

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

Masteroppgave 2014
30 stp

Snøakkumulasjon på et flernivåtak med takutstikk ved bruk av skalamodellforsøk i vindtunnel

Snow Deposition on a Multilevel Roof Surface with a
Connecting Roof Projection by the Means of Scale
Model Experiments in a Wind Tunnel

Arnold Vinje Erichsen

Forord

Denne masteroppgaven er den avsluttende delen av masterprogrammet sivilingeniør i byggeteknikk og arkitektur og ble fullført ved Instituttet for matematiske realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), våren 2014.

Professor Thomas K. Thiis har vært min veileder i forbindelse med denne oppgaven og jeg ønsker å takke ham for masse ny lærdom, god rådgivning og muligheten til å bli med til Coimbra i Portugal, hvor jeg utførte feltarbeidet mitt i forbindelse med oppgaven.

Jeg ønsker å uttrykke min takknemlighet til Professor Almerindo Ferreira ved Universitetet i Coimbra som stilte opp fra første dag og ga meg godt selskap under oppholdet i Coimbra. Almerindo bidro i tillegg med erfaring og innsikt til utførelsen av forsøkene i vindtunnelen.

Jeg vil takke min medstudent og gode venn, Markus Molnar for godt selskap under oppholdet i Coimbra. Markus har i aller høyeste grad bidratt til ferdigstillingen av oppgaven min.

Takk til alle studiekameratene mine for godt samhold og gode diskusjoner under studieførløpet og spesielt dette siste semesteret.

Takk til familien min som har skrytt av meg og motivert meg helt siden jeg begynte skolegangen for mange år siden. Jeg vil ønske søsteren min, Anneli, lykke til videre med lærerstudiene.

Til slutt vil jeg takke kjæresten min, Siri, som blant annet har lest korrektur, gitt sine synspunkter og i ytterste grad hjulpet meg med utformingen av denne oppgaven.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Ås, mai 2014

Arnold Vinje Erichsen

Sammendrag

Snølaststandarden, NS-EN 1991-1-3:2003 beskriver hvordan snølasten forekommer på et flernivåtak uten helning og hvordan dimensjonering for snølasten foreligger. I snølaststandarden er ikke snølasten på den nedre takflaten beskrevet når takflaten er delvis eller fullstendig overdekket av et takutstikk.

Fastsettelsen av snøstandardens beskrivelse av snølasten på den nedre takflaten når takflaten er delvis eller helt overdekket av et takutstikk ble utført ved hjelp av erosjonsforsøk og depositionsforsøk i en vindtunnel med filtrert sand.

Ved depositionsforsøkene eroderte ca 30 % av sanden av den øvre takflaten når den nedre takflaten var i le for vinden og ca 60 % når den nedre takflaten var på lo side for vinden. På den nedre takflaten økte sandlaget med 0-7 % når vinden blåste av takflaten, mens sandlaget minket med 8-21 % når vinden blåste på takflaten. Innenfor drivlengden $l_s = 30$ cm på den nedre takflaten er formfaktoren, angitt av snølaststandarden, tilstrekkelig stor. Utenfor drivlengden l_s er erosjonen av sand i samtlige forsøk for liten til at formfaktoren fra snølaststandarden kan anses som bevart.

Videre ble det observert at sanden på den nedre takflaten organiserte seg som en sandtopp rett under kanten på takutstikket når vinden blåste av den nedre takflaten. Når vinden blåste på den nedre takflaten posisjonerte sandtoppen seg 2-3 cm innenfor kanten på takutstikket. Ut fra denne observasjonen ble en situasjon med uheldige værforhold i løpet av en vinter diskutert, hvor dannelsen av en «dobbel snøfonn» på den nedre takflaten kan føre til at den underliggende takkonstruksjonen blir overbelastet.

Abstract

Eurocode 1 part 1-3: General actions - Snow loads with the Norwegian national annex, NS-EN 1991-1-3:2003 describes the accumulation of a snow load upon a multilevel roof surface. Eurocode 1 part 1-3 also describes how to prevent damage from the snow load by the use of appropriate calculations. However, there is no description within the Eurocode that describes how to calculate a snow load on the lower roof surface if the roof surface is slightly, or completely covered, by a roof projection.

Erosion- and deposition experiments in a wind tunnel with sieved sand were performed to examine the Eurocode's description of a snow load on the lower roof surface and its sufficiency upon the addition of a roof projection as part of the construction.

The results from the deposition experiments showed approximately 30 % erosion of sand on the upper roof surface when the lower roof surface was on the leeward side. With the lower roof surface facing into the wind did an erosion of sand of approximately 60 % occur on the upper roof surface. Facing the same way, the lower roof surface experienced an erosion of sand of 8-21 %. With the lower roof surface on the leeward side of the wind, did a deposition of sand of 0-7 % occur on the lower roof surface. The multileveled roof surface drift length was $l_s = 30$ cm. Within this length, the snow load shape coefficient assigned by the Eurocode was proved sufficient. The snow load shape coefficient was not approved outside the drift length, l_s .

A sand profile was observed on the lower roof surface with its peak strictly beneath the roof projection edge, when the lower roof surface was on the leeward side of the wind. The same phenomenon was observed when the wind faced the other way, but with the sand profile peak positioned 2-3 cm slightly inside the vertical projection of the roof projection edge. This led to the discussion of a "worst case" scenario with bad weather conditions in the winter, where a double snow load could accumulate on the lower roof surface and lead to an overload situation on the construction of the roof.

Innhold

Forord	I
Sammendrag.....	II
Abstract.....	III
Figurliste	VII
Tabelliste.....	X
1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Problemstilling	1
1.3 Avgrensninger	1
2. Teori	2
2.1 Grunnleggende vindteori	2
2.1.1 Trykk	2
2.1.2 Atmosfærisk trykk.....	2
2.1.3 Geostrofisk vind.....	3
2.1.4 Grenselaget	3
2.2 Fluidodynamikk	4
2.2.1 Densitet og viskositet	5
2.2.2 Laminær og turbulent strømning.....	5
2.2.3 Separasjon.....	8
2.2.4 Separasjon av vind på flernivåtak	8
2.2.5 Endeeffekter som følge av sug.....	9
2.2.6 Fluidhastighetsmåling med Pitotrør	10
2.3 Snødriv.....	11
2.3.1 Kryp.....	12

Innhold

2.3.2	Saltasjon.....	12
2.3.3	Suspensjon/turbulent diffusjon	13
2.3.4	Avsetting og oppsamling av snø i vinden.....	14
2.3.5	Snødriv på takkonstruksjoner	14
2.3.6	Snøfonner på tak og under takutstikk.....	16
2.3.7	Snøkonsentrasjon og -fluks.....	20
2.3.8	Snølast på flernivåtak	21
2.3.9	Partikkeltyper til forsøk på snødriv på flernivåtak.....	22
3.	Metode og modell.....	24
3.1	Bakgrunn for forsøk	24
3.2	Karakterisering av vindtunnel.....	24
3.3	Utformingen av skalamodellen	26
3.4	Erosjonsforsøkene	28
3.5	Deposisjonsforsøkene.....	31
4.	Resultat	33
4.1	Karakterisering av vindtunnelen	33
4.2	Erosjonsforsøkene	37
4.2.1	RP_E_0_L.....	37
4.2.2	RP_E_22,5_L.....	39
4.2.3	RP_E_45_L.....	41
4.2.4	RP_E_0_W	43
4.2.5	RP_E_22,5_W.....	44
4.2.6	RP_E_45_W	47
4.2.7	Hovedtrekk ved erosjonsforsøkene	49
4.3	Deposisjonsforsøkene.....	51
4.3.1	RP_D_0_L	51
4.3.2	RP_D_22,5_L	53

Innhold

4.3.3	RP_D_45_L	55
4.3.4	RP_D_0_W	58
4.3.5	RP_D_22,5_W	60
4.3.6	RP_D_45_W	63
4.3.7	Hovedtrekk ved deposisjonforsøkene	66
5.	Diskusjon	69
5.1	Karakterisering av vindtunnelen	69
5.2	Erosjonsforsøkene	70
5.3	Deposisjonsforsøkene	70
5.4	Feilkilder	72
6.	Konklusjon	74
7.	Videre arbeid	75
8.	Litteraturliste	76
9.	Vedlegg	78

Figurliste

Figur 1: Dannelse av et fullt utviklet strømningsmønster (Morrison 2013).	6
Figur 2: Reynolds observasjoner med en farget og en gjennomsiktig væske i et gjennomsiktig rør (Morrison 2013).	6
Figur 3: Laminær (a) og turbulent (b) strømning i et sirkulært rør (Morrison 2013).....	7
Figur 4: Luftstrømmer på og rundt en bygning med flernivåtak (O'Rourke & Wood 1986).	8
Figur 5: Luftstrømmer på en skalamodell med flernivåtak (Tsuchiya et al. 2002).....	9
Figur 6: Isolinjer av trykkoefisienter på et vindutsatt, flatt tak (Prasad et al. 2009).....	10
Figur 7: Prinsipp for funksjon og bruk av et pitotrør (Johnson 1998).....	11
Figur 8: Fra venstre: Snødriv ved kryp, saltasjon og suspensjon og ved hvilke skjærhastigheter hver type er dominerende.	12
Figur 9: Luftstrømmer over et flernivåtak (O'Rourke & Wood 1986).....	15
Figur 10: Vindretninger aktuelle til å drive snø på tak med forskjellig bredde (O'Rourke & Wood 1986).....	16
Figur 11: De to oftest forekommende likevektsprofilene til snøfonner på trappetak (O'Rourke et al. 1985).....	17
Figur 12: Snødeposisjoner på den nedre takflaten på a) le og b) lo side for vinden på et flernivåtak (Tsuchiya et al. 2002).....	18
Figur 13: Snødybder på lo og le side av et T-formet, ikke-porøst snøgjerde med høyde 620 mm og bredde 1250 mm (Potac 2013, unpublished).....	19
Figur 14: Snødybder på lo- og le side av et forskjøvet T-formet, ikke-porøst snøgjerde med høyde 700 mm og bredde 2500 mm (Potac 2013, unpublished).....	20
Figur 15: Fonner på den nedre takflaten i le for vinden på en modell med et flernivåtak ved driv av silikasand, skumplast, sagmugg og snø (Xuanyi Zhou 2014, unpublished).	23
Figur 16: Forenklet oppsett av innløp, testområde og utløp i vindtunnelen fra a) siden og b) ovenfra.	25
Figur 17: Vindprofil fra vindtunnelen i LAI i forbindelse med forsøkene til Ferreira (2011). 25	
Figur 18: Skalamodellens dimensjoner i snitt.....	27
Figur 19: Skalamodellens indre konstruksjon.....	27
Figur 20: Bilder tatt etter forsøk med 225 mm takutstikk.	28

Figurliste

Figur 21: Bilde av et forsøk klar til igangsettelse.	29
Figur 22: Skilting ved 150 RPM under et forsøk.	30
Figur 23: Hastighetsmålinger over innløpets tverrsnitt i vindtunnelen.	34
Figur 24: Hastighetsmålinger over testområdet i vindtunnelen.	35
Figur 25: Vindhastigheten, v [m/s], i vindtunnelen ved økende turbinhastighet, w [RPM].	36
Figur 26: Bilde fra forsøk RP_E_0_L ved turbinhastighet 300 RPM. Vinden kommer inn mot modellen fra venstre.	38
Figur 27: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for RP_E_0_L.	38
Figur 28: Bilde fra forsøk RP_E_22,5_L ved turbinhastighet 300 RPM.	40
Figur 29: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for RP_E_22,5_L.	40
Figur 30: Bilde fra forsøk RP_E_45_L ved turbinhastighet 300 RPM.	42
Figur 31: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for forsøk RP_E_45_L.	42
Figur 32: Bilde fra forsøk RP_E_0_W ved turbinhastighet 300 RPM.	43
Figur 33: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for forsøk RP_E_0_W.	44
Figur 34: Bilde fra forsøk RP_E_22,5_W ved turbinhastighet 300 RPM.	45
Figur 36: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for forsøk RP_E_22,5_W.	46
Figur 36: Bilde fra forsøk RP_E_45_W ved turbinhastighet 300 RPM.	47
Figur 37: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for forsøk RP_E_45_W.	48
Figur 38: Samlede resultater av erosjonsforsøk i erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinje med den nedre takflaten på le side for vinden.	49
Figur 39: Samlede resultater av erosjonsforsøk i erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinje med den nedre takflaten på lo side for vinden.	50
Figur 40: Deposjonsdiagram for forsøk RP_D_0_L.	52
Figur 41: Bilder fra modellen fra a) venstre side, b) innunder takutstikket og c) bak modellen etter endt forsøk RP_D_22,5_L.	54
Figur 42: Deposjonsdiagrammene for a) den øvre og b) den nedre takflaten fra forsøk RP_D_22,5_L.	54
Figur 43: Bilder fra modellen fra a) venstre side, b) innunder takutstikket og c) bak modellen etter endt forsøk RP_D_45_L.	56

Figurliste

<i>Figur 44: Deposjonsdiagrammene for a) den øvre og b) den nedre takflaten fra forsøk RP_D_45_L.</i>	<i>57</i>
Figur 45: Bilder fra modellen fra a) venstre side, b) foran modellen og c) bak modellen etter endt forsøk RP_D_0_W.	59
Figur 46: Deposjonsdiagram for forsøk RP_D_0_W.	59
Figur 47: Bilder fra modellen fra a) venstre side, b) innunder takutstikket på venstre side, c) bak modellen og d) foran modellen etter endt forsøk RP_D_22,5_W.	61
Figur 48: Deposjonsdiagram for a) den øvre og b) den nedre takflaten fra forsøk RP_D_22,5_W.	62
Figur 49: Bilder av modellen fra a) venstre side, b) innunder takutstikket, c) foran modellen på den øvre takflaten og d) foran modellen på den nedre takflaten etter endt forsøk RP_D_45_W.	64
Figur 50: Deposjonsdiagram for a) den øvre og b) den nedre takflaten fra forsøk RP_D_45_W.	65
Figur 51: Deposjonsdiagram med samlede resultater fra alle forsøkene med den nedre takflaten i le for vinden.	66
Figur 52: Deposjonsdiagram med samlede resultatene fra alle forsøkene med den nedre takflaten fullt eksponert for vinden.	67

Tabelliste

Tabell 1: Liste av erosjonsforsøk med forklaring av gjeldende parametere.	30
Tabell 2: Liste av deposisjonsforsøk med forklaring av gjeldende parametere.....	32

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Snø avsettes på en flate når skjærhastigheten avtar på en strekning (Kind 1976). På bygninger med flernivåtak avtar skjærhastigheten på den nedre takflaten når vinden blåser på og av den nedre takflaten, altså når den nedre takflaten er i lo og le side av vinden, respektivt.

Skjærhastigheten på den nedre takflaten minker som en følge av at luftstrømmen separerer seg når den treffer flernivåtakinget (Tsuchiya et al. 2002).

NS-EN 1991-1-3:2003 heretter referert til som snølaststandarden, tar høyde for deponeringen av snø på den nedre takflaten i form av formfaktorene μ_1 og μ_2 . Innbakt i formfaktoren μ_2 er μ_w som tar hensyn til redistribusjon av snø på den nedre takflaten som følge av vind.

1.2 Problemstilling

I snølaststandarden er distribusjon og last av snø på den nedre takflaten på en bygning med flernivåtak beskrevet. Lasten er imidlertid ikke beskrevet hvis den nedre takflaten er delvis eller helt overdekket av et takutstikk med en betydelig størrelse.

Arbeidet presentert i denne gradsoppgaven er en innledning til arbeidet som burde utføres for å bestemme hvordan bygg med flate tak burde dimensjoneres for snødriv når overdekkende takutstikk blir en betydelig del av bygningen. Ved å bearbeide og analysere resultatene fra erosjonsforsøk og deponeringsforsøk på en skalamodell med flernivåtak i vindtunnel vil lastsituasjonen på den nedre takflaten bli klarere.

1.3 Avgrensninger

Hvor lett snø lar seg transportere i vinden varierer i stor grad med temperatur og alder.

Sandens evne til å bli transportert i vind påvirkes ikke av disse parameterne. Resultatene fra forsøkene vil dermed miste kredibilitet hvis forsøkene blir repetert ved bruk av snø. Det var begrenset med tid til utførelsen av forsøkene og derfor ble de kun utført i to vindretninger ved bruk av en modell med bare ett sett med dimensjoner. Siden dimensjonene forble de samme ble det ikke mulig å si noe om hvordan resultatene ville variert når modellens form ble forandret.

2. Teori

2.1 Grunnleggende vindteori

Belastninger fra snø på takkonstruksjoner kommer veldig sjelden i form av kun snøfall. Snøen distribueres på forskjellig vis på en takkonstruksjon. Problemstillingen i denne oppgaven omhandler redistribusjon av snø på tak grunnet vind. For å forstå hvordan snøen deponeres fra vinden er det viktig å ta for seg grunnleggende begreper om vind. Det er blant annet veldig aktuelt å forstå hvorfor vind oppstår og hva som styrer retningen på vinden. Teori om trykk, atmosfærisk trykk, geostrofisk vind og grenselag er hentet fra lærebøkene til Arya (2001) og Berry (1981).

2.1.1 Trykk

I atmosfæren oppstår det forskjeller i trykk blant annet på grunn av temperatur. Luft transporteres rundt Jorden i form av vind med mål om å jevne ut disse trykkforskjellene.

Når et stoff går over fra fast form til væske går molekylene i stoffet fra kun å vibrere til å flytte på seg i væsken. Molekylene vil kolliderer med hverandre, og alle flater væsken er i kontakt med. Det utøves dermed et trykk på flatene. Trykk er definert som kraft per flateenhet og oppgis ofte som N/mm^2 eller Pa. Trykk utjevnes normalt på trykkisoflaten hvis ingen andre forhold påvirker utjevningen. En trykkisoflate er en flate hvor alle punkter har samme trykk.

2.1.2 Atmosfærisk trykk

Luftrykket i atmosfæren minker når avstanden fra Jordens overflate øker. I et punkt i atmosfæren er luftrykket lik tyngden av den overliggende luften. Størst luftrykk befinner seg dermed nærmest planetens bakkenivå og lavest luftrykk øverst i atmosfæren.

Luften søker å utligne trykkforskjeller og oppnå en likevekt hvor trykket er jevnt overalt. I Jordens atmosfære vil det alltid oppstå forskjeller i trykk som vinden søker å utligne, men på grunn av blant annet Jordens størrelse vil aldri en stabil tilstand oppnås. Forskjeller i trykk kan oppstå lokalt eller globalt. Fralands- og pålandsvind er et fenomen som oppstår på grunn av lokale trykkforskjeller. På en fin og varm dag vil land la seg varme av solen. Luft ved bakkenivå vil varmes opp av varmestrålingen fra bakken og stige oppover. Det dannes høytrykk. Vannet i havet lar seg ikke varme opp like fort og trykket over vannmassene vil

være betydelig lavere, et lavtrykk. Luft pumpes opp og vekk fra land mot lavtrykket over havet. Dette forårsaker at mer luft må tilføres høytrykket på land i form av lavtliggende pålandsvind fra havet. Likeledes vil dette fenomenet reverseres på en kald dag der land lettere avkjøles enn vannmassene i havet. Da vil et lavtrykk dannes på land og et høytrykk over havet og luft vil pumpes fra lavtrykk til høytrykk i form av fralandsvind.

2.1.3 Geostrofisk vind

En global årsak til forskjeller i trykk er den klare temperaturforskjellen mellom varme ekvator og de kalde polene. På lignende vis som ved fralands- og pålandsvind vil et høytrykk dannes der hvor luft er i kontakt med en varm overflate og et lavtrykk vil dannes i kalde strøk.

Grunnet Jordens rotasjon om sin egen akse vil luftstrømmene mellom høytrykk og lavtrykk dreies med rotasjonen. Jordrotasjonens påvirkning på vinden er beskrevet som Coriolis kraft.

Coriolis kraft kan beskrives med et eksempel med en rund plate og en ball plassert midt på platen. Gitt at platen er fullstendig horisontal vil ballen trille rett ut over platekanten hvis den blir satt i bevegelse. Hvis platen roterer om sitt eget sentrum vil ballens bane på tur ut over kanten bli avbøyd når den settes i bevegelse. Denne avbøyningen skyldes Coriolis kraft.

Når luftstrømmene er under påvirkning av Coriolis kraft vil de samtidig bli akselerert. Når kraften som driver trykkutjevningen har nådd likevekt med Coriolis kraft vil luftstrømmene bevege seg normalt på trykkgradientene og det som kalles geostrofiske vinder oppstår.

Ved følgende likning er den geostrofiske vinden, u_g , gitt (Berry 1981).

$$u_g = \frac{\alpha \Delta p}{f} k \quad (1)$$

α er et spesifikt volum, Δp er den horisontale trykkgradienten, f er Coriolis kraftparameter som varierer med høyden og k er den vertikale enhetsvektoren.

Ved høyden, z_g , over bakken ligger gradientnivået, her er vindhastigheten lik den geostrofiske vindhastigheten. Fra gradientnivået og ned vil vinden bremses opp på grunn av ruheten ved Jordens overflate. Området mellom gradientnivået og bakkenivået kalles grenselaget.

2.1.4 Grenselaget

Grenselaget defineres som området i et fluid, væske eller gass, som er i umiddelbar kontakt med en fast overflate og som følge av dette vil påvirke og bli påvirket av overflatens egenskaper. Skarpe endringer i blant annet hastighet, retninger, temperatur og densitet (massetetthet) vil forekomme i grenselaget i et fluid.

Teori

Bakkens ruhet har altså en påvirkning på vinden i området kalt grenselaget, eller friksjonslaget. Tykkelsen på dette laget varierer med ruheten på underlaget slik at økt ruhet gir økt tykkelse. Hastigheten, u_z , i grenselaget varierer med høyden, z , og vil fra gradientnivået til noen få meter over bakken være gitt ved «the power law» beskrevet i likning 2 (Berry 1981).

$$\frac{u_z}{u_g} = \left(\frac{z}{z_g}\right)^n \quad (2)$$

u_g er hastigheten i gradientnivået tidligere vist i likning 1 og z_g er høyden fra bakkenivået og opp til gradientnivået. Underlagets ruhet og luftstabiliteten er representert ved eksponenten n . Luftstabilitet indikeres med den vertikale temperaturgradienten, $\partial T/\partial z$, som beskriver hvor raskt temperaturen avtar med en høydeøkning på 1 km. Ved nøytrale forhold vil temperaturen i luft avta med ca 10°C/km .

Forholdet mellom luftstabilitet og vindhastighet er komplisert. Vindhastighetens avhengighet av ruhetshøyden blir derfor vanskelig å fastsette. Ved nøytrale stabilitetsforhold, $\partial T/\partial z \sim 10^\circ \text{C/km}$, og relativt glatte overflater kan vinden, u_z , ved høyden, z , bestemmes med «det logaritmiske vindprofilet» i likning 3 (Berry 1981).

$$u_z = \frac{u_* \ln(z/z_0)}{k} \quad (3)$$

Friksjonshastigheten, også kalt skjærhastigheten, $u_* = \sqrt{(\tau/\rho)}$, angis ved fluidets densitet, ρ , og skjærkraften, τ , som fluidet utfører på overflaten. u_* er en hypotetisk verdi som er konstant for hvert vindprofil. z_0 er ruhetshøyden og k er von Karmans konstant oftest gitt til 0,4.

Ruhetshøyden, z_0 , varierer med objektets gjennomsnittshøyde, deres form, overflate og hvor tett de er plassert på en ellers glatt overflate. z_0 bestemmes enten ved tabeller basert på topografi gitt i eksempelvis vindstandarder eller fra hastighetsmålingene, $u(z_1)$ og $u(z_2)$, ved høydene, z_1 og z_2 , og likning 4 (Thomas K. Thiis 1999).

$$z_0 = \exp\left(\frac{u(z_2) \ln(z_1) - u(z_1) \ln(z_2)}{u(z_2) - u(z_1)}\right) \quad (4)$$

2.2 Fluidodynamikk

Dynamikk er læren om stoffers oppførsel i bevegelse. Statikk er feltet for stoffers oppførsel når de er i ro. Statikk og dynamikk er begreper innenfor mekanikk, hvor det er det viktig å skille mellom faste stoffer og fluider. For eksempel er ikke viskositet et like viktig begrep innenfor dynamikken for faste stoffer som det er for dynamikken til fluider.

I forbindelse med fluiddynamikk er det viktig å beskrive begrepene densitet, viskositet, laminær og turbulent strømning og separasjon. Teorien i fluiddynamikkapittelet er hovedsakelig hentet fra læreboken til Morrison (2013).

2.2.1 Densitet og viskositet

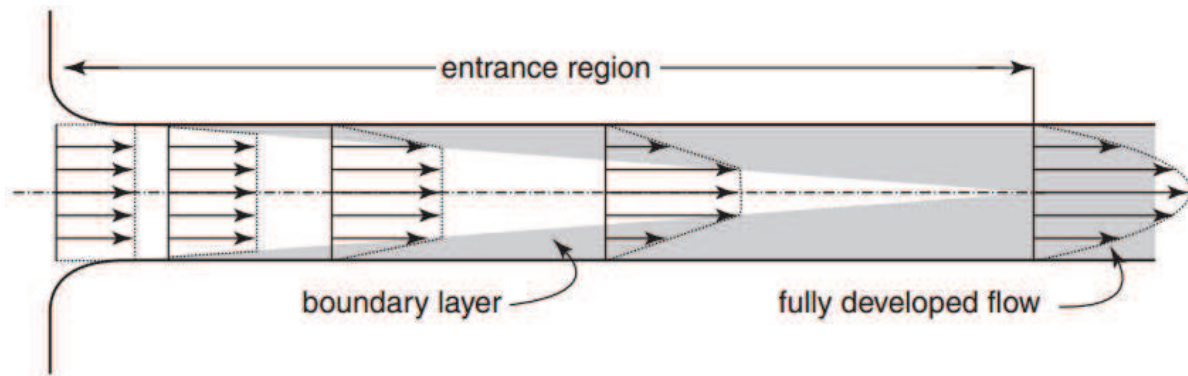
Densitet beskriver hvor tungt et stoff er i forhold til et enhetsvolum. Typiske enheter for densitet er g/cm^3 og kg/m^3 . Densiteten til et stoff er vanligvis oppgitt ved et referansetrykk på 1 atmosfære [atm] og en referansetemperatur på $20\text{ }^\circ\text{C}$. Densiteten til et stoff varierer med temperatur og trykk og det er derfor nødvendig med disse referanseverdiene.

Densiteten varierer mellom forskjellige stoffer. Det samme gjelder viskositeten til et stoff. Viskositet forteller noe om et fluids evne til å motstå bevegelse. Dynamisk viskositet, μ , til et fluid kan blant annet oppgis som poise [p] som tilsvarer g/cm s eller som pascalsekund [Pa s], kg/m s . I flere tilfeller er det viktig å ha kjennskap til et stoffs kinetiske viskositet, ν . Den kinetiske viskositeten benevnes ved m^2/s og beregnes ved å dividere den dynamiske viskositeten til et stoff på dets densitet.

Flytende stoffer deles inn i newtonske fluider og ikke-newtonske fluider. Honning og vann er to newtonske fluider med konstant viskositet og vil deformeres uansett hvilken påkjenning de blir utsatt for. Flytende betong vil i utgangspunktet la seg flyte ut, men hvis det tilsettes lite vann ved produksjon må for eksempel en vibrator benyttes for å få betongen til å bevege seg før gravitasjonen får hold på den. Betong er en binghamvæske viss viskositet avhenger av sin egen hastighet.

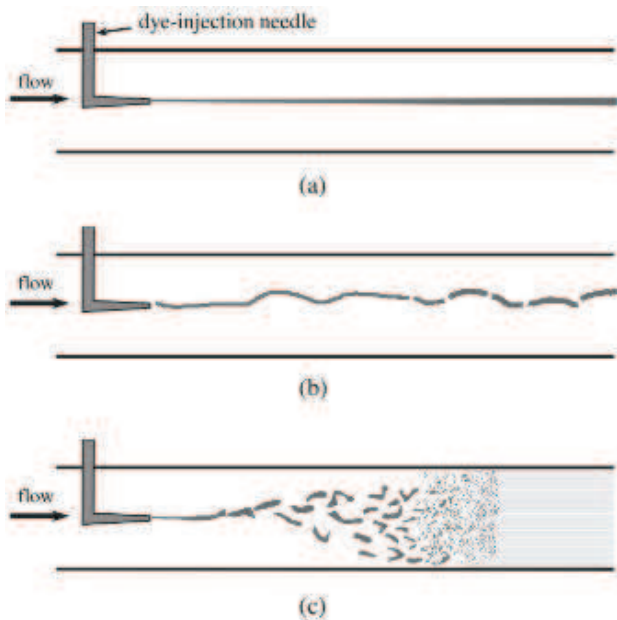
2.2.2 Laminær og turbulent strømning

I kapittel 2.1.4 ble fluidstrømning over en flate introdusert i forbindelse med introduksjonen av grenselag. Dette kalles ekstern fluidstrømning. Intern fluidstrømning finnes for eksempel i fluider i rør, vist i figur 1. Initielt vil fluidet som entrer røret ha samme hastighet over hele tverrsnittet. Ved kontakt med overflaten i rørveggen vil fluidet bremses opp ytterst og et grenselag dannes på rørveggen. Jo lengre inn i røret fluidet beveger seg jo mer av fluidet bremses opp på grunn av ruheten i rørveggoverflaten. Til slutt vil regionen utenfor grenselagets gradientnivå forsvinne og et fullt «utviklet strømningsmønster» danner seg hvor hastigheten i et punkt i fluidet vokser logaritmisk med høyden fra rørveggen.



Figur 1: Dannelse av et fullt utviklet strømningsmønster (Morrison 2013).

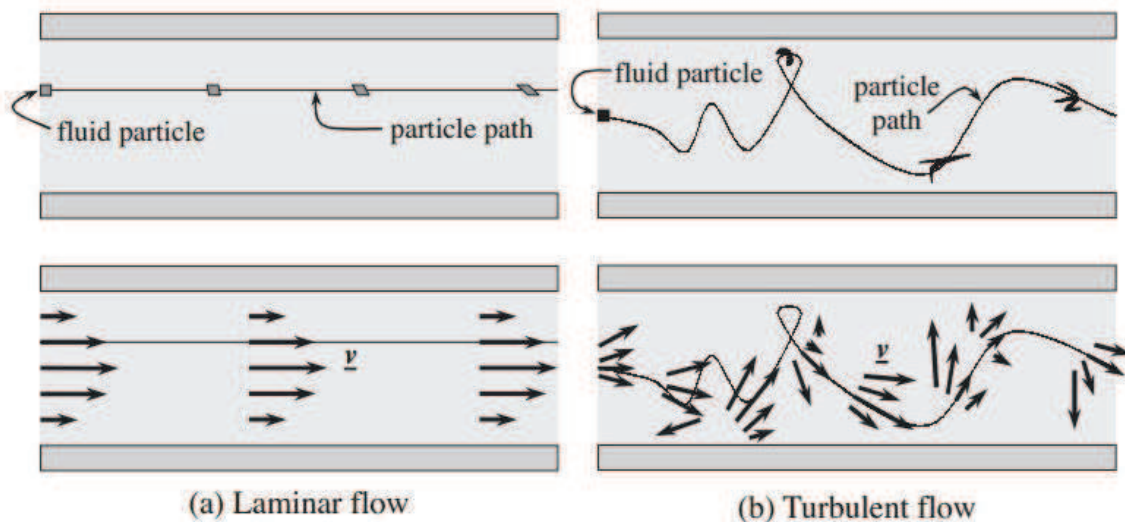
I 1883 utførte Osborne Reynolds forsøk med væsker i et sirkulært rør og beviste laminær og turbulent strømning. Reynolds brukte et transparent rør som inneholdt en gjennomsiktig væske, se figur 2. En farget væske ble injisert inn i den gjennomsiktige væsken og ved lave hastigheter observerte Reynolds at den fargede væsken fulgte en rett linje nedstrøms i røret (a). Når trykket inn i røret ble økt til en viss størrelse, økte hastigheten på væskene i røret slik at den fargede væsken begynte å bevege seg mer tilfeldig i den gjennomsiktige væsken (b). Når hastigheten ble enda høyere begynte den fargede og den gjennomsiktige væsken å blande seg, før væskene til slutt ikke kunne skilles fra hverandre (c).



Figur 2: Reynolds observasjoner med en farget og en gjennomsiktig væske i et gjennomsiktig rør (Morrison 2013).

Teori

Laminær strømning kan beskrives som sirkulære, syltynne lag av væske utenpå hverandre hvor fluidhastigheten avtar fra midten og ut mot rørveggen, se figur 3 a). På grunn av hastighetsforskjellen mellom lagene oppstår det skjær som overfører krefter mellom fluidlagene. Ved lave hastigheter vil væskestrømmen forholde seg laminær og strømme i retningen av rørets lengde. Når hastigheten i fluidet øker vil fluidets lagvise orden opphøre og strømmingen vil bevege seg tilfeldig i alle retninger. Strømningen blir turbulent (b).



Figur 3: Laminær (a) og turbulent (b) strømning i et sirkulært rør (Morrison 2013).

Med utgangspunkt i forsøkene sine fastsatte Reynolds laminær strømning i et sirkulært rør til $Re < 2000$ og turbulent til $Re > 4000$. Verdien for når strømmingen begynner sin ferd fra laminær til turbulent kalles det kritiske Reynolds tall, Re_{krit} . Reynolds tall er gitt i likning 5 og beregnes fra den gjennomsnittlige strømningshastigheten V , den karakteristiske diameteren D , densiteten ρ og den dynamiske viskositeten μ (Morrison 2013).

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (5)$$

Reynoldstall sier noe om forholdet mellom fluidets treghetskrefter og fluidets viskositet. Den karakteristiske diameteren for et sirkelformet rør er lik dets indre diameter kalt den hydrauliske diameter D_h . Hydraulisk diameter for et kvadratisk rør er gitt ved likning 6 hvor A_c er tversnittets areal og p er rørets innvendige omkrets (Çengel & Turner 2001).

$$D_h = 4 \frac{A_c}{p} \quad (6)$$

Når gravitasjon blir introdusert til problemet trengs det en beskrivelse av forholdet mellom fluidets treghetskrefter og gravitasjonskraften. Beskrivelsen kommer i form av Froudetallet. Utregningen av Froudetallet for en strømmende væske i et rør er gitt i likning 7 hvor V er den gjennomsnittlige strømningshastigheten, g er gravitasjonen og D er den indre rørdiameteren (Morrison 2013).

