



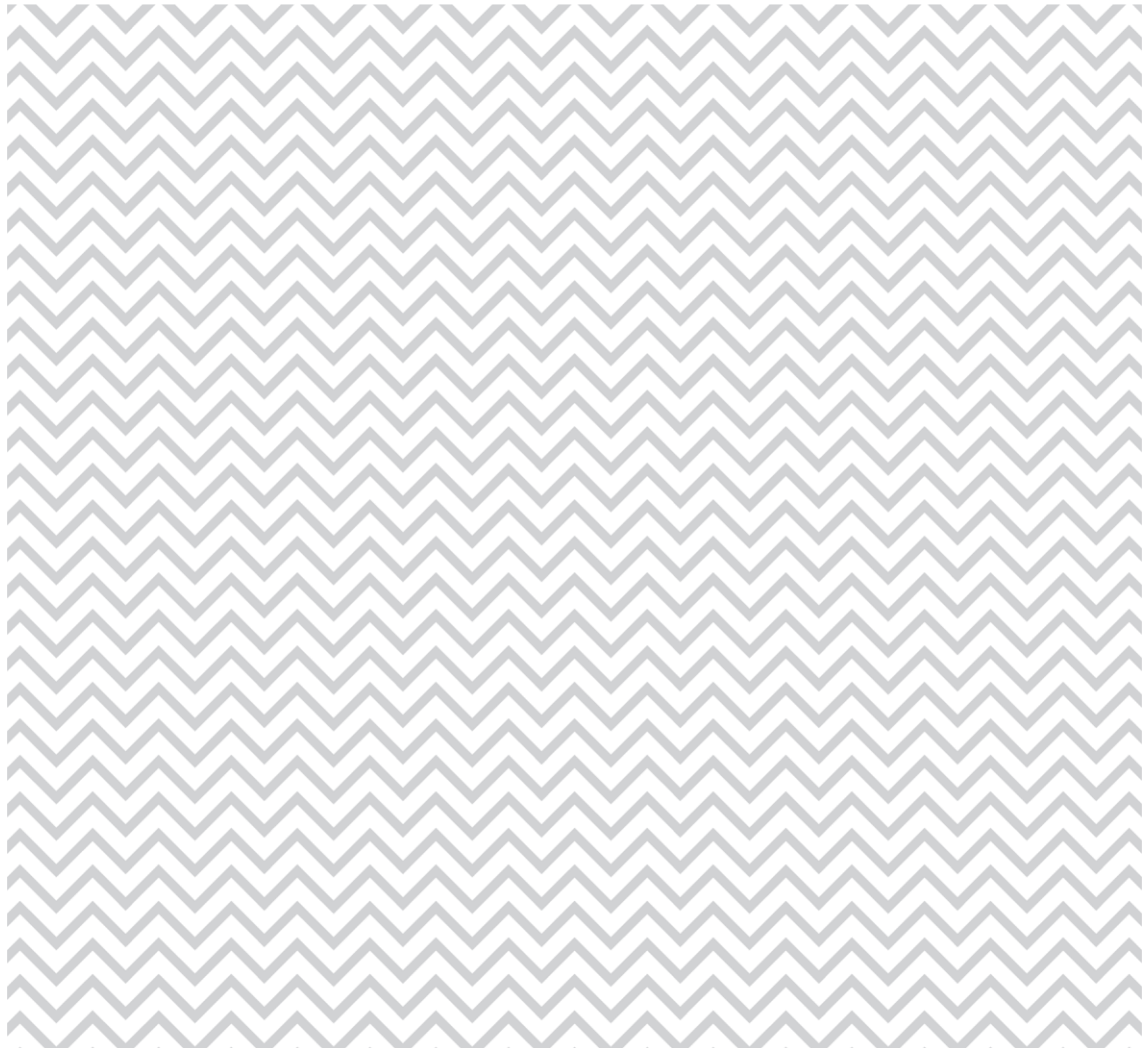
Meteorologisk
institutt

METinfo

Nr. 21/2016
ISSN 1894-759X
METEOROLOGI
Bergen, 10.10.2016

Atmosfæremålinger for brodesign

- Anbefalinger om tilleggsmåling med Lidar
Birgitte R. Furevik og Knut Helge Midtbø



Sammendrag

Dette notatet redegjør for nytteverdien av Lidar for måling av vind og turbulens i norske fjorder og behovet for målinger til å støtte opp om vindmodelleringen. Lidar er en fjernmålingsmetode som benyttes mye innen vindenergi og har potensiale også innen brodesign. Avanserte oppsett og måleteknikker med Lidar kan sies å være et forskningsfelt som er i stadig utvikling, men det er så modent at det kan vise til gode resultater. I komplekst terreng som de norske fjorder bør multi-Lidar teknikk benyttes.

