 240    | 0      | 2468,325            | 370    | 340    | 2437,25             | 250    | -340   | 2465,45             |
| 250    | 0      | 2468,25             | 360    | 340    | 2436,05             | 260    | -340   | 2465,325            |
| 260    | 0      | 2468,3              | 350    | 340    | 2436,3              | 2/0    | -340   | 2466,025            |
| 2/0    | 0      | 2468,375            | 340    | 340    | 2436,85             | 280    | -340   | 2466,6              |
| 280    | 0      | 2408,8              | 330    | 340    | 2443,15             | 290    | -340   | 2404,35             |
| 290    | 0      | 2400,0              | 320    | 240    | 2450,45             | 310    | -340   | 2436,05             |
| 310    | 0      | 2406,775            | 300    | 340    | 2450,4              | 320    | -340   | 2451,225            |
| 320    | 0      | 2455,825            | 290    | 340    | 2467.3              | 330    | -340   | 2437.025            |
| 330    | 0      | 2449                | 280    | 340    | 2470 775            | 340    | -340   | 2430 175            |
| 340    | 0      | 2442.35             | 270    | 340    | 2470.2              | 350    | -340   | 2430.075            |
| 350    | 0      | 2442.4              | 260    | 340    | 2469,7              | 360    | -340   | 2430,475            |
| 360    | 0      | 2430,675            | 250    | 340    | 2470,05             | 370    | -340   | 2432,475            |
| 370    | 0      | 2430,875            | 240    | 340    | 2469,7              | 380    | -340   | 2434,125            |
| 380    | 0      | 2432,5              | 230    | 340    | 2469,65             | 390    | -340   | 2435,7              |
| 390    | 0      | 2434,175            | 220    | 340    | 2469,025            | 400    | -340   | 2437,125            |
| 400    | 0      | 2434,825            | 210    | 340    | 2470,05             | 410    | -340   | 2438,55             |
| 410    | 0      | 2436,675            | 200    | 340    | 2469,175            | 420    | -340   | 2439,6              |
| 420    | 0      | 2436,95             | 190    | 340    | 2469,15             | 430    | -340   | 2440,5              |
| 430    | 0      | 2437,5              | 180    | 340    | 2468,725            | 440    | -340   | 2441,85             |
| 440    | 0      | 2438,025            | 170    | 340    | 2469,025            | 450    | -340   | 2442,575            |
| 450    | 0      | 2438,825            | 160    | 340    | 2468,55             | 460    | -340   | 2442,075            |
| 460    | 0      | 2439,875            | 150    | 340    | 2468,9              | 4/0    | -340   | 2442,9              |
| 4/0    | 0      | 2439,725            | 140    | 340    | 2468,425            | 480    | -340   | 2442,975            |
| 480    | 0      | 2441,175            | 130    | 340    | 2407,85             | 490    | -340   | 2443,875            |
| 490    | 0      | 2442,375            | 110    | 340    | 2408,423            | 500    | -340   | 2443,25             |
| 510    | 0      | 2441,623            | 100    | 340    | 2408,075            | 510    | -340   | 2443,773            |
| 520    | 0      | 2443                | 90     | 340    | 2406,223            | 530    | -340   | 2444,3              |
| 530    | 0      | 2443,075            | 80     | 340    | 2467.925            | 540    | -340   | 2448.6              |
| 540    | 0      | 2445.2              | 70     | 340    | 2468.625            | 550    | -340   | 2447.7              |
| 550    | 0      | 2446.15             | 60     | 340    | 2465.725            | 560    | -340   | 2446.325            |
| 560    | 0      | 2448,75             | 50     | 340    | 2459,35             | 570    | -340   | 2446,35             |
| 570    | 0      | 2451,175            | 40     | 340    | 2451,275            | 580    | -340   | 2446,925            |
| 580    | 0      | 2449,15             | 30     | 340    | 2450,7              | 590    | -340   | 2450,1              |
| 590    | 0      | 2448,675            | 20     | 340    | 2452,875            | 600    | -340   | 2455,95             |
| 600    | 0      | 2449,15             | 10     | 340    | 2455,75             | 610    | -340   | 2462,025            |
| 610    | 0      | 2449,775            | 0      | 340    | 2460,775            | 620    | -340   | 2468,575            |
| 620    | 0      | 2454,375            |        |        |                     |        |        |                     |

Tabell V12 og V13. Målinger av sandlagets høyde ved akkumulasjonsforsøk.

| SC_D   | _3_8_  | N                   |        |        |                     |
|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|
| X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] |
| -10    | 0      | 2604,3              | 620    | 340    | 2459,475            |
| 0      | 0      | 2464,425            | 610    | 340    | 2453,6              |
| 10     | 0      | 2460,25             | 600    | 340    | 2451,4              |
| 20     | 0      | 2458,675            | 590    | 340    | 2450,525            |
| 30     | 0      | 2460,9              | 580    | 340    | 2451,7              |
| 40     | 0      | 2465,35             | 570    | 340    | 2451,675            |
| 50     | 0      | 2464,575            | 560    | 340    | 2508,575            |
| 60     | 0      | 2464,775            | 550    | 340    | 2461,975            |
| /0     | 0      | 2464,625            | 540    | 340    | 2455,5              |
| 80     | 0      | 2404,975            | 530    | 340    | 2450,3              |
| 100    |        | 2400,3              | 520    | 240    | 2400,475            |
| 110    | 0      | 2439,2              | 500    | 340    | 2433,7              |
| 120    | ő      | 2434,423            | 490    | 340    | 2453,55             |
| 130    | ő      | 2444 275            | 480    | 340    | 2452.5              |
| 140    | 0      | 2444.8              | 470    | 340    | 2451.425            |
| 150    | 0      | 2445.6              | 460    | 340    | 2450.075            |
| 160    | 0      | 2445.525            | 450    | 340    | 2449.825            |
| 170    | 0      | 2446.4              | 440    | 340    | 2448.925            |
| 180    | 0      | 2447.075            | 430    | 340    | 2450.175            |
| 190    | 0      | 2447.475            | 420    | 340    | 2450.45             |
| 200    | 0      | 2447,65             | 410    | 340    | 2450,25             |
| 210    | 0      | 2447,7              | 400    | 340    | 2450,4              |
| 220    | 0      | 2447,8              | 390    | 340    | 2449,925            |
| 230    | 0      | 2448,25             | 380    | 340    | 2449,85             |
| 240    | 0      | 2448                | 370    | 340    | 2450,325            |
| 250    | 0      | 2448,275            | 360    | 340    | 2450,125            |
| 260    | 0      | 2448,875            | 350    | 340    | 2449,325            |
| 270    | 0      | 2448,65             | 340    | 340    | 2449,6              |
| 280    | 0      | 2447,7              | 330    | 340    | 2453,5              |
| 290    | 0      | 2448,525            | 320    | 340    | 2453,3              |
| 300    | 0      | 2453,875            | 310    | 340    | 2454,15             |
| 310    | 0      | 2452,45             | 300    | 340    | 2450,15             |