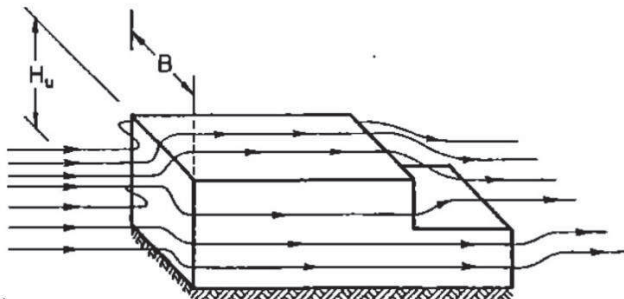
$$Fr = \frac{V^2}{gD} \quad (7)$$

2.2.3 Separasjon

En separasjon er et område i en fluidstrøm, ofte nedstrøms for et objekt, hvor fluidhastigheten minker og fluidstrømmen endres på grunn av hindringen som objektet skaper. Separasjonen oppstår fordi fluidstrømmen ikke klarer å ivareta fluidhastigheten rundt den skarpe endringen som objektet danner i fluidstrømmen. Det tredimensjonale området hvor separasjonen forekommer refereres til som en separasjonsboble. Separasjonsboblens form varierer med formen til objektet i fluidstrømmen. Hvis fluidstrømmen kun passerer på den ene siden av objektet som for eksempel et hustak på en flate, vil separasjonsboblen se annerledes ut.

2.2.4 Separasjon av vind på flernivåtak

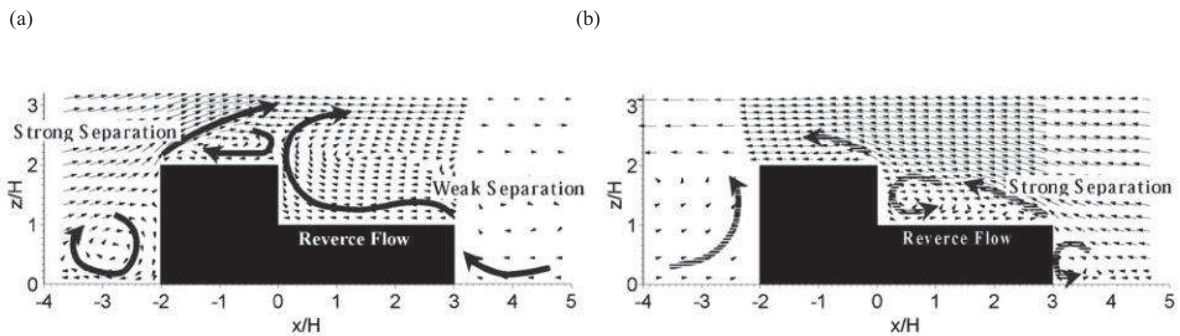
Luftstrømmen på et bygg kan deles inn i luftstrømmene som går over bygget, luftstrømmene som separeres foran bygget og luftstrømmene som går til hver av sidene. Figur 4 viser strømningslinjer rundt en bygningsform med et flernivåtak hvor H_u er høyden fra bakkenivå til den øvre takflaten og B er byggets bredde. Vinden kommer inn fra venstre side og strømmer ut på høyre side i figuren.



Figur 4: Luftstrømmer på og rundt en bygning med flernivåtak (Orourke & Wood 1986).

Teori

Ved brede, lave bygg (forholdet H_u/B gir en lav verdi) vil mest luft presses opp langs veggen og gå over takflaten. Når et bygg er høyt og slankt (forholdet H_u/B gir en høy verdi) vil mest luft presses ut på sidene av bygget. Når vind blåser mot en bygning vil luften dele seg på veggen den treffer. Deler av luftstrømmen vil gå ned mot bakken og resten vil strømme opp og over kanten på taket (Tsuchiya et al. 2002). I figur 5 vises separasjonen som forekommer på takflatene og foran en bygning med flernivåtak når luften blåser a) av den nedre takflaten og b) på den nedre takflaten.



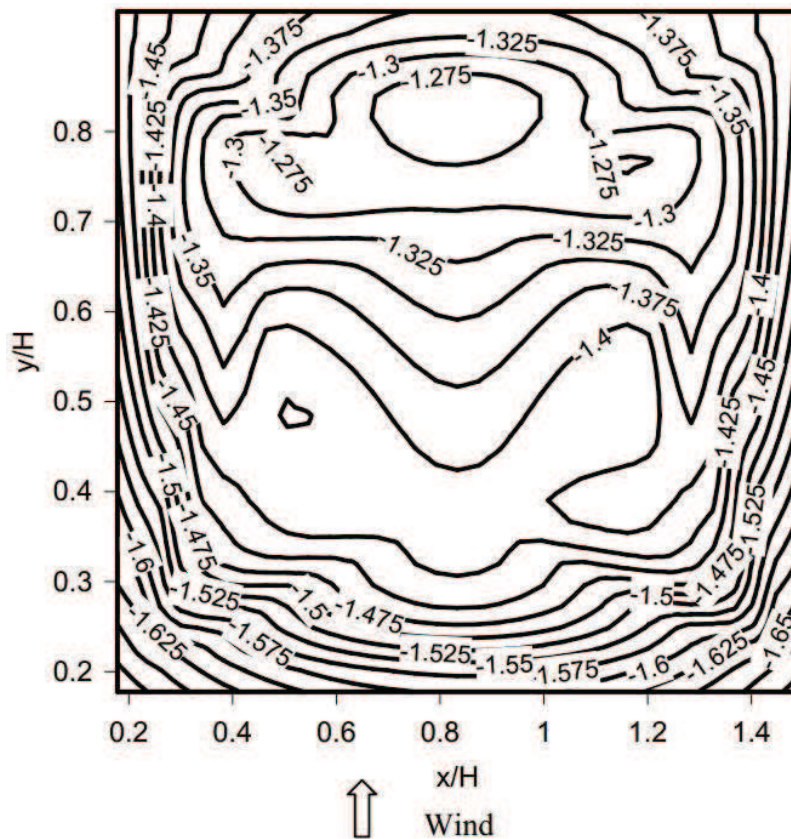
Figur 5: Luftstrømmer på en skalamodell med flernivåtak (Tsuchiya et al. 2002).

Luftmengden som går opp og over takflaten i a og b i figur 5 varierer med H_u/B . Når luften blåser på b) den nedre takflaten er høyden H_u halvert (H_u blir høyden til den nedre takflaten) og luftmengden som blåser over modellen og ikke på sidene er større enn i a).

Separasjonsbobler kalles også resirkulasjonsbobler fordi luften som havner i boblen vil rotere tilbake til separasjonspunktet og vil her enten strømme med en runde til i boblen eller trekkes med over boblen.

2.2.5 Endeffekter som følge av sug

Vinden utligner trykk ved å bevege seg mellom trykkisoflatene. Retningen og hastigheten til vinden bestemmes av trykkgradienten som beskriver hvor trykket vil øke hurtigst i et hvert punkt på en trykkisoflate (ofte normalt) (Berry 1981). Når avstanden mellom to isoflater er liten beveger vinden seg fortere mellom dem enn om avstanden er lang. Isolinjer beskriver det samme som isoflater, bare i to dimensjoner. I figur 6 er isolinjer av trykkkoeffisienter på et flatt tak presentert når lufthastigheten var 7 m/s (Prasad et al. 2009).



Figur 6: Isolinjer av trykkoeffisienter på et vindutsatt, flatt tak (Prasad et al. 2009).

Trykkgradienten er større langs sidene og forkanten på en takflate fordi trykket varierer hurtigere her enn lenger inn på flaten. I figur 6 er trykkgradienten uttrykt ved avstanden mellom isolinjene av trykkoeffisientene. Lufthastigheten øker fortere der hvor trykkgradienten er stor.

2.2.6 Fluidhastighetsmåling med Pitotrør

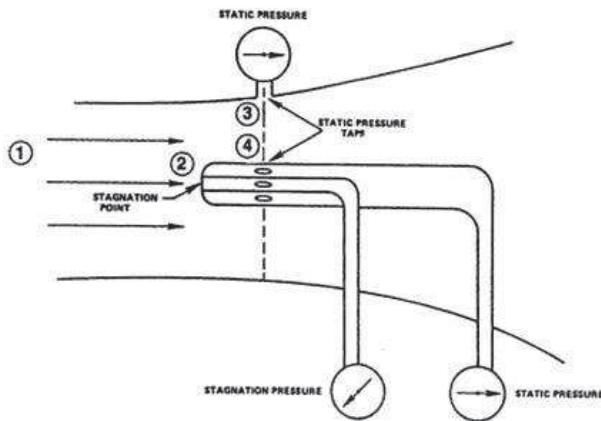
I 1732 oppfant Henri Pitot pitotrøret for bestemmelse av et fluids hastighet i et punkt. Pitotrøret i seg selv kan kun benyttes for å bestemme det totale trykket og det statiske trykket i et fluid i et punkt, men ved hjelp av Bernoullis likning, likning 8 kan fluidets hastighet i dette punktet bestemmes med likning 9 (Johnson 1998).

$$P_T = P_S + P_D = gh\rho + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (8)$$

Teori

$$v = \sqrt{\frac{2 \times (P_T - P_S)}{\rho}} \quad (9)$$

Pitotrøret må rettes direkte mot fluidstrømmen for å måle riktig totaltrykk. Et eksempel på dette er vist i figur 7.



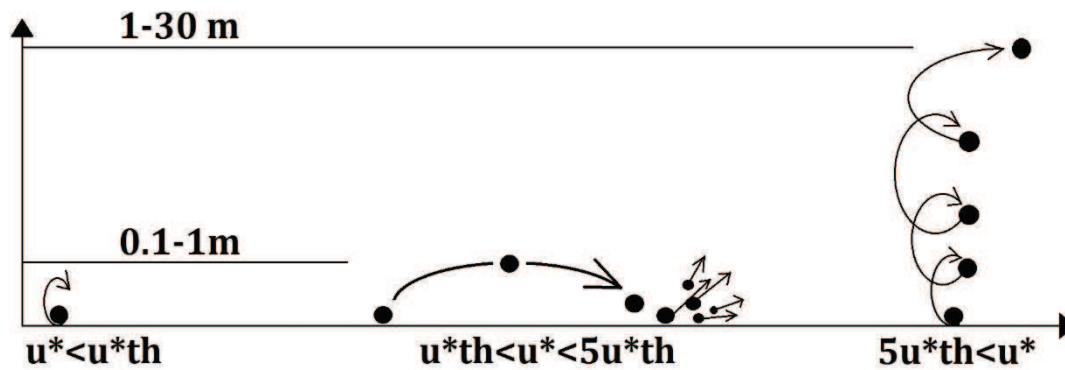
Figur 7: Prinsipp for funksjon og bruk av et pitotrør (Johnson 1998).

Det totale trykket leses av i et rør som ligger i midten av instrumentet med en åpning foran på tuppen. Foran, på siden av pitotrøret er det også hull som luft presses mot. Disse hullene er åpningene på et rør som ligger rundt røret hvor totaltrykket blir lest av. Trykket mot disse hullene er det statiske trykket.

2.3 Snødriv

Snødriv er et fenomen hvor vind trekker med seg snøflak fra snøfall og deponerer den på et område lenger nedstrøms. Snødriv utsetter mange takkonstruksjoner for ekstra belastninger slik at blant annet skader og kollaps forekommer (O'Rourke et al. 1985).

Om snø lar seg drive og hvor mye av snø som driver kommer an på vindhastigheten og snøens drivegenskaper. Med drivegenskaper menes blant annet snøkornets størrelse, fasong, vekt og kohesive krefter. De kohesive kreftene styres av snøens alder og temperatur. Snøens drivegenskaper er tallfestet med en grensefriksjonshastighet, u_{*th} (th fra det engelske ordet «threshold») som skjærhastigheten må overskride hvis snødriv skal forekomme (Kind 1976).



Figur 8: Fra venstre: Snødriv ved kryp, saltasjon og suspensjon og ved hvilke skjærhastigheter hver type er dominerende.

Snødriv forekommer enten som kryp, saltasjon eller suspensjon. Variantene for snødriv er beskrevet i figur 8. Den vertikale aksene angir observert drivhøyde for de ulike variasjonene av snødriv. Den horisontale aksene viser hva skjærhastigheten må være i forhold til grensefriksjonshastigheten til et snøkorn før de ulike variasjonene snødriv inntreffer. Teori i dette kapitlet er hovedsakelig hentet fra Kind (1976).

2.3.1 Kryp

Kryp forekommer når skjærhastigheten, u^* , utøvd på snødekket nærmer seg, men ikke overgår snøkornenes grensefriksjonshastighet, u^*_{th} . Snøkornene vil da, som navnet tilsier, kripe bortover overflaten uten at kontakten med overflaten brytes. Denne typen driv kan lett stanses av ujevnheter og hindringer nedstrøms i vindretningen.

2.3.2 Saltasjon

Når skjærhastigheten, u^* , har passert grensefriksjonshastigheten, u^*_{th} , vil partikler begynne å saltare. Siden partiklene kan være av forskjellig størrelse vil noen partikler saltare før andre og noen vil saltare høyere enn andre. Ved kryp vil partiklene rulle uten å forlate overflaten. Ved saltasjon vil partiklene løsne fra overflaten og drives i en parabelbane nedstrøms et stykke før gravitasjon overkommer oppdriften. De fleste partiklene vil ikke drive høyere enn 5 cm (Tabler 1988), men hvis forholdene er riktig kan partikler saltare ved 1 m høyde (Thiis 1999). Når partiklene så treffer den snødekte overflaten vil deres kinetiske energi bidra til løsrivelsen av nye snøpartikler som vil fortsette saltasjonen videre nedstrøms i vinden.

Forskning i felt og vindtunnel viser at salterende jord- og sandpartikler av varierende størrelse påvirker vinden på lignende vis som andre ruhetselementer i et vindprofil. Vindprofilet over de salterende partiklene kan beskrives ved likning 10 (Owen 1964).

$$\frac{u}{u^*} = 2,5 \ln\left(\frac{2gz}{u^{*2}}\right) + 9,7 \quad (10)$$

Ved hjelp av forskningsdata fra Oura et al. (1967) bekreftet Kind (1976) likning 10 som en valid beskrivelse av salterende snøpartiklers påvirkning på vindprofilet.

Saltasjon er den dominerende formen for snødriv opptil punktet hvor skjærhastigheten, u^* , er høyere enn fem ganger snøens grensefriksjonshastighet, $5u_{*th}$, se figur 8. Ved skjærhastigheter større enn dette vil snøpartikler drive ved suspensjon.

2.3.3 Suspensjon/turbulent diffusjon

Skjærhastigheten, u^* , på en partikkel i et grenselag må være større eller lik fem ganger partikkelens grensefriksjonshastighet, u_{*th} , for at partikkelens oppdrift skal overkomme gravitasjonen beskrevet ved partikkelens vertikale terminalhastighet og suspendere (Bagnold 1973). Når en partikkel suspenderer kan den transporteres over lengre avstander i vinden. Snøpartikkelens størrelse er med suspensjon som med kryp og saltasjon av stor betydning. Det er oftest de aller minste partiklene kalt snøstøv som suspenderer. Siden partiklene i snøstøv er så små vil kreftene mellom partiklene være av større betydning. Snøstøvet vil samle seg i større mengder, terminalhastigheten vil øke og til slutt vil samlingen av snøstøv dale ned mot overflaten igjen.

Grensene som definerer hvilken type snødriv som oppstår ved de ulike skjærhastighetene gitt i figur 8 er ikke fastsatt. Hvordan en snøpartikkel driver avhenger ikke bare av skjærhastigheten. Den avhenger som tidligere nevnt av hver enkelte snøpartikkels egenskaper i forhold til vekt og størrelse. Et snødekkets grensefriksjonshastighet er basert på den gjennomsnittlige snøpartikkelen. Derfor er grensene for når partikler går fra en type driv til den neste varierende med hver partikkel. Ved brede korngraderinger kan snødekker drive både ved kryp, saltasjon og suspensjon.

På åpne terrenger er saltasjon og suspensjon ofte de dominerende formene for snødriv og bidraget fra snøkryp kan nesten neglisjeres (Tabler 1988). Hvis redistribusjon av snø på tak er det gjeldende tilfellet er det feil å regne med suspensjon fordi partiklene ofte transporteres lengre enn taklengden ved denne typen driv.

2.3.4 Avsetting og oppsamling av snø i vinden

Hvilke typer snødriv som oppstår og om fenomenet oppstår er tett tilknyttet skjærhastigheten i ethvert punkt. Jo høyere skjærhastighet, jo mer energi vil snøpartiklene ha og de vil være i stand til å drive høyere og lengre.

Da er det kanskje ikke så rart at vindens evne til å bære snø i en gitt høyde i tillegg øker når vindhastigheten øker. Hvis vinden akselererer over en flate vil bæreevnen til vinden øke og mer snø kan transporteres. På samme måte vil bæreevnen minke hvis vindhastigheten minker.

Når vinden eroderer like mye snø som den deponerer kalles det for fullt utviklet snøtransport. Vinden vil først plukke med seg flere partikler enn den skiller ut. Deretter vil likevekt oppnås. Mengden snø tilgjengelig for transport bestemmer varigheten av likevekten. Minste avstand for vinden å virke på for at en fullt utviklet transport av snø skal forekomme er gitt til 150-300 m av Tabler (1988) og 210 m av O'Rourke et al. (1985).

Grunnet naturlig turbulens vil vinden utsettes for hyppige akselerasjoner og retardasjoner når den blåser over en flate. Avhengig av om hastigheten øker eller minker vil snø henholdsvis tas opp eller skilles ut av vinden. Endringer i snøkonsentrasjon vil med tiden jevne seg ut og over lengre tidsforløp ikke ha innvirkning på snødrivsberegninger.

Deposisjon og erosjon av snøpartikler henholdsvis på og av en flate varierer med skjærhastighetsendringen du^* på strekningsendringen ds . Hvis $du^*/ds > 0$ vil snø erodere av flaten og hvis $du^*/ds < 0$ vil snø deponeres på flaten. I tilfeller der strømningsbanen til vinden blir innsnevret kan deposisjon forekomme. Konsentrasjonen av snø i luften vil øke og hvis den blir større en vindens transportkapasitet må snøpartikler skilles ut.

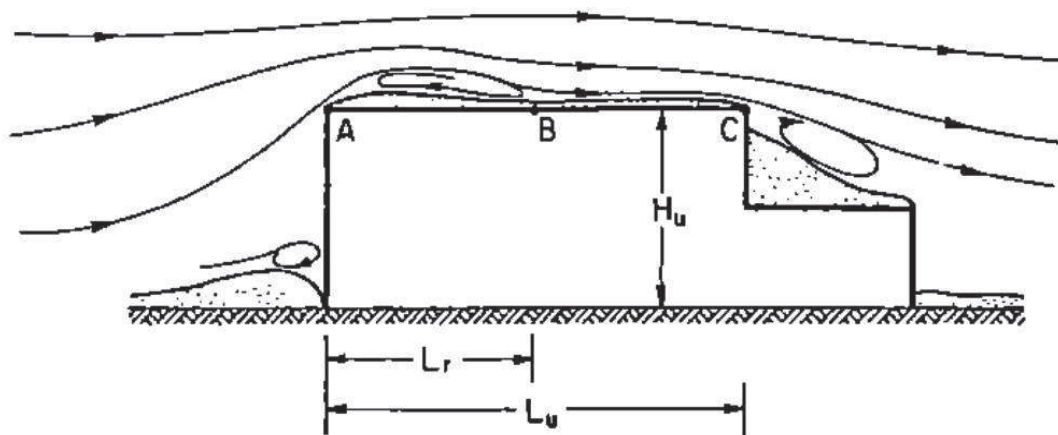
2.3.5 Snødriv på takkonstruksjoner

Tidligere i teoridelen har de forskjellige typene snødriv blitt beskrevet og det kom fram at alle typene snødriv kan forekomme samtidig. Det er forøvrig formålet med en eventuell analyse eller beregning som dikterer de ulike typene snødriv sitt bidrag til mengden drevet snø. I åpne terreng og ved normale forhold kan snødriv ved kryp neglisjeres. Dette gjelder også ved driv av snø på tak. De gjeldende typene snødriv er da saltasjon og suspensjon.

Snødriv på tak foregår enten ved at snø blir fraktet av vinden fra et tak til et annet tak eller ved at snø driver fra en del av et tak til en annen del av det samme taket. Siden de fleste suspenderende partikler ikke svever mer enn en 1 meter fra overflaten (Tabler 1988) er prosessen hvor snøpartikler forflytter seg mellom tak kun aktuell for underliggende

takkonstruksjoner. Dette samsvarer også for salterende partikler. Når snø driver fra en del av et tak til en annen del er salterende partikler det dominerende bidraget. Suspenderende partikler er nemlig i fare for å drive for langt.

I forrige kapittel ble en negativ endring i skjærhastighet og en innsnevring i strømningsbanen beskrevet som tilfeller hvor snø vil skilles fra vinden hvis den frakter snø. Disse to prosessene er og aktuelle ved snødeposisjon på tak. For eksempel vil strømningsbanen snevres inn når vind treffer en bygning og blir tvunget opp veggen og over takflaten. I figur 9 er luftstrømmen som passerer over og på sidene av et flernivåtak med den nedre takflaten i le for vinden vist.



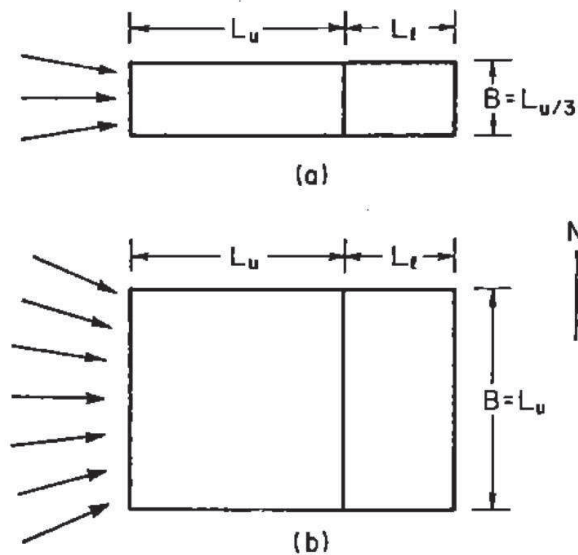
Figur 9: Luftstrømmer over et flernivåtak (O'Rourke & Wood 1986).

O'Rourke og Wood (1986) deler den øvre takflaten i figur 9 i tre soner, sone A, B og C. I sone A kommer vinden inn over takflaten og en separasjonsboble dannes. Boblen strekker seg til sone B hvor luftstrømmen samler seg igjen. Separasjonsboblens eller resirkulasjonsboblens lengde er gitt ved L_r . Denne lengdens størrelse har en sammenheng og vil øke med høyden, H_u , til den øverste takflaten (Castro & Robins 1977; Hunt et al. 1978). Separasjonsboblen med lengde L_u eroderer partikler fra B til A. Derfor er ikke denne delen av taket tilgjengelig som kilde for drivsnø. Kilden som vinden kan plukke snø fra er da innskrenket til området mellom sone B og C. O'Rourke og Wood (1986) kaller lengden for den effektive lengden, L_{eff} , og angir den ved likning 11.

$$L_{eff} = L_u - L_r \quad (11)$$

L_u er den øverste takflatens totale lengde. For tilfeller med flernivåtak hvor den nedre flaten ligger i le for vinden vil takets lengde være av betydning av to grunner. En fordi

vindhastigheten over den øvre flaten øker med flatens lengde. Den andre årsaken er fordi flaten som snø driver fra varierer med lengden på den øvre flaten. Se figur 10.



Figur 10: Vindretninger aktuelle til å drive snø på tak med forskjellig bredde (O'Rourke & Wood 1986).

I figur 10 er nord definert rett opp. B er bredden på flernivåtakket, L_u er lengden på den øvre flaten («upper roof surface») og L_l er lengden på den nedre takflaten («lower roof surface»). Figuren beskriver hvordan flere vindretninger kan bidra til snødriv på den nedre takflaten når a) B er lik L_u i motsetning til når b) B er lik $1/3 L_u$. Da er det hovedsakelig kun vestlig vind som vil bidra til at snøen driver ned på den nedre takflaten (O'Rourke & Wood 1986).

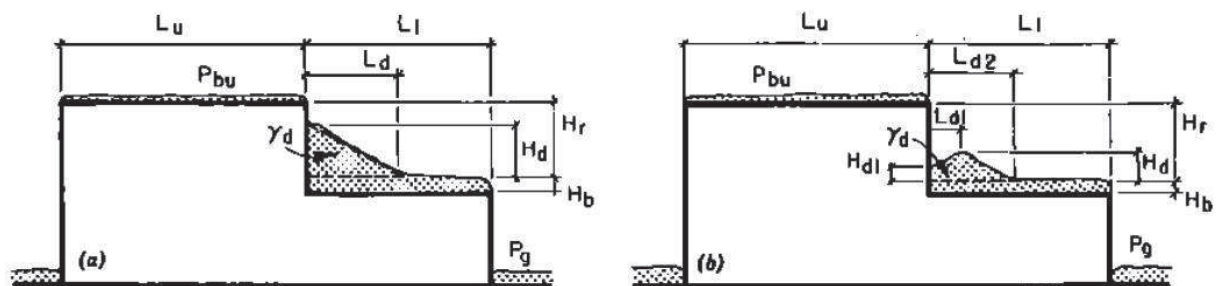
2.3.6 Snøfonner på tak og under takutstikk

I forrige avsnitt ble snødriv på tak introdusert og det ble nevnt noe om redistribusjon av snøpartikler på underliggende tak. Forskjellige egenskaper ved snø og snøtransport har blitt beskrevet, men kun på enkle overflater.

Hvis et objekt blir innført i en fluidstrøm vil adferdsmønsteret i fluidstrømmen endre seg og separasjon oppstå hvis fluidhastigheten er høy nok rundt objektet. I separasjonens virkningsområde er skjærhastigheten lavere fordi fluidhastigheten er lavere. Hvis snø blir innført i luftstrømmen vil den som nevnt i tidligere avsnitt skilles ut der skjærhastigheten er lavere og der luftstrømmen snevres inn. I disse områdene vil snøfonner dannes. Motsatt vil

snøpartikler eroderes vekk i de områdene hvor hastigheten er høy og store overflater med eksponert grunn kan forekomme. Overflaten som vinden blåser over vil altså endre seg og med den ruheten og skjærhastigheten. Hvis vindens hastighet og retning forblir den samme og tilførselen av snø vedvarer vil det i hvert punkt deponeres like mye snø som det eroderer bort og systemet vil havne i likevekt, eller en såkalt «steady state».

O'Rourke et al. (1985) utførte en statistisk analyse med ca 350 tilfeller av skade eller kollaps forårsaket av snødriv på tak. På bakgrunn av undersøkelser gjort av forsikringsselskaper og ingeniører ved disse ulykkene kom O'Rourke et al. (1985) fram til at likevektsprofilen til snøfonner på trappetak i all hovedsak kommer i to varianter, vist i figur 11.

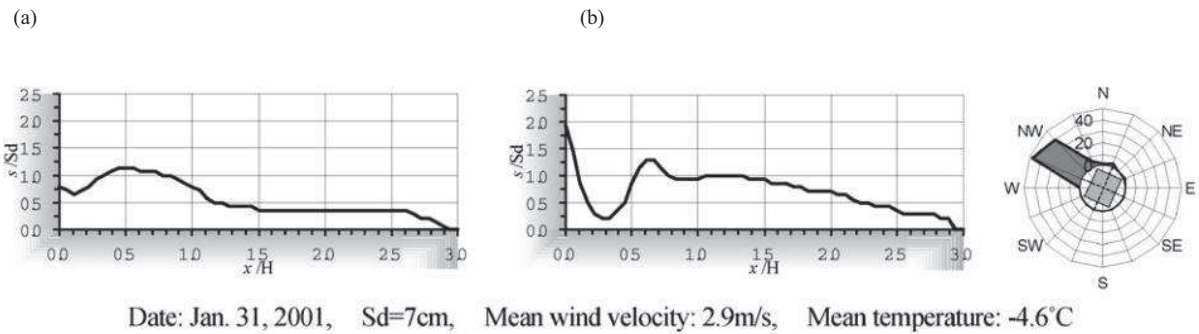


Figur 11: De to oftest forekommende likevektsprofilene til snøfonner på trappetak (O'Rourke et al. 1985).

Av likevektsprofilene i figur 11 forekommer a oftest. Stigningen til likevektsprofilen varierer avhengig av forholdet mellom høydeforskjellen mellom takene og det laveste takets lengde. O'Rourke et al. (1985) anslår stigningen til å være 1:4 når snøfonnens dybde ikke overgår takhøydeforskjellen og den nedre taklengden ikke hindrer snøfonnens vekst i lengderetningen. Når snøfonnens dybde nærmer seg takenes høydeforskjell vil stigningen være 1:5 eller 1:6. Når det er stor nok tilførsel av snø vil likevektsprofilen utvikles og deretter vil resterende drivsnø legge seg bak likevektsprofilens topp slik at stigningen på snøfonnen blir slakere og slakere. En likevektsprofil for en snøfonn bygger opp sin maksimale høyde relativt tidlig i forhold til hvor lang det tar før profilens lengde er fullt utviklet (Tabler 1988).

Snøakkumulasjonen på den nedre takflaten henholdsvis i a) le og b) lo for vinden på et flernivåtak er vist i figur 12 (Tsuchiya et al. 2002).

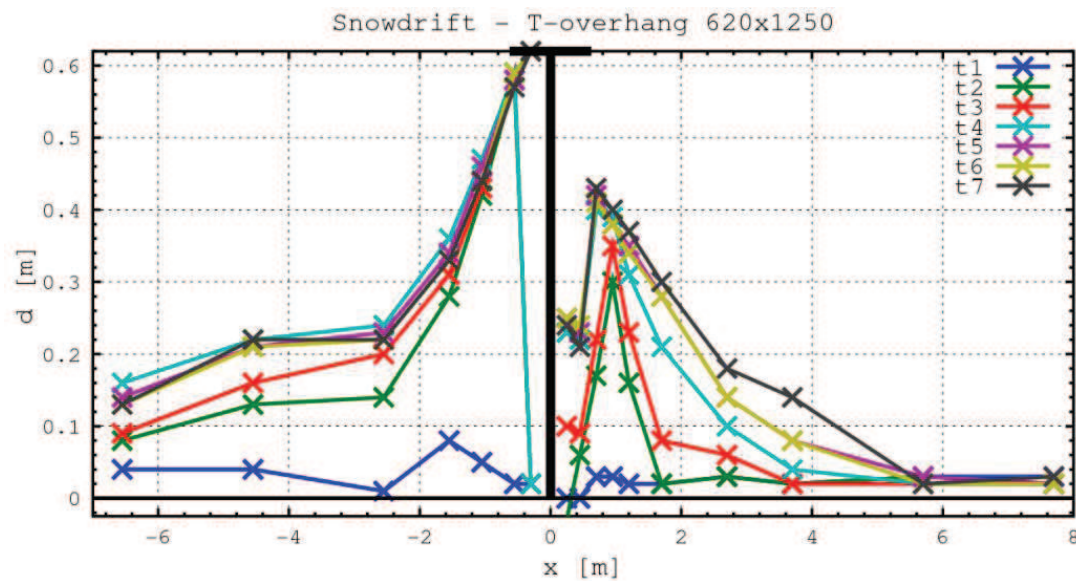
Teori



Figur 12: Snødeposisjoner på den nedre takflaten på a) le og b) lo side for vinden på et flernivåtak (Tsuchiya et al. 2002).

For begge snøprofilene i figur 12 er det en klar hovedansamling på takflaten. Når takflaten er i a) le for vinden ligger hovedansamlingen nært veggen med toppunktet ved omtrent $x/H = 0,5$. Når den nedre takflaten ligger b) fullt eksponert i vinden ligger hovedansamlingen av snø litt lenger ut på takflaten. Toppunktet er nesten på samme sted. Det er en klar likhet mellom snøprofilene i figur 12 og likevektsprofil b) i figur 11.

I en doktoroppgave av Potac (2013, unpublished) så Potac på snødriv rundt T-formede snøgjerder med 15 m bredde som stod normalt på vindretningen. Han målte snøfønnes dybder på lo og le side av et T-formet snøgjerde med høyde 620 mm og bredde 1250 mm ved forskjellige tidsintervaller. Potac utførte tre forsøk med disse dimensjonene og Potacs siste forsøk er vist i figur 13. Dette forsøket hadde flest målinger og ble observert over det lengste tidsintervallet.

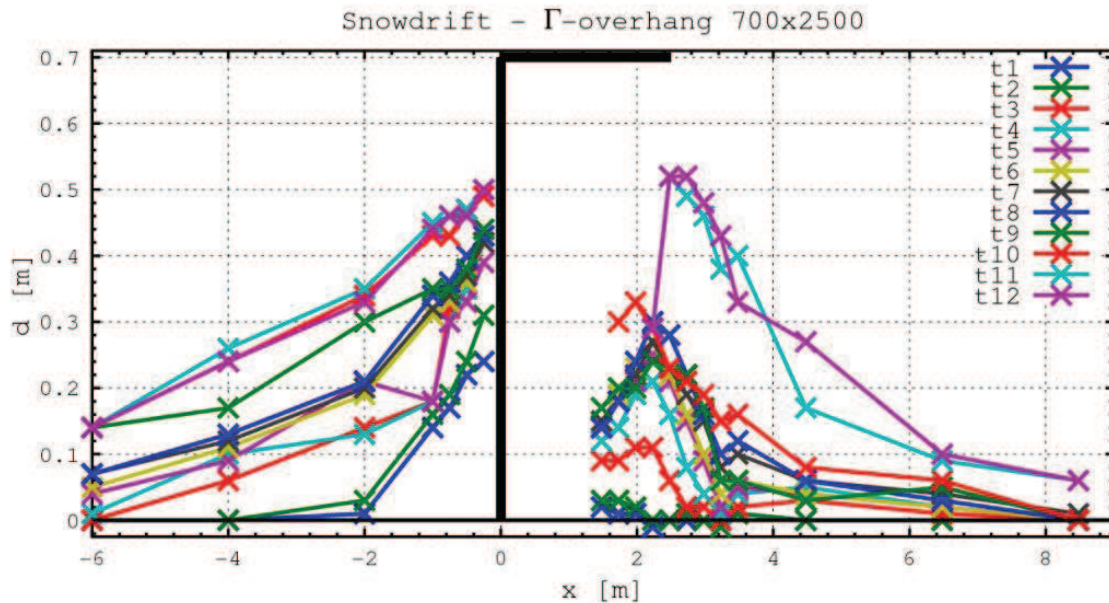


Figur 13: Snødybder på lo og le side av et T-format, ikke-porøst snøgjerde med høyde 620 mm og bredde 1250 mm (Potac 2013, unpublished).

Den vertikale aksene angir de målte snødybdene ved forskjellige distanser opp- og nedstrøms for snøgjerdet gitt på den horisontale aksene i figur 13. Det ble utført 7 målinger, t_1 - t_7 .

Potac observerte i alle forsøkene at snøfonnenes toppunkt befant seg like under den horisontale flatens ender både på lo og le side av snøgjerdets vertikale flate med et lite tomrom av snø mellom toppunktet og vertikalflaten. Snøfonnen på lo side vokste betraktelig fortere og større både i høyde og lengde i forhold til snøfonnen på le side.

Når det T-formede snøgjerdets form ble endret slik at den horisontale flaten kun stakk ut på le side av veggen observerte Potac det samme på lesidens snøfonn som ved forsøkene med en symmetrisk T-form på snøgjerdet. Toppen av snøfonnen befant seg like under den horisontale flatens ende. Når høyden var 700 mm og bredden var 2500 mm var det en klar glippe mellom toppunktet på snøfonnen og snøgjerdets vertikale flate, figur 14. På losiden av snøgjerdet bygde det seg en snøfonn helt inn til veggen.