Innhold

Sammendrag	2
Bakgrunn	5
Ferjefri E39	5
Måleprogrammet	5
Utvidelse av måleprogrammet	8
Lidar	8
Vindmåling med en Lidar	8
Vindmåling med flere Lidarer	10
Målinger og modellering	12
Oppsummering	13
Referanser	14

Bakgrunn

En bakgrunn som skisserer hvilke parametere der er behov for å få målinger av.

Ferjefri E39

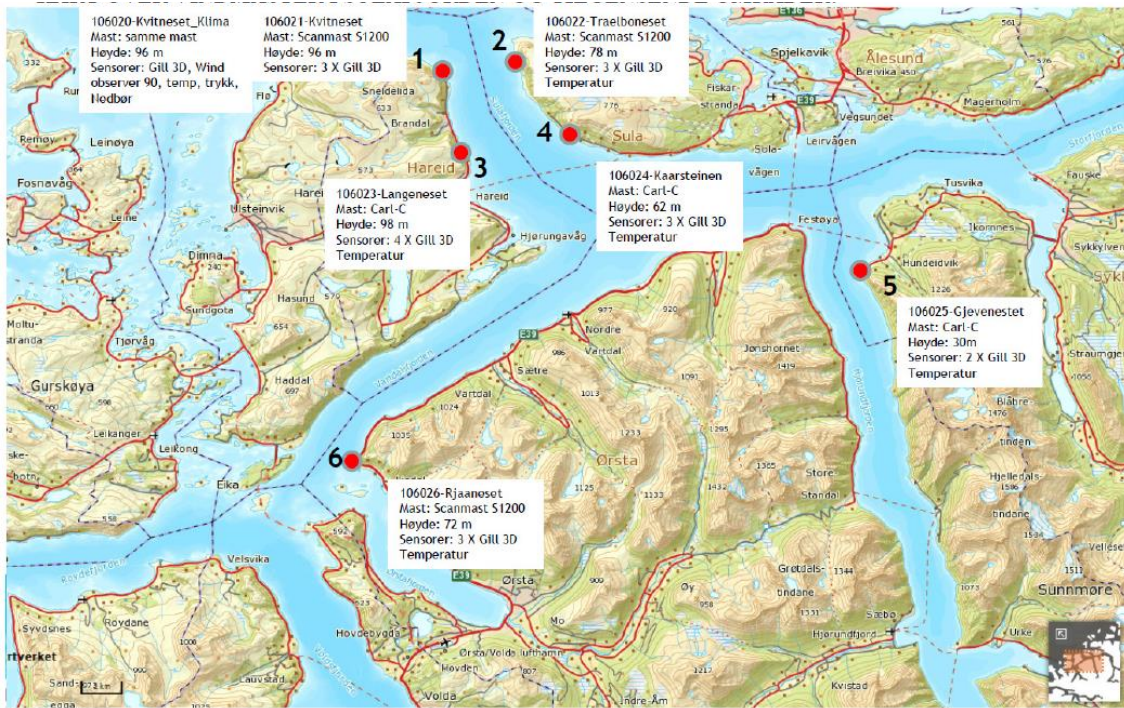
Ferjefri E39-prosjektet – Region Midt har satt i gang et stort måleprogram i Sula- og Vartdalsfjorden og i Halsafjorden. Der utvikles nye brokonsept blant annet hengebruere med lange spenn (3-4km), rørtunneller og broer med flytende fundamenter. Noen av de største utfordringene er å kjenne til vinden og turbulensen. Broene blir mest sannsynlig bygget med to kasser (som veibanene ligger på) og det er nytt. Det er dype fjorder, slik at det kan være aktuelt med flytende brotårn. Egenperiodene for slike store og eventuelt flytende konstruksjoner er 30-200 s og man har ikke nok kjennskap til vindspekteret for disse perioder.

For å kunne redegjøre for lastene, er det iverksatt et måleprogram basert på flere 80-100m høye master. Måleprogrammet vil gi detaljert kunnskap om vinden hvor det måles, men fjellet er steilt og går opp i 500m og masterne må stå ganske nær bratte partier. Vinden er veldig topografisk styrt og det er risiko for at målingene ikke er representative på tvers av fjorden. Koherens, som er en viktig parameter, får man ikke målt.

