



DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTETET

## BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/studieretning: Konstruksjonsteknikk	Vår semesteret 2019
	Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Jasanth Santhakumar & Thivyen Anpalagan	
Veilder: Jasna Jakobsen	
Tittel på oppgaven: Vindlast på bygninger	
Engelsk tittel: Wind load on structures	
Studiepoeng: 20	
Emneord: Måledata Middelvind Standardavvik Turbulens	Sidetall: + vedlegg/annet:  Stavanger, dato: 03.09.23

# Innhold

<b>FIGURLISTE OG TABELLISTE .....</b>	<b>4</b>
<b>FORORD .....</b>	<b>6</b>
<b>SAMMENDRAG .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUKSJON.....</b>	<b>8</b>
1.2 OPPGAVESTRUKTUR .....	8
1.3 AVGRENSNINGER .....	9
<b>2 TEORETISK BAKGRUNN.....</b>	<b>10</b>
2.1 HVA ER VIND?.....	10
2.1.1 Beauforts skala .....	11
2.2 VINDBESKRIVELSE ETTER HOLMES.....	12
2.2.1 Middelvindhastighet profiler .....	12
2.2.2 Logaritmisk lov profil .....	13
2.2.3 Power lov profil.....	15
2.2.4 Turbulens.....	16
2.2.5 Turbulens Intensitet.....	17
2.3 VINDBESKRIVELSE I NS-EN 1991-1-4.....	18
2.3.1 Basis Vindhastighet .....	18
2.3.2 Middelvind.....	19
2.3.3 Terrengruhet.....	19
2.3.4 Vindturbulens .....	20
2.3.4 Topp hastighetstrykk .....	21
2.4. BEREGNING AV VINDLAST .....	21
2.4.1 Vindtrykk på overflater.....	21
2.4.2 Formfaktorer .....	22
2.4.3 Trykk på overflater .....	24
2.4.4 Trykk på flate tak.....	27
2.4.5 Vindkrefter.....	29
2.5 VELTEMOMENT .....	30
<b>3 LOFOTEN – PRECASE STUDIE .....</b>	<b>31</b>
3.1 LOFOTEN.....	31
3.2 HENDELSEN .....	32
3.3 CASE STUDIE .....	33
3.4 DIMENSJONERING AV HYTTA .....	33
3.5 VÆRET .....	34
3.6 ANALYSERE .....	35
3.6.1 Basis Vindhastighet .....	36
3.6.2 Middelvind.....	36
3.6.3 Vindkasthastighetstrykk.....	38
3.7 VINDTRYKK PÅ OVERFLATER.....	38
3.7.1. Lastetilfelle vindretning med 0°:.....	39
3.7.2 Lastetilfelle vindretning med 90° .....	47
3.7.3 Vindkrefter.....	52
3.8 VELTEMOMENT FRA VIND.....	56
3.8.1 Lastetilfelle vindretning 0°.....	58
3.8.2 Lastetilfelle vindretning 90° .....	59
3.9 LØFTEKRAFT OG SKYVEKRAFT.....	62
3.9.1 Løftekraft.....	62

3.9.2 Skyvekraft .....	64
<b>4.1 CASE STUDIE .....</b>	<b>68</b>
4.1 BAKGRUNNS INFO OM IVAR LANGENS HUS .....	69
4.2 VÆRET .....	70
<b>5 METODE .....</b>	<b>72</b>
5.1.1 MATLAB .....	72
5.1.2 AUTOCAD .....	73
5.1.3 REVIT .....	73
5.1.4 VINDMÅLER.....	74
<b>6.1 RESULTATER .....</b>	<b>75</b>
<b>6.2 IVAR LANGENS HUS – VINDLAST BEREGNINGER.....</b>	<b>102</b>
6.2.1 VINDKASTHASTIGHETSTRYKK .....	104
6.2.2 VINDTRYKK PÅ OVERFLATER.....	105
<i>Lastetilfelle vindretning med 0°.....</i>	<i>106</i>
<i>Lastetilfelle vindretning med 90°.....</i>	<i>113</i>
6.2.3 VINDKREFTER .....	118
6.2.4 VELTEMOMENT .....	121
<i>Lastetilfelle vindretning 0° .....</i>	<i>124</i>
<i>Lastetilfelle vindretning 90°.....</i>	<i>125</i>
<b>7. DISKUSJON .....</b>	<b>127</b>
<b>8. KONKLUSJON.....</b>	<b>130</b>
<b>KILDER.....</b>	<b>130</b>
<b>VEDLEGG .....</b>	<b>141</b>
MATLAB .....	141

## Figurliste og Tabelliste

TABELL 1: RUNDHAUGWEB.....	11
FIGUR 2.1 GRAF OVER LOGARITMISK OG POWER LOV PROFIL ([4], S.54) .....	12
TABELL 2.1: TERRENGTYPE ([4] S.53) .....	15
FIGUR 2.2: VINDHASTIGHET OVER 5 MIN INTERVALL MED 3 FORSKJELLIGE HØYDER ([4] S.51) .....	18
TABELL 2.2: TERRENGKATEGORI ([11] S.17).....	20
FIGUR 2.3 HENVISER HVORDAN TRYKK PÅ OVERFLATER ER, HENTET FRA ([11], S.21) .....	22
TABELL 2.3: FORMFAKTORER FOR VEGGER .....	22
FIGUR 2.4: HASTIGHETSTRYKKPROFIL (HENTET FRA ([11] S.29)) .....	24
FIGUR 2.5: REFERANSEHØYDE OG TILHØRENDE HASTIGHETSTRYKKPROFIL (HENTET ([11] S.29) .....	25
FIGUR 2.6: ULIK VINDRETNING PÅ TAK HAR Å SI FOR INNDELING AV SONER OG KALKULERING AV $e$ (HENTET FRA [16]) .....	26
FIGUR 2.7: INNDELING AV TAK SONER ([11] S.32) .....	27
TABELL 2.4: FORMFAKTORER FOR FLATE TAK ([11] S.33) .....	28
FIGUR 3.1 KART OVER LOFOTEN (KILDE???) .....	31
FIGUR 3.2: BILDET TATT ETTER HENDELSEN, FOTO: HELGE LYNGMOE [6] .....	32
FIGUR 3.3: DIMENSJONER AV HYTTA .....	33
FIGUR 3.4: VINDMÅLINGENE FRA DE ULIKE MÅLESTASJONENE [15].....	34
FIGUR 3.5: KART OVER MÅLESTASJONENE [18] .....	35
TABELL 3.1: VINDHASTIGHET VERDI FOR MOSKENES ([11] S.7).....	35
FIGUR 3.6: KARTGRUNNLAG OVER REGIONEN [19] .....	36
FIGUR 3.7: TERRENGFORHOLDET VED HENDELSEN [18].....	36
FIGUR 3.9: BILDET VISER VINDRETNING 90 GRADER I FORHOLD TIL BYGGETS KORTSIDE .....	38
FIGUR 3.8: BILDET VISER VINDRETNING 0 GRADER I FORHOLD TIL BYGGETS KORTSIDE.....	38
FIGUR 3.10: REFERANSEHØYDE $z_e$ , AVHENGIG AV H OG B ([11] S.29).....	40
TABELL 3.2: ANBEFALTE VERDIER AV UTVENDIGE FORMFAKTORER FOR VERTIKALE VEGGER I REKTANGULÆRE BYGNINGER ([11] S.31) .....	41
FIGUR 3.11: INTERPOLERING AV UTVENDIG TRYKK KOEFFISIENT I SONE D.....	42
FIGUR 3.12: INTERPOLERING AV UTVENDIG TRYKK KOEFFISIENT I SONE E .....	42
FIGUR 3.13: HASTIGHETSTRYKK PÅ VEGGER FOR VINDRETNING 0 GRADER .....	43
FIGUR 3.14: FLAT TAK OPPDELT I SONER ([11] S.32).....	44
FIGUR 3.15: SONENE FOR VINDLAST PÅ TAK MED TILHØRENDE MÅL.....	44
TABELL 3.3: UTVENDIGE FORMFAKTORER FOR FLATE TAK ([11] S.33) .....	45
FIGUR 3.16: INTERPOLERING AV UTVENDIG TRYKK KOEFFISIENT I SONE D.....	48
FIGUR 3.17: INTERPOLERING AV UTVENDIG TRYKK KOEFFISIENT I SONE E .....	48
FIGUR 3.18: HASTIGHETSTRYKK PÅ VEGGER FOR VINDRETNING 90 GRADER .....	49
FIGUR 3.19: SONENE FOR VINDLAST PÅ TAK MED TILHØRENDE MÅL.....	50
FIGUR 3.20: DIMENSJONERING AV VELTEMOMENT FOR VINDRETNING 0.....	57
FIGUR 3.21: DIMENSJONERING AV VELTEMOMENT FOR VINDRETNING 90.....	57
FIGUR 3.22: FUNDAMENTERING AV HYTTA, FOTO: NORDLAND POLITIDISTRIKT [19] .....	66
FIGUR 4.1 .....	68
FIGUR 4.2: ILLUSTRASJON AV GITT PLANTEGNING .....	69
FIGUR 4.3 MIDDELVIND FOR ANALYSEPERIODEN .....	70
FIGUR 4.4: MIDDELVINDHASTIGHETEN DEN 17.02.2023.....	71
FIGUR 4.5: MIDDELVINDHASTIGHETEN DEN 02.12.2022.....	71

FIGUR 5.1: HER SER VI HVORDAN LASERLYSET FUNGERER, OG MÅTE DEN BEREGNER VINDEN PÅ GOD AVSTAND [1] .....	74
FIGUR 2 MÅLTE HORIZONTALE VIND DEN 17.02.2023 .....	75
FIGUR 3 MÅLTE VINDRETNING DEN 17.02.2023 .....	76
FIGUR 4 MÅLTE HORIZONTALE VIND DEN 14.01.2023 .....	77
FIGUR 5 MÅLTE HORIZONTALE VIND DEN 14.01.2023 .....	77
FIGUR 5 MÅLTE HORIZONTALE VIND DEN 02.12.2022 .....	78
FIGUR 6 MÅLTE VINDRETNING DEN 02.12.2022 .....	79
FIGUR 7 MÅLTE VINDHASTIGHET 20 MIN INTERVALL DEN 17.01.2023 .....	80
FIGUR 8 MÅLTE VINDRETNINGER 20 MIN INTERVALL DEN 17.01.2023 .....	81
FIGUR 9 MÅLTE VINDHASTIGHET 20 MIN INTERVALL DEN 02.12.2022 .....	81
FIGUR 10 .....	82
FIGUR 11: MÅLTE VINDHASTIGHET 20 MIN INTERVALL DEN 14.01.2023 .....	82
FIGUR 12 MÅLTE VINDRETNING 20 MIN INTERVALL DEN 14.01.2023 .....	83
FIGUR 15 EN TIME MIDDELVINDHASTIGHET .....	86
FIGUR 16 EN TIME MIDDELVINDHASTIGHET .....	87
FIGUR 17 EN TIME MIDDELVINDHASTIGHET .....	87
FIGUR 18: 20 TIMERS MIDDELVINDHASTIGHET 17.02.2023 .....	88
FIGUR 19 20 TIMERS MIDDELVINDHASTIGHET 02.12.2022 .....	89
FIGUR 20: .....	90
FIGUR 21 MIDDELVINDHASTIGHET SOM FUNKSJONEN HØYDE DEN 02.12.2022 .....	91
FIGUR 22: .....	91
FIGUR 23 TURBULENSINTESITET SOM FUNKSJON AV HØYDE DEN 17.02.2023 .....	92
FIGUR 24 TURBULENSINTESITET SOM FUNKSJON AV HØYDE DEN 02.12.2022 .....	93
FIGUR 25 TURBULENSINTESITET SOM FUNKSJON AV HØYDE DEN 14.01.2023 .....	94
FIGUR 26 MIDDELVINDRETNING SOM FUNKSJON AV HØYDE DEN 17.02.2023 .....	95
FIGUR 27 MIDDELVINDRETNING SOM FUNKSJON AV HØYDE DEN 14.01.2023 .....	95
FIGUR 28 MIDDELVINDRETNING SOM FUNKSJON AV HØYDE DEN 02.12.2022 .....	96
FIGUR 29 VINDROSE FOR DEN 17.02.2023 .....	97
FIGUR 30 VINDROSE FOR DEN 02.12.2022 .....	98
FIGUR 31 VINDROSE DEN 14.01.2023 .....	99
FIGUR 32 TILPASSET LOGARITMISK LIKNING FOR DEN 17.02.2023 .....	100
FIGUR 33 TILPASSET LOGARITMISK PROFIL FOR DEN 14.02.2023 .....	100
FIGUR 6.40: FORENKLET MODELL AV IVAR LANGENS HUS I REVIT .....	102
FIGUR 6.42: MIDDELVINDHASTIGHET OVER 20 TIMERS INTERVALL .....	103
FIGUR 6.45: BILDET VISER VINDRETNING 90 GRADER I FORHOLD TIL BYGGETS KORTSIDE .....	105
FIGUR 6.44: BILDET VISER VINDRETNING 0 GRADER I FORHOLD TIL BYGGETS KORTSIDE .....	105
FIGUR 6.46: REFERANSEHØYDE $z_e$ , AVHENGIG AV H OG B ([11] S.29) .....	107
FIGUR 6.49: HASTIGHETSTRYKK PÅ VEGGER FOR VINDRETNING 0 GRADER .....	109
FIGUR 6.50: SONENE FOR VINDLAST PÅ TAK MED TILHØRENDE MÅL .....	111
FIGUR 6.51: HASTIGHETSTRYKK PÅ VEGGER FOR VINDRETNING 90 GRADER .....	114
FIGUR 6.52: SONENE FOR VINDLAST PÅ TAK MED TILHØRENDE MÅL .....	115
FIGUR 6.53: FUNDAMENTER AV IVAR LANGENS HUS. HENTET FRA STATSBYGG [21] .....	121
FIGUR 6.54: DIMENSJONERING AV VELTEMOMENT FOR VINDRETNING 0 .....	123
FIGUR 6.55: DIMENSJONERING AV VELTEMOMENT FOR VINDRETNING 90 .....	123

## Forord

Det er en stor glede og mestringsfølelse å kunne presentere bacheloroppgaven som representerer sluttdelen av vår bachelor. Temaet til denne oppgaven handler om vindeffekter på bygninger. Denne oppgaven viser et resultat av mye dedikert og langvarig arbeid, hvor vi har fått muligheten til å utforske den spennende verden av bygningslast og vindpåvirkning.

Hensikten med denne oppgaven er: Å vise fram et bilde av hvordan vind kraft påvirker bygninger. Få en dybde forståelse på vindbeskrivelse av grafer

Det har ikke vært en lett prosess for oss. bakgrunnen av disse gode resultatene er en del utfordringer og hinder som har fått oss til å stoppe helt. Selv om det har vært en del "vei sperringer" og mye stress, var det en veldig lærerikt eventyr kan man si. Kan si at det var en unik opplevelse for oss begge å lære nye faglige stoffer på egenhånd. Denne oppgaven har virkelig testet ferdighetene og utholdenheten vår.

Vi vil avslutningsvis rette en hjertelig takk til alle som har bidratt og støttet oss gjennom denne krevende perioden. Vi er dypt takknemlige for den unike muligheten vi fikk til å fordype oss i et tema som er så nært knyttet til vårt fagfelt og vår lidenskap. Vi verdsetter de verdifulle ferdighetene og erfaringene vi har tilegnet oss gjennom denne oppgaven, og vi er stolte av å kunne ta med oss disse videre.

## Sammendrag

Denne oppgaven involverer en analyse av vindens effekter på bygninger, med spesielt fokus på Ivar Langens hus ved Universitetet i Stavanger. Formålet er å undersøke rådataene samlet inn fra en vindmåler plassert på Ivar Langens hus og gjennomføre en omfattende bearbeiding av disse dataene. Analyseperioden spenner over en tre måneders periode, fra desember 2022 til februar 2023.

To utvalgte dager med forskjellige vindforhold, en med høy vindhastighet og en med lav vindhastighet, blir grundig undersøkt i oppgaven. For å behandle og presentere dataene er MATLAB-programvaren benyttet til å frembringe grafer og utføre relevante analyser. Først ble dataene delt inn i 20-minutters tidsserier, og middelvindhastighet og middelvindretning ble plottet som funksjon av høyden  $z$  for hver tidsserie. I tillegg ble standardavviket for vindhastigheten og vindretningen inkludert for å evaluere variasjonen i vindforholdene. Turbulensintensiteten ble også studert som en funksjon av høyden for å identifisere områder med høy eller lav turbulens rundt bygningen. For å gi en helhetlig visualisering av vindforholdene, ble det utarbeidet vindrosor som presenterte hyppigheten av forskjellige vindretninger og vindhastigheter. Disse rosenplotene ga innsikt i vindkarakteristikkene rundt Ivar Langens hus. Videre ble en logaritmisk profil tilpasset utvalgte data hvor middelvindhastigheten var over 10 m/s. Disse dataene ble gruppert basert på de dominerende vindretningene for å analysere egenskapene til den logaritmiske vindprofilen under spesifikke vindforhold. I tillegg til hovedoppgaven som setter søkelys på Ivar Langens hus, ble det også utført en pre-case-studie som omhandlet en hendelse i Lofoten. Denne studien bidro til en utvidelse av perspektivet rundt temaet vindens effekter på bygninger.

Denne omfattende analyseprosessen har resultert i en dypere forståelse av vindens innvirkning på bygninger som Ivar Langens hus. Beregning av en forenklet vindlast basert på de bearbejdede dataene vil bidra til forbedrede metoder for vurdering og håndtering av vindlast på bygninger.

# Introduksjon

## 1.2 Oppgavestruktur

### Kapittel 1: Introduksjon

Dette kapitlet gir en innledning til oppgaven og presenterer temaet som omhandler vindens effekter på bygninger. Videre blir oppgavens avgrensninger og oppbygging av kapitlene presentert.

### Kapittel 2: Teoretisk bakgrunn

I dette kapitlet gir vi en teoretisk bakgrunn om vindens fysiske egenskaper og hvordan den påvirker bygninger. Vi utforsker relevante konsepter knyttet til vindanalyse, inkludert vindlaster, turbulens og vindprofil.

### Kapittel 3: Pre Case Studie

I dette kapitlet blir et pre case studie presentert, som omhandler en spesifikk hendelse i Lofoten. Vi utfører relevante beregninger og analyser for å studere vindens effekter på bygninger i denne situasjonen.

### Kapittel 4: Metode

Dette kapitlet beskriver den metodiske tilnærmingen som blir brukt i analysen. Vi presenterer detaljer om datainnsamlingen, bearbeidingen av rådataene og de spesifikke analyseteknikkene som benyttes.

### Kapittel 5: Case Studie av Ivar Langens Hus

Dette kapitlet er dedikert til hovedcase-studien av Ivar Langens hus ved Universitetet i Stavanger. Vi presenterer grundig informasjon om bygningen

### Kapittel 6: Resultater

I dette kapitlet presenteres og diskuteres resultatene av analyseringen av vindmåledataene og beregningene som er gjort. Vi analyserer og tolker funnene i forhold til vindens påvirkning på bygningen og drøfter eventuelle implikasjoner og mulige tiltak.



## Kapittel 7: Diskusjon og Konklusjon

### 1.3 Avgrensninger

En viktig avgrensning i denne oppgaven var begrensningen av tiden til å gjennomføre trykkmålinger og beregne trykk på veggene basert på disse dataene. På grunn av tidsbegrensninger ble denne delen av prosjektet ikke gjennomført.

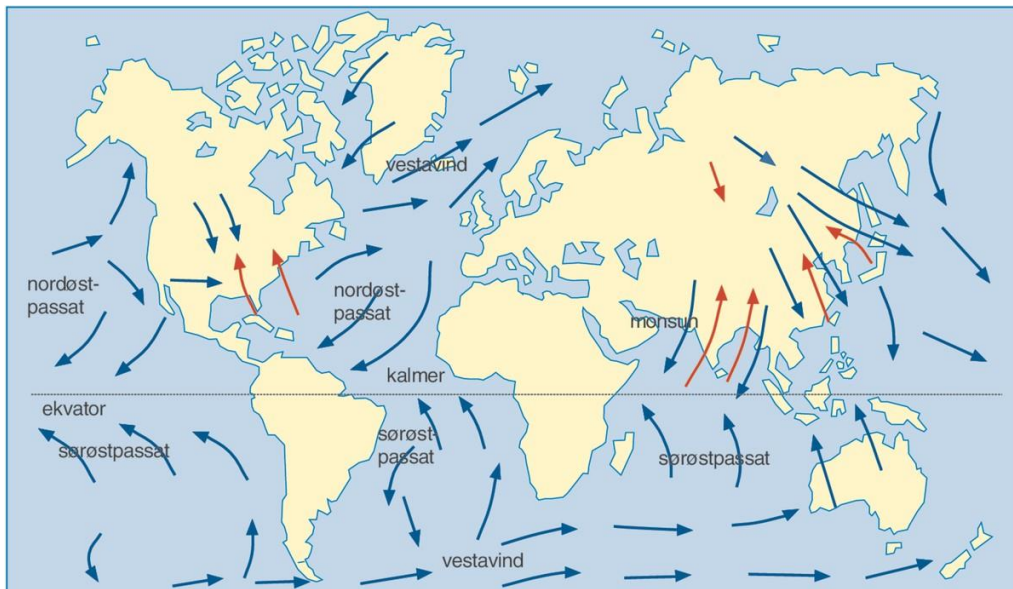
Videre ble teorien presentert i kapittel 2 bare delvis tatt i betraktning, med fokus på de relevante aspektene for beregning av vindlast. Ettersom det finnes flere regler og ulike beregningsmetoder for vindlast, ble kun de mest relevante delene av teorien inkludert i analysen.

Når det gjelder beregningen av Ivar Langens Hus, ble en forenklet tilnærming brukt på grunn av bygningens komplekse karakter og avvik fra norske standarden med hensyn til dimensjonene. Dette innebærer at beregningene kan være mindre nøyaktige enn om en mer omfattende tilnærming hadde blitt brukt.

Disse avgrensningene ble gjort med hensikt for å effektivisere prosessen og gjøre den gjennomførbar innenfor de gitte tids- og ressursbegrensningene.

## 2 Teoretisk Bakgrunn

### 2.1 Hva er Vind?



Figur 2.1: Her vises noen av de mest vanlige vindsystemene på jorda [10]

Forskjellen i solstråling mellom polene og ekvator resulterer i forskjellige temperaturer og trykk. Når disse faktorene spiller sammen med kraften produsert av rotasjonen til jorda setter i gang store sirkulasjons systemer i atmosfæren. Som et resultat av denne sirkulære bevegelsen er den dominerende vindretningen i tropiske klimasoner og nære polene øst, vestlige vind dominerer i tempererte breddegrader [10].

Vind og seismiske krefter er blant de mest dominerende klimabaserte kreftene for bygg. Store ødeleggelser har blitt forårsaket som et resultat av vindstormer. Ulike seismiske krefter er vindstormer et ganske kjent fenomen på verdensbasis. Selv om de fleste vindstormer er små, kan vindstormer i tropiske klima utvikle seg til tropiske sykloner, disse har særdeles sterke krefter som fører med seg ødeleggelse [10]

### 2.1.2 Beauforts skala

Beauforts skala er en vindskala som ble utviklet av den britiske admiralen Francis Beaufort på begynnelsen av 1800-tallet. Skalaen er designet for å hjelpe sjøfolk med å vurdere vindens styrke og effekter uten å måle den med spesifikke instrumenter. Den har senere blitt tilpasset og utvidet for å inkludere mer nøyaktige vindhastighetsområder som kan måles med moderne teknologi.

Beauforts skala består av 13 kategorier som beskriver vindstyrken og dens innvirkning på land og sjø. Skalaen går fra 0 (stille) til 12 (orkan). Her er en generell oversikt over Beauforts skala [17]:

Tabell 2.1: Beaufortskala [17]

Styrke	Navn	Meter / sekund	Km/t	Værkart	Virkning på land	Virkning på sjøen
0	Stille	0,0 - 0,2	<1	-	Røyk stiger rett opp	Sjøen er speilblank
1	Flau vind	0,3 - 1,5	1 - 5	-	Vindretningen ses på røyken	Krusninger danner seg på havflaten
2	Svak vind	1,6 - 3,3	6 - 11	3	Følbar, rører på bladene på trærne, løfter en vimpel	Små og korte, men tydelige bølger
3	Lett bris	3,4 - 5,4	12 - 19	5	Lauv og småkvister rører seg. Vinden strekker lette flagg og vimpler.	Småbølgene begynner å toppe seg, skum dannes
4	Laber bris	5,5 - 7,9	20 - 29	7	Vinden løfter støv og løse papirer, rører på kvister og smågreiner, strekker større flagg og vimpler.	Bølgene blir lengre, en del skumskavler
5	Frisk bris	8 - 10,7	30 - 38	10	Småtrær med løv begynner å svaie	Middelstore bølger dannes
6	Liten kuling	10,8 - 13,8	39 - 50	12	Store greiner svaier, telefontråder kvirer. Det er vanskelig å bruke paraply. En merker motstand når en	Store bølger begynner å dannes
7	Stiv kuling	13,9 - 17,1	51 - 61	15	Hele trær rører på seg. Det er tungt å gå mot vinden	Sjøen hoper seg opp
8	Sterk kuling	17,2 - 20,7	62 - 74	20	Vinden brykker kvister av trærne. Tungt å gå mot vinden.	Middels høye bølger av større lengde
9	Liten storm	20,8 - 24,4	75 - 86	22	Hele store trær svaier, greiner brykker. Små bygningsskader, takstein kan blåse ned.	Høye bølger
10	Full storm	24,5 - 28,4	87 - 101	25	Sjelden inne i landet. Trær rives opp med rot, store bygningsskader.	Svært høye bølger
11	Sterk storm	28,5 - 32,6	102 - 120	30	Sjelden, men med store ødeleggelse.	-
12	Orkan	Over 32,6	Over 120	33	Forekommer meget sjelden. Uvanlig store ødeleggelse.	-

## 2.2 Vindbeskrivelse etter Holmes

Ved å anta at x-aksen representerer vindretningen, y-aksen representerer lateralretningen og z-aksen representerer vertikalretningen med positiv retning oppover, kan vindhastigheten normalt dekomponeres til en middelvindhastighet i vindretningen og tre ortogonale turbulenskomponenter over et tidsintervall. Hastighetene på et gitt tidspunkt  $t$  blir beskrevet som ([12], s.20):

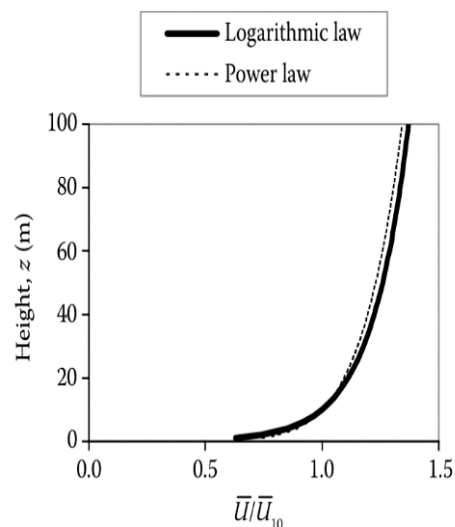
$$\text{i den langsgående retningen} \quad U(z) + u(x, y, z, t) \quad (2.1.1)$$

$$\text{i den laterale retningen} \quad v(x, y, z, t) \quad (2.1.2)$$

$$\text{i den vertikale retningen} \quad w(x, y, z, t) \quad (2.1.3)$$

### 2.2.1 Middelvindhastighet profiler

Vindprofil refererer til hvordan vindhastigheten endrer seg med høyden over bakken i atmosfæren. Ved å beregne vindprofilen kan man få en bedre forståelse av den vertikale fordelingen av vindhastighet i atmosfæren, og hvordan dette kan påvirke ulike applikasjoner og aktiviteter. Ifølge Holmes ser vi på to profiler, logaritmisk profil og power lov profil ([4], s.51).



Figur 2.2 Graf over Logaritmisk og Power lov profil ([4], s.54)

### 2.2.2 Logaritmisk lov profil

Den logaritmiske vindprofilen beskriver hvordan middelvindhastigheten øker logaritmisk med høyden over bakken, i samsvar med logaritmisk lov. Denne profilen er basert på antagelsen om at vinden over et jevnt, åpent terreng følger et logaritmisk mønster, der middelvindhastigheten er lavest ved bakken og øker gradvis med høyden. Logaritmisk lov brukes vanligvis for å beskrive vindprofilen i det stabile grenselaget i atmosfæren ([4] s.51). Profilen er gitt med ligning (2.2):

$$\bar{U}(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.2)$$

- $\bar{U}(z)$  er middelvindhastigheten på høyde  $z$
- $u_*$  er friksjonshastigheten
- $k$  er von Kármán-konstanten (vanligvis antatt som 0,4)
- $\log_e$  er den naturlige logaritmefunksjonen
- $z$  er den aktuelle høyden
- $z_0$  er grovhetslengden.

Formelen for friksjonshastigheten er gitt ved ligning (2.3), hvor  $\tau_0$  er skjærstress som beskriver stresset ved overflaten ([4] s.52).

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_a} \quad (2.3)$$

En alternativ måte å kvantifisere ujevnheten på er ved hjelp av overflatefriksjonskoeffisienten,  $\kappa$ . Dette er en dimensjonsløs parameter som representerer den relative mengden av skjærspenning mellom overflaten og væske/gass. Med andre ord beskriver  $\kappa$  hvor godt overflaten "griper" strømmen og skaper motstand. En høyere verdi av  $\kappa$  indikerer en grovere og mer ujevn overflate, noe som resulterer i økt friksjon og motstand mot strømmen ([4] s.52). Det defineres som:

$$\kappa = \frac{\tau_0}{\rho U_{10}^2} = \frac{u_*^2}{U_{10}^2} \quad (2.4)$$

For terreng med mer ruhet, slik som skoger og byområder, kan den opprinnelige høyden  $z$  i likning (2.2) byttes ut med en effektiv høyde ( $z_1 - z_h$ ), der  $z_h$  representerer forskyvningen fra et valgt referanseplan. Denne forskyvningen er spesifikt definert som tre fjerdedeler av takhøyden ([4] s.52). Dermed kan den modifiserte likningen (2.2) uttrykkes på alternative måter som:

$$\bar{U}(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left[ \frac{z - z_h}{z_0} \right] \quad (2.5)$$

Vindhastigheten varierer med høyden, og ved bakkenivå er den null. Når vi beveger oss oppover, øker vindhastigheten gradvis. Over grenselaget opplever vi en jevn strøm av vind med en spesifikk hastighet kalt gradienthastigheten. Ved å bruke likning (2.5) på gjennomsnittlig vindhastighet målt på to ulike høyder,  $z_1$  og  $z_2$ , kan vi beregne forholdet mellom disse hastighetene ([4] s.52):

$$\frac{\bar{U}(z_1)}{\bar{U}(z_2)} = \frac{\ln[(z_1 - z_h)/z_0]}{\ln[(z_2 - z_h)/z_0]} \quad (2.6)$$

Ved å velge en høyde på 10 meter og anvende likningene (2.4) og (2.5), kan vi oppnå en relasjon mellom overflatefriksjonskoeffisienten og ruhetlengden gitt i (2.7):

$$\kappa = \left[ \frac{k}{\ln \left( \frac{10}{z_0} \right)} \right]^2 \quad (2.7)$$

### 2.2.3 Power lov profil

På en annen side beskriver power vindprofil en annen type vindprofil, der vindhastigheten endrer seg i henhold til en potensfunksjon. Dette betyr at vindhastigheten kan øke eller avta med høyden i en mer kompleks måte enn i den logaritmiske profilen. Power vindprofil brukes ofte for å beskrive vindprofilen i den ustabile grenselaget i atmosfæren, der luftstrømmer er mer turbulente og uforutsigbare ([4] s.53). Power lov profil sin formel:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_{10} \left( \frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2.8)$$

- Der  $\bar{U}(z)$  er vindhastigheten på høyde  $z$
- $\bar{U}_{10}$  er vindhastigheten på referansehøyden  $z_r$
- $z$  er den aktuelle høyden
- $z_r$  er referansehøyden
- $\alpha$  er en empirisk parameter som kalles for potensparameteren.

Tabell 2.2: Terrengtype ([4] s.53)

Terrain type	Roughness length (m)	Surface drag coefficient
Very flat terrain (snow, desert)	0.001–0.005	0.002–0.003
Open terrain (grassland, few trees)	0.01–0.05	0.003–0.006
Suburban terrain (buildings 3–5 m)	0.1–0.5	0.0075–0.02
Dense urban (buildings 10–30 m)	1–5	0.03–0.3

Alpha ( $\alpha$ ), som er en eksponent i likning (2.9), vil variere avhengig av hvor ru terrenget er og også høydeområdet det gjelder, når den tilpasses den logaritmiske loven. Det finnes en sammenheng som kan brukes til å relatere eksponenten til grovhetslengden,  $z_0$ :

$$\alpha = \left( \frac{1}{\ln(z_{ref}/z_0)} \right) \quad (2.9)$$

#### 2.2.4 Turbulens

Turbulensnivået i vindhastigheten kan måles ved hjelp av standardavviket eller kvadratrotten av gjennomsnittlig avvik. Ved å subtrahere den jevne eller gjennomsnittlige komponenten, eller den langsomt varierende komponenten, kan vi isolere de gjenværende avvikene. Disse avvikene kan opptre både i positiv og negativ retning, og derfor kvadrerer vi dem før vi beregner gjennomsnittet. Ved å beregne gjennomsnittet av de kvadrerte avvikene og deretter ta kvadratrotten, får vi en størrelse som har samme enheter som vindhastigheten. Denne størrelsen, som er gitt i ligning 2.9, representerer turbulensen i vindhastigheten ([4] s.57):

$$\sigma_u = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [U(t) - \bar{U}]^2 dt \right\}^{1/2} \quad (2.10)$$

Komponenten  $U(t)$  beskriver den samlede hastighetskomponenten i retning av gjennomsnittsvinden, gitt som  $\bar{U}(t) + u(t)$ , hvor  $u(t)$  representerer den langsiktige turbulenskomponenten. På tilsvarende vis blir turbulensen i de laterale horisontale retningene, representert av  $v(t)$ , og i den vertikale retningen, representert av  $w(t)$ , målt ved å anvende deres respektive standardavvik  $\sigma_v$  og  $\sigma_w$  ([4] s.57).



### 2.2.5 Turbulens Intensitet

Turbulensintensiteten av en komponent beregnes ved å dividere standardavviket til hver turbulenskomponent med middelvindhastighet ([4] s.57). Gitt ved ligningene:

$$I_u = \sigma_u / \bar{U} \text{ (i den langsgående retningen)} \quad (2.11a)$$

$$I_v = \sigma_v / \bar{U} \text{ (i den laterale retningen)} \quad (2.11b)$$

$$I_w = \sigma_w / \bar{U} \text{ (i den vertikale retningen)} \quad (2.11c)$$

Målinger i nærheten av bakken i stormer har vist at standardavviket til den langsgående vindhastigheten,  $\sigma_u$ , er tilnærmet  $2.5u_*$ . Tilsvarende kan standardavviket til den laterale (horisontale) vindhastigheten,  $\sigma_v$ , tilnærmes til  $2.2u_*$ , mens standardavviket for den vertikale komponenten,  $\sigma_w$ , tilnærmes til  $1.4u_*$  ([4] s.58). En konsekvens av dette er at vi kan omskrive likningene (2.11a-c) ved å bruke likning (2.2) til følgende uttrykk:

$$I_u(z) = \frac{2.5u_*}{(u_*/0.4)\ln(z/z_0)} = \frac{1}{\ln(z/z_0)} \quad (2.12a)$$

$$I_v(z) = \frac{2.2u_*}{(u_*/0.4)\ln(z/z_0)} = \frac{0.88}{\ln(z/z_0)} \quad (2.12b)$$

$$I_w(z) = \frac{1.4u_*}{(u_*/0.4)\ln(z/z_0)} = \frac{0.56}{\ln(z/z_0)} \quad (2.12c)$$

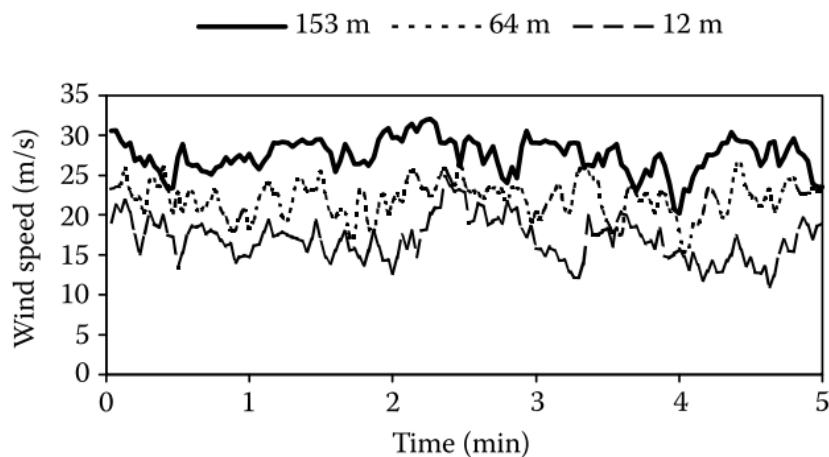
## 2.3 Vindbeskrivelse I NS-EN 1991-1-4

### 2.3.1 Basis Vindhastighet

Den fundamentale verdien av den basis vindhastigheten,  $V_{b,0}$ , refererer til den karakteristiske 10-minutters gjennomsnittlige vindhastigheten, uavhengig av vindretning og årstid, målt 10 meter over bakkenivå i åpent landskap med lav vegetasjon som gress og med isolerte hindringer som har en avstand på minst 20 ganger hindringens høyde ([11], s.15).

$$V_b = C_{dir} \times C_{season} \times V_{b,0} \quad (2.13)$$

- $V_{b,0}$  er referansevindhastighet og er angitt i NS Tabell
- $V_b$  er basisk vindhastighet
- $C_{dir}$  er direksjons faktor, anbefalt verdi er 1,0
- $C_{season}$  er sesongs faktor, anbefalt verdi er 1,0



Figur 2.3: Vindhastighet over 5 min intervall med 3 forskjellige høyder ([4] s.51)

### 2.3.2 Middelvind

Formelen (2.13) beskriver beregningen av middelvindhastigheten,  $v_m$ , på en spesifisert høyde,  $z$ . Denne formelen tar hensyn til to faktorer:  $c_r(z)$ , som representerer ruhetsfaktoren og tar hensyn til den topografiske påvirkningen på vindhastigheten på den aktuelle høyden  $z$ , og  $c_0(z)$ , som representerer den anbefalte topografi-faktoren som vanligvis blir tatt som 1,0 ([11] s.20).

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b \quad (2.14)$$

- $c_r(z)$  er ruhetsfaktoren
- $c_0(z)$  er topografi-faktoren, satt til 1,0.

### 2.3.3 Terrengruhet

Den anbefalte metoden for å bestemme ruhetsfaktoren på høyden  $z$  er basert på en logaritmisk hastighetsprofil, og beskrives med uttrykket (2.15). Dette gjøres for å ta hensyn til hvordan ruhetsfaktoren varierer med høyden og hvordan den påvirker vindhastigheten ved konstruksjonen (s.20, NS).

$$c_r(z) = k_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{for } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (2.15)$$
$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{for } z \leq z_{min}$$

- $z_0$  er ruhetslengden
- $k_r$  er terreng faktoren

$$k_r = 0.19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (2.16)$$

- $z_{0,II}$  sjekk verdi i terreng kategori, se Tabell (2.2)
- $z_{min}$  minste høyde
- $z_{max}$  blir antatt som 200m

Tabell 2.3: Terrenkategorier ([11] s.17)

Terrenkategorier		$z_0$ m	$z_{min}$ m
0	Kyststrøk som er eksponert for åpent hav	0,003	1
I	Innsjøer eller flatt og horisontalt område med lite vegetasjon og uten hindringer	0,01	1
II	Område med lav vegetasjon som gress og spredte hindringer (trær, bygninger) med avstand minst 20 ganger deres høyde	0,05	2
III	Område med vegetasjon eller bygninger eller med spredte hindringer med avstand minst 20 ganger deres høyde (landsbyer, forstadsterreng, permanent skog)	0,3	5
IV	Område der minst 15 % av overflaten er dekket av bygninger, og deres gjennomsnittlige høyde overskrider 15 m	1,0	10
MERKNAD Terrenkategoriene er illustrert i A.1.			