Figur 14: Snødybder på lo- og le side av et forskjøvet T-formet, ikke-porøst snøgjerde med høyde 700 mm og bredde 2500 mm (Potac 2013, unpublished).

Den vertikale aksene i figur 14 angir de målte snødybdene ved forskjellige distanser opp- og nedstrøms for snøgjerdet gitt på den horisontale aksene. Det ble utført 12 målinger, t1-t12.

Potac (2013, unpublished) testet en siste konfigurasjon hvor forholdet H/B var like under 1,0. Da dannet det seg en liten glippe mellom snøfonnens toppunkt og snøgjerdets vertikale flate. På lesiden fylte glippen mellom vertikalflaten og snøfonnens toppunkt seg litt igjen ved siste måling.

2.3.7 Snøkonsentrasjon og -fluks

I forbindelse med lastberegninger tilknyttet snøfall og snødriv er det viktig å fastslå mengde snø i luften. Mengden av snø i luften i et gitt volum omtales som snøkonsentrasjon og strømmingen av snø gjennom en flate, for eksempel nedbør mot bakken, kalles snøfluks.

Nedbørsintensiteten av snø N i luft kan bestemmes ved bruk av målinger av nedbørsmengden, R , over et tidsintervall, t , se likning 12.

$$N = \frac{R}{t} \quad (12)$$

Nedbørsintensiteten N [kg/s] i likning 12 kan videre benyttes for å finne snønedbøren per kvadratmeter, kalt den vertikale nedbørsfluks, $Q_{R, \text{vert}}$. $Q_{R, \text{vert}}$ kan beregnes ved å dividere N på enhetsarealet 1 m^2 og får deretter enheten $\text{kg/m}^2\text{s}$. Snøkonsentrasjonen C_R [kg/m³] i luften

Teori

blir deretter utregnet fra den vertikale nedbørsfluksen, $Q_{R,vert}$, ved å dividere med en snøpartikkels absolutte terminale fallhastighet w_f , se likning 13.

$$C_R = \frac{Q_{R,vert}}{|w_f|} \quad (13)$$

Snøpartikkelens terminale fallhastighet w_f angir en partikkels hastighet, motivert av gravitasjon og begrenset av luftmotstanden. Absoluttverdien av w_f benyttes siden hastighetsretningen ikke har noe å si for konsentrasjonen av snø innenfor et bestemt volum.

Den horisontale snøfluksen grunnet vind er gitt i likning 14. Da benyttes snøkonsentrasjonen, C_R , sammen med den horisontale vindhastigheten, u .

$$Q_{R,hor} = C_R u \quad (14)$$

2.3.8 Snølast på flernivåtak

Ved bestemmelse av snølasten, S , på et tak benytter snølaststandardens seg av formfaktorer skreddersydd til de ulike takformene som benyttes ved utbygging av nybygg og rehabilitering av eldre bygg. Formfaktoren for en takform angir hvor stor andel av marklasten, S_k , en konstruksjon må dimensjoneres for. Formfaktorene for et flernivåtak er gitt ved likning 15 og 16 (Standard 2008).

$$\mu_1 = 0,8 \quad (15)$$

$$\mu_2 = \mu_s + \mu_w \quad (16)$$

μ_1 angir andelen av marklasten på den nedre takflaten (antas flat) som følge av vanlig snøfall. En formfaktor på 0,8 gjelder også på den øvre takflaten.

μ_2 tar for seg snø som er distribuert fra den øvre takflaten på den nedre takflaten ved ras (μ_s) og som følge av vind (μ_w). Ved flate tak er formfaktoren, $\mu_s = 0$. Det vil altså si at formfaktoren på den nedre takflaten som følge av distribusjon fra den flate øvre takflaten er $\mu_2 = \mu_w$. Utregningen av formfaktoren, μ_w , er vist i likning 17 (Standard 2008).

$$\mu_w = \frac{b_1 + b_2}{2h} \leq \gamma \frac{h}{S_k} \quad (17)$$

I likning 17 er h høyden mellom den øvre og den nedre takflaten, b_1 og b_2 er breddene av henholdsvis den øvre og den nedre takflaten og γ angir tyngdetettheten til snøen på takflaten. I snølaststandardens er tyngdetettheten til snø eksempelvis gitt til 2 kN/m^3 i beskrivelsen av formfaktoren μ_w .

Formfaktoren μ_w skal benyttes innenfor en lengde, l_s , fra den høyere, sideliggende konstruksjonens vegg. Lengden l_s kalles drivlengden og beregnes etter likning 18 (Standard 2008).

$$l_s = 2h \quad (18)$$

Hvis den nedre takflatens bredde, b_2 , er lengre en drivlengden, l_s , skal formfaktoren $\mu_1 = 0,8$ benyttes på takflaten utenfor utbredelsen av drivlengden, l_s .

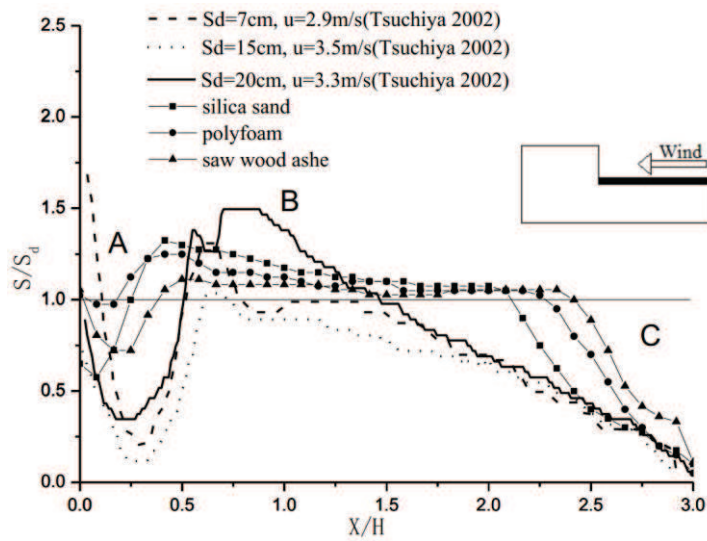
2.3.9 Partikkeltyper til forsøk på snødriv på flernivåtak

Ved forsøk med en modell i vindtunnel tillater i utgangspunktet ikke omstendighetene bruk av ekte snø ved forsøkene. I stedet er det vanlig å benytte seg av partikkelmedier som sagflis, silikasand og polyuretanskum. Polyuretanskum er et vann- og polyuretanplastbasert materiale videre referert til som skumplast. Når snø byttes ut til fordel for andre partikkeltyper er det hensiktsmessig å undersøke skaleringskriteriene. Skaleringskriteriene beskriver hvordan snøens egenskaper er ivaretatt ved bruk av andre partikkelmedier med hensyn på:

- 1) Ruheten under de salterende partiklene og ruheten over de salterende partiklene under et forsøk.
- 2) Forholdet mellom partikkelmediets densitet og luftens densitet.
- 3) Forholdet mellom skjærhastigheten som må til for å løsrive en partikkel fra bakken og partikkelens teoretiske grensefriksjonshastighet.
- 4) Partikkelmediets treghetsegenskaper i forhold til gravitasjon og luftmotstand.
- 5) Hvilken vinkel partikkelmediets drivfonn danner den nedre takflaten på et flernivåtak.
- 6) Partikkelmediets forhold mellom massetransport og tid.

I forbindelse med artikkelen til Xuanyi Zhou (2014, unpublished) ble det utført forsøk hvor skaleringskriteriene til ulike partikkelmedier ble undersøkt. Resultatene viste at skaleringskriteriene var best ivaretatt når forsøkene ble utført med silikasand, se figur 15.

Teori



Figur 15: Fønner på den nedre takflaten i le for vinden på en modell med et flernivåtak ved driv av silikasand, skumplast, sagmugg og snø (Xuanyi Zhou 2014, unpublished).

I figur 15 angis S/S_d på den vertikale aksene ved avstanden, X/H , fra 0 på den horisontale aksene. S/S_d er forholdet mellom den målte dybden og den initielle dybden i partikkelmediet benyttet ved de ulike forsøkene. For eksempel så var S_d ulik ved vindtunneltestene med sagmugg, skumplast og silikasand og testene med snø ute i felten utført av Tsuchiya et al. (2002).

3. Metode og modell

Forsøkene ble utført i en vindtunnel med gjenvinningsfunksjon i «Industrial Aerodynamics Laboratory» (ble forkortet med LAI på portugisisk) ved Universitetet i Coimbra i Portugal. Det skulle utføres forsøk i forbindelse med to gradsoppgaver. I tillegg til forsøk på modell med flernivåtak skulle det utføres forsøk på en modell med solfangere. Modellen ble bygget i felleskap med egne tegninger, men med et utgangspunkt i modellen Tsuchiya et al. (2002) benyttet til sine forsøk.

Før forsøkene kunne igangsettes måtte luftstrømmen som vindtunnelen produserte godkjennes som homogen. For å bestemme strømningsmønsteret på og rundt modellen ble såkalte erosjonstester utført. For å se på potensielle avsetninger mellom takflatene på flernivåtaket ble det utført sandpakkeforsøk/deposisjonsforsøk med forskjellig lengde på takutstikket.

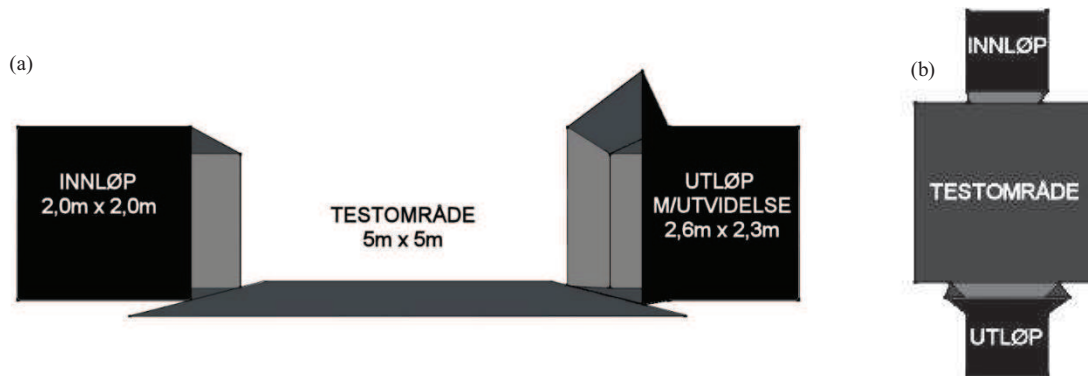
3.1 Bakgrunn for forsøk

Fordelen med forsøk i vindtunnel er at parameterne som vil få noe å si for forsøkene lett kan kontrolleres. Med den riktige programvaren er det uproblematisk å hente ut resultatene fra forsøket og sette de opp til sammenligning i oversiktlige diagrammer og tabeller.

3.2 Karakterisering av vindtunnel

I forsøksrommet var det et innløp og et utløp. Innløpet hadde et tverrsnitt på 2 m x 2 m som luft kom inn til testområdet gjennom. Utløpet var identisk, men med et slags traktformet tverrsnitt (ca. 2,6 m x 2,3 m) nærmest testområdet for større avsugningskapasitet. Luften fra utløpet gikk deretter gjennom en resirkulasjonstunnel like over testområdet og inn i turbinrommet hvor turbinen sugde luft inn i tunnelen igjen. Et forenklet oppsett av tunnelen er vist i figur 16.

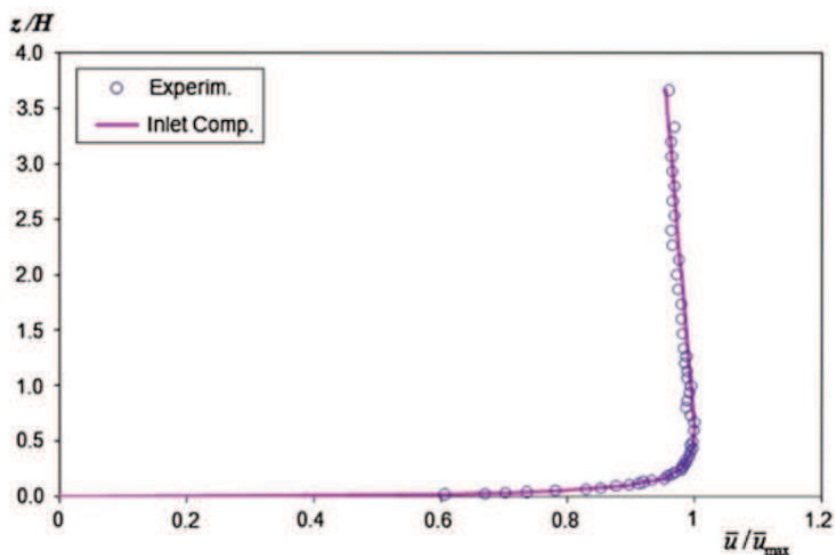
Metode og modell



Figur 16: Forenklet oppsett av innløp, testområde og utløp i vindtunnelen fra a) siden og b) ovenfra.

I forsøksrommet, like ved innløpet stod kontrollkonsollen. Grensesnittet til konsollen bestod av et ampere- og et voltmeter, en timer for å klokke forbruket av turbinen, en hovedbryter for strømmen og en hovedbryter for turbinen, et hjul for å stille hastighet og en måler som oppgav hastigheten til turbinen i revolutions per minute [RPM]. På midten av testområdet, ca 2,5 m over bakken var det montert et oppheng for en laser som målte avstander ned til testobjektet. Ved siden av testområdet var kontrollposten som styrte laseren plassert.

Forsøkene med flernivåtak ble utført i samme vindtunnel som forsøkene til Ferreira (2011). Figur 17 viser vindprofilen som Ferreira utarbeidet til forsøkene sine i vindtunnelen i LAI.



Figur 17: Vindprofil fra vindtunnelen i LAI i forbindelse med forsøkene til Ferreira (2011).

Metode og modell

I figur 17 er z/H forholdet mellom høyden, z , fra bakken til målepunktet og høyden, H , til testobjektet som forsøkene ble utført i forbindelse med. \bar{u}/\bar{u}_{\max} er forholdet med den målte gjennomsnittshastigheten og den høyeste målte gjennomsnittshastigheten. Fra denne figuren kan tykkelsen på grenselaget i vindtunnelen regnes til 75 mm.

Før vindtunnelen ble benyttet til forsøkene ble luftstrømmens uniformhet i innløpet og testområdet undersøkt. Uniformhet forekommer når luftstrømmen har de samme verdiene over et tverrsnitt eller langs en flates bredde og lengde. Ved hjelp av et pitotrør, montert i en forlaget brakket, ble trykkforskjellen lest av over hele innløpets tverrsnitt i et rutenett på 0,25 m x 0,25 m. Lufthastigheten under karakteriseringen av innløpet i vindtunnelen var 10,2 m/s som tilsvarer en turbinhastighet på 300 RPM.

Ved karakteriseringen av testområdet ble luftstrømmen målt ved 0,2 meters høyde når lufthastigheten var 10,2 m/s. Trykkforskjellen ble målt langs den 5 m lange midtlinjen i punkter på 0,25 m fra hverandre. Ved hver 0,25 meter ble det utført tre målinger. En på midtlinjen og to til hver side, 0,25 m fra midtlinjen. Det ble i tillegg utført 6 målinger i utløpet; tre målinger 1 m inn i utløpet og tre målinger 2 m inn i utløpet.

For å bestemme forholdet mellom lufthastighet [m/s] i testområdet og turbinens hastighet [RPM] ble det utført målinger med pitotrør i midten av innløpet ved 0,3 meter og ved 1,0 meters høyde ved 50, 100, 200, 300 og 400 RPM. Ved disse målingene ble et voltmeter benyttet for å oppgi gjennomsnittet av målingene som ble registrert i løpet av 15 sekunder.

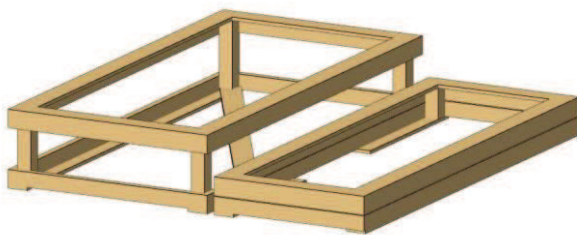
3.3 Utformingen av skalamodellen

Modellens dimensjoner ble oppgitt som et forhold av modellens minste dimensjon, i dette tilfellet den minste modulens høyde, dimensjonen H . Modellen har noen av de samme forholdene som modellen til Tsuchiya et al. (2002), men siden forsøkene som skulle utføres også inkluderte forsøkene med modellen med solfangerne måtte et kompromiss inngås. Derfor ble modellen modifisert til å passe begge gradsoppgavenes behov. Modellens dimensjoner utenom lengden er vist i figur 18.



Figur 18: Skalamodellens dimensjoner i snitt.

I figur 19 er dimensjonene til testobjektet oppgitt i forhold til høyden H . Den største modulen ble bygget med en høyde på $2H$ og en bredde på $4H$. Den minste modulen hadde høyden H og bredden $3H$. Begge modulene var $8H$ lange. Modellens indre konstruksjon er vist i figur 19.



Figur 19: Skalamodellens indre konstruksjon.

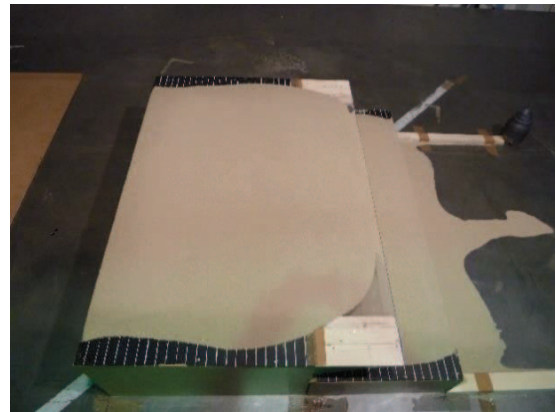
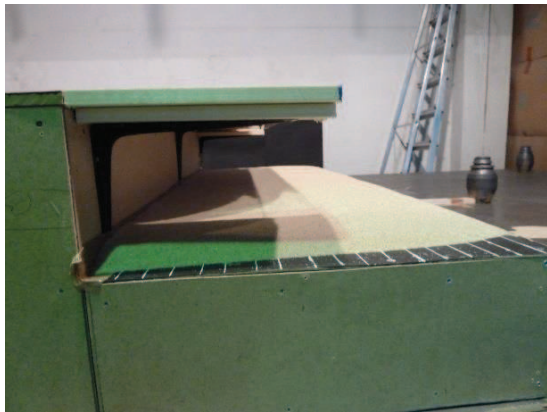
Modellen ble først bygget med $H = 300\text{mm}$. Siden platene, type trefiber kom med dimensjonene $1200\text{ mm} \times 2400\text{ mm}$ i butikk var det mindre behov for kutting ved modellbyggingen. Siden det var ønskelig med resultater som kunne regnes som todimensjonale ga det mening å bygge modellen så bred når innløpet til vindtunnelen hadde en bredde på 2000 mm .

Etter et testforsøk ble det klart at resultater fra forsøk med denne modellen ikke kunne sees på som todimensjonale. For at lasermåling ved senere forsøk skulle være mulig ble modellens dimensjoner halvert og modellen utgjorde nå $1/8$ av hva den var initielt. H , den minste modulens høyde, var nå lik 150 mm .

Metode og modell

Det var fortsatt håp om todimensjonale målinger og for å oppnå dette ble det installert to plater på høykant på hver side av modellen med høyde 600 mm og lengde 2400 mm på lignende vis som hos Xuanyi Zhou (2014, unpublished). Sideplatene ble montert slik at den korte siden gikk i flukt med modellens første kontaktflate i luftstrømmen. Følgelig ble da 1350 mm av hver plate hengende ut nedstrøms fra modellen. Siden plateendene sannsynligvis ville begynne å blafre ved høye hastigheter ble de festet sammen med en list bakerst, nede ved gulvet.

Takutsticket som skulle være med i de ulike konfigurasjonene bestod av en 8 mm tykk plexiglassplate med tre vinkler skrudd til for montering på modellen. Glippen mellom den øvre takflaten og takutsticket ble tapet over for å unngå et oppsamlingssted for sandkorn under forsøkene. Bilder av modellen med et takutstikk på 22,5 cm er vist i figur 20.



Figur 20: Bilder tatt etter forsøk med 225 mm takutstikk.

3.4 Erosjonsforsøkene

Metoden for kartlegging av luftstrømmønstre ved hjelp av erosjonen av partikler er delvis beskrevet av Ferreira (2011) som videre har referert til Viegas og Borges (1986). Denne metoden er heretter referert til som et erosjonsforsøk.

Det ble utført seks erosjonsforsøk; et forsøk uten takutstikk, et med 22,5 cm langt takutstikk og et med 45,0 cm langt takutstikk over den nedre flaten. Disse tre forsøkene ble utført med den nedre flaten på le og lo side av vinden

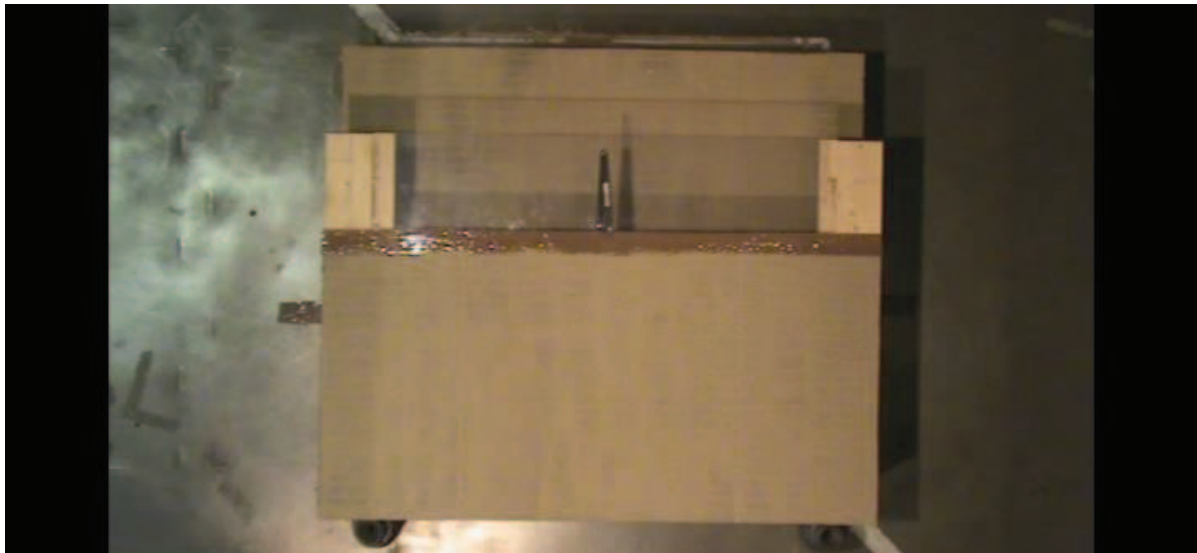
Hvert forsøk ble forberedt med en posisjonering. Videokameraet som skulle benyttes til dokumentasjon av forsøket ble satt opp over modellen. Modellen ble plassert slik at alle

Metode og modell

sidene kom godt inn i bildet til videokameraet. Etter dette ble mål tatt og merker laget på gulvet i kritt for at modellen skulle stå likt i luftstrømmen ved hvert forsøk. Modellens posisjon ble 153,7 cm fra innløpet med modellens midtlinje langs midtlinjen til testområdet. Dette gjaldt både når den nedre takflaten var i le og i lo for vinden.

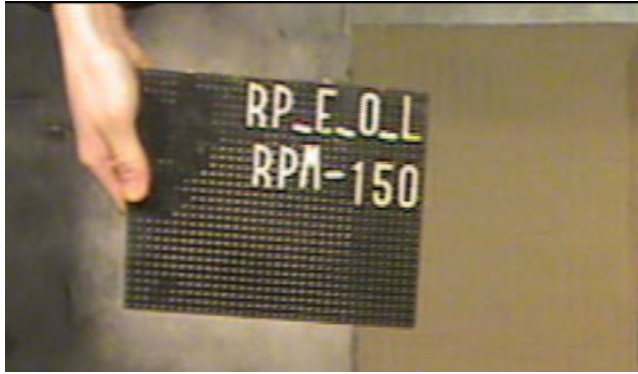
Deretter ble den øvre og den nedre takflaten dekket med et tynt lag med sand. Sanden ble påført med en håndholdt «plog» med en åpning under på 1 mm. Dette ble gjort for at sanden påført skulle ha lik tykkelse over hele flaten.

Takutstikket som ble designet til forsøkene med utstikk ble laget med gjennomsiktig pleksiglass. Siden takutstikket var gjennomsiktig kom videokameraet godt til for dokumentasjon av den nedre takflaten. Et forsøk med 22,5 cm takutstikk er riktig posisjonert og forberedt med et tynt lag sand i figur 21.



Figur 21: Bilde av et forsøk klar til igangsettelse.

Under forsøket ble turbinens hastighet satt til 150 RPM og deretter økt til 175, 200, 225, 250, 275, 300, 325, 350 og 375 RPM. Etter hver økning ble tiden tatt til 2 minutter. Når 2 minutter hadde passert ble hastigheten registrert med skilt i videoklippet. Ved å skilte hastigheten visste den som tok ut bildene fra filmen ved hvilket tidspunkt dette skulle gjøres. Et eksempel på en «skilting» under et erosjonsforsøk er vist i figur 22.



Figur 22: Skilting ved 150 RPM under et forsøk.

I figur 21 er det et bilde av testobjektet ovenfra før et forsøk ble igangsatt. Dette forsøket, forsøk RP_E_22,5_W og forsøk RP_E_45_W, ble forberedt uten å spre sand på selve takutstikket. Dette var nødvendig for å kunne dokumentere hva som skjedde på den nedre takflaten.

Formålet med å ta ut bilder fra filmen som ble tatt opp under forsøket var for å dokumentere nøyaktig hvor det var og ikke var sand ved de ulike hastighetene. Bildene som ble plukket fra videoklippet ved de ulike hastighetene ble først lagt over hverandre med forskjellig farge i Paintshop Pro 8. Fargediagrammene, heretter referert til som erosjonsdiagram i plan, ble deretter importert inn i Grapher 6 hvor de fikk tildelt akser. Med digitale akser i erosjonsdiagrammene i plan kunne koordinater hentes ut i punktene som skilte de ulike hastighetene og verdiene ble satt i grafer. Erosjonstendensene ved de forskjellige konfigurasjonene ble klarere slik. I tabell 1 er erosjonsforsøkene som ble utført presentert med forsøksnavn og hvilke forsøksparametre som gjaldt.

Tabell 1: Liste av erosjonsforsøk med forklaring av gjeldende parametere.

Erosjonsforsøk	
Navn	Forklaring
RP_E_0_L	Roof projection_Erosion_Length of roof projection = 0 cm_Leeward
RP_E_22,5_L	Roof projection_Erosion_Length of roof projection = 22,5 cm_Leeward
RP_E_45_L	Roof projection_Erosion_Length of roof projection = 45 cm_Leeward
RP_E_0_W	Roof projection_Erosion_Length of roof projection = 0 cm_Windward
RP_E_22,5_W	Roof projection_Erosion_Length of roof projection = 22,5 cm_Windward
RP_E_45_W	Roof projection_Erosion_Length of roof projection = 45 cm_Windward

3.5 Deposisjonsforsøkene

Metoden beskrevet herunder er delvis hentet fra metoden som Xuanyi Zhou (2014, unpublished) praktiserte i sine forsøk. Sandens ivaretagelse av skaleringskriteriene er beskrevet i kapittel 2.3.9 ved hjelp av funnene fra forsøkene hans.

Oppsettet, med hensyn på modellens orientering i vinden og lengde på takutstikk, i deposisjonsforsøkene var de samme som for erosjonsforsøkene. Flernivåtaket alene, flernivåtaket med et takutstikk på 22,5 cm og flernivåtaket med et takutstikk på 45 cm med den nedre flaten på le og lo side av vinden, i alt 6 forsøk. Det ble ført på et tykkere lag med sand til denne typen forsøk. Med selvlagde lister og en lang stålstav ble tykkelsen på sandlaget ca 22 mm. Sandlagtykkelsen ble økt for at mengden på modellen skulle være målbar med laser etter at forsøket var utført.

Før forsøket ble initiert ble modellen posisjonert etter de samme retningslinjene som for erosjonsforsøkene. Modellen ble så målt opp med en avstandslaser slik at en T0-profil kunne lages til sammenligning med avstandsmålingene som skulle utføres med laser etter at forsøkene var over og sanden erodert bort. Forkortelsen «T0» betyr at tiden var lik 0 og ble benyttet i forbindelse med at en måling av modellen ble utført før modellen ble eksponert for vinden. Målingen som ble utført av modellen etter at forsøket var over ble kalt en T6-profil eller – måling. Laseren ble operert ved hjelp av et Windows XP basert program utviklet av Professor Almerindo Ferreira ved University of Coimbra. Dette programmet styrte laseren ved hjelp av en forlaget lesefil laget i Microsoft Excel og overført til Notepad. Hver avlesning ble utført ved 25 mm mellomrom.

Sanden på modellen skulle være uforstyrret opp til en turbinhastighet på 333 RPM. For å oppnå dette ble en plate som var 600 mm høy og 2400 mm bred benyttet til å skjerme modellen fra den økende lufthastigheten. Når turbinhastigheten nådde 333 RPM ble platen flyttet ut av luftstrømmen og tiden ble tatt til 6 minutter. Etter at 6 minutter hadde gått ble platen satt foran modellen igjen og turbinhastigheten senket til 0 RPM. Nå gjenstod det bare å måle opp sandtykkelsen med laser og samme lesefil som ble benyttet til å måle den initielle sandtykkelsen. Denne avlesningen ble som sagt kalt T6-profilen eller -målingen.

Laseravstandene fra T0- og T6-målingene ble behandlet slik at de kunne presenteres som sandlagtykkelser og endringer i sandlagtykkelse. I tabell 2 er deposisjonsforsøkene som ble utført presentert med forsøksnavn og hvilke forsøksparametre som gjaldt.

Metode og modell

Tabell 2: Liste av deposisjonsforsøk med forklaring av gjeldende parametere.

Deposisjonsforsøk	
Navn	Forklaring
RP_D_0_L	<i>Roof projection_Deposition_Length of roof projection = 0 cm_Leeward</i>
RP_D_22,5_L	<i>Roof projection_Deposition_Length of roof projection = 22,5 cm_Leeward</i>
RP_D_45_L	<i>Roof projection_Deposition_Length of roof projection = 45 cm_Leeward</i>
RP_D_0_W	<i>Roof projection_Deposition_Length of roof projection = 0 cm_Windward</i>
RP_D_22,5_W	<i>Roof projection_Deposition_Length of roof projection = 22,5 cm_Windward</i>
RP_D_45_W	<i>Roof projection_Deposition_Length of roof projection = 45 cm_Windward</i>

4. Resultat

I vindtunnelen ved Industrial Aerodynamics Laboratory (LAI) ble det utført en karakterisering av tunnelen. Karakteriseringen ble utført ved å måle trykkforskjeller over tunnelens innløp og testområde. Deretter ble trykkforskjellen gjort om til hastigheter (lettere å forholde seg til enn trykkforskjellene) for å se om luftstrømmen var homogen.

De ulike hastighetene som ble benyttet i forsøkene ble styrt av vindtunnelens turbinhastighet oppgitt i RPM. Derfor ble det avslutningsvis utført et forsøk for å bestemme sammenhengen mellom turbinhastigheten og lufthastighet i vindtunnelen oppgitt i m/s.

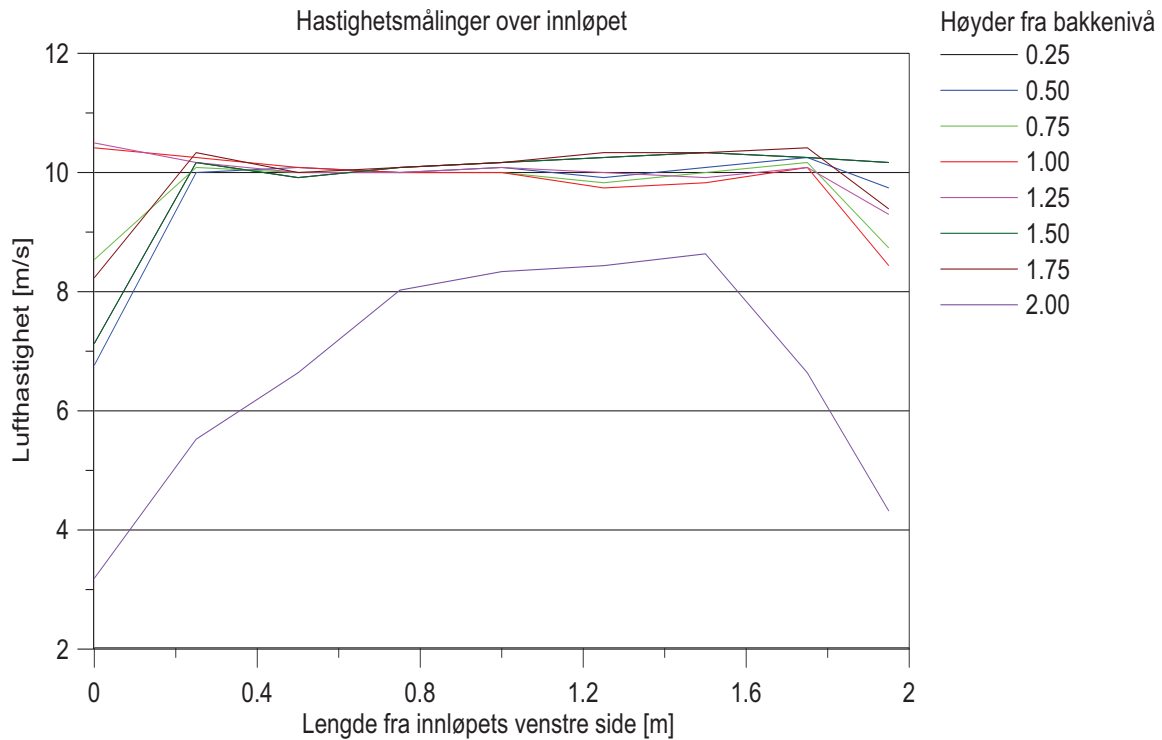
For å bestemme luftstrømmene på flernivåtakets flater ble det utført seks erosjonsforsøk i tunnelen ved LAI. Ett erosjonsforsøk ble utført for hver konfigurasjon.

For å se på partikkelavsetninger mellom den øvre og den nedre takflaten ble det utført seks depositionsforsøk hvor de samme parameterne som for erosjonsforsøkene gjaldt.

4.1 Karakterisering av vindtunnelen

Hastighetsmålingene i vindtunnelens innløp og testområde er vist i figur 23 og 24. Tilhørende data er fra henholdsvis tabell V.1 og tabell V.2 i vedleggskapittelet. Fargede grafer angir målehøyde fra innløpets bakkenivå i figur 23. I figur 24 angir de fargede grafene i hvilken avstand fra midtlinjen målingen er gjort ved. Den vertikale akse angir lufthastigheter og den horisontale akse angir avstanden. For figur 23, avstanden fra innløpets venstre side og for figur 24, avstanden fra innløpet.