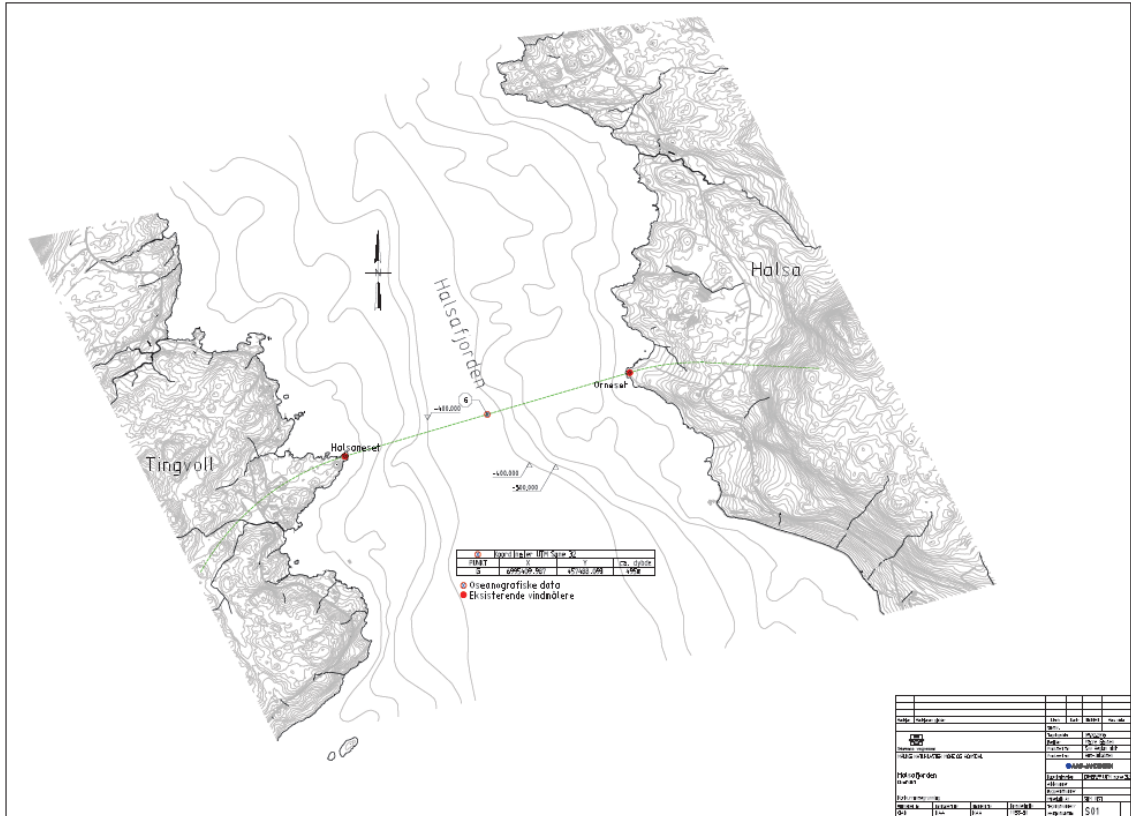
Med de utfordringer en har for lange bruspenn i komplekst terreng er det svært viktig å skaffe god informasjon om vind- og turbulens ute på broene og høyt oppe i brutårnene. Slik informasjon kan i dag skaffes ved hjelp av vindmålinger i høye master på land, eller ved hjelp av finskala meteorologiske modeller/Computational Fluid Dynamics (CFD) modeller. Begge disse metodene har store usikkerheter i komplekst terreng når det skal ekstrapoleres til steder der det vanskelig kan måles, eller modellen brukes i et terreng som er i grenseland av hva den kan klare.

Måleprogrammet

Måleprogrammet i Sulafjorden skal starte opp høsten 2016. Atmosfæredelen av dette programmet består av 6 master á 30-98m i hvert av de røde punkt på land (Figur 1). I målepunkt 1 måles der temperatur, lufttrykk, relativ fuktighet og nedbør i 80 meters høyde. Ellers måles der vind i 10, 30, 80 og 98m. Det er ikke planlagt å måle temperaturprofil men der settes termometer i toppen på flere av mastene. I Halsafjorden (Figur 2) er det satt opp to master som allerede har målt i lengre tid.



Figur 1: Master i Sulafjorden. Figuren er hentet fra Lønseth (2016).



Figur 2: Oppsett Halsafjorden. Figuren er hentet fra SVV (2016).

Utvidelse av måleprogrammet

Den store fordel med Lidar er at der kan måles vind og turbulens i store høyder og over sjøen. Målemetoden har noen særegenskaper og også en del begrensinger. Dette avsnittet gir en kort oversikt over hva man kan forvente av nytteverdi ved å utvide måleprogrammet for Sula og Halsafjorden ved vindmålinger med en eller flere Lidarer samt måling av temperaturprofil.

Lidar

En detaljert beskrivelse av Lidar-typer og måleprinsipper er gitt i Lindelöw (2007). Man kan også se til Clifton *et al.* (2013) selv om disse anbefalinger er skrevet for vindenergi. I dette avsnittet beskrives først hva man kan måle med bare en Lidar og en oppsummering av det, og deretter hva man kan få ut med to eller flere Lidarer.