| 320    | 0      | 2452,675            | 290    | 340    | 2448,55             |
| 330    | 0      | 2452,55             | 280    | 340    | 2449,025            |
| 340    | 0      | 2448,325            | 270    | 340    | 2450,275            |
| 350    | 0      | 2448,5              | 260    | 340    | 2450,25             |
| 360    | 0      | 2448,75             | 250    | 340    | 2449,975            |
| 370    | 0      | 2448,85             | 240    | 340    | 2449,9              |
| 380    | 0      | 2449,025            | 230    | 340    | 2449,95             |
| 390    | 0      | 2449,325            | 220    | 340    | 2449,925            |
| 400    | 0      | 2449,05             | 210    | 340    | 2449,925            |
| 410    | 0      | 2449,125            | 100    | 340    | 2449,5              |
| 420    | 0      | 2449,3              | 190    | 340    | 2449,425            |
| 440    | 0      | 2449,625            | 170    | 340    | 2449,0              |
| 450    | 0      | 2449 825            | 160    | 340    | 2449.4              |
| 460    | 0      | 2450 775            | 150    | 340    | 2448.95             |
| 470    | 0      | 2451.25             | 140    | 340    | 2448.25             |
| 480    | 0      | 2451.325            | 130    | 340    | 2448.1              |
| 490    | 0      | 2451.375            | 120    | 340    | 2448.475            |
| 500    | 0      | 2451,075            | 110    | 340    | 2448,7              |
| 510    | 0      | 2450,8              | 100    | 340    | 2457,05             |
| 520    | 0      | 2449,9              | 90     | 340    | 2461,825            |
| 530    | 0      | 2459,6              | 80     | 340    | 2467,9              |
| 540    | 0      | 2454,6              | 70     | 340    | 2467,7              |
| 550    | 0      | 2454,3              | 60     | 340    | 2467,225            |
| 560    | 0      | 2454,875            | 50     | 340    | 2467,3              |
| 570    | 0      | 2475,125            | 40     | 340    | 2458,975            |
| 580    | 0      | 2450,875            | 30     | 340    | 2455,525            |
| 590    | 0      | 2450,525            | 20     | 340    | 2457,775            |
| 600    | 0      | 2450,675            | 10     | 340    | 2460,8              |
| 610    | 0      | 2450,625            | 0      | 340    | 2465,55             |
| 620    | 0      | 2450,475            |        |        |                     |

| SC_D   | _3_8_  | P                   |        |        |                     |        |        |                     |
|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|
| X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] |
| -10    | 0      | 2605                | 620    | 340    | 2631,75             | 0      | -340   | 2776,625            |
| 0      | 0      | 2394,575            | 610    | 340    | 2612,95             | 10     | -340   | 2603,325            |
| 10     | 0      | 2459,525            | 600    | 340    | 2468,3              | 20     | -340   | 2786,45             |
| 20     | 0      | 2456,175            | 590    | 340    | 2464                | 30     | -340   | 2457,35             |
| 30     | 0      | 2453,925            | 580    | 340    | 2459,825            | 40     | -340   | 2453,125            |
| 40     | 0      | 2457,475            | 5/0    | 340    | 2455,375            | 50     | -340   | 2449,425            |
| 50     | 0      | 2400,020            | 550    | 340    | 2452,275            | 70     | -340   | 2451,3              |
| 70     | 0      | 2404,373            | 540    | 340    | 2451,775            | 80     | -340   | 2457,4              |
| 80     | ő      | 2465.425            | 530    | 340    | 2451.575            | 90     | -340   | 2462.975            |
| 90     | 0      | 2465.525            | 520    | 340    | 2453.25             | 100    | -340   | 2462.85             |
| 100    | 0      | 2465.25             | 510    | 340    | 2456.2              | 110    | -340   | 2463.3              |
| 110    | 0      | 2465,625            | 500    | 340    | 2455,55             | 120    | -340   | 2463,675            |
| 120    | 0      | 2465,925            | 490    | 340    | 2456,475            | 130    | -340   | 2463,9              |
| 130    | 0      | 2466,275            | 480    | 340    | 2452,175            | 140    | -340   | 2457,625            |
| 140    | 0      | 2466,1              | 470    | 340    | 2452,1              | 150    | -340   | 2451,2              |
| 150    | 0      | 2466,875            | 460    | 340    | 2452,525            | 160    | -340   | 2445,6              |
| 160    | 0      | 2467,05             | 450    | 340    | 2451,9              | 170    | -340   | 2443,25             |
| 170    | 0      | 2466,6              | 440    | 340    | 2451,85             | 180    | -340   | 2443,7              |
| 180    | 0      | 2466,925            | 430    | 340    | 2452,25             | 190    | -340   | 2444,6              |
| 190    | 0      | 2463,375            | 420    | 340    | 2451,7              | 200    | -340   | 2445,15             |
| 200    | 0      | 2458,3              | 410    | 340    | 2451,975            | 210    | -340   | 2445,225            |
| 210    | 0      | 2453,15             | 400    | 340    | 2452,85             | 220    | -340   | 2445,425            |
| 220    | 0      | 2447,05             | 390    | 340    | 2452,25             | 230    | -340   | 2445,625            |
| 230    | 0      | 2439,175            | 380    | 340    | 2451,975            | 240    | -340   | 2445,8              |
| 240    | 0      | 2438,4              | 3/0    | 340    | 2451,6              | 250    | -340   | 2445,675            |
| 250    | 0      | 2439,075            | 360    | 340    | 2401                | 200    | -340   | 2440,075            |
| 200    | 0      | 2430,33             | 340    | 340    | 2430,073            | 280    | -340   | 2440,2              |
| 280    | 0      | 2436,15             | 330    | 340    | 2431,2              | 290    | -340   | 2446.425            |
| 290    | ő      | 2442.1              | 320    | 340    | 2448 725            | 300    | -340   | 2446.35             |
| 300    | ō      | 2440,475            | 310    | 340    | 2448.675            | 310    | -340   | 2446.1              |
| 310    | 0      | 2451,175            | 300    | 340    | 2446,125            | 320    | -340   | 2446,35             |
| 320    | 0      | 2447                | 290    | 340    | 2445,925            | 330    | -340   | 2450,425            |
| 330    | 0      | 2447,075            | 280    | 340    | 2446,225            | 340    | -340   | 2449,9              |
| 340    | 0      | 2448,075            | 270    | 340    | 2441,75             | 350    | -340   | 2450                |
| 350    | 0      | 2448,225            | 260    | 340    | 2440,85             | 360    | -340   | 2446,425            |
| 360    | 0      | 2448,875            | 250    | 340    | 2440,925            | 370    | -340   | 2445,1              |
| 370    | 0      | 2448,95             | 240    | 340    | 2440,875            | 380    | -340   | 2446,65             |
| 380    | 0      | 2449,475            | 230    | 340    | 2440,05             | 390    | -340   | 2447,35             |
| 390    | 0      | 2449,725            | 220    | 340    | 2444,8              | 400    | -340   | 2447,325            |
