
RAPPORT

STOCKHOLM EXERGI AB

Lövsta, underlag för tillståndsansökan och detaljplan

UPPDRAGSNUMMER 15004422

SPRIDNING AV FÖRORENAD SEDIMENT FRÅN LÖVSTA OM PROJEKTET INTE GENOMFÖRS



RAPPORT

2019-12-20

SWECO ENERGY AB
STRÖMNINGSTEKNIK OCH DAMMAR

JULIUS FRITZELL, CARSTEN STAUB
GRANSKNING: PIERRE-LOUIS LIGIER, NON OKUMURA

Innehållsförteckning

1	Inledning	3
2	Metodik	3
2.1	Historik och metodik	3
2.2	Analys av yttre rörligt sedimentlager	4
2.3	Vind- och vågförhållanden	5
3	Samlad bedömning	6
4	Referenser	6

Bilaga 1 – Tjocklek av rörliga sedimentlagret

Bilaga 