Vindmåling med en Lidar

Lidar er et laserinstrument som sender ut lyspulser og måler frekvensen av det tilbakespredte lyset fra små partikler i luften innenfor det belyste luftvolumet. Hvis det tilbakespredte lys har et frekvensskift i forhold til det utsendte lys, antas det at det skyldes et Dopplerskift som følge av partikkelbevegelse med komponent parallelt med Lidarens synsretning (den radielle retning). Aerosolinnholdet i luften som sørger for at Lidaren får signal kan variere en del avhengig av lokalitet og værforhold. Hvis det er få aerosoler i luften påvirker det dekningsgraden slik at en Lidar der teoretisk kan måle 6km i praksis kun måler 2,5-3km (Aas-Jakobsen, 2016). Mer vind kan gi mer partikler i luften (for eksempel salt) som gjør at der måles oftere ved høye vindhastigheter. Dermed kan man få en overestimering av midlere vindstyrke (Hahmann, 2016).

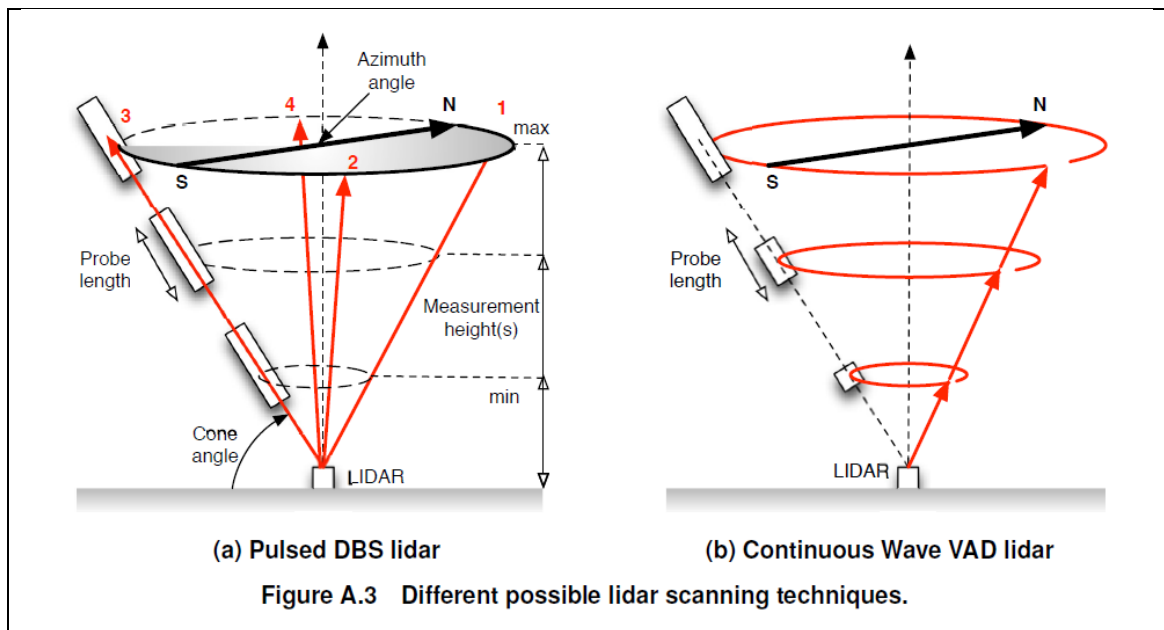
For å måle horisontal vindstyrke og –retning og vertikal hastighet må et sett av målinger med minst 30° vinkel i forhold til hverandre settes sammen. For den profilerende vind-Lidar gjøres det ved å måle i flere retninger i en vinkel fra loddrett (Figur 3). Enten ved å skanne konisk (Velocity-Azimuth-Display) eller ved å peke i et antall forskjellige retninger (Doppler-Beam-Swinging (DBS)). Vinkelen fra loddrett er i begge tilfeller vanligvis 30°. En syklus av målinger dekomponeres og settes sammen til en vindvektor for hver høyde.

Slik skanning i flere retninger påvirker den romlige oppløsning. Hvis vinkelen fra loddrett er α blir diameteren, d , over den horisontale flaten i kjeglen i Figur 3, der måles over for at få en måling av vindvektoren i en høyde H

$$d = H \tan(\alpha)$$

Med en vinkel på 30° fra loddrett blir diameteren 115m i 100m og 570m i 500m høyde. Siden målingene i alle retningene utnyttes til å danne en vindvektor, er det nødvendig å anta at vinden er homogen over dette areal. I tillegg kan en Lidar ikke måle i bare et punkt i rommet, men måler over et langt, tynt volumen i radiell retning (Figur 3). Lengden av luftvolumenet er gjerne 30-50m, men det er den midterste delen som gir mest signal (Lindelöw, 2007, tabell 8). Innenfor området med diameteren, d, og det radielle volumen antas altså vindfeltet å være homogent.