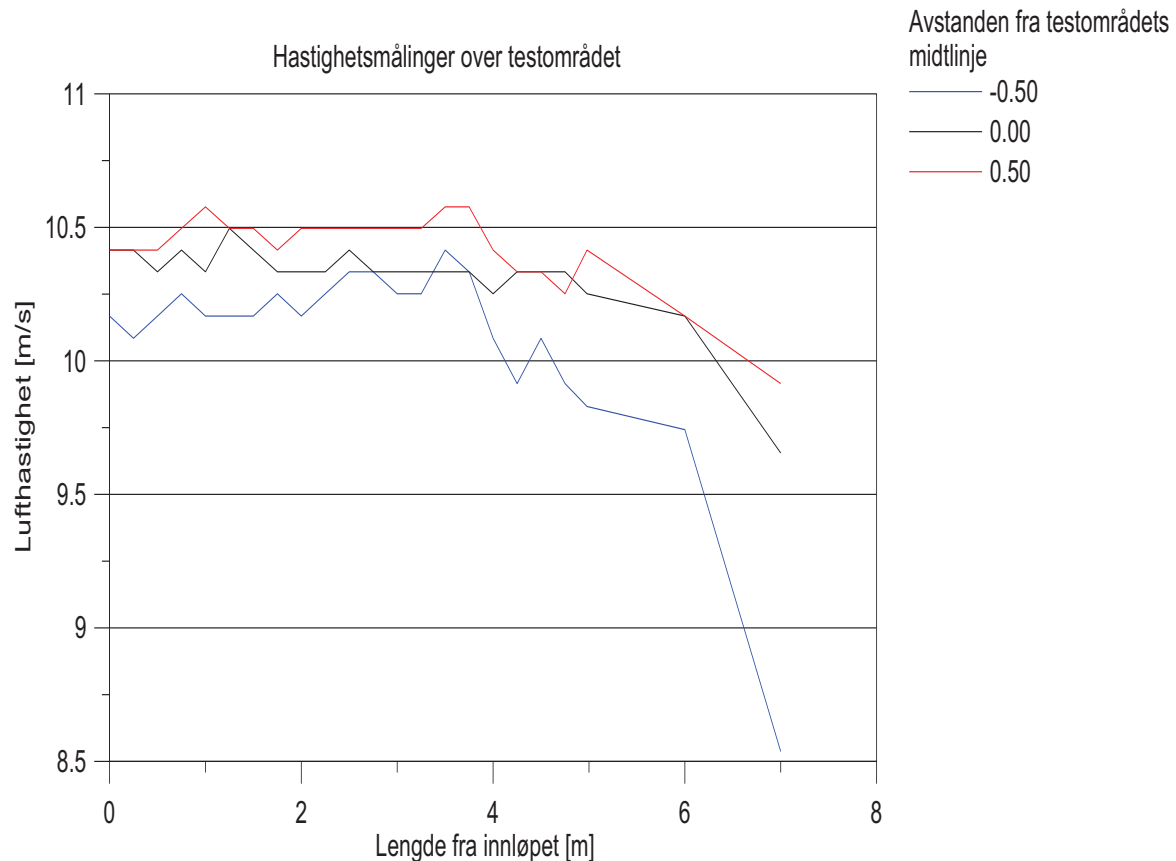
Resultat



Figur 23: Hastighetsmålinger over innløpets tverrsnitt i vindtunnelen.

Grafene i figur 23 virker å være godt samlet ved lufthastigheten 10 m/s i intervallet 0,3 m – 1,8 m med en litt større spredning i intervallet 1,0 m – 1,8 m. Hastighetsmålingene ved 2,0 m virker å være 1,5 m/s lavere enn hastighetsmålingene gjort ved de andre høydene. En annen tendens som kommer godt fram er hastighetsforskjellen som opptrer ut på sidene av innløpet i alle høyder og spesielt ved 2,0 m. Hastighetsforskjellen virker imidlertid å være større på venstre side enn på høyre side. På venstre side øker hastigheten i høydene 1,0 m og 1,25 m, mens de minker på høyre side.

Resultat

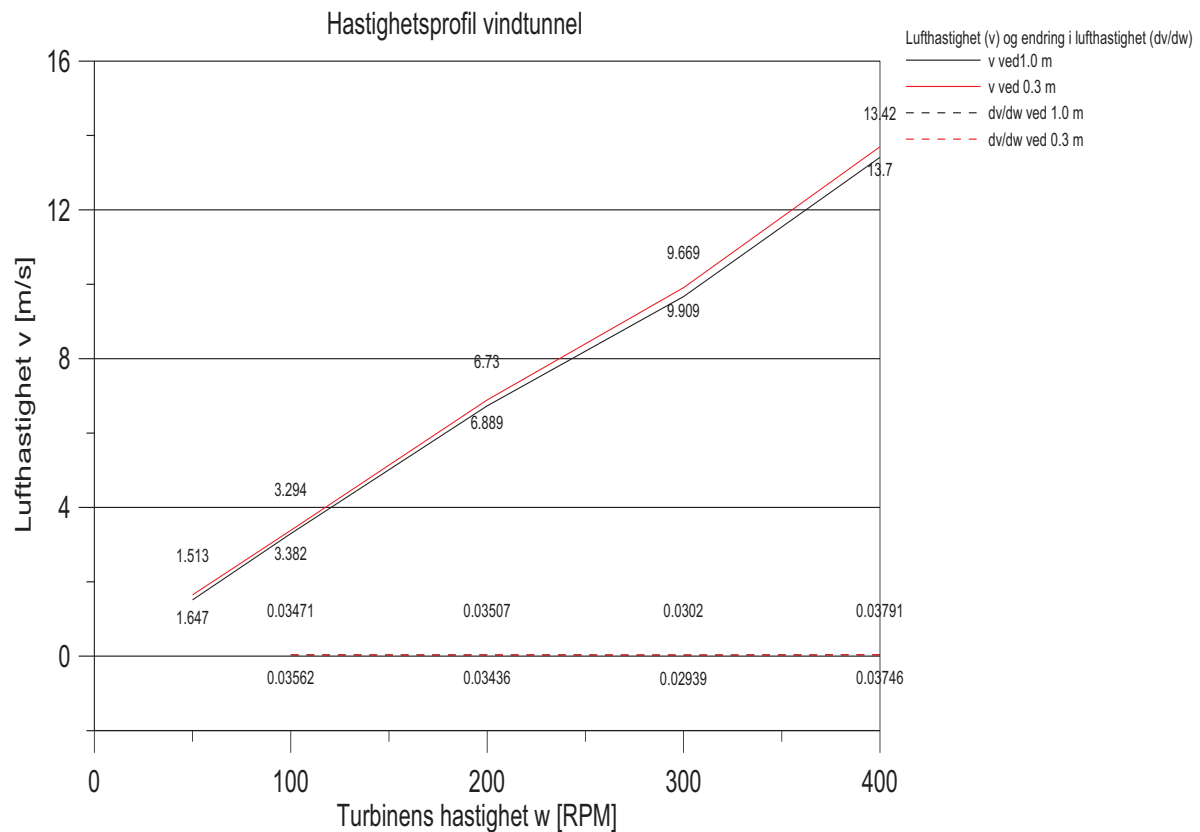


Figur 24: Hastighetsmålinger over testområdet i vindtunnelen.

Hastighetsmålingene som ble utført over testområdet og benyttet i diagrammet i figur 24 varierer i hovedsak mellom hastighetene 10,0 m/s og 10,6 m/s. Ved å betrakte grafene kun mellom 0 m og 5 m så vil den gjennomsnittlige hastigheten 0,5 m foran senterlinjen være ca 10,2 m/s. På senterlinjen vil den gjennomsnittlige hastigheten ligge mellom 10,3-10,4 m/s og 0,5 m bak senterlinjen er den gjennomsnittlige hastigheten like under 10,5 m/s. Den gjennomsnittlige hastigheten på testområdet varierer altså med 0,3 m/s i favør til luftstrømmen bak senterlinjen. Ved 5 m-merket stuper lufthastigheten på samtlige grafer. På senterlinjen og 0,5 m bak senterlinjen virker hastigheten å minke med ca 0,8 m/s. Lufthastigheten virker å minke betraktelig mer 0,5 m foran senterlinjen. Fra den gjennomsnittlige hastigheten 10,2 m/s i intervallet 0– 5 m til 8,5 m/s ved 7 m-merket. En forskjell på 1,7 m/s. Lufthastigheten 0,5 m foran senterlinjen virker å minke helt fra 4,5 m fra innløpet.

Resultat

Avslutningsvis ble det utført et forsøk for å bestemme sammenhengen mellom turbinens hastighet og lufthastigheten i vindtunnelen. Til disse målingene ble pitotrøret tatt i bruk. De avleste verdiene ble regnet om fra trykkforskjeller til hastigheter ved hjelp av likning 9. Målingene er vist i figur 25 hvor turbinhastigheten, w [RPM], ligger langs den horisontale aksene og lufthastigheten, v [m/s], er gitt på den vertikale aksene. Det ble utført to målinger: Den røde linjen representerer hastighetsmålingene ved 0,3 m over bakkenivå og den røde stiplede linjen er endringen i hastighetsmålingene. Målingene vises under grafene. Den svarte linjen representerer hastighetsmålingene som ble utført 1,0 m over bakkenivå med en tilhørende endring i hastighetsmålingene ved den svarte stiplede linjen. Målingsverdiene er gitt over grafene. Grafene i figur 25 er tegnet fra verdiene i tabell V.3 i vedlegget.



Figur 25: Vindhastigheten, v [m/s], i vindtunnelen ved økende turbinhastighet, w [RPM].

Hastighetsmålingene som ble utført viser liten variasjon både ved 0,3 m og 1,0 m over bakken. Endringen i lufthastighet, dv , på endringen i turbinhastighet, dw , er gitt ved de stiplede linjene som virker å være nesten konstant når turbinhastigheten, w , øker.

4.2 Erosjonsforsøkene

Resultatene fra forsøkene er blitt behandlet i erosjonsdiagrammer i plan og i snitt hvor vinden alltid kommer fra venstre og mot høyre.

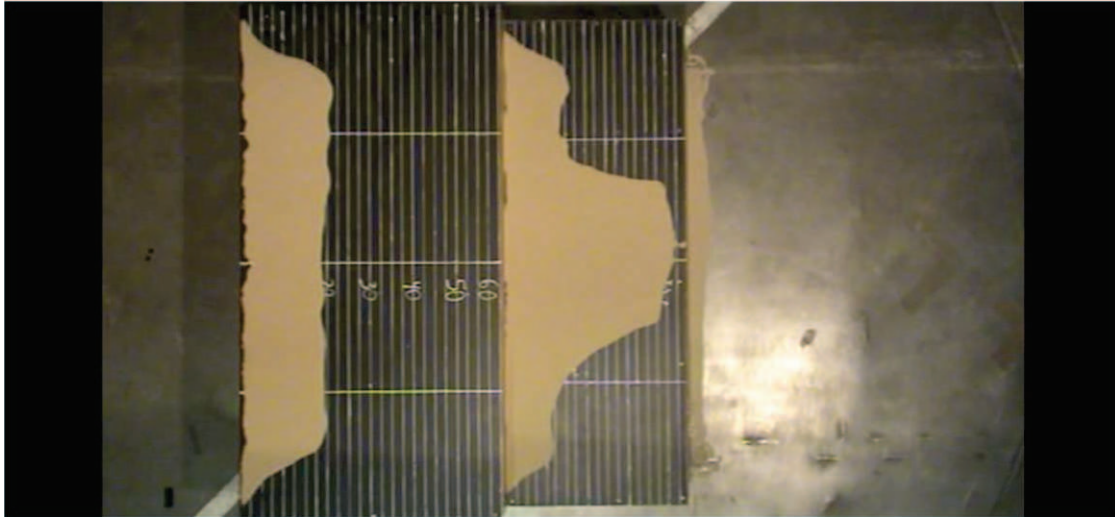
Erosjonsdiagram i plan (perspektiv ovenfra) viser sandutbredelsen på takflatene ved økende hastigheter. Lyserosa viser til sand ved 5,10 m/s, rosa til 5,95 m/s, mørkerosa til 6,80 m/s, lilla til 7,65 m/s, mørkeblå til 8,50 m/s, blå til 9,35 m/s, turkis til 10,20 m/s, grønn til 11,05 m/s, gul til 11,90 m/s og rød angir den siste og høyeste hastigheten forsøkene ble kjørt ved som var 12,75 m/s. Diagrammet kan og betraktes slik at et farget område er erodert sand fra en hastighet til en annen. For eksempel, mellom hastighetene 11,90 m/s og 12,75 m/s ble sanden på det gule området erodert vekk.

Erosjonsdiagram i snitt består av en vertikal akse som viser lufthastigheten og en horisontal akse som viser forholdet x/L , lengden, x , fra modellens venstre side i profil delt på modellens totallengde, L (1050 m). Dette diagrammet er laget ut ifra hvert forsøks erosjonsdiagram i plan. Diagrammet angir hvor det ved de forskjellige hastighetene lå sand på flernivåtakets senterlinje under forsøket. Som en ekstra forklaring til diagrammet er profilen av modellen i svart plassert under erosjonsdiagrammet med en hvit vindpil.

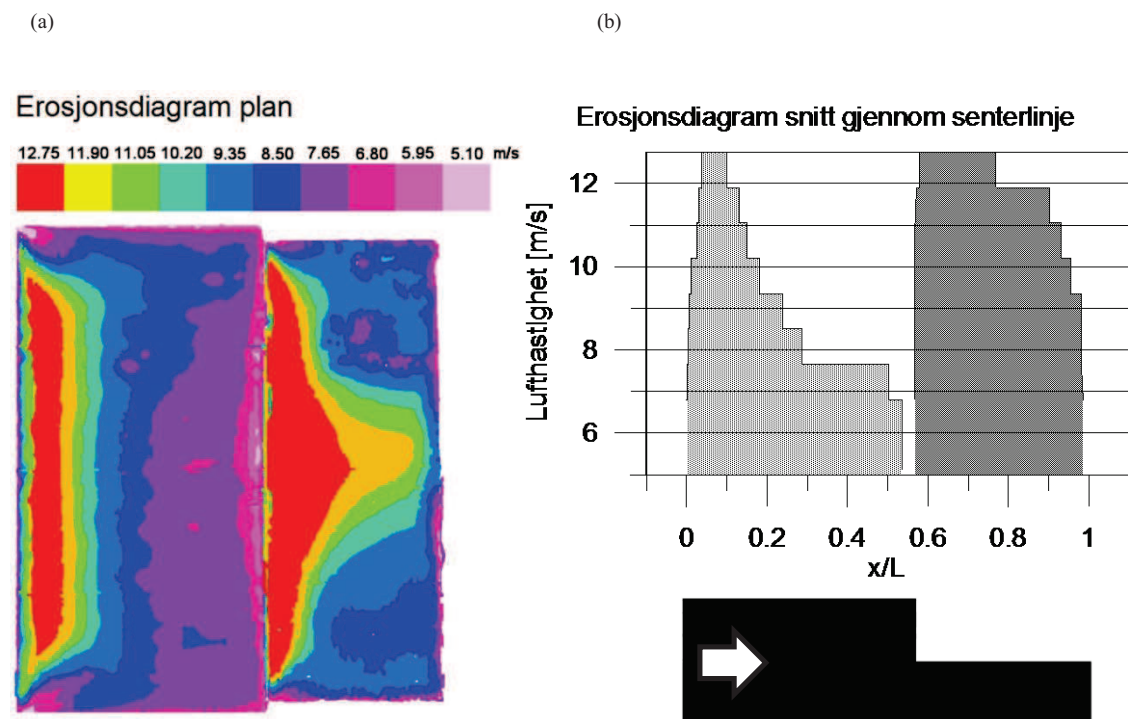
Nedenfor følger resultatene fra erosjonsforsøkene i sine respektive kapitler. Forsøkene med den nedre takflaten i le for vinden, det vil si forsøk RP_E_0_L, RP_E_22,5_L og RP_E_45_L er presentert først, deretter følger forsøkene med den nedre takflaten i lo for vinden, altså forsøk RP_E_0_W, RP_E_22,5_W og RP_E_45_W.

4.2.1 RP_E_0_L

I avsnittet nedenfor er bildene og de behandlede resultatene fra forsøk RP_E_0_L. Dette er et erosjonsforsøk uten takutstikk med den nedre takflaten i le for vinden. Figur 26 viser bilde fra forsøket når turbinhastigheten var 300 RPM som tilsvarer en vindhastighet rundt 10,2 m/s. I figur 27 vises resultatene i erosjonsdiagrammer a) i plan og b) i snitt gjennom senterlinjen med vinden kommende inn fra venstre. Den gråskraverte og svartskraverte grafen viser sandlagutbredelsen på henholdsvis den øvre og den nedre takflaten ved hastighetene 5,1 m/s til 12,75 m/s. Som en ytterligere forklaring til erosjonsdiagrammet b) i snitt gjennom senterlinjen er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammet. Verdiene til diagrammet i figur 27 er hentet fra tabell V.4 i vedlegget.



Figur 26: Bilde fra forsøk RP_E_0_L ved turbinhastighet 300 RPM. Vinden kommer inn mot modellen fra venstre.



Figur 27: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for RP_E_0_L.

Sanden på den øvre takflaten i figur 27 a) virker å ha erodert jevnt mot venstre over hele flatens lengde. Mellom hastighetene 7,65 m/s og 8,5 m/s (det blåfargede arealet) eroderte sanden på den øvre takflaten noe ulikt, men denne ulikheten ble tatt igjen når lufthastigheten

Resultat

økte ytterligere. Sanden eroderte som sagt relativt likt over hele bredden på den øvre takflaten, men ikke på hjørnene. Her virker det som om sanden eroderte noe tidligere, ved lavere hastigheter.

Når sanden begynte å erodere er bedre beskrevet i erosjonsdiagrammet b) i snitt. Mellom lufthastighetene 6,80 m/s og 7,65 m/s forekom den første erosjonen på den øvre takflaten. På den venstre siden av erosjonsgrafen er erosjonen relativt liten helt opp til 12,75 m/s. På høyre siden danner sandens utbredelse ved økende hastigheter en eksponentiell kurve mellom lufthastighetene 7,65 m/s og 12,75 m/s.

Første tydelige tegn til erosjon på den nedre takflaten langs senterlinjen forekom mellom 9,35 m/s og 10,20 m/s. Sanden eroderte jevnt langs senterlinjen når lufthastigheten økte, men med et byks mellom 11,90 m/s og 12,75 m/s. Ved betraktning av erosjonsdiagrammet a) i plan er endringen i sandlaget på den nedre takflaten noe annerledes når fokus forskyves fra senterlinjen. Ut på sidene eroderte sanden tidligere, ved lavere hastigheter enn langs modellens senterlinje.

Erosjonen som helhet over modellen var ganske symmetrisk om modellens senterlinje.

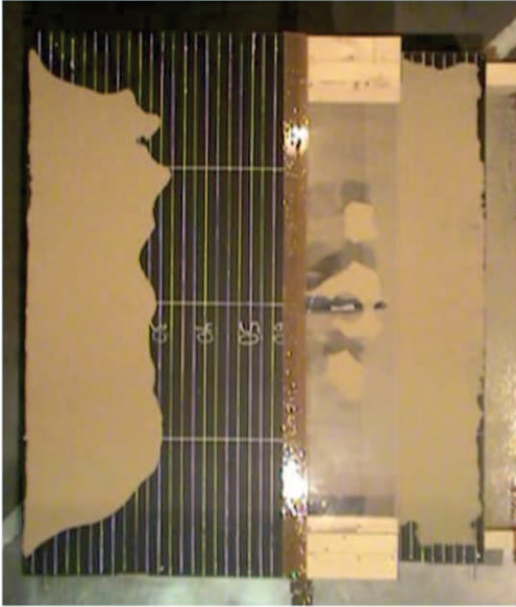
4.2.2 RP_E_22,5_L

I avsnittet nedenfor er bildene og de behandlede resultatene fra forsøk RP_E_22,5_L. Dette er et erosjonsforsøk med et 22,5 cm langt takutstikk med den nedre takflaten i le for vinden.

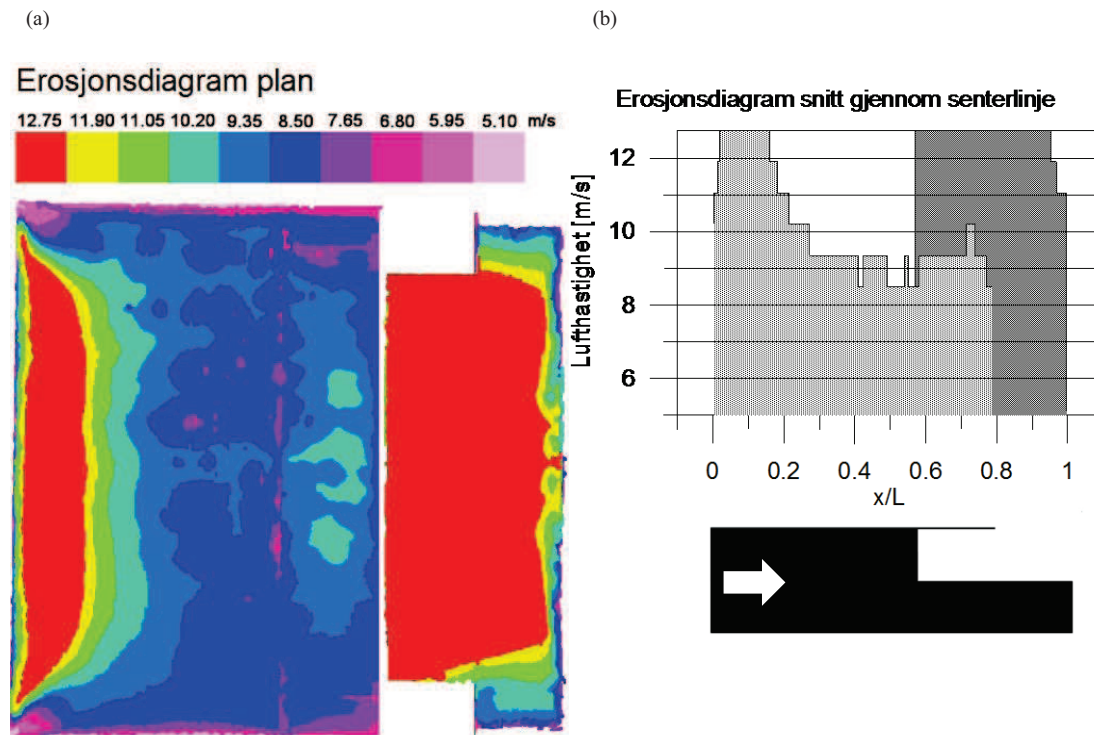
Figur 28 viser bilde fra forsøket når turbinhastigheten var 300 RPM som tilsvarer en vindhastighet rundt 10,2 m/s. I figur 29 vises resultatene i erosjonsdiagrammer a) i plan og b) i snitt gjennom senterlinjen med vinden kommende inn fra venstre. Den gråskraverte og svartskraverte grafen viser sandlagutbredelsen på henholdsvis den øvre og den nedre takflaten ved hastighetene 5,1 m/s til 12,75 m/s. Som en ytterligere forklaring til erosjonsdiagrammet i snitt gjennom senterlinjen er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammet. Erosjonsdiagrammene i figur 29 er tegnet fra verdiene i tabell V.5 i vedlegget.

Den øvre takflaten i erosjonsdiagrammet i plan er bredere for forsøk RP_E_22,5_L enn for forsøk RP_E_0_L på grunn av det 22,5 cm lange takutstikket som utvider takflaten.

Resultat



Figur 28: Bilde fra forsøk RP_E_22,5_L ved turbinhastighet 300 RPM.



Figur 29: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for RP_E_22,5_L.

Resultat

De samme trekkene gikk igjen i dette forsøket som for forsøk RP_E_0_L. På den øvre takflaten eroderte sanden relativt likt over hele flatens bredde, men sanden eroderte ved lavere hastighet på kortsidene enn lenger inn på takflaten. Mellom hastighetene 8,50 m/s og 9,35 m/s eroderte sanden vekk fra den høyre langsiden av den øvre takflaten og mot venstre. Imidlertid eroderte ikke sanden på takutstikket. Her ble sanden liggende selv ved 10,20 m/s. Dette kommer bedre frem på erosjonsdiagrammet a) i plan enn b) i snitt gjennom senterlinjen. Fenomenet er like fullt synlig i erosjonsdiagrammet b) i snitt gjennom senterlinjen. På begge takflatene begynte sanderosjonen ved høyere hastigheter enn under forsøk RP_E_0_L og sandens utbredelse ved økende hastigheter dannet en eksponentiell kurve opp mot 12,75 m/s.

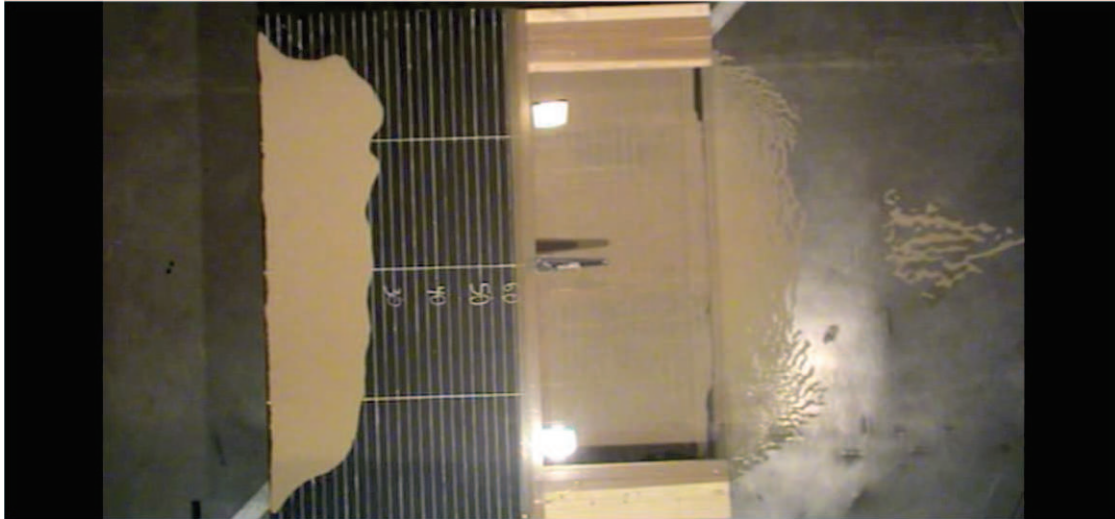
Erosjonen startet tidligere på kortsidene på den nedre takflaten akkurat som på den øvre takflaten. Denne gangen var ikke sanderosjonsforskjellen til stedet hele veien fra senterlinjen og ut til kortsidene som ved forsøk RP_E_0_L. I stedet ble sanden liggende helt ut til den høyre langsiden nesten over hele flatens lengde opp til 12,75 m/s.

Sanden ser ut til å ha erodert relativt symmetrisk om modellens senterlinje under hele forsøkets gang.

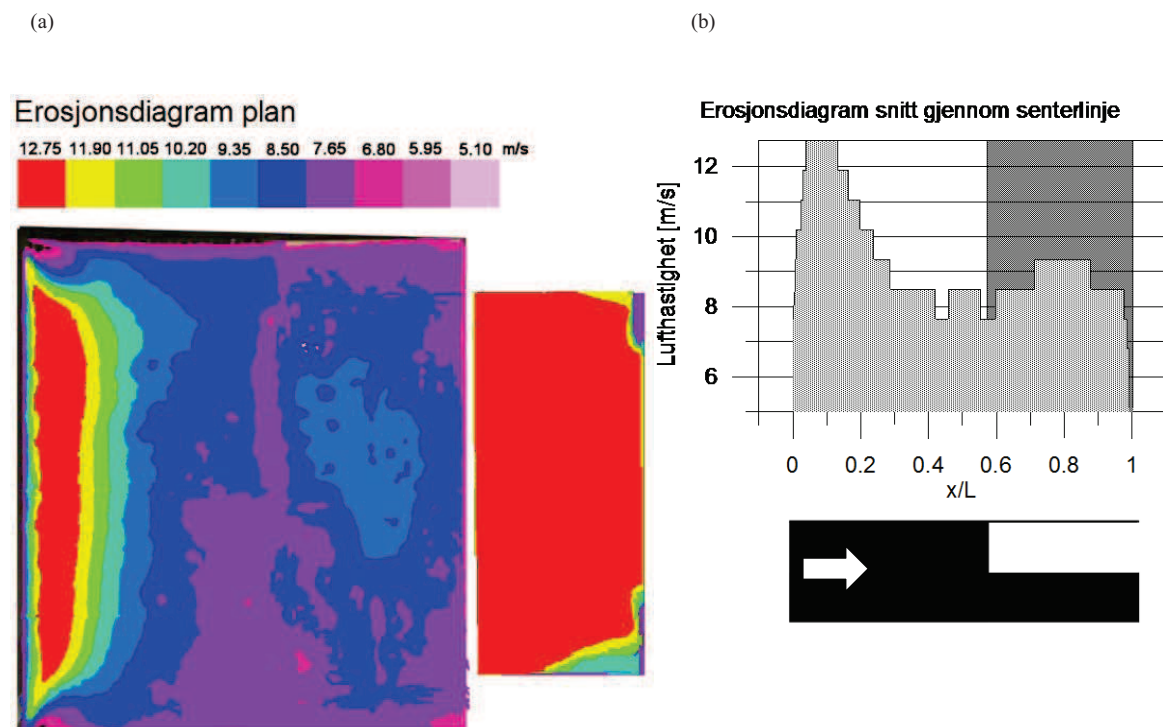
4.2.3 RP_E_45_L

I avsnittet nedenfor er bildene og de behandlede resultatene fra forsøk RP_E_45_L. Dette er et erosjonsforsøk med et 45 cm langt takutstikk med den nedre takflaten i le for vinden. Figur 30 viser bilde fra forsøket når turbinhastigheten var 300 RPM som tilsvarer en vindhastighet rundt 10,2 m/s. I figur 31 vises resultatene i erosjonsdiagrammer a) i plan og b) i snitt gjennom senterlinjen med vinden kommende inn fra venstre. Den gråskraverte og svartskraverte grafen viser sandlagutbredelsen på henholdsvis den øvre og den nedre takflaten ved hastighetene 5,1 m/s til 12,75 m/s. Som en ytterligere forklaring til erosjonsdiagrammet b) i snitt gjennom senterlinjen er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammet. Erosjonsdiagrammet b) i snitt i figur 31 er hentet fra tabell V.6 i vedlegget.

Den øvre takflaten i erosjonsdiagrammet a) i plan er bredere for forsøk RP_E_45_L enn for forsøk RP_E_0_L på grunn av det 45 cm lange takutstikket som utvider takflaten.



Figur 30: Bilde fra forsøk RP_E_45_L ved turbinhastighet 300 RPM.



Figur 31: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for forsøk RP_E_45_L.

Sanden eroderte ved lav hastighet på sidene av modellen både på den øvre og den nedre takflaten. På den øvre takflaten var det tegn til erosjon etter 7,65 m/s lengre inn på modellen.

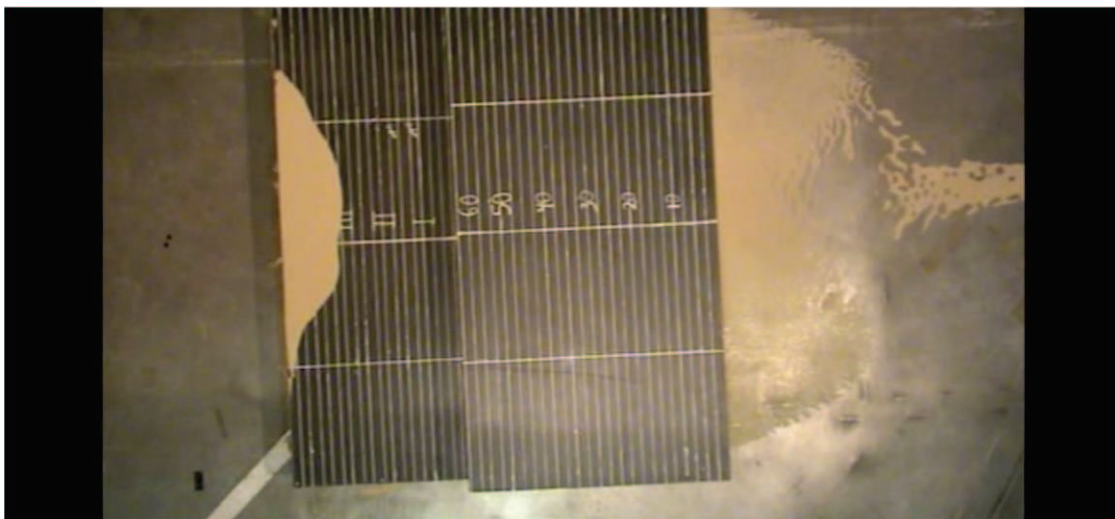
Resultat

Sanden eroderte litt skjevt opp til neste hastighet som var 8,50 m/s. Som ved forsøk RP_E_22,5_L eroderte ikke sanden på takutstikket selv om sanden eroderte på den høyre langsiden til den øvre takflaten, den ble liggende litt lenger. Etter 8,5 m/s eroderte sanden relativt likt over hele flatens lengde, men sandlagets bredde så ut til å øke over senterlinjen og minke under når hastigheten økte. Store deler av den nedre takflaten var upåvirket av den høye lufthastigheten da sanden ikke eroderte selv ved 12,75 m/s.

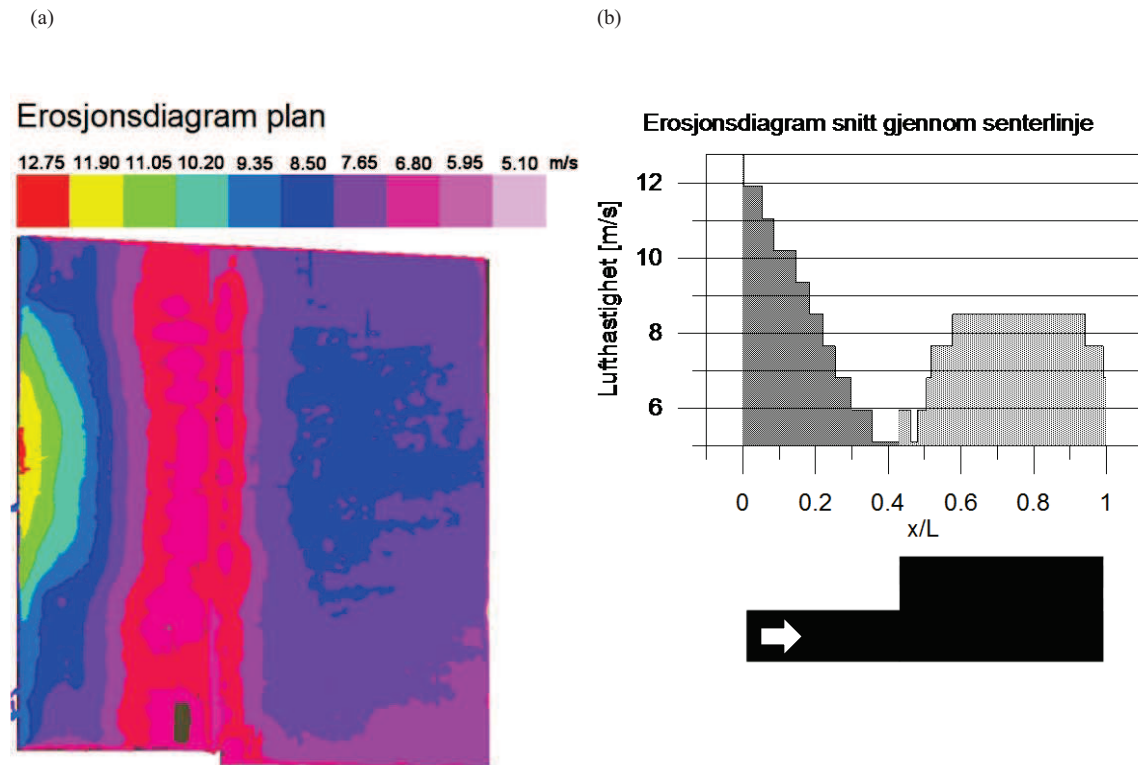
I erosjonsdiagrammet a) i plan i figur 31 ser sanden ut til å ha erodert litt usymmetrisk om flernivåtakets senterlinje.