### 2.3.4 Vindturbulens

For å beregne standardavvik er formelen gitt ved:

$$\sigma_v = k_r \times v_b \times k_I \quad (2.17)$$

Turbulensintensiteten i norske standarden er definert som forholdet mellom standardavviket og middelvindhastighet på en bestemt høyde ([11] s.18), akkurat som i Holmes' formulering. Uttrykket er:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{for } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (2.18)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{for } z < z_{min}$$

- $k_I$  er turbulensfaktoren og anbefalt verdi er 1,0
- $C_0$  er terrenformfaktoren
- $z_0$  er ruhetslengden, gitt i Tabell (2.2)

### 2.3.4 Topphastighetstrykk

Vindhastighetstrykket er formulert som ([11] s.23):

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) = c_e(z) \times q_b \quad (2.19)$$

- $\rho$  er lufttettheten. Anbefalte verdien er 1,25 kg/m<sup>3</sup>
- $c_e(z)$  er eksponeringsfaktor, uttrykket (2.20)

$$c_e(z) = \frac{q_b(z)}{q_b} \quad (2.20)$$

$q_p$  er basis hastighetstrykk, uttrykket som:

$$q_p = \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2 \quad (2.21)$$

## 2.4. Beregning av Vindlast

### 2.4.1 Vindtrykk på overflater

Vindtrykket som virket på de utvendige flatene,  $W_e$ , ([11] s.20) er definert som:

$$1. \quad W_e = q_b(z_e) \times c_{pe} \quad (2.21)$$

- $q_b(z_e)$  er topphastighetstrykket, definert i (2.20)
- $z_e$  er referansehøyden
- $c_{pe}$  er formfaktoren for det utvendige trykket

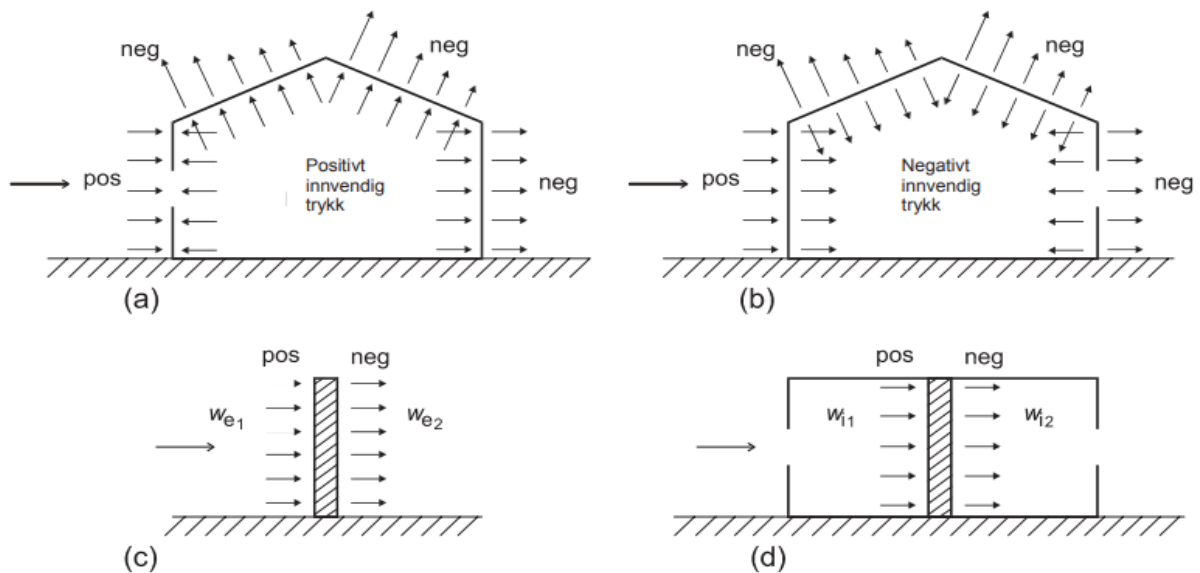
Vindtrykket som virket på de innvendige flatene,  $W_e$ , ([11] s.20) er definert som:

$$2. \quad W_e = q_b(z_i) \times c_{pi} \quad (2.22)$$

- $q_b(z_i)$  er topphastighetstrykket, definert i (2.20)
- $z_i$  er referansehøyden
- $c_{pi}$  er formfaktoren for det utvendige trykket

## 2.4.2 Formfaktorer

Vindtrykket påvirkes av bygningens utforming, og dette kan beskrives ved hjelp av formfaktorer. Når vi ser på et punkt på bygningens overflate, indikerer positivt vindtrykk at det er en kraft som presser innover mot overflaten, mens negativt vindtrykk indikerer en kraft som trekker utover fra overflaten kalt sug ([11] s.21).



Figur 2.4 Henviser hvordan trykk på overflater er, hentet fra ([11], s.21)

Formfaktorene tar hensyn til både utvendige og innvendige vindtrykk og bidrar til å bestemme det totale resultattrykket på et tak eller en bygningsdel. De utvendige og innvendige formfaktorene,  $c_{pe}$ , for bygninger og bygningsdeler, avhenger blant annet av størrelsen på det belastede arealet,  $A$ .

Tabell 2.4: Formfaktorer for vegger

Sone	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0		-0,3

For arealer større enn eller lik 10 m<sup>2</sup> bruker man  $c_{pe,10}$ , mens for arealer mindre enn eller lik 1 m<sup>2</sup> bruker man  $c_{pe,1}$ . Hvis arealet er mellom 1 m<sup>2</sup> og 10 m<sup>2</sup> brukes ligning (2.23) for å finne formfaktoren:

$$C_{pe} = C_{pe,1} - (C_{pe,1} - C_{pe,10}) \log_{10} A \quad (2.23)$$

Ved å definere forholdet mellom høyden « $h$ » og bredden « $d$ » avhengig av hvilken vindretning som blir brukt som referanse, resulterer dette hvilken linje fra tabell som må brukes. Det defineres 3 kategorier som er definert for forholdet mellom høyden og bredden som er referert i Tabell (2.4). For mellomliggende verdier av kategoriene så må det brukes interpolasjon. Ligning (2.24) kan brukes til interpolasjon.

$$y = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} x(x - x_1) + y_1 \quad (2.24)$$

I tilfeller der vindkraften som påvirker bygningskonstruksjoner skal beregnes ved hjelp av formfaktorene  $c_{pe}$  for både losiden (sone D) og lesiden (sone E) av bygningen samtidig, kan det være nødvendig å ta hensyn til en reduksjon i korrelasjonen mellom vindtrykkene på lo- og lesiden av bygningen.

For bygninger der forholdet mellom bygningens høyde ( $h$ ) og dens minste dimensjon i vindretningen ( $d$ ) er større enn eller lik 5 ( $h/d \geq 5$ ), kan resultatantkraften multipliseres med 1. Dette betyr at det ikke er noen reduksjon i korrelasjonen, og vindkraften beregnes som den er.

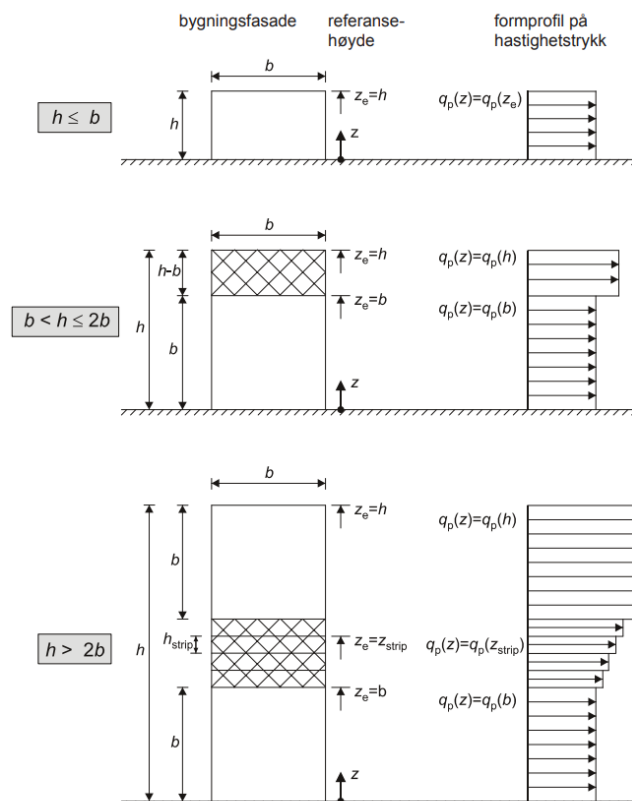
For bygninger der forholdet  $h/d$  er mindre eller lik 1 ( $h/d \leq 1$ ), skal resultatantkraften multipliseres med 0,85. Dette indikerer en reduksjon på 15% i korrelasjonen mellom vindtrykkene på lo- og lesiden av bygningen ([11], s.31).

### 2.4.3 Trykk på overflater

For vegger på losiden av rektangulære bygninger (sone D på figur 2.5) bestemmes referansehøyden  $z_e$  basert på forholdet mellom høyden  $h$  og bredden  $b$  av bygningen.  $z_e$  representerer den øverste høyden for ulike deler av veggen ([11] s.28).

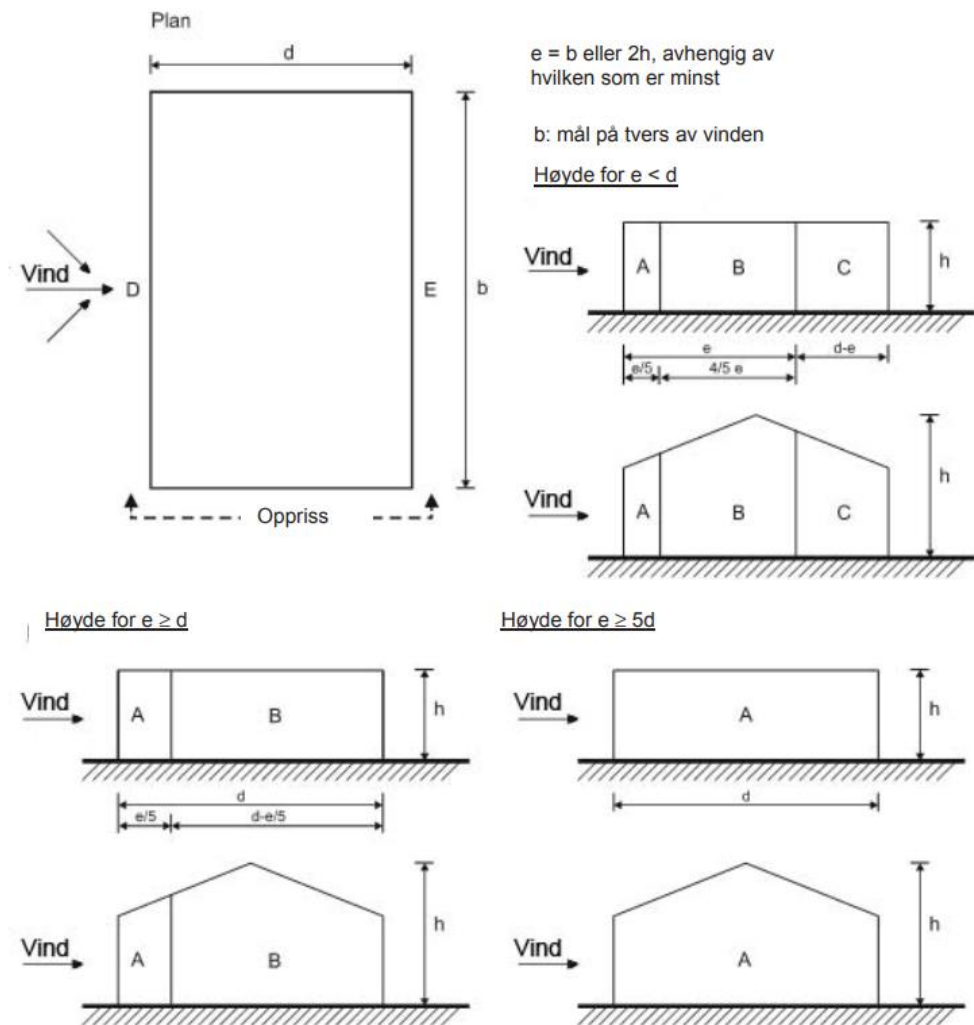
For å bestemme  $z_e$  bruker man følgende tilfeller som beskrevet i figur (2.5):

- Hvis bygningens høyde  $h$  er mindre enn bredden  $b$ , regnes hele veggen som én del.
- Hvis bygningens høyde  $h$  er større enn bredden  $b$ , men mindre enn dobbelt så bred, deler man veggen inn i to deler. Den nedre delen strekker seg fra bakken opp til høyden  $b$ , mens den øvre delen utgjør resten av høyden.
- Hvis bygningens høyde  $h$  er større enn dobbelt så bred, deler man veggen inn i flere deler. Den nedre delen strekker seg fra bakken opp til høyden  $b$ . Den øvre delen går fra toppen av bygningen og ned til en høydedifferanse lik bredden  $b$ . Mellom den øvre og nedre delen er det et midtsegment som kan deles inn i horisontale striper med en høyde  $h_{strip}$ .



Figur 2.5: Hastighetstrykkprofil (Hentet fra ([11] s.29))

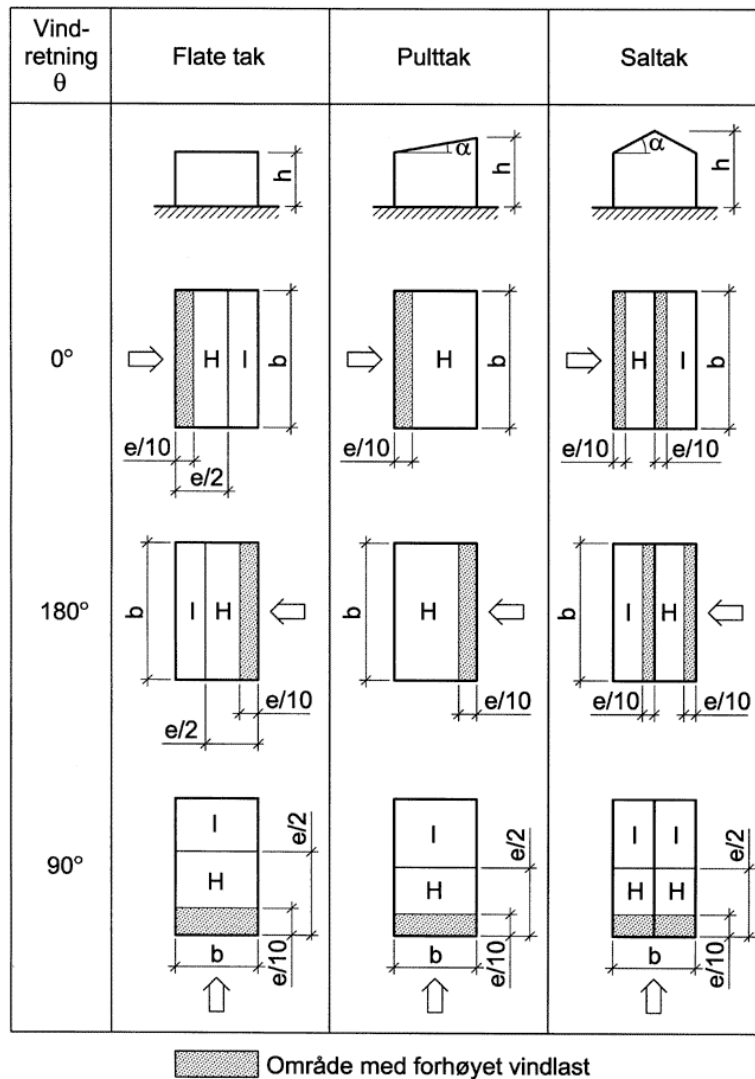




Figur 2.6: Referansehøyde og tilhørende hastighetstrykkprofil (Hentet ([11] s.29)

I figur 2.6 presenteres ulike tilfeller og hvordan høyder og bygningens geometri påvirker beregningen av  $e$ . Gjennom figuren blir det forklart hvordan ulike bygning struktur kan påvirke faktoren  $e$  i et gitt område.

I en bygningsakse er vindretningene 0 og 90 grader betydelig innvirkning på trykket som påføres i en konstruksjon. Disse vinklene er av spesiell interesse når det gjelder å evaluere og beregne belastningene som påvirker konstruksjonen. Dette skyldes at trykket som virker i disse retningene har potensial til å forårsake de største belastningene og påkjenningene på konstruksjonen.



Figur 2.7: Ulik vindretning på tak har å si for inndeling av soner og kalkulering av  $e$  (Hentet fra [16])

#### 2.4.4 Trykk på flate tak

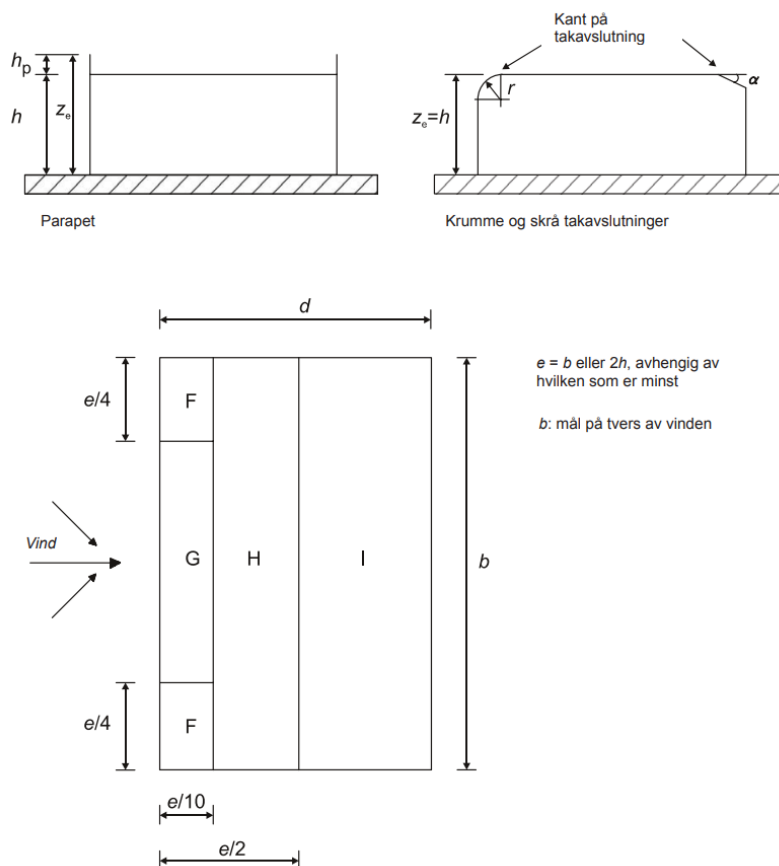
Flate tak, i henhold til norske standarder, er definert som takflater som har en takvinkel ( $\alpha$ ) på  $-5^\circ$  til  $5^\circ$ .

Disse takene skal behandles spesielt med tanke på vindbelastning og dimensjonering. Når det gjelder flate tak, anbefales det å dele dem inn i soner. Dette gjøres for å ta hensyn til forskjellige deler av taket og deres mulige påvirkning på vindbelastningen. Den nøyaktige inndelingen av soner kan ses i Figur (2.8), som gir en visuell representasjon.

Referansehøyden for flate tak og tak med krumme eller skrå rette takavslutninger bør settes lik høyden ( $h$ ) av taket. Dette betyr at referansehøyden for disse takene tilsvarer den faktiske høyden.

For flate tak med parapeter er det derimot anbefalt å bruke en referansehøyde lik summen av takhøyden ( $h$ ) og høyden ( $h_p$ ) av parapeten. Dette er illustrert i Figur (2.8), som viser hvordan referansehøyden for tak med parapeter beregnes.

Når det gjelder parapeter på flate tak, bør resultantformfaktoren bestemmes ved hjelp av metoden beskrevet i Figur (2.5). Dette betyr at man må beregne den kombinerte effekten av vindtrykket på parapeten og selve taket ([11] s.31).



Figur 2.8: Inndeling av tak soner ([11] s.32)

Tabell 2.5: Formfaktorer for flate tak ([11] s.33)

Taktype		Sone								
		F		G		H		I		
		$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	
Skarp takavslutning		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2	
Med parapet	$h_p/h=0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2	
		-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2	
	$h_p/h=0,05$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2	
		-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2	
	Krum takavslutning	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4		+0,2	-0,2
			-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3		+0,2	-0,2
$r/h = 0,10$		-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		+0,2	-0,2	
		-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		+0,2	-0,2	
Skrå, rett takavslutning		$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3		+0,2	-0,2
			-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4		+0,2	-0,2
	$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4		+0,2	-0,2	
		-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5		+0,2	-0,2	

Merknad 1: Ved bruk av tak med parapeter eller krumme takavslutninger kan lineær interpolasjon benyttes for å beregne mellomliggende verdier av  $h_p/h$  (høyde på parapetet dividert på takhøyden) og  $r/h$  (radius på den krumme takavslutningen dividert på takhøyden). Dette betyr at man kan estimere verdier for  $h_p/h$  og  $r/h$  som ligger mellom de eksplisitt oppgitte verdiene ved hjelp av lineære sammenhenger ([11] s.33 NS).

Merknad 2: Når det gjelder tak med skråe, rette takavslutninger, kan lineær interpolasjon benyttes mellom vinklene  $a = 30^\circ$ ,  $45^\circ$  og  $a = 60^\circ$ . Dette betyr at man kan estimere verdier for formfaktorer mellom disse vinklene ved å bruke en lineær sammenheng. For vinkler større enn  $60^\circ$  kan lineær interpolasjon benyttes mellom verdiene for  $a = 60^\circ$  og verdiene for flate tak med skarp takavslutning ([11] s.33 NS).

Merknad 3: I sone I, der både positive og negative verdier er oppgitt, skal begge verdiene vurderes. Dette betyr at man må ta hensyn til både de positive og negative verdiene og utføre relevante beregninger eller vurderinger basert på dette ([11] s.33 NS).

Merknad 4: For den krumme takavslutningen blir de utvendige formfaktorene gitt ved lineær interpolasjon langs kurven mellom verdiene på veggen og taket. Dette betyr at man kan estimere utvendige formfaktorer for ulike punkter langs den krumme takavslutningen ved å bruke lineære sammenhenger mellom verdiene på veggen og taket ([11] s.33 NS).

#### 2.4.5 Vindkrefter

Vindkrefter som virker på en konstruksjon eller konstruksjonsdel er gitt med formel ([11] s.22):

$$F_w = C_s C_d \times \sum w_e \times A_{ref} \quad (2.23)$$

Kreftene beregnet for de innvendige trykkene er gitt med ligning (2.24):

$$F_{w,i} = C_s C_d \times \sum w_i \times A_{ref} \quad (2.24)$$

Friksjonskrefter som virker på en konstruksjon eller konstruksjonsdel er gitt med formel:

$$F_{fr} = c_{fr} \times q_b(z_e) \times A_{fr} \quad (2.25)$$

- $C_s C_d$  er konstruksjonsfaktoren
- $\sum w_e$  summen av det utvendige trykket
- $\sum w_i$  summen av det innvendige trykket
- $A_{ref}$  er referansearealet av overflaten
- $A_{fr}$  er arealet av utvendig overflate som er parallelt med vinden

Merknad 1: Imidlertid, for bygninger med en høyde mindre enn 15 m, kan man forenkle beregningene ved å anta at  $C_s C_d$  er lik 1. Dette skyldes at mindre bygninger generelt sett har mindre komplekse former og færre overflateegenskaper som påvirker vindlaster.

Det er viktig å merke seg at denne forenklingen gjelder kun for bygninger med en høyde under 15 m. For høyere bygninger eller bygninger med spesielle geometriske egenskaper, kan det være nødvendig å bruke mer nøyaktige verdier for  $C_s C_d$  i beregningene av vindlaster ([11] s.23).

Merknad 2: Ved summering av vindkrefter som virker på bygningskonstruksjoner, kan det være hensiktsmessig å ta hensyn til redusert korrelasjon for samtidig vindtrykk på lo- og lesiden av bygningen. Ved å ta hensyn til denne reduserte korrelasjonen i beregningene, kan man oppnå en mer realistisk vurdering av de samtidige vindkreftene som virker på bygningskonstruksjoner ([11] s.23 NS).

## 2.5 Veltemoment

### Veltemoment:

Veltemomentet fra vind refererer til det dreiemomentet som genereres når vindkraften påvirker en bygning. Dette momentet prøver å rotere bygningen rundt et bestemt punkt, kjent som momentpunktet.

### Momentpunkt:

Momentpunktet er det stedet hvor vi fokuserer på beregningen av veltemomentet. Dette punktet er vanligvis valgt som et sentralt punkt i bygningen eller strukturen. Veltemomentet beregnes med hensyn til momentpunktet, og det er viktig å bestemme dette punktet nøyaktig for å analysere hvordan vindkreftene påvirker konstruksjonen.

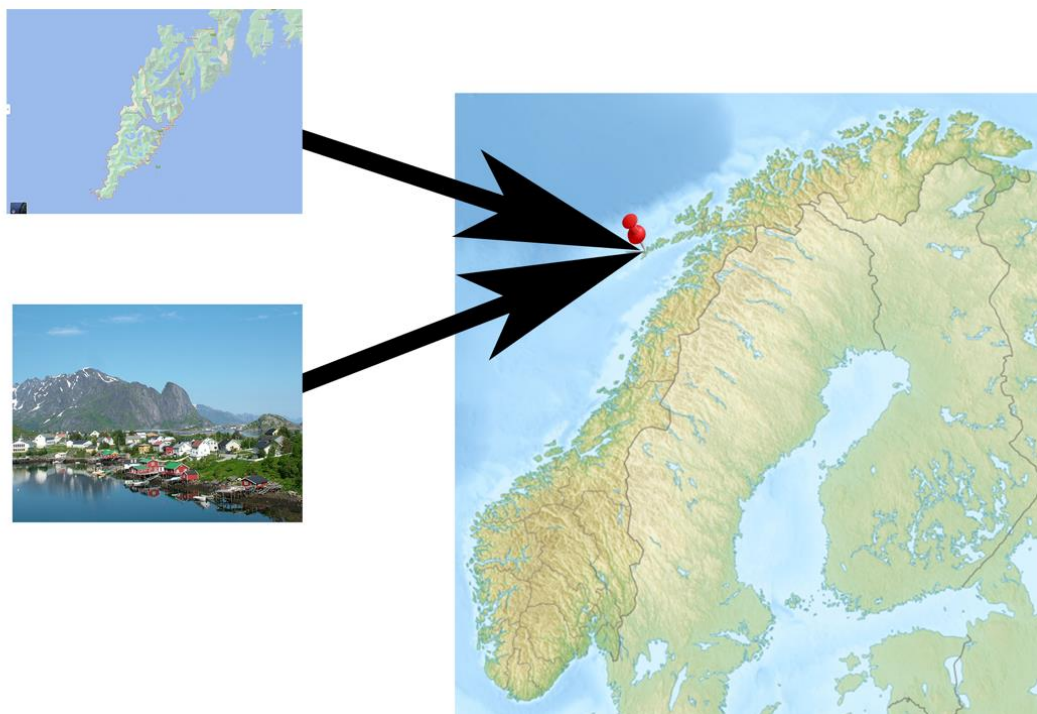
### Momentarm:

I konteksten av beregninger for vindlast, representerer momentarmen avstanden fra momentpunktet til endepunkt. Denne avstanden brukes til å beregne det resulterende momentet som genereres av kraften.

### 3 Lofoten – Precase Studie

#### 3.1 Lofoten

Lofoten er en øygruppe som befinner seg i Nordland fylke i Nord-Norge. Terrenget i Lofoten preges av bratte fjell, der det høyeste fjellet (Higravtindan) rager opp hele 1146,9 meter over havet. Dette gir landskapet en dramatisk og imponerende karakter. På grunn av sin eksponerte beliggenhet ved havet, er Lofoten ofte utsatt for kraftige og sterke vinder. Vindpåvirkningen skyldes fjellene og det åpne landskapet i området [14]. Vår case-studie er lokalisert i Å i Moskenes kommune i Lofoten.



Figur 3.1 Kart over Lofoten

### 3.2 Hendelsen

På kvelden den 12. februar, rundt klokken 22:30, ble en hytte som huset fire turister blåst ut på havet i Å, Moskenes. Denne hendelsen fant sted under påvirkning av en kraftig vindstorm som var varslet for den kvelden. Turistene hadde leid hytten som en del av sitt ferieopphold, men den voldsomme stormen førte til at hytten løsrev seg fra sitt fundament og ble drevet ut på havet. Heldigvis klarte turistene å evakuere i tide og komme seg i trygghet [6].

Turistene hevder at hytta ikke var sikret eller konstruert i henhold til lokale byggeforskrifter og standarder for området, noe som bidro til at den ble ødelagt og skapte en farlig situasjon. De mener at hytteeieren er ansvarlig for manglende sikkerhetstiltak og ble rapportert at de vurderte å anmelde eieren av hytten [6].



Hytteeieren, derimot, hevder at hytta var bygget i henhold til gjeldende forskrifter og at ekstreme værforhold var årsaken til hendelsen. Eieren påpeker at det har vært liknende hytter i området i mange år uten problemer [6].



### 3.3 Case studie

Hendelsen der hytta ble blåst ut på sjøen i Lofoten kan ha oppstått på grunn av flere mulige faktorer som førte til svikt i konstruksjonen eller sikringen av hytta.

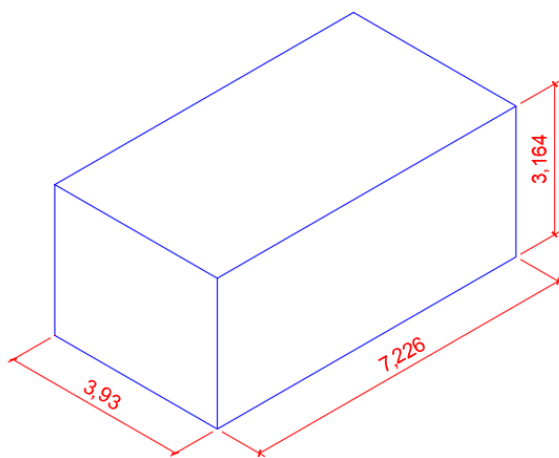
En mulig feil kan være utilstrekkelig sikring av hytta mot ekstreme vindkrefter. Dette kan skyldes manglende forankring til fundamentet eller utilstrekkelig bruk av riktige festemidler og konstruksjonsmetoder for å motstå kraften fra vinden.

Det er også mulig at hytta hadde konstruksjonstekniske svakheter, for eksempel manglende styrke i vegger, tak eller bærende elementer. Slike svakheter kunne ha gjort hytta mer sårbar for de ekstreme vindkreftene som oppstod under stormen.

### 3.4 Dimensjonering av hytta

KODA Compact Extended er en modulær hytteløsning av KODA, et estisk selskap, med 25 kvadratmeter boareal. Den er laget av prefabrikkerte moduler og kan tilpasses behov. Hytta veier 9 tonn.

Hytta har et oppholdsrom, soverom, bad og kjøkkenområde. Hytta er laget av tre, glass og stål, og har isolasjon og energieffektive løsninger. Den er en moderne og bærekraftig boenhet som kan tilpasses forskjellige behov og enkelt transporteres og monteres på ulike steder [5].

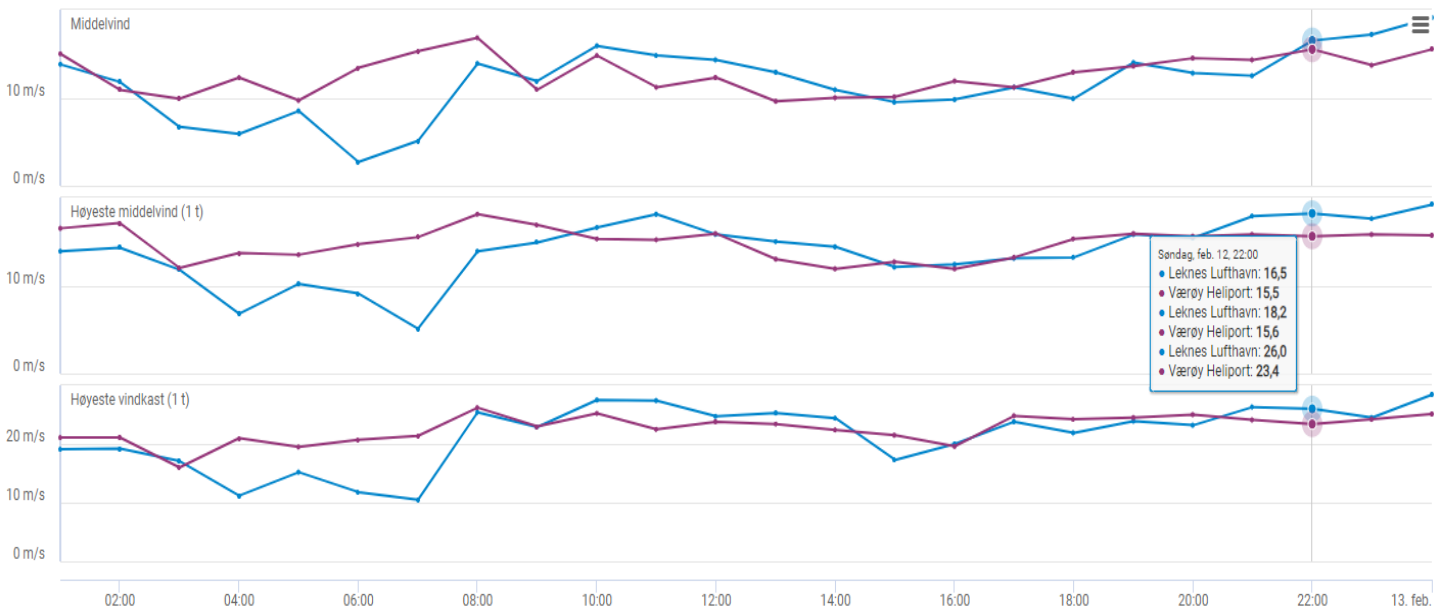


Figur 3.3: Dimensjoner av hytta

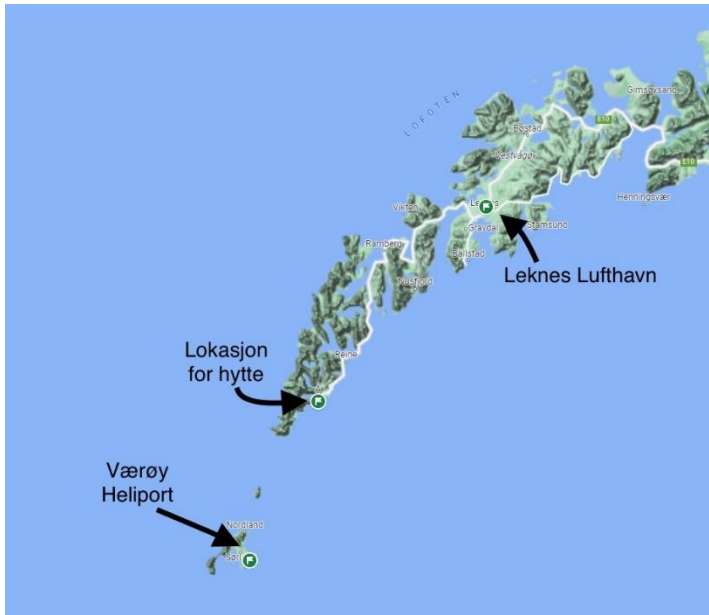
### 3.5 Været

Innhenting av nøyaktige data for det angitte området kan utføres ved hjelp av ulike metodiske tilnærminger. Med bakgrunn i eksisterende målestasjoner i nærheten av Å, fremstår Værøy heliport og Leknes lufthavn som de mest hensiktsmessige datakildene å benytte.

Dataene i Figur (3.4) omfatter observasjoner fra Værøy og Leknes i Lofoten-regionen, datert den 12. februar rundt klokken 22. Disse registreringene presenterer den høyeste gjennomsnittlige vindhastigheten og den dominante vindretningen. Figur (3.4) viser oss at høyeste time middelvinden var på 18,2 fra Leknes lufthavn. Dette vil si at det er sterk kuling ved Beauforts skala og at vindretningen var 277 grader [15].



Figur 3.4: Vindmålingene fra de ulike målestasjonene [15].



Figur 3.5: Kart over målestasjonene [18]

Tabell 3.1: Vindhastighet verdi for Moskenes ([11] s.7)

Kommune	V <sub>b,0</sub> m/s	Fylke
Ballangen	27	Nordland
Røst	31	Nordland
Værøy	31	Nordland
Flakstad	30	Nordland
Vestvågøy	30	Nordland
Vågan	29	Nordland
Hadsel	29	Nordland
Bø	29	Nordland
Øksnes	29	Nordland
Sortland	28	Nordland
Andøy	31	Nordland
Moskenes	31	Nordland
Harstad	27	Troms
Tromsø	27	Troms
Kvæfjord	28	Troms
Skånland	26	Troms
Bjarkøy	28	Troms
Ibestad	26	Troms
Gratangen	26	Troms
Lavangen	26	Troms
Reppa	24	Troms

Siden målestasjonene er langt unna Å-området, må vi bruke en omtrentlig verdi for vindhastigheten i dette området.

For å anslå vindhastigheten, kan vi vurdere ut ifra norske standarden for vindhastighet i Norge [11], ettersom spesifikke data for Å-området ikke foreligger.

### 3.6 Analysere

Hytta er plassert over betongblokker og er forankret på en spesifisert måte. Imidlertid har vi ikke tilgang til nøyaktige vinddata for det aktuelle området. Derfor benyttes det 50-års referansevindhastigheten fra norske standarden for kommune Moskenes (se Tabell 3.1). Dette brukes fordi stedet Å ligger i Moskenes kommune. Disse verdiene representerer ekstreme vær-situasjoner og siden vær dataene er en generell beskrivelse av værforholdene i Lofoten så bruker vi 50-års referansevindhastigheten for å få et tilnærmet resultat.

Referansevindhastigheten er 31 m/s.

Formålet med denne analysen er å beregne veltemomentet fra vind og sjekke det opp mot stabiliserende momentet fra byggets vekt, og at bygget tåler både horisontale og vertikale vindkrefter. Det inkluderes kun sonene D og E i beregningene når vi beregner utvendige formfaktorer for vertikale vegger, ettersom summen av vindlast i sonene A, B og C er lik 0 og bidrar ikke til veltemomentet.

### 3.6.1 Basis Vindhastighet

$$V_b = C_{dir} \times C_{season} \times V_{b,0} \quad (3.1)$$

$$C_{dir} = 1$$

$$C_{season} = 1$$

$$V_{b,0} = 31 \text{ m/s} \longrightarrow \text{Referansevindhastighet}$$

$$V_b = 1 \times 1 \times 31 \text{ m/s} = 31 \text{ m/s} \quad (3.2)$$

### 3.6.2 Middelvind

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b \quad (3.3)$$

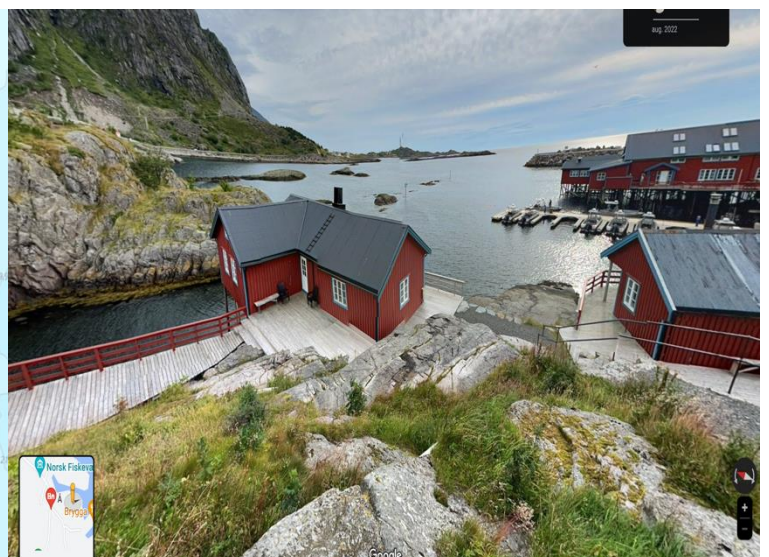
Terrengruhetsfaktor:

$$Kr = 0.19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} \quad (3.4)$$

Siden det er ulike terrengforhold så blir det antatt at det er ingen skråninger eller åser for å gjøre det simplifisert



Figur 3.6: Kartgrunnlag over regionen [19]



Figur 3.7: Terrengforholdet ved hendelsen [18]

Hendelsen fant sted på Moskstraumen AS campingplass i Å. Likevel gir ikke Figur 3.6 en nærmere visning av selve hendelsesstedet. I stedet gir den en oversikt over det nærliggende området på campingplassen. Siden det blir antatt at det er ingen åser eller skråninger, blir ikke vindhastigheten økt med 5%, slik som beskrevet i NS ([11], s.16-18), og koeffisienten  $c_0(z)$  er lik 1 i henhold til standarden.

Terreng kategori  $\longrightarrow$  0  $\longrightarrow$  Kyststrøk

$$z_0 = 0.03m$$

$z_{0,II} = 0.05m \longrightarrow$  Terrengkategori II

$$Kr = 0.19 \left( \frac{0.03m}{0.05m} \right)^{0.07} = 0.156 \quad (3.5)$$

Ruhetsfaktor:

$$c_r(z) = k_r \times \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (3.6)$$

$z = 3.164m \longrightarrow$  Bygningshøyde

$$c_r(z) = k_r \times \ln \left( \frac{3.164m}{0.03m} \right) = 1.086 \quad (3.7)$$

Terrengformfaktor:

$c_0(z) = 1 \longrightarrow$  Terrengkategori  $\rightarrow$  0 (Kyststrøk)

$$v_m(z) = 1.086 \times 1 \times 31 m/s = 33.7 m/s \quad (3.8)$$

Ettersom middelvindhastigheten er definert så kan vindkasthastighetstrykket beregnes nå.

### 3.6.3 Vindkasthastighetstrykk

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) \quad (3.9)$$

$$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3 \longrightarrow \text{Lufttetthet}$$

#### Turbulensintensitet:

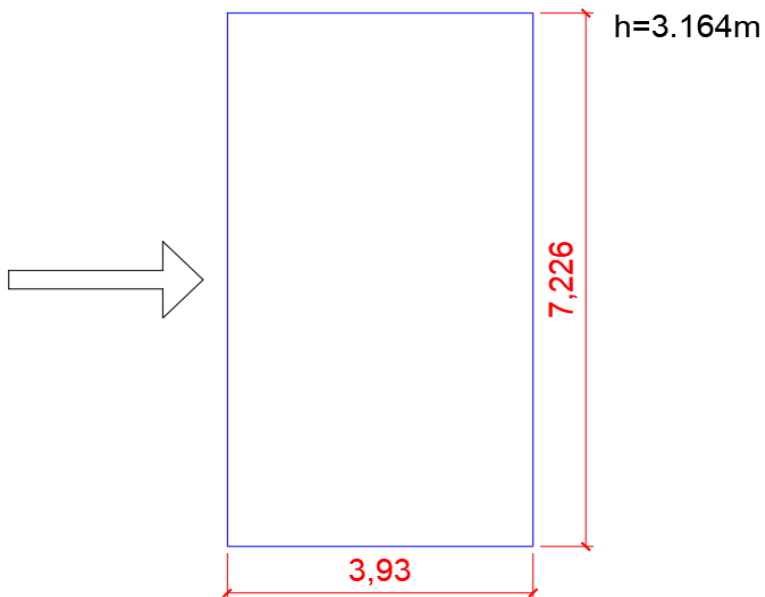
$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3.10)$$

$$k_I = 1 \longrightarrow \text{Turbulensfaktoren}$$

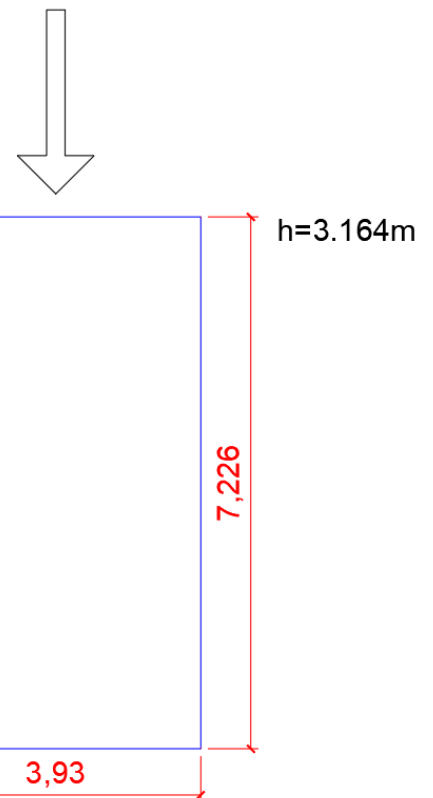
$$I_v(z) = \frac{1}{1 \times \ln\left(\frac{3.164\text{m}}{0.003\text{m}}\right)} = 0.144 \quad (3.11)$$

$$q_p(z) = [1 + 7 \times 0.144] \times \frac{1}{2} \times 1.25 \text{ kg/m}^3 \times (33.7 \text{ m/s})^2 = 1.14 \text{ kN/m}^2 \quad (3.12)$$

### 3.7 Vindtrykk på overflater



Figur 3.8: Bildet viser vindretning 0 grader i forhold til byggets kortside



Figur 3.9: Bildet viser vindretning 90 grader i forhold til byggets kortside

De mest utfordrende vindretningene for bygningens stabilitet er de som peker mot 0 grader og 90 grader i forhold til byggets kortside. Disse to retningene har størst potensial for å påføre bygningen kraftig vindbelastning. Figur (3.8) og (3.9) illustrerer dimensjonene for vindretningene. Derfor bruker vi nettopp disse retningene som referansepunkter når vi beregner hvor mye kraft vinden kan utøve på bygningen.