Denne metoden, basert på kun en Lidar med VAD eller DBS, gir gode målinger av vindstyrke og -retning når en sammenligner med vindmålingene (10 minutters middel) fra en mast (cup og sonic anemometer) (Smith *et al.*, 2006; Sathe, 2015; Kumer *et al.*, 2015). Gode målinger av 10 minutters vinden får man også fra flytende Lidar, selv i signifikant bølgehøyde opp til 4m og vind 25m/s (35m) og 31m/s (200m) (DNVGL, 2015). Metoden egner seg godt når instrumentet står i flat terreng eller i sjøen.



Figur 3: En Lidar måler i flere retninger for å oppnå en vertikal vindprofil. Figur fra Clifton *et al.* (2013) som viser to vertikale Lidarprinsipper og målevolumen («probe length»). A) Doppler-Beam-Swinging (DBS) og b) Velocity-Azimuth-Display (VAD).

Ifølge Sathe *et al.* (2011b) er det ikke mulig å måle turbulens med konisk skanning (VAD). Med data fra samme eksperiment fant de også ut at verdiene for maksimum vind (høyeste vind i en 10 minutters periode) var underestimert med 10% (Sathe *et al.*, 2011a) fordi der måles over et stort volumen. Senere modellerte Sathe og Mann (2012) u- og w-komponentene av vindspekteret målt med pulserende DBS Lidar opp til bølgetall $0,08\text{m}^{-1}$. Modellen stemte ikke med den lavfrekvente delen av spektret for v-komponenten, men ved hjelp av denne forståelsen er det likevel mulig å analysere enkeltstråler fra DBS til vindspektra. Tubulensintensiteten (T_i) er et mål som ofte brukes til design av strukturer. Ifølge Bot (2014) er T_i målt med to forskjellige WindCube Lidarer ganske god og ligger mellom T_i fra sonic og cup-anemometer for vindstyrker 4-18m/s.

En skannende Lidar måler over et snitt, for eksempel vertikalt (Range Height Indicator (RHI)) eller flat konisk (Plan Position Indicator (PPI)) (skissert i Figur 4). Det er fortsatt den radiale vinden som måles, og det kan gjøre det komplisert å tolke resultatet. En enkelt skannende Lidar kan likevel gi et bilde av vindforholdene, både av middel og variabiliteten, hvis der skannes langs den dominerende vindretningen (Jakobsen *et al.*, 2015; Kumer *et al.*, 2015). Kumer *et al.* (2014) påviste tolagsstrømning med RHI skanning. Cheynet *et al.* (2016) har benyttet smale PPI skann fra en Lidar (Windcube 100S) på FINO-1 plattformen i Nordsjøen til å beregne koherensen ved å anta at v-komponenten av vinden er 0.

Oppsummert – Bruk av en Lidar:

Siden en DBS Lidar trenger et ganske stort volumen å måle over hvor vinden er homogen, bør den ikke stå nær fjellet. Lidar på bøye kan ikke brukes til målinger av turbulens og koherens, men den kan gi gode målinger av middelvind opp til 200m høyde midt i fjorden. En skannende Lidar som står på land kan gi noe informasjon om vindforholdene, men det vil være vanskelig å ta ut verdier som kan brukes i design. En Lidar alene vil derfor ha begrenset nytteverdi.