| 400    | 0      | 2450,375            | 210    | 340    | 2451,95             | 410    | -340   | 2448,2              |
| 410    | 0      | 2450,3              | 200    | 340    | 2459,375            | 420    | -340   | 2447,925            |
| 420    | 0      | 2450,4              | 190    | 340    | 2466,6              | 430    | -340   | 2447,725            |
| 430    | 0      | 2450,25             | 180    | 340    | 2468,725            | 440    | -340   | 2448,1              |
| 440    | 0      | 2450,625            | 170    | 340    | 2468,1              | 450    | -340   | 2448,45             |
| 450    | 0      | 2450,975            | 160    | 340    | 2468,5              | 460    | -340   | 2448,375            |
| 460    | 0      | 2450,7              | 150    | 340    | 2468,825            | 4/0    | -340   | 2449,025            |
| 470    | 0      | 2450,825            | 120    | 340    | 2408,423            | 480    | -340   | 2449,025            |
| 400    | 0      | 2430,873            | 120    | 340    | 2407,023            | 500    | -340   | 2446,03             |
| 500    | 0      | 2430,93             | 110    | 340    | 2400,2              | 510    | -340   | 2446,75             |
| 510    | ŏ      | 2454.95             | 100    | 340    | 2467 825            | 520    | -340   | 2448.7              |
| 520    | ŏ      | 2455.75             | 90     | 340    | 2467.45             | 530    | -340   | 2448.9              |
| 530    | õ      | 2452.475            | 80     | 340    | 2467.425            | 540    | -340   | 2449.05             |
| 540    | 0      | 2450.55             | 70     | 340    | 2467,125            | 550    | -340   | 2449,15             |
| 550    | 0      | 2450,425            | 60     | 340    | 2467,35             | 560    | -340   | 2480,25             |
| 560    | 0      | 2450,7              | 50     | 340    | 2467,3              | 570    | -340   | 2452,775            |
| 570    | 0      | 2451,1              | 40     | 340    | 2467,525            | 580    | -340   | 2452,775            |
| 580    | 0      | 2454,8              | 30     | 340    | 2461,65             | 590    | -340   | 2453,875            |
| 590    | 0      | 2459,95             | 20     | 340    | 2456,5              | 600    | -340   | 2448,45             |
| 600    | 0      | 2464,575            | 10     | 340    | 2458,475            | 610    | -340   | 2447,625            |
| 610    | 0      | 2479,425            | 0      | 340    | 2462,375            | 620    | -340   | 2447,9              |
| 620    | 0      | 2608,775            |        |        |                     |        |        |                     |

Tabell V14 og V15. Målinger av sandlagets høyde ved akkumulasjonsforsøk.

| SC_D_  | _3_24  | _N                  |        |        |                     |        |        |                     |
|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|
| X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] |
| -10    | 0      | 2589,225            | 620    | 340    | 2451                | 0      | -340   | 2777,5              |
| 0      | 0      | 2846,425            | 610    | 340    | 2451,15             | 10     | -340   | 2777,325            |
| 10     | 0      | 2461,45             | 600    | 340    | 2451,075            | 20     | -340   | 2588,975            |
| 20     | 0      | 2460,45             | 590    | 340    | 2450,5              | 30     | -340   | 2816,825            |
| 30     | 0      | 2465,2              | 580    | 340    | 2453,65             | 40     | -340   | 2460,05             |
| 40     | 0      | 2464,575            | 5/0    | 340    | 2453,3              | 50     | -340   | 2456,375            |
| 50     | 0      | 2400,3              | 500    | 340    | 2451,35             | 70     | -340   | 2400,020            |
| 70     | 0      | 2465 125            | 540    | 340    | 2450,4              | 80     | -340   | 2402,5              |
| 80     | ő      | 2465.2              | 530    | 340    | 2450.45             | 90     | -340   | 2462.625            |
| 90     | 0      | 2465.575            | 520    | 340    | 2449,925            | 100    | -340   | 2463.075            |
| 100    | 0      | 2465,925            | 510    | 340    | 2449,85             | 110    | -340   | 2463,7              |
| 110    | 0      | 2465,55             | 500    | 340    | 2450,025            | 120    | -340   | 2462,275            |
| 120    | 0      | 2466,975            | 490    | 340    | 2449,825            | 130    | -340   | 2455                |
| 130    | 0      | 2462,725            | 480    | 340    | 2449,75             | 140    | -340   | 2448,2              |
| 140    | 0      | 2455,375            | 470    | 340    | 2450,35             | 150    | -340   | 2440,65             |
| 150    | 0      | 2451,425            | 460    | 340    | 2449,9              | 160    | -340   | 2436,6              |
| 160    | 0      | 2443,9              | 450    | 340    | 2449,975            | 1/0    | -340   | 2438,125            |
| 1/0    | 0      | 2430,9              | 440    | 340    | 2449,65             | 180    | -340   | 2438,45             |
| 190    | 0      | 2437,425            | 430    | 340    | 2449,95             | 200    | -340   | 2439,4              |
| 200    | ő      | 2430,223            | 410    | 340    | 2443,473            | 210    | -340   | 2440,275            |
| 210    | ő      | 2438.85             | 400    | 340    | 2449.65             | 220    | -340   | 2441.475            |
| 220    | 0      | 2440.55             | 390    | 340    | 2450.125            | 230    | -340   | 2442.525            |
| 230    | 0      | 2440,25             | 380    | 340    | 2449,55             | 240    | -340   | 2442,5              |
| 240    | 0      | 2440,525            | 370    | 340    | 2449,3              | 250    | -340   | 2442,55             |
| 250    | 0      | 2440,925            | 360    | 340    | 2449,225            | 260    | -340   | 2443,15             |
| 260    | 0      | 2441,725            | 350    | 340    | 2450,225            | 270    | -340   | 2443,95             |
| 270    | 0      | 2441,25             | 340    | 340    | 2450,45             | 280    | -340   | 2445,025            |
| 280    | 0      | 2441,625            | 330    | 340    | 2448,95             | 290    | -340   | 2445,375            |
| 290    | 0      | 2443,4              | 320    | 340    | 2448,25             | 300    | -340   | 2445,475            |
| 300    | 0      | 2444,875            | 310    | 340    | 2447,375            | 310    | -340   | 2446,5              |
| 330    | 0      | 2447,3              | 200    | 340    | 2440,275            | 320    | -340   | 2447,525            |
| 330    | ő      | 2447.45             | 280    | 340    | 2445.95             | 340    | -340   | 2446.9              |
| 340    | 0      | 2447,975            | 270    | 340    | 2445,375            | 350    | -340   | 2447,125            |
| 350    | 0      | 2448,1              | 260    | 340    | 2445,275            | 360    | -340   | 2446,7              |
| 360    | 0      | 2447,975            | 250    | 340    | 2444,675            | 370    | -340   | 2446,75             |
| 370    | 0      | 2447,85             | 240    | 340    | 2444,55             | 380    | -340   | 2447,25             |