4.2.4 RP_E_0_W

I avsnittet nedenfor er bildene og de behandlede resultatene fra forsøk RP_E_0_W. Dette er et erosjonsforsøk uten takutstikk med den nedre takflaten fullt eksponert for vinden. Figur 32 viser bilde fra forsøket når turbinhastigheten var 300 RPM som tilsvarer en vindhastighet rundt 10,2 m/s. I figur 33 vises resultatene i erosjonsdiagrammer a) i plan og b) i snitt gjennom senterlinjen med vinden kommende inn fra venstre. Den gråskraverte og svartskraverte grafen viser sandlagutbredelsen på henholdsvis den øvre og den nedre takflaten ved hastighetene 5,1 m/s til 12,75 m/s. Som en ytterligere forklaring til erosjonsdiagrammet b) i snitt gjennom senterlinjen er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammet. Verdiene til erosjonsdiagrammet b) i snitt i figur 33 er hentet fra tabell V.7 i vedlegget.



Figur 32: Bilde fra forsøk RP_E_0_W ved turbinhastighet 300 RPM.



Figur 33: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for forsøk RP_E_0_W.

I forsøk RP_E_0_W ser erosjonen ut til å ha startet umiddelbart på begge takflatene. På den nedre og den øvre takflaten så sandlaget på flaten ut til å smalne tilnærmet konstant ved hver fartsøkning på 0,85 m/s. Ved 12,75 m/s var det kun en liten stripe av sand helt inntil den venstre langsiden på den nedre takflaten og ved 9,35 m/s var all sanden på den øvre takflaten erodert bort. Forøvrig så sandlaget ut til å smalne relativt jevnt langs hele langsiden på den nedre takflaten, men med en liten breddeforskjell fra flatens senterlinje og ut på kortsidene. Erosjonsforskjellen på hjørnene i forhold til lengre inn på flatene kom ikke like tidlig fram som ved forsøkene når den nedre takflaten var i le for vinden. Sandlaget på den øvre takflaten ble smalere i lengde- enn i bredderetningen når lufthastigheten økte.

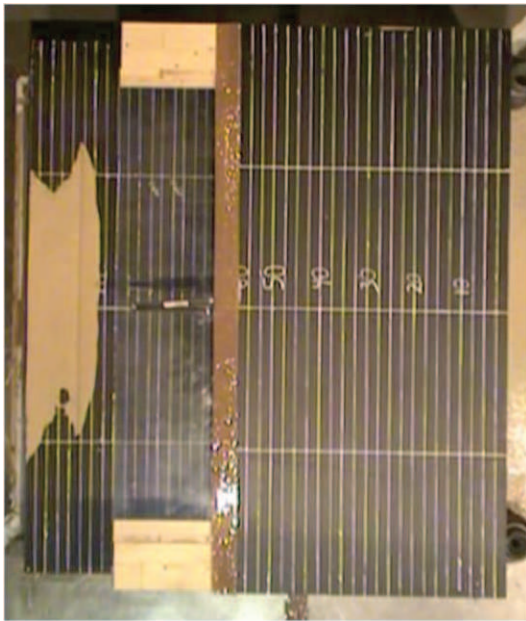
I forbindelse med symmetri eroderte sanden tidligere over senterlinjen enn under.

4.2.5 RP_E_22,5_W

I avsnittet nedenfor er bildene og de behandlede resultatene fra forsøk RP_E_22,5_W. Dette er et erosjonsforsøk med et 22,5 cm langt takutstikk med den nedre takflaten fullt eksponert for vinden. Figur 34 viser bilde fra forsøket når turbinhastigheten var 300 RPM som tilsvarer

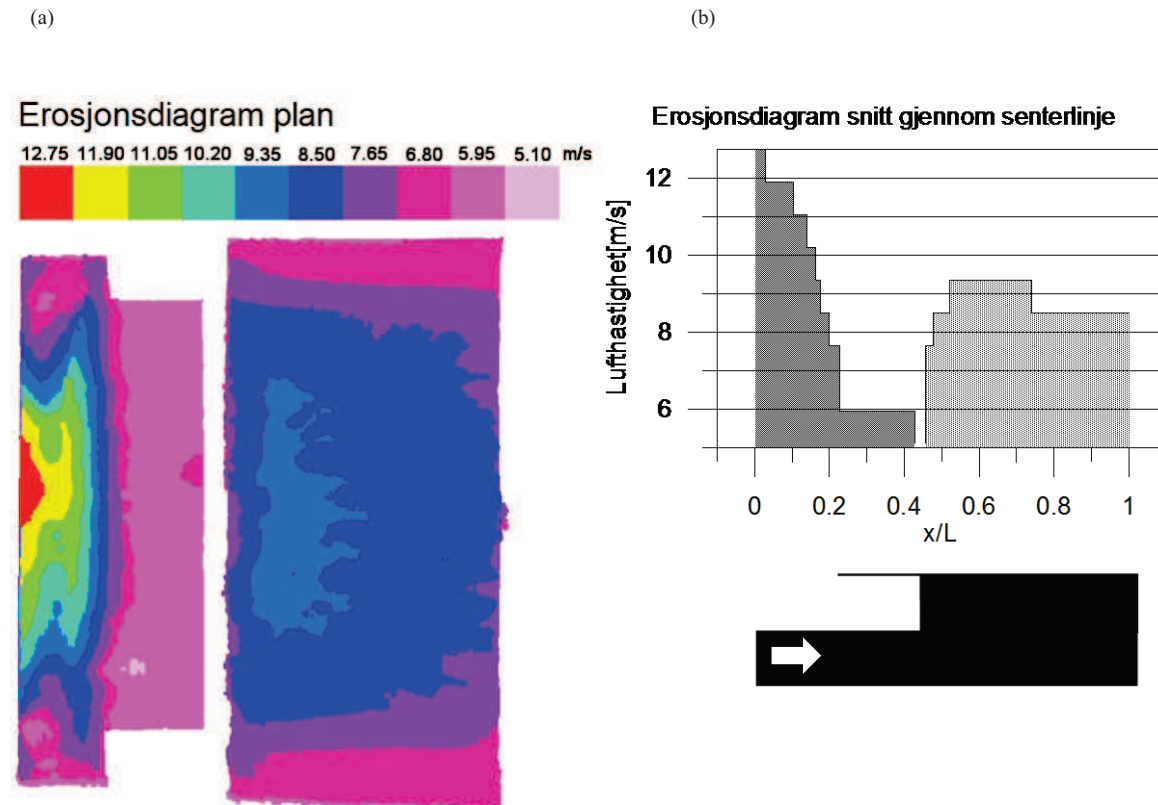
Resultat

en vindhastighet på 10,2 m/s. I figur 35 vises resultatene i erosjonsdiagrammer a) i plan og b) i snitt gjennom senterlinjen med vinden kommende inn fra venstre. Den gråskraverte og svartskraverte grafen viser sandlagutbredelsen på henholdsvis den øvre og den nedre takflaten ved hastighetene 5,1 m/s til 12,75 m/s. Som en ytterligere forklaring til erosjonsdiagrammet b) i snitt gjennom senterlinjen er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammet. Erosjonsdiagrammet b) i snitt i figur 35 er tegnet ut ifra verdiene i tabell V.8 i vedlegget.



Figur 34: Bilde fra forsøk RP_E_22,5_W ved turbinhastighet 300 RPM.

Resultat



Figur 35: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for forsøk RP_E_22,5_W.

Erosjonen startet etter 5,10 m/s på den nedre takflaten og etter 7,65 m/s på den øvre takflaten. Erosjonsdiagrammet a) i plan viser erosjonen som forekom på begge kortsidene på den øvre takflaten etter en lufthastighet på 6,80 m/s. Ved en ytterligere lufthastighetsøkning smalnet sandlaget enda mer i lengderetningen på den øvre takflaten. Mellom lufthastighetene 8,50 m/s og 9,35 m/s viste sandlaget en endring i bredden på den øvre takflaten. Sandlaget smalnet til under halve bredden av hva den var ved forrige referansehastighet. Ved neste økning, altså ved en økning til 10,20 m/s var sanden erodert bort.

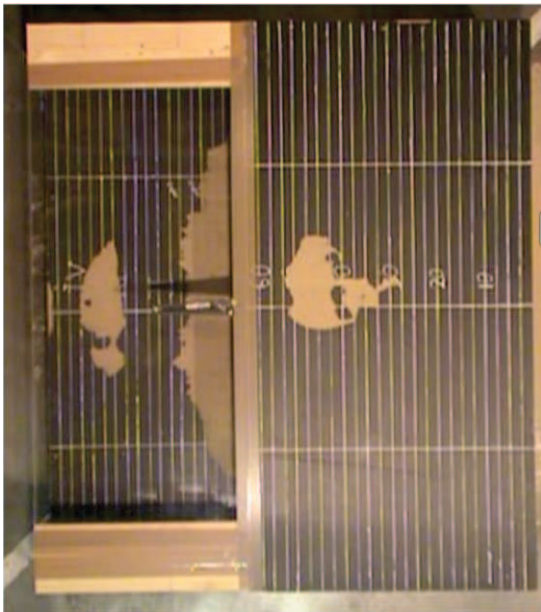
På den nedre takflaten startet sanderosjonen etter 5,95 m/s. Det gikk deretter en økning på 0,85 m/s uten videre erosjon. Etter 7,65 m/s smalnet sandlaget konstant i bredden opp til 12,75 m/s. Bredden på sandlaget var da litt bredere enn ved samme hastighet i forsøk RP_E_0_W. Erosjonen på hjørnene var svært markant fra første stund på den nedre takflaten og økte med hver lufthastighetsøkning fra 6,80 m/s. Sandlaget ble dermed smalere og smalere i bredden ved hver lufthastighetsøkning.

Resultat

Sanderosjonen var relativt symmetrisk om modellens senterlinje på den øvre takflaten. Med første øyekast virket erosjonen av sand på den nedre takflaten også ganske symmetrisk. Ved å se på sandlaget i figur 35 kommer skjevheten bedre fram.

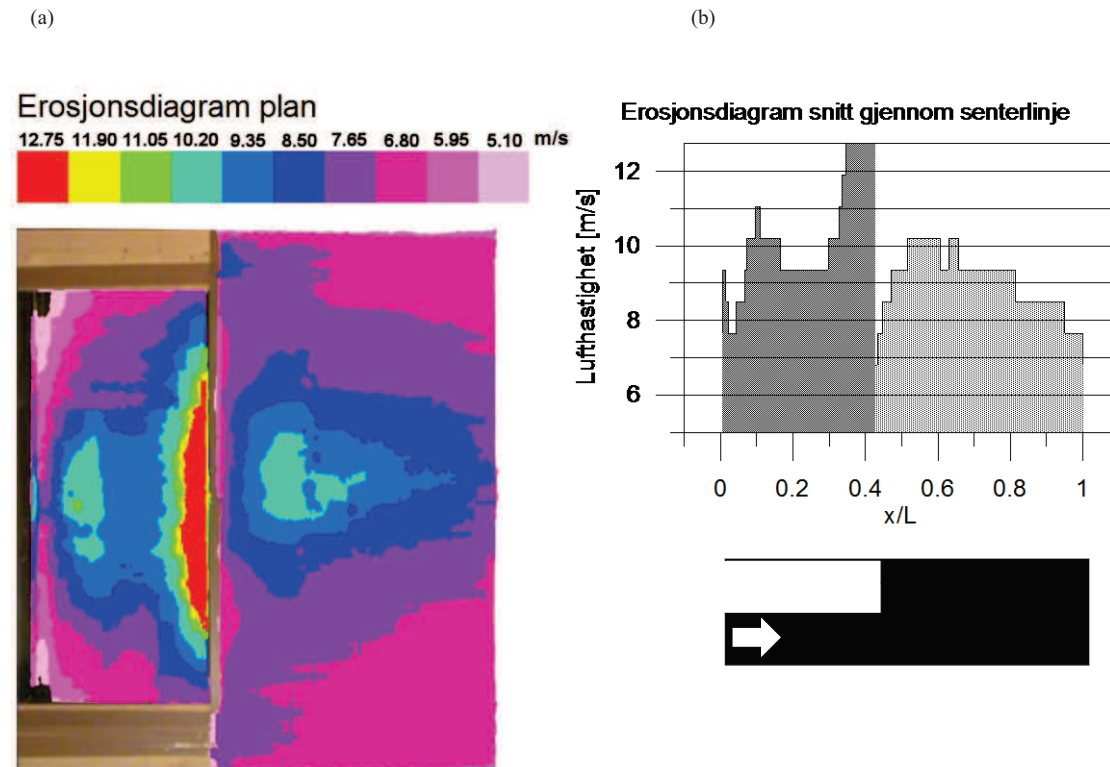
4.2.6 RP_E_45_W

I avsnittet nedenfor er bildene og de behandlede resultatene fra forsøk RP_E_45_W. Dette er et erosjonsforsøk med et 45 cm langt takutstikk med den nedre takflaten fullt eksponert for vinden. Figur 36 viser bilde fra forsøket når turbinhastigheten var 300 RPM som tilsvarer en vindhastighet på 10,2 m/s. I figur 37 vises resultatene i erosjonsdiagrammer a) i plan og b) i snitt gjennom senterlinjen med vinden kommende inn fra venstre. Den gråskraverte og svartskraverte grafen viser sandlagutbredelsen på henholdsvis den øvre og den nedre takflaten ved hastighetene 5,1 m/s til 12,75 m/s. Som en ytterligere forklaring til erosjonsdiagrammet b) i snitt gjennom senterlinjen er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammet. Verdiene til erosjonsdiagrammet b) i snitt i figur 37 er hentet fra tabell V.9 i vedlegget.



Figur 36: Bilde fra forsøk RP_E_45_W ved turbinhastighet 300 RPM.

Resultat



Figur 37: Erosjonsdiagrammer a) i plan og b) snitt gjennom senterlinjen for forsøk RP_E_45_W.

Den øvre takflaten viste like tendenser til de foregående forsøkene med den nedre takflaten fullt eksponert i vinden. Sandlaget utbredelse i flatens lengderetning smalnet relativt fort når lufthastigheten økte fra første erosjon som forekom etter 6,80 m/s. Sandlagets utbredelse langs flatens bredde forandret seg ikke like mye i begynnelsen. Sandlagutbredelsen i bredderetning på den øvre takflaten er godt beskrevet ved erosjonsdiagrammet b) i snitt gjennom senterlinjen som viser en initiell erosjon etter 5,95 m/s. Ved hver lufthastighetsøkning så det ut som at mer og mer sand eroderte vekk og eksponerte mer av den øvre takflaten.

På den nedre takflaten eroderte sanden mot veggen til den øvre takflaten. Erosjonen begynte etter 7,65 m/s langs flatens senterlinje, mens erosjonsdiagrammet a) i plan viser første tegn til erosjon på kortsidene etter 5,10 m/s. Sanderosjonen ser ut til å fortsette ved hver lufthastighetsøkning til sanden på kortsidene er erodert helt vekk ved 8,50 m/s. Ved videre økning av lufthastighet eroderte sanden innover mot flatens senterlinje opptil 11,90 m/s. Ved den siste økningen eroderte sanden litt innover, men ved 12,75 m/s lå det fortsatt en stripe av

Resultat

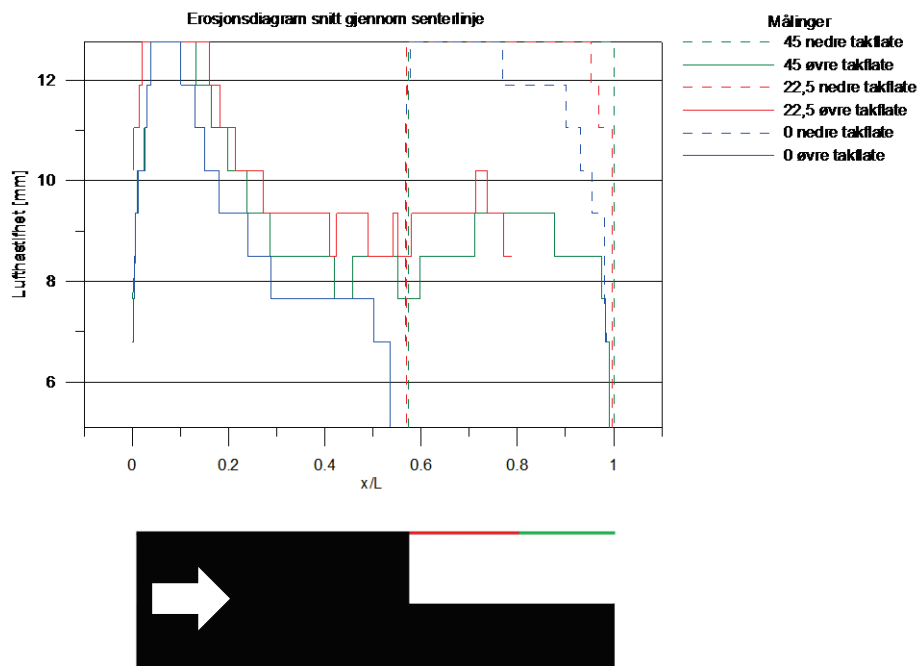
sandlaget igjen inntil veggen. Langs senterlinjen eroderte store deler av sandflaten ved en lufthastighetsøkning til 10,20 m/s og til 11,05 m/s.

Sanden eroderte ganske symmetrisk om begge takflatenes senterlinje under forsøket.

4.2.7 Hovedtrekk ved erosjonsforsøkene

Nedenfor er hovedtrekkene fra observasjonene i forbindelse med erosjonsforsøkene presentert. Figur 38 og 39 viser de samlede resultatene fra erosjonsforsøkene henholdsvis med den nedre takflaten i le for vinden og i lo for vinden. Vinden kommer inn fra venstre og er angitt av den hvite vindpilen på den svarte profilen av modellen.

De heltrukne linjene representerer sandutbredelsen på den øvre takflaten og de stiplede linjene representerer sandutbredelsen på den nedre takflaten. Den blå, den røde og den grønne linjen representerer resultatene til forsøkene uten takutstikk, med 22,5 cm takutstikk og 45 cm takutstikk, respektivt.

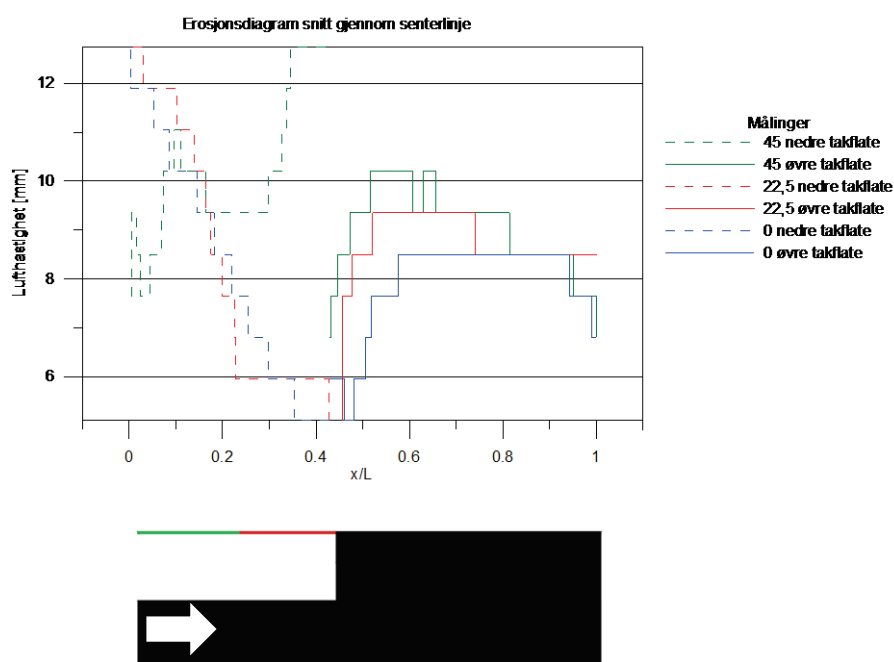


Figur 38: Samlede resultater av erosjonsforsøk i erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinje med den nedre takflaten på le side for vinden.

Resultat

Økningen av takutstikket fra 0 til 22,5 cm til 45 cm ved forsøk når den nedre takflate er i le ser ikke ut til å ha påvirket den øvre takflaten mye. Sandutbredelsen varierte med hastigheten på samme vis for alle tre forsøkene, med noen få unntak.

Hvorvidt erosjon forekom på den nedre takflaten så ut til å variere med lengden på takutstikket. Uten takutstikk eroderte sanden noe. Ved en økning til 22,5 cm og 45 cm eroderte sanden svært lite med unntak av rundt kantene mellom den nedre takflaten og veggen mot den øvre takflaten. Erosjonen forekom spesielt tidlig på hjørnene mellom den øvre takflatens langkant og sidekanter.



Figur 39: Samlede resultater av erosjonsforsøk i erosjonsdiagram i snitt gjennom senterlinje med den nedre takflaten på lo side for vinden.

All sanden eroderte av den øvre takflaten ved forsøkene med den nedre takflaten i lo for vinden. Når dette skjedde var ulikt for de tre forsøkene. Vinden måtte blåse hurtigere for å erodere sanden av takflaten når takutstikklengden økte. Erosjonene på den nedre takflaten var relativt lik for forsøkene RP_E_0_W og RP_E_22,5_W, men ved enda en økning av takutstikket ser sanden ut til å ha erodert i motsatt retning når luftfartshastigheten økte.

4.3 Deposisjonsforsøkene

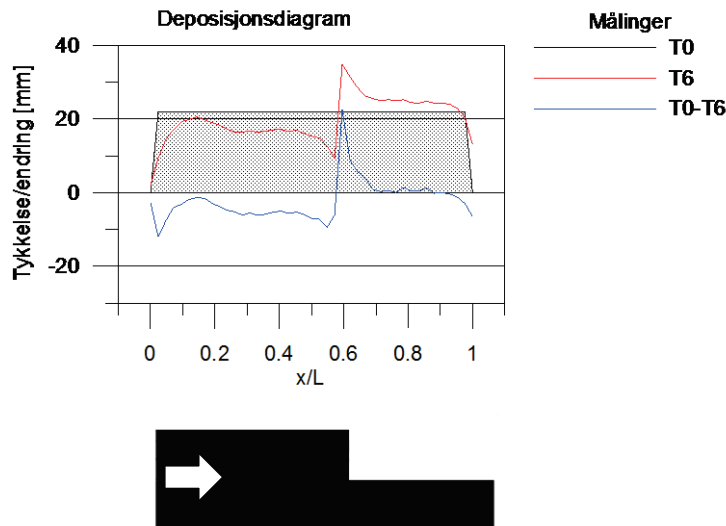
Det ble utført seks deposisjonsforsøk; tre med den nedre takflaten i le og tre i lo for vinden. Metoden er beskrevet i kapittel 3.5. Resultatene fra forsøkene er blitt behandlet i Microsoft Excel og deretter brukt som input i grafer som angir tykkelsen på sandlaget før og etter vindeksponering og endringen i sandlagtykkelsen på den vertikale aksene. På den horisontale aksene er forholdet x/L , lengden x fra modellens venstre side i profil delt på modellens totallengde L (1050 m). Hvert diagram har en svart T0 linje med skravur under som viser sandlagtykkelsen før forsøket startet. Den røde linjen viser T6-målingene som ble tatt etter at forsøket var over og den blå linjen viser endringen mellom T0- og T6-målingen.

Nedenfor følger resultatene fra deposisjonsforsøkene i sine respektive kapitler. Forsøkene med den nedre takflaten i le for vinden, det vil si forsøk RP_D_0_L, RP_D_22,5_L og RP_D_45_L er presentert først, deretter følger forsøkene med den nedre takflaten i lo for vinden, altså forsøk RP_D_0_W, RP_D_22,5_W og RP_D_45_W.

4.3.1 RP_D_0_L

I avsnittet nedenfor er de behandlede resultatene fra forsøk RP_D_0_L. Dette er et deposisjonsforsøk uten takutstikk med den nedre takflaten i le for vinden. Resultatene fra forsøket er gitt i tabell V.10 i vedlegg og presentert i figur 40 i et deposisjonsdiagram som viser sandlagtykkelsen før (T0-svart linje) og etter forsøket (T6-rød linje) og endringen i sandlagtykkelsen (T0-T6-blå linje) på den øvre- og den nedre takflaten. Som en ytterligere forklaring til deposisjonsdiagrammet er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammet som indikerer hvilke takflater grafen er i henhold til og hvilken retning vinden blåser.

Resultat



Figur 40: Deposisjonsdiagram for forsøk RP_D_0_L.

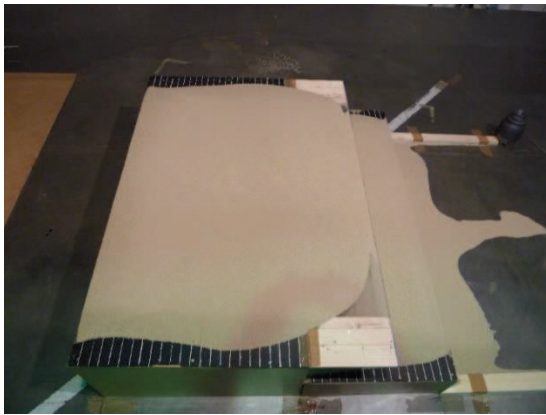
I korte trekk så har sand blitt erodert av den øvre takflaten. Utrekninger fra T0-T6 i tabell V.10 angir at 24,5 % av partiklene på den øvre flaten er erodert bort. Sandlasten $S_{T6, ø}$, på den øvre takflaten etter at forsøket var utført kan dermed regnes å være $0,75 \cdot S_{T0}$, hvor S_{T0} er sandlasten på takflaten før forsøket ble utført. Av 24,5 % som ble erodert fra den øvre takflaten har ca $\frac{1}{4}$ blitt deponert på den nedre takflaten. Dette førte til at sandlaget på den nedre takflaten økte med 7,2 % og sandlasten på den nedre takflaten blir angivelig $S_{T6, n} = 1,07 \cdot S_{T0}$.

Lengst til venstre, like etter $x/L = 0$ har en større mengde sand erodert. Deretter eroderte det nesten ingen ting ved $x/L = 0,15$. Erosjonen tok seg gradvis opp, det vil si at sandlaget ble tynnere mot $x/L = 0,55$ hvor ca 10 mm med sand eroderte bort og det lå igjen et sandlag en med tykkelse ca 10 mm. Like før $x/L = 0,6$ hvor den nedre takflaten møtte veggen dannet en sandtopp seg med en høyde på ca 35 mm. Etter dette punktet minket høyden relativt konstant ned til ca 25 mm ved $x/L = 0,7$. Sandlagstykkelsen avtok litt mot kanten av takflaten hvor tykkelsen av sand ble mindre enn hva den var før forsøket ble initiert. Dette kommer godt fram fra den blåfargede grafen.

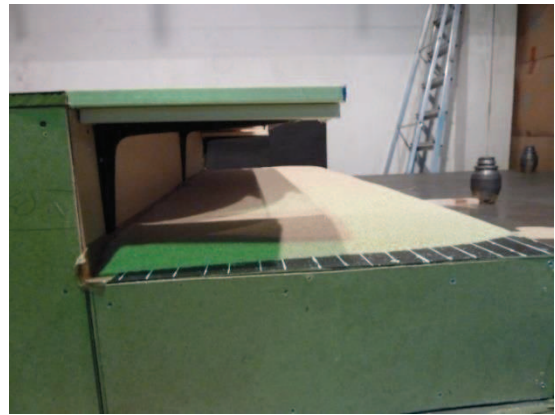
4.3.2 RP_D_22,5_L

I avsnittet nedenfor er de behandlede resultatene fra forsøk RP_D_22,5_L. Dette er et depositionsforsøk med et 22,5 cm langt takutstikk med den nedre takflaten i le for vinden. Figur 41 viser bilder av modellen etter endt forsøk, perspektivene er henholdsvis a) på venstre side av modellen med vinden inn fra venstre, b) innunder takutstikket på venstre side med vinden inn fra venstre og c) bak modellen med vinden rett mot kameraet. Resultatene fra forsøket er gitt i tabell V.11 i vedlegg og presentert i figur 42 i depositionsdiagrammer som viser sandlagtykkelsen før (T0-svart linje) og etter forsøket (T6-rød linje) og endringen i sandlagtykkelsen (T0-T6-blå linje) på a) den øvre og b) den nedre takflaten. Som en ytterligere forklaring til depositionsdiagrammene er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammet som indikerer hvilke takflater grafene er i henhold til.

(a)



(b)



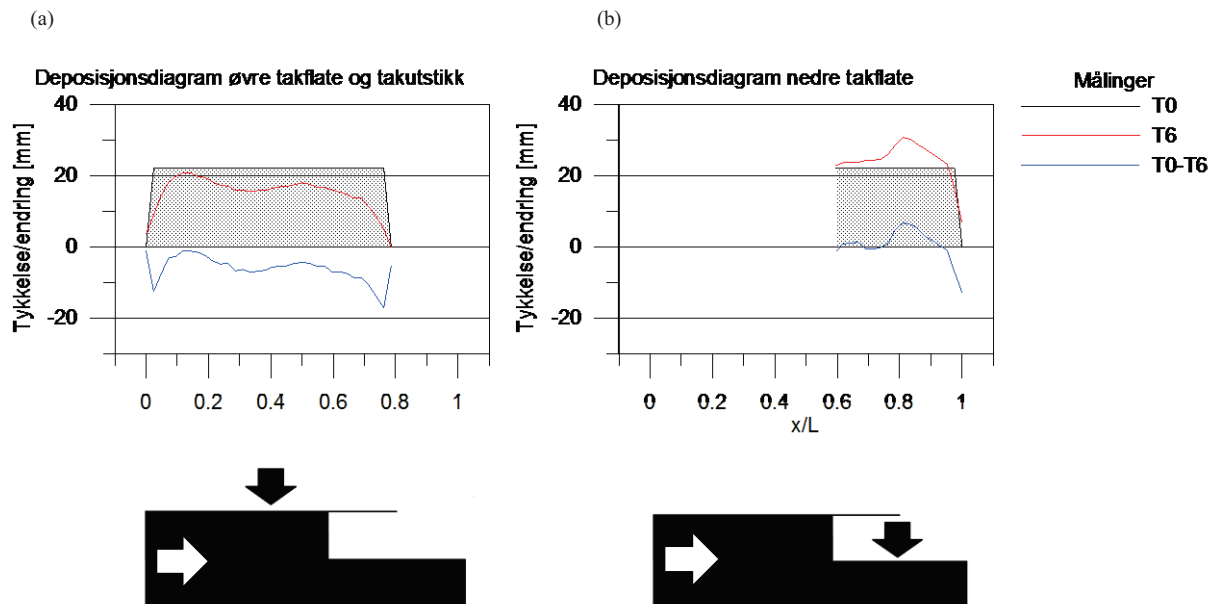
Resultat

(c)



Figur 41: Bilder fra modellen fra a) venstre side, b) innunder takutstikket og c) bak modellen etter endt forsøk RP_D_22,5_L.

Sand har erodert av begge takflatene og etterlatt sidene på begge flatene helt eksponert. De eksponerte områdene ble bredere og bredere lengre nedstrøms. Fra sanderosjonen som forekom på sidene ser det ut som om sanden eroderte relativt symmetrisk på begge takflatene.



Figur 42: Deposisjonsdiagrammene for a) den øvre og b) den nedre takflaten fra forsøk RP_D_22,5_L.

Fra den blå linjen i figur 42 ser det ut som at den samme hovedtendensen gjelder her som for forsøk RP_D_0_L. Sandlaget på den øvre takflaten og takutstikket eroderte ned til en andel på

Resultat

71,2 %. Sandlasten på denne overflaten kan da angis til $S_{T6, \emptyset} = 0,712 * S_{T0}$. 28,8 % av sanden på den øvre takflaten ble altså erodert bort og måleresultatene på den nedre takflaten angir en sandlagsøkning med 3,9 %. Denne økningen tilsvarer 7,2 % av den eroderte sanden fra den øvre takflaten og takutstikket. Sandlasten på den nedre takflaten er $S_{T6, n} = 1,039 * S_{T0}$.

På den øvre takflaten eroderte mest sand ved $x/L = 0,05$ og $x/L = 0,75$. Sandlagets høyde på flaten ble toppet med ca 20 mm ved $x/L = 0,15$. Deretter minket tykkelsen noe før den økte igjen til ca 18 mm ved $x/L = 0,5$. Herfra eroderte sanden ned mot kanten av det 22,5 cm lange takutstikket ved $x/L = 0,8$.

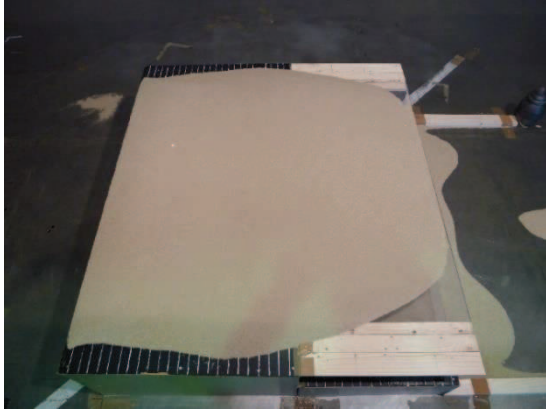
På den nedre takflaten økte sandlagtykkelsen fra inntil veggen til den øvre takflaten. Sandhøyden bygget seg til en topp på over 30 mm like under kanten på takutstikket ved $x/L = 0,8$. Herfra minket sandhøyden fra takflaten nesten konstant med en ekstra erosjon på slutten ved $x/L = 1,0$.

4.3.3 RP_D_45_L

I avsnittet nedenfor er de behandlede resultatene fra forsøk RP_D_45_L. Dette er et deposisjonsforsøk med et 45 cm langt takutstikk med den nedre takflaten i le for vinden. Figur 43 viser bilder av modellen etter endt forsøk, perspektivene er henholdsvis på a) venstre side av modellen med vinden fra venstre, b) innunder takutstikket på venstre side og c) bak modellen med vinden blåsende rett mot kameraet. Resultatene fra forsøket er gitt i tabell V.12 i vedlegget og presentert i figur 44 i deposisjonsdiagrammer som viser sandlagtykkelse før (T0-svart linje) og etter forsøket (T6-rød linje) og endringen i sandlagtykkelse (T0-T6-blå linje) på a) den øvre og b) den nedre takflaten. Grå felter i tabell V.12 markerer «uverdige målinger» som ikke er tatt med i deposisjonsdiagrammet. Som en ytterligere forklaring til deposisjonsdiagrammene er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammene som indikerer hvilke takflater grafene er i henhold til.