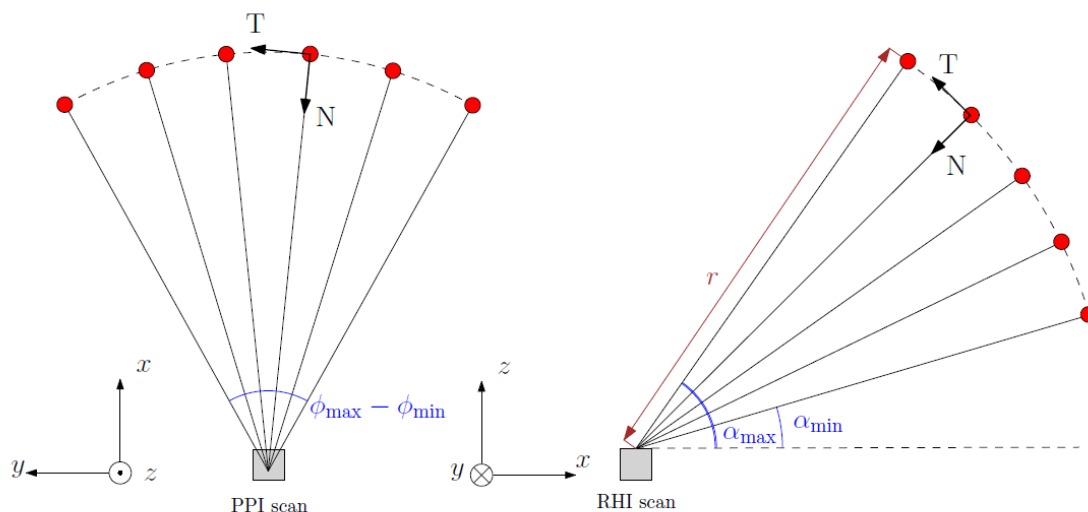
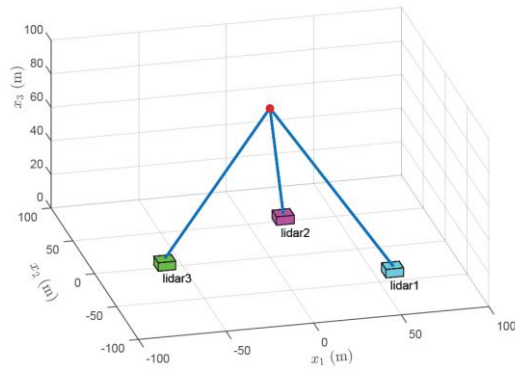


Fig. 1. Schematic of the PPI scan (left) and of the RHI scan (right), with magnified angle to improve the clarity.

Figur 4: Horisontal skanning PPI (til venstre) og vertikal skanning RHI (til høyre). Disse skannemønstre er fabrikkinnstillinger fra produsenten. Figur fra Cheynet *et al.* (2016).

Vindmåling med flere Lidarer

Flere Lidarer kan settes sammen (Figur 5) for å oppnå høyere nøyaktighet og raskere målefrekvens fordi strålene kan fokuseres på et punkt. Multi-Lidar teknikk gir langt større muligheter for å måle turbulens og variasjonene på tvers av en fjord i komplekst terreng (Pauscher *et al.*, 2016). Med skanningen (kombinasjoner av RHI og PPI på flere instrument) eller mer spesialtilpassede målinger kan en få et godt overblikk over de generelle vindforholdene i fjorden.



Figur 5: Tre Lidarer måler på samme volumen. Figur fra Sathe (2015).

Koherens i vind over sjø kan i praksis kun måles ved hjelp av fjernmålingsinstrumenter. Ideelt bør man ha 4 Lidarer for å få til måling av koherens. Da kan de måle to og to samtidig i to punkter. Der må måles i størrelsesordenen et sekund i hvert punkt, så med kun 2 eller 3 Lidarer vil det bli en tidsforsinkelse mellom målingene i de to adskilte punkter. Tidsforsinkelsen vil redusere det frekvensområdet der måles med cirka en tredjedel (M. Courtney, personlig kommunikasjon). Det har nylig blitt gjort koherensmålinger med Lidar for Bjørnafjorden for Statens Vegvesen. Dataene er ikke ferdig analysert ennå. I Bjørnafjorden kunne man på grunn av geografien lage et oppsett hvor to Lidarer målte omtrent 90° på hverandre, som derved gir god oppløsning av de horisontale vindkomponentene.

Ved å analysere enkeltstråledata fra flere Lidarer som sampler med 1Hz kan man få gode målinger av u- og v-komponentene av vindspekteret fra lave frekvenser og opp til 0,5 Hz. På grunn av størrelsen på målevolumenet blir energien i spekteret noe dempet, men det kan det mest sannsynlig korrigeres for ved hjelp av sonic-målingene fra masterne (Mann *et al.*, 2009).

Oppsummert - Bruk av flere Lidarer:

Optimalt oppsett er avhengig av hvor mange Lidarer man har til rådighet, derfor foreslår vi ikke noe konkret oppsett her. Det som vil gi mest informasjon og minst usikkerhet, er fire skannende Lidarer som står på land. Det ventes at fire Lidarer vil gi gode målinger langs brotraseen og brotårn av:

1. vindprofiler (10minutters middel) opp til ønsket høyde
2. de generelle vindforholdene
3. vertikal og lateral koherens av horisontal vind (u,v)
4. turbulensspektra for u og v opp til 0,5 Hz.

Med fire instrumenter har man også sikkerhet for, at det kan måles selv om et instrument er ute av drift en periode. Hvis man kunne plassere en Lidar på fast grunn, så den peker ned eller opp til målepunktet ville det også være mulig å få ut spekteret til w-komponenten, men det virker vanskelig å få til.