| 380    | 0      | 2447,775            | 230    | 340    | 2443,625            | 390    | -340   | 2447,45             |
| 390    | 0      | 2448,35             | 220    | 340    | 2443,15             | 400    | -340   | 2447,45             |
| 400    | 0      | 2448,2              | 210    | 340    | 2442,3              | 410    | -340   | 2448,05             |
| 410    | 0      | 2447,9              | 200    | 340    | 2441,575            | 420    | -340   | 2447,575            |
| 420    | 0      | 2448,425            | 190    | 340    | 2440,2              | 430    | -340   | 2448,275            |
| 440    | 0      | 2449.05             | 170    | 340    | 2446.9              | 450    | -340   | 2447.775            |
| 450    | ő      | 2448,55             | 160    | 340    | 2453,175            | 460    | -340   | 2447,925            |
| 460    | Ő      | 2448,425            | 150    | 340    | 2459,225            | 470    | -340   | 2448,15             |
| 470    | 0      | 2448,275            | 140    | 340    | 2466,725            | 480    | -340   | 2448,15             |
| 480    | 0      | 2449,025            | 130    | 340    | 2468,4              | 490    | -340   | 2448,075            |
| 490    | 0      | 2448,525            | 120    | 340    | 2467,525            | 500    | -340   | 2448,45             |
| 500    | 0      | 2448,475            | 110    | 340    | 2467,725            | 510    | -340   | 2448,25             |
| 510    | 0      | 2448,5              | 100    | 340    | 2467,125            | 520    | -340   | 2448,775            |
| 520    | 0      | 2448,7              | 90     | 340    | 2467,225            | 530    | -340   | 2449,575            |
| 530    | 0      | 2448,5              | 80     | 340    | 2467,075            | 540    | -340   | 2448,775            |
| 540    | 0      | 2448,9              | 70     | 340    | 2405,25             | 550    | -340   | 2448,45             |
| 560    | 0      | 2449,9              | 50     | 340    | 2401,575            | 570    | -340   | 2448,95             |
| 570    | ō      | 2452.95             | 40     | 340    | 2586.35             | 580    | -340   | 2448.675            |
| 580    | 0      | 2452.875            | 30     | 340    | 2621.675            | 590    | -340   | 2448,825            |
| 590    | 0      | 2450,925            | 20     | 340    | 2781,5              | 600    | -340   | 2448,425            |
| 600    | 0      | 2449,825            | 10     | 340    | 2781,725            | 610    | -340   | 2451,3              |
| 610    | 0      | 2449,9              | 0      | 340    | 2781,75             | 620    | -340   | 2457,8              |
| 620    | 0      | 2449,425            |        |        |                     |        |        |                     |

| X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | Z <sub>M</sub> [mm] |
|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|
| -10    | 0      | 2589,7              | 620    | 340    | 2452,4              | 0      | -340   | 2588,9              |
| 0      | 0      | 2594,175            | 610    | 340    | 2451,725            | 10     | -340   | 2836,325            |
| 10     | 0      | 2462,2              | 600    | 340    | 2451,2              | 20     | -340   | 2457,8              |
| 20     | 0      | 2459,475            | 590    | 340    | 2451,55             | 30     | -340   | 2452,925            |
| 30     | 0      | 2455,775            | 580    | 340    | 2450,65             | 40     | -340   | 2450,65             |
| 40     | 0      | 2453,85             | 570    | 340    | 2451,575            | 50     | -340   | 2447,25             |
| 60     | 0      | 2452,45             | 550    | 340    | 2450,05             | 70     | -340   | 2444,925            |
| 70     | ő      | 2466.325            | 540    | 340    | 2452.8              | 80     | -340   | 2454.625            |
| 80     | 0      | 2465.3              | 530    | 340    | 2450.55             | 90     | -340   | 2462.65             |
| 90     | 0      | 2465                | 520    | 340    | 2450,775            | 100    | -340   | 2463,2              |
| 100    | 0      | 2465,375            | 510    | 340    | 2451,125            | 110    | -340   | 2463,575            |
| 110    | 0      | 2465,775            | 500    | 340    | 2451,025            | 120    | -340   | 2464,025            |
| 120    | 0      | 2466,1              | 490    | 340    | 2450,525            | 130    | -340   | 2464,1              |
| 130    | 0      | 2465,925            | 480    | 340    | 2450,5              | 140    | -340   | 2463,95             |
| 140    | 0      | 2466,75             | 470    | 340    | 2450,525            | 150    | -340   | 2464,05             |
| 150    | 0      | 2466,825            | 460    | 340    | 2449,725            | 160    | -340   | 2463,975            |
| 160    | 0      | 2466,75             | 450    | 340    | 2449,7              | 170    | -340   | 2464,55             |
| 170    | 0      | 2467,325            | 440    | 340    | 2450,075            | 180    | -340   | 2464,95             |
| 180    | 0      | 2467,425            | 430    | 340    | 2449,8              | 190    | -340   | 2464,55             |
| 190    | 0      | 2467,275            | 420    | 340    | 2450,05             | 200    | -340   | 2464,/5             |
| 200    | 0      | 2407,323            | 410    | 340    | 2449,95             | 220    | -340   | 2405,475            |
| 220    | 0      | 2407,323            | 300    | 340    | 2443,73             | 220    | -340   | 2403                |
| 230    | 0      | 2467,85             | 380    | 340    | 2445,0              | 240    | -340   | 2403,5              |
| 240    | ő      | 2468.525            | 370    | 340    | 2449.3              | 250    | -340   | 2465.625            |
| 250    | 0      | 2466.25             | 360    | 340    | 2449.05             | 260    | -340   | 2462.975            |
| 260    | 0      | 2459,95             | 350    | 340    | 2448,375            | 270    | -340   | 2456,9              |
| 270    | 0      | 2454,55             | 340    | 340    | 2447,75             | 280    | -340   | 2450,625            |
| 280    | 0      | 2448,3              | 330    | 340    | 2447,875            | 290    | -340   | 2444,2              |
| 290    | 0      | 2441,75             | 320    | 340    | 2448                | 300    | -340   | 2438                |
| 300    | 0      | 2438,75             | 310    | 340    | 2447,975            | 310    | -340   | 2433                |
| 310    | 0      | 2436,2              | 300    | 340    | 2437,2              | 320    | -340   | 2431,075            |
| 320    | 0      | 2435,75             | 290    | 340    | 2434,025            | 330    | -340   | 2428,125            |
| 330    | 0      | 2434,3              | 280    | 340    | 2435,25             | 340    | -340   | 2425,275            |
| 340    | 0      | 2446,275            | 270    | 340    | 2440,375            | 350    | -340   | 2425,25             |
| 350    | 0      | 2446,475            | 260    | 340    | 2438,925            | 360    | -340   | 2443,95             |
| 360    | 0      | 2444,925            | 250    | 340    | 2446,6              | 3/0    | -340   | 2443,1              |