For å beregne vindtrykk så bruker vi ligning (3.13):

$$W_e = q_p(z_e) \times C_{pe} \quad (3.13)$$

3.7.1. Lastetilfelle vindretning med 0°:

Arealet på langsiden av en struktur er avgjørende for å bestemme riktig  $C_{pe}$ -faktor i beregningen. Denne faktoren tar hensyn til form og dimensjoner av bygningen. Norske standarden gir veiledning om hvordan  $C_{pe}$  beregnes basert på ulike geometriske forhold [11].

Arealet til langside er definert som:

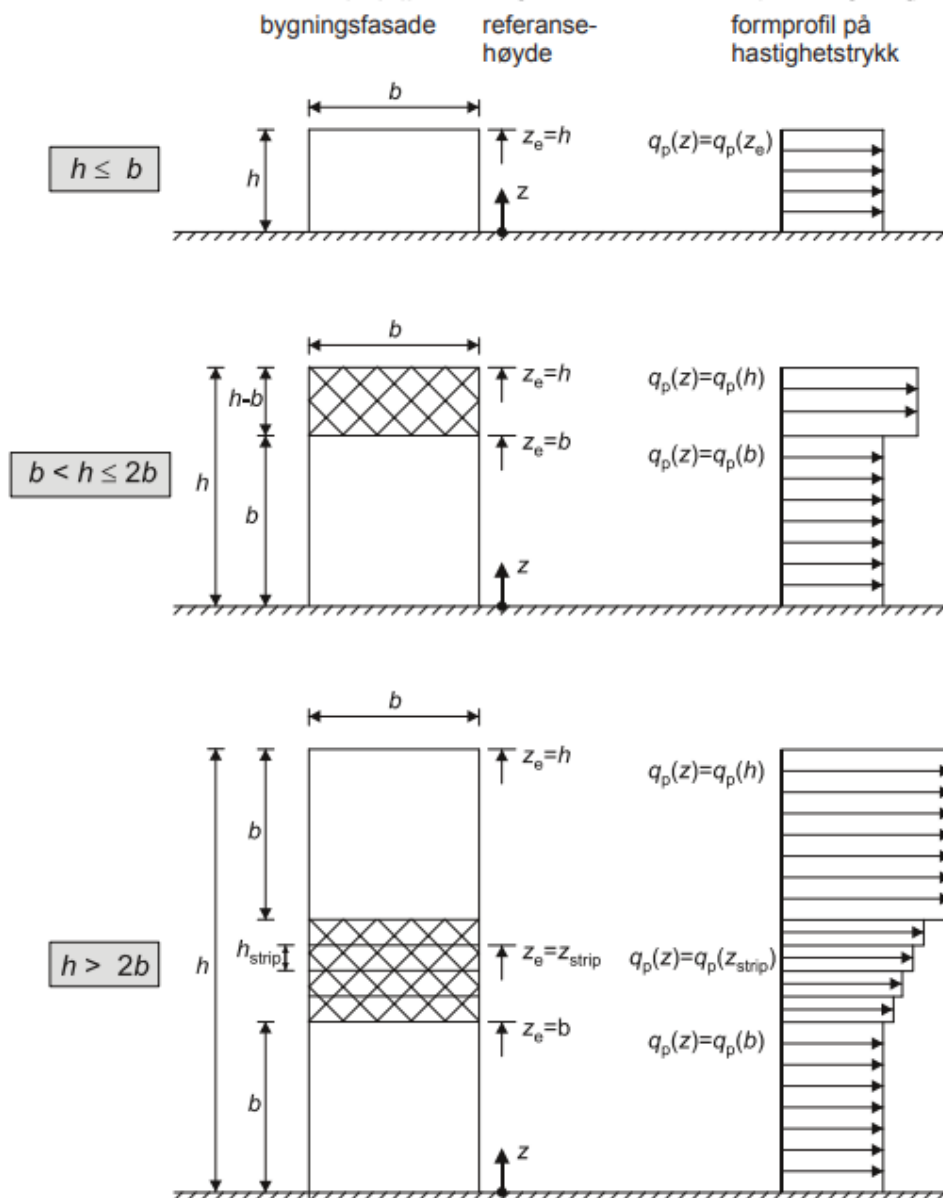
$$A = 7.226m \times 3.164m = 22.863m^2 \quad (3.14)$$

Ettersom arealet er større enn  $10m^2$  som er vist i ligning (3.14) så brukes det  $C_{pe,10}$  faktor:

$$A = 22.863m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (3.15)$$

### Vertikale vegger på rektangulære bygninger

Høyden  $z_e$  som referanse for veggene på langsidenene av rektangulære bygninger (innen sone D, som vist i Figur 3.10), justeres i samsvar med forholdet mellom bygningens høyde "h" og bredde "b". Dette betyr at  $z_e$  varierer basert på hvordan høyden og bredden forholder seg til hverandre.



Figur 3.10: Referansehøyde  $z_e$ , avhengig av  $h$  og  $b$  ([11] s.29)



Blant de tre scenarioene presentert i Figur (3.10), er det første scenarioet som virker mer nøyaktig, og dette skyldes følgende grunn:

$$h = 3.164\text{m} < b = 7.226\text{m} \quad (3.16)$$

Derfor er formprofilen for hastighetstrykk også fastsatt som:

$$q_p(z_e) = q_p(z) \quad (3.17)$$

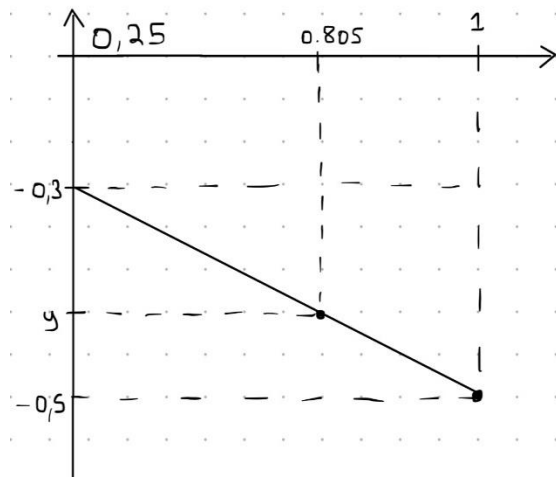
For å finne de anbefalte verdiene for formfaktorer gitt i Tabell (3.2) så må dette bestemmes avhengig av forholdet  $h/d$ .

$$h/d = \frac{3.164\text{m}}{3.93\text{m}} = 0.805 \quad (3.18)$$

Tabell 3.2: Anbefalte verdier av utvendige formfaktorer for vertikale vegger i rektangulære bygninger ([11] s.31)

Sone	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

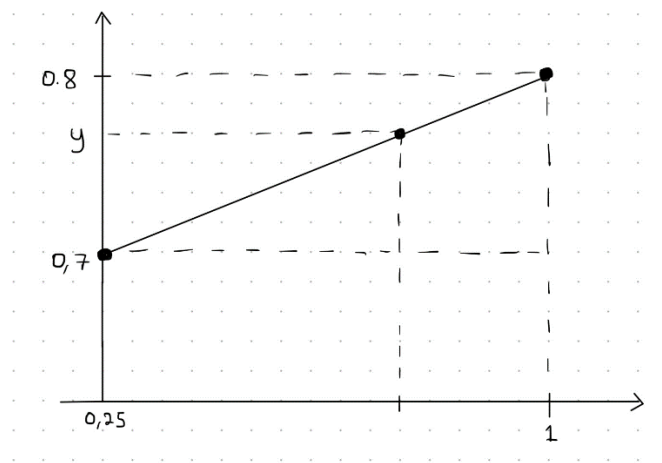
Da det dreier seg om et forhold mellom to formfaktorer, er det nødvendig å benytte interpolasjon for å oppnå en nøyaktig verdi for formfaktoren. Dette trinnet må gjentas både for Sone D og Sone E.



Figur 3.11: Interpolering av utvendig trykk koeffisient i Sone D

$$y = 0.7 + \frac{(0.8-0.7)}{(1-0.25)}(0.805 - 0.25) = 0.774 \quad (3.19)$$

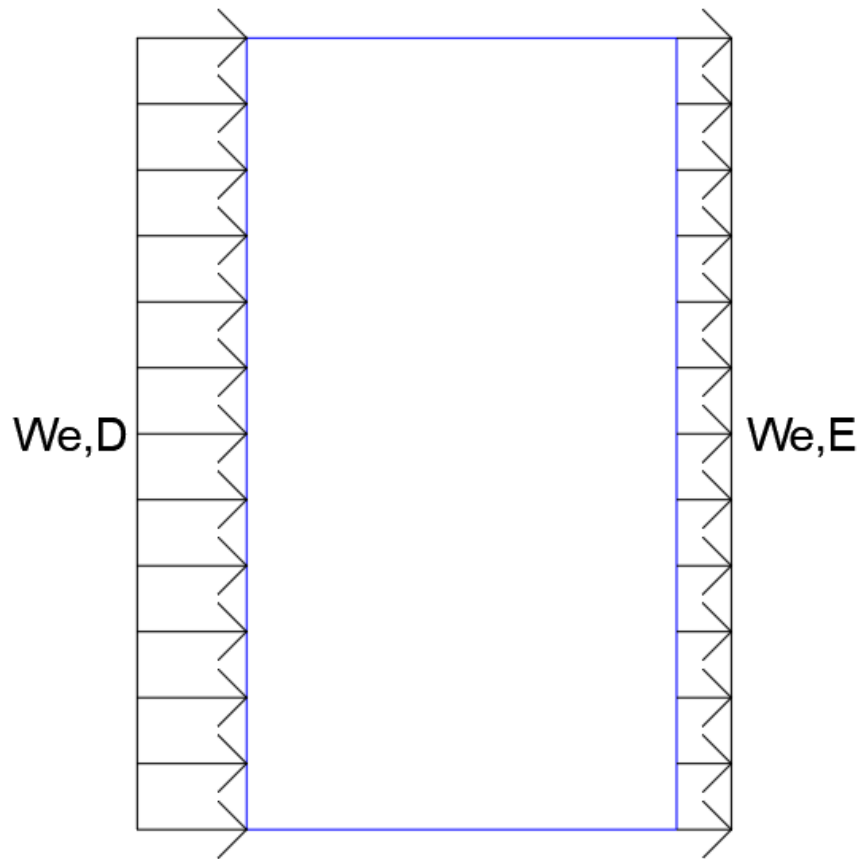
$$\text{Sone D} \rightarrow C_{pe,10} = 0.774$$



Figur 3.12: Interpolering av utvendig trykk koeffisient i Sone E

$$y = -0.3 + \frac{(-0.5-(-0.3))}{(1-0.25)}(0.805 - 0.25) = -0.448 \quad (3.20)$$

$$\text{Sone E} \rightarrow C_{pe,10} = -0.448$$



Figur 3.13: Hastighetstrykk på vegger for vindretning 0 grader

I denne situasjonen er det utvendig vindlast som er relevant, da det er denne kraften fra vind som har påvirket bygningens ytre. Innvendig vindlast refererer til de kreftene som vind påvirker inne i en struktur, men den spiller ikke en betydelig rolle i denne spesifikke hendelsen. Det er den ytre vindpåvirkningen og dens innvirkning på bygningen som er sentralt her.

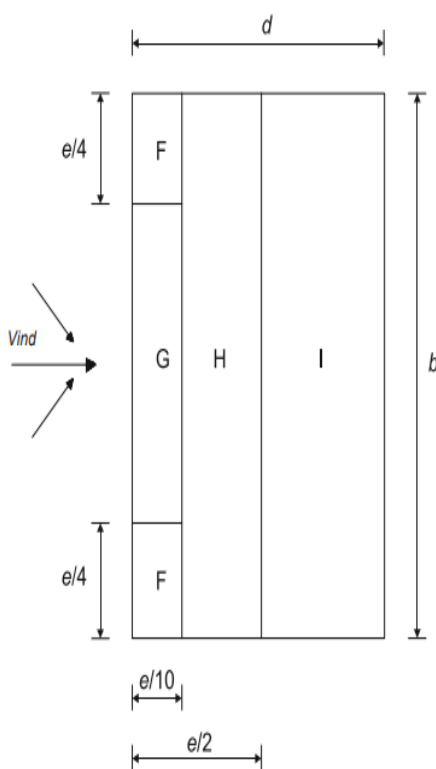
Da vi besitter formfaktorene for de respektive sonene og har definert vindhastighetstrykket i ligning (3.12), kan vindtrykket nå beregnes som følger:

$$\begin{aligned} W_{e,D} &= q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times 0.774 \\ W_{e,D} &= 0.882 \text{ kN/m}^2 \end{aligned} \tag{3.21}$$

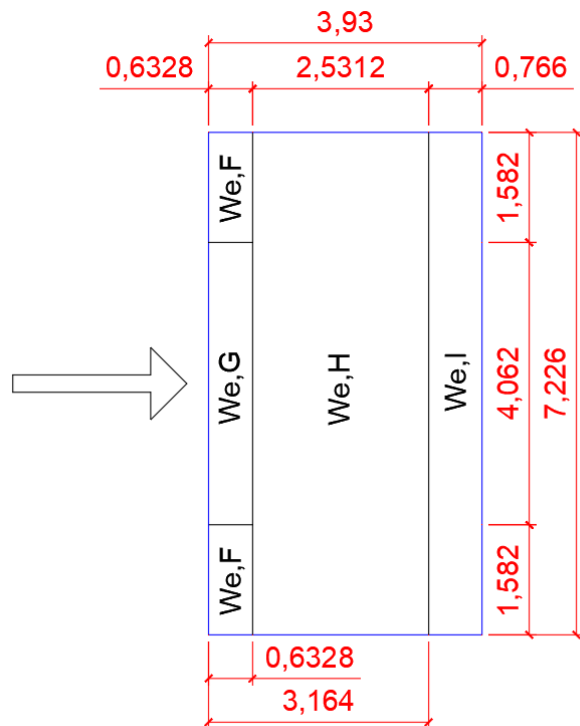
$$\begin{aligned} W_{e,E} &= q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times (-0.448) \\ W_{e,E} &= -0.511 \text{ kN/m}^2 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Disse verdiene er avgjørende og vil bli tatt med videre for å beregne vindkreftene som virker på veggene. Vi har nå beregnet vindtrykket for både sone D og sone E. Neste steg vil være å utføre beregninger for å finne vindtrykket på taket. Dette vil gi en helhetlig forståelse av hvordan vindkreftene påvirker de ulike delene av strukturen.

### Flate tak



$e = b$  eller  $2h$ , avhengig av hvilken som er minst  
 $b$ : mål på tvers av vinden



Figur 3.14: Flat tak oppdelt i soner ([11] s.32)

Figur 3.15: Sonene for vindlast på tak med tilhørende mål

Figur (3.14) illustrerer hvordan taket skal bli delt inn i soner for flate tak. På den andre siden gir Figur (3.15) en mer detaljert skisse som tydelig viser dimensjonene som også er nevnt under:

$$b = 7.226m, \quad 2h = 6.328m \rightarrow e = 2h$$

$$\frac{e}{2} = 3.164m, \quad \frac{e}{4} = 1.582m, \quad \frac{e}{10} = 0.6328m$$

Tabell 3.3: Utvendige formfaktorer for flate tak ([11] s.33)

Taktype	Sone							
	F		G		H		I	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
Skarp takavslutning	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	
							-0,2	

For å bestemme den nødvendige formfaktoren, må vi først beregne arealet for hver enkelt sone. Avhengig av dette arealet vil vi velge riktig formfaktor å anvende. Som tidligere nevnt, hvis sonens areal overstiger  $10m^2$ , vil vi anvende formfaktoren  $C_{pe,10}$ . Hvis derimot sonens areal er mindre enn  $1 m^2$ , vil vi bruke formfaktoren  $C_{pe,1}$ . Hvis arealet er mellom  $1 m^2$  og  $10m^2$  bruker vi ligning (3.23) for å finne formfaktoren:

$$C_{pe} = C_{pe,1} - (C_{pe,1} - C_{pe,10}) \log_{10} A \quad (3.23)$$

$$A_{ref,F} = 0.6328m \times 1.582m = 1.001m^2$$

$$A_{ref,F} = 1m^2 < 1.001m^2 < 10m^2 \rightarrow \text{Bruke ligning (3.23)}$$

$$C_{pe} = -2.5 - (-2.5 - (-1.8)) \log_{10}(1.001) = -2.4997 \approx -2.5 \quad (3.24)$$

$$A_{ref,G} = 0.6328m \times 4.062m = 2.5704m^2$$

$$A_{ref,G} = 1m^2 < 2.5704m^2 < 10m^2 \rightarrow \text{Bruke ligning (3.23)}$$

$$C_{pe} = -2.0 - (-2.0 - (-1.2)) \log_{10}(2.5704) = -1.672 \approx -1.7 \quad (3.25)$$

$$A_{ref,H} = 2.5312m \times 7.226m = 18.29m^2$$

$$A_{ref,H} = 18.29m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (3.26)$$

$$A_{ref,I} = 0.766m \times 7.226m = 5.535m^2$$

$$A_{ref,I} = 5.535m^2 < 10m^2 \rightarrow C_{pe,1} \quad (3.27)$$

Samme formfaktor for  $C_{pe,1}$  og  $C_{pe,10}$ , så trenger ikke å bruke ligning (3.23)

$$\text{Sone F} \rightarrow C_{pe,1} = -2.5$$

$$\text{Sone G} \rightarrow C_{pe,1} = -1.7$$

$$\text{Sone H} \rightarrow C_{pe,10} = -0.7$$

$$\text{Sone I} \rightarrow C_{pe,1} = -0.2 \longrightarrow \text{den mest gunstige verdien}$$

*for veltemoment er valgt*



Dersom vi hadde tatt i bruk en positiv verdi for Sone I, ville dette ha indikert at det er et trykk mot taket. I vår nåværende situasjon, der vi ønsker at beregningene skal understreke et høyere veltemoment forårsaket av vind, må vi justere forholdet ved å anse Sone I som en negativ verdi.

Nå som sonene er definert, er vi klare til å utføre beregninger av vindtrykket for de forskjellige sonene på taket:

$$W_{e,F} = q_p(z_e) \times C_{pe,1} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times (-2.5) = -2.85 \text{ kN/m}^2 \quad (3.28)$$

$$W_{e,G} = q_p(z_e) \times C_{pe,1} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times (-1.7) = -1.94 \text{ kN/m}^2 \quad (3.29)$$

$$W_{e,H} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times (-0.7) = -0.798 \text{ kN/m}^2 \quad (3.30)$$

$$W_{e,I} = q_p(z_e) \times C_{pe,1} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times (-0.2) = -0.228 \text{ kN/m}^2 \quad (3.31)$$

### 3.7.2 Lastetilfelle vindretning med 90°

Den samme prosedyren som ble brukt i det tidligere underkapittelet med tittelen "Lasttilfelle vindretning med 0 grader" skal også utføres i dette nåværende underkapittelet. Først vil vi evaluere arealet for å avgjøre om vi skal bruke  $C_{pe,10}$  eller  $C_{pe,1}$ . Dette trinnet er viktig for å bestemme riktig formfaktor i henhold til situasjonen.

$$A = 3.93m \times 3.164m = 12.435m^2 \quad (3.32)$$

$$A = 12.435m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10}$$

$C_{pe,10}$  formfaktor for veggene.

#### *Vertikale vegger på rektangulære bygninger*

Siden vindretningen kommer mot kortsiden av strukturen, blir verdien for "b" endret til 3.93 meter. I tråd med informasjonen i Figur (3.10), blir situasjonen fortsatt definert på samme måte også i dette tilfellet.

$$h = 3.164m < b = 3.93m \quad (3.33)$$

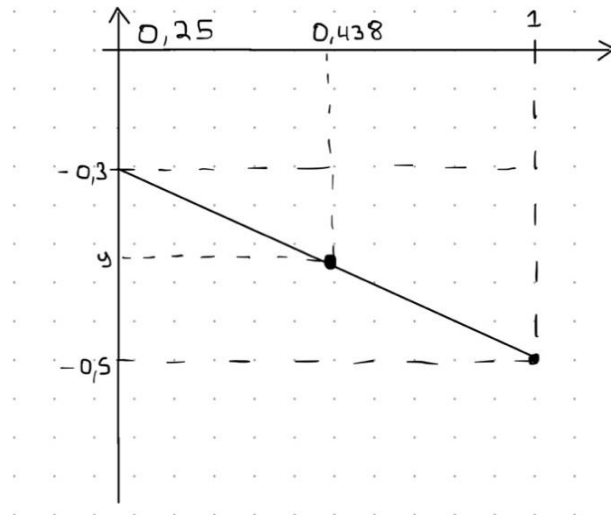
Derfor er formprofilen for hastighetstrykk også fastsatt som:

$$q_p(z_e) = q_p(z) \quad (3.34)$$

For å finne de anbefalte verdiene for formfaktorer gitt i Tabell (3.2) så må dette bestemmes avhengig av forholdet  $h/d$ .

$$h/d = \frac{3.164m}{7.226m} = 0.438 \quad (3.35)$$

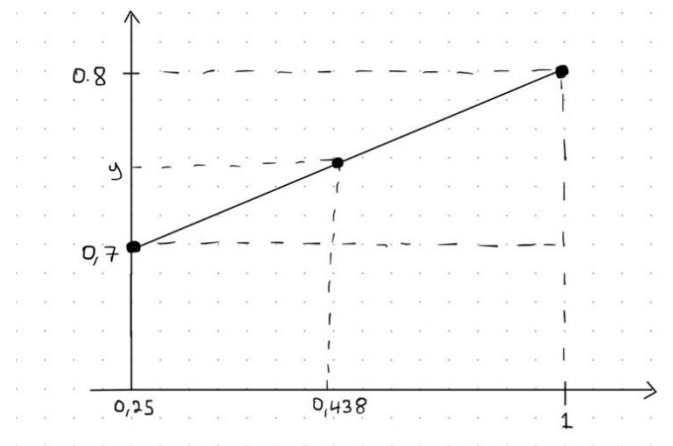
Igjen, når forholdet ikke gir en eksakt verdi, blir det nødvendig å benytte seg av interpolasjon for å finne en mer presis formfaktor. Dette betyr at vi igjen må estimere en mellomliggende verdi basert på det resultatet.



Figur 3.16: Interpolering av utvendig trykk koeffisient i Sone D

$$y = 0,7 + \frac{(0,8-0,7)}{(1-0,25)}(0,438 - 0,25) = 0,725 \quad (3.36)$$

$$\text{Sone D} \rightarrow C_{pe,10} = 0,725$$

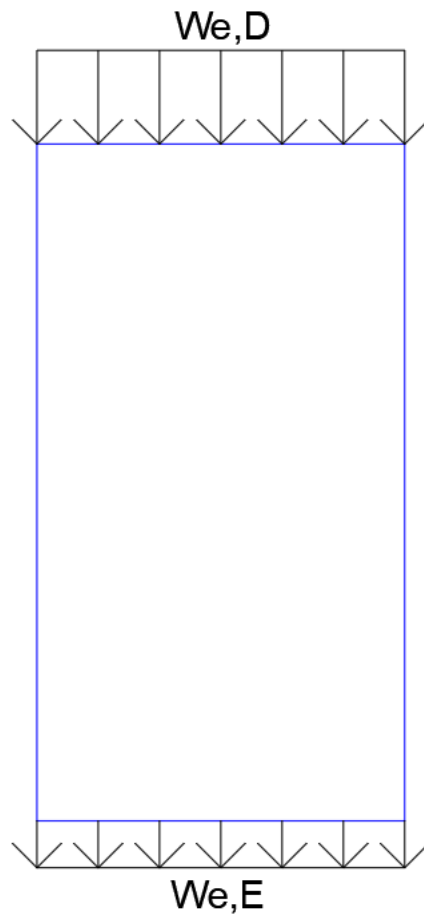


Figur 3.17: Interpolering av utvendig trykk koeffisient i Sone E

$$y = -0,3 + \frac{(-0,5-(-0,3))}{(1-0,25)}(0,438 - 0,25) = -0,350 \quad (3.37)$$

$$\text{Sone E} \rightarrow C_{pe,10} = -0,350$$





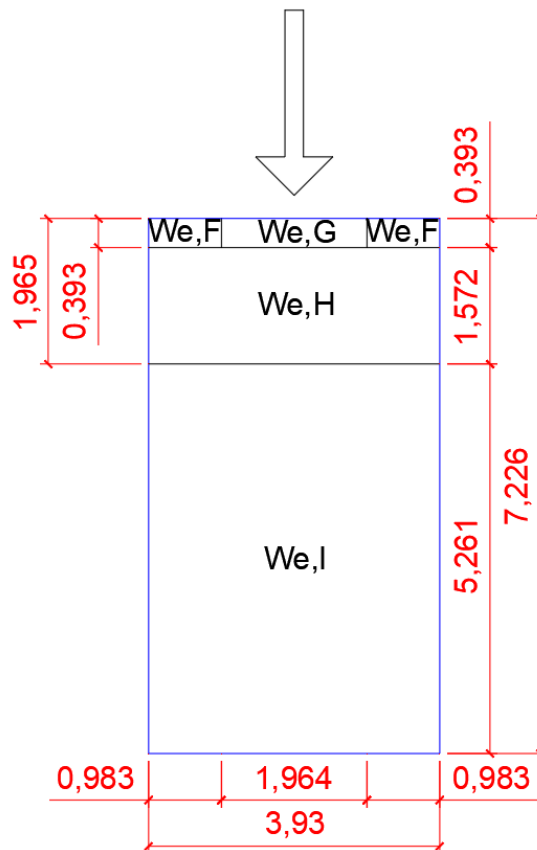
Figur 3.18: Hastighetstrykk på vegger for vindretning 90 grader

Med formfaktorene på plass etter interpolasjon, har vi nå de nødvendige verdiene for å fortsette med beregningen av vindtrykket for både Sone D og Sone E. Hastighetstrykket for sonene, som er illustrert i Figur (3.18), er også beregnet og presentert nedenfor.

$$\begin{aligned}
 W_{e,D} &= q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times 0.725 \\
 W_{e,D} &= 0.827 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}
 \tag{3.38}$$

$$\begin{aligned}
 W_{e,E} &= q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times (-0.350) \\
 W_{e,E} &= -0.399 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}
 \tag{3.39}$$

## Flate tak



Figur 3.19: Sonene for vindlast på tak med tilhørende mål

Ettersom det må bli tatt til betraktning et lastetilfelle der vindretningen er 90 grader i forhold til byggets kortside også, tilpasses dimensjonene i henhold til dette. Figur (3.19) viser hvordan sonene er fordelt med de justerte målene, og en nærmere beskrivelse følger nedenfor.

$e$  skal være minst av  $b$  eller  $2h$ :

$$b = 7.226m, \quad 2h = 6.328m \rightarrow e = 2h$$
$$\frac{e}{2} = 3.164m, \quad \frac{e}{4} = 1.582m, \quad \frac{e}{10} = 0.6328m$$

Når en har beregnet dimensjonene, må en også regne ut arealet for hver enkelt sone. Dette er viktig for å fastslå hvilken formfaktor som skal brukes i hvert tilfelle. De påfølgende beregningene er oppsummert nedenfor:

$$A_{ref,F} = 0.983m \times 0.393m = 0.39m^2$$

$$A_{ref,F} = 0.39m^2 < 10m^2 \rightarrow C_{pe,1} \quad (3.40)$$

$$A_{ref,G} = 1.964m \times 0.393m = 0.772m^2$$

$$A_{ref,G} = 0.772m^2 < 10m^2 \rightarrow C_{pe,1} \quad (3.41)$$

$$A_{ref,H} = 1.572m \times 3.93m = 6.18m^2$$

$$A_{ref,H} = 6.18m^2 < 10m^2 \rightarrow \text{Bruke ligning (4.23)}$$

$$C_{pe} = -1.2 - (-1.2 - (-0.7)) \log_{10}(6.18) = -0.8045 \approx -0.81 \quad (3.42)$$

$$A_{ref,I} = 5.261m \times 3.93m = 20.676m^2$$

$$A_{ref,I} = 20.676m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (3.43)$$

$$\text{Sone F} \rightarrow C_{pe,1} = -2.5$$

$$\text{Sone G} \rightarrow C_{pe,1} = -2.0$$

$$\text{Sone H} \rightarrow C_{pe,1} = -0.81$$

$$\text{Sone I} \rightarrow C_{pe,10} = -0.2 \longrightarrow \text{den mest gunstige verdien}$$

*for veltemoment er valgt*



Også i denne aktuelle belastningssituasjonen blir Sone I vurdert med en negativ verdi. Dette valget forklares ved at en positiv verdi ville ha resultert i trykk mot denne sonen. Gitt den nåværende situasjonen, er det mer logisk at Sone I har en negativ verdi.

$$W_{e,F} = q_p(z_e) \times C_{pe,1} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times (-2.5) = -2.85 \text{ kN/m}^2 \quad (3.44)$$

$$W_{e,G} = q_p(z_e) \times C_{pe,1} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times (-2.0) = -2.28 \text{ kN/m}^2 \quad (3.45)$$

$$W_{e,H} = q_p(z_e) \times C_{pe,1} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times (-0.81) = -0.92 \text{ kN/m}^2 \quad (3.46)$$

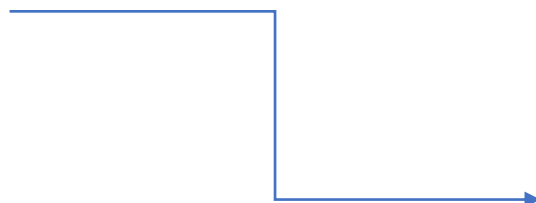
$$W_{e,I} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.14 \text{ kN/m}^2 \times (-0.2) = -0.23 \text{ kN/m}^2 \quad (3.47)$$

### 3.7.3 Vindkrefter

Vindkreftene som virker på bygningens flater, vil bli spesifisert i samsvar med de tidligere angitte belastningstilfellene (vindretningen 0 og 90 grader i forhold til byggets korte side) og i henhold til de definerte trykksonene på vegger og tak for hvert enkelt tilfelle (sone D, sone E, sone F, sone G, sone H og sone I). I tillegg vil en reduksjon i vindkreftene bli anvendt med en korrelasjonsfaktor på 0.85 for å ta hensyn til sammenhengen mellom vindtrykk på vindvendt (lo) og levendt (leside) av bygningen, i samsvar med anbefalingene i NS-EN 1991 ([11] s.31).

Vindkraften blir definert gjennom ligning (3.48):

$$F_{We} = C_s C_d \times W_e \times A_{ref} \quad (3.48)$$



$C_s C_d$  → For bygninger med en høyde mindre enn 15m kan verdien av  $C_s C_d$  settes lik 1.  
 $A_{ref}$  → Referansearealet av den enkelte overflaten

Lastetilfelle vindretning 0°:

Sone D:

$$F_{W_{e,D}} = C_s C_d \times W_{e,D} \times A_{ref,D}$$

$$A_{ref,D} = 7.226\text{m} \times 3.164\text{m} = 22.863\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,D}} = 1 \times 0.882 \text{ kN/m}^2 \times 22.863\text{m}^2 \times 0.85 = 17.14\text{kN} \quad (3.49)$$

Sone E:

$$F_{W_{e,E}} = C_s C_d \times W_{e,E} \times A_{ref,E}$$

$$A_{ref,E} = 7.226\text{m} \times 3.164\text{m} = 22.863\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,E}} = 1 \times (-0.511 \text{ kN/m}^2) \times 22.863\text{m}^2 \times 0.85 = -9.93\text{kN} \quad (3.50)$$

Sone F:

$$F_{W_{e,F}} = C_s C_d \times W_{e,F} \times A_{ref,F}$$

$$A_{ref,F} = 0.6328\text{m} \times 1.582\text{m} = 1.001\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,F}} = 1 \times (-2.85 \text{ kN/m}^2) \times 1.001\text{m}^2 \times 0.85 = -2.43\text{kN} \quad (3.51)$$

Sone G:

$$F_{W_{e,G}} = C_s C_d \times W_{e,G} \times A_{ref,G}$$

$$A_{ref,G} = 0.6328\text{m} \times 4.062\text{m} = 2.5704\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,G}} = 1 \times (-1.94 \text{ kN/m}^2) \times 2.5704\text{m}^2 \times 0.85 = -4.24\text{kN} \quad (3.52)$$

Sone H:

$$F_{W_{e,H}} = C_s C_d \times W_{e,H} \times A_{ref,H}$$

$$A_{ref,H} = 2.5312\text{m} \times 7.226\text{m} = 18.29\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,H}} = 1 \times (-0.798 \text{ kN/m}^2) \times 18.29\text{m}^2 \times 0.85 = -12.41\text{kN} \quad (3.53)$$

Sone I:

$$F_{w_{e,I}} = C_s C_d \times W_{e,I} \times A_{ref,I}$$

$$A_{ref,I} = 0.766\text{m} \times 7.226\text{m} = 5.535\text{m}^2$$

$$F_{w_{e,I}} = 1 \times (-0.228 \text{ kN/m}^2) \times 5.535\text{m}^2 \times 0.85 = -1.07\text{kN} \quad (3.54)$$

Lastetilfelle vindretning 90°:

Sone D:

$$F_{W_{e,D}} = C_s C_d \times W_{e,D} \times A_{ref,D}$$

$$A_{ref,D} = 3.93\text{m} \times 3.164\text{m} = 12.435\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,D}} = 1 \times 0.827 \text{ kN/m}^2 \times 12.435\text{m}^2 \times 0.85 = 8.74\text{kN} \quad (3.55)$$

Sone E:

$$F_{W_{e,E}} = C_s C_d \times W_{e,E} \times A_{ref,E}$$

$$A_{ref,E} = 3.93\text{m} \times 3.164\text{m} = 12.435\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,E}} = 1 \times (-0.399 \text{ kN/m}^2) \times 12.43\text{m}^2 \times 0.85 = -4.22\text{kN} \quad (3.56)$$

Sone F:

$$F_{W_{e,F}} = C_s C_d \times W_{e,F} \times A_{ref,F}$$

$$A_{ref,F} = 0.983\text{m} \times 0.393\text{m} = 0.39\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,F}} = 1 \times (-2.85 \text{ kN/m}^2) \times 0.39\text{m}^2 \times 0.85 = -0.95\text{kN} \quad (3.57)$$

Sone G:

$$F_{W_{e,G}} = C_s C_d \times W_{e,G} \times A_{ref,G}$$

$$A_{ref,G} = 1.964\text{m} \times 0.393\text{m} = 0.772\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,G}} = 1 \times (-2.28 \text{ kN/m}^2) \times 0.772\text{m}^2 \times 0.85 = -1.5\text{kN} \quad (3.58)$$

Sone H:

$$F_{W_{e,H}} = C_s C_d \times W_{e,H} \times A_{ref,H}$$

$$A_{ref,H} = 1.572\text{m} \times 3.93\text{m} = 6.18\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,H}} = 1 \times (-0.81 \text{ kN/m}^2) \times 6.18\text{m}^2 \times 0.85 = -4.25\text{kN} \quad (3.59)$$

Sone I:

$$F_{W_{e,I}} = C_s C_d \times W_{e,I} \times A_{ref,I}$$

$$A_{ref,I} = 5.261\text{m} \times 3.93\text{m} = 20.676\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,I}} = 1 \times (-0.228 \text{ kN/m}^2) \times 20.676\text{m}^2 \times 0.85 = -4.01\text{kN} \quad (3.60)$$

### 3.8 Veltemoment fra vind

Etter å ha beregnet vindkreftene for begge lastetilfellene, må vi nå analysere disse kreftene for å beregne det resulterende veltemomentet som oppstår på grunn av vinden. Deretter skal hvert av de to lastetilfellene evalueres ved å sammenligne veltemomentet fra vinden med det stabiliserende momentet som oppstår fra strukturens egenvekt.

Vi går vi videre til å beregne momentarmene for hver sone på bygningen:

#### **Taksonene (F, G, H, og I):**

Momentarm beregning for sone F/G:

Momentarm = Takets lengde - Halvparten av dimensjonen for sone F/G.

#### **Momentarm beregning for sone H:**

Momentarm = Halvparten av dimensjonen for sone H + Dimensjonen for sone I.

#### **Momentarm beregning for sone I:**

Momentarm = Halvparten av dimensjonen for sone I.

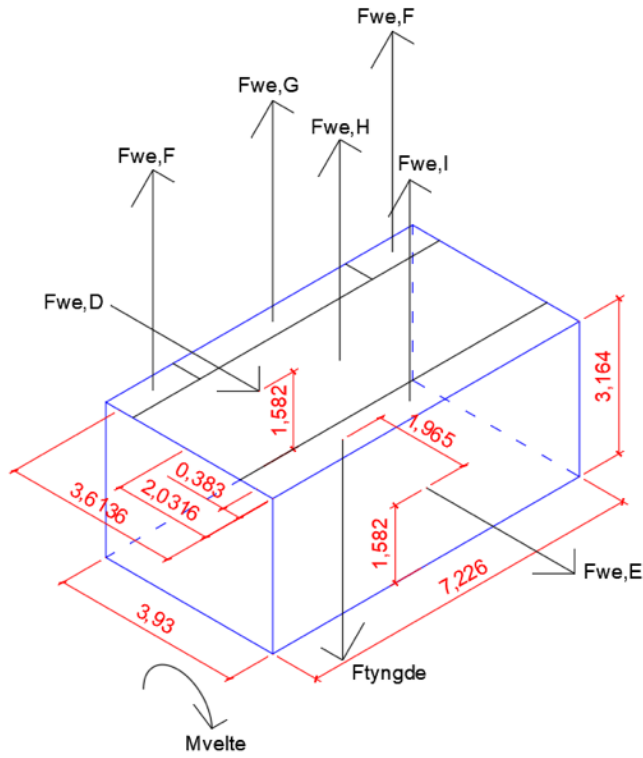
#### **Veggsonene (D og E):**

Momentarm beregning for sone D og E:

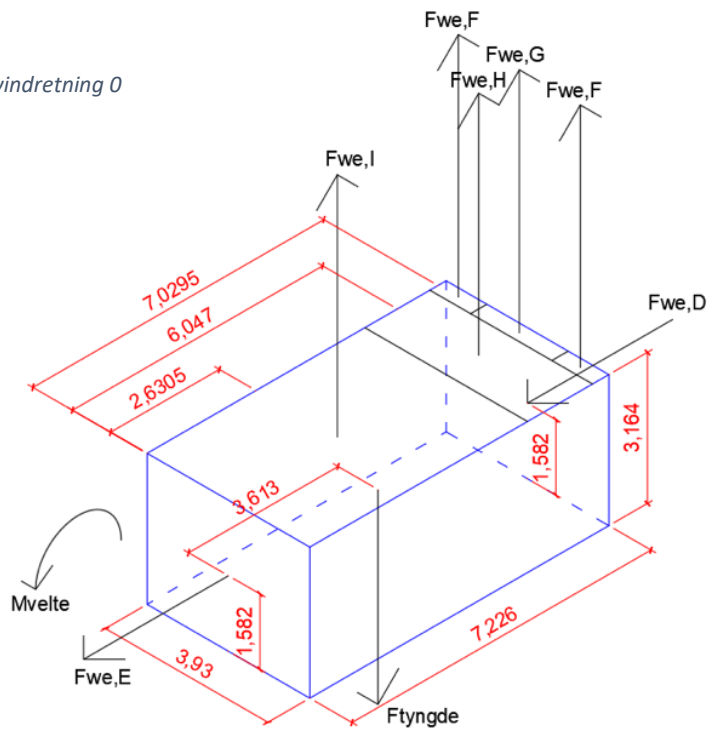
Momentarm = Halvparten av vegghøyden.



Ettersom det er ulike dimensjoner for de ulike lastetilfellene, må vi tilpasse dimensjonene for hver enkelt momentarm. Figur (3.20) og (3.21) viser momentarmene for de forskjellige vindretningene.



Figur 3.20: Dimensjonering av veltemoment for vindretning 0



Figur 3.21: Dimensjonering av veltemoment for vindretning 90

Tyngdekraften er uttrykket som  $F_{tyngde}$ :

$$F_{tyngde} = 9000\text{kg} \times 9.81\text{ m/s}^2 = 88.29\text{kN} \quad (3.62)$$

Alle elementene er på plass. Først vil en definere momentarmene for hver av sonene:

- Sone D og E har en momentarm på 1.582m.
- Sone F og G har en momentarm på 3.613m.
- Sone H har en momentarm på 2.0316m.
- Sone I har en momentarm på 0.383m.

Nå skal vindkraften multipliseres i hver sone med den tilhørende momentarmen i den samme sonen for å beregne momentet i hver sone. Momentet for alle sonene skal beregnes og deretter sammenlignes med det stabiliserende momentet som genereres av bygningens egenvekt. Sone F må ganges med 2, slik det er illustrert i Figur (3.15), siden det er 2 soner av F.