Med 2-3 instrumenter blir frekvensområdet (under punkt 3) redusert fordi det ikke kan måles samtidig i to punkter. Den romlige dekningsgraden, altså skanningen over fjorden, blir mest sannsynlig også redusert, men det kan det kanskje kompenseres for, ved å måle i lengre tid.

Målinger og modellering

Det skisserte opplegget for måling av vind vil kartlegge vinden på og i nærhet av brotraseene. For å bedre utnyttelsen av disse målingene brukes detaljerte atmosfæremodeller for å fylle ut i rommet i det bildet som observasjonene gir. Modeller er uunnværlige siden de har en tredimensjonal og konsistent beskrivelse av vindforholdene i hele fjorden, men de kan ikke gi helt sikre svar uten at det sammenlignes med målinger.

Hvordan luften strømmer når den kommer i kontakt med terreng er bestemt av luftens stabilitet i tillegg til skalaen til værphenomenet. I de norske fjorder er det aktuelt å undersøke situasjoner med forsterket strømming over fjell og forhold som fører til danning av rotor (Doyle og Durran, 2002). Både målekampanjer og modellstudier underbygger at temperaturinversjoner har en essensiell betydning for både strømmingen nær bakken og dannelsen av rotor (Vospher, 2004; Ágústsson *et al.*, 2014). Stabiliteten spiller også generelt en rolle for det vertikale vindprofilen opp til ca. 100m.

Lufttemperatur er den parameteren som sier mest om stabiliteten i atmosfæren. I værvarslingsmodellene benyttes det radiosonder/værballonger til å måle temperaturen med høyden. I Norge sendes det opp radiosonder 2-4 ganger for dagen flere steder. I Midt-Norge er det dessverre langt til de nærmeste radiosonde-stasjonene som er i Stavanger (Sola) og Bodø.

Nær bakken/sjøen kan stabiliteten anslås ut fra forskjellen mellom sjøtemperatur i overflaten og lufttemperaturen. Termometre i tre høyder på en høy mast er et sikrere mål og vil gjøre det enklere å forstå de lokale vindmålingene. Når det gjelder modellering av fallvinder, rotor og horisontale hvirvler, vil en sannsynligvis trenge temperaturmålinger opp til 1500m eller høyere for å sikre at modellen har korrekt stabilitet eller forstå eventuelle forskjeller mellom modellresultat og målinger.

Oppsummert:

- Det anbefales å måle temperaturen i 3 høyder i en av 100m mastene. Det vil gi informasjon for bedre å forstå de observerte og modellerte vindforhold.

Oppsummering

Selv om det alltid vil være en viss risiko knyttet til bruk av ny teknologi, er potensiell nytteverdi her så stor at vi vil anbefale måling med flere Lidarer i et multi-Lidar oppsett.

Hvor mange Lidarer som bør anvendes avhenger av økonomien, men ifølge vår rekognosering vil fire gi optimal uttelling. Det fysiske oppsettet er avhengig av hvor mange og hvilke Lidar der anvendes samt de tekniske og geografiske muligheter og begrensninger, så derfor har vi ikke skissert mulige oppsett.

Vi har pekt på nytteverdien ved å bruke modeller sammen med målingene. En får gjennom målinger med Lidar meget god informasjon som også vil være nyttig i design av tilsvarende måleopplegg, ikke minst for andre fjordkryssinger for E39, men også andre vegprosjekter og også ved planlegging og bruk av annen infrastruktur der informasjon om vind- og turbulens er viktig (for eksempel flyplasser). Temperaturmålinger vil øke verdien av måleprogrammet vesentlig når det gjelder å la modeller og målinger utfylle hverandre. Vi anbefaler at det utføres temperaturmålinger i de samme høyder som vindmålingene (tre høyder) på en av de høyeste mastene (for eksempel Kvitneset). Vi antar at temperaturmålingene kan tilføyes med beskjeden ekstrakostnad.