Resultat

(a)



(b)



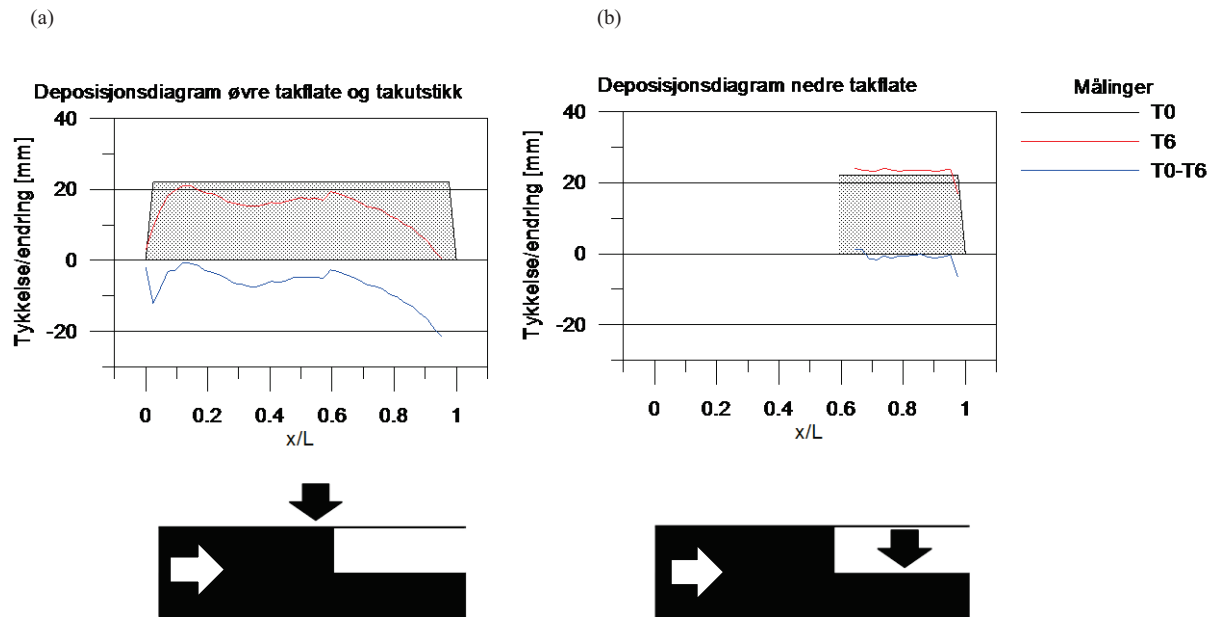
(c)



Figur 43: Bilder fra modellen fra a) venstre side, b) innunder takutstikket og c) bak modellen etter endt forsøk RP_D_45_L.

Sand ble erodert av begge takflatene og sidene på begge takflatene ble eksponert. De eksponerte områdene ble bredere og bredere lengre nedstrøms og fra sanderosjonen virker det som om sanden ble erodert relativt symmetrisk på begge takflatene.

Resultat



Figur 44: Deposjonsdiagrammene for a) den øvre og b) den nedre takflaten fra forsøk RP_D_45_L.

På den øvre takflaten og takutstikket ble den samme tendensen observert som tidligere ved deposisjonsforsøk med den nedre takflaten i le for vinden. I løpet av forsøket eroderte 31,2 % av sandlaget av den øvre takflaten og takutstikket og 4 % av sanden ble erodert av den nedre takflaten. Sandlastene $S_{T6, \emptyset}$ for den øvre takflaten og takutstikket og $S_{T6, n}$ for den nedre takflaten kan regnes til henholdsvis $0,688 \cdot S_{T0}$ og $0,96 \cdot S_{T0}$.

På den øvre takflaten var det to sandtopper, en like etter $x/L = 0$ og en ved $x/L = 0,95$. Mellom disse to punktene var det en sandtopp ved $x/L = 0,15$ med høyde ca 22 mm over takflaten og en ved $x/L = 0,6$ med høyde like under 20 mm. Ved $0,95 < x/L < 1,0$ viser deposisjonsgrafen for a) den øvre takflaten og takutstikket at sandlagtykkelsen var 0 mm. Dette kan avkrefte fra a) det øverste og c) det nederste bildet i figur 43. Hvor tykt sandlaget var i dette området kan imidlertid ikke fastsettes fra bildeserien. På den nedre takflaten har et lite sandlag lagt seg langs hele bredden med en liten sandtopp like før takflatens langside, like under kanten av det

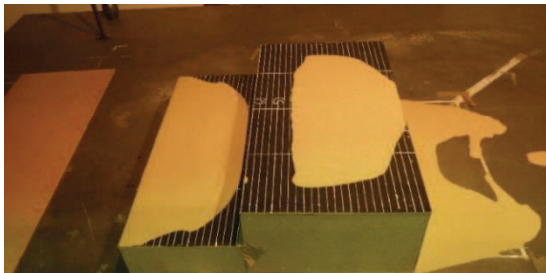
Resultat

45 cm lange takutstikket. Fra denne toppen og ned til flatens langkant minker sanden til litt under T0-målingen.

4.3.4 RP_D_0_W

I avsnittet nedenfor er de behandlede resultatene fra forsøk RP_D_0_W. Dette er et depositionsforsøk uten takutstikk med den nedre takflaten fullt eksponert for vinden. Figur 45 viser bilder av modellen etter endt forsøk, perspektivene er henholdsvis a) på venstre side av modellen med vinden fra venstre, b) foran modellen med vinden i ryggen og c) bak modellen med vinden blåsende rett i kameraet. Resultatene fra forsøket er gitt i tabell V.13 i vedlegget og presentert i figur 46 i et depositionsdiagram som viser sandlagtykkelsen før (T0-svart linje) og etter forsøket (T6-rød linje) og endringen i sandlagtykkelse (T0-T6-blå linje) på a) den øvre og b) den nedre takflaten. Grå felter i tabell V.13 markerer «uverdige målinger» som ikke ble tatt med i depositionsdiagrammet. Som en ytterligere forklaring til depositionsdiagrammet er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammet som indikerer hvilken takflate grafen er i henhold til.

(a)

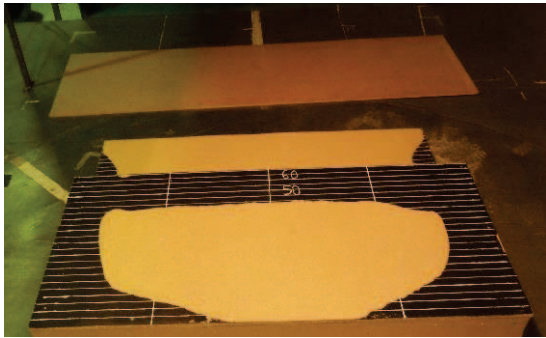


(b)



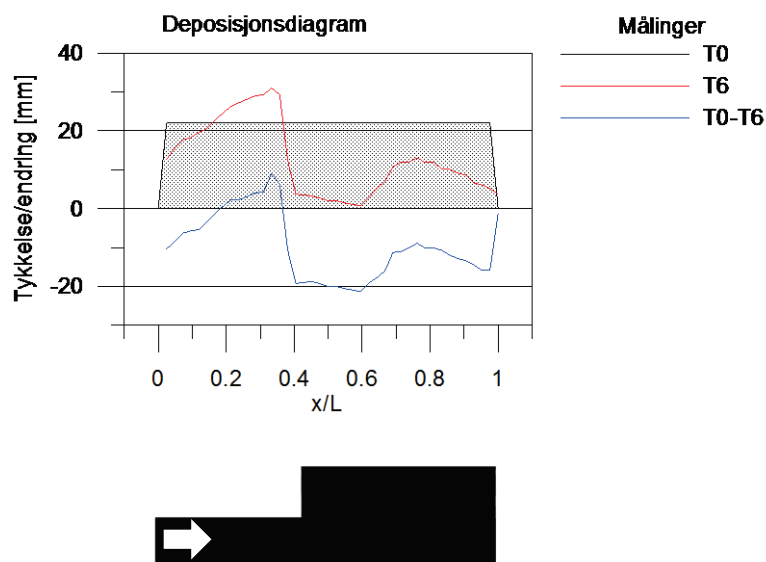
Resultat

(c)



Figur 45: Bilder fra modellen fra a) venstre side, b) foran modellen og c) bak modellen etter endt forsøk RP_D_0_W.

Sanden ble erodert av begge takflatene og sidene på begge flatene ble helt eksponert. De eksponerte områdene ble bredere og bredere lengre nedstrøms i vinden. Sanderøsjonen på sidene indikerer en relativt symmetrisk sanderøsjon på begge takflatene. I bildet med perspektivet b) rett mot den nedre takflaten har sand blitt erodert vekk og etterlatt seg et bart område like inntil veggen mot den øvre takflaten. På den øvre takflaten har de første 150 mm av flaten blitt rensket for sand.



Figur 46: Deposisjonsdiagram for forsøk RP_D_0_W.

Resultat

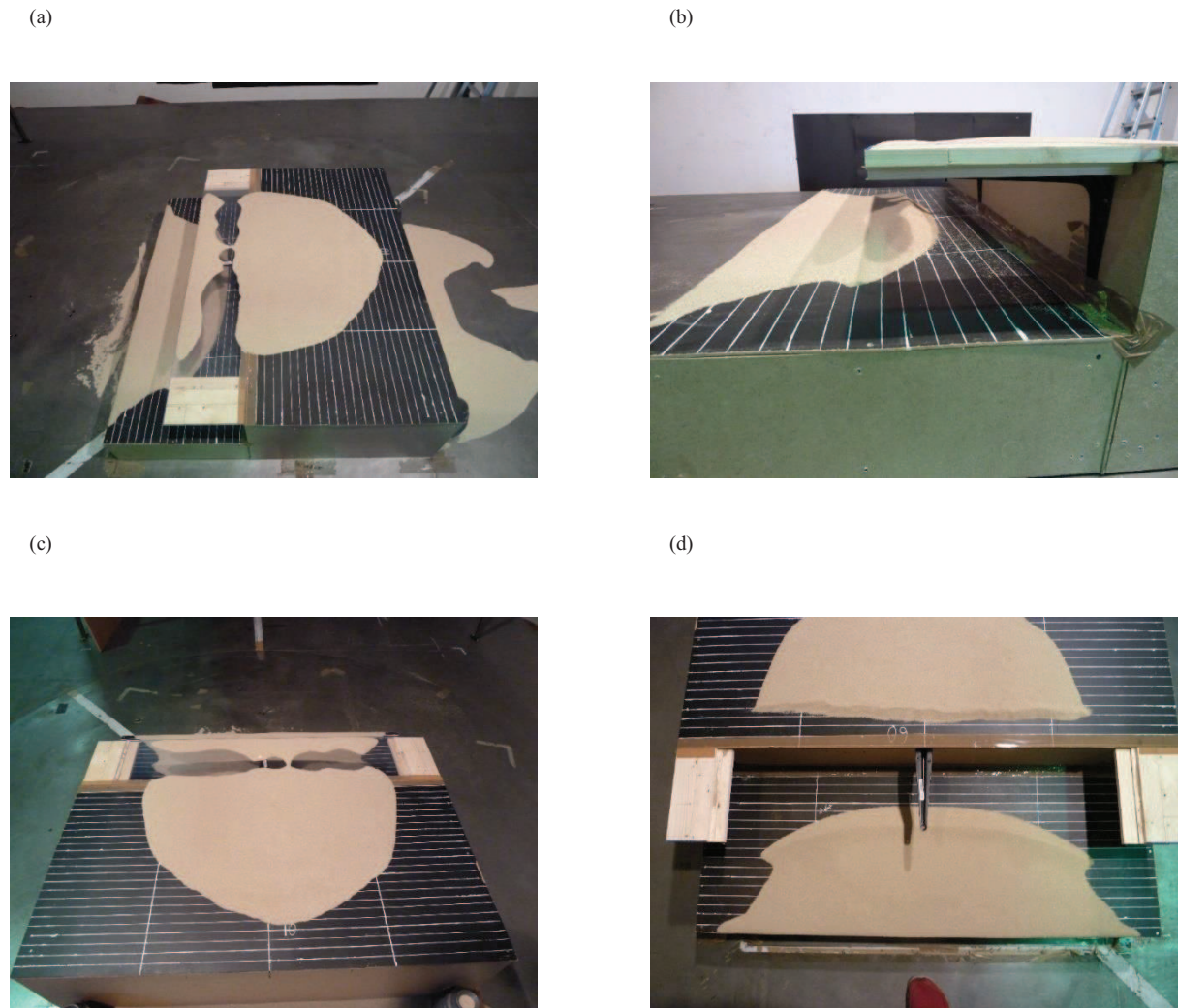
På den nedre takflaten ble 10,3 % av sandlaget erodert vekk. Sandlasten på flaten er angivelig gitt til $S_{T6,n} = 0,897 \cdot S_{T0}$. På den øvre takflaten ble 65,9 % av sandlaget erodert bort og den tilhørende sandlasten, $S_{T6,o}$, på denne flaten blir dermed lik $0,341 \cdot S_{T0}$.

I $x/L = 0,0$ eroderte sand av takflaten. Etter dette punktet økte sandlagets tykkelse jevnt med x/L . Ved $x/L = 0,15$ var sandlagets høyde den samme som ved T0-målingen og like etter $x/L = 0,3$ toppet sanden seg. Etter toppunktet like etter $x/L = 0,3$ var masse sand erodert like inntil veggen til den øvre takflaten. Fra figur 46 b er det allerede blitt konstatert at den nedre takflaten var helt fri for sand like inntil veggen. I samme bildet (b) kommer det klart fram at de første 150 mm på den øvre takflaten var bar. Like fullt viser målingene et lite sandlag med minkende tykkelse fra $x/L = 0,4$ og $x/L = 0,6$. Fra $x/L = 0,6$ økte sandlagets tykkelse til en topp på 13 mm ved $x/L = 0,75$ før tykkelsen jevnt minket ned til ca 6 mm ved $x/L = 1,0$. Endringen i sandlagets tykkelse, T0-T6, er godt beskrevet med den blå grafen i figur 46.

4.3.5 RP_D_22,5_W

I avsnittet nedenfor er de behandlede resultatene fra forsøk RP_D_22,5_W. Dette er et deposisjonsforsøk med et 22,5 cm langt takutstikk med den nedre takflaten fullt eksponert for vinden. Figur 47 viser bilder av modellen etter endt forsøk, perspektivene er henholdsvis a) på venstre side av modellen med vinden fra venstre, b) innunder takutstikket på venstre side med vinden fra venstre, c) bak modellen med vinden rett i kameraet og d) foran modellen med vinden i ryggen. Resultatene fra forsøket er gitt i tabell V.14 i vedlegget og presentert i figur 48 i deposisjonsdiagrammer som viser sandlagtykkelsen før (T0-svart linje) og etter forsøket (T6-rød linje) og endringen i sandlagtykkelsen (T0-T6-blå linje) på a) den øvre og b) den nedre takflaten. Grå felter i tabell V.14 markerer «uverdige målinger» som ikke er tatt med i deposisjonsdiagrammet. Som en ytterligere forklaring til deposisjonsdiagrammene er det en svart profil med en hvit vindpil i bunn av diagrammene som indikerer hvilke takflater grafene er i henhold til.

Resultat



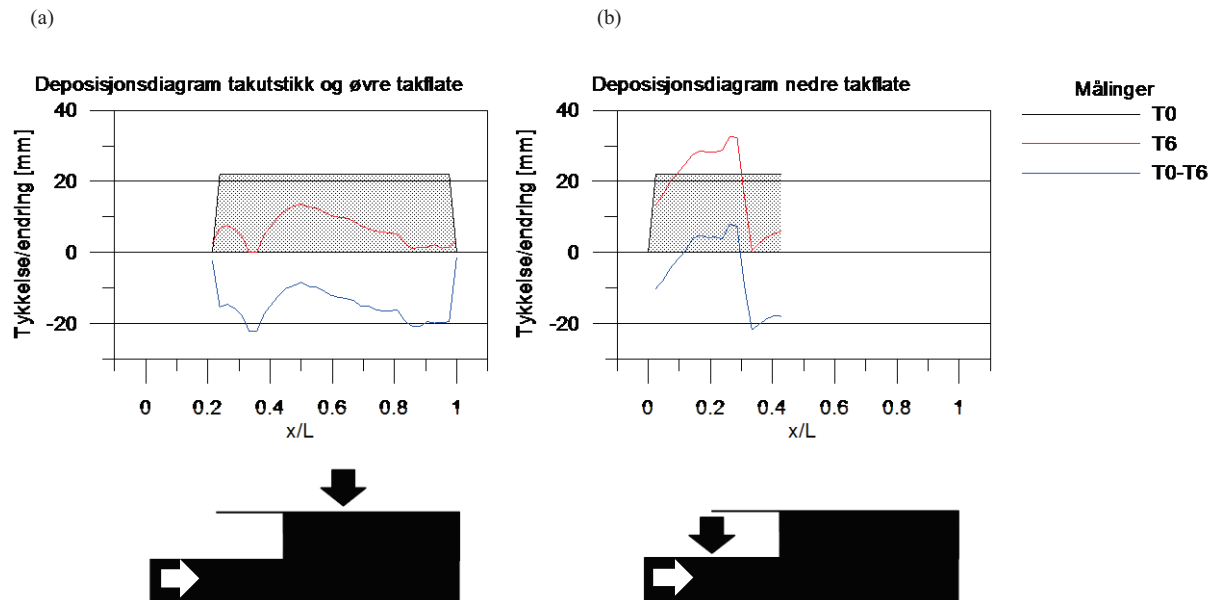
Figur 47: Bilder fra modellen fra a) venstre side, b) innunder takutstikket på venstre side, c) bak modellen og d) foran modellen etter endt forsøk RP_D_22,5_W.

Bilde a og c i bildeserien viser sanderosjonen på den øvre takflaten som ser ut som en slags «manetformasjon». En sandformasjon ble dannet inntil kanten av det 22,5 cm lange takutstikket. Deretter en glippe hvor takutstikket var helt eksponert og til slutt en halvsirkelformet klokke. Lenger nedstrøms for klokken ble mer av takflaten eksponert sammen med de relativt store områdene på begge sidene av takflaten. Bilde b og c i bildeserien i figur 47 gir et godt innblikk i hvordan sanden eroderte på den nedre takflaten. Inntil veggen til den øvre takflaten og 100 mm ut på flaten var det ingen sand. Det var heller ingen sand langs sidekantene på den nedre takflaten. Det bare området ble bredere lenger nedstrøms i flatens bredderetning. I det nederste bildet (d) i serien kan en strekkontur skimtes

Resultat

like under toppen av den halvsirkelformede sandflaten. Dette var en kontinuerlig sandbanketopp som befant seg like under kanten av takutstikket på begge sidene, men som flyttet seg mot veggen nærmere flatens senterlinje.

Sanderosjonen på den øvre og den nedre takflaten var symmetrisk om flatens senterlinje.



Figur 48: Deposisjonsdiagram for a) den øvre og b) den nedre takflaten fra forsøk RP_D_22,5_W.

På den nedre takflaten eroderte 21,6 % av sanden av, mens 69,6 % av sanden på den øvre takflaten og takutstikket eroderte vekk. Formfaktorene for de to flatene blir henholdsvis $S_{T6,n} = 0,784 * S_{T0}$ og $S_{T6,o} = 0,34 * S_{T0}$.

På den bakre langsiden på a) den øvre takflaten angir deposisjonsdiagrammet sandlaget til en tykkelse på 2-3 mm. Dette stemmer ikke overens med bilde a og c i figur 48. For øvrig eroderte over halve sandlaget på takflaten bort og etterlot to topper av sand. En med en høyde på ca 8 mm over takflaten ved $x/L = 0,25$ og en litt større en med høyde ca 14 mm ved $x/L = 0,5$. Mellom disse to toppene var det en bar flate. Fra bildeserien i figur 48 ser det ut til at denne flaten varierte fra 100 til 10 mm i lengderetningen.

Sandlagtykkelsen på den nedre flaten minket litt på langsiden. Herfra økte den konstant til $x/L = 0,15$ hvor tykkelsen var like i underkant av 30 mm. Sanden holdt seg litt i denne høyden

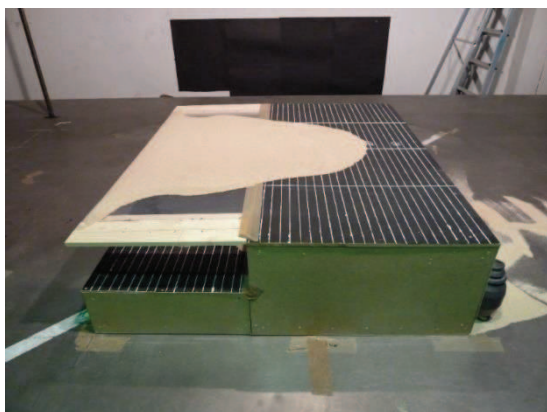
Resultat

før den økte til en tykkelse på ca 34 mm. Denne toppen var posisjonert ved $x/L = 0,25$, like innunder kanten på det 22,5 mm lange takutstikket. Etter denne toppen minket sandlagtykkelsen til 0 mm like etter $x/L = 0,3$. Herfra viser diagrammet en oppbygning av sand inn mot veggen til den øvre takflaten. Fra bildeserien i figur 47 kommer det klart fram at takflaten var helt eksponert fra veggen og 100 mm ut, langs senterlinjen. Det bare området ble bredere med økende avstand fra flatens senterlinje og ut mot kortsidene.

4.3.6 RP_D_45_W

I avsnittet nedenfor er de behandlede resultatene fra forsøk RP_D_45_W. Dette er et depositionsforsøk med et 45 cm langt takutstikk med den nedre takflaten fullt eksponert for vinden. Figur 49 viser bilder av modellen etter endt forsøk, perspektivene er henholdsvis a) på venstre side av modellen med vinden fra venstre, b) innunder takutstikket på venstre side med vinden fra venstre, c) foran modellen på den øvre takflaten og takutstikket med vinden i ryggen og d) foran modellen på den nedre takflaten med vinden i ryggen. Resultatene fra forsøket er gitt i tabell V.15 i vedlegget og presentert i figur 50 i depositionsdiagrammer som viser sandlagtykkelsen før (T0-svart linje) og etter forsøket (T6-rød linje) og endringen i sandlagtykkelse (T0-T6-blå linje) på a) den øvre og b) den nedre takflaten. Grå felter i tabell V.15 markerer «uverdige målinger» som ikke ble tatt med i depositionsdiagrammet. Som en ytterligere forklaring til depositionsdiagrammene er det en svart profil med en hvit vindpil i bunnen av diagrammene som indikerer hvilke takflater grafene er i henhold til.

(a)

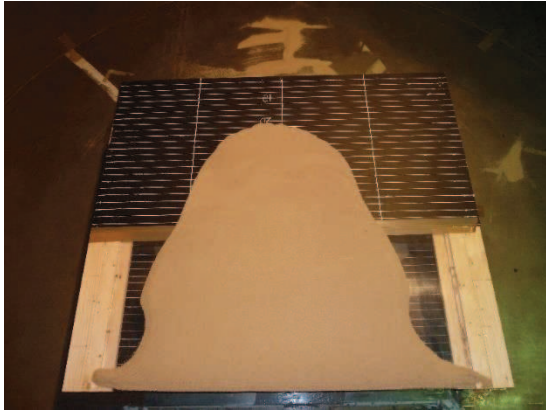


(b)

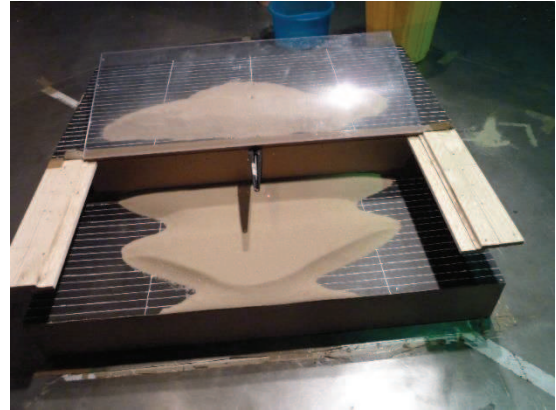


Resultat

(c)



(d)

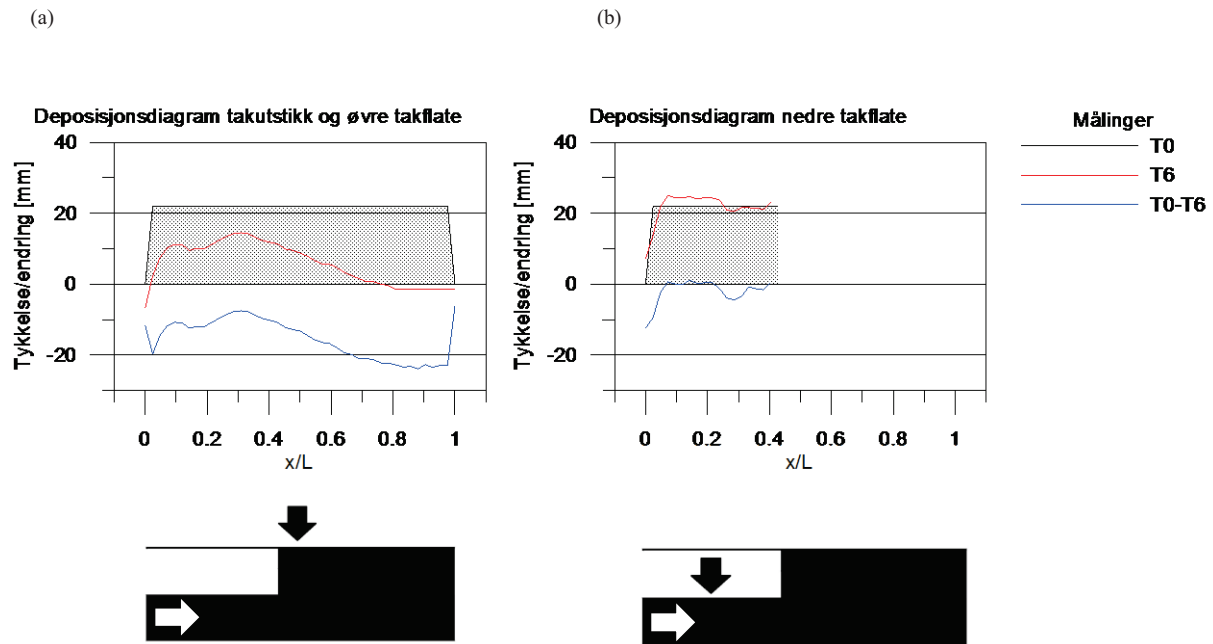


Figur 49: Bilder av modellen fra a) venstre side, b) innunder takutstikket, c) foran modellen på den øvre takflaten og d) foran modellen på den nedre takflaten etter endt forsøk RP_D_45_W.

På den øvre takflaten ble en avlang «manetformasjon» dannet med fullt eksponerte områder langs takflatens sidekanter. Disse områdene ble bredere lenger nedstrøms før de til slutt møtte hverandre og dannet en helt sandfri sone på de 200 bakerste mm av takflaten. På den nedre takflaten dannet en sandformasjon seg som så litt ut som et juletre med flat topp. Denne sandformasjonen hadde en linjekontur nesten helt ved takflatens langside hvor toppen av konturen flyttet seg lengre nedstrøms med avstanden fra flatens senterlinje. De bare områdene på den nedre takflatens kortsider ble bredere og bredere nærmere den venstre langsiden.

Sanden eroderte relativt symmetrisk om takflatenes senterlinje. Tegn på en litt skjev erosjon synes i bilde d og c i bildeserien i figur 49.

Resultat



Figur 50: Deposisjonsdiagram for a) den øvre og b) den nedre takflaten fra forsøk RP_D_45_W.

Av den nedre takflaten er det erodert vekk 8,1 %. Dette svarer til en sandlast $S_{T6,n} = 0,919 \cdot S_{T0}$. På den øvre takflaten og takutstikket ble 71,9 % av sandlaget erodert vekk av vinden. Sandlasten for den øvre takflaten og takutstikket regnes til $S_{T6,\theta} = 0,281 \cdot S_{T0}$.

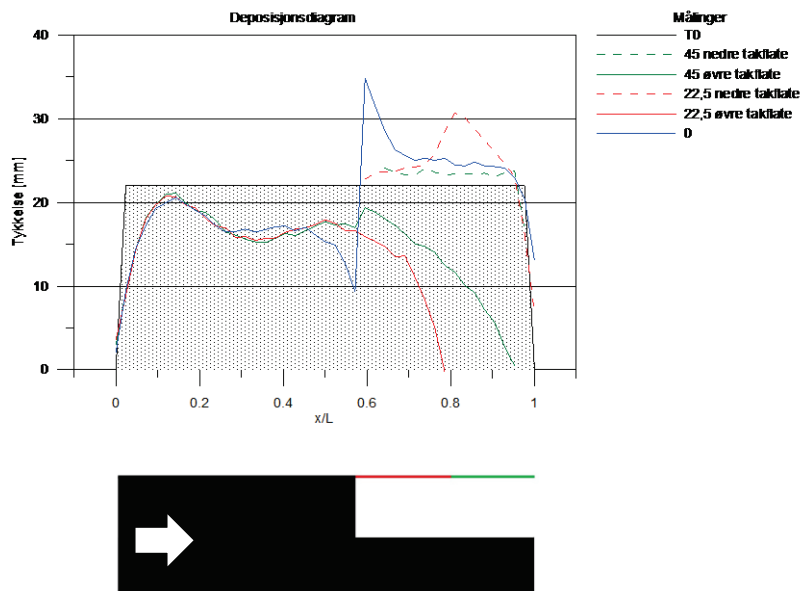
På den venstre langsiden og på det 200 mm brede området mot den høyre langsiden viser den røde linjen en negativ sandlagtykkelse. Dette er selvfølgelig ikke mulig. Bilde a og c i figur 49 viser at sanden ble erodert bort i disse områdene i løpet av forsøket. Mellom de bare områdene var det et sandlag med to topper. Fra $x/L = 0,0$ økte sandlagtykkelsen relativt fort til den første sandtoppen på ca 11 mm like før $x/L = 0,1$. Deretter avtok høyden på sandlaget før den økte til ca 15 mm i $x/L = 0,3$. Fra $x/L = 0,3$ minket sandlagtykkelsen jevnt ned til 0 mm i $x/L = 0,75$.

På den nedre takflaten endret lite seg mellom T0- og T6-målingene. Ca 10 mm med sand ble erodert langs den venstre langsiden av takflaten. Deretter økte sandlagtykkelsen til en topp på 25 mm like etter $x/L = 0,05$. Mellom $x/L = 0,05$ og $x/L = 0,25$ økte sandlaget med 2-3 mm. Fra $x/L = 0,25$ og inn til veggen mot den øvre takflaten eroderte det lite sand av takflaten.

4.3.7 Hovedtrekk ved deposisjonsforsøkene

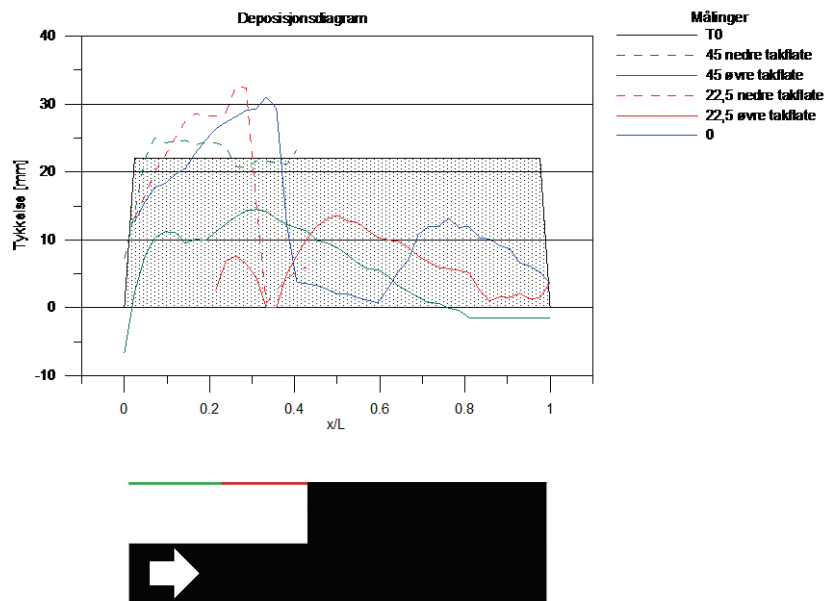
Nedenfor er hovedtrekkene fra observasjonene i forbindelse med deposisjonsforsøkene presentert. Figur 51 og 52 viser de samlede resultatene fra deposisjonsforsøkene henholdsvis med den nedre takflaten i le for vinden og i lo for vinden. Vinden kommer inn fra venstre.

De heltrukne linjene viser til sandutbredelsen på den øvre takflaten og de stiplede linjene viser til sandutbredelsen på den nedre takflaten. Den blå, den røde og den grønne linjen viser resultatene fra forsøkene med modellen uten takutstikk, med 22,5 cm takutstikk og 45 cm takutstikk, respektivt.



Figur 51: Deposisjonsdiagram med samlede resultater fra alle forsøkene med den nedre takflaten i le for vinden.

Resultat



Figur 52: Deposisjonsdiagram med samlede resultatene fra alle forsøkene med den nedre takflaten fullt eksponert for vinden.

Når den nedre takflaten var i le for vinden ble ca 30 % av sandlaget på den øvre takflaten erodert vekk når modellen ble eksponert for vind. Når modellorienteringen ble endret 180 grader og vinden kom inn på den nedre takflaten økte erosjonsandelen på den øvre takflaten til 65,9 %.

Sandlagsprofilene ved T6-målingen på den øvre takflaten var relativt like hverandre i sine respektive orienteringer. Når den nedre takflaten var i lo for vinden flyttet sandlagsprofilen seg oppstrøms når takutstikket ble lengre.

På den nedre takflaten forekom en deposisjon på sandlaget når flaten var i le for vinden. Deposisjonen varierte mellom 3,9 og 7,2 %. I tillegg til den generelle økningen av sand på takflaten dannet det seg et toppunkt i deposisjonen som posisjonerte seg under takutstikkets kant ved de tre forsøkene.

Når den nedre takflaten var på lo side for vinden forekom det en erosjon. Andelen sand som ble erodert av takflaten lå mellom 8,1 - 21,6 %. Under forsøkene med den nedre takflaten på lo side for vinden ble det dannet topper av sand slik som i forsøkene med den nedre takflaten i

Resultat

le for vinden. Toppunktets posisjon varierte med takutstikkets lengde og befant seg som regel 2-3 cm innenfor takutstikkets kant. Altså noe nærmere veggen enn ved forsøkene med motsatt vindretning.