### 3.8.1 Lastetilfelle vindretning $0^\circ$

$$M_{\text{Veltemoment}} = (F_{W_{e,D}} + F_{W_{e,E}}) \times (1.582\text{m}) + (2F_{W_{e,F}} + F_{W_{e,G}}) \times (3.613\text{m}) + F_{W_{e,H}} \times (2.0316\text{m}) + F_{W_{e,I}} \times (0.383\text{m}) \quad (3.63)$$

$$M_{\text{Veltemoment}} = (17.14\text{kN} + 9.93\text{kN}) \times (1.582\text{m}) + (2 \times 2.43\text{kN} + 4.24\text{kN}) \times (3.613\text{m}) + 12.41\text{kN} \times (2.0316\text{m}) + 1.07\text{kN} \times (0.383\text{m}) = 101.325 \approx 101.33\text{ kN} \quad (3.64)$$

Tyngdekraften har en momentarm på 1.965m, som er vist i Figur (3.20). Beregningene nedenfor representerer det stabiliserende momentet fra egenvekt:

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = F_{tyngde} \times (1.965\text{m}) = 88.29\text{kN} \times (1.965\text{m}) = 173.49 \approx 173.5\text{ kNm} \quad (3.65)$$

Det som gjenstår, er å vurdere forholdet mellom det veltemomentet som skyldes vinden og det stabiliserende momentet som genereres av egenvekten til konstruksjonen.

$$M_{\text{Veltemoment}} = 101.33 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = 173.5 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = 173.5 \text{ kNm} \gg M_{\text{Veltemoment}} = 101.33 \text{ kNm} \quad (3.65)$$

Dette vil bli reflektert senere, men i den påfølgende situasjonen skal vi ta hensyn til lastetilfellet med vindretning  $90^\circ$  også. Derfor må vi først starte med å definere dimensjonene for momentarmene. Figur (3.21) illustrerer disse dimensjonene og er også beskrevet nedenfor:

- Sone D og E har en momentarm på 1.582m.
- Sone F og G har en momentarm på 7.0295m.
- Sone H har en momentarm på 6.047m.
- Sone I har en momentarm på 2.6305m.

Momentarmene er definert, og nå må vi multiplisere dem med vindkraftene i hver sone igjen for å beregne det totale veltemomentet i hver sone. Deretter vil disse momentene bli summeret, og vi vil vurdere dem opp mot det stabiliserende momentet som genereres av egenvekten til bygningen. Sone F må ganges med 2 igjen, slik det er illustrert i Figur (3.19), siden det er 2 soner av F.

### 3.8.2 Lastetilfelle vindretning $90^\circ$

$$M_{\text{Veltemoment}} = (F_{W_e,D} + F_{W_e,E}) \times (1.582\text{m}) + (2F_{W_e,F} + F_{W_e,G}) \times (7.0295\text{m}) + F_{W_e,H} \times (6.047\text{m}) + F_{W_e,I} \times (2.6305\text{m}) \quad (3.66)$$

$$M_{\text{Veltemoment}} = (8.74\text{kN} + 4.22\text{kN}) \times (1.582\text{m}) + (2 \times 0.95\text{kN} + 1.5\text{kN}) \times (7.0295\text{m}) + 4.25\text{kN} \times (6.047\text{m}) + 4.01\text{kN} \times (2.6305\text{m}) = 80.65 \text{ kNm} \quad (3.67)$$

Med en momentarm på 3.613m som illustrert i Figur (4.21), kan stabiliserende momentet som oppstår på grunn av egenvekten beregnes som:

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = F_{\text{tyngde}} \times (3.613\text{m}) = 88.29\text{kN} \times (3.613\text{m}) = 318.99 \approx 319 \text{ kNm} \quad (3.68)$$

Da gjenstår det å sammenligne veltemomentet fra vinden i den angitte retningen med det stabiliserende momentet som oppstår på grunn av egenvekten, for å kunne fastslå den overordnede situasjonen.

$$M_{\text{Veltemoment}} = 80.65 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = 319 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = 319 \text{ kNm} \gg M_{\text{Veltemoment}} = 80.65 \text{ kNm} \quad (3.69)$$

I begge tilfellene har resultatene vist at det stabiliserende momentet er større enn veltemomentet fra vinden. Etersom dette er konklusjonen, er det nødvendig å se på situasjonen fra en annen vinkel. Verdiene som er brukt for vindhastighet ble hentet som den 50-årige referansevindhastigheten for ekstremvær. Det er imidlertid ingen konkrete data tilgjengelige for den nøyaktige vindhastigheten. Men hvis vi antar basert på forskjellen mellom veltemomentet fra vinden og det stabiliserende momentet i begge lastetilfeller:

Lastetilfelle vindretning 0°:

$$173.5 \text{ kNm} - 101.33 \text{ kNm} = 72.17 \text{ kNm} \approx 72.2 \text{ kNm} \quad (3.70)$$

Lastetilfelle vindretning 90°:

$$319 \text{ kNm} - 80.65 \text{ kNm} = 238.65 \text{ kNm} \quad (3.71)$$

Ut ifra dette ser det ut til at lastetilfellet med vindretning 0 er mer sannsynlig hvis vindhastigheten hadde vært litt høyere, noe som ville ført til at veltemomentet fra vinden hadde oversteget det stabiliserende momentet. Hvis vi beregner forholdet mellom det stabiliserende momentet og veltemomentet fra vinden:

$$\frac{\text{Stabiliserende moment i vindretning 0}}{\text{Veltemoment i vindretning 0}} = \frac{173.5}{101.33} = 1.712 \approx 71.2\% \text{ mer} \quad (3.72)$$

Så det vil si veltemomentet i vindretning 0 må være mer enn 71.2% i resultat, for å være større enn stabiliserende moment. Med dette kan det justeres i ligning (3.73) for å finne hva vindhastigheten må være for å få økt veltemoment i den retningen.

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) \quad (3.73)$$

Alle leddene er antatt som konstant utenom  $v_m^2(z)$  fordi det er ingen endring på leddene, lufttettheten  $\rho$  er har samme verdi, turbulensintensitet  $I_v(z)$ :

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3.74)$$

Har ingen endring i noen av faktorene, fordi forholdene er antatt å være det samme.

$$v_m(z) = 33.7 \text{ m/s} \quad (3.75)$$

$v_m(z)$ , altså middelvindhastigheten er leddet som skal analyseres. Forholdet som ble beregnet fra ligning (3.72) kan multipliseres med den tidligere middelvindhastigheten for å oppnå et økt veltemoment.

$$v_m(z) = 33.7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 1.712 = 57.7 \text{ m/s} \quad (3.76)$$

En middelvindhastighet på  $57.7 \text{ m/s}$  er svært usannsynlig. Videre, da vi tidligere presenterte data fra andre målestasjoner, var ingen av dem i nærheten av denne verdien. Da gjenstår det å sjekke verdiene for løftekraft og skyvekraft for å konkludere denne hendelsen

### 3.9 Løftekraft og Skyvekraft

Løftekraften refererer til kreftene som påvirker den vertikale retningen, inkludert for eksempel vindkrefter på taket. Skyvekraften indikerer kreftene som virker i horisontalretningen, som er vindkrefter som presser mot veggene.

#### 3.9.1 Løftekraft

Hovedmålet er å vurdere vindkreftene som virker på taket i forhold til tyngdekraften som påvirker bygningen. Dette gir oss innsikt i kreftene som virker langs den vertikale retningen. Spesielt ønskes det å belyse under hvilke forhold eller hvordan denne hendelsen kunne ha oppstått. Hvis vindkreftene som påvirker taket er større enn tyngdekraften, indikerer dette at bygningen har blitt løftet opp.

På grunn av de to separate lastetilfellene må kreftene summeres individuelt for hvert tilfelle og deretter vurderes i forhold til tyngdekraften.  $F_{L\text{øfte}}$  er summen av vindkreftene fra taket.

#### Lastetilfelle vindretning $0^\circ$

$$F_{L\text{øfte}} = F_{We,F} + F_{We,G} + F_{We,H} + F_{We,I}$$

$$F_{L\text{øfte}} = 2.43\text{kN} + 4.24\text{kN} + 12.41\text{kN} + 1.07\text{kN} = 20.15 \text{ kN} \quad (3.77)$$

Tyngdekraften er referert som  $F_{\text{tyngde}}$ :

$$F_{\text{tyngde}} = 9000\text{kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 88.29\text{kN} \quad (3.78)$$

$$F_{\text{tyngde}} \gg F_{L\text{øfte}} \quad (3.79)$$

Lastetilfelle vindretning 90°

$$F_{L\text{\o}fte} = F_{W_{e,F}} + F_{W_{e,G}} + F_{W_{e,H}} + F_{W_{e,I}}$$

$$F_{L\text{\o}fte} = 0.95\text{kN} + 1.5\text{kN} + 4.25\text{kN} + 4.01\text{kN} = 10.71\text{kN} \quad (3.80)$$

Tyngdekraften er referert som  $F_{\text{tyngde}}$ :

$$F_{\text{tyngde}} = 9000\text{kg} \times 9.81\text{ m/s}^2 = 88.29\text{kN} \quad (3.81)$$

$$F_{\text{tyngde}} \gg F_{L\text{\o}fte} \quad (3.82)$$

I begge scenariene er tyngdekraften overlegent større enn løftekraften. Dette har blitt påvist og demonstrert gjennom ligningene (3.79) og (3.82). For å oppnå en fullstendig forståelse av hendelsene gjenstår det kun å beregne skyvekraften.

### 3.9.2 Skyvekraft

I den horisontale retningen identifiserer vi skyvekraften, som representerer de kreftene som presser mot veggen på bygningen.

På motsatt side finner vi friksjonskraften fra betongblokkene og hytta. Denne kraften skaper en motstand mot bevegelse og oppstår på grunn av luftens viskositet og friksjon mot bygningens overflate og betongblokkene.

Sammenligning av disse to kreftene, hvis skyvekraften er større enn friksjonskraften, betyr det at det er en ubalanse der vindkreftene presser bygningen bort fra terrenget. Dette kan resultere i at bygningen blir forflyttet eller skyvet i den horisontale retningen på grunn av vindpåvirkningen.

#### **Teoretisk**

Beregning av skyvekraft må gjøres i to lastetilfeller igjen. Både for vindretning  $0^\circ$  og  $90^\circ$ .

Skyvekraften resulterer summen av vindkreftene mot vegg.

Lastetilfelle vindretning  $0^\circ$ :

$$F_{skyve} = F_{We,D} + F_{We,E} = 17.14\text{kN} + 9.93\text{kN} = 27.1\text{kN} \quad (3.83)$$

Lastetilfelle vindretning  $90^\circ$

$$F_{skyve} = F_{We,D} + F_{We,E} = 8.74\text{kN} + 4.22\text{kN} = 12.96\text{kN} \quad (3.84)$$

Hvis gjenstanden har beveget seg og vi kjenner verdien av tyngdekraften ( $F_{tyngde} = 88.29\text{kN}$ ) og kraften som virker mot bygget ( $F_{skyve} = 27.1\text{kN}$ ), kan vi regne ut normalkraften (N) og definere friksjonskraften ( $F_{friksjon}$ ).

For å finne normalkraften, må vi først finne ut hvilken kraft som opprettholder likevekten i vertikalretningen. Siden gjenstanden beveger seg, betyr det at kraften som skyver bort fra bygget ( $F_{skyve}$ ) er større enn friksjonskraften.



Hvis det virker både en løftkraft ( $F_{L\oifte}$ ) og tyngdekraft ( $F_{tyngde}$ ) på en gjenstand i vertikal retning, kan vi finne normalkraften (N) ved å balansere disse kreftene. Normalkraften vil være den kraften som balanserer summen av de vertikale kreftene.

Ligningen for å finne normalkraften blir:

$$N - F_{tyngde} - F_{L\oifte} = 0$$

$$N = F_{tyngde} + F_{L\oifte} \quad (3.85)$$

Lastetilfelle vindretning  $0^\circ$

La oss først se på lastetilfellet der skyvekraften er 27.01 kN. Vi starter med å beregne normalkraften (N):

$$N = F_{tyngde} + F_{L\oifte} = 88.29\text{kN} - 20.9\text{kN} = 67.39\text{kN} \quad (3.86)$$

For å gjøre skyvekraften ( $F_{skyve}$ ) større enn friksjonskraften ( $F_{friksjon}$ ) i dette tilfellet, må vi finne en friksjonskoeffisient ( $\mu$ ) som tilfredsstiller betingelsen:

$$F_{skyve} > F_{friksjon}$$

$$F_{skyve} > \mu \times N$$

$$27.01\text{kN} > \mu \times 67.39\text{kN} \quad (3.87)$$

Derfor må friksjonskoeffisienten være mindre enn:

$$\mu < \frac{27.01\text{kN}}{67.39\text{kN}} \approx 0.4008 \quad (3.88)$$

For å oppnå en situasjon der skyvekraften er større enn friksjonskraften, må friksjonskoeffisienten være mindre enn 0.4008.

### Lastetilfelle vindretning 90°

I det andre lastetilfellet har vi en skyvekraft på 12.96 kN i vindretning 90°. Igjen beregner vi normalkraften (N):

$$N = F_{\text{tyngde}} + F_{\text{Løfte}} = 88.29\text{kN} - 13.65\text{kN} = 74.64\text{kN} \quad (3.89)$$

For å gjøre skyvekraften ( $F_{\text{skyve}}$ ) større enn friksjonskraften ( $F_{\text{friksjon}}$ ) i dette tilfellet, må det følges samme fremgangsmåte:

$$F_{\text{skyve}} > F_{\text{friksjon}}$$

$$F_{\text{skyve}} > \mu \times N$$

$$12.96\text{kN} > \mu \times 74.64\text{kN} \quad (3.90)$$

Derfor må friksjonskoeffisienten være mindre enn:

$$\mu < \frac{27.01\text{kN}}{74.64\text{kN}} \approx 0.3619 \quad (3.91)$$

For å oppnå en situasjon der skyvekraften er større enn friksjonskraften, må friksjonskoeffisienten være mindre enn 0.3619.

Da dette har ført til en bestemt situasjon, er det nødvendig å evaluere den aktuelle friksjonskoeffisienten. Hytta er laget av tre og er plassert over betongblokker, som er vist i Figur (3.22).



Figur 3.22: Fundamentering av hytta, FOTO: NORDLAND POLITIDISTRIKT [20]

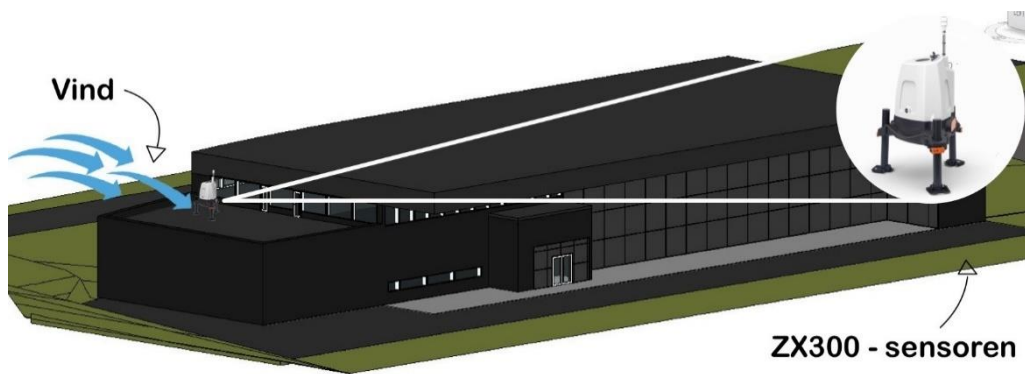
Med følgende resultat og oversikt over informasjonen som er delt kan det finnes ut hva friksjonskoeffisienten mellom betongblokkene og hytta hadde vært.

En omtrentlig verdi for friksjonskoeffisienten mellom betong og tre kan ligge i området mellom 0,4 og 0,7. Dette er en antagelse ut ifra mangel på data. Dette betyr at for hvert kilo av vekt som trykkes nedover, vil det kreve 0,4 til 0,7 kilo med friksjonskraft for å forhindre at tre objekter glir langs betongoverflaten.

Hendelsen blir diskutert videre i Kapitlet «Diskusjon og Konklusjon»...

## 4.1 Case Studie

Formålet med studien er å sammenligne værforholdene på tre spesifikke dager, der den ene dagen representerer den laveste middelvindhastigheten, den andre dagen representerer den høyeste middelvindhastigheten, og hvor den tredje er en tilfeldig valgt dag i den angitte tidsperioden. Formålet med denne sammenligningen er å øke forståelsen av variasjonen i værforholdene og deres påvirkning på vindforholdene i denne tidsrammen. Vi valgte å utnytte oss av instrumentet (ZX300, som du kan leses på Kapittel 5) som er plassert på taket til Ivar Langens hus bygningen på Universitetet i Stavanger. Under er det en illustrasjon av bygningen og plassering av instrumentet.



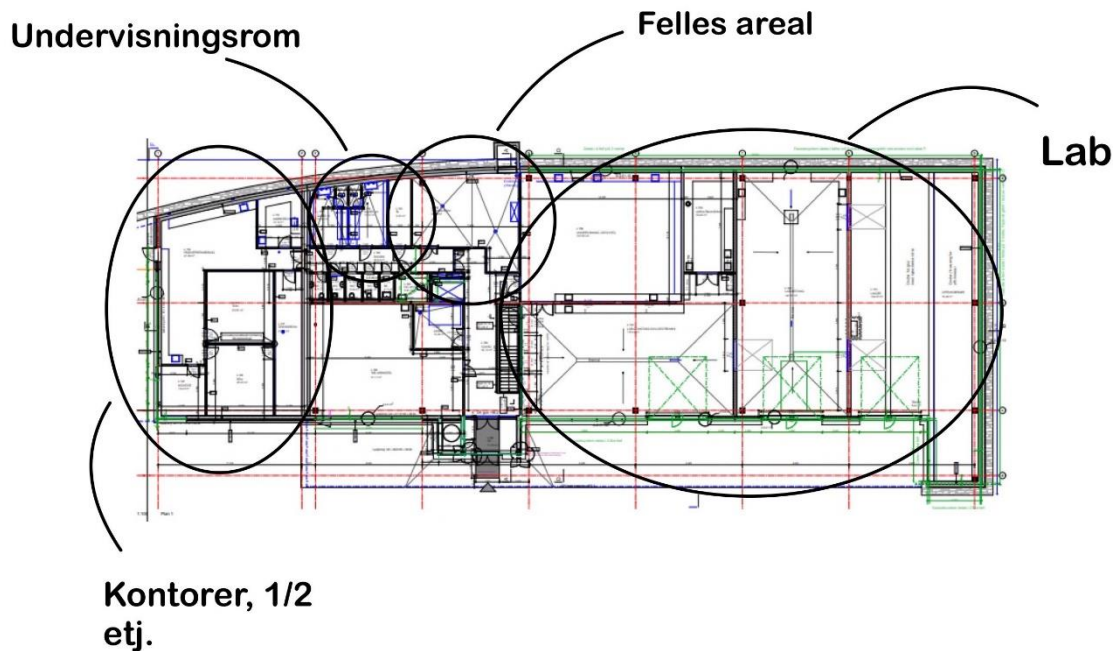
Figur 4.1: Vindmålesensoren på Universitetet i Stavanger

I løpet av perioden fra 2. desember 2022 til 28. februar 2023 er det tilgjengelig omfattende værdata fra Lidar måleren. Tilgangen til værdataene gir en unik mulighet til å gjennomføre en grundig sammenligning av disse værdataene

## 4.1 Bakgrunns info om Ivar Langens Hus

2013 startet de byggingen av Ivar Langens Hus. Prosjektet varte i rundt et år og ble fullført juni 2014. Prosjektleder Håvard Nordmark forteller oss at prosjektet hadde en budsjettamme på 78 millioner kroner. Navnet til dette nydelige bygget er oppkalt etter Ivar Langen, som var universitets første rektor, fra 2003 til 2007.

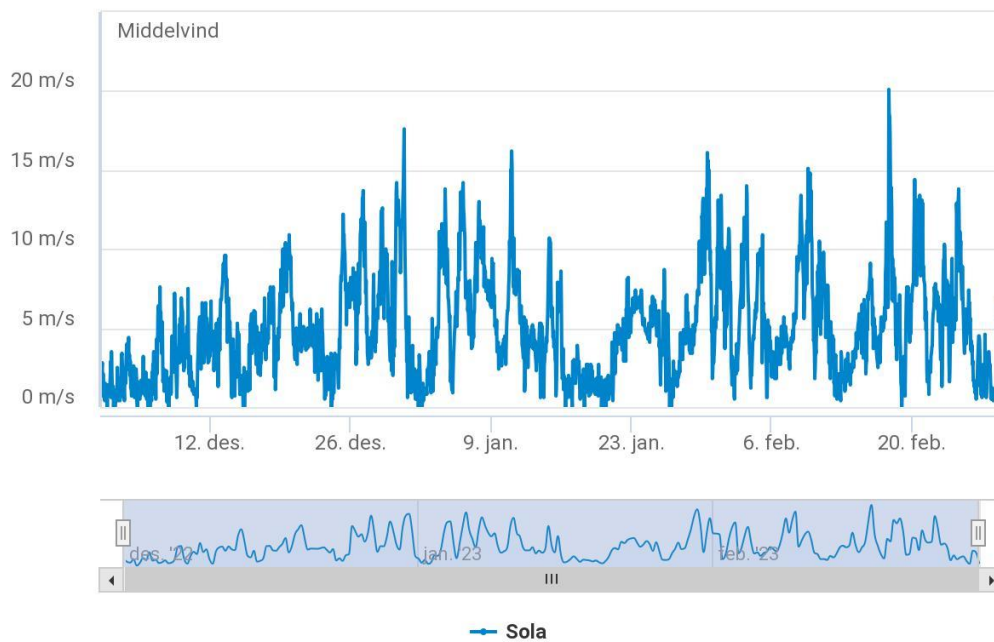
Dette bygget ble tilrettelagt bygget for ingeniørstudenter. Spesifikt, bygg og petroleum studenter. Bygget har et stort undervisningsrom, fire kontorer, en mikrolab med to svært kraftige mikroskoper, og ikke minst et felles areal som blir brukt til møter og sosiale arrangementer (kilder).



Figur 4.2: Illustrasjon av gitt plantegning

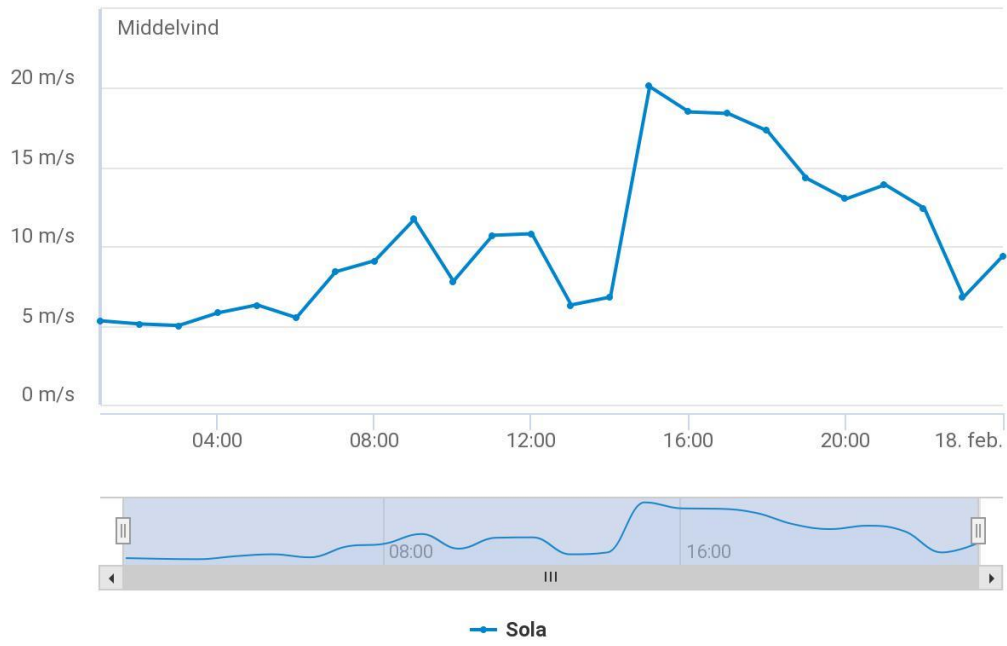
## 4.2 Været

Ved å analysere store datamengder med vinddata, foretrekkes det å velge de dagene med høyest og lavest gjennomsnittsvindhastighet. Ved å bruke historiske vindgrafer fra seklima.no har disse to spesifikke dagene blitt identifisert. Når det gjelder valg av målestasjon, har vi valgt den nærmeste målestasjonen fra Lidar måleren. For denne studien ble Sola metrologiske stasjon valgt på grunn av dens geografiske plassering og relevans.

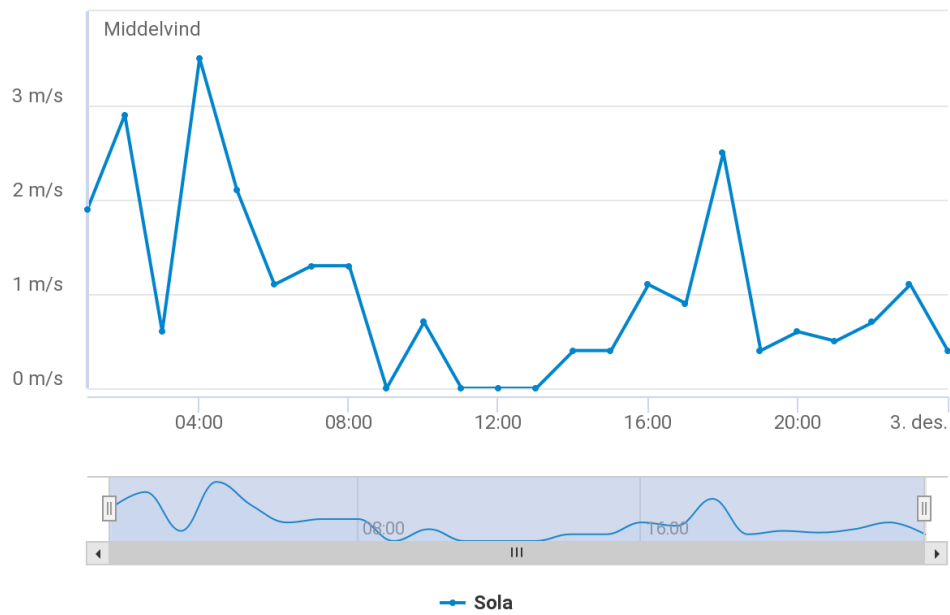


Figur 4.3 Middelvind for analyseperioden

Figur (4.3) illustrerer middelvindhastigheten for den tidsperioden vi skal analysere. I denne perioden ser til at vinden har variert mye. En nøye undersøkelse på grafen viser at den høyeste middelvindhastigheten oppstår den 17. februar 2023, mens den laveste middelvindhastigheten ble observert den 2. desember 2022. Den 17. februar ble en middelvindhastighet på 20,1 meter per sekund observert, som vist i figur 6.1. På den andre siden ble den 2. desember 2022 påvist som dagen med den laveste middelvindhastigheten i den angitte tidsrammen. Det ble registrert en gjennomsnittlig vindhastighet på kun 0,4 meter per sekund, som fremgår av Figur (4.4).



Figur 4.4: Middelvindhastigheten den 17.02.2023



Figur 4.5: Middelvindhastigheten den 02.12.2022

## 5 Metode

### 5.1.1 Matlab

I løpet av den valgte måleperioden ble dataene samlet inn og deretter behandlet og analysert ved hjelp av MATLAB, et matematisk dataprogram. De opprinnelige rådataene er lagret på en server ved Universitetet i Stavanger, og på grunn av deres betydelige størrelse har de blitt komprimert og lagret i .xls-format. Ved hjelp av et MATLAB-skript ble dataene dekomprimert og lagret som .mat-filer, organisert etter dato. For å begrense støy og unormalt høye signaler som kan påvirke dataene, blir eventuelle registrerte urealistisk store responsverdier eller vindkast, samt forstyrrelser i sensoren, satt til NaN-verdier. Imidlertid gjelder ikke dette for alle tall. Noen ganger er det nødvendig for brukeren å manuelt merke verdier som 999 og negative verdier for vindhastigheter som NaN-verdier. Dette tiltaket er implementert for å opprettholde konsistens i datasettet og redusere mulige feilaktige påvirkninger som kan oppstå på grunn av slike verdier. Dette er gjort for å opprettholde konsistens og redusere mulig feilaktig påvirkning fra slike verdier. På grunn av kompleksiteten i importprosessen blir dataene først importert til Excel. Dette gjør det mulig å endre datatypene for ulike kolonner og sikre korrekte datatyper før videre behandling.



### 5.1.2 AutoCad

AutoCAD er en dataprogramvare for 2D- og 3D-tegning og modellering som brukes i arkitektur, ingeniørfag og bygg- og konstruksjonsbransjen. Den lar brukerne opprette nøyaktige tekniske tegninger, planer og modeller ved hjelp av ulike verktøy og funksjoner.

I utgangspunktet ble en dwg-fil av plantegningen presentert, som deretter ble redigert i AutoCAD. Formålet med redigeringen var å fjerne unødvendig informasjon og gjøre nødvendige endringer. Den redigerte dwg-filen skulle deretter brukes som en skisse eller referanse for å tegne inn informasjonen i Revit.

### 5.1.3 Revit

Skissen som ble opprettet i AutoCAD blir brukt som referanse i Revit for å tegne bygningen. Det er viktig å merke seg at skissen fra AutoCAD ikke inneholder informasjon om terrengforhold eller nøyaktige høydedata for bygget. Derfor blir det gjort antagelser og omtrentlige beregninger når det gjelder høyde og andre relevante faktorer.

Tegningene som ble utført i Revit inkluderer kun nødvendige byggedetaljer som er relevante for oppgavens bearbeiding og ikke nødvendigvis dimensjonert helt nøyaktig i samsvar med plantegningene som ble brukt som utgangspunkt.

#### 5.1.4 Vindmåler

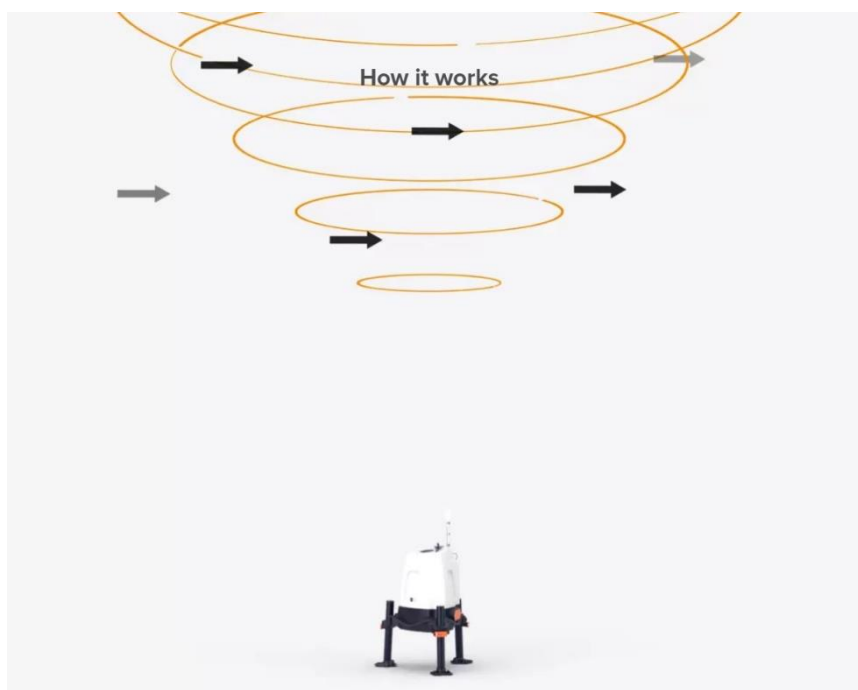
I prosjektet ble ZX300 brukt som det primære instrumentet for å registrere vindmålingene. ZX300 er en spesialisert enhet som er utviklet for vindmålinger på land. Den tilbyr en effektiv metode for å evaluere og måle tilgjengeligheten og potensialet for vindkraft i et spesifikt område.

ZX300 er en Lidar-enhet, som står for "Light Detection and Ranging". Den benytter seg av laserlys for å beregne avstander og samle inn data om vindmålingene. Dette gjør det mulig å utføre nøyaktige målinger uten behov for fysisk kontakt med vinden eller forstyrrelser av vindstrømmen [1].

En av fordelene ved å bruke ZX300 er dens evne til å samle inn vinddata på avstand uten å forstyrre vindstrømmen. ZX300 er utstyrt med avansert teknologi som sikrer høy kvalitet og pålitelighet i målingene som blir utført.

Gjennom bruk av ZX300 kunne prosjektet dra nytte av nøyaktige og pålitelige vindmålinger. Denne informasjonen var avgjørende for å utføre grundige analyser og beregninger relatert til vindens effekter på bygningen og vurdering av vindlast.

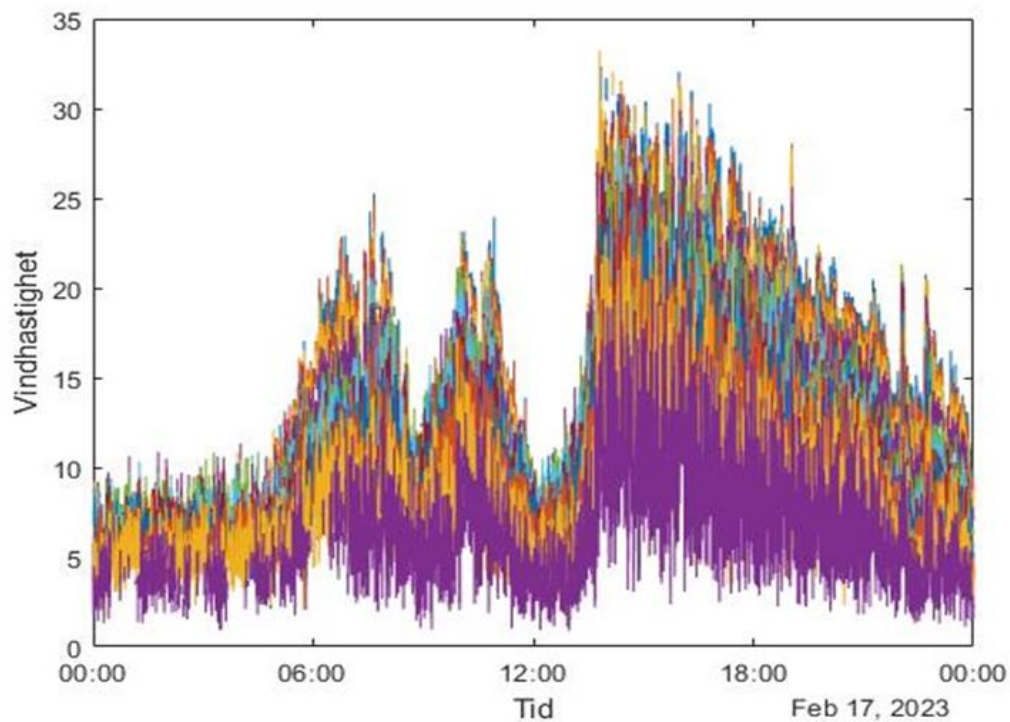
Måleapparatet følger central Europe Time som er 1 time bak sola.



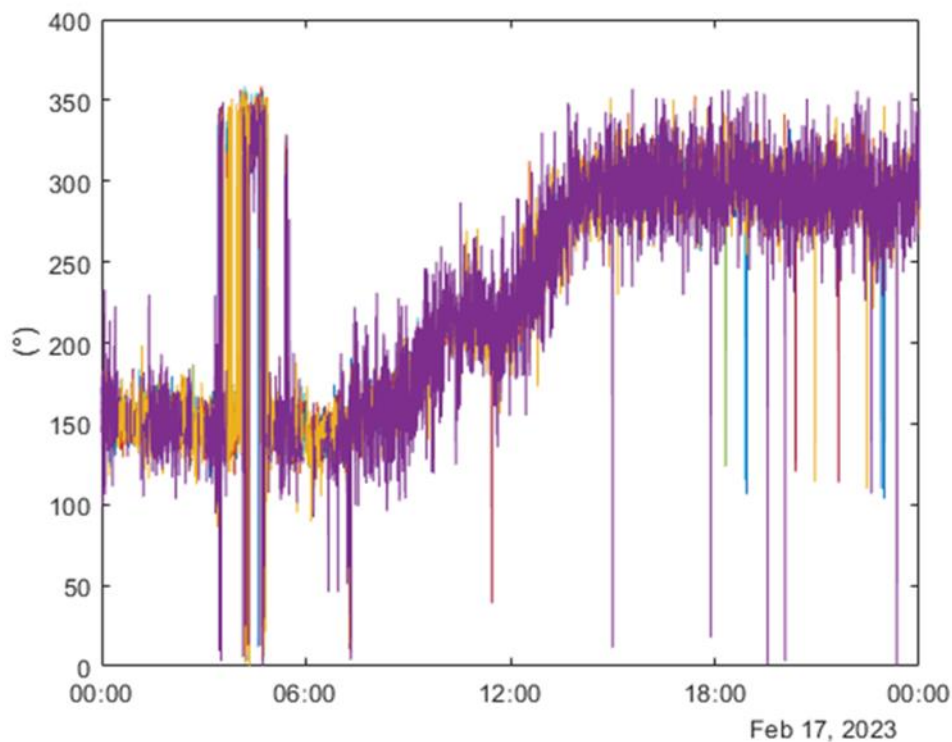
Figur 5.1: Her ser vi hvordan laserlyset fungerer, og måte den beregner vinden på god avstand [1]

## 6.1 Resultater

Vi har valgt å analysere disse tre dagene for seg selv. Ved dele opp dataene i både 10 og 20 minutters intervall. Lidar måleren plukker opp data et antall ganger per minutt, og ut ifra dette og grafisk presentasjon har det vist seg at 20 minutters intervall var mer lønnsomt for oss. Lidar måleren fanger værdata fra 11 forskjellige høyder som er vist på Figur (7). Den 2 desember så det ut som til det var mangel på data fra perioden 00:00 til 14:00 og fra 20:00 til 23:59. Dette har ført til at grafene på denne dagen er mer begrenset enn de andre. Figur (2) viser den horisontale vindhastigheten Lidar måleren har fanget opp i løpet 00:00 til 23:59 intervall.



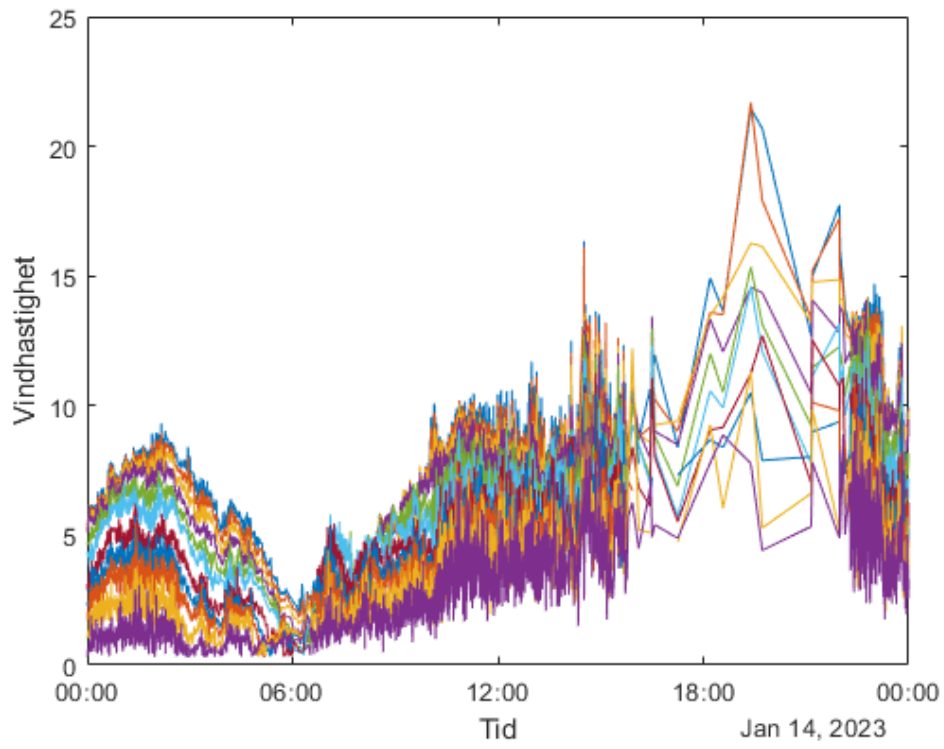
Figur 1 Målte horisontale vind den 17.02.2023



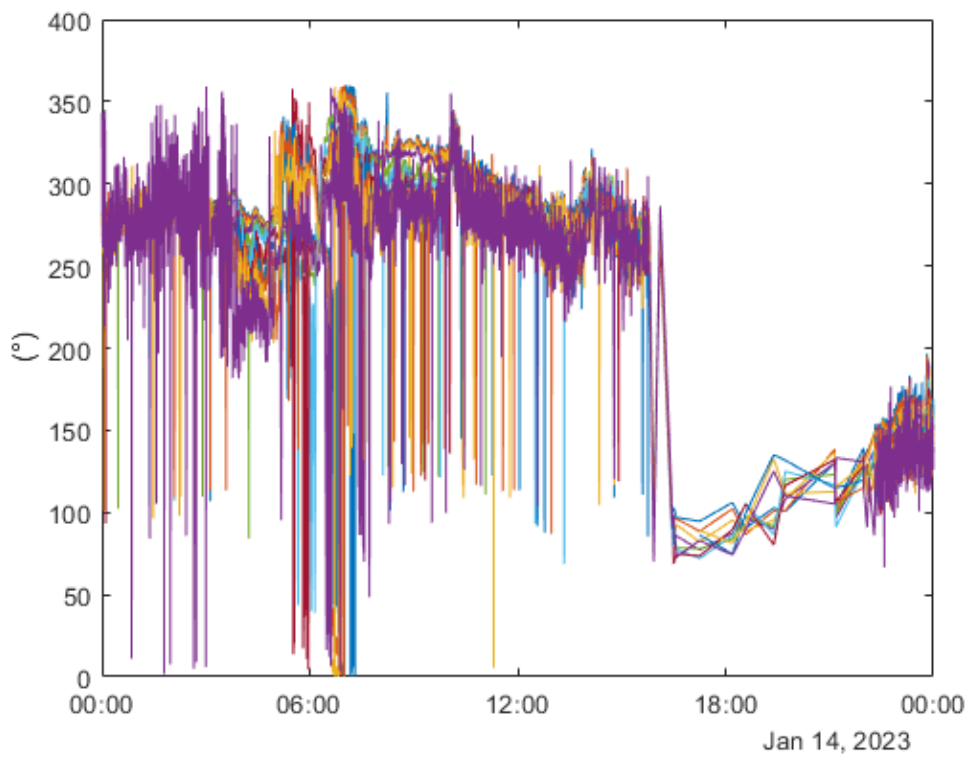
Figur 2 Målte vindretning den 17.02.2023

I Figur (2) (seklima 17. februar) er det tydelig at den høyeste gjennomsnittlige vindhastigheten forekommer klokken 15. Siden Lidar-måleren følger Central European Time, tilsvarer dette klokken 14. Ved å se på Figur (1) ser man at vindhastigheten øker rundt 14 CET. Når man sammenligner seklima sin graf Figur(), og Figur (15) viser det til at klokken 15 er det tidspunktet med høyest middelvindhastighet. Ved å analysere Figur (1) ser man også en økning i vindhastigheten klokken 15.