| 3/0    | 0      | 2445,375            | 240    | 340    | 2452,325            | 380    | -340   | 2443,55             |
| 300    | 0      | 2443,5              | 230    | 340    | 2436,6              | 400    | -340   | 2444,475            |
| 400    | 0      | 2446.5              | 210    | 340    | 2469.8              | 410    | -340   | 2444,373            |
| 410    | ő      | 2446.55             | 200    | 340    | 2469.825            | 420    | -340   | 2445.325            |
| 420    | 0      | 2447.65             | 190    | 340    | 2470.175            | 430    | -340   | 2445.175            |
| 430    | 0      | 2447,525            | 180    | 340    | 2469,15             | 440    | -340   | 2445,65             |
| 440    | 0      | 2447,675            | 170    | 340    | 2469,2              | 450    | -340   | 2445,65             |
| 450    | 0      | 2447,875            | 160    | 340    | 2468,575            | 460    | -340   | 2445,25             |
| 460    | 0      | 2447,875            | 150    | 340    | 2468,275            | 470    | -340   | 2445,475            |
| 470    | 0      | 2448,125            | 140    | 340    | 2469,425            | 480    | -340   | 2445,925            |
| 480    | 0      | 2448,2              | 130    | 340    | 2468,725            | 490    | -340   | 2445,675            |
| 490    | 0      | 2448,275            | 120    | 340    | 2468,025            | 500    | -340   | 2446,075            |
| 500    | 0      | 2447,825            | 110    | 340    | 2468,35             | 510    | -340   | 2446                |
| 510    | 0      | 2448,2              | 100    | 340    | 2468,65             | 520    | -340   | 2445,825            |
| 520    | 0      | 2448,625            | 90     | 340    | 2468,2              | 530    | -340   | 2446,075            |
| 530    | 0      | 2448,675            | 80     | 340    | 2468,3              | 540    | -340   | 2446,275            |
| 540    | 0      | 2448,2              | /0     | 340    | 2467,575            | 550    | -340   | 2445,85             |
| 550    | 0      | 2446,575            | 50     | 340    | 2408,1              | 500    | -340   | 2440,15             |
| 570    | 0      | 2448,75             | 40     | 340    | 2400                | 520    | -340   | 2440,4              |
| 580    | 0      | 2451 55             | 30     | 340    | 2432,15             | 590    | -340   | 2440,775            |
| 590    | 0      | 2450.825            | 20     | 340    | 2451.95             | 600    | -340   | 2448.125            |
| 600    | ő      | 2449.625            | 10     | 340    | 2455.075            | 610    | -340   | 2447,475            |
| 610    | 0      | 2448.875            | 0      | 340    | 2459.2              | 620    | -340   | 2446.6              |
| 620    | 0      | 2449,15             |        |        |                     |        |        |                     |
|        |        |                     | -      |        |                     |        |        |                     |

Tabell V16 og V17. Målinger av sandlagets høyde ved akkumulasjonsforsøk.

| SC_D_ | 5_8_1  | N                   |        |        |                     | SC   |
|-------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|------|
| ([mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [r |
| -10   | 0      | 2603,05             | 620    | 340    | 2782,5              | 1.1  |
| 0     | 0      | 2810,525            | 610    | 340    | 2782,775            |      |
| 10    | 0      | 2460,875            | 600    | 340    | 2611,025            |      |
| 20    | 0      | 2459,45             | 590    | 340    | 2611,075            |      |
| 30    | 0      | 2464,5              | 580    | 340    | 2782,5              |      |
| 40    | 0      | 2463,825            | 5/0    | 340    | 2463,075            |      |
| 50    | 0      | 2400                | 560    | 340    | 2465,75             |      |
| 20    | 0      | 2404,373            | 550    | 340    | 2400,025            |      |
| 80    | 0      | 2465.975            | 530    | 340    | 2450,55             | 5    |
| 90    | ő      | 2463 525            | 520    | 340    | 2450 725            | 9    |
| 100   | 0      | 2455.875            | 510    | 340    | 2451.375            | 1    |
| 110   | 0      | 2448,875            | 500    | 340    | 2462,8              | 1    |
| 120   | 0      | 2442,75             | 490    | 340    | 2456,725            | 1    |
| 130   | 0      | 2442,675            | 480    | 340    | 2456,025            | 1    |
| 140   | 0      | 2443,675            | 470    | 340    | 2455,35             | 1    |
| 150   | 0      | 2445,5              | 460    | 340    | 2457,975            | 1    |
| 160   | 0      | 2445,6              | 450    | 340    | 2453,25             | 1    |
| 170   | 0      | 2446,175            | 440    | 340    | 2453,05             | 1    |
| 180   | 0      | 2446,15             | 430    | 340    | 2451,575            | 1    |
| 190   | 0      | 2451,275            | 420    | 340    | 2449,75             | 1    |
| 200   | 0      | 2450,925            | 410    | 340    | 2449,875            | 2    |
| 210   | 0      | 2450,275            | 400    | 340    | 2450,6              | 2    |
| 220   | 0      | 2480,8              | 390    | 340    | 2450,75             |      |
| 230   | 0      | 2440,323            | 370    | 340    | 2450,15             | 2    |
| 250   | 0      | 2443,3              | 360    | 340    | 2434,63             | 2    |
| 260   | ő      | 2450.35             | 350    | 340    | 2450.075            | 2    |
| 270   | 0      | 2451.8              | 340    | 340    | 2449.975            | 2    |
| 280   | 0      | 2451.275            | 330    | 340    | 2449.55             | 2    |
| 290   | 0      | 2450,4              | 320    | 340    | 2450,275            | 2    |
| 300   | 0      | 2452,175            | 310    | 340    | 2450,175            | 3    |
| 310   | 0      | 2451,725            | 300    | 340    | 2450,275            | 3    |
| 320   | 0      | 2451,85             | 290    | 340    | 2450,475            | 3    |
| 330   | 0      | 2447,025            | 280    | 340    | 2495,075            | 3    |
| 340   | 0      | 2447,225            | 270    | 340    | 2453,9              | 3    |
| 350   | 0      | 2447,5              | 260    | 340    | 2454,1              | 3    |
| 360   | 0      | 2448,75             | 250    | 340    | 2457,4              | 3    |
| 370   | 0      | 2451,875            | 240    | 340    | 2448,075            | 3    |
| 380   | 0      | 2453,525            | 230    | 340    | 2448,8              | 3    |
| 400   | 0      | 2453,15             | 210    | 340    | 2449,05             | 3    |
| 410   | ŏ      | 2432,0              | 200    | 340    | 2450 325            | 4    |
| 420   | ŏ      | 2452.25             | 190    | 340    | 2450.4              | 4    |
| 430   | ō      | 2467.875            | 180    | 340    | 2449.95             | 4    |
| 440   | 0      | 2447,975            | 170    | 340    | 2458,925            | 4    |
| 450   | 0      | 2447,825            | 160    | 340    | 2453,4              | 4    |
| 460   | 0      | 2448,625            | 150    | 340    | 2453,375            | 4    |
| 470   | 0      | 2451,6              | 140    | 340    | 2448,225            | 4    |