5. Diskusjon

5.1 Karakterisering av vindtunnelen

Lufthastigheten i et rør er beskrevet av Morrison (2013) som avtagende jo nærmere rørveggen luftstrømmen er ved fullt utviklede strømningsmønstre. Øverst i midten av innløpet til vindtunnelen var hastighetene relativt like som langs sidene av innløpet. I hjørnene øverst i innløpet minket hastighetene enda mer. Dette kan komme av en «dobbel nedbremsing» grunnet sideflatenes og toppflatens kombinerte ruhet. I området 0,2 m – 1,8 m fra innløpets venstre side og opptil en høyde lik 1,75 m var trykkforskjellen og dermed hastighetene relativt like.

Lufthastigheten så ut til å variere med ca 0,25 m/s på linjen 0,5 m bak senterlinjen i forhold til lufthastigheten målt 0,5 m foran senterlinjen. Ulikheten i lufthastighet kan være forårsaket av endringen i omgivelsene rundt testområdet, da det på ene siden av testområdet var en glatt betongvegg, mens det på den andre siden stod bord, stoler, et laseroppheng og andre forstyrrende elementer av forskjellig størrelse og form.

Lufthastigheten ble kraftig oppbremset 5 m fra innløpet. Disse målingene er gjort innenfor utløpet hvor ruheten på bakkeflaten sannsynligvis var større.

I figur 25 ble målingene for fastsettelse av forholdet mellom lufthastigheten [m/s] og turbinhastigheten [RPM] i vindtunnelen presentert. Lufthastigheten så ut til å øke lineært med turbinhastigheten. Ved å beregne gjennomsnitt av økningene mellom hvert punkt ble stigningen 0,034 både for målingene ved 0,3 m og 1,0 m.

Strømningsforholdene i innløpet og testområdet viste noe variasjon, men modellen ble plassert i et område på testflaten hvor variasjonen var liten og neglisjerbar. Forholdene som forsøkene ble utført i kan dermed antas som homogene og repeterbare.

5.2 Erosjonsforsøkene

I snølaststandarden er formfaktoren μ_1 på den nedre takflaten på et flernivåtak gitt til 0,8. Innenfor drivlengden, l_s , kommer et tillegg ved μ_2 . Erosjon må altså forekomme på den nedre takflaten ved eller innenfor $l_s = 30$ cm ved forsøk RP_E_0_L for at drivlengden definert i snølaststandarden skal være tilstrekkelig lang. Ved en fartsøkning til 12,75 m/s ble dette innfridd. Det vil altså si at vindhastigheten må være av en viss størrelse for at drivlengden angitt i snølaststandarden skal stemme. Eventuelt må det defineres en ny metode for bestemmelse av l_s slik at l_s er tilstrekkelig lang. Det er for øvrig ikke beskrevet en drivlengde l_s når et takutstikk blir tilført en bygningskropp i snølaststandarden.

Utover funn i forbindelse med drivlengden, l_s , viste det seg at resultatene fra erosjonsforsøkene ikke bidro like mye som antatt til å bestemme hvordan partikkelakkumulasjonen varierer under et takutstikk på et flernivåtak. Resultatene fra erosjonsforsøkene utdypet ikke resultatene fra depositionsforsøkene i noen større grad. Metoden kan kanskje være mer aktuell i andre sammenhenger. For eksempel ser erosjonsforsøkernes resultater ut til å korrespondere godt med forsøkene til Prasad et al. (2009) som viser økt sug langs endekantene på takflater og artikkelen av O'Rourke og Wood (1986) som beskriver luftstrømmer over et bygg med flatt tak. Erosjonsforsøk er muligens en metode som er bedre egnet til undersøkelser i forbindelse med vindbelastning på bygg.

5.3 Deposjonsforsøkene

I forrige kapittel ble drivlengden l_s på den nedre takflaten på et flernivåtak diskutert. Det kan se ut som at snølaststandardens angivelse av l_s kommer til kort for resultatene fra erosjonsforsøkene når den nedre takflaten er i le for vinden.

I forbindelse med snødriv på flernivåtak har snølaststandarden videre angitt formfaktoren μ_1 til å være 0,8 på den nedre takflaten og innenfor l_s forekommer et tillegg ved formfaktor μ_2 som er lik 3,5 for skalamodellen benyttet i forsøkene. Formfaktorene blir multiplisert med marklasten, S_k , slik at lasten på den aktuelle flaten kan bestemmes.

I resultatdelen ble det definert tre størrelser, sandlastene S_{T0} , $S_{T6, \theta}$ og $S_{T6, n}$. Det antas at sandlasten S_{T0} for modellforsøk beskriver det samme som marklasten S_k i snølastberegninger.

Diskusjon

Da kan forholdstallene $S_{T6, \emptyset}/S_{T0}$ og $S_{T6, n}/S_{T0}$ ved forsøkene sammenlignes med formfaktoren $\mu_i=S/S_k$ fra snølaststandarden.

For samtlige forsøk var $S_{T6, n}/S_{T0}$ i resultatene mindre enn μ_2 og dermed mindre enn $\mu_1 + \mu_2$. Utenfor drivlengden, l_s , ble det observert mindre enn 20 % erosjon. Ved videre vindeksponering av modellen er det mulig at erosjonen ville blitt større på den nedre takflaten når takflaten var på lo side for tunnelen. $S_{T6, n}/S_{T0}$ i dette tilfellet ville muligens blitt mindre enn μ_1 . Når vinden blåste av den nedre takflaten forekom en deposisjon hvor $S_{T6, n}/S_{T0}$ var klart større enn 0,8 utenfor l_s med og uten takutstikk. For at resultatene fra forsøkene skal stemme overens med snølaststandarden må enten l_s endres til å bli lengre, eller så må formfaktoren μ_1 som gjelder utenfor drivlengden, l_s , ta høyde for mindre erosjon eller en deposisjon og dermed være større.

Snølaststandarden angir også formfaktoren μ_1 på den øvre takflaten til 0,8. Resultatene fra deposisjonsforsøkene viser en erosjon på den øvre takflaten ($S_{T6, \emptyset}/S_{T0} < 0,8$) som er tilstrekkelig stor nok til at angivelsen av μ_1 er ivaretatt.

Resultatene fra forsøkene viste en tendens til mer erosjon på kanten av den nedre takflaten. Hvis denne kanteffekten neglisjeres kan det tenkes at volumet av sand på modellen etter utført forsøk er bevart ved endring av lengden på takutstikket.

I løpet av forsøkene dannet det seg fonner på den nedre takflaten ved begge vindretningene. Når modellen var orientert med den nedre takflaten i le for vinden posisjonerte toppene på de dannede fonnene seg rett under takutstikkets kant. Dette ser ut til å samsvare med forsøkene til Potac (2013, unpublished). Ved motsatt orientering, det vil si den nedre takflaten i lo for vinden, ser fonntoppene på den nedre takflaten ut til å trekke nærmere veggen til den øvre takflaten.

I løpet av et helt år utsettes bygninger for vind fra alle kanter og i vinterhalvåret transporterer vinden snø som deponeres på den nedre takflaten på bygg med flernivåtak. Hvis et takutstikk føyes til den øvre takflaten viser resultatene fra deposisjonsforsøkene at en «dobbel snøfonn» kan danne seg på den nedre takflaten ved riktig uheldige værforhold, for eksempel når vinden først blåser direkte på og deretter av den nedre takflaten. Ved slike tilfeller er det mulig at drivformasjonens form på den nedre takflaten må revurderes i snølaststandarden.

5.4 Feilkilder

Under karakteriseringen av vindtunnelen viste målingene større og flere tendenser til avvik i testområdet enn i innløpet da braketten til pitotrøret i disse forsøkene ved uhell lett kunne blitt endret på og dermed ikke peke direkte inn i vinden. Hvis pitotrøret eksempelvis ble rotert litt ut av stilling ville totaltrykket og dermed lufthastigheten blitt mindre enn hvis det stod direkte inn i vinden.

Karakteriseringen av vindtunnelen omfattet ikke laseropphenget og gulvet i testområdet. Det er tenkelig at en av disse, eller begge ikke har hatt en horisontal stilling under forsøkene da avstanden ned til bakken var forskjellig foran og bak modellen ved lasermålingene. I tillegg var gulvet relativt tynt og kunne endre form under påkjenning fra modellen og forsøksoperatørene og dermed skjevstille gulvet ytterligere. Skjevstillingen kommer frem fra målinger som viste negativ sandlagtykkelse på den nedre takflaten.

Under utførelsen av erosjonsforsøkene med takutstikk ble det observert at utstikket vibrerte når hastigheten i vindtunnelen økte. En mulig effekt fra dette kan være tidligere erodering av partikler på takutstikket enn ellers på modellens flater. Ved depositionsforsøkene er det sannsynlig at sanden tynget takutstikket nok til at tidlig erodering ikke forekom.

I forsøksresultatene ble symmetri om senterlinjen kommentert. Det ble påvist at skjevhet i symmetri var forårsaket av en generell feilstilling av modellen i vinden. En dimensjonsfeil på 1 cm ble oppdaget på den minste modellmodulens kortside. Dette bidro til at symmetrien på den øvre takflaten var bevart, mens symmetrien ikke var det for den nedre takflaten.

I forsøkene beskrevet i artikkelen til Xuanyi Zhou (2014, unpublished) ble tiden tatt til 6, 12 og 18 minutter. Xuanyi Zhou erfarte at 6 minutter var tilstrekkelig for å se en tendens i forsøkene. En 6 minutter lang modelleksponering i vinden er for øvrig ikke representativt med en bygning utsatt for vind i en hel vinter. Faktoren $S_{T6, n}/S_{T0}$ i forsøket vil øke når vindeksponeringstiden øker. Om den blir høyere enn snølaststandardens totale formfaktor er usikkert, men det er sannsynlig at $S_{T6, n}/S_{T0}$ vil være enda større utenfor l_s .

Under utførelsen av depositionsforsøk RP_D_0_L ble en T0-profil fastsatt ved lasermåling. Resultatene fra denne målingen ble videre benyttet til lage T0-profiler for de resterende forsøkene. Dette vil gjøre at avstanden ned til sanden på et takutstikk vil være den samme som for den øvre takflaten, når det i realiteten kan tenkes at takutstikket vil være noe nedbøyd

Diskusjon

grunnet sandens tyngde. Hvorvidt dette er negativt eller ikke kommer an på hvor stor nedbøyningen er ved T6-målingen. Dette kan bedømmes fra deposisjonsdiagrammene og bildeseriene ved hvert forsøk. Erosjonen på takutstikket kan antas å være tilstrekkelig stor nok til at nedbøyning av takutstikket under T6-målingen kan antas neglisjerbar. I noen tilfeller viste resultatene negative sandlagtykkelser og det kan være at nedbøyningen fra sanden andre steder på utstikket påvirket denne avlesningen.

6. Konklusjon

I forbindelse med forsøkene til denne gradsoppgaven ble det benyttet en vindtunnel. I forbindelse med karakteriseringen av denne vindtunnelen antas vindtunnelens luftstrøm å ha vært tilstrekkelig homogen i området som berørte modellen. Lufthastigheten ble ved jevne målinger i vindtunnelen bestemt til å øke med 0,034 m/s når vindtunnelens turbinhastighet økte med 1 RPM.

Forsøk ved erosjonsteknikk ble funnet uegnet til dette studiet av partikkeldriv da resultatene fra forsøkene ikke kunne brukes til å utdype resultatene fra deposisjonsforsøkene ytterligere. Denne metoden kan eksempelvis gi gode resultater ved undersøkelser i forbindelse med vindbelastning.

Det kan antas en sammenheng mellom partikkeldeposisjon på den nedre takflaten på et flernivåtak når det overhengende takutstikkets lengde varierer. Hvis endeeffekten som påvirket erosjonen ble neglisjert var volumet av sand bevart på den nedre takflaten i le for vinden. Toppunktets plassering i forhold til takutstikkets kant varierte ved de to vindretningene. I verste fall kan dette bidra til at en «dobbel snøfonn» dannes ved driv i en ekte situasjon. Resultatene fra deposisjonsforsøkene dikterer en endring i snølaststandarden som omhandler flernivåtak da enten drivlengden, l_s , må forlenges eller formfaktoren μ_1 må økes på den nedre takflaten.

7. Videre arbeid

Formålet med denne oppgaven var blant annet å belyse hvordan snølaststandarden tar stilling til snølasten på den nedre takflaten på et flernivåtak med takutstikk, samt starte arbeidet for at snølaststandarden blir revidert på dette punktet hvis funnene i forsøkene gir grunnlag for det. Det videre arbeidet med funnene fra denne gradsoppgaven vil blant annet omfatte forsøk hvor formen på testobjektets varieres for å se på fonndannelsen på den nedre takflaten. For å fastsette en sammenheng i forbindelse med bevart snøvolum på den nedre takflaten kan det være hensiktsmessig å utføre flere depositionsforsøk med en nedre takflate som er lengre enn ved forsøkene utført i forbindelse med denne oppgaven.

Deposisjonsforsøkene burde settes opp på en slik måte at resultatene kan betraktes som todimensjonale, det vil si at sideeffektene av vinden kan neglisjeres. En variasjon av takutstikklengder er og hensiktsmessig for å finne et empirisk forhold mellom de styrende faktorene ved snødeposisjonen innunder takutstikk. Deposisisjonsforsøkene burde i tillegg utføres med en lengre vindeksponeringstid. Da vil det vise seg om 6 minutter er tilstrekkelig med tid for sanden til å få utviklet en likevektsprofil på den nedre takflaten både i le og lo for vinden.

8. Litteraturliste

- Arya, S. P. S. (2001). *Introduction to Micrometeorology*. San Diego: Academic Press. XXV, 420 s. : ill. s.
- Bagnold, R. A. (1973). Nature of Saltation and of Bed-Load Transport in Water. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 332 (1591): 473-504.
- Berry, M. O. (1981). *Handbook of Snow: Principles, Processes, Management & Use, Chapter 2, Snow and Climate*: Pergamon Press. XX, 776 s. : ill. s.
- Castro, I. P. & Robins, A. G. (1977). Flow Around a Surface-Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams. *Journal of Fluid Mechanics*, 79 (FEB22): 307-&.
- Çengel, Y. A. & Turner, R. H. (2001). *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences.: Inkl. CD-ROM*: McGraw-Hill Education.
- Ferreira, A. D. (2011). Structural Design of a Natural Windbreak Using Computational and Experimental Modeling. *Environmental Fluid Mechanics*, 11 (5): 517-530.
- Hunt, J. C. R., Abell, C. J., Peterka, J. A. & Woo, H. (1978). Kinematical Studies of Flows Around Free or Surface-Mounted Obstacles - Applying Topology to Flow Visualization. *Journal of Fluid Mechanics*, 86 (MAY): 179-&.
- Johnson, R. W. (1998). *The Handbook of Fluid Dynamics*. Boca Raton, Fla.: CRC Press. 1 b. (flere pag.) : ill. s.
- Kind, R. J. (1976). Critical-Examination of Requirements for Model Simulation of Wind-Induced Erosion-Deposition Phenomena such as Snow Drifting. *Atmospheric Environment*, 10 (3): 219-227.
- Morrison, F. A. (2013). *An Introduction to Fluid Mechanics*. New York: Cambridge University Press. XVI, 927 s. : ill. s.
- O'Rourke, M. & Wood, E. (1986). Improved Relationship for Drift Loads on Buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 13 (6): 647-652.
- O'Rourke, M. J., Speck, R. S. & Stiefel, U. (1985). Drift Snow Soads on Multilevel Roofs. *Journal of Structural Engineering-Asce*, 111 (2): 290-306.
- Oura, H., Hokkaido, D. & Teion, K. (1967). *Studies on Blowing Snow II*. Sapporo: Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University.

- Owen, P. R. (1964). Saltation of Uniform Grains in Air. *Journal of Fluid Mechanics*, 20 (02): 225-242.
- Potac, J. (2013, unpublished). *Field Measurements and Numerical Simulations of Snow Transport and Deposition Around Structures and Into Ventilation Intakes*. Philosophiae Doctor (PhD) Thesis. Ås: Norwegian University of Life Sciences, Department of Mathematical Sciences and Technology. 344 s.
- Prasad, D., Uliate, T. & Ahmed, M. R. (2009). Wind Loads on Low-Rise Building Models with Different Roof Configurations. 36 (3): 231-243.
- Standard, N. (2008). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner. Del 1-3. Allmenne laster. Snølaster*. Oslo: Standard Norge. 45, 10 s. : ill. s.
- Tabler, R. D. (1988). *Snow Fence Handbook (Release 1.1)*. Laramie, Wyo.: Tabler & Associates.
- Thiis, T. K. (1999). *The New mess building in Ny-Ålesund: effects on snowdrifts*, b. nr 5-1999. Bergen: The Institute. 20 s. : ill. s.
- Thomas K. Thiis, Y. G. (1999). Large-Scale Measurements of Snowdrifts Around Flat-Roofed and Single-Pitch-Roofed Buildings. *Cold Regions Science and Technology*, 30 (1-3): 175-181.
- Tsuchiya, M., Tomabechi, T., Hongo, T. & Ueda, H. (2002). Wind Effects on Snowdrift on Stepped Flat Roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90 (12-15): 1881-1892.
- Viegas, D. X. & Borges, A. R. J. (1986). An Erosion Technique for the Measurement of the Shear Stress Field on a Flat Plate. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 19 (8): 625.
- Xuanyi Zhou, J. H., Ming Gu. (2014, unpublished). *Research of Wind Tunnel Test on Snow Loads on a Stepped Flat Roof*. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, T. U., Shanghai (red.). 40 s.

9. Vedlegg

Tabell V.1: Hastigheter fra målinger av trykkforskjeller over innløpets tverrsnitt.....	79
Tabell V.2: Hastigheter fra trykkforskjellmålinger over testområdet.	80
Tabell V.3: Lufthastigheten i vindtunnelen.	81
Tabell V.4: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_0_L.	82
Tabell V.5: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_22,5_L.	83
Tabell V.6: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_22,5_L.	84
Tabell V.7: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_0_W.....	85
Tabell V.8: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_22,5_W.....	85
Tabell V.9: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_45_W.....	86
Tabell V.10: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_0_L.	87
Tabell V.11: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_22,5_L.....	88
Tabell V.12: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_45_L.....	90
Tabell V.13: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_0_W.	92
Tabell V.14: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_22,5_W.	93
Tabell V.15: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_45_W.	95

7. Vedlegg

Tabell V.1: Hastigheter fra målinger av trykkforskjeller over innløpets tverrsnitt.

Hastigheter over innløpets tverrsnitt										
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	Innløpets høyde [m]
0.00		7.13	6.76	8.54	10.42	10.50	8.73	8.23	3.19	
0.25		10.17	10.00	10.08	10.25	10.17	10.25	10.33	5.52	
0.50		9.91	10.08	10.00	10.08	10.00	10.17	10.00	6.64	
0.75		10.08	10.00	10.00	10.00	10.00	10.08	10.08	8.03	
1.00		10.17	10.08	10.00	10.00	10.08	10.08	10.17	8.34	
1.25		10.25	9.91	9.83	9.74	10.00	10.08	10.33	8.44	
1.50		10.33	10.08	10.00	9.83	9.91	10.08	10.33	8.64	
1.75		10.25	10.25	10.17	10.08	10.08	10.25	10.42	6.64	
1.95		10.17	9.74	8.73	8.44	9.30	9.39	9.39	4.32	
Innløpets bredde [m]										

7. Vedlegg

Tabell V.2: Hastigheter fra trykkforskjellmålinger over testområdet.

Hastigheter over testområdet								Avstand fra
	-1.00	-0.75	-0.50	0.00	0.50	0.75	1.00	senterlinjen [m]
0.00			10.17	10.42	10.42			
0.25			10.08	10.42	10.42			
0.50			10.17	10.33	10.42			
0.75			10.25	10.42	10.50			
1.00			10.17	10.33	10.58			
1.25			10.17	10.50	10.50			
1.50			10.17	10.42	10.50			
1.75			10.25	10.33	10.42			
2.00			10.17	10.33	10.50			
2.25			10.25	10.33	10.50			
2.50	6.89	10.00	10.33	10.42	10.50	10.50	8.13	
2.75			10.33	10.33	10.50			
3.00			10.25	10.33	10.50			
3.25			10.25	10.33	10.50			
3.50			10.42	10.33	10.58			
3.75			10.33	10.33	10.58			
4.00			10.08	10.25	10.42			
4.25			9.91	10.33	10.33			
4.50			10.08	10.33	10.33			
4.75			9.91	10.33	10.25			
4.98			9.83	10.25	10.42			
5.25								
5.50								
5.75								
6.00			9.74	10.17	10.17			
6.25								
6.50								
6.75								
7.00			8.54	9.66	9.91			
Avstand fra innløpet [m]								

7. Vedlegg

Tabell V.3: Lufthastigheten i vindtunnelen.

Lufthastighet ved 0.3 m høyde					
Turbinhastighet w RPM	Trykkforskjellen dP Pa	Lufthastigheten v m/s	dv/dw m/(s RPM)	$\sum(dv/dw)/n$ m/(s RPM)	
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
Lufthastighet ved 1.0 m høyde					
Turbinhastighet w RPM	Trykkforskjellen dP Pa	Lufthastigheten v m/s	dv/dw m/(s RPM)	$\sum(dv/dw)/n$ m/(s RPM)	
50	1.35	1.51			
100	6.40	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

7. Vedlegg

Ved bearbeidelsen av erosjonsdiagrammene i snitt gjennom senterlinjen ble resultatene i tabell V.4 – V.9 benyttet.

Tabell V.4: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_0_L.

Målinger fra forsøk RP_E_0_L							
Øvre steg				Nedre Steg			
x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v	x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v
mm		RPM	m/s	mm		RPM	m/s
-0.43	0.00	200	6.80	1034.73	0.99	200	6.80
1.29	0.00	200	6.80	1030.02	0.98	225	7.65
1.29	0.00	225	7.65	1030.02	0.98	250	8.50
4.29	0.00	225	7.65	1030.02	0.98	275	9.35
4.29	0.00	250	8.50	1002.14	0.95	275	9.35
6.00	0.01	250	8.50	1002.14	0.95	300	10.20
6.00	0.01	275	9.35	978.13	0.93	300	10.20
12.01	0.01	275	9.35	978.13	0.93	325	11.05
12.01	0.01	300	10.20	946.40	0.90	325	11.05
27.02	0.03	300	10.20	946.40	0.90	350	11.90
27.02	0.03	325	11.05	807.03	0.77	350	11.90
31.73	0.03	325	11.05	807.03	0.77	375	12.75
31.73	0.03	350	11.90	607.20	0.58	375	12.75
39.45	0.04	350	11.90	607.20	0.58	350	11.90
39.45	0.04	375	12.75	600.34	0.57	350	11.90
105.92	0.10	375	12.75	596.48	0.57	325	11.05
105.92	0.10	350	11.90	596.48	0.57	300	10.20
136.36	0.13	350	11.90	596.48	0.57	275	9.35
136.36	0.13	325	11.05	596.48	0.57	250	8.50
157.38	0.15	325	11.05	596.48	0.57	225	7.65
157.38	0.15	300	10.20	596.48	0.57	200	6.80
189.54	0.18	300	10.20				
189.54	0.18	275	9.35				
251.29	0.24	275	9.35				
251.29	0.24	250	8.50				
301.89	0.29	250	8.50				
301.89	0.29	225	7.65				
527.02	0.50	225	7.65				
527.02	0.50	200	6.80				
562.18	0.54	200	6.80				
562.18	0.54	175	5.95				
562.18	0.54	150	5.10				

7. Vedlegg

Tabell V.5: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_22,5_L.

Målinger fra forsøk RP_E_22,5_L							
Øvre steg				Nedre steg			
x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v	x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v
mm		RPM	m/s	mm		RPM	m/s
826.00	0.79	250	8.50	1047.46	1.00	150	5.10
809.81	0.77	250	8.50	1047.46	1.00	175	5.95
809.81	0.77	275	9.35	1047.46	1.00	200	6.80
775.02	0.74	275	9.35	1047.46	1.00	225	7.65
775.02	0.74	300	10.20	1047.46	1.00	250	8.50
749.64	0.71	300	10.20	1047.46	1.00	275	9.35
749.64	0.71	275	9.35	1047.46	1.00	300	10.20
608.50	0.58	275	9.35	1047.46	1.00	325	11.05
608.50	0.58	250	8.50	1017.25	0.97	325	11.05
579.52	0.55	250	8.50	1017.25	0.97	350	11.90
579.52	0.55	275	9.35	1001.62	0.95	350	11.90
567.92	0.54	275	9.35	1001.62	0.95	375	12.75
567.92	0.54	250	8.50	597.46	0.57	375	12.75
514.75	0.49	250	8.50	597.46	0.57	350	11.90
514.75	0.49	275	9.35	597.46	0.57	325	11.05
445.38	0.42	275	9.35	597.46	0.57	300	10.20
445.38	0.42	250	8.50	597.46	0.57	275	9.35
430.39	0.41	250	8.50	597.46	0.57	250	8.50
430.39	0.41	275	9.35	597.46	0.57	225	7.65
285.66	0.27	275	9.35	597.46	0.57	200	6.80
285.66	0.27	300	10.20	597.46	0.57	175	5.95
224.49	0.21	300	10.20	597.46	0.57	150	5.10
224.49	0.21	325	11.05				
190.91	0.18	325	11.05				
190.91	0.18	350	11.90				
168.92	0.16	350	11.90				
168.92	0.16	375	12.75				
20.79	0.02	375	12.75				
20.79	0.02	350	11.90				
13.79	0.01	350	11.90				
13.79	0.01	325	11.05				
2.40	0.00	325	11.05				
2.40	0.00	300	10.20				

7. Vedlegg

Tabell V.6: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_22,5_L.

Målinger fra forsøk RP_E_45_L							
Øvre steg				Nedre steg			
x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v	x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v
mm		RPM	m/s	mm		RPM	m/s
1039.84	0.99	150	5.10	601.98	0.57	150	5.10
1039.84	0.99	175	5.95	601.98	0.57	175	5.95
1039.84	0.99	200	6.80	601.98	0.57	200	6.80
1032.84	0.98	200	6.80	601.98	0.57	225	7.65
1032.84	0.98	225	7.65	601.98	0.57	250	8.50
1024.52	0.98	225	7.65	601.98	0.57	275	9.35
1024.52	0.98	250	8.50	601.98	0.57	300	10.20
921.19	0.88	250	8.50	601.98	0.57	325	11.05
921.19	0.88	275	9.35	601.98	0.57	350	11.90
746.94	0.71	275	9.35	601.98	0.57	375	12.75
746.94	0.71	250	8.50	1051.98	1.00	375	12.75
626.77	0.60	250	8.50	1051.98	1.00	350	11.90
626.77	0.60	225	7.65	1051.98	1.00	325	11.05
579.79	0.55	225	7.65	1051.98	1.00	300	10.20
579.79	0.55	250	8.50	1051.98	1.00	275	9.35
481.38	0.46	250	8.50	1051.98	1.00	250	8.50
481.38	0.46	225	7.65	1051.98	1.00	225	7.65
440.02	0.42	225	7.65	1051.98	1.00	200	6.80
440.02	0.42	250	8.50	1051.98	1.00	175	5.95
300.35	0.29	250	8.50	1051.98	1.00	150	5.10
300.35	0.29	275	9.35				
249.56	0.24	275	9.35				
249.56	0.24	300	10.20				
207.89	0.20	300	10.20				
207.89	0.20	325	11.05				
171.10	0.16	325	11.05				
171.10	0.16	350	11.90				
137.85	0.13	350	11.90				
137.85	0.13	375	12.75				
40.78	0.04	375	12.75				
40.78	0.04	350	11.90				
31.91	0.03	350	11.90				
31.91	0.03	325	11.05				
25.71	0.02	325	11.05				
25.71	0.02	300	10.20				
9.75	0.01	300	10.20				
9.75	0.01	275	9.35				
6.21	0.01	275	9.35				
6.21	0.01	250	8.50				
0.00	0.00	225	7.65				

7. Vedlegg

Tabell V.7: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_0_W.

Målinger fra forsøk RP_E_0_W							
Nedre steg				Øvre steg			
x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v	x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v
mm		RPM	m/s	mm		RPM	m/s
450.00	0.43	150	5.10	450.00	0.43	175	5.95
371.94	0.35	150	5.10	484.05	0.46	175	5.95
371.94	0.35	175	5.95	484.05	0.46	150	5.10
312.75	0.30	175	5.95	504.75	0.48	150	5.10
312.75	0.30	200	6.80	504.75	0.48	175	5.95
266.65	0.25	200	6.80	530.52	0.51	175	5.95
266.65	0.25	225	7.65	530.52	0.51	200	6.80
231.55	0.22	225	7.65	543.40	0.52	200	6.80
231.55	0.22	250	8.50	543.40	0.52	225	7.65
191.21	0.18	250	8.50	605.52	0.58	225	7.65
191.21	0.18	275	9.35	605.52	0.58	250	8.50
152.97	0.15	275	9.35	988.80	0.94	250	8.50
152.97	0.15	300	10.20	988.80	0.94	225	7.65
89.58	0.09	300	10.20	1040.34	0.99	225	7.65
89.58	0.09	325	11.05	1040.34	0.99	200	6.80
56.05	0.05	325	11.05	1050.00	1.00	200	6.80
56.05	0.05	350	11.90				
3.14	0.00	350	11.90				
3.14	0.00	375	12.75				
0.00	0.00	375	12.75				

Tabell V.8: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_22,5_W.

Målinger fra forsøk RP_E_22,5_L							
Nedre steg				Øvre steg			
x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v	x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v
mm		RPM	m/s	mm		RPM	m/s
448.70	0.43	150	5.10	478.84	0.46	150	5.10
448.70	0.43	175	5.95	478.84	0.46	175	5.95
239.13	0.23	175	5.95	478.84	0.46	200	6.80
239.13	0.23	200	6.80	478.84	0.46	225	7.65
237.83	0.23	200	6.80	501.23	0.48	225	7.65
237.83	0.23	225	7.65	501.23	0.48	250	8.50
208.04	0.20	225	7.65	547.21	0.52	250	8.50
208.04	0.20	250	8.50	547.21	0.52	275	9.35
183.91	0.18	250	8.50	776.92	0.74	275	9.35
183.91	0.18	275	9.35	776.92	0.74	250	8.50
171.30	0.16	275	9.35	1051.41	1.00	250	8.50
171.30	0.16	300	10.20				
145.87	0.14	300	10.20				
145.87	0.14	325	11.05				
107.61	0.10	325	11.05				
107.61	0.10	350	11.90				
31.09	0.03	350	11.90				
31.09	0.03	375	12.75				
1.52	0.00	375	12.75				

7. Vedlegg

Tabell V.9: Resultater fra erosjonsforsøk RP_E_45_W.

Målinger fra forsøk RP_E_45_W							
Nedre steg				Øvre steg			
x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v	x	x/L	Turbinhastighet w	Lufthastighet v
mm		RPM	m/s	mm		RPM	m/s
5.48	0.01	225	7.65	450.00	0.43	200	6.80
5.48	0.01	225	7.65	454.48	0.43	200	6.80
5.48	0.01	250	8.50	454.48	0.43	225	7.65
5.48	0.01	250	8.50	468.93	0.45	225	7.65
5.48	0.01	275	9.35	468.93	0.45	250	8.50
16.21	0.02	275	9.35	496.01	0.47	250	8.50
16.21	0.02	250	8.50	496.01	0.47	275	9.35
24.10	0.02	250	8.50	542.03	0.52	275	9.35
24.10	0.02	225	7.65	542.03	0.52	300	10.20
46.23	0.04	225	7.65	637.72	0.61	300	10.20
46.23	0.04	250	8.50	637.72	0.61	275	9.35
71.86	0.07	250	8.50	661.13	0.63	275	9.35
71.86	0.07	275	9.35	661.13	0.63	300	10.20
77.56	0.07	275	9.35	689.02	0.66	300	10.20
77.56	0.07	300	10.20	689.02	0.66	275	9.35
101.87	0.10	300	10.20	855.16	0.81	275	9.35
101.87	0.10	325	11.05	855.16	0.81	250	8.50
116.11	0.11	325	11.05	997.68	0.95	250	8.50
116.11	0.11	300	10.20	997.68	0.95	225	7.65
172.42	0.16	300	10.20	1050.00	1.00	225	7.65
172.42	0.16	275	9.35	1050.00	1.00	200	6.80
312.20	0.30	275	9.35			200	6.80
312.20	0.30	300	10.20				
344.18	0.33	300	10.20				
344.18	0.33	325	11.05				
352.95	0.34	325	11.05				
352.95	0.34	350	11.90				
362.80	0.35	350	11.90				
362.80	0.35	375	12.75				
450.00	0.43	375	12.75				

7. Vedlegg

Ved bearbeidelsen av depositionsdiagrammene ble resultatene i tabell V.10 – V.15 benyttet.

Tabell V.10: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_0_L.