Denne sammenhengen indikerer en økning i vindforholdene øker dermed middelvindhastigheten. Figur (2) viser den tilsvarende vindretningen for de målte vindhastighetene. Vindretningen begynner rundt 153 grader klokken 09:00 og øker gradvis til 300 grader. Dette betyr at vinden starter fra sørøstlig retning og gradvis dreier mot nordvestlig retning.



Figur 3 Målte horisontale vind den 14.01.2023

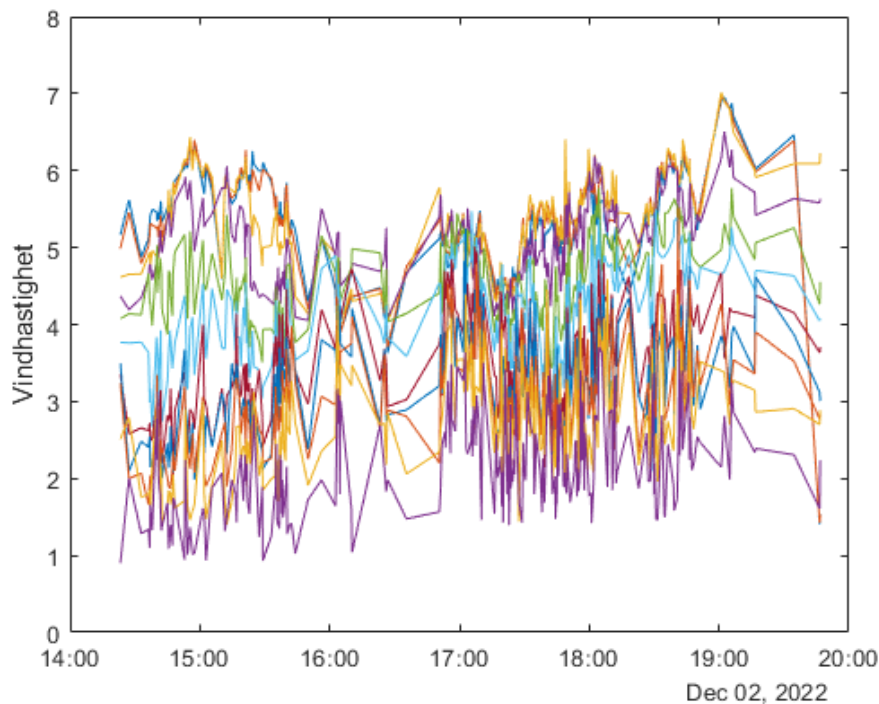


Figur 4 Målte horisontale vind den 14.01.2023

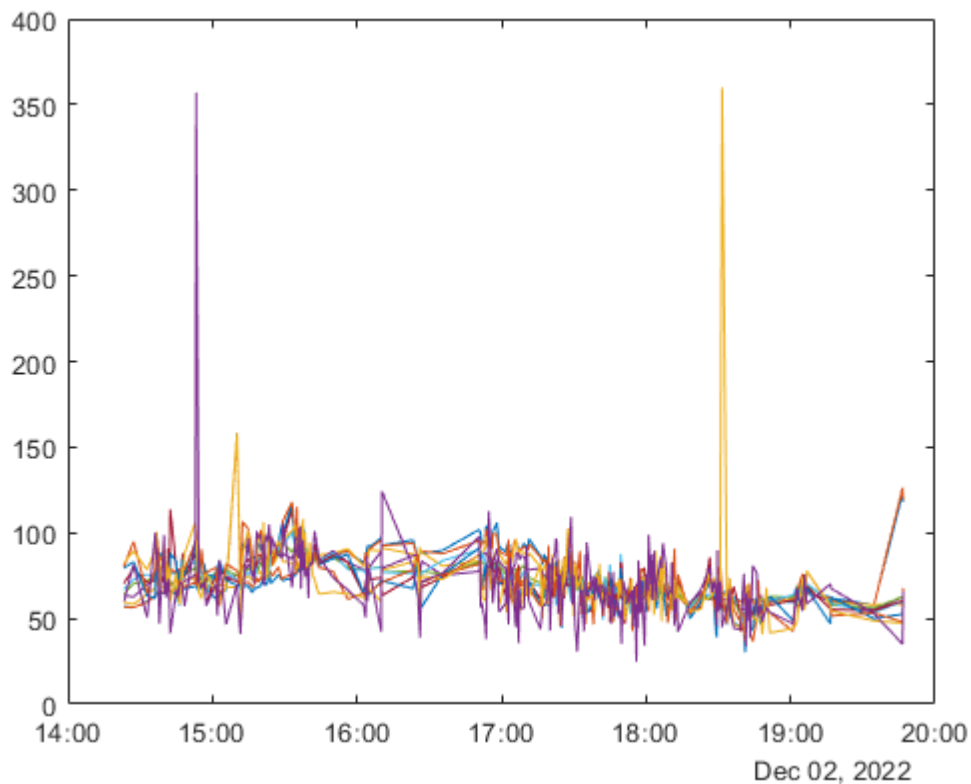
Figur (3) og Figur (4) presenterer måledata for den tilfeldig valgte dagen. Det er viktig å bemerke at det foreligger begrensede data fra klokken 16:00 til 22:00 på denne dagen, noe som resulterer i et betydelig tomrom i grafen i dette tidsintervallet. På samme måte viser Figur (5) og Figur (6) en begrensning i datatilgjengeligheten mellom klokken 14:00 og 20:00, noe som medfører at vi ikke kan danne en helhetlig graf for denne spesifikke dagen.

På den 14. januar er det tydelig at de målte vindverdiene i alle høyder holdt seg under 10 m/s fram til klokken 06, da de begynte å øke. Samtidig kan vi observere at vindretningen var svært ujevn og forstyrret i den perioden hvor vindhastigheten begynte å øke. Den viktigste endringen som ble merkbar, var en skiftende retning mellom 0 og 360 grader i den perioden vindhastigheten økte. Dette indikerer at vinden hovedsakelig kom fra nordlig retning i denne perioden, og den vekslet mellom forskjellige nordlige retninger.

Den 2. desember ble det observert betydelig lavere vindhastigheter sammenlignet med de to andre dagene. Vindretningsdata for denne dagen indikerer hovedsakelig vindretning mellom 50 og 100 grader. Imidlertid kan vi også se at det var noen perioder hvor vinden dreide seg mot 350 grader. Dette antyder at vinden hovedsakelig kom fra nordøstlig retning, men av og til varierte den mot nordlig retning i løpet av dagen.

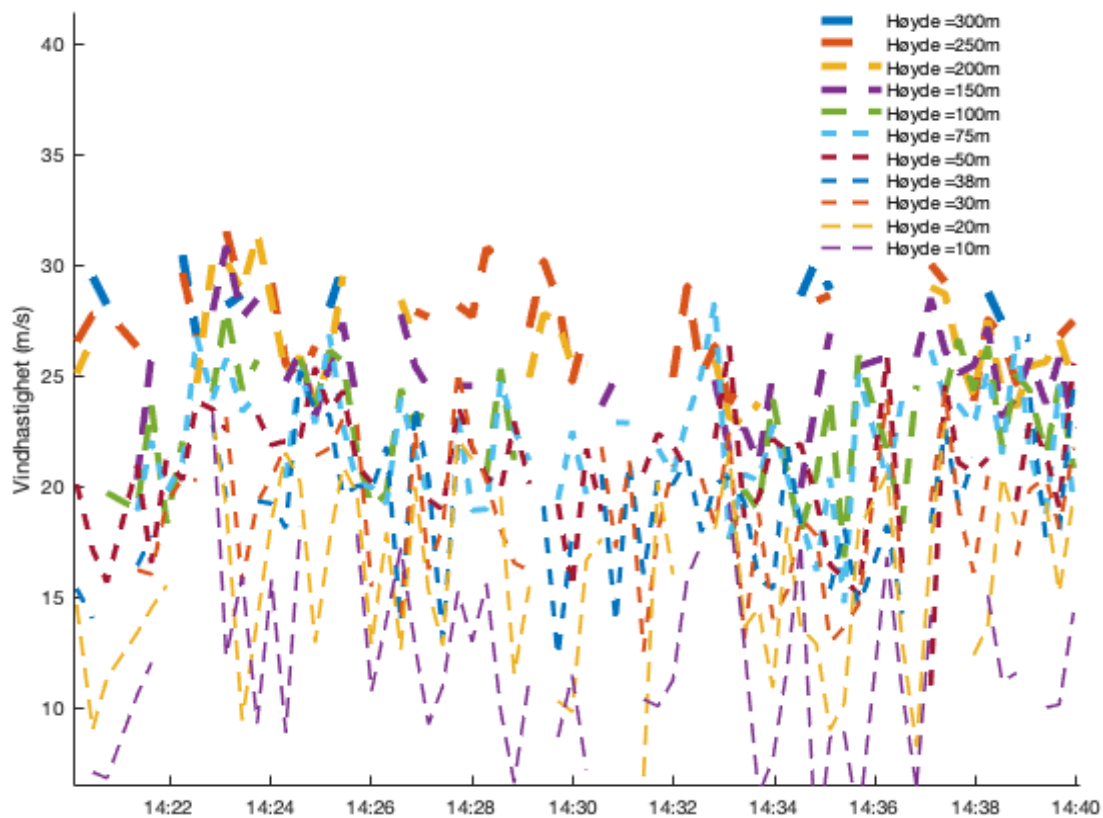


Figur 5 Målte horisontale vind den 02.12.2022



*Figur 6 Målte vindretning den 02.12.2022*

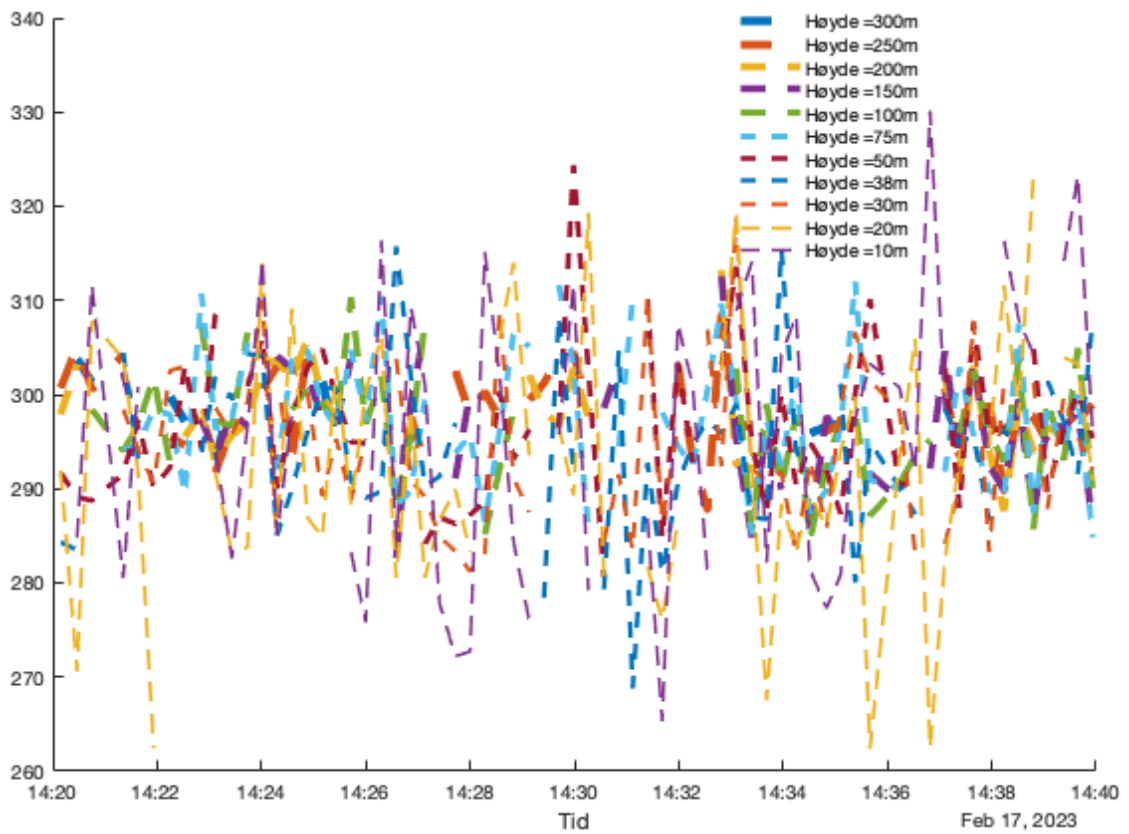
For å oppnå en dypere forståelse av hvordan vindforholdene utvikler seg i et 20-minutters tidsintervall, har vi valgt å fokusere på tidsintervallet 14:20-14:40 CET den 14 januar og 17 februar, og 17:44-17:54 CET den 2 desember. Det resulterer med en grundig undersøkelse av grafen i dette tidsrommet. Dette vil gi innsikt i de kortsiktige endringene i vindforholdene og bidra til en mer detaljert analyse av værforholdene for den aktuelle dagen.



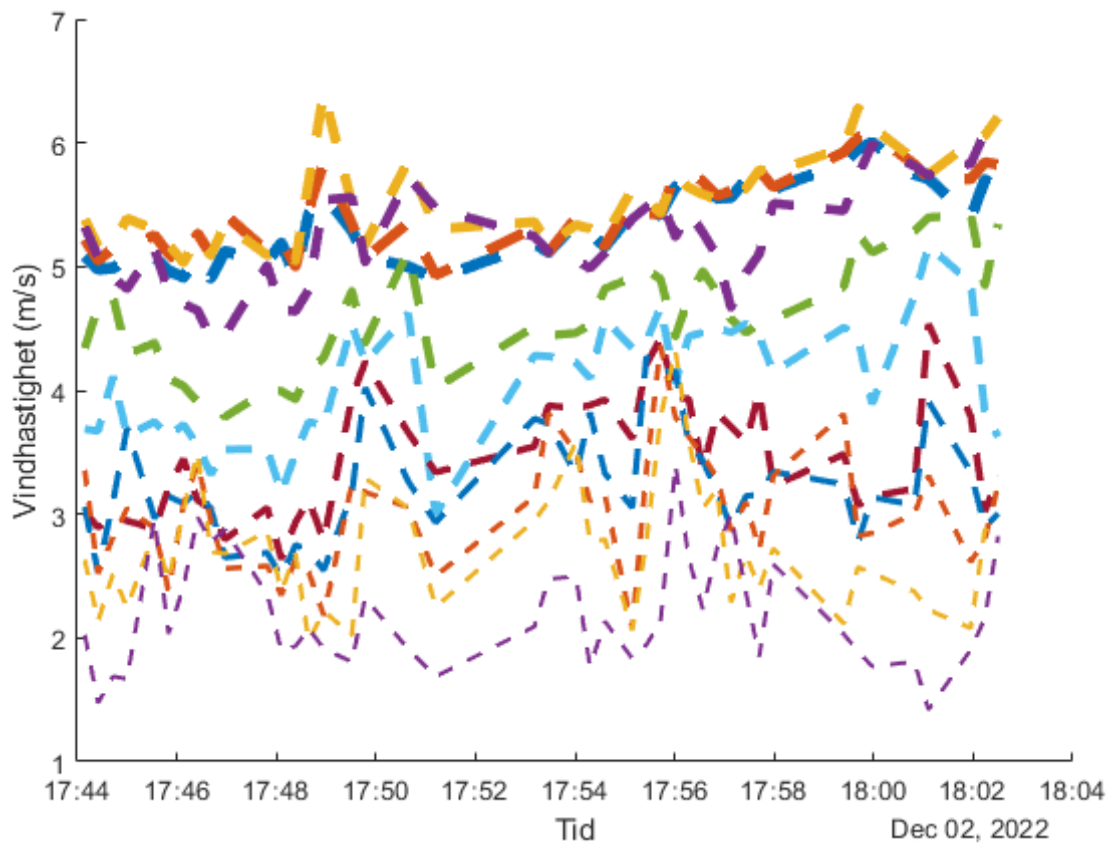
Figur 7 Målte vindhastighet 20 min intervall den 17.01.2023

Figurene gir en oversikt over målte verdier i løpet av et 20-minutters intervall. Den første grafen fokuserer på vindhastigheten, mens den andre grafen presenterer vindretningen. Disse grafene gir data for alle 11 ulike høyder, og gjør det mulig å analysere hvordan vindforholdene varierer i vertikal retning. Gjennom disse grafene kan man få innsikt i hvordan vindhastighet og vindretning endrer seg i ulike høyder over bakkenivå eller havoverflaten.

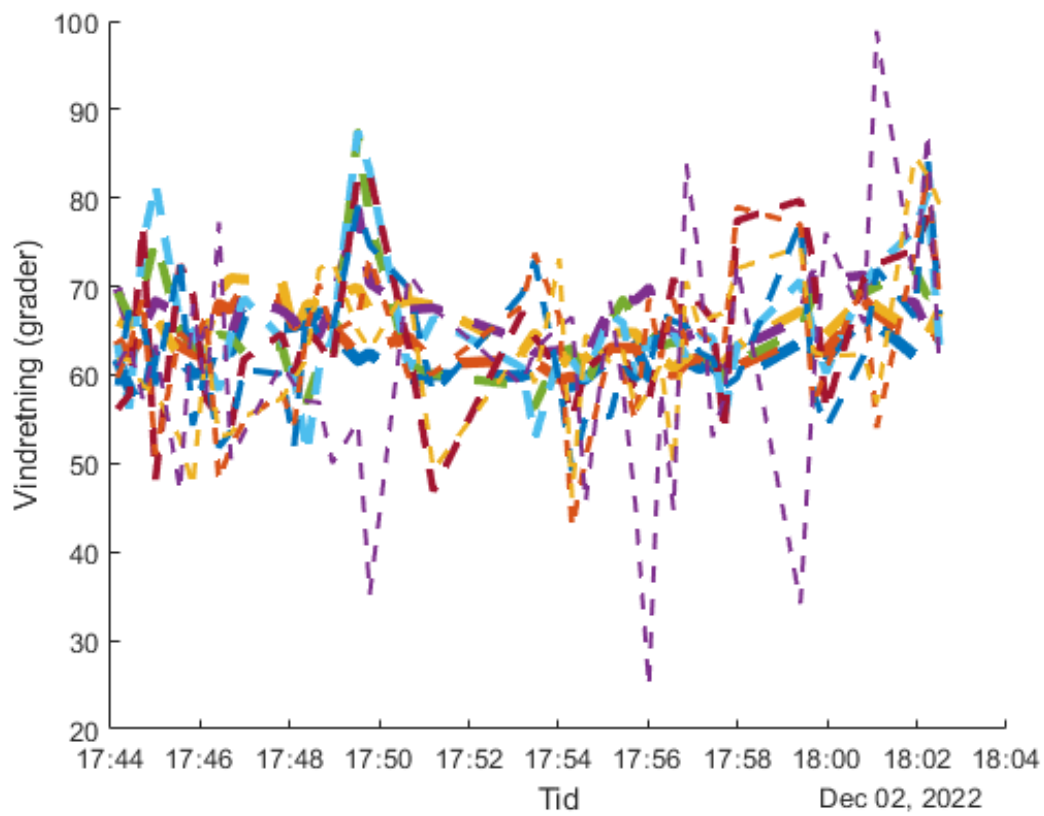




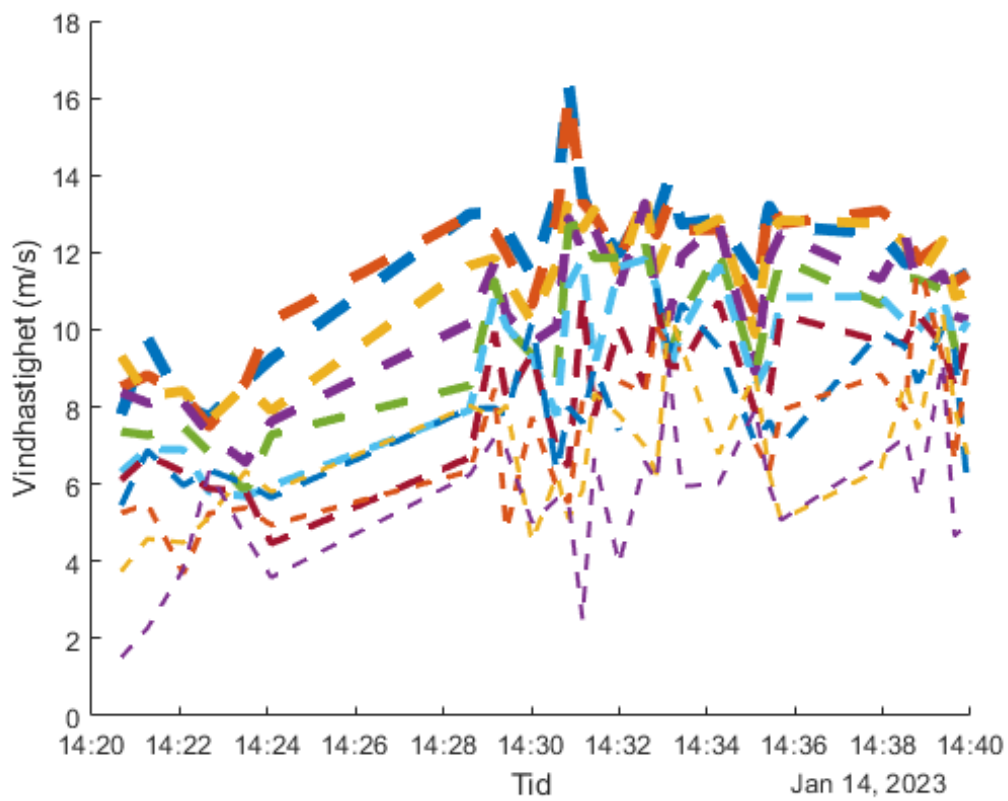
Figur 8 Målte vindretninger 20 min intervall den 17.01.2023



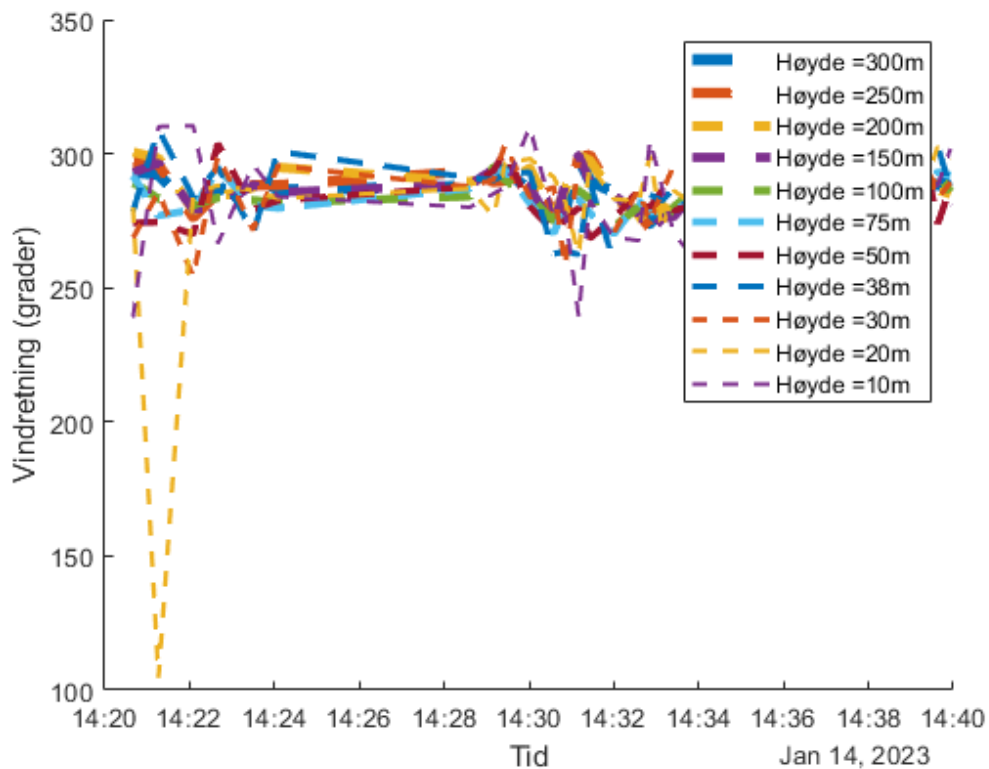
Figur 9 Målte vindhastighet 20 min intervall den 02.12.2022



Figur 10

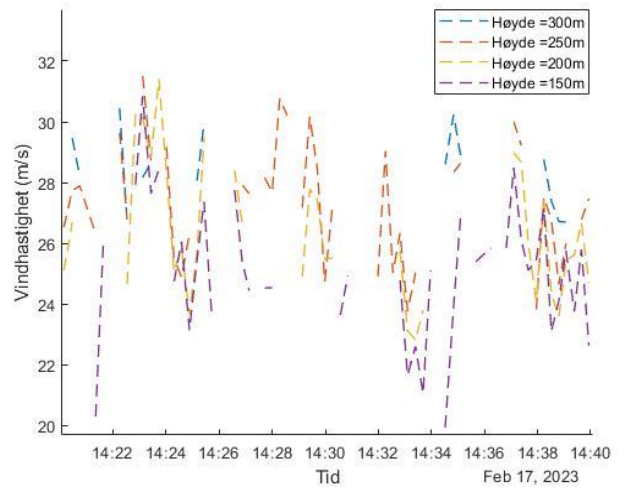
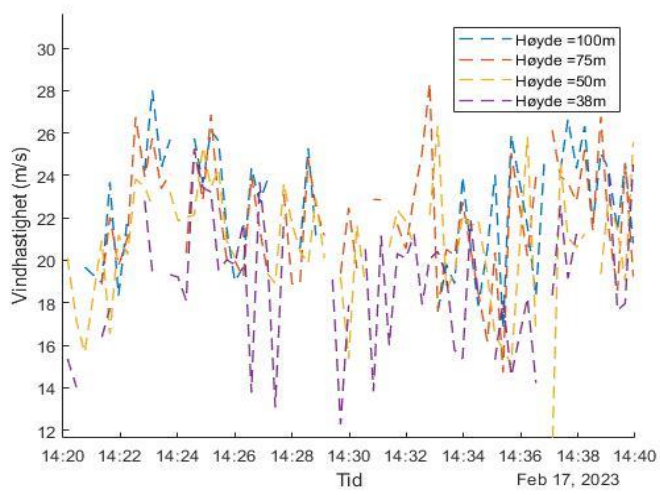
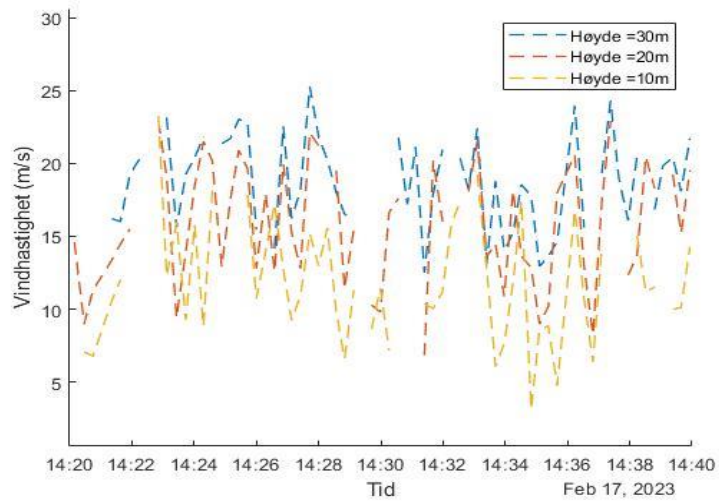


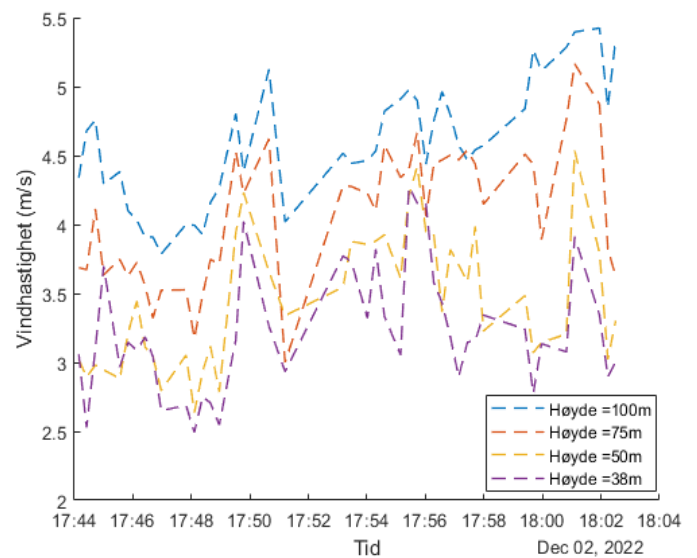
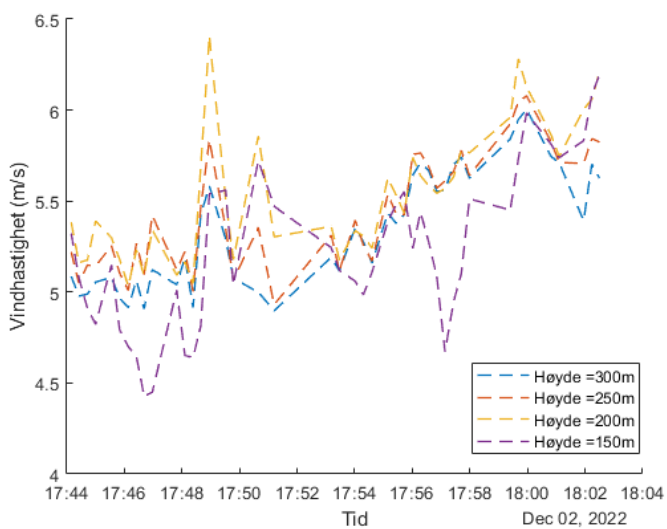
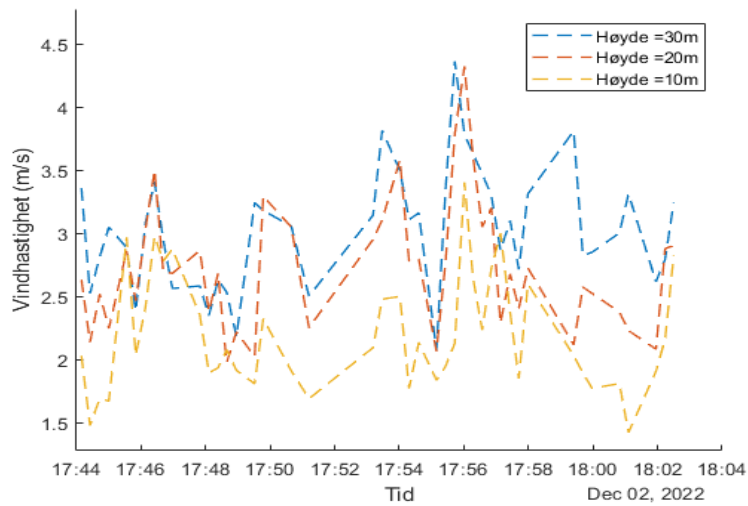
Figur 11: Målte vindhastighet 20 min intervall den 14.01.2023



Figur 12 Målte vindretning 20 min intervall den 14.01.2023

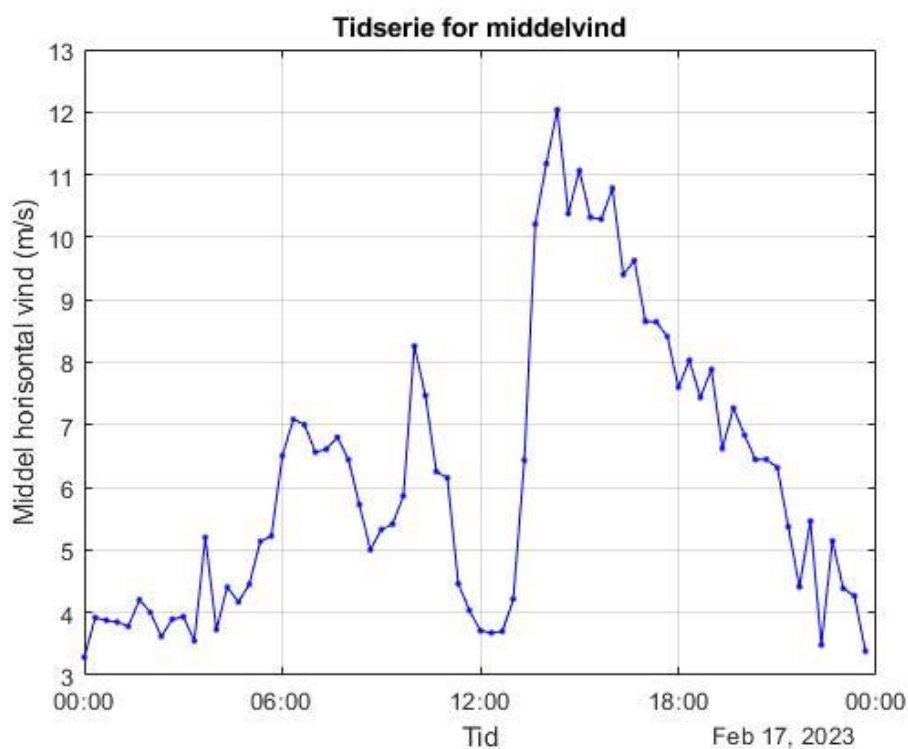
Figur (13) og (14) gir oss en innsikt i vindhastigheten målt ved ulike høyder, og de er presentert i filtrert grafer for å gi en mer detaljert forståelse av disse dataene. Disse grafene gir oss muligheten til å analysere hvordan vindhastigheten endres i forhold til høyden og hvordan den utvikler seg over tid. Ved å studere begge grafene ser vi en klar trend: jo høyere opp i atmosfæren vi måler vindhastigheten, jo høyere er den i gjennomsnitt. Dette antyder en økning i vindhastigheten med økende høyde.





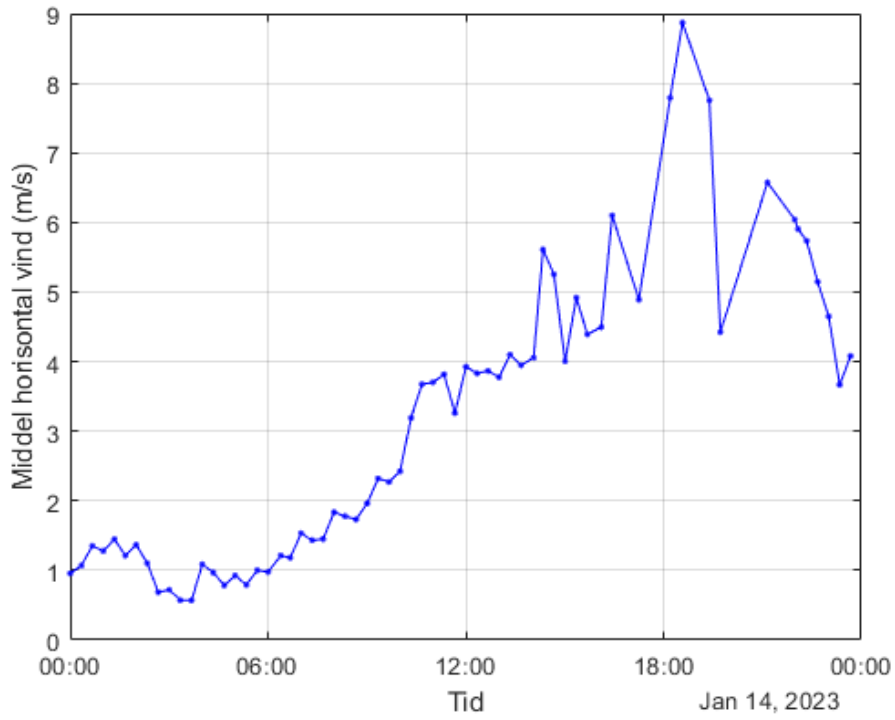
I den videre undersøkelsen av middelvindhastigheten i løpet av de tre dagene, er grafene som viser time middelvindhastighet for hver av disse dagene i 10 meters høyde. I Figur (15) blir det tydelig at den 17. februar opplever betydelig variasjon i middelvindhastigheten.

Tidlig på morgenen ser vi at vindhastigheten er relativt lav, men den begynner å øke gradvis rundt klokken 05. Deretter ser vi en bemerkelsesverdig dip i vindhastigheten, som inntreffer rundt klokken 10. Etter denne nedgangen stiger middelvindhastigheten drastisk igjen kl 14. Den høyeste middelvindhastigheten som blir observert på denne dagen, er 12 meter per sekund.

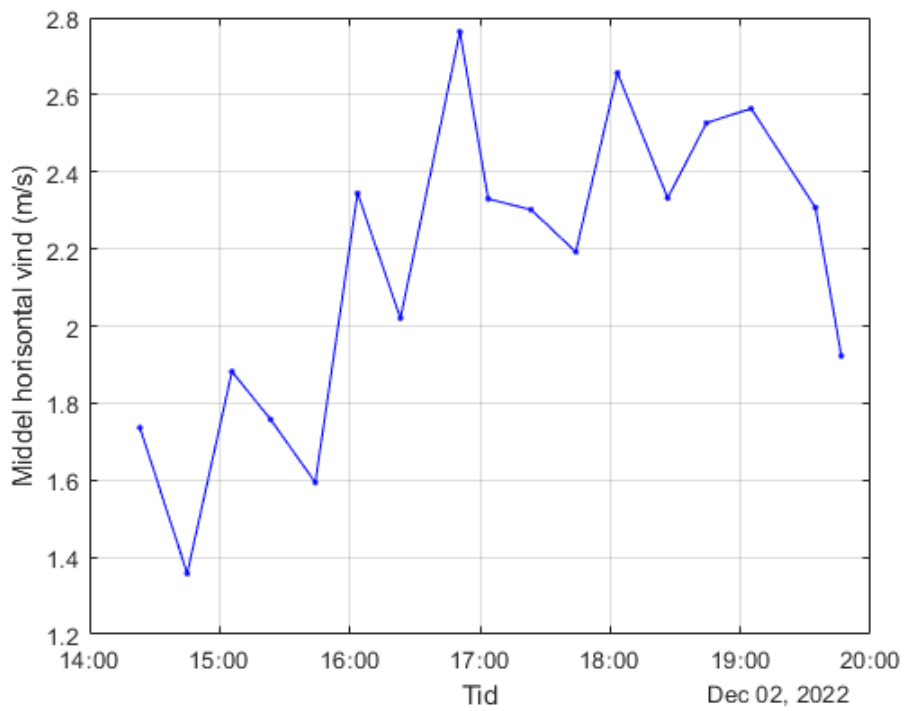


Figur 15 En time middelvindhastighet

Mens den 14. januar opplever en topp i middelvindhastigheten på hele 8.9 meter per sekund, viser dataene at den høyeste middelvindhastigheten den 2. desember var langt lavere, 2.78 meter per sekund. Disse tallene indikerer betydelige forskjeller i vindstyrken mellom de to dagene. På den 14. januar ser vi også at det er drastiske variasjoner i middelvindhastigheten i løpet av dagen. Den når sitt høydepunkt på 8.9 meter per sekund, men også faller til lavere verdier i løpet av dagen. I kontrast til dette har den 2. desember en mer stabil vindhastighet som ligger i området mellom 1.3 og 2.8 meter per sekund gjennom dagen. Dette indikerer en jevnere og mindre variabelt vindforhold på denne datoen sammenlignet med den 14. januar.



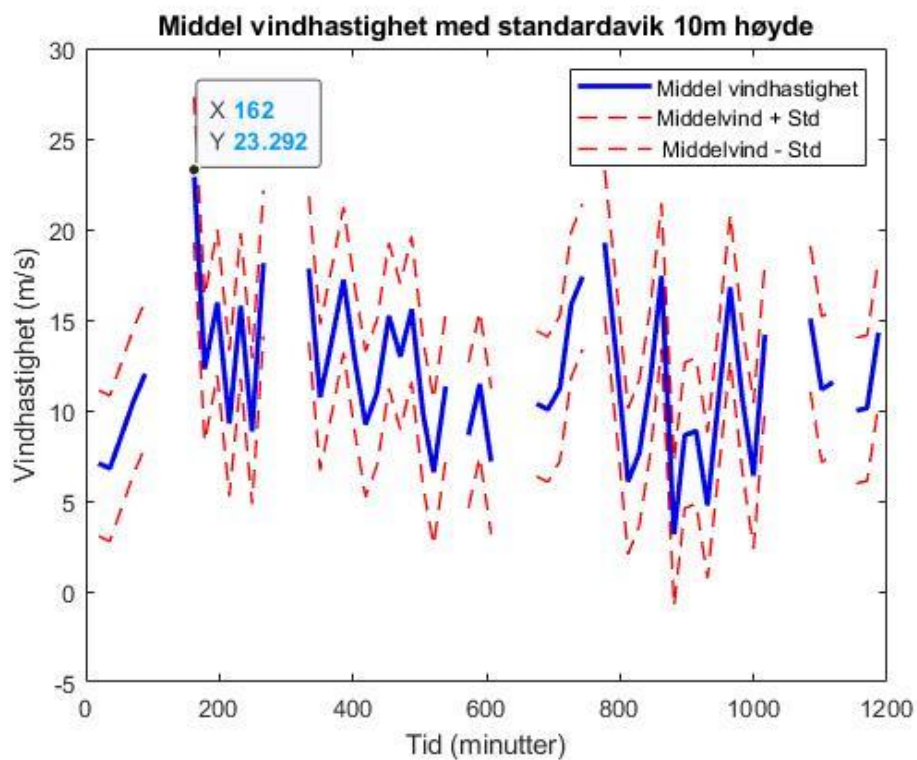
Figur 16 En time middelvindhastighet



Figur 17 En time middelvindhastighet

Figurene under viser middelvindhastigheten i et 20-timers intervall i 10 meters høyde, spesifikt Figur (18) som dekker perioden fra 17. februar kl. 12:00 til 18. februar kl. 08:00, avslører en bemerkelsesverdig høyere middelvindhastighet. Denne middelvindhastigheten er beregnet til å være 23.292 meter per sekund i denne tidsperioden.