| 480   | 0      | 2453,375            | 130    | 340    | 2447,75             | 4    |
| 490   | 0      | 2454,175            | 120    | 340    | 2448,25             | 4    |
| 500   | 0      | 2453,15             | 110    | 340    | 2448,775            | 5    |
| 510   | 0      | 2454,875            | 100    | 340    | 2448,675            | 5    |
| 520   | 0      | 2454,65             | 90     | 340    | 2448,65             | 5    |
| 530   | 0      | 2454,925            | 80     | 340    | 2448,325            | 5    |
| 540   | 0      | 2451,625            | 70     | 340    | 2448,325            | 5    |
| 550   | 0      | 2450,6              | 50     | 340    | 2448,7              | 5    |
| 570   | 0      | 2450,35             | 40     | 340    | 2454,375            | 5    |
| 580   | 0      | 2450,375            | 30     | 340    | 2401,1              |      |
| 590   | 0      | 2457.95             | 20     | 340    | 2467 575            |      |
| 600   | 0      | 2463.45             | 10     | 340    | 2466.375            | 6    |
| 510   | 0      | 2474.65             | 0      | 340    | 2459.4              | 6    |
| 620   | 0      | 2610                |        |        |                     | 6    |
|       |        |                     |        |        |                     | 0    |

| -      |        |                     |        |        |                     |
|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|
| X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | Z <sub>M</sub> [mm] |
| -10    | 0      | 2605,05             | 620    | 340    | 2782,65             |
| 10     | ŏ      | 2458,9              | 600    | 340    | 2612,9              |
| 20     | 0      | 2456,275            | 590    | 340    | 2813,45             |
| 30     | 0      | 2454,35             | 580    | 340    | 2467,25             |
| 40     | 0      | 2456,225            | 570    | 340    | 2465,35             |
| 50     | 0      | 2463,575            | 560    | 340    | 2461,35             |
| 60     | 0      | 2465,275            | 550    | 340    | 2457,65             |
| 70     | 0      | 2465,35             | 540    | 340    | 2454,425            |
| 80     | 0      | 2465,475            | 530    | 340    | 2452,9              |
| 100    | ő      | 2404,9              | 520    | 340    | 2451,425            |
| 110    | ŏ      | 2466.275            | 500    | 340    | 2450,35             |
| 120    | 0      | 2465.9              | 490    | 340    | 2451.7              |
| 130    | 0      | 2466,35             | 480    | 340    | 2458,15             |
| 140    | 0      | 2466,7              | 470    | 340    | 2455,7              |
| 150    | 0      | 2467,45             | 460    | 340    | 2455,775            |
| 160    | 0      | 2462,05             | 450    | 340    | 2472,925            |
| 170    | 0      | 2455,425            | 440    | 340    | 2452,675            |
| 180    | 0      | 2488,05             | 430    | 340    | 2451,825            |
| 190    | 0      | 2450,675            | 420    | 340    | 2451,8              |
| 200    | 0      | 2446,9              | 410    | 340    | 2450,975            |
| 220    | 0      | 2400,120            | 300    | 340    | 2450,225            |
| 230    | 0      | 2443,023            | 380    | 340    | 2443,33             |
| 240    | 0      | 2448,875            | 370    | 340    | 2455.75             |
| 250    | 0      | 2449,45             | 360    | 340    | 2455.6              |
| 260    | 0      | 2449                | 350    | 340    | 2451,875            |
| 270    | 0      | 2449,3              | 340    | 340    | 2451,8              |
| 280    | 0      | 2449,65             | 330    | 340    | 2452,125            |
| 290    | 0      | 2454,3              | 320    | 340    | 2451,725            |
| 300    | 0      | 2453,775            | 310    | 340    | 2451,8              |
| 310    | 0      | 2453,225            | 300    | 340    | 2451,45             |
| 320    | 0      | 2451,675            | 290    | 340    | 2451,3              |
| 330    | 0      | 2446,820            | 280    | 340    | 2449,875            |
| 350    | ő      | 2449,123            | 260    | 340    | 2455.3              |
| 360    | 0      | 2449.95             | 250    | 340    | 2454.8              |
| 370    | 0      | 2449,7              | 240    | 340    | 2455,15             |
| 380    | 0      | 2450,225            | 230    | 340    | 2462,85             |
| 390    | 0      | 2495,975            | 220    | 340    | 2451,125            |
| 400    | 0      | 2454,025            | 210    | 340    | 2450,575            |
| 410    | 0      | 2453,775            | 200    | 340    | 2450,35             |
| 420    | 0      | 2455,5              | 190    | 340    | 2450,05             |
| 430    | 0      | 2450,175            | 180    | 340    | 2449,525            |
| 440    | 0      | 2449,475            | 1/0    | 340    | 2448,975            |
| 450    | 0      | 2449,0              | 150    | 340    | 2451,35             |
| 470    | 0      | 2443,73             | 140    | 340    | 2458.675            |
| 480    | 0      | 2450.125            | 130    | 340    | 2474.025            |
| 490    | 0      | 2450.6              | 120    | 340    | 2466.075            |
| 500    | 0      | 2469,25             | 110    | 340    | 2469,075            |
| 510    | 0      | 2454,6              | 100    | 340    | 2468,725            |
| 520    | 0      | 2455,125            | 90     | 340    | 2468,375            |
| 530    | 0      | 2458,05             | 80     | 340    | 2468,65             |
| 540    | 0      | 2451,375            | 70     | 340    | 2468,225            |
| 550    | 0      | 2450,375            | 60     | 340    | 2467,525            |
| 560    | 0      | 2450,25             | 50     | 340    | 2467,625            |
| 5/0    | 0      | 2451,1              | 40     | 340    | 2467,375            |
| 580    | 0      | 2454,4              | 30     | 340    | 2467,625            |
| 590    | 0      | 2459                | 10     | 340    | 2407,975            |
| 610    | 0      | 2403,75             | 0      | 340    | 2400,75             |
| 0.0    |        | 6.10.1.1.1          |        |        | 2407.0              |

| SC_D   | 5_24   | _N                  |        |        |                     |        |        |                     |
|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|
| X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] |
| -10    | 0      | 2589,675            | 620    | 340    | 2460,75             | 0      | -340   | 2777,625            |
| 0      | 0      | 2464,575            | 610    | 340    | 2459,225            | 10     | -340   | 2589,2              |
| 10     | 0      | 2461,65             | 600    | 340    | 2452,775            | 20     | -340   | 2786,25             |
| 20     | 0      | 2464,95             | 590    | 340    | 2451,1              | 30     | -340   | 2460,05             |
| 40     | 0      | 2400,2              | 570    | 340    | 2451,05             | 40     | -340   | 2450,725            |
| 50     | 0      | 2404,95             | 560    | 340    | 2451,2              | 60     | -340   | 2456,35             |
| 60     | ő      | 2465.1              | 550    | 340    | 2451,825            | 70     | -340   | 2463,025            |