Målinger fra forsøk RP_D_0_L													
T0-måling for øvre og nedre takflate					T6-måling for øvre og nedre takflate					T0-T6 for den øvre og nedre takflate			
x	x/L	Sandlag-tykkelse	Ideell sandlag-tykkelse	Avstand med laser	x	x/L	Sandlag-tykkelse	Avstand med laser	Endring i sandlag-tykkelse	Arealet under avlesning	Netto areal deponert	Andel deponert fra T0	
mm		mm	mm	mm	mm		mm	mm	mm	mm2	mm2	%	
0	0.00	4.8	0.0	2464.2	0	0.00	2.1	2466.9	-2.7	-34.1			
25	0.02	21.5	22.0	2447.5	25	0.02	9.4	2459.6	-12.0	-300.6			
50	0.05	22.1	22.0	2447.0	50	0.05	14.5	2454.5	-7.6	-188.8			
75	0.07	21.3	22.0	2447.8	75	0.07	17.3	2451.8	-4.0	-100.0			
100	0.10	22.5	22.0	2446.5	100	0.10	19.3	2449.7	-3.2	-80.0			
125	0.12	21.8	22.0	2447.2	125	0.12	19.9	2449.1	-1.8	-45.6			
150	0.14	21.9	22.0	2447.1	150	0.14	20.6	2448.4	-1.3	-33.1			
175	0.17	21.3	22.0	2447.7	175	0.17	19.8	2449.2	-1.5	-37.5			
200	0.19	21.9	22.0	2447.1	200	0.19	19.1	2450.0	-2.8	-70.6			
225	0.21	22.2	22.0	2446.8	225	0.21	18.4	2450.6	-3.8	-95.0			
250	0.24	22.0	22.0	2447.0	250	0.24	17.3	2451.8	-4.8	-119.4			
275	0.26	21.7	22.0	2447.3	275	0.26	16.5	2452.5	-5.2	-130.6			
300	0.29	22.6	22.0	2446.4	300	0.29	16.5	2452.5	-6.0	-151.2			
325	0.31	22.3	22.0	2446.7	325	0.31	16.8	2452.2	-5.5	-136.9			
350	0.33	22.7	22.0	2446.4	350	0.33	16.5	2452.5	-6.2	-154.4			
375	0.36	22.6	22.0	2446.4	375	0.36	16.8	2452.2	-5.8	-145.0			
400	0.38	22.4	22.0	2446.6	400	0.38	17.1	2451.9	-5.3	-132.5			
425	0.40	22.2	22.0	2446.9	425	0.40	17.2	2451.8	-5.0	-123.8			
450	0.43	22.3	22.0	2446.7	450	0.43	16.6	2452.4	-5.7	-141.3			
475	0.45	22.3	22.0	2446.7	475	0.45	17.1	2452.0	-5.3	-131.3			
500	0.48	22.0	22.0	2447.0	500	0.48	16.1	2452.9	-5.9	-146.9			
525	0.50	22.4	22.0	2446.6	525	0.50	15.3	2453.7	-7.1	-176.3			
550	0.52	22.1	22.0	2446.9	550	0.52	14.9	2454.1	-7.2	-180.6			
575	0.55	22.2	22.0	2446.8	575	0.55	12.8	2456.3	-9.4	-236.2			
600	0.57	15.3	22.0	2453.7	600	0.57	9.3	2459.7	-6.0	-74.7	-3166.3	-24.5	
625	0.60	12.3	22.0	2616.7	625	0.60	34.9	2594.1	22.6	281.9			
650	0.62	22.7	22.0	2606.3	650	0.62	31.6	2597.4	8.8	221.2			
675	0.64	22.8	22.0	2606.2	675	0.64	28.6	2600.5	5.8	143.8			
700	0.67	22.4	22.0	2606.6	700	0.67	26.3	2602.7	3.9	98.1			
725	0.69	24.7	22.0	2604.3	725	0.69	25.6	2603.4	0.9	22.5			
750	0.71	24.7	22.0	2604.3	750	0.71	25.0	2604.0	0.3	7.5			
775	0.74	24.7	22.0	2604.3	775	0.74	25.3	2603.7	0.6	14.4			
800	0.76	25.0	22.0	2604.0	800	0.76	25.0	2604.0	0.1	1.3			
825	0.79	23.9	22.0	2605.1	825	0.79	25.3	2603.7	1.4	35.6			
850	0.81	24.0	22.0	2605.0	850	0.81	24.5	2604.5	0.5	11.9			
875	0.83	23.8	22.0	2605.2	875	0.83	24.4	2604.6	0.6	13.8			
900	0.86	23.6	22.0	2605.5	900	0.86	24.8	2604.2	1.3	32.5			
925	0.88	24.5	22.0	2604.5	925	0.88	24.4	2604.6	-0.2	-3.8			
950	0.90	24.3	22.0	2604.7	950	0.90	24.3	2604.7	0.0	0.0			
975	0.93	24.4	22.0	2604.6	975	0.93	24.1	2604.9	-0.3	-6.9			
1000	0.95	24.2	22.0	2604.9	1000	0.95	22.9	2606.1	-1.2	-30.6			
1025	0.98	23.4	22.0	2605.6	1025	0.98	20.5	2608.5	-2.9	-72.5			
1050	1.00	19.6	0.0	2609.4	1050	1.00	13.0	2616.0	-6.5	-81.9	688.8	7.2	

7. Vedlegg

Tabell V.11: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_22,5_L.

Målinger fra forsøk RP_D_22,5_L#1													
T0-måling for øvre takflate og takutstikk					T0-måling for nedre takflate			T6-måling for øvre takflate og takutstikk				T6-måling for nedre takflate	
x	x/L	Sandlag-tykkelse	Ideell sandlag-tykkelse	Avstand med laser	Sandlag-tykkelse	Ideell sandlag-tykkelse	Avstand med laser	x	x/L	Sandlag-tykkelse	Avstand med laser	Sandlag-tykkelse	Avstand med laser
mm		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	mm	mm
0	0.00	4.8	0.0	2464.2				0	0.00	3.6	2465.4		
25	0.02	21.5	22.0	2447.5				25	0.02	8.9	2460.1		
50	0.05	22.1	22.0	2447.0				50	0.05	14.3	2454.7		
75	0.07	21.3	22.0	2447.8				75	0.07	18.1	2451.0		
100	0.10	22.5	22.0	2446.5				100	0.10	19.7	2449.3		
125	0.12	21.8	22.0	2447.2				125	0.12	20.8	2448.3		
150	0.14	21.9	22.0	2447.1				150	0.14	20.7	2448.3		
175	0.17	21.3	22.0	2447.7				175	0.17	19.7	2449.3		
200	0.19	21.9	22.0	2447.1				200	0.19	19.4	2449.6		
225	0.21	22.2	22.0	2446.8				225	0.21	18.1	2450.9		
250	0.24	22.0	22.0	2447.0				250	0.24	17.2	2451.8		
275	0.26	21.7	22.0	2447.3				275	0.26	17.0	2452.0		
300	0.29	22.6	22.0	2446.4				300	0.29	15.8	2453.2		
325	0.31	22.3	22.0	2446.7				325	0.31	15.9	2453.1		
350	0.33	22.7	22.0	2446.4				350	0.33	15.5	2453.5		
375	0.36	22.6	22.0	2446.4				375	0.36	15.7	2453.3		
400	0.38	22.4	22.0	2446.6				400	0.38	15.8	2453.2		
425	0.40	22.2	22.0	2446.9				425	0.40	16.4	2452.6		
450	0.43	22.3	22.0	2446.7				450	0.43	16.8	2452.2		
475	0.45	22.3	22.0	2446.7				475	0.45	16.9	2452.1		
500	0.48	22.0	22.0	2447.0				500	0.48	17.4	2451.6		
525	0.50	22.4	22.0	2446.6				525	0.50	17.9	2451.1		
550	0.52	22.1	22.0	2446.9				550	0.52	17.5	2451.5		
575	0.55	22.2	22.0	2446.8				575	0.55	16.7	2452.3		
600	0.57	22.0	22.0	2447.0				600	0.57	16.6	2452.4		
625	0.60	23.0	22.0	2446.0	24.1	22.0	2604.9	625	0.60	15.9	2453.1	22.8	2606.2
650	0.62	22.4	22.0	2446.6	22.7	22.0	2606.3	650	0.62	15.4	2453.6	23.6	2605.5
675	0.64	22.2	22.0	2446.9	22.8	22.0	2606.2	675	0.64	14.7	2454.3	23.7	2605.3
700	0.67	22.3	22.0	2446.7	22.4	22.0	2606.6	700	0.67	13.5	2455.5	23.7	2605.3
725	0.69	22.3	22.0	2446.7	24.7	22.0	2604.3	725	0.69	13.6	2455.4	24.2	2604.9
750	0.71	22.0	22.0	2447.0	25.0	22.0	2604.0	750	0.71	11.1	2457.9	24.3	2604.8
775	0.74	22.4	22.0	2446.6	24.7	22.0	2604.3	775	0.74	8.4	2460.6	24.5	2604.5
800	0.76	22.1	22.0	2446.9	25.0	22.0	2604.0	800	0.76	5.0	2464.0	25.8	2603.2
825	0.79	5.0	0.0	2464.0	23.9	22.0	2605.1	825	0.79	-0.3	2469.3	28.5	2600.5
850	0.81				24.0	22.0	2605.0	850	0.81			30.7	2598.3
875	0.83				23.8	22.0	2605.2	875	0.83			30.2	2598.8
900	0.86				23.6	22.0	2605.5	900	0.86			28.7	2600.3
925	0.88				24.5	22.0	2604.5	925	0.88			27.4	2601.6
950	0.90				24.3	22.0	2604.7	950	0.90			26.0	2603.0
975	0.93				24.4	22.0	2604.6	975	0.93			24.7	2604.3
1000	0.95				24.2	22.0	2604.9	1000	0.95			23.1	2605.9
1025	0.98				23.4	22.0	2605.6	1025	0.98			16.3	2612.7
1050	1.00				19.6	0.0	2609.4	1050	1.00			6.7	2622.3

7. Vedlegg

Målinger fra forsøk RP_D_22,5_L#2							
T0-T6 for den øvre takflate og takutstikk				T0-T6 for den nedre takflate			
Endring i sandlagtykkelse	Arealet under avlesningen	Netto areal deponert	Andel deponert fra T0	Endring i sandlagtykkelse	Arealet under avlesningen	Netto areal deponert	Andel deponert fra T0
mm	mm ²	mm ²	%	mm	mm ²	mm ²	%
-1.2	-15.3						
-12.6	-315.0						
-7.7	-193.1						
-3.2	-80.0						
-2.8	-68.8						
-1.0	-25.6						
-1.2	-30.6						
-1.6	-40.6						
-2.5	-62.5						
-4.1	-102.5						
-4.8	-120.6						
-4.7	-118.1						
-6.8	-169.4						
-6.4	-159.4						
-7.2	-179.4						
-6.8	-171.2						
-6.6	-165.6						
-5.7	-143.1						
-5.5	-136.9						
-5.4	-133.8						
-4.6	-115.6						
-4.4	-111.2						
-4.6	-115.6						
-5.5	-138.1						
-5.4	-134.4						
-7.1	-176.3			-1.3	-16.2		
-7.0	-175.6			0.8	20.6		
-7.4	-185.6			0.9	22.5		
-8.8	-218.8			1.3	32.5		
-8.7	-216.9			-0.6	-14.4		
-10.9	-272.5			-0.7	-18.1		
-14.0	-350.0			-0.2	-5.6		
-17.1	-428.1			0.8	20.0		
-5.3	-65.9	-5136.3	-28.8	4.7	116.3		
				6.7	166.3		
				6.4	159.4		
				5.2	129.4		
				2.9	73.1		
				1.7	43.1		
				0.3	7.5		
				-1.1	-26.3		
				-7.1	-178.1		
				-12.9	-160.9	370.9	3.9

7. Vedlegg

Tabell V.12: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_45_L.

Målinger fra forsøk RP_D_45_L #1													
T0-måling for øvre takflate og takutstikk					T0-måling for nedre takflate			T6-måling for øvre takflate og takutstikk				T6-måling for nedre takflate	
x	x/L	Sandlag-tykkelse	Ideell sandlag-tykkelse	Avstand med laser	Sandlag-tykkelse	Ideell sandlag-tykkelse	Avstand med laser	x	x/L	Sandlag-tykkelse	Avstand med laser	Sandlag-tykkelse	Avstand med laser
mm		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	mm	mm
0	0.00	4.8	0.0	2464.2				0	0	2.950	2466.1		
25	0.02	21.5	22.0	2447.5				25	0	9.325	2459.7		
50	0.05	22.1	22.0	2447.0				50	0	14.300	2454.7		
75	0.07	21.3	22.0	2447.8				75	0	18.200	2450.8		
100	0.10	22.5	22.0	2446.5				100	0	19.775	2449.2		
125	0.12	21.8	22.0	2447.2				125	0	21.000	2448.0		
150	0.14	21.9	22.0	2447.1				150	0	21.100	2447.9		
175	0.17	21.3	22.0	2447.7				175	0	19.975	2449.0		
200	0.19	21.9	22.0	2447.1				200	0	19.050	2450.0		
225	0.21	22.2	22.0	2446.8				225	0	18.825	2450.2		
250	0.24	22.0	22.0	2447.0				250	0	17.925	2451.1		
275	0.26	21.7	22.0	2447.3				275	0	16.500	2452.5		
300	0.29	22.6	22.0	2446.4				300	0	16.100	2452.9		
325	0.31	22.3	22.0	2446.7				325	0	15.625	2453.4		
350	0.33	22.7	22.0	2446.4				350	0	15.300	2453.7		
375	0.36	22.6	22.0	2446.4				375	0	15.200	2453.8		
400	0.38	22.4	22.0	2446.6				400	0	15.750	2453.3		
425	0.40	22.2	22.0	2446.9				425	0	16.300	2452.7		
450	0.43	22.3	22.0	2446.7				450	0	16.050	2453.0		
475	0.45	22.3	22.0	2446.7				475	0	16.625	2452.4		
500	0.48	22.0	22.0	2447.0				500	0	17.175	2451.8		
525	0.50	22.4	22.0	2446.6				525	0	17.700	2451.3		
550	0.52	22.1	22.0	2446.9				550	0	17.325	2451.7		
575	0.55	22.2	22.0	2446.8				575	0	17.450	2451.6		
600	0.57	22.0	22.0	2447.0				600	0	17.000	2452.0		
625	0.60	22.0	22.0	2447.0	24.1	22.0	2604.9	625	0	19.350	2449.7	157.48	2471.5
650	0.62	22.0	22.0	2447.0	22.7	22.0	2606.3	650	0	18.875	2450.1	69.90	2559.1
675	0.64	22.0	22.0	2447.0	22.8	22.0	2606.2	675	0	18.050	2451.0	24.13	2604.9
700	0.67	22.0	22.0	2447.0	22.4	22.0	2606.6	700	0	17.275	2451.7	23.60	2605.4
725	0.69	22.0	22.0	2447.0	24.7	22.0	2604.3	725	0	16.250	2452.8	23.32	2605.7
750	0.71	22.0	22.0	2447.0	25.0	22.0	2604.0	750	0	15.075	2453.9	23.30	2605.7
775	0.74	22.0	22.0	2447.0	24.7	22.0	2604.3	775	0	14.750	2454.3	24.07	2604.9
800	0.76	22.0	22.0	2447.0	25.0	22.0	2604.0	800	0	14.025	2455.0	23.63	2605.4
825	0.79	22.0	22.0	2447.0	23.9	22.0	2605.1	825	0	12.475	2456.5	23.28	2605.7
850	0.81	22.0	22.0	2447.0	24.0	22.0	2605.0	850	0	11.700	2457.3	23.43	2605.6
875	0.83	22.0	22.0	2447.0	23.8	22.0	2605.2	875	0	10.100	2458.9	23.38	2605.6
900	0.86	22.0	22.0	2447.0	23.6	22.0	2605.5	900	0	9.200	2459.8	23.43	2605.6
925	0.88	22.0	22.0	2447.0	24.5	22.0	2604.5	925	0	7.175	2461.8	23.50	2605.5
950	0.90	22.0	22.0	2447.0	24.3	22.0	2604.7	950	0	5.650	2463.4	23.10	2605.9
975	0.93	22.0	22.0	2447.0	24.4	22.0	2604.6	975	0	2.775	2466.2	23.55	2605.5
1000	0.95	22.0	22.0	2447.0	24.2	22.0	2604.9	1000	0	0.475	2468.5	23.80	2605.2
1025	0.98	22.0	22.0	2447.0	23.4	22.0	2605.6	1025	0	-4.225	2473.2	16.80	2612.2
1050	1.00	5.0	0.0	2464.0	19.6	0.0	2609.4	1050	0	19.475	2449.5	-151.53	2780.5

7. Vedlegg

Målinger fra forsøk RP_D_45_L #2							
T0-T6 for den øvre takflate og takutstikk				T0-T6 for den nedre takflate			
Endring i sandlagtykkelse mm	Arealet under avlesningen mm2	Netto areal deponert mm2	Andel deponert fra T0 %	Endring i sandlagtykkelse mm	Arealet under avlesningen mm2	Netto areal deponert mm2	Andel deponert fra T0 %
-1.9	-23.1						
-12.2	-303.8						
-7.8	-193.8						
-3.1	-76.3						
-2.7	-67.5						
-0.8	-19.4						
-0.8	-20.6						
-1.3	-33.7						
-2.8	-70.6						
-3.4	-84.4						
-4.1	-102.5						
-5.2	-130.0						
-6.5	-161.9						
-6.7	-166.9						
-7.3	-183.7						
-7.4	-184.4						
-6.7	-166.3						
-5.8	-146.2						
-6.2	-155.6						
-5.7	-141.9						
-4.8	-120.6						
-4.7	-116.9						
-4.8	-120.0						
-4.8	-118.8						
-5.0	-125.0						
-2.7	-66.3			133.4			
-3.1	-78.1			47.2			
-3.9	-98.7			1.3	33.1		
-4.7	-118.1			1.2	30.0		
-5.8	-143.8			-1.4	-35.0		
-6.9	-173.1			-1.7	-41.9		
-7.3	-181.3			-0.7	-16.3		
-8.0	-199.4			-1.3	-33.7		
-9.5	-238.1			-0.6	-15.0		
-10.3	-257.5			-0.6	-15.0		
-11.9	-297.5			-0.4	-11.2		
-12.8	-320.0			-0.1	-3.1		
-14.8	-370.6			-1.0	-25.6		
-16.3	-408.7			-1.2	-30.0		
-19.2	-480.6			-0.8	-21.2		
-21.5	-538.1			-0.3	-8.7		
-26.2				-6.6	-165.0		
14.5		-7003.8	-31.2	-171.1		-358.7	-4.0

7. Vedlegg

Tabell V.13: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_0_W.

Målinger fra forsøk RP_D_0_W												
T0-måling for nedre og øvre takflate					T6-måling for nedre og øvre takflate				T0-T6 for den nedre og øvre takflate			
x	x/L	Sandlag-tykkelse	Ideell sandlag-tykkelse	Avstand med laser	x	x/L	Sandlag-tykkelse	Avstand med laser	Endring i sandlag-tykkelse	Arealet under avlesningen	Netto areal deponert	Andel deponert fra T0
mm		mm	mm	mm	mm		mm	mm	mm	mm ²	mm ²	%
0	0.00	20.0	0.0	2609.0	0	0.00	-149.5	2778.5	-169.5			
25	0.02	23.0	22.0	2606.0	25	0.02	12.7	2616.3	-10.3	-258.1		
50	0.05	24.0	22.0	2605.0	50	0.05	15.5	2613.5	-8.5	-212.5		
75	0.07	24.0	22.0	2605.0	75	0.07	17.7	2611.3	-6.3	-156.9		
100	0.10	24.0	22.0	2605.0	100	0.10	18.3	2610.7	-5.7	-142.5		
125	0.12	25.0	22.0	2604.0	125	0.12	19.6	2609.4	-5.4	-134.4		
150	0.14	24.0	22.0	2605.0	150	0.14	20.5	2608.5	-3.5	-86.9		
175	0.17	24.0	22.0	2605.0	175	0.17	22.8	2606.2	-1.2	-30.6		
200	0.19	24.0	22.0	2605.0	200	0.19	24.7	2604.4	0.7	16.3		
225	0.21	24.0	22.0	2605.0	225	0.21	26.3	2602.7	2.3	58.7		
250	0.24	25.0	22.0	2604.0	250	0.24	27.3	2601.7	2.3	57.5		
275	0.26	25.0	22.0	2604.0	275	0.26	28.2	2600.8	3.2	79.4		
300	0.29	25.0	22.0	2604.0	300	0.29	29.1	2599.9	4.1	101.9		
325	0.31	25.0	22.0	2604.0	325	0.31	29.3	2599.7	4.3	108.1		
350	0.33	22.0	22.0	2607.0	350	0.33	31.1	2598.0	9.1	226.3		
375	0.36	23.0	22.0	2606.0	375	0.36	29.4	2599.6	6.4	159.4		
400	0.38	23.0	22.0	2606.0	400	0.38	12.4	2616.6	-10.6	-264.4		
425	0.40	23.0	22.0	2606.0	425	0.40	3.8	2625.2	-19.2	-480.6		
450	0.43	24.0	22.0	2605.0	450	0.43	104.0	2525.0	80.0		-959.4	-10.3
475	0.45	22.0	22.0	2447.0	475	0.45	3.3	2465.7	-18.7	-233.7		
500	0.48	22.0	22.0	2447.0	500	0.48	2.7	2466.3	-19.3	-481.9		
525	0.50	22.0	22.0	2447.0	525	0.50	2.1	2467.0	-19.9	-498.7		
550	0.52	22.0	22.0	2447.0	550	0.52	2.1	2467.0	-19.9	-498.7		
575	0.55	22.0	22.0	2447.0	575	0.55	1.5	2467.5	-20.5	-512.5		
600	0.57	22.0	22.0	2447.0	600	0.57	1.1	2467.9	-20.9	-522.5		
625	0.60	22.0	22.0	2447.0	625	0.60	0.8	2468.3	-21.3	-531.3		
650	0.62	22.0	22.0	2447.0	650	0.62	2.8	2466.2	-19.2	-478.8		
675	0.64	23.0	22.0	2446.0	675	0.64	5.3	2463.7	-17.7	-442.5		
700	0.67	23.0	22.0	2446.0	700	0.67	7.0	2462.0	-16.0	-400.0		
725	0.69	22.0	22.0	2447.0	725	0.69	10.8	2458.2	-11.2	-280.6		
750	0.71	23.0	22.0	2446.0	750	0.71	12.0	2457.0	-11.0	-275.0		
775	0.74	22.0	22.0	2447.0	775	0.74	12.0	2457.0	-10.0	-249.4		
800	0.76	22.0	22.0	2447.0	800	0.76	13.1	2455.9	-8.9	-221.9		
825	0.79	22.0	22.0	2447.0	825	0.79	11.8	2457.2	-10.2	-253.8		
850	0.81	22.0	22.0	2447.0	850	0.81	11.9	2457.1	-10.1	-251.3		
875	0.83	21.0	22.0	2448.0	875	0.83	10.3	2458.7	-10.7	-266.3		
900	0.86	22.0	22.0	2447.0	900	0.86	10.1	2458.9	-11.9	-296.9		
925	0.88	22.0	22.0	2447.0	925	0.88	9.2	2459.8	-12.8	-320.6		
950	0.90	22.0	22.0	2447.0	950	0.90	8.7	2460.3	-13.3	-332.5		
975	0.93	21.0	22.0	2448.0	975	0.93	6.6	2462.4	-14.4	-359.4		
1000	0.95	22.0	22.0	2447.0	1000	0.95	6.2	2462.9	-15.8	-396.2		
1025	0.98	21.0	22.0	2448.0	1025	0.98	5.2	2463.8	-15.8	-394.4		
1050	1.00	5.0	0.0	2464.0	1050	1.00	3.7	2465.3	-1.3	-16.3	-8515.0	-65.9

7. Vedlegg

Tabell V.14: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_22,5_W.

Målinger for forsøk RP_D_22,5_W #1													
T0-måling for den nedre takflate					T0-måling for takutstikk og den øvre takflate			T6-måling for den nedre takflate				T6-måling for takutstikk og den øvre takflate	
x	x/L	Sandlag-tykkelse	Ideell sandlag-tykkelse	Avstand med laser	Sandlag-tykkelse	Ideell sandlag-tykkelse	Avstand med laser	x	x/L	Sandlag-tykkelse	Avstand med laser	Sandlag-tykkelse	Avstand med laser
mm		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	mm	mm
0	0.00	19.6	0.0	2609.4				0	0.00	-126.5	2755.5		
25	0.02	23.4	22.0	2605.6				25	0.02	13.2	2615.8		
50	0.05	24.2	22.0	2604.9				50	0.05	16.3	2612.7		
75	0.07	24.4	22.0	2604.6				75	0.07	20.0	2609.0		
100	0.10	24.3	22.0	2604.7				100	0.10	22.4	2606.6		
125	0.12	24.5	22.0	2604.5				125	0.12	25.0	2604.0		
150	0.14	23.6	22.0	2605.5				150	0.14	27.5	2601.5		
175	0.17	23.8	22.0	2605.2				175	0.17	28.6	2600.4		
200	0.19	24.0	22.0	2605.0				200	0.19	28.2	2600.8		
225	0.21	23.9	22.0	2605.1	5.0	0.0	2464.0	225	0.21	28.2	2600.8	2.6	2466.5
250	0.24	25.0	22.0	2604.0	22.2	22.0	2446.8	250	0.24	28.8	2600.2	6.8	2462.2
275	0.26	24.7	22.0	2604.3	22.2	22.0	2446.8	275	0.26	32.6	2596.4	7.6	2461.4
300	0.29	25.0	22.0	2604.0	22.2	22.0	2446.8	300	0.29	32.4	2596.6	6.5	2462.5
325	0.31	25.0	22.0	2604.0	22.2	22.0	2446.8	325	0.31	15.5	2613.5	4.4	2464.6
350	0.33	22.4	22.0	2606.6	22.2	22.0	2446.8	350	0.33	0.7	2628.3	0.0	2469.0
375	0.36	22.8	22.0	2606.2	22.2	22.0	2446.8	375	0.36	2.6	2626.4	0.1	2469.0
400	0.38	23.0	22.0	2606.0	22.2	22.0	2446.8	400	0.38	4.3	2624.7	4.9	2464.1
425	0.40	23.0	22.0	2606.0	22.2	22.0	2446.8	425	0.40	5.3	2623.7	7.7	2461.3
450	0.43	24.0	22.0	2605.0	22.2	22.0	2446.8	450	0.43	6.0	2623.0	10.2	2458.8
475	0.45				22.1	22.0	2446.9	475	0.45			12.0	2457.0
500	0.48				22.4	22.0	2446.6	500	0.48			13.1	2455.9
525	0.50				22.0	22.0	2447.0	525	0.50			13.6	2455.4
550	0.52				22.3	22.0	2446.7	550	0.52			12.8	2456.2
575	0.55				22.3	22.0	2446.7	575	0.55			12.6	2456.5
600	0.57				22.2	22.0	2446.9	600	0.57			11.4	2457.6
625	0.60				22.4	22.0	2446.6	625	0.60			10.4	2458.6
650	0.62				22.6	22.0	2446.4	650	0.62			10.0	2459.0
675	0.64				22.7	22.0	2446.4	675	0.64			9.8	2459.2
700	0.67				22.3	22.0	2446.7	700	0.67			8.9	2460.1
725	0.69				22.6	22.0	2446.4	725	0.69			7.6	2461.4
750	0.71				21.7	22.0	2447.3	750	0.71			6.8	2462.3
775	0.74				22.0	22.0	2447.0	775	0.74			5.9	2463.1
800	0.76				22.2	22.0	2446.8	800	0.76			5.8	2463.3
825	0.79				21.9	22.0	2447.1	825	0.79			5.5	2463.5
850	0.81				21.3	22.0	2447.7	850	0.81			5.2	2463.9
875	0.83				21.9	22.0	2447.1	875	0.83			2.7	2466.3
900	0.86				21.8	22.0	2447.2	900	0.86			1.0	2468.0
925	0.88				22.5	22.0	2446.5	925	0.88			1.6	2467.4
950	0.90				21.0	22.0	2448.0	950	0.90			1.5	2467.5
975	0.93				22.0	22.0	2447.0	975	0.93			2.2	2466.9
1000	0.95				21.0	22.0	2448.0	1000	0.95			1.3	2467.8
1025	0.98				21.0	22.0	2448.0	1025	0.98			1.5	2467.5
1050	1.00				5.0	0.0	2464.0	1050	1.00			3.7	2465.3

7. Vedlegg

Målinger for forsøk RP_D_22,5_W #2							
T0-T6 for den nedre takflate				T0-T6 for takutstikk og den øvre takflate			
Endring i sandlagtykkelse mm	Arealet under avlesningen mm ²	Netto areal deponert mm ²	Andel deponert fra T0 %	Endring i sandlagtykkelse mm	Arealet under avlesningen mm ²	Netto areal deponert mm ²	Andel deponert fra T0 %
-146.1							
-10.2	-254.4						
-7.8	-195.0						
-4.4	-109.4						
-1.9	-47.5						
0.5	11.9						
3.9	98.7						
4.8	119.4						
4.2	105.0						
4.3	108.1			-2.4	-30.6		
3.8	95.0			-15.3	-383.7		
7.9	197.5			-14.6	-364.4		
7.4	184.4			-15.7	-393.1		
-9.5	-237.5			-17.8	-443.8		
-21.7	-542.5			-22.2	-554.4		
-20.2	-505.0			-22.1	-553.7		
-18.7	-467.5			-17.3	-431.3		
-17.7	-442.5			-14.5	-363.1		
-18.0	-225.0	-2106.3	-21.6	-12.0	-300.0		
				-10.1	-252.5		
				-9.3	-231.9		
				-8.4	-209.4		
				-9.5	-238.1		
				-9.7	-243.1		
				-10.8	-268.8		
				-12.0	-300.0		
				-12.6	-315.0		
				-12.9	-321.9		
				-13.4	-335.0		
				-15.0	-374.4		
				-14.9	-373.7		
				-16.1	-401.9		
				-16.4	-411.2		
				-16.4	-409.4		
				-16.2	-404.4		
				-19.3	-481.3		
				-20.8	-519.4		
				-20.9	-522.5		
				-19.5	-486.9		
				-19.8	-496.2		
				-19.8	-493.8		
				-19.5	-486.9		
				-1.3	-15.9	-12411.6	-69.6

7. Vedlegg

Tabell V.15: Resultater fra depositionsforsøk RP_D_45_W.

Målinger for forsøk RP_D_45_W #1													
T0-måling for den nedre takflate					T0-måling for takutstikk og den øvre takflate			T6-måling for den nedre takflate				T6-måling for takutstikk og den øvre takflate	
x	x/L	Sandlag-tykkelse	Ideell sandlag-tykkelse	Avstand med laser	Sandlag-tykkelse	Ideell sandlag-tykkelse	Avstand med laser	x	x/L	Sandlag-tykkelse	Avstand med laser	Sandlag-tykkelse	Avstand med laser
mm		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	mm	mm
0	0.00	19.6	0.0	2609.4	5.0	0.0	2464.0	0	0.00	7.2	2621.8	-6.7	2475.7
25	0.02	23.4	22.0	2605.6	22.0	22.0	2447.0	25	0.02	14.0	2615.0	2.3	2466.7
50	0.05	24.2	22.0	2604.9	22.0	22.0	2447.0	50	0.05	21.8	2607.2	7.5	2461.5
75	0.07	24.4	22.0	2604.6	22.0	22.0	2447.0	75	0.07	25.0	2604.0	10.3	2458.7
100	0.10	24.3	22.0	2604.7	22.0	22.0	2447.0	100	0.10	24.3	2604.7	11.2	2457.8
125	0.12	24.5	22.0	2604.5	22.0	22.0	2447.0	125	0.12	24.4	2604.6	11.2	2457.9
150	0.14	23.6	22.0	2605.5	22.0	22.0	2447.0	150	0.14	24.7	2604.3	9.5	2459.5
175	0.17	23.8	22.0	2605.2	22.0	22.0	2447.0	175	0.17	24.0	2605.0	10.1	2458.9
200	0.19	24.0	22.0	2605.0	22.0	22.0	2447.0	200	0.19	24.4	2604.6	10.0	2459.0
225	0.21	23.9	22.0	2605.1	22.0	22.0	2447.0	225	0.21	24.3	2604.7	11.2	2457.8
250	0.24	25.0	22.0	2604.0	22.0	22.0	2447.0	250	0.24	23.8	2605.3	12.3	2456.7
275	0.26	24.7	22.0	2604.3	22.0	22.0	2447.0	275	0.26	20.8	2608.2	13.4	2455.6
300	0.29	25.0	22.0	2604.0	22.0	22.0	2447.0	300	0.29	20.6	2608.5	14.3	2454.7
325	0.31	25.0	22.0	2604.0	22.0	22.0	2447.0	325	0.31	21.6	2607.4	14.5	2454.5
350	0.33	22.4	22.0	2606.6	22.0	22.0	2447.0	350	0.33	21.6	2607.4	14.2	2454.8
375	0.36	22.7	22.0	2606.3	22.0	22.0	2447.0	375	0.36	21.4	2607.6	13.1	2455.9
400	0.38	22.7	22.0	2606.3	22.0	22.0	2447.0	400	0.38	21.1	2607.9	12.2	2456.8
425	0.40	22.7	22.0	2606.3	22.0	22.0	2447.0	425	0.40	23.2	2605.8	11.8	2457.2
450	0.43	24.1	22.0	2604.9	22.2	22.0	2446.8	450	0.43	161.5	2467.5	11.3	2457.7
475	0.45				22.1	22.0	2446.9	475	0.45			9.9	2459.1
500	0.48				22.4	22.0	2446.6	500	0.48			9.6	2459.5
525	0.50				22.0	22.0	2447.0	525	0.50			8.8	2460.2
550	0.52				22.3	22.0	2446.7	550	0.52			7.8	2461.2
575	0.55				22.3	22.0	2446.7	575	0.55			6.6	2462.4
600	0.57				22.2	22.0	2446.9	600	0.57			5.7	2463.3
625	0.60				22.4	22.0	2446.6	625	0.60			5.6	2463.4
650	0.62				22.6	22.0	2446.4	650	0.62			4.7	2464.4
675	0.64				22.7	22.0	2446.4	675	0.64			3.3	2465.7
700	0.67				22.3	22.0	2446.7	700	0.67			2.4	2466.6
725	0.69				22.6	22.0	2446.4	725	0.69			1.5	2467.5
750	0.71				21.7	22.0	2447.3	750	0.71			0.7	2468.3
775	0.74				22.0	22.0	2447.0	775	0.74			0.7	2468.3
800	0.76				22.2	22.0	2446.8	800	0.76			-0.1	2469.1
825	0.79				21.9	22.0	2447.1	825	0.79			-0.4	2469.4
850	0.81				21.3	22.0	2447.7	850	0.81			-1.4	2470.5
875	0.83				21.9	22.0	2447.1	875	0.83			-1.4	2470.5
900	0.86				21.8	22.0	2447.2	900	0.86			-1.4	2470.5
925	0.88				22.5	22.0	2446.5	925	0.88			-1.4	2470.5
950	0.90				21.3	22.0	2447.8	950	0.90			-1.4	2470.5
975	0.93				22.1	22.0	2447.0	975	0.93			-1.4	2470.5
1000	0.95				21.5	22.0	2447.5	1000	0.95			-1.4	2470.5
1025	0.98				21.5	22.0	2447.5	1025	0.98			-1.4	2470.5
1050	1.00				4.8	0.0	2464.2	1050	1.00			-1.4	2470.5

7. Vedlegg

Målinger for forsøk RP_D_45_W #2							
T0-T6 for den nedre takflate				T0-T6 for takutstikk og den øvre takflate			
Endring i sandlagtykkelse	Arealet under avlesningen	Netto areal deponert	Andel deponert fra T0	Endring i sandlagtykkelse	Arealet under avlesningen	Netto areal deponert	Andel deponert fra T0
mm	mm2	mm2	%	mm	mm2	mm2	%
-12.4	-155.0			-11.7	-146.2		
-9.4	-235.6			-19.7	-492.5		
-2.3	-58.7			-14.5	-362.5		
0.6	15.6			-11.7	-292.5		
0.0	1.2			-10.8	-270.0		
-0.1	-3.1			-10.8	-271.2		
1.1	28.1			-12.5	-311.9		
0.2	4.4			-11.9	-297.5		
0.4	10.6			-12.0	-300.6		
0.4	11.2			-10.8	-270.6		
-1.2	-30.6			-9.7	-241.3		
-3.9	-96.9			-8.6	-215.0		
-4.4	-111.2			-7.7	-192.5		
-3.4	-85.6			-7.5	-188.1		
-0.8	-20.6			-7.8	-195.0		
-1.3	-33.1			-8.9	-222.5		
-1.6	-40.0			-9.8	-244.4		
0.5	12.5			-10.2	-255.6		
137.4		-786.9	-8.1	-10.9	-271.9		
				-12.2	-305.6		
				-12.8	-320.6		
				-13.2	-329.4		
				-14.5	-361.9		
				-15.7	-391.9		
				-16.5	-411.3		
				-16.8	-419.4		
				-17.9	-448.1		
				-19.4	-484.4		
				-19.9	-496.9		
				-21.0	-526.2		
				-21.0	-524.4		
				-21.3	-533.7		
				-22.3	-556.3		
				-22.3	-556.3		
				-22.8	-569.4		
				-23.4	-584.4		
				-23.2	-580.6		
				-23.9	-598.1		
				-22.7	-567.5		
				-23.5	-587.5		
				-22.9	-573.1		
				-22.9	-573.1		
				-6.3	-78.1	-16420.0	-71.9



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no