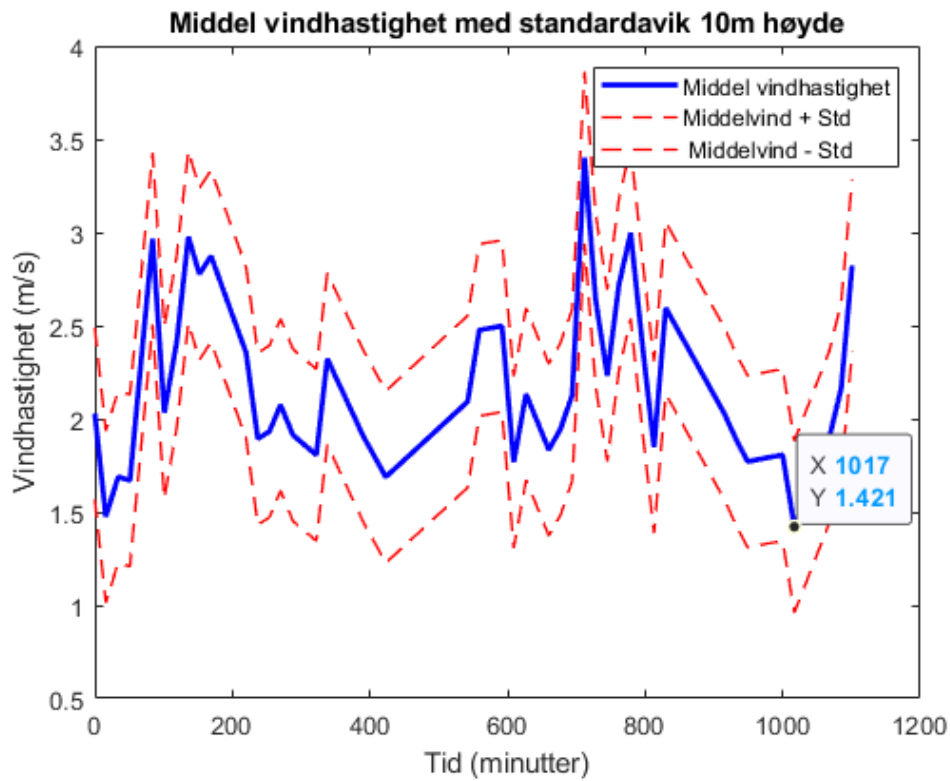
Det er også interessant å merke seg at middelvindhastigheten i denne perioden varierer betydelig mer enn det som ble observert i Figur (15). Dette indikerer en mer urolig eller dynamisk vær-situasjon i dette tidsrommet, med større endringer i vindhastigheten over tid.



Figur 18: 20 timers middelvindhastighet 17.02.2023

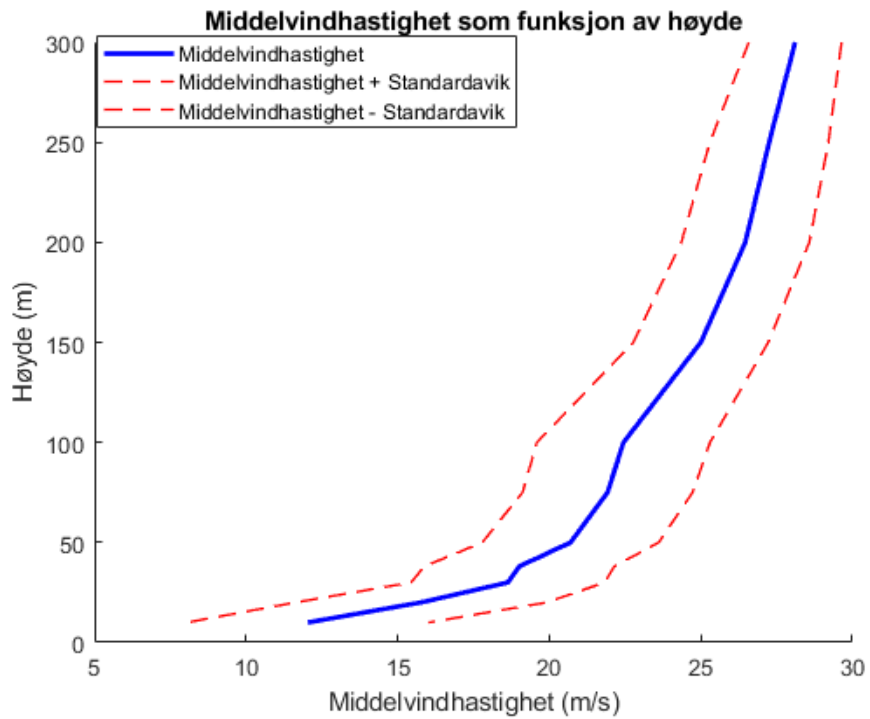


Figur (19) presenterer et 20-timers tidsintervall, men den mangler noen datapunkter som kanskje ikke var tilgjengelige eller ble utelatt av ulike årsaker. Det som er interessant med denne grafen, er at den viser likheter med Figur (16). I begge tilfellene har vi laveste og høyeste middelvindhastigheter som er relativt lave, med en verdi på 1.4 meter per sekund. Dette kan indikere at i det angitte tidsintervallet i Figur (19) var det relativt rolige vindforhold med stabil og moderat vindhastighet.

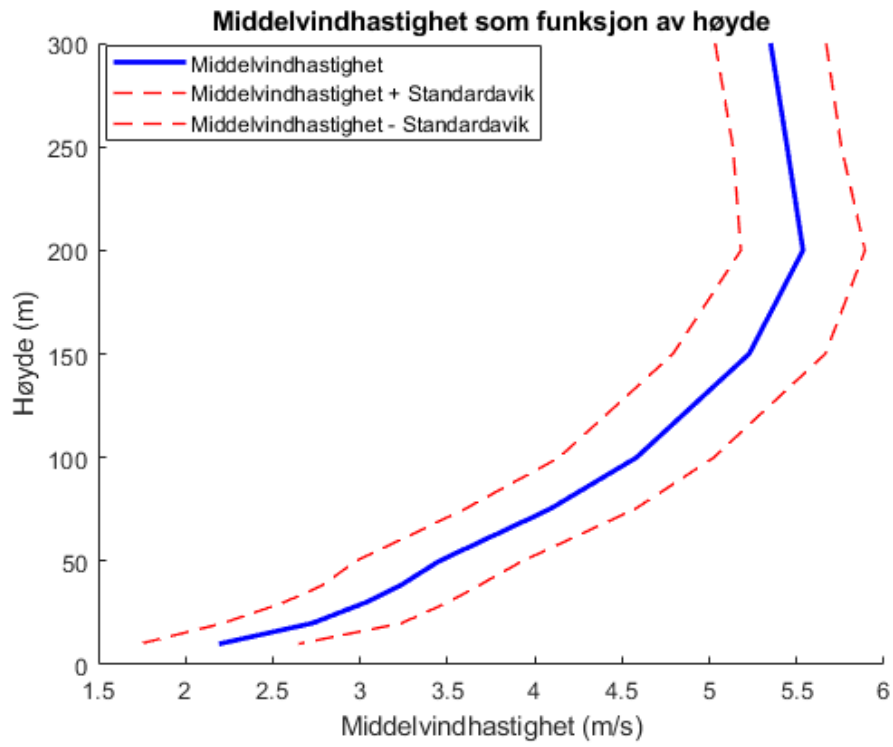


Figur 19 20 timers middelvindhastighet 02.12.2022

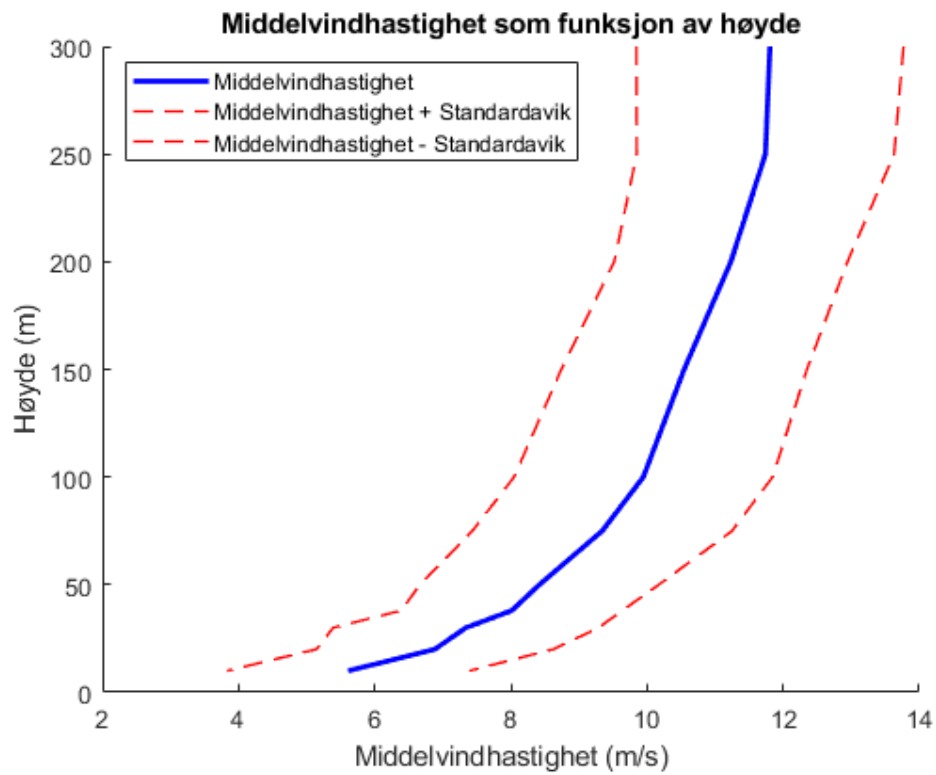
Grafene som viser middelvindhastighet som funksjon av høyde gir en tydelig indikasjon på hvordan vindhastigheten utvikler seg med økende høyde. En felles observasjon i alle de tre grafene er at vindhastigheten øker i henhold til en kvadratisk funksjon.



Figur 20:



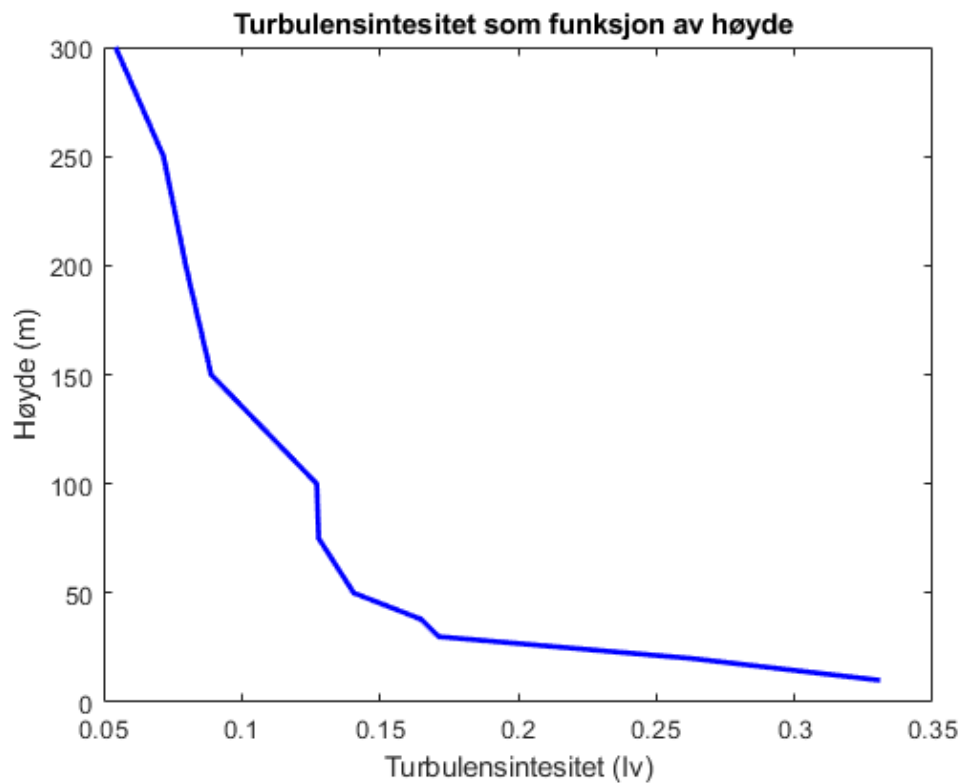
Figur 21 Middelvindhastighet som funksjonen høyde den 02.12.2022



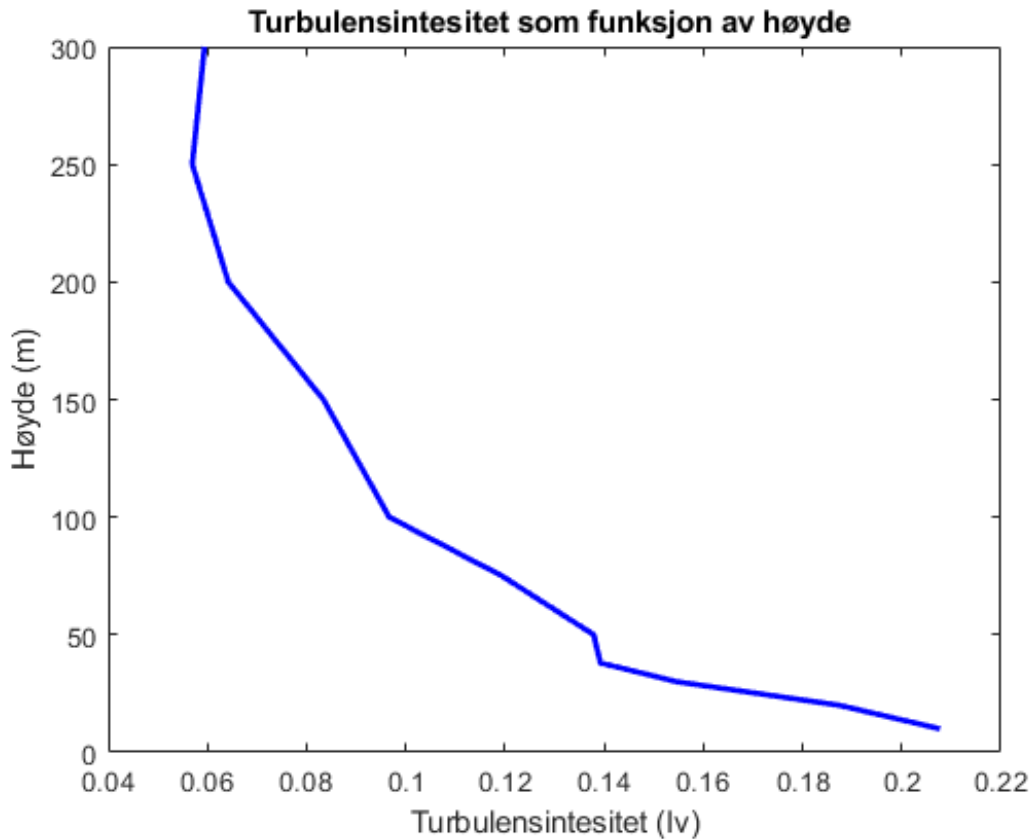
Figur 22:

Turbulensintensitet som funksjon av høyde i et 20 minutters intervall gir en innsikt i hvordan turbulensen i atmosfæren varierer i forhold til høyden over bakken. Denne informasjonen hjelper oss med å forstå hvor ujevne og uforutsigbare luftstrømmene er sammenlignet med gjennomsnittshastigheten på Ivar Langenes Hus.

I Figur (23) fra 17. februar 2023, ble en turbulensintensitet på 0.338 observert. Dette indikerer at gjennomsnittlige variasjoner i vindhastigheten i luftstrømmen ved dette stedet og i denne høyden utgjorde 33,8% av gjennomsnittshastigheten. Med andre ord var det en moderat grad av turbulens på den datoen.

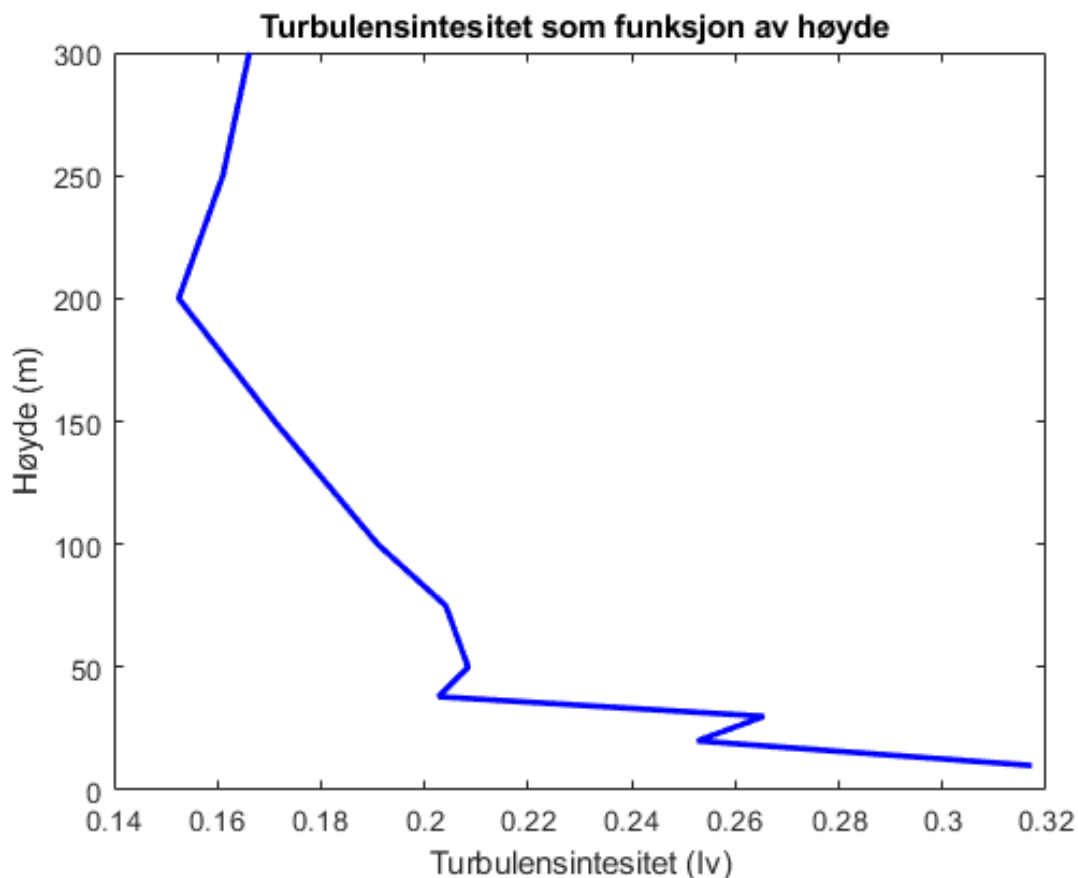


Figur 23 Turbulensintensitet som funksjon av høyde den 17.02.2023



Figur 24 Turbulensintensitet som funksjon av høyde den 02.12.2022

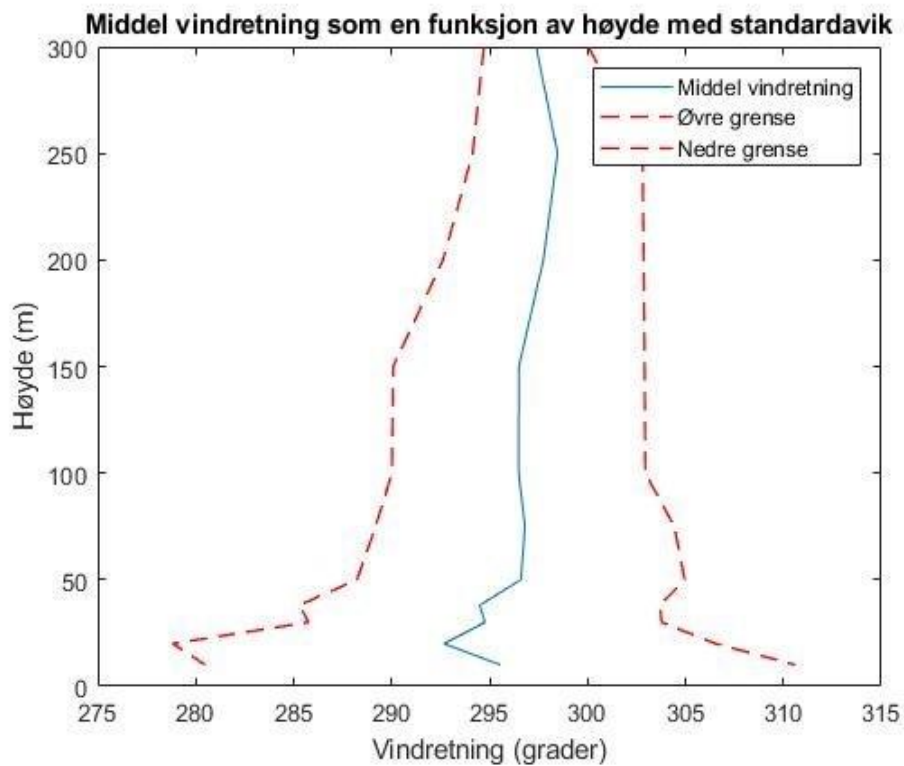
I Figur (24) fra 2. desember 2022, ble en lavere turbulensintensitet på 0.213 registrert. Dette betyr at de gjennomsnittlige svingningene i vindhastigheten i luftstrømmen. Dette tyder på at luftstrømmen er relativt stabil, med små svingninger eller turbulente forhold. Dette indikerer relativt rolige forhold på den datoen. Videre viser Figur (25) fra 14. januar 2023 en turbulensintensitet på 0.31 noe som indikerer moderat turbulens for den spesifikke dagen.



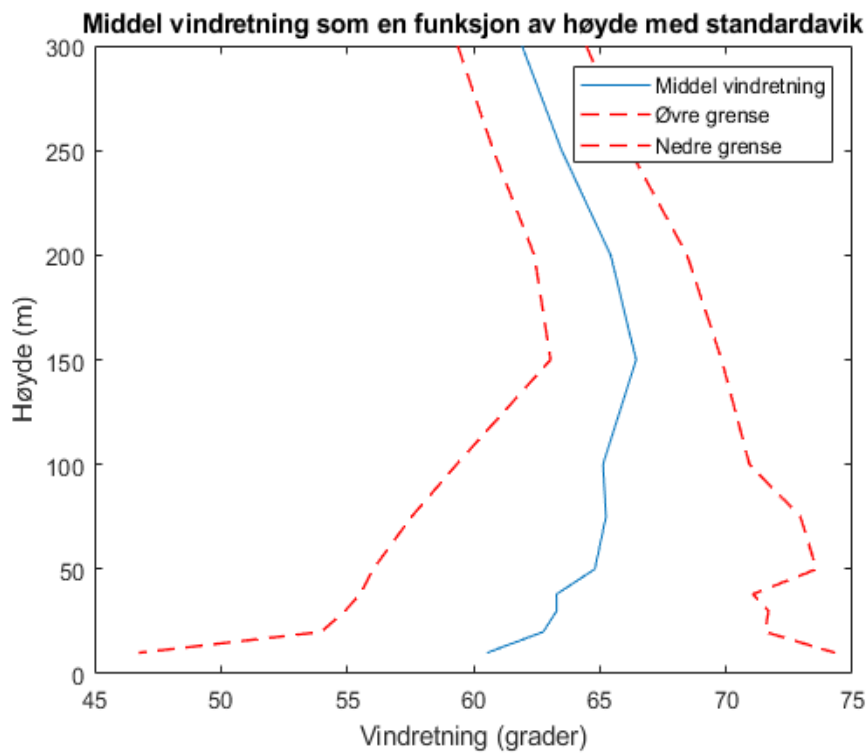
Figur 25 Turbulensintensitet som funksjon av høyde den 14.01.2023

Videre undersøker vi middelvindretningen som en funksjon av høyde. Dette aspektet av dataene gir oss innsikt i hvordan vindretningen endrer seg i forhold til høyden over bakkenivå. I alle de tre figurene (26), (27) og (28) er det tydelig at når vi er nærmere bakkenivå, observerer vi variasjoner i vindretningen. Disse variasjonene kan i stor grad påvirkes av lokale topografiske forhold.

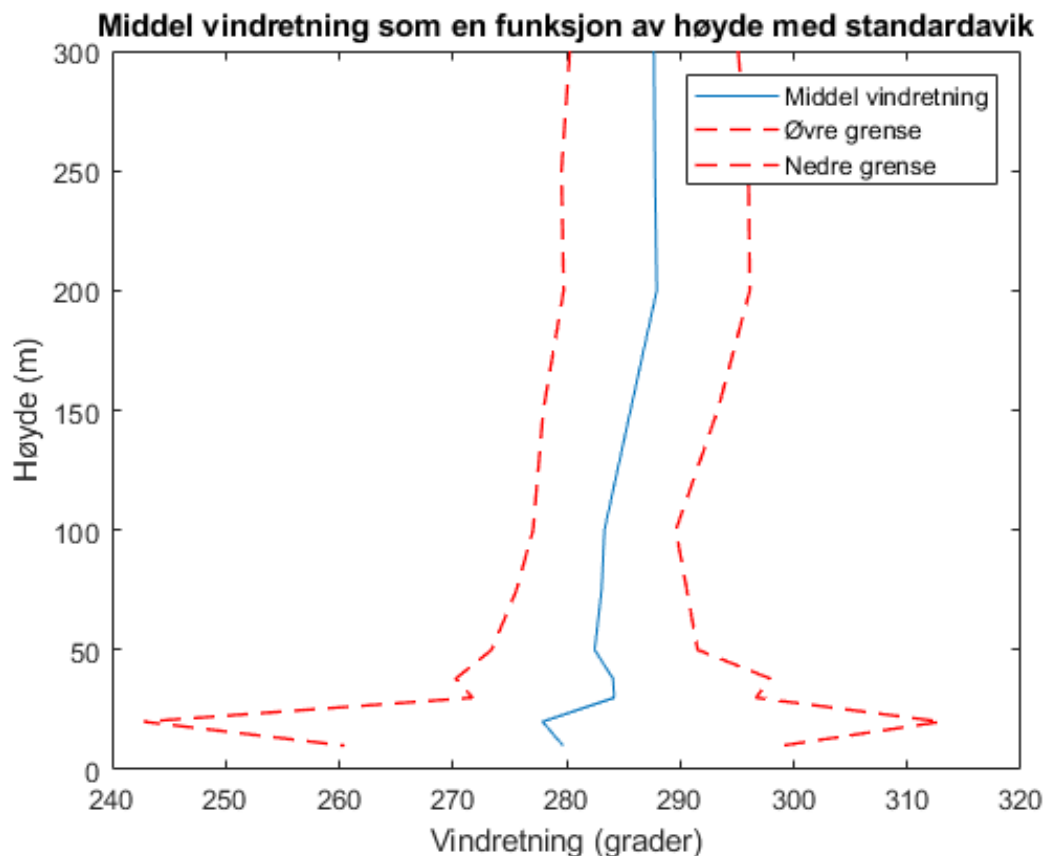
Men når vi går høyere opp i atmosfæren, begynner vi å se at vindretningen blir mer stabil og mindre utsatt for lokale forstyrrelser. Dette kan skyldes økt høyde over terreng som kan redusere påvirkningen fra lokale hindringer. I tillegg kan det også være knyttet til atmosfærens generelle stabilitet, der vindretningen kan bli mer påvirket av større skala atmosfæriske mønstre i høyere luftlag.



Figur 26 Middelvindretning som funksjon av høyde den 17.02.2023



Figur 27 Middelvindretning som funksjon av høyde den 14.01.2023

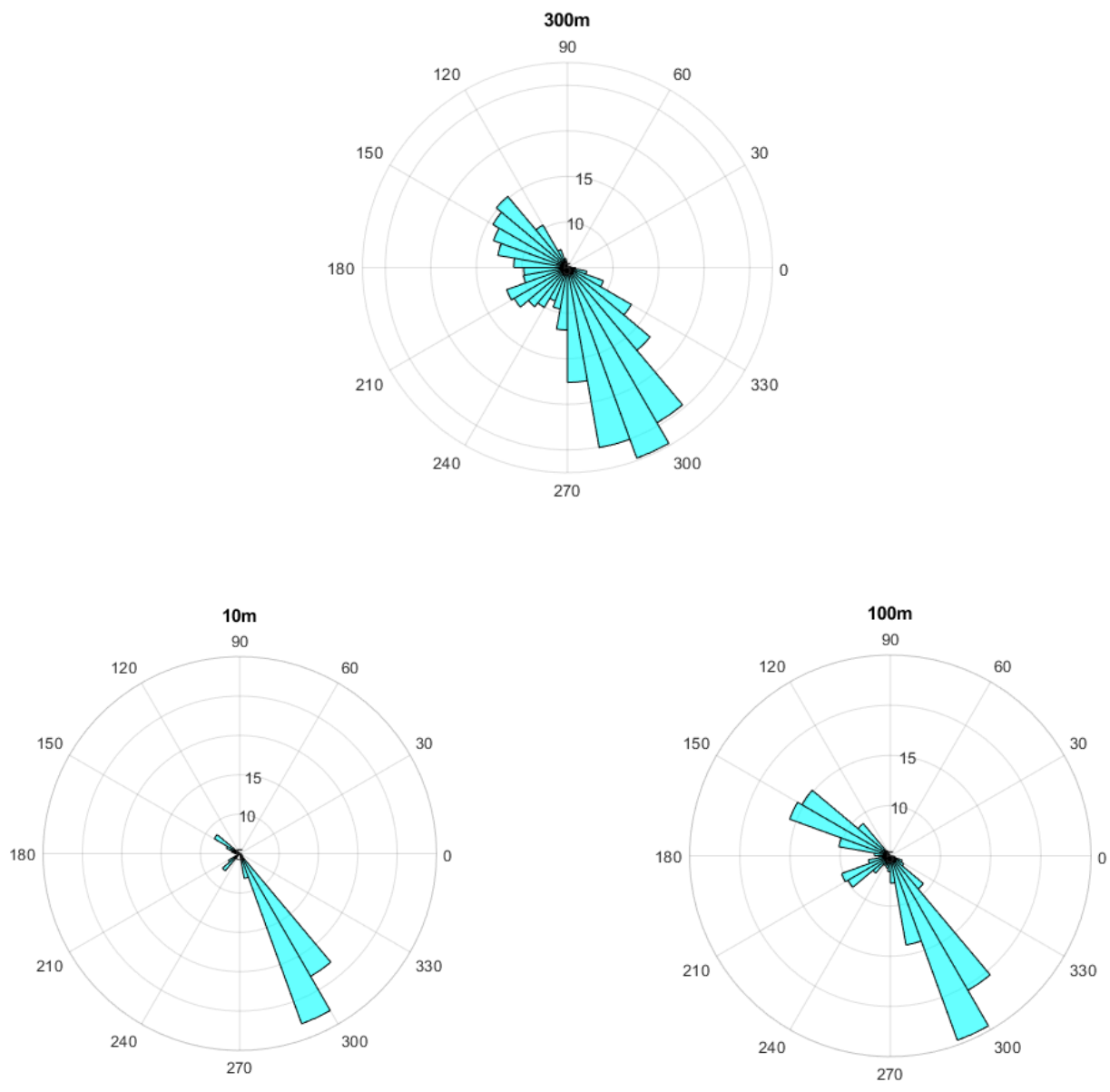


Figur 28 Middelvindretning som funksjon av høyde den 02.12.2022

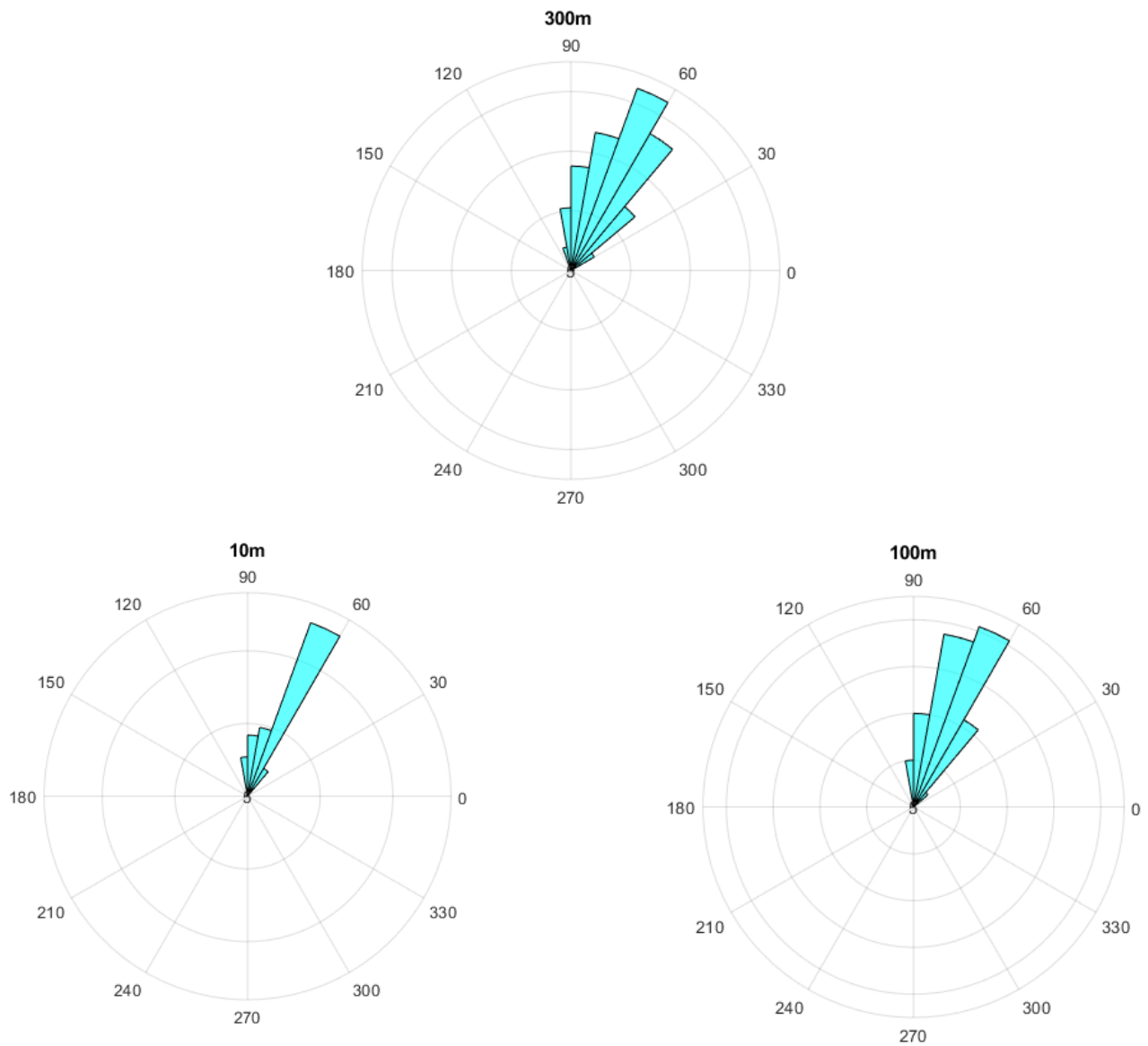
I tillegg til de tidligere nevnte grafene som viser middel vindhastighet og middelvindretning, har det blitt utført en analyse av vindrosene for tre ulike høyder: 300 meter, 100 meter og 10 meter, over de tre angitte dagene. Vindrosen illustrerer middelvindhastighet i løpet av 20-minutters intervaller, sammen med tilhørende middelvindretning for de spesifikke dagene.

Figur (29), viser den 17. februar ser det ut til at den fremtredende vindretningen i 300 meters høyde kommer fra nordvest. Denne retningen er ledsaget av høy middelvindhastighet. Samtidig viser analysen at vinden som blåser fra sørøst har en lavere gjennomsnittlig vindhastighet i dette tidsintervallet. Denne trenden ser ut til å gjenta seg ved både 100 meters og 10 meters høyde, hvor nordvestlig vindretning også dominerer med høyere gjennomsnittlig vindhastighet sammenlignet med vind fra sørøst.



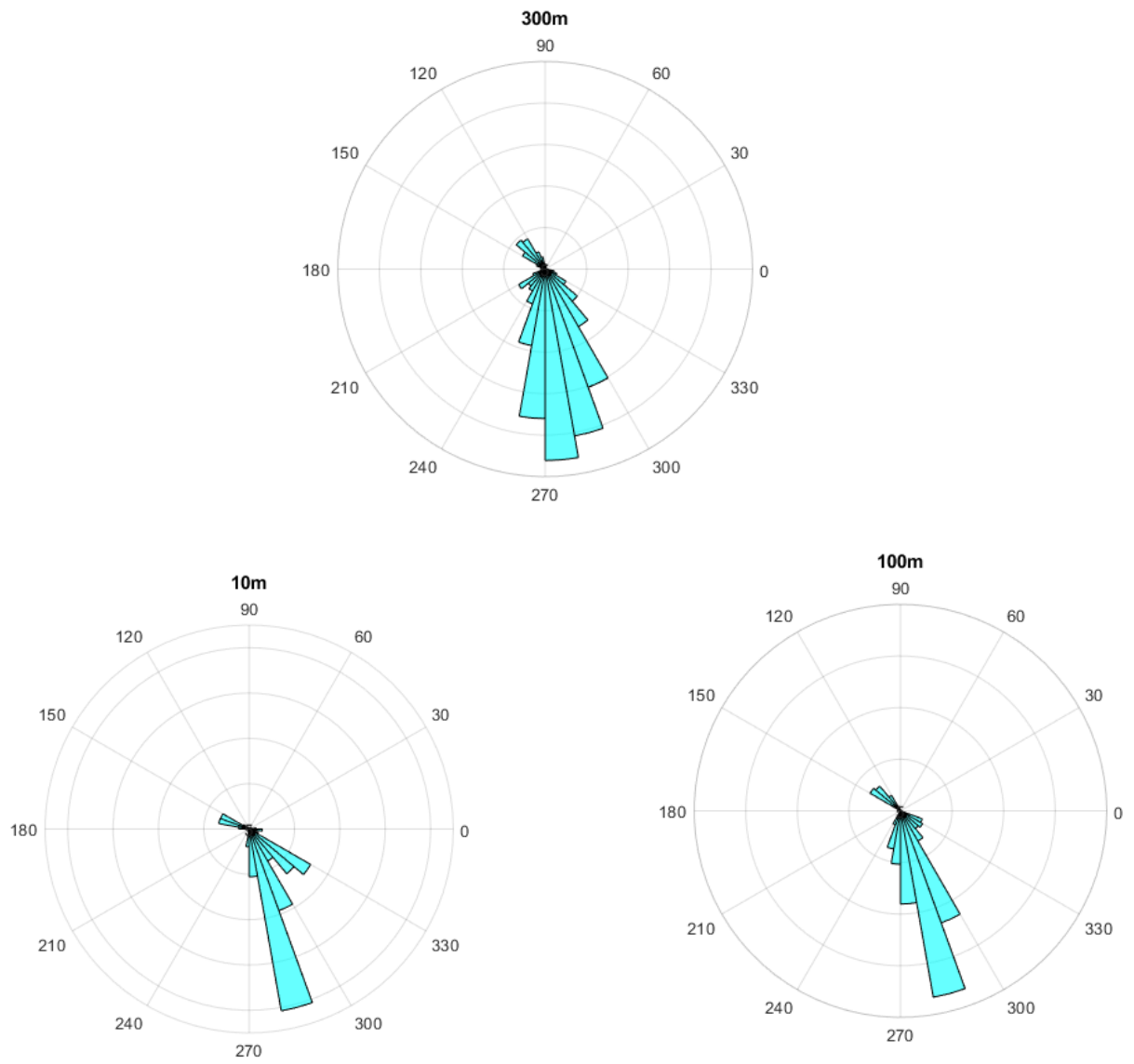


Figur 29 Vindrose for den 17.02.2023

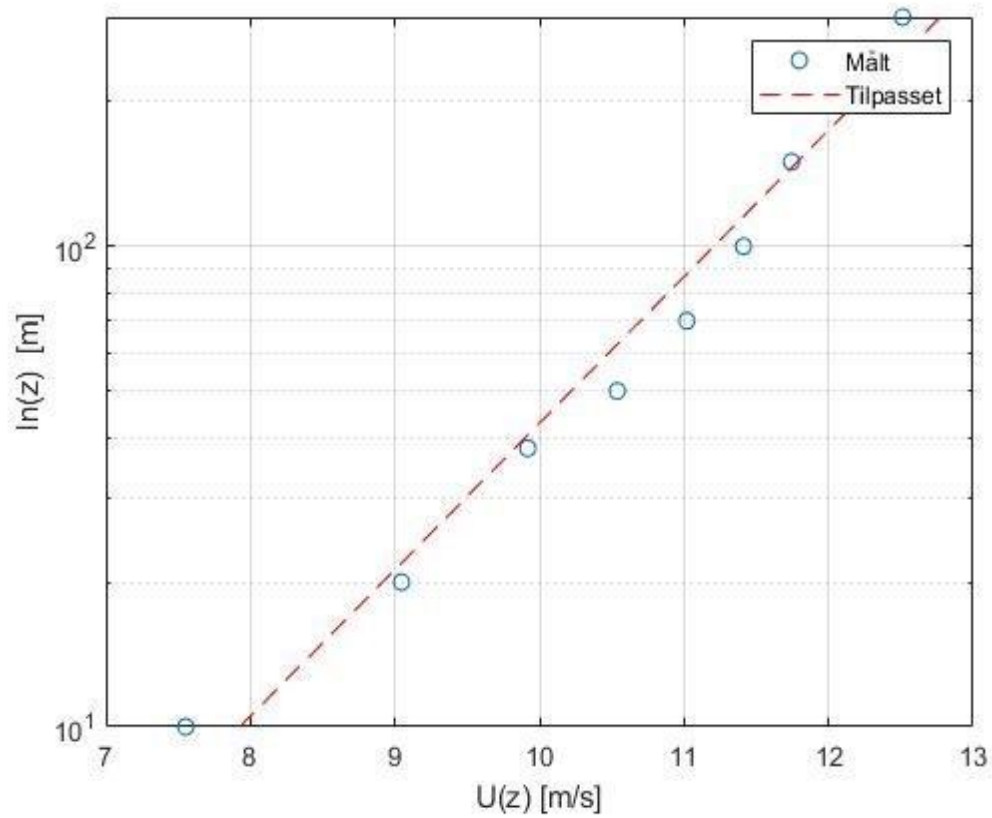


Figur 30 Vindrose for den 02.12.2022

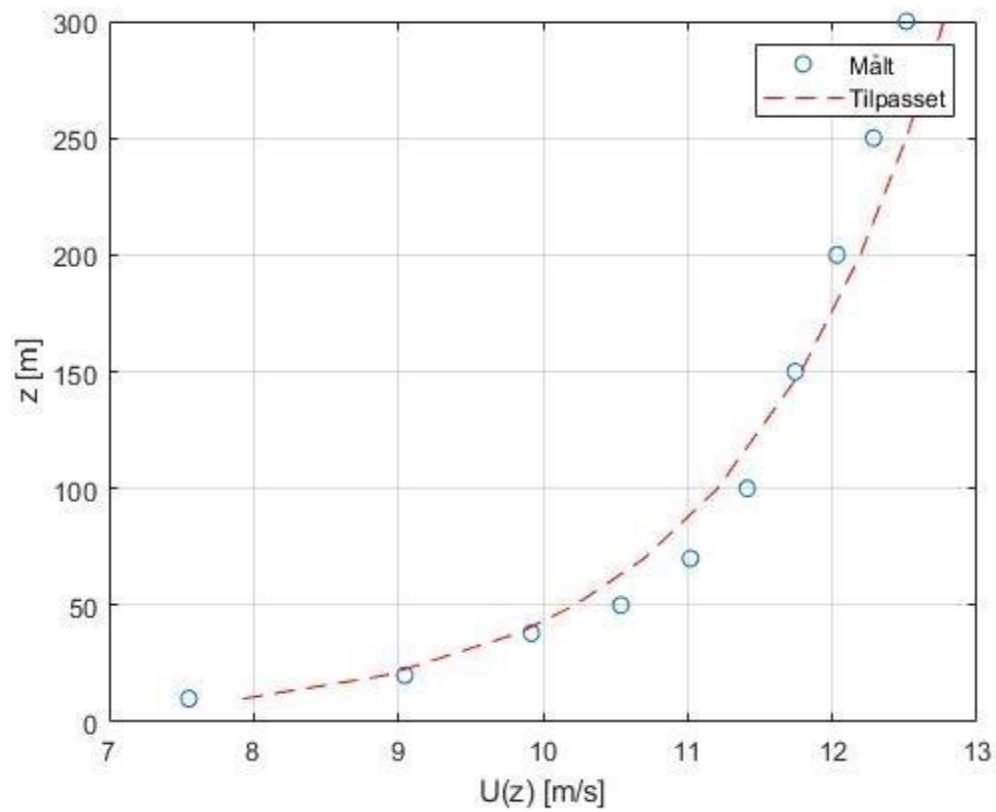
Den 2. desember 2022, se Figur(30) ser det ut til at den dominerende vindretningen er nordøst, ifølge vindrosen. Dette indikerer at vinden i løpet av denne dagen hovedsakelig kom fra nordøstlig retning i de målte høydene. I vindrosen for den 12. januar 2023, som er vist i Figur (31), kan vi observere at den fremherskende vindretningen i alle høyder kommer fra nordvest. I høyden 300 meter ser vi imidlertid en tendens til at denne vindretningen gradvis dreier seg mot sørvest, og dette er ledsaget av lavere gjennomsnittlig vindhastighet i denne retningen. Med andre ord, vinden fra nordvest synes å avta i styrke når den beveger seg oppover i høyden og skifter gradvis mot sørvest.