| 70     | ō      | 2465.775            | 540    | 340    | 2451.375            | 80     | -340   | 2463.25             |
| 80     | 0      | 2465,825            | 530    | 340    | 2451,675            | 90     | -340   | 2463,625            |
| 90     | 0      | 2466                | 520    | 340    | 2452,125            | 100    | -340   | 2463,625            |
| 100    | 0      | 2465,925            | 510    | 340    | 2454,675            | 110    | -340   | 2463,8              |
| 110    | 0      | 2467,125            | 500    | 340    | 2453,025            | 120    | -340   | 2461,725            |
| 120    | 0      | 2459,65             | 490    | 340    | 2450,45             | 130    | -340   | 2455,4              |
| 130    | 0      | 2453,25             | 480    | 340    | 2450,9              | 140    | -340   | 2452,775            |
| 140    | 0      | 2445,775            | 470    | 340    | 2450,475            | 150    | -340   | 2446,8              |
| 160    | 0      | 2439,275            | 460    | 340    | 2449,75             | 170    | -340   | 2439,825            |
| 170    | 0      | 2431,33             | 440    | 340    | 2450,45             | 180    | -340   | 2433,023            |
| 180    | ő      | 2420.375            | 430    | 340    | 2450.05             | 190    | -340   | 2433.2              |
| 190    | ō      | 2427,975            | 420    | 340    | 2450,325            | 200    | -340   | 2433.2              |
| 200    | 0      | 2451,25             | 410    | 340    | 2450                | 210    | -340   | 2433,1              |
| 210    | 0      | 2450,925            | 400    | 340    | 2449,975            | 220    | -340   | 2432,525            |
| 220    | 0      | 2446,775            | 390    | 340    | 2451,6              | 230    | -340   | 2436,125            |
| 230    | 0      | 2446,875            | 380    | 340    | 2450,4              | 240    | -340   | 2448,8              |
| 240    | 0      | 2446,325            | 370    | 340    | 2450,5              | 250    | -340   | 2449,05             |
| 250    | 0      | 2446,875            | 360    | 340    | 2449,875            | 260    | -340   | 2448,775            |
| 260    | 0      | 2446,85             | 350    | 340    | 2450,1              | 270    | -340   | 2484,15             |
| 2/0    | 0      | 2447,725            | 340    | 340    | 2450,025            | 280    | -340   | 2445,225            |
| 200    | 0      | 2443,7              | 320    | 340    | 2430,323            | 300    | -340   | 2445,175            |
| 300    | 0      | 2448.075            | 310    | 340    | 2449.45             | 310    | -340   | 2445.675            |
| 310    | 0      | 2448,475            | 300    | 340    | 2449,675            | 320    | -340   | 2446,4              |
| 320    | 0      | 2448,2              | 290    | 340    | 2450,35             | 330    | -340   | 2446,3              |
| 330    | 0      | 2448,5              | 280    | 340    | 2450,15             | 340    | -340   | 2446,9              |
| 340    | 0      | 2447,85             | 270    | 340    | 2450,025            | 350    | -340   | 2447,15             |
| 350    | 0      | 2447,975            | 260    | 340    | 2448,975            | 360    | -340   | 2446,725            |
| 360    | 0      | 2448,25             | 250    | 340    | 2448,625            | 370    | -340   | 2446,95             |
| 370    | 0      | 2448,4              | 240    | 340    | 2448,325            | 380    | -340   | 2446,925            |
| 380    | 0      | 2449,5              | 230    | 340    | 2448,020            | 390    | -340   | 2446,725            |
| 400    | 0      | 2430,45             | 210    | 340    | 2453.05             | 410    | -340   | 2446 725            |
| 410    | 0      | 2449.275            | 200    | 340    | 2452.875            | 420    | -340   | 2447.025            |
| 420    | 0      | 2448,75             | 190    | 340    | 2452,575            | 430    | -340   | 2447,4              |
| 430    | 0      | 2449,325            | 180    | 340    | 2433,575            | 440    | -340   | 2447,275            |
| 440    | 0      | 2449,65             | 170    | 340    | 2433,35             | 450    | -340   | 2448,3              |
| 450    | 0      | 2448,575            | 160    | 340    | 2434,3              | 460    | -340   | 2447,65             |
| 460    | 0      | 2449,575            | 150    | 340    | 2434,05             | 470    | -340   | 2447,8              |
| 470    | 0      | 2448,9              | 140    | 340    | 2435,05             | 480    | -340   | 2447,675            |
| 480    | 0      | 2449,525            | 130    | 340    | 2441,425            | 490    | -340   | 2447,4              |
| 500    | 0      | 2449.875            | 110    | 340    | 2455.4              | 510    | -340   | 2447.575            |
| 510    | 0      | 2451.9              | 100    | 340    | 2462.25             | 520    | -340   | 2447,65             |
| 520    | 0      | 2453,025            | 90     | 340    | 2468,6              | 530    | -340   | 2448,025            |
| 530    | 0      | 2451,75             | 80     | 340    | 2468,2              | 540    | -340   | 2447,65             |
| 540    | 0      | 2450,7              | 70     | 340    | 2467,8              | 550    | -340   | 2448,45             |
| 550    | 0      | 2450,15             | 60     | 340    | 2467,7              | 560    | -340   | 2448,3              |
| 560    | 0      | 2450,275            | 50     | 340    | 2467,475            | 570    | -340   | 2448,55             |
| 570    | 0      | 2450,825            | 40     | 340    | 2467,075            | 580    | -340   | 2449,7              |
| 580    | 0      | 2450,75             | 30     | 340    | 2466,775            | 590    | -340   | 2450,375            |
| 590    | 0      | 2450                | 20     | 340    | 2400,725            | 600    | -340   | 2449,075            |
| 610    | 0      | 2450,25             | 0      | 340    | 2465,675            | 620    | -340   | 2440,0              |
| 620    | õ      | 2452.625            | - "    | 540    | 2400,023            | 020    | 540    | 2443,273            |
|        |        |                     | •      |        |                     |        |        |                     |

| Tabell V18 og V19. Målinger av sandlage | ets høyde ved akkumulasjonsforsøk. |  |
|---|------------------------------------|--|
|   | SC_D_5_24_P                        |  |

|   | JC_D_  |        | , ·                 |        |        |                     |        |        |                     |
|---|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|
|   | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] | X [mm] | Y [mm] | z <sub>M</sub> [mm] |
|   | -10    | 0      | 2589,6              | 620    | 340    | 2451,1              | 0      | -340   | 2777,4              |
| J | 0      | 0      | 2786,3              | 610    | 340    | 2451,9              | 10     | -340   | 2776,625            |
|   | 10     | 0      | 2460,625            | 600    | 340    | 2452,425            | 20     | -340   | 2587,075            |
|   | 20     | 0      | 2456,875            | 590    | 340    | 2452,775            | 30     | -340   | 2808,325            |
|   | 30     | 0      | 2453,8              | 580    | 340    | 2451,625            | 40     | -340   | 2457,925            |