Referanser

- Ágústsson, H., H. Ólafsson, M.O. Jonassen and Ó. Rögnvaldsson (2014) The impact of assimilating data from a remotely piloted aircraft on simulations of weak-wind orographic flow, *Tellus A* 2014, 66, 25421, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v66.25421>.
- Bot (2014) Turbulence assessment with ground based LiDARs, rapport nr. ECN-E--14-043. Finnes på <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2014/e14043.pdf>
- Cheyne, E, JB Jakobsen, B Svandal, J Reuder, V Kumer (2016) Wind coherence measurement by a single pulsed Doppler wind lidar, *Energy Procedia*, in press.
- Clifton, A., D. Elliott, M. Courtney (2013) Recommended practices for remote sensing for wind energy applications, IEA wind. http://www.ieawind.org/index_page_postings/RP/RP%2015_RemoteSensing_1stEd_8March2013.pdf
- DNVGL (2015) *Assessment of the Fugro Oceanor Seawatch Wind Lidar buoy pre-deployment validation on Frøya*, Norway, GLGH-4237 13 10378-R0004, Rev B.
- Doyle, J.D., and Durran, D.R. (2002) *The dynamics of mountain-wave-induced rotors*, *J. Atmos. Sci.*, 59, 186-201
- Hahmann, A, R Floors, A Peña, J Du and XG Larsén (2016) *Preliminary results from the RUNE and X-WiWa projects*, Presentasjon på NORCOWE avsluttende konferanse i Bergen. Presentasjonen finnes på <http://norcowe.no/index.cfm?id=432911>.
- Jakobsen, JB, E. Cheynet, J. Snæbjørnsson, T. Mikkelsen, M Sjøholm, N. Angelou, P. Hansen, J. Mann, B. Svandal, V. Kumer, J. Reuder (2015) *Assessment of wind conditions at a fjord inlet by complementary use of sonic anemometers and Lidars*, *Energy Procedia*, 80, 411 – 421.
- Kumer, V.M., J. Reuder, B.R. Furevik (2014) *A comparison of Lidar and radiosonde wind measurements*, *Energy Procedia*, 53, doi: 10.2016/j.egypro.2014.07.230
- Kumer, V.M., J. Reuder, B. Svandal, C. Sætre, P. Eecen (2015) *Characterisation of Single Wind Turbine Wakes with Static and Scanning WINTWEX-W LIDAR Data*, *Energy Procedia*, Volume 80, 2015, doi:10.1016/j.egypro.2015.11.428
- Lindelöw, P. (2007) *Fiber Based Coherent Lidars for Remote Wind Sensing*, PhD Thesis, DTU. <http://orbit.dtu.dk/files/4957725/Thesis%20final%20A4.pdf>
- Lønseth, L. (2016) *Fjordkryssinger for E39 SVV Region Midt: Oversikt over bøyer med utstyr og planer for utsetting*, Fugro Oceanor Memorandum, C75365, 26. september 2016.
- Mann, J., J.-P. Cariou, M. Courtney, R. Parmentier, T. Mikkelsen, R. Wagner, P. Lindelöw, , M. Sjøholm, K. Enevoldsen, (2009) *Comparison of 3D turbulence measurements using three staring wind lidars and a sonic anemometer*, *Meteorologische Zeitschrift*, Volume 18, Number 2, pp. 135-140(6)
- Pauscher, L., N. Vasiljevic, D. Callies, G. Lea, J. Mann, T. Klaas, J. Hieronimus, J. Gottschall, A. Schwesig, M. Kühn and M. Courtney (2016) *An Inter-Comparison Study of Multi- and DBS Lidar Measurements in Complex Terrain*, *Remote Sensing*, 8(9), 782; doi:10.3390/rs8090782, <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/9/782>

Sathe, A, M Courtney, J Mann, R Wagner (2011a) *How good are remote sensors at measuring extreme winds?* EWEA offshore wind conference.

http://orbit.dtu.dk/files/5522937/Sathe_paper_EWEA2011presentation.pdf

Sathe, A, J. Mann, J. Gottschall, and M. S. Courtney (2011b) *Can Wind Lidars Measure Turbulence?*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, DOI: 10.1175/JTECH-D-10-05004.1.

Sathe, A., and J. Mann (2012), *Measurement of turbulence spectra using scanning pulsed wind lidars*, J. Geophys. Res., 117, D01201, doi:10.1029/2011JD016786

Sathe, A. (2015). *Estimating Turbulence Statistics and Parameters from Lidar Measurements*. Remote Sensing Summer School. DTU Wind Energy. (DTU Wind Energy E; No. 0085). <http://orbit.dtu.dk/files/110853896/RSSummerSchool2015.pdf>

Smith, DA, M Harris, AS Coffey, T Mikkelsen, HE Jørgensen, J Mann, R Danielian (2006) Wind Lidar evaluation at the Danish wind test site in Høvsøre, DOI: 10.1002/we.193.

SVV (2016) Konkurransesgrunnlag for *Tilbud miljølaster Fjordkrysning E39 Statens vegvesen region midt Saksnummer: 16/18890*, Statens Vegvesen, Versjon 1.10.

Vospher (2004) *Inversion effects on mountain lee waves*, Q. J. R. Meteorol. Soc., 130, pp 1723-1748

Aas-Jakobsen, K, (2016) *Lidarmålinger i Halså og Sulafjorden*, notat fra Aas-Jakobsen, 7. juli 2016.