Figur 31 Vindrose den 14.01.2023



Figur 32 Tilpasset logaritmisk likning for den 17.02.2023



Figur 33 Tilpasset logaritmisk profil for den 14.02.2023

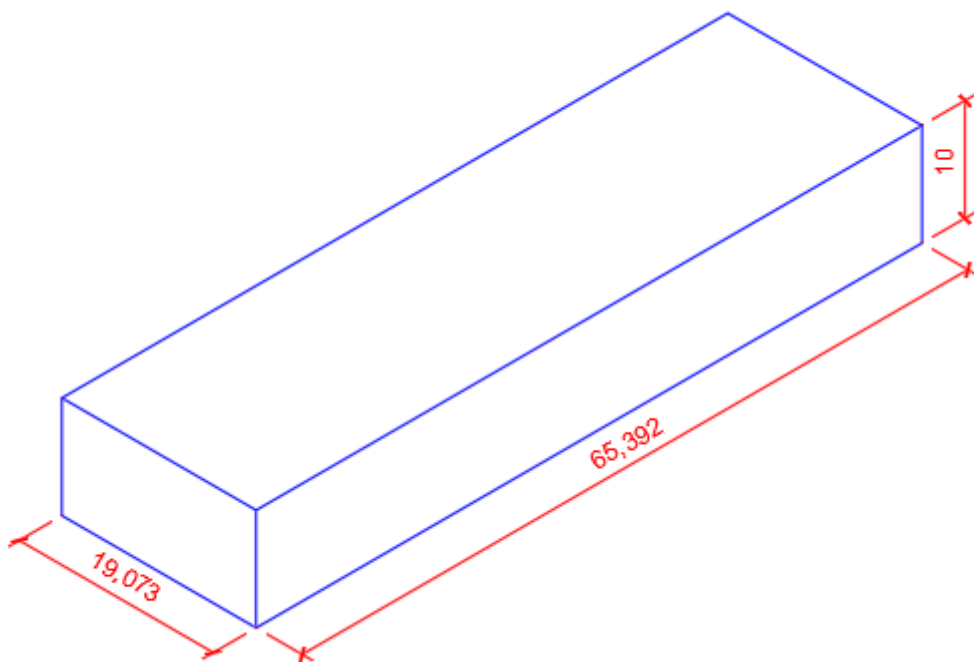
Vindprofilen under figur (6.33) er tilpasset i samsvar med NS (Norsk Standard). NS gir retningslinjer og standarder for å vurdere og tilpasse vindprofiler. Ved å følge NS sikres det at vindprofilen er korrekt tilpasset og representative for det aktuelle området. Ved å følge ligningen  $U_{z\_fitted} = 1/a * \log(z/z0\_fitted)$  som er utarbeidet fra Norsk Standard 11, dannes det en tilpasset logaritmisk profil.

## 6.2 Ivar Langens Hus – Vindlast beregninger



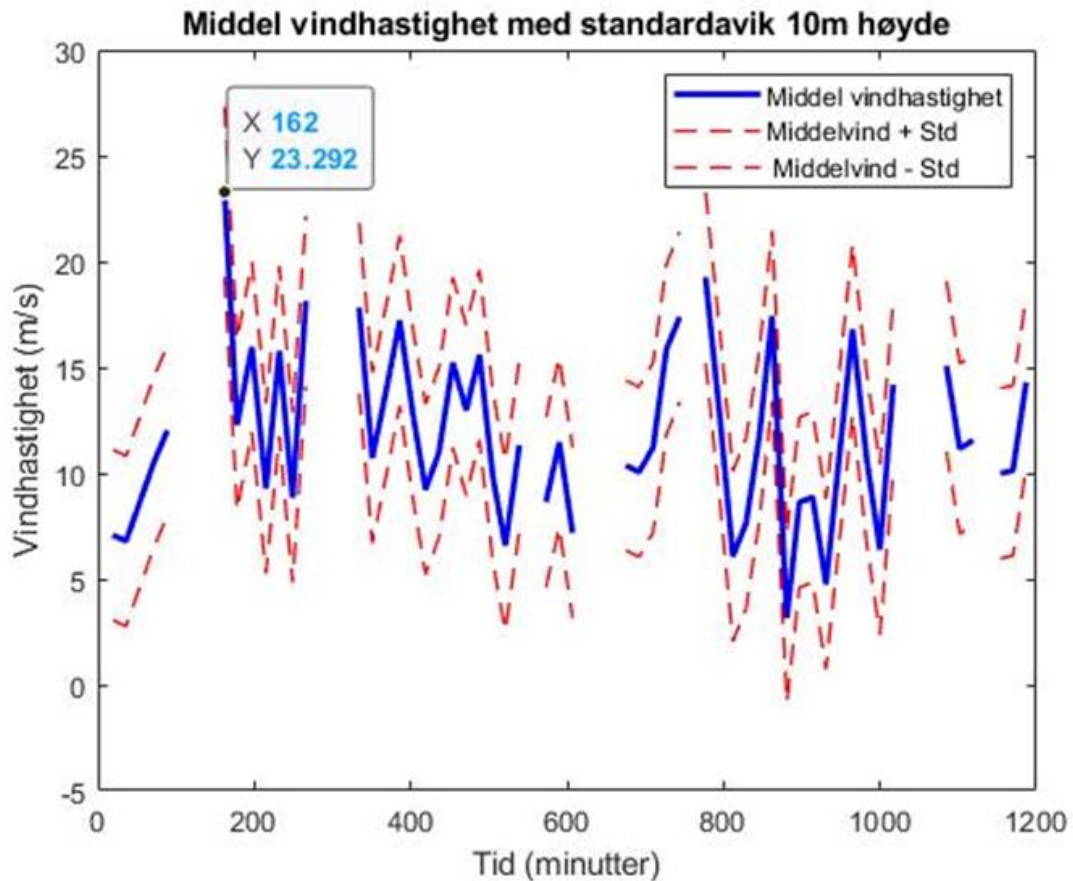
Figur 6.40: Forenklet modell av Ivar Langens hus i Revit

For å forenkle beregningene av Ivar Langens Hus (IL-bygget), blir dimensjonene som er tatt i bruk i Revit brukt som referanse. En høyde på 10 meter og lengde på 65.393 meter er spesifisert som dimensjoner for disse beregningene i Figur (6.41).



Figur 6.41: Forenklet dimensjonering av Ivar Langens hus

Dataene for stedsvindhastighet, som også kan kalles for middelvindhastighet, er allerede tilgjengelige. Da er det ikke nødvendig å gjennomføre beregninger for å finne andre relaterte verdier, som for eksempel basis vindhastighet og lignende. Figuren (6.42) viser konkrete tall for stedsvindhastigheten ved en høyde på 10 meter.



Figur 6.42: Middelvindhastighet over 20 timers intervall

Figur (6.42) viser den høyeste gjennomsnittlige vindhastigheten over en periode på 20 timer, referert til den 17. februar 2023.

$$V_m(10) = 23.292 \text{ m/s} \tag{6.1}$$

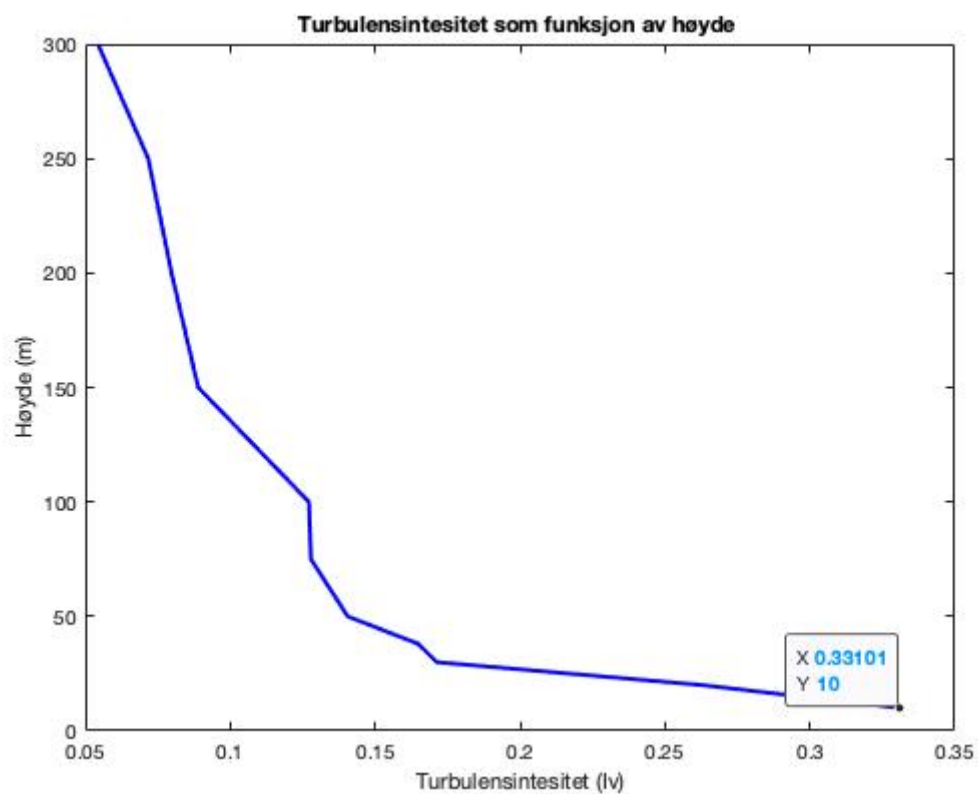
### 6.2.1 Vindkasthastighetstrykk

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) \quad (6.2)$$

$$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3 \longrightarrow \text{Lufttetthet} \quad (6.3)$$

- Turbulensintensitet:

Turbulensintensiteten er allerede evaluert gjennom grafene. Disse resultatene er på nytt presentert for betraktning i figur (6.43) under.



Figur 6.43: Turbulensintensitet som funksjon av høyde på 10m

Figuren (6.43) viser turbulensintensiteten for den 17. februar 2023 ved en høyde av 10 meter over bakken. Ligning (6.4) er verdien:

$$I_v(10) = 0.33 \quad (6.4)$$

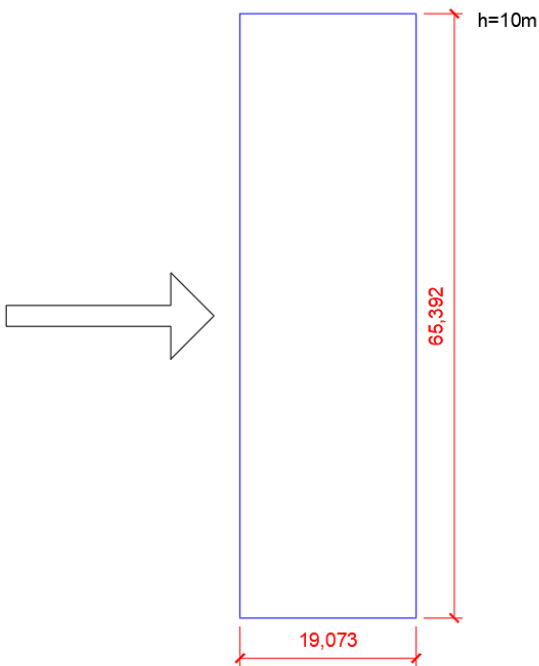


$k_1 = 1$   $\longrightarrow$  Turbulensfaktoren

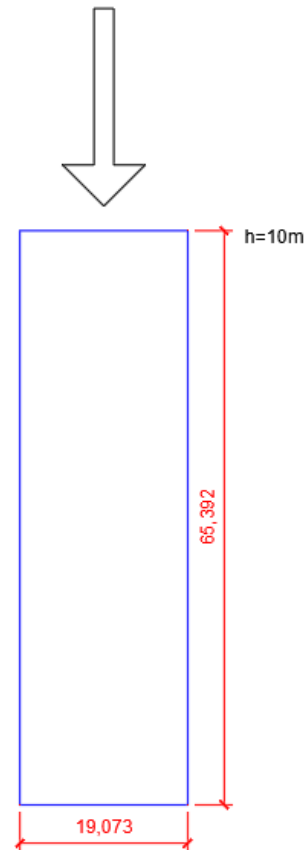
Med alle variablene tydelig definert, er det nå mulig å utføre beregningen for vindkasthastighetstrykket som følger:

$$q_p(z) = [1 + 7 \times 0.33] \times \frac{1}{2} \times 1.25 \text{ kg/m}^3 \times (23.292 \text{ m/s})^2 = 1.12 \text{ kN/m}^2 \quad (6.5)$$

### 6.2.2 Vindtrykk på overflater



Figur 6.44: Bildet viser vindretning 0 grader i forhold til byggets kortside



Figur 6.45: Bildet viser vindretning 90 grader i forhold til byggets kortside

De to mest kritiske vindretningene for beregninger er 90 grader og 0 grader, da det er disse retningene som påfører bygningen den største vindbelastningen. Dimensjonene for bygningen i ulike retninger er illustrert i figur (6.44) og (6.45).

Når vi vurderer de eksterne formfaktorene for de vertikale veggene, tar vi kun hensyn til sonene D og E. Dette skyldes at vindlasten i sonene A, B og C summeres til null, og har derfor ingen innvirkning på veltemomentet.

For å beregne vindtrykk så bruker vi ligning (6.6):

$$W_e = q_p(z_e) \times C_{pe} \quad (6.6)$$

Lastetilfelle vindretning med  $0^\circ$ :

For å bestemme den riktige  $C_{pe}$ -faktoren i beregningene, spiller arealet på langsiden av en struktur en avgjørende rolle. Utrekningen for  $C_{pe}$ -faktoren er presentert i ligning (6.7) og er som følger:

Arealet til langside er definert som:

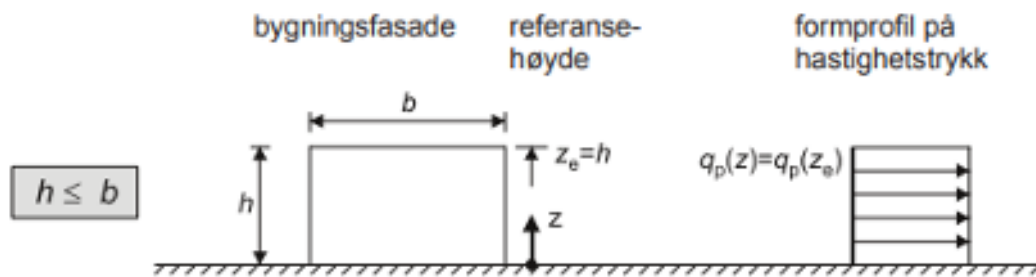
$$A = 65.392m \times 10m = 653.92m^2 \quad (6.7)$$

Ettersom arealet er større enn  $10m^2$  brukes det  $C_{pe,10}$  faktor.

$$A = 653.92m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (6.8)$$

### Vertikale vegger på rektangulære bygninger

De tre tilfellene som gir formen til hastighetstrykket, er allerede nevnt før. Ligning 6.9 refererer til ett av disse tilfellene, og dette blir også vist i Figur (6.46).



Figur 6.46: Referanse-høyde  $z_e$ , avhengig av  $h$  og  $b$  ([11] s.29)

$$h = 10\text{m} < b = 65.392\text{m} \quad (6.9)$$

Derfor er formprofilen for hastighetstrykk også fastsatt som:

$$q_p(z_e) = q_p(z) \quad (6.10)$$

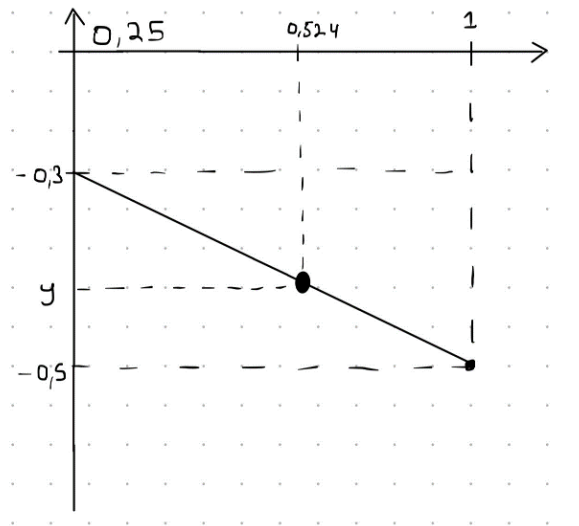
For å finne de anbefalte verdiene for formfaktorer gitt i (Tabell 6.1) så må dette bestemmes avhengig av forholdet  $h/d$ .

$$h/d = \frac{3.164\text{m}}{3.93\text{m}} = 0.524 \quad (6.11)$$

Tabell 6.1: Anbefalte verdier av utvendige formfaktorer for vertikale vegger i rektangulære bygninger ([11] s.31)

Sone	A		B		C		D		E	
	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
≤ 0,25	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

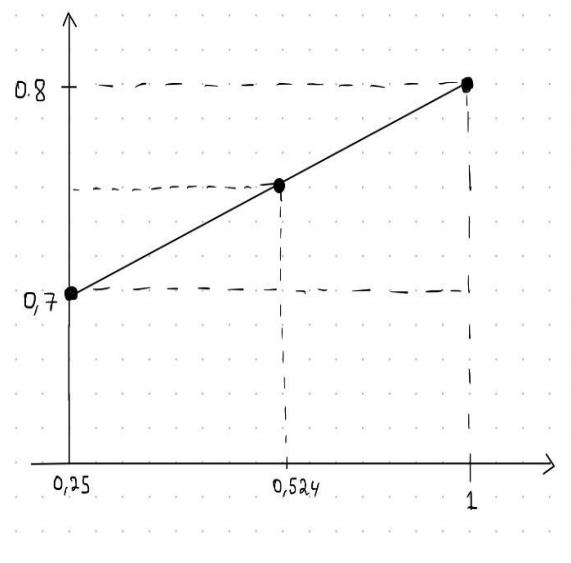
Ettersom det involverer en relasjon mellom to formfaktorer, er det nødvendig å benytte seg av interpolasjon for å oppnå en nøyaktig verdi for formfaktoren. Dette trinnet må gjennomføres på nytt både for Sone D og Sone E.



Figur 5.47: Interpolering av utvendig trykk koeffisient i Sone D

$$y = 0,7 + \frac{(0,8-0,7)}{(1-0,25)}(0,524 - 0,25) = 0,737 \quad (6.12)$$

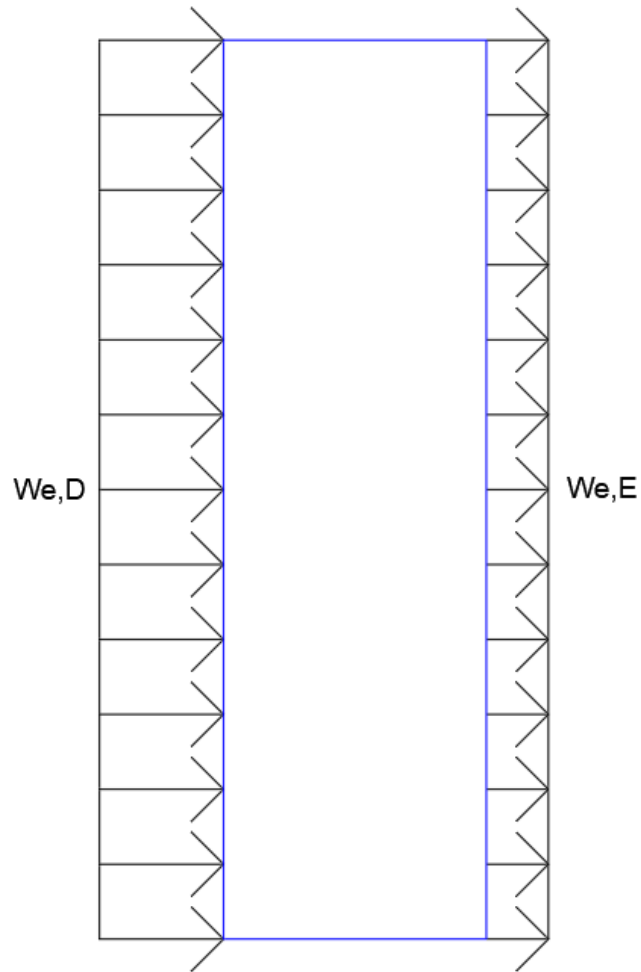
$$\text{Sone D} \rightarrow C_{pe,10} = 0,737 \quad (6.13)$$



Figur 6.48: Interpolering av utvendig trykk koeffisient i Sone E

$$y = -0,3 + \frac{(-0,5-(-0,3))}{(1-0,25)}(0,524 - 0,25) = -0,37 \quad (6.14)$$

$$\text{Sone E} \rightarrow C_{pe,10} = -0,37 \quad (6.15)$$



Figur 6.49: Hastighetstrykk på vegger for vindretning 0 grader

Innvendig vindlast blir ikke tatt til betraktning i noen av lastetilfellene med tanke på at det påvirker indre struktur og ikke ytre struktur. Så beregningene er mer rettet mot utvendig vindlast.

Med formfaktorene for de respektive sonene tilgjengelig og vindhastighetstrykket definert i henhold til ligning (6.5), kan beregningen av vindtrykket nå utføres på følgende måte:

$$W_{e,D} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times 0.737 \quad (6.16)$$

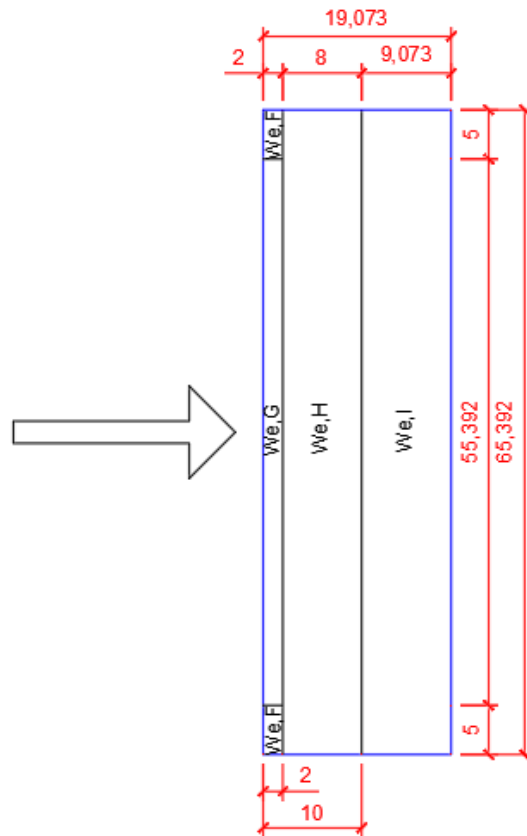
$$W_{e,D} = 0.825 \text{ kN/m}^2 \quad (6.17)$$

$$W_{e,E} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times (-0.37) \quad (6.18)$$

$$W_{e,E} = -0.414 \text{ kN/m}^2 \quad (6.19)$$

De nevnte verdiene spiller en avgjørende rolle i de påfølgende beregningene, som tar sikte på å avgjøre vindtrykket som virker på veggene. Beregningene for vindtrykk i både sone D og sone E er nå gjennomført. Det neste skrittet innebærer å gjennomføre beregninger for å fastslå vindtrykket som påvirker taket.

Flate tak



Figur 6.50: Sonene for vindlast på tak med tilhørende mål

Figur (6.50) illustrerer omfattende skisse som tydelig viser dimensjonene over sone fordelingene for taket som også er referert til under:

$e$  skal være minst av  $b$  eller  $2h$ :

$$b = 65.392m, \quad 2h = 20m \rightarrow e = 2h$$

$$\frac{e}{2} = 10m, \quad \frac{e}{4} = 5m, \quad \frac{e}{10} = 2m$$

Når dimensjonene nå er fastsatt, utføres beregningen av arealet for hver enkelt sone som et avgjørende skritt for å bestemme hvilken formfaktor som skal brukes i hvert tilfelle.

Resultatene av de påfølgende beregningene presenteres nedenfor:

$$A_{ref,F} = 5m \times 2m = 10m^2$$

$$A_{ref,F} = 10m^2 = 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (6.20)$$

Siden arealet er lik  $10m^2$  så kan det brukes  $C_{pe,10}$  i dette tilfelle.

$$A_{ref,G} = 55.392m \times 2m = 110.784m^2$$

$$A_{ref,G} = 110.784m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (6.21)$$

$$A_{ref,H} = 8m \times 65.392m = 523.14m^2$$

$$A_{ref,H} = 523.14m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (6.22)$$

$$A_{ref,I} = 9.073m \times 65.392m = 593.3m^2$$

$$A_{ref,I} = 593.3m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (6.23)$$

$$\text{Sone F} \rightarrow C_{pe,10} = -1.8$$

$$\text{Sone G} \rightarrow C_{pe,10} = -1.2$$

$$\text{Sone H} \rightarrow C_{pe,10} = -0.7$$

$$\text{Sone I} \rightarrow C_{pe,10} = -0.2 \quad \longrightarrow \quad \text{den mest gunstige verdien}$$

*for veltemoment er valgt*



I den nåværende situasjonen vurderes også Sone I med en negativ verdi. Dette valget begrunnes med at en positiv verdi ville ha ført til trykk mot denne sonen. I tråd med den aktuelle belastningssituasjonen, gir det derfor mer mening at Sone I har en negativ verdi.



Formfaktorene er nå definert slik at beregningene for vindtrykket på taksonene kan utføres:

$$W_{e,F} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times (-1.8) = -2.016 \text{ kN/m}^2 \quad (6.24)$$

$$W_{e,G} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times (-1.2) = -1.344 \text{ kN/m}^2 \quad (6.25)$$

$$W_{e,H} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times (-0.7) = -0.784 \text{ kN/m}^2 \quad (6.26)$$

$$W_{e,I} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times (-0.2) = -0.224 \text{ kN/m}^2 \quad (6.27)$$

Lastetilfelle vindretning med  $90^\circ$

Da vindretningen er vinkelrett på kortsiden, er det nødvendig å definere arealet av veggene for å velge riktig formfaktor.

$$A = 19.073m \times 10m = 190.73m^2 \quad (6.28)$$

$$A = 190.73m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (6.29)$$

Vertikale vegger på rektangulære bygninger

I denne situasjonen, hvor vindretningen påvirker kortsiden av strukturen, justeres verdien for "b" til 19.073 meter. I samsvar med informasjonen som er presentert i figur (6.46), forblir situasjonen definert på samme måte, selv i dette tilfellet.

$$h = 10m < b = 19.073m \quad (6.30)$$

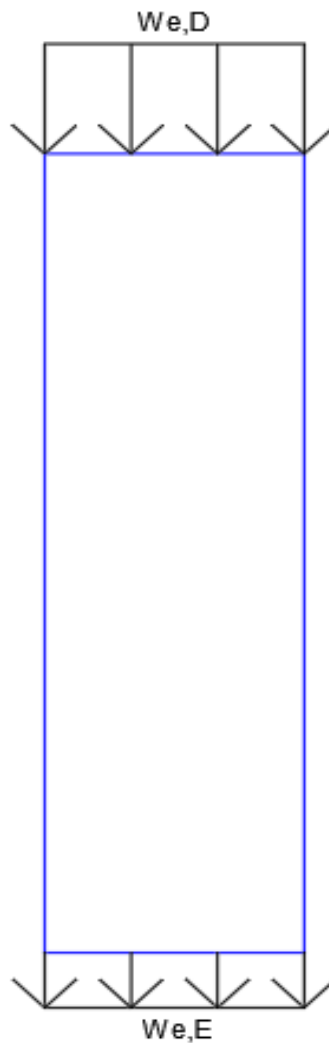
$$q_p(z_e) = q_p(z) \quad (6.31)$$

$$h/d = \frac{10m}{65.392m} = 0.153 \quad (6.32)$$

Tabell 6.2: Anbefalte verdier av utvendige formfaktorer for vertikale vegger i rektangulære bygninger ([11] s.31)

Sone	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Ettersom forholdet for å finne formfaktorene som er gjort i ligning (6.32) er gjort, indikerer dette siste linje fra Tabell (6.2). Dette skyldes at verdien av forholdet,  $h/d = 0.153$  er mindre enn eller lik 0.25.



Figur 6.51: Hastighetstrykk på vegger for vindretning 90 grader

Da vi besitter formfaktorene for de respektive sonene og har definert vindhastighetstrykket i ligning (6.12), kan vindtrykket nå beregnes som følger:

$$W_{e,D} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times 0.7$$

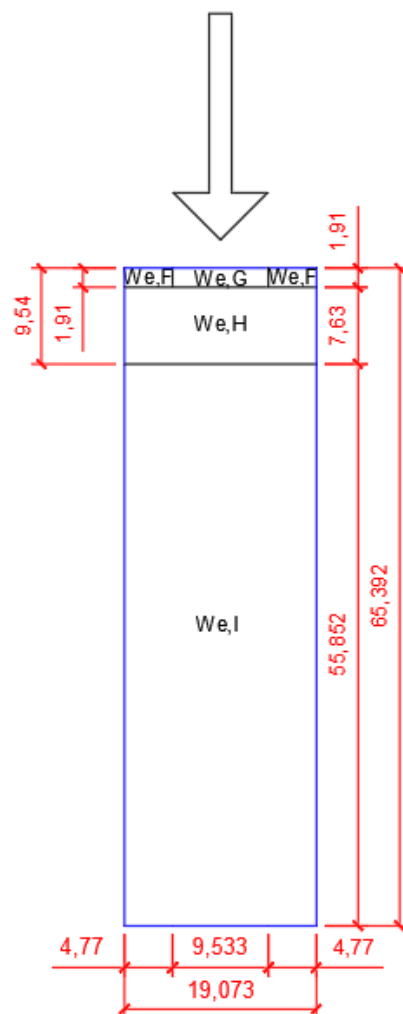
$$W_{e,D} = 0.784 \text{ kN/m}^2 \quad (6.33)$$

$$W_{e,E} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times (-0.3)$$

$$W_{e,E} = -0.34 \text{ kN/m}^2 \quad (6.34)$$

Vindtrykket for sone D og sone E er beregnet. Dette blir tatt med videre for å beregne vindkreftene som virker på veggene. Beregninger av vindtrykket for taket er neste steg.

*Flate tak*



Figur 6.52: Sonene for vindlast på tak med tilhørende mål

Figur (6.52) illustrerer dimensjonene for hver av sonene for flate tak. Dimensjonene er også nevnt under:

$$b = 19.073m, \quad 2h = 20m \rightarrow e = b$$

$$\frac{e}{2} = 9.54m, \quad \frac{e}{4} = 4.77m, \quad \frac{e}{10} = 1.91m$$

Arealet til hver av sonene må beregnes og vurdere hvilken formfaktor som må brukes.

$$A_{ref,F} = 4.77m \times 1.91m = 9.11m^2$$

$$A_{ref,F} = 9.11m^2 < 10m^2 < 10m^2$$

Ettersom arealet er mellom  $1m^2$  og  $10m^2$  må det brukes ligning (6.35):

$$C_{pe} = C_{pe,1} - (C_{pe,1} - C_{pe,10}) \log_{10} A \quad (6.35)$$

$$C_{pe} = -2.5 - (-2.5 - (-1.8)) \log_{10}(9.11) = -1.83 \quad (6.36)$$

$$A_{ref,G} = 9.533m \times 1.91m = 18.21m^2$$

$$A_{ref,G} = 18.21m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (6.37)$$

$$A_{ref,H} = 19.073m \times 7.63m = 145.53m^2$$

$$A_{ref,H} = 145.53m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (6.38)$$

$$A_{ref,I} = 19.073m \times 55.852m = 1065.27m^2$$

$$A_{ref,I} = 1065.27m^2 > 10m^2 \rightarrow C_{pe,10} \quad (6.39)$$

$$\text{Sone } F \rightarrow C_{pe} = -1.83$$

$$\text{Sone } G \rightarrow C_{pe,10} = -1.2$$

$$\text{Sone } H \rightarrow C_{pe,10} = -0.7$$

$$\text{Sone } I \rightarrow C_{pe,10} = -0.2 \quad \longrightarrow \quad \text{den mest gunstige verdien}$$

*for veltemoment er valgt*



I vår nåværende situasjon, der målet er å understreke et økt veltemoment forårsaket av vinden, har vi justert forholdet ved å betrakte Sone I som en negativ verdi, selv om en positiv verdi normalt ville indikert et trykk mot taket.

Med sonene nå klart definert, er de klare til å utføre beregninger av vindtrykket for de forskjellige sonene på taket:

$$W_{e,F} = q_p(z_e) \times C_{pe} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times (-1.83) = -2.05 \text{ kN/m}^2 \quad (6.40)$$

$$W_{e,G} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times (-1.2) = -1.344 \text{ kN/m}^2 \quad (6.41)$$

$$W_{e,H} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times (-0.7) = -0.784 \text{ kN/m}^2 \quad (6.42)$$

$$W_{e,I} = q_p(z_e) \times C_{pe,10} = 1.12 \text{ kN/m}^2 \times (-0.2) = -0.224 \text{ kN/m}^2 \quad (6.43)$$

Vindtrykket har blitt beregnet for hver av sonene, og i det kommende underkapitlet vil vindkreftene bli beregnet.

### 6.2.3 Vindkrefter

Lastetilfelle vindretning 0°

Sone D:

$$F_{W_{e,D}} = C_s C_d \times W_{e,D} \times A_{ref,D}$$

$$A_{ref,D} = 65.392\text{m} \times 10\text{m} = 653.92\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,D}} = 1 \times 0.825 \text{ kN/m}^2 \times 653.92\text{m}^2 \times 0.85 = 459\text{kN} \quad (6.44)$$

Sone E:

$$F_{W_{e,E}} = C_s C_d \times W_{e,E} \times A_{ref,E}$$

$$A_{ref,E} = 65.392\text{m} \times 10\text{m} = 653.92\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,E}} = 1 \times (-0.414 \text{ kN/m}^2) \times 653.92\text{m}^2 \times 0.85 = -230.1\text{kN} \quad (6.45)$$

Sone F:

$$F_{W_{e,F}} = C_s C_d \times W_{e,F} \times A_{ref,F}$$

$$A_{ref,F} = 5\text{m} \times 2\text{m} = 10\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,F}} = 1 \times (-2.016 \text{ kN/m}^2) \times 10\text{m}^2 \times 0.85 = -17.136\text{kN} \quad (6.46)$$

Sone G:

$$F_{W_{e,G}} = C_s C_d \times W_{e,G} \times A_{ref,G}$$

$$A_{ref,G} = 55.392\text{m} \times 2\text{m} = 110.784\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,G}} = 1 \times (-1.344 \text{ kN/m}^2) \times 110.784\text{m}^2 \times 0.85 = -127\text{kN} \quad (6.47)$$

Sone H:

$$F_{W_{e,H}} = C_s C_d \times W_{e,H} \times A_{ref,H}$$

$$A_{ref,H} = 8m \times 65.392m = 523.14m^2$$

$$F_{W_{e,H}} = 1 \times (-0.784 \text{ kN/m}^2) \times 523.14m^2 \times 0.85 = -349kN \quad (6.48)$$

Sone I:

$$F_{w_{e,I}} = C_s C_d \times W_{e,I} \times A_{ref,I}$$

$$A_{ref,I} = 9.073m \times 65.392m = 593.3m^2$$

$$F_{w_{e,I}} = 1 \times (-0.224 \text{ kN/m}^2) \times 593.3m^2 \times 0.85 = -113kN \quad (6.49)$$

Lastetilfelle vindretning 90°

Sone D:

$$F_{W_{e,D}} = C_s C_d \times W_{e,D} \times A_{ref,D}$$

$$A_{ref,D} = 19.073m \times 10m = 190.73m^2$$

$$F_{W_{e,D}} = 1 \times 0.784 \text{ kN/m}^2 \times 190.73m^2 \times 0.85 = 127.1025kN \quad (6.50)$$

Sone E:

$$F_{W_{e,E}} = C_s C_d \times W_{e,E} \times A_{ref,E}$$

$$A_{ref,E} = 19.073m \times 10m = 190.73m^2$$

$$F_{W_{e,E}} = 1 \times (-0.34 \text{ kN/m}^2) \times 190.73m^2 \times 0.85 = -55.12kN \quad (6.51)$$

Sone F:

$$F_{W_{e,F}} = C_s C_d \times W_{e,F} \times A_{ref,F}$$

$$A_{ref,F} = 4.77\text{m} \times 1.91\text{m} = 9.11\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,F}} = 1 \times (-2.05 \text{ kN/m}^2) \times 9.11\text{m}^2 \times 0.85 = -15.87\text{kN} \quad (6.52)$$

Sone G:

$$F_{W_{e,G}} = C_s C_d \times W_{e,G} \times A_{ref,G}$$

$$A_{ref,G} = 9.533\text{m} \times 1.91\text{m} = 18.21\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,G}} = 1 \times (-1.344 \text{ kN/m}^2) \times 18.21\text{m}^2 \times 0.85 = -20.8\text{kN} \quad (6.53)$$

Sone H:

$$F_{W_{e,H}} = C_s C_d \times W_{e,H} \times A_{ref,H}$$

$$A_{ref,H} = 19.073\text{m} \times 7.63\text{m} = 145.53\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,H}} = 1 \times (-0.784 \text{ kN/m}^2) \times 145.53\text{m}^2 \times 0.85 = -96.98\text{kN} \quad (6.54)$$

Sone I:

$$F_{W_{e,I}} = C_s C_d \times W_{e,I} \times A_{ref,I}$$

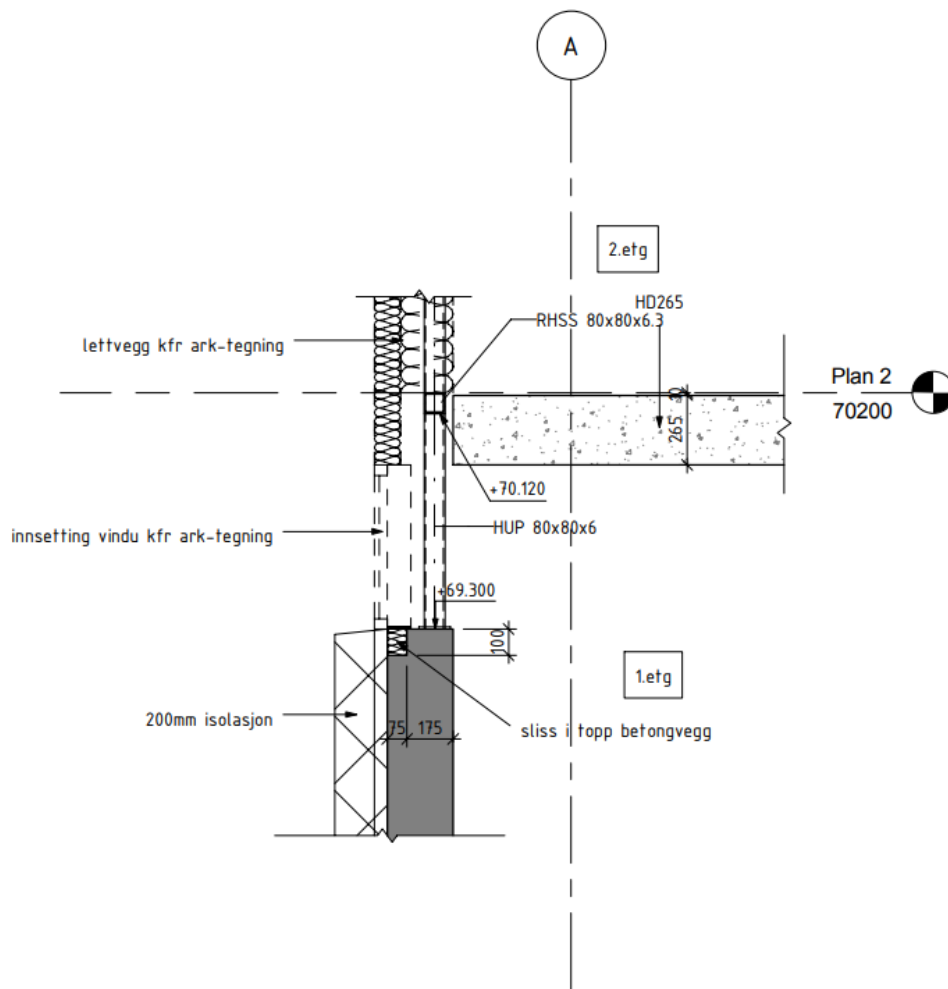
$$A_{ref,I} = 19.073\text{m} \times 55.852\text{m} = 1065.27\text{m}^2$$

$$F_{W_{e,I}} = 1 \times (-0.224 \text{ kN/m}^2) \times 1065.27\text{m}^2 \times 0.85 = -202.83\text{kN} \quad (6.55)$$



## 6.2.4 Veltemoment

I fravær av eksakte data angående vekten av "Ivar Langens Hus," har vi benyttet tilgjengelig informasjon om bygningens dimensjoner for å gjøre en omtrentlig vurdering av dens vekt. Bygningen, med en lengde (L) på 65.392 meter, en bredde (B) på 19.073 meter og en høyde (H) på 10 meter.