|   | 40     | 0      | 2451,425            | 570    | 340    | 2450,5              | 50     | -340   | 2453,125            |
|   | 50     | 0      | 2454,275            | 560    | 340    | 2451,225            | 60     | -340   | 2448,95             |
|   | 60     | 0      | 2462,05             | 550    | 340    | 2451,225            | 70     | -340   | 2445,675            |
|   | 70     | 0      | 2465                | 540    | 340    | 2450,45             | 80     | -340   | 2447,675            |
|   | 80     | 0      | 2465,75             | 530    | 340    | 2450,725            | 90     | -340   | 2454,925            |
|   | 90     | 0      | 2465,225            | 520    | 340    | 2450,35             | 100    | -340   | 2462                |
|   | 100    | 0      | 2400,8              | 510    | 340    | 2449,875            | 110    | -340   | 2403,475            |
|   | 110    | 0      | 2400,175            | 400    | 340    | 2450,6              | 120    | -340   | 2403,5              |
|   | 120    |        | 2405,95             | 490    | 240    | 2450,125            | 140    | -340   | 2403,323            |
|   | 140    | 0      | 2400,15             | 480    | 240    | 2450,625            | 150    | -340   | 2403,375            |
|   | 150    | 0      | 2400,475            | 4/0    | 340    | 2452,25             | 150    | -340   | 2403,45             |
|   | 160    | 0      | 2400,3              | 400    | 240    | 2451,15             | 170    | -340   | 2404,0              |
|   | 170    | 0      | 2400,025            | 440    | 340    | 2451,35             | 180    | -340   | 2403,873            |
|   | 180    | 0      | 2467,375            | 430    | 340    | 2447.075            | 190    | -340   | 2464.5              |
|   | 190    | 0      | 2466 925            | 420    | 340    | 2446,975            | 200    | -340   | 2464 975            |
|   | 200    | ő      | 2467 675            | 410    | 340    | 2446 225            | 210    | -340   | 2465 225            |
|   | 210    | 0      | 2467 525            | 400    | 340    | 2446 475            | 220    | -340   | 2465                |
|   | 220    | ő      | 2468 175            | 390    | 340    | 2443 475            | 230    | -340   | 2465.35             |
|   | 230    | ő      | 2467.65             | 380    | 340    | 2443.1              | 240    | -340   | 2464.875            |
|   | 240    | 0      | 2467.9              | 370    | 340    | 2442.825            | 250    | -340   | 2465.725            |
|   | 250    | ő      | 2468.2              | 360    | 340    | 2442.025            | 260    | -340   | 2465.95             |
|   | 260    | 0      | 2468.325            | 350    | 340    | 2436.625            | 270    | -340   | 2460.975            |
|   | 270    | 0      | 2468.075            | 340    | 340    | 2436.675            | 280    | -340   | 2453.55             |
|   | 280    | 0      | 2468,9              | 330    | 340    | 2440,625            | 290    | -340   | 2447,425            |
|   | 290    | 0      | 2461,85             | 320    | 340    | 2441,675            | 300    | -340   | 2441,7              |
|   | 300    | 0      | 2454,75             | 310    | 340    | 2448,375            | 310    | -340   | 2467,225            |
|   | 310    | 0      | 2454,7              | 300    | 340    | 2453,7              | 320    | -340   | 2435,425            |
|   | 320    | 0      | 2458,075            | 290    | 340    | 2458,8              | 330    | -340   | 2431,675            |
|   | 330    | 0      | 2449,525            | 280    | 340    | 2465,45             | 340    | -340   | 2434,325            |
|   | 340    | 0      | 2446,7              | 270    | 340    | 2470,7              | 350    | -340   | 2434,25             |
|   | 350    | 0      | 2446,575            | 260    | 340    | 2469,175            | 360    | -340   | 2437,65             |
|   | 360    | 0      | 2451,4              | 250    | 340    | 2469,825            | 370    | -340   | 2439,875            |
|   | 370    | 0      | 2448,375            | 240    | 340    | 2468,825            | 380    | -340   | 2441,7              |
|   | 380    | 0      | 2441,35             | 230    | 340    | 2469,05             | 390    | -340   | 2441,85             |
|   | 390    | 0      | 2435,7              | 220    | 340    | 2468,65             | 400    | -340   | 2442,4              |
|   | 400    | 0      | 2435,65             | 210    | 340    | 2468,875            | 410    | -340   | 2443,5              |
|   | 410    | 0      | 2436,375            | 200    | 340    | 2468,375            | 420    | -340   | 2455,15             |
|   | 420    | 0      | 2435,825            | 190    | 340    | 2468,25             | 430    | -340   | 2446,85             |
|   | 430    | 0      | 2444,175            | 180    | 340    | 2468,15             | 440    | -340   | 2447,2              |
|   | 440    | 0      | 2440,25             | 170    | 340    | 2468,925            | 450    | -340   | 2449,375            |
|   | 450    | 0      | 2440,4              | 160    | 340    | 2468,5              | 460    | -340   | 2446,025            |
|   | 460    | 0      | 2440,25             | 150    | 340    | 2467,95             | 4/0    | -340   | 2446,05             |
|   | 4/0    | 0      | 2440,575            | 140    | 340    | 2468,425            | 480    | -340   | 2446,1              |
|   | 480    | 0      | 2447,725            | 130    | 340    | 2407,85             | 490    | -340   | 2440,275            |
|   | 490    | 0      | 2440,35             | 110    | 240    | 2407,375            | 500    | -340   | 2447,15             |
|   | 510    | 0      | 2447,3              | 100    | 340    | 2404,00             | 520    | -340   | 2440,0              |
|   | 520    | 0      | 2447,6              | 00     | 340    | 2437,375            | 520    | -340   | 2440,975            |
|   | 520    | 0      | 2440,075            | 80     | 340    | 2445,7              | 540    | -340   | 2440,025            |
|   | 540    | 0      | 2446,525            | 70     | 340    | 2452 475            | 550    | -340   | 2449.025            |
|   | 550    | 0      | 2448.85             | 60     | 340    | 2455 975            | 560    | -340   | 2449 225            |
|   | 560    | 0      | 2440,05             | 50     | 340    | 2459.4              | 570    | -340   | 2448 225            |
|   | 570    | 0      | 2449.175            | 40     | 340    | 2464.025            | 580    | -340   | 2447.375            |
|   | 580    | ő      | 2449.625            | 30     | 340    | 2781.325            | 590    | -340   | 2447.45             |
| l | 590    | 0      | 2450.8              | 20     | 340    | 2591 625            | 600    | -340   | 2448 675            |
| ļ | 600    | 0      | 2450.9              | 10     | 340    | 2781.475            | 610    | -340   | 2454.275            |
| ļ | 610    | 0      | 2450.05             | 0      | 340    | 2781.65             | 620    | -340   | 2459.875            |
|   | 620    | 0      | 2450,125            |        |        |                     |        |        |                     |
| 2 |        |        |                     |        |        |                     |        | -      |                     |



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet Postboks 5003 NO-1432 Ås 67 23 00 00 www.nmbu.no