Figur 6.53: Fundamenter av Ivar Langens Hus. Hentet fra Statsbygg [21].

Ettersom dette er de eneste dataene vi har som kan brukes til betraktning for å beregne videre så har vi tykkelsen til fundamentering med en dimensjon på 265mm. Ved å kalkulere areal i første omgang:

$$A = l \times b = 65.392m \times 19.073m = 1247.22m^2 \quad (6.56)$$

Ved å utnytte denne arealen for å estimere bygningens masse uten å inkludere spesielle materialer og begrense beregningen kun til mengden betong i bygget, kan vi danne en forutsetning om vekten.

Ved å ta utgangspunkt i informasjonen fra Figur (6.53) om dimensjonene, kan vi anvende dette til å utføre en forenklet beregning for å estimere vekten. Ved å velge en høyde på 0,265 meter, vil dette kun gi oss volumet av betong som utgjør bygningen.

Volumet av betongmengden i bygningen kan beskrives som:

$$V = l \times b \times h \quad (6.57)$$

$$V = 65.392m \times 19.073m \times 0.265m = 330.5m^3$$

Herdet betong har vanligvis en tetthet som spenner fra 2200 til 2500 kilogram per kubikkmeter ( $kg/m^3$ ), og dette området for tetthet avhenger av betongens sammensetning og valg av tilslagstype ([22]).

Estimere vekten ved å multiplisere volumet med betongens tetthet:

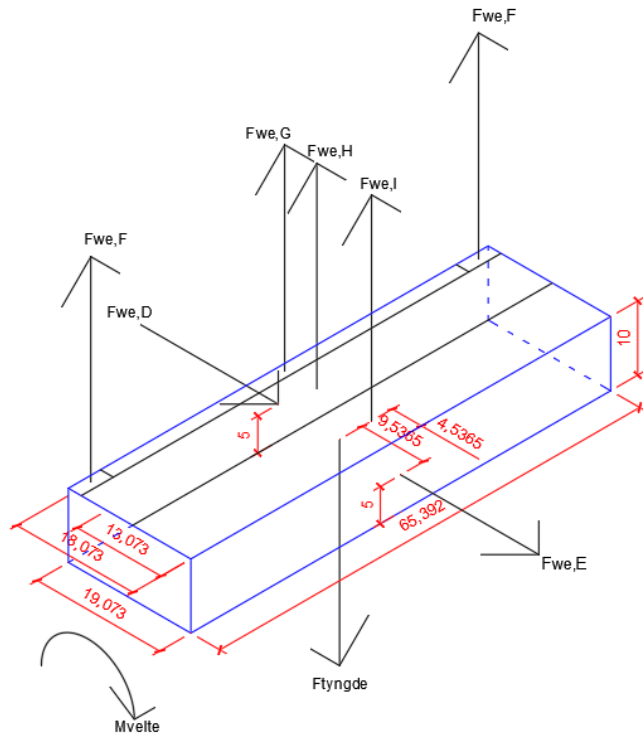
$$Vekt (W) = Volum (V) \times Tetthet (D) \quad (6.58)$$

$$W = 330.5m^3 \times 2400 \frac{kg}{m^3} = 793200 kg \approx 793.2 tonn \quad (6.59)$$

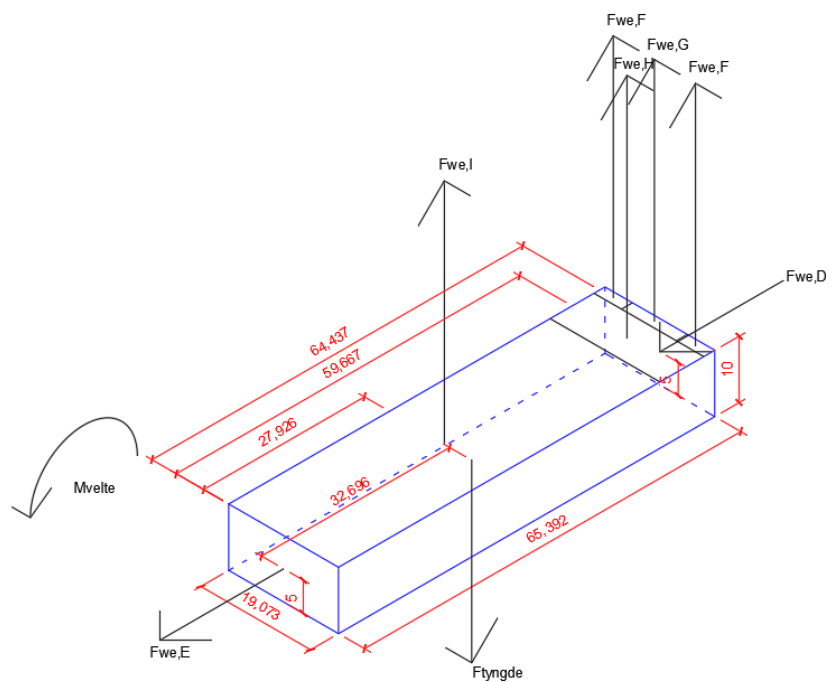
Tyngdekraften er referert som  $F_{tyngde}$ :

$$F_{tyngde} = 793200 kg \times 9.81 m/s^2 = 7781.3 kN \quad (6.60)$$

Figur (6.54) og (6.55) gir en visuell fremstilling av dimensjonene for momentarmene som er knyttet til de forskjellige vindretningene.



Figur 6.54: Dimensjonering av veltemoment for vindretning 0



Figur 6.55: Dimensjonering av veltemoment for vindretning 90

Lastetilfelle vindretning 0°

Definere momentarmene hvis momentpunktet er midten av hver sone:

- Sone D og E har en momentarm på 5m.
- Sone F og G har en momentarm på 18.073m.
- Sone H har en momentarm på 13.073m.
- Sone I har en momentarm på 4.5365m.

For å beregne momentet i hver sone, multipliseres vindkraften i hver sone med den tilhørende momentarmen i samme sone. Deretter sammenlignes dette momentet med det stabiliserende momentet som oppstår på grunn av bygningens egenvekt. Det bør bemerkes at sonen F må multipliseres med en faktor på 2, som illustrert i Figur (6.54), da det er to soner av F.

$$M_{Veltemoment} = (F_{We,D} + F_{We,E}) \times (5m) + (2F_{We,F} + F_{We,G}) \times (18.073m) + F_{We,H} \times (13.073m) + F_{We,I} \times (4.5365m) \quad (6.61)$$

$$M_{Veltemoment} = (459kN + 230.1kN) \times (5m) + (2 \times 17.136kN + 127kN) \times (18.073m) + 349kN \times (13.073m) + 113kN \times (4.5365m) = 11\,435.27 \text{ kNm} \quad (6.62)$$

Tyngdekraften har en momentarm på 9.5365m, som er vist i Figur (6.54). Beregningene nedenfor representerer det stabiliserende momentet fra egenvekt:

$$\begin{aligned} M_{Stabiliserende\ moment} &= F_{tyngde} \times (9.5365m) \\ &= 7781.3 \text{ kN} \times (9.5365m) = 74206.37 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (6.63)$$

Det neste trinnet involverer å evaluere forholdet mellom det momentet som forårsakes av vindkraften og det motvirkende momentet som skapes av bygningens egenvekt.

$$M_{\text{Veltemoment}} = 11\,435.27 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = 74\,206.37 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = 74\,206.37 \text{ kNm} \gg M_{\text{Veltemoment}} = 11\,435.27 \text{ kNm} \quad (6.64)$$

For å beregne lastetilfelle med vindretning  $90^\circ$ , må dimensjonene for momentarmene først defineres. Figur (6.55) gir en illustrasjon av disse dimensjonene og er beskrevet nedenfor:

- Sone D og E har en momentarm på 5m.
- Sone F og G har en momentarm på 64.437m.
- Sone H har en momentarm på 59.667m.
- Sone I har en momentarm på 27.926m.

Når momentarmene nå er definert, går man videre med å beregne det totale veltemomentet i hver enkelt sone ved å multiplisere dem med vindkreftene i respektive soner. Disse momentene blir deretter summert, og de vil bli vurdert i forhold til det stabiliserende momentet som bygningens egenvekt genererer. Det er viktig å huske at for sonene av type F, må verdien multipliseres med 2 igjen, i tråd med illustrasjonen i Figur (6.55), ettersom det er to soner av type F.

Lastetilfelle vindretning  $90^\circ$

$$M_{\text{Veltemoment}} = (F_{\text{We,D}} + F_{\text{We,E}}) \times (5\text{m}) + (2F_{\text{We,F}} + F_{\text{We,G}}) \times (64.437\text{m}) + F_{\text{We,H}} \times (59.667\text{m}) + F_{\text{We,I}} \times (27.926\text{m}) \quad (6.67)$$

$$M_{\text{Veltemoment}} = (127.1025 \text{ kN} + 55.12) \times (5\text{m}) + (2 \times 15.87\text{kN} + 20.8\text{kN}) \times (64.437\text{m}) + 96.98\text{kN} \times (59.667\text{m}) + 202.83\text{kN} \times (27.926\text{m}) = 15\,747.37 \text{ kNm} \quad (6.66)$$

Med en momentarm på 32.696 meter, som tydelig kommer frem av illustrasjonen i Figur (6.55), kan vi beregne det stabiliserende momentet som genereres av bygningens egenvekt som følger:

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = F_{\text{tyngde}} \times (32.696\text{m}) = 7781.3 \text{ kN} \times (32.696\text{m}) = 254\,417.385 \text{ kNm} \quad (6.67)$$

Siste trinn involverer en sammenligning mellom veltemomentet i den spesifikke vindretningen og stabiliserende moment som genereres av bygningens egenvekt.

$$M_{\text{Veltemoment}} = 15\,747.37 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = 254\,417.385 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{Stabiliserende moment}} = 254\,417.385 \text{ kNm} \gg M_{\text{Veltemoment}} = 15\,747.37 \text{ kNm}$$

## 7. Diskusjon

Begrenset kjennskap til Matlab-programvaren ved starten av dette prosjektet kan ha ført til uklarheter som oppstod underveis, uten tydelige årsaker. Det er en mulighet for at disse feilene kunne ha oppstått allerede i kopierings- og dekomprimeringsprosessen av datamaterialet i Matlab. Feilaktig behandlede data kan ha medført unøyaktigheter i alle analyser som ble utført på vinddataene. Blant de identifiserte kildene til feil kan det nevnes feil i korrigeringen av vindretninger, upresise korrigeringer av unormale topper og verdier i tidsseriene, feil under beregningen av gjennomsnittsverdier og standardavvik, samt mangelfull tidsseriedata fra 02.12.2022. På tross av forekomsten av disse feilene, ser det ut til at resultatene likevel har vært relativt pålitelige. De berørte variablene har hatt begrenset innvirkning på de endelige resultatene. Likevel er det viktig å utvise forsiktighet og nøye vurdering av resultatene, siden selv tilsynelatende korrekte resultater kan være påvirket av skjulte feil eller unøyaktigheter som kan påvirke beslutningsprosessen eller tolkningen av dataene.

Resultatene indikerer at hovedvindretningen den 17.02.2023 kom fra nordvest i en høyde på 10 meter, og i løpet av en 20-timers periode var gjennomsnittlig vindhastighet 23,2 m/s. I samme tidsintervall målte Sola målestasjon (kilden) en gjennomsnittlig vindhastighet på 20,1 m/s. Det er viktig å vurdere at terrengforholdene kan ha påvirket disse dataene. Sola lufthavn ligger kun 9 meter over havet og befinner seg ved kysten av Nordsjøen. Samtidig er Ivar Langens Hus plassert på en liten høyde. Når vinden møter en bakke eller en høyde, kan den bli kanalisert opp langs terrenget, og dette kan føre til en økning i vindhastigheten i disse områdene på grunn av akselerasjonen av luftstrømmen gjennom trange passasjer.

Dermed kan forskjeller i topografi mellom Sola lufthavn og Ivar Langens Hus spille en rolle i de observerte variasjonene i vindhastighet og retning. Dette underbygger viktigheten av å ta hensyn til terrengforholdene når man tolker vinddata, spesielt i regioner med variert topografi. Normalt forventes det at middelvindhastigheten øker med økende høyde over bakkenivå. Dette skyldes at på bakkenivå påvirkes vindhastigheten ofte av friksjon med overflaten og terrenget, noe som kan bremse ned vinden. Når vinden beveger seg opp i atmosfæren, blir denne friksjonseffekten mindre betydningsfull, og vinden kan akselerere. Observasjonen av at middelvindhastigheten øker med høyden i henhold til en  $x^2$ -funksjon i alle tre grafene gir

verdifull innsikt i hvordan vindforholdene varierer vertikalt. Dette er i samsvar med den logaritmiske veksten av vindhastigheten med høyden, hvor vindhastigheten øker som kvadratet av høyden over bakken.

I resultatene fra studiene har vi observert ulike perspektiver på hvordan vinden påvirker strukturer. En pre-case-studie undersøkte hvordan vinden påvirket en hytte. Utvendig vindlast ble beregnet for å identifisere de mest betydningsfulle faktorene bak hendelsen. Dette inkluderte å vurdere vindmomentet i forhold til stabiliserende krefter og å sammenligne løftekraften med tyngdekraften. Til slutt ble det nødvendig å vurdere om skyvekraften var den avgjørende faktoren. Beregningene indikerte at friksjonskoeffisienten ( $\mu$ ) måtte ligge innenfor visse grenser:

$$\mu < \frac{27.01kN}{67.39kN} \approx 0.4008$$

$$\mu < \frac{27.01kN}{74.64kN} \approx 0.3619$$

På grunn av manglende eksakt data ble det antatt at friksjonskoeffisienten måtte være et sted mellom 0.4 og 0.7 for interaksjonen mellom betong og tre. Imidlertid, uten kilder eller solid belegg for denne antagelsen, er det vanskelig å konkludere sikkert. Likevel virker det troverdig å vurdere at skyvekraften kunne ha vært en betydelig faktor i hendelsen, spesielt når det manglet grundig grunnlagsinformasjon.

For å fremheve utfordringen ytterligere ble det brukt en 50-års referansevindhastighet for ekstremvær fra norske standarder. Dette peker på at enkelte data som ble brukt, kanskje ikke var tilstrekkelig relevante, og at målestasjonene i området kanskje var utilstrekkelig. En annen mulig tilnærming kunne vært å vurdere høyere vindhastigheter, som potensielt ville ha økt skyvekraften og andre påvirkende faktorer betydelig.

Ivar Langens Hus, derimot, er en kompleks struktur med betydelig større dimensjoner. Beregning av vindlast på dette bygget innebar en annen utfordring, gitt den bedre



forankringen og den høyere vekten i forhold til hytten i Lofoten. Vekten ble estimert basert på en plantegning fra Statsbygg, men dette estimatet kunne variere betydelig i virkeligheten. Videre ble ikke løftekraft eller skyvekraft beregnet, da bygget allerede var konstruert i henhold til gjeldende regelverk.

Dette viser hvordan vindpåvirkning kan variere dramatisk avhengig av konstruksjonens egenskaper og vindforholdene på stedet. I tillegg kan manglende nøyaktig informasjon og usikkerheter i beregningene føre til ulike tolkninger og resultater i slike studier. Det understreker viktigheten av nøye datainnsamling og grundige beregninger når man vurderer vindpåvirkning på strukturer.

I dette bachelorprosjektet har vi grundig utforsket og analysert betydningen og påvirkningen av vindlast på bygninger. Gjennom en omfattende gjennomgang av teoretiske konsepter, nasjonale byggenormer, samt praktiske eksempler og casestudier, har vi oppnådd følgende betydningsfulle innsikter og konklusjoner.

Vindlast er en vesentlig faktor som har en betydelig innvirkning på både sikkerheten og ytelsen til bygninger. Variasjonen i vindlast kan være betydelige, avhengig av faktorer som geografisk plassering, bygningens geometri, høyde og den aktuelle meteorologiske situasjonen.

Normer og retningslinjer, for eksempel Eurokode, gir detaljerte retningslinjer for beregning av vindlast. Det er en avgjørende betydning å nøye følge disse standardene for å sikre at bygningene blir robuste og trygge for sine beboere.

## 8. Konklusjon

### Kilder

1. ZX Lidars. (2023). ZX 300 Onshore Wind Lidar. Hentet fra [https://www.zxlidars.com/windlidars/zx-300/?fbclid=IwAR1jyy6QJEQh19wZcJ-Nh\\_v-y2bsVP-c-KonFfMrhN4EODPvuN](https://www.zxlidars.com/windlidars/zx-300/?fbclid=IwAR1jyy6QJEQh19wZcJ-Nh_v-y2bsVP-c-KonFfMrhN4EODPvuN)
2. Byggforskserien. (2005). Klimaundersøkelser. Hentet fra <https://www.byggforsk.no/dokument/47/3>
3. Byggforskserien. (2005). Plassering og utforming av mindre bygninger på værharde steder. Hentet fra [https://www.byggforsk.no/dokument/78/plassering\\_og\\_utforming\\_09Vm](https://www.byggforsk.no/dokument/78/plassering_og_utforming_09Vm)
4. Holmes, J. D. (2015). Wind loading of structures. London: Taylor Francis
5. Kodasema. (2022). Koda. Hentet fra <https://kodasema.com/nb/>
6. Lysvold, S. S., Martinsen, M. W., Thrane, K., Karlsen, A. K., Johansen, J. I. (2023, februar 14). Turister anmelder hytteeier etter at de ble blåst på havet i Lofoten. Hentet fra NRK: <https://www.nrk.no/nordland/turister-ia-i-lofoten-skal-anmelde-hytteieier-etter-at-de-blaste-pa-sjoen-1.16296050>
7. NRK og Meteorologisk institutt. (2023). Historikk for sola målestasjon: desember 2022. Hentet fra yr.no: <https://www.yr.no/nb/historikk/graf/1500418/Norge/Rogaland/Sola/Sola?q=2022-12>
8. NRK og meteorologisk institutt. (2023). Historikk Sola målestasjon: februar 2023. Hentet fra yr.no: <https://www.yr.no/nb/historikk/graf/1-500418/Norge/Rogaland/Sola/Sol02>
9. NRK og meteorologisk institutt. (2023). Historikk Sola målestasjon: februar 2023. Hentet fra yr.no: <https://www.yr.no/nb/historikk/graf/1-500418/Norge/Rogaland/Sola/Sol02>
10. Dannevig, Petter; Harstveit, Knut: vind i Store norske leksikon på snl.no. Hentet 14. juni 2023 fra <https://snl.no/vind>
11. Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster, NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009, 2009.
12. C. Dyrbye and S. O. Hansen, Wind loads on structures. Chichester: Wiley, 1997.

13. Været1 (2023, 12. Februar) Hentet fra: Historisk vær for Lofoten | Været1.com (vaeret1.com).
14. Thorsnæs, Geir; Store norske leksikon (2005 - 2007): Lofoten i Store norske leksikon på snl.no. Hentet 14. juni 2023 fra <https://snl.no/Lofoten>
15. Norsk Klimaservicesenter (2023), Seklima- Observasjoner og værstatistikk (graf). <https://seklima.met.no/observations/>
16. Vindlaster på bygninger, 2003, Vindlaster på bygninger (471.043), byggforsk.no. [471.043 Vindlaster på bygninger - Byggforskserien](#)
17. Rundhaugweb, Tore Foshaug (2023, 01.september), Beauforts vindskala, <https://www.rundhaugweb.com/Vind.html>
18. Google Earth (2023), Lofoten, [https://earth.google.com/web/search/Lofoten/@68.08413217,14.17292969,23.68573151a,221528.40037845d,35y,0.00152728h,0t,0r/data=CnlaSBJCCiUweDQ1ZGUzZiZhZTNmM2U4Mjk6MHg2MTIjOTE2NzRiZmMzYzVkGXuL4rCP\\_1BAIRQNramHRytAKgdMb2ZvdGVuGAlgASImCiQJpnF1rOaLTkARKoPWRLPvPUAZAI9GASapZEAhU\\_oe0-RjYsA](https://earth.google.com/web/search/Lofoten/@68.08413217,14.17292969,23.68573151a,221528.40037845d,35y,0.00152728h,0t,0r/data=CnlaSBJCCiUweDQ1ZGUzZiZhZTNmM2U4Mjk6MHg2MTIjOTE2NzRiZmMzYzVkGXuL4rCP_1BAIRQNramHRytAKgdMb2ZvdGVuGAlgASImCiQJpnF1rOaLTkARKoPWRLPvPUAZAI9GASapZEAhU_oe0-RjYsA)
19. Norgeskart, Kraftverket (2023), Moksnes. <https://www.norgeskart.no/#!?project=norgeskart&layers=1002&zoom=10&lat=7531622.79&lon=417383.91&markerLat=7530845.301567506&markerLon=415670.2525176005&p=searchOptionsPanel&sok=moksnes%20lofoten>
20. Karlsen, Martinsen, Lysvold, Brembo, Johansen, Kristoffersen (15.februar 2023). [Hytte blåste på havet i Lofoten: Professor mener forskriftene ikke ble fulgt – NRK Nordland.](#) [https://www.nrk.no/nordland/hytte-blaste-pa-havet-i-lofoten\\_-professor-mener-forskriftene-ikke-ble-fulgt-1.16299005](https://www.nrk.no/nordland/hytte-blaste-pa-havet-i-lofoten_-professor-mener-forskriftene-ikke-ble-fulgt-1.16299005)
21. (Statsbygg, 10. mai, 2023)  
Statsbygg. (2023). Bilder av byggeprosjektet. Leveringsdato: 10. mai.
22. Thue, Jan Vincent; Tekst fra Store norske leksikon (2005-2007): *betong* i *Store norske leksikon* på snl.no. Hentet 3. september 2023 fra <https://snl.no/betong>
23. Dale, Ole Harld, (2014, 16.09), Ivar Langens hus, Byggeindustrien, Bygg.no [https://www.bygg.no/ivar-langens-hus/1208452!/?fbclid=IwAR0d99ErSE5UjtVrsaVjO68Sx-onJjcDYwivFbia\\_mFpgYNGNVsplzD2nso](https://www.bygg.no/ivar-langens-hus/1208452!/?fbclid=IwAR0d99ErSE5UjtVrsaVjO68Sx-onJjcDYwivFbia_mFpgYNGNVsplzD2nso)
24. Dale, Ole Harld, (2014, 16.09), Ivar Langens hus, Byggeindustrien, Bygg.no [https://www.bygg.no/ivar-langens-hus/1208452!/?fbclid=IwAR0d99ErSE5UjtVrsaVjO68Sx-onJjcDYwivFbia\\_mFpgYNGNVsplzD2nso](https://www.bygg.no/ivar-langens-hus/1208452!/?fbclid=IwAR0d99ErSE5UjtVrsaVjO68Sx-onJjcDYwivFbia_mFpgYNGNVsplzD2nso)

## Matlab koder

Vindhastighet i 20 min intervall:

```
tableData = intervalTables{44, 1};
heights = [300, 250, 200, 150, 100, 75, 50, 38, 30, 20, 10];
windSpeedColumns = {'HorizontalWindSpeedmsAt300m', 'HorizontalWindSpeedmsAt250m',
'HorizontalWindSpeedmsAt200m', 'HorizontalWindSpeedmsAt150m',
'HorizontalWindSpeedmsAt100m', 'HorizontalWindSpeedmsAt75m',
'HorizontalWindSpeedmsAt50m', 'HorizontalWindSpeedmsAt38m',
'HorizontalWindSpeedmsAt30m', 'HorizontalWindSpeedmsAt20m',
'HorizontalWindSpeedmsAt10m'};
windSpeedValues = tableData(:, windSpeedColumns);
time = tableData.Time;
figure;
hold on;

lineStyles = {'-'}; % Different line styles
lineWidths = [4.6, 4.3, 4, 3.7, 3.5, 3.2, 2.9, 2.6, 2.3, 2, 1.7, 1.5]; % Different line widths
for i = 1:numel(heights)
    lineStyleIndex = mod(i, numel(lineStyles)) + 1; % Cycle through line
styles
    lineWidthIndex = mod(i, numel(lineWidths)) + 1; % Cycle through line
widths
    plot(time, windSpeedValues(:, i), lineStyles{lineStyleIndex}, 'LineWidth',
lineWidths(lineWidthIndex));
end
hold off;
xlabel('Tid');
ylabel('Vindhastighet (m/s)');
legend(strcat('Høyde = ', string(heights), 'm'));
```

Vinretning i 20 min intervall:

```
tableData = intervalTables{44, 1};
heights = [300, 250, 200, 150, 100, 75, 50, 38, 30, 20, 10];
winddir = {'WindDirectiondegAt300m', 'WindDirectiondegAt250m', 'WindDirectiondegAt200m',
'WindDirectiondegAt150m', 'WindDirectiondegAt100m', 'WindDirectiondegAt75m',
'WindDirectiondegAt50m', 'WindDirectiondegAt38m', 'WindDirectiondegAt30m',
'WindDirectiondegAt20m', 'WindDirectiondegAt10m'};
Values = tableData(:, winddir);
time = tableData.Time;
figure;
hold on;

lineStyles = {'-'}; % Different line styles
lineWidths = [4.6, 4.3, 4, 3.7, 3.5, 3.2, 2.9, 2.6, 2.3, 2, 1.7, 1.5]; % Different line widths
for i = 1:numel(heights)
    lineStyleIndex = mod(i, numel(lineStyles)) + 1; % Cycle through line
styles
    lineWidthIndex = mod(i, numel(lineWidths)) + 1; % Cycle through line
widths
    plot(time, Values(:, i), lineStyles{lineStyleIndex}, 'LineWidth', lineWidths(lineWidthIndex));
```

```

end
hold off;
xlabel('Tid');
ylabel('Vindretning (grader)');
legend(strcat('Høyde = ', string(heights), 'm'));

```

*Middelvind med standardavvik*

```

tableData = intervalTables{44, 1};
% Define the wind speed column names windSpeedColumns = {'HorizontalWindSpeedmsAt10m'};
% Extract the relevant data from the table windSpeeds = table2array(tableData(:,
windSpeedColumns));
% Calculate the mean wind speed (ignoring NaN values) meanWindSpeed = nanmean(windSpeeds,
2);
% Calculate the standard deviation of wind speed (ignoring NaN values) stdWindSpeed =
nanstd(windSpeeds);
% Create a time vector
time = tableData.Time;

% Calculate the time difference in seconds
timeInSeconds = seconds(time - time(1));

curve1 = meanWindSpeed + stdWindSpeed;
curve2 = meanWindSpeed - stdWindSpeed;

% Plot the mean and standard deviation
figure;
plot(timeInSeconds, meanWindSpeed, 'b', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(timeInSeconds, curve1, 'r--', 'LineWidth', 1);
plot(timeInSeconds, curve2, 'r--', 'LineWidth', 1);
xlabel('Tid ');
ylabel('Vindhastighet (m/s)');
legend('Middel vindhastighet', 'Middelvind + Std', 'Middelvind - Std');
title('Middel vindhastighet med standardavvik 10m høyde');

```

*Middelvind med hastighet:*

```

% Access the table
tableData = intervalTables{44, 1};

```

```

% Define the wind speed column names
windSpeedColumns = {'HorizontalWindSpeedmsAt300m', 'HorizontalWindSpeedmsAt250m',
'HorizontalWindSpeedmsAt200m', 'HorizontalWindSpeedmsAt150m',
'HorizontalWindSpeedmsAt100m', 'HorizontalWindSpeedmsAt75m',
'HorizontalWindSpeedmsAt50m', 'HorizontalWindSpeedmsAt38m',
'HorizontalWindSpeedmsAt30m', 'HorizontalWindSpeedmsAt20m',
'HorizontalWindSpeedmsAt10m'};
% Extract the relevant data from the table windSpeeds = table2array(tableData(:,
windSpeedColumns));
% Calculate the mean wind speed (ignoring NaN values) for each height meanWindSpeed =
nanmean(windSpeeds, 1);
% Calculate the standard deviation of the wind speed for each height stdWindSpeed =
nanstd(windSpeeds, 1);
% Define the heights corresponding to the wind speed columns heights = [300, 250, 200, 150, 100,
75, 50, 38, 30, 20, 10];
% Plot the mean wind speed against height
figure;
hold on;
plot(meanWindSpeed, heights, 'b', 'LineWidth', 2);
plot(meanWindSpeed + stdWindSpeed, heights, 'r-', 'LineWidth', 1);
plot(meanWindSpeed - stdWindSpeed, heights, 'r-', 'LineWidth', 1);
hold off;
xlabel('Middelvindhastighet (m/s)');
ylabel('Høyde (m)');
title('Middelvindhastighet som funksjon av høyde');
legend('Middelvindhastighet', 'Middelvindhastighet + Standardavik', 'Middelvindhastighet -
Standardavik');

```

Turbelens med høyde:

```

% Access the table
tableData = intervalTables{44, 1};

% Define the wind speed column names
windSpeedColumns = {'HorizontalWindSpeedmsAt300m', 'HorizontalWindSpeedmsAt250m',
'HorizontalWindSpeedmsAt200m', 'HorizontalWindSpeedmsAt150m',
'HorizontalWindSpeedmsAt100m', 'HorizontalWindSpeedmsAt75m',
'HorizontalWindSpeedmsAt50m', 'HorizontalWindSpeedmsAt38m',
'HorizontalWindSpeedmsAt30m', 'HorizontalWindSpeedmsAt20m',
'HorizontalWindSpeedmsAt10m'};
% Extract the relevant data from the table windSpeeds = table2array(tableData(:,
windSpeedColumns));
% Calculate the turbulence intensity (ignoring NaN values) for each height turbulenceIntensity =
nanstd(windSpeeds, 1) ./ nanmean(windSpeeds, 1);
% Define the heights corresponding to the wind speed columns heights = [300, 250, 200, 150, 100,
75, 50, 38, 30, 20, 10];
% Plot the turbulence intensity against height
figure;
plot(turbulenceIntensity, heights, 'b', 'LineWidth', 2);
xlabel('Turbulensintetitet (lv)');

```

```
ylabel('Høyde (m)');  
title('Turbulensintensitet som funksjon av høyde ');
```

Middelvindretning som en funksjon av høyde

```
% Access the table  
tableData = intervalTables{44, 1};  
  
% Define the wind speed column names  
windSpeedColumns = {'HorizontalWindSpeedmsAt300m', 'HorizontalWindSpeedmsAt250m',  
'HorizontalWindSpeedmsAt200m', 'HorizontalWindSpeedmsAt150m',  
'HorizontalWindSpeedmsAt100m', 'HorizontalWindSpeedmsAt75m',  
'HorizontalWindSpeedmsAt50m', 'HorizontalWindSpeedmsAt38m',  
'HorizontalWindSpeedmsAt30m', 'HorizontalWindSpeedmsAt20m',  
'HorizontalWindSpeedmsAt10m'};  
% Define the wind direction column names  
windDirColumns = {'WindDirectiondegAt300m', 'WindDirectiondegAt250m',  
'WindDirectiondegAt200m', 'WindDirectiondegAt150m', 'WindDirectiondegAt100m',  
'WindDirectiondegAt75m', 'WindDirectiondegAt50m', 'WindDirectiondegAt38m',  
'WindDirectiondegAt30m', 'WindDirectiondegAt20m', 'WindDirectiondegAt10m'};  
% Extract the relevant data from the table  
windSpeeds = table2array(tableData(:, windSpeedColumns));  
windDirections = table2array(tableData(:, windDirColumns));  
% Calculate the mean wind direction for each height  
meanWindDirection = nanmean(windDirections, 1);  
heights = [300, 250, 200, 150, 100, 75, 50, 38, 30, 20, 10];  
plot(meanWindDirection, heights);  
xlabel('Vindretning (grader)');  
ylabel('Høyde (m)');  
title('Middel vindretning som en funksjon av høyde');
```

Middelvindretning som en funksjon av høyde med std

```
% Access the table  
tableData = intervalTables{44, 1};  
  
% Define the wind speed column names  
windSpeedColumns = {'HorizontalWindSpeedmsAt300m', 'HorizontalWindSpeedmsAt250m',  
'HorizontalWindSpeedmsAt200m', 'HorizontalWindSpeedmsAt150m',  
'HorizontalWindSpeedmsAt100m', 'HorizontalWindSpeedmsAt75m',  
'HorizontalWindSpeedmsAt50m', 'HorizontalWindSpeedmsAt38m',  
'HorizontalWindSpeedmsAt30m', 'HorizontalWindSpeedmsAt20m',  
'HorizontalWindSpeedmsAt10m'};  
% Define the wind direction column names  
windDirColumns = {'WindDirectiondegAt300m', 'WindDirectiondegAt250m',  
'WindDirectiondegAt200m', 'WindDirectiondegAt150m', 'WindDirectiondegAt100m',  
'WindDirectiondegAt75m', 'WindDirectiondegAt50m', 'WindDirectiondegAt38m',  
'WindDirectiondegAt30m', 'WindDirectiondegAt20m', 'WindDirectiondegAt10m'};  
% Extract the relevant data from the table  
windSpeeds = table2array(tableData(:, windSpeedColumns));  
windDirections = table2array(tableData(:, windDirColumns));  
% Calculate the mean wind direction and standard deviation for each height  
meanWindDirection = nanmean(windDirections, 1);  
stdWindDirection = nanstd(windDirections, 0, 1);  
heights = [300, 250, 200, 150, 100, 75, 50, 38, 30, 20, 10];
```

```

plot(meanWindDirection', heights);
hold on;
plot(meanWindDirection' + stdWindDirection', heights, 'r-', 'LineWidth', 1);
plot(meanWindDirection' - stdWindDirection', heights, 'r-', 'LineWidth', 1);
hold off;
xlabel('Vindretning (grader)');
ylabel('Høyde (m)');
title('Middel vindretning som en funksjon av høyde med standardavvik');
legend('Middel vindretning', 'Øvre grense', 'Nedre grense');
Middelvinhastighet med høyde i funksjon og std:
% Access the table
tableData = intervalTables{44, 1};

% Define the wind speed column names
windSpeedColumns = {'HorizontalWindSpeedmsAt300m', 'HorizontalWindSpeedmsAt250m',
'HorizontalWindSpeedmsAt200m', 'HorizontalWindSpeedmsAt150m',
'HorizontalWindSpeedmsAt100m', 'HorizontalWindSpeedmsAt75m',
'HorizontalWindSpeedmsAt50m', 'HorizontalWindSpeedmsAt38m',
'HorizontalWindSpeedmsAt30m', 'HorizontalWindSpeedmsAt20m',
'HorizontalWindSpeedmsAt10m'};
% Extract the relevant data from the table windSpeeds = table2array(tableData(:,
windSpeedColumns));
% Calculate the mean wind speed and standard deviation for each height
meanWindSpeed = nanmean(windSpeeds, 1);
stdWindSpeed = nanstd(windSpeeds, 0, 1);

Tilpasset logaritmisk profil:
% Define the heights corresponding to the wind speed columns heights = [300, 250, 200, 150, 100,
75, 50, 38, 30, 20, 10];
% Plot the mean wind speed against height with standard deviation figure; plot(meanWindSpeed,
heights, 'b', 'LineWidth', 2); hold on; plot(meanWindSpeed + stdWindSpeed, heights, 'r-',
'LineWidth', 1); plot(meanWindSpeed - stdWindSpeed, heights, 'r-', 'LineWidth', 1); hold off;
xlabel('Vindhastighet (m/s)');
ylabel('Høyde (m)');
title('Middel vindhastighet som funksjon av høyde med standardavvik');
legend('Middel vindhastighet', 'Øvre grense', 'Nedre grense');
Tilpasset logaritmisk profil: % Anta «referanse» (vanlig) middelvind hastighet v
z0 = sym('z0');
% Anta terreng kategori III

% Høyder fra 10 m til 300m
z=[10,20,38,50,70,100,150,200,250,300];
Uz=[7.552751615921578,9.045716694880287,9.919045280957333,10.538681773838997,11.01930
9177441533,11.412010359916040,11.744034478796430,12.031646852797705,12.28533894599308
6,12.512274256400243]; % ln i Matlab
figure(1);plot(Uz,z,'o')
xlabel('U(z) [m/s]')
ylabel('z [m]')
grid

% MAtlab tilpassing av rettligne i Uz, ln(z)

```



```

x=Uz;
y=log(z);
figure(2);semilogy(Uz,z,'o');
xlabel('U(z) [m/s]')
ylabel('ln(z) [m]')
grid
p=polyfit(x,y,1); % y = a*x + b
a=p(1);
b=p(2);
z0_fitted=exp(b);

% Plot logaritmisk funksjon som ble tilpasset
% Vanlig plott
Uz_fitted=1/a*log(z/z0_fitted);
figure(1);hold on;plot(Uz_fitted,z,'r-')
legend('Målt','Tilpasset')

%Semilogplot
figure(2);hold on;
semilogy(Uz_fitted,z,'r-')
legend('Målt','Tilpasset')

```

Vindrose i alle høyder:

```

% Define the colormap based on wind speed:
% Define the wind speed column names
windSpeedColumns = {'HorizontalWindSpeedmsAt300m', 'HorizontalWindSpeedmsAt250m',
'HorizontalWindSpeedmsAt200m', 'HorizontalWindSpeedmsAt150m',
'HorizontalWindSpeedmsAt100m', 'HorizontalWindSpeedmsAt75m',
'HorizontalWindSpeedmsAt50m', 'HorizontalWindSpeedmsAt38m',
'HorizontalWindSpeedmsAt30m', 'HorizontalWindSpeedmsAt20m',
'HorizontalWindSpeedmsAt10m'};
% Define the wind direction column names
windDirectionColumns = {'WindDirectiondegAt300m', 'WindDirectiondegAt250m',
'WindDirectiondegAt200m', 'WindDirectiondegAt150m', 'WindDirectiondegAt100m',
'WindDirectiondegAt75m', 'WindDirectiondegAt50m', 'WindDirectiondegAt38m',
'WindDirectiondegAt30m', 'WindDirectiondegAt20m', 'WindDirectiondegAt10m'};
% Initialize tables to store wind speed, wind direction, and mean values
windSpeedTable = table();
windDirectionTable = table();
meanWindSpeedTable = table();
meanWindDirectionTable = table();

% Iterate over each cell in the first column of intervalTables
for i = 1:numel(intervalTables(:,1))
    % Access the table in the current cell
    tableData = intervalTables{i, 1};

    % Extract the wind speed and wind direction data from the table
    windSpeedData = tableData(:, windSpeedColumns);
    windDirectionData = tableData(:, windDirectionColumns);

```

```

% Append the data to the overall wind speed and wind direction tables windSpeedTable =
[windSpeedTable; array2table(windSpeedData)];
windDirectionTable = [windDirectionTable; array2table(windDirectionData)];
% Check if it is the last table for a specific height
if mod(i, 6) == 0
% Calculate the nanmean for the current height
meanWindSpeed = nanmean(windSpeedData);
meanWindDirection = nanmean(windDirectionData);
% Append the mean values to the result tables
meanWindSpeedTable = [meanWindSpeedTable; array2table(meanWindSpeed)];
meanWindDirectionTable = [meanWindDirectionTable; array2table(meanWindDirection)];
end
end
% Example wind speed and direction data
windSpeed = meanWindSpeedTable;
windDirection = meanWindDirectionTable;

```

```

numColumns = size(windSpeed, 2); % Get the number of columns

```

```

for column = 1:numColumns

```

```

% Extract data for the current column
currentWindSpeed = windSpeed(:, column);
currentWindDirection = windDirection(:, column);

```

```

% Convert wind direction from degrees to radians
currentWindDirection = table2array(currentWindDirection);
theta = deg2rad(currentWindDirection);
% Calculate x and y coordinates for plot
r = table2array(currentWindSpeed);
x = r .* cos(theta);
y = r .* sin(theta);

```

```

% Create a new figure for each column
figure;
subplot(1, 2, 1); % Create a subplot for wind direction
polarplot(theta(:), r(:), 'LineStyle', 'none', 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 3);
title(sprintf('Vindrose - Høyde %d', column));
subplot(1, 2, 2); % Create a subplot for wind speed
scatter(x(:), y(:), 10, r(:), 'filled');
colormap('jet');
colorbar;
title(sprintf('Vindhastighet', column));
end

```

```

Middelvindhastighet for hele analyse perioden:
meanValues = [];
times = [];

```

```

% Loop through each cell/table in the cell array
for i = 1:numel(intervalTables)
% Extract the data from the i-th table
currentTable = intervalTables{i};
windSpeed = currentTable.HorizontalWindSpeedmsAt10m;

```

```
time = currentTable.Time;
% Calculate the mean wind speed for this table, ignoring NaN values meanWindSpeed =
nanmean(windSpeed);
    % Append the mean value and corresponding time to the arrays
    meanValues = [meanValues, meanWindSpeed];
    times = [times, time(1)]; % Assuming Time is constant within each table
end
% Create a plot of mean values against time
figure;
plot(times, meanValues, 'b.-'); % 'b.-' specifies blue color, solid line, and dots
xlabel('Tid');
ylabel('Middel horizontal vind (m/s)');
title('Middel vind den 17 Feb 2023');
grid on;
```



Vedlegg  
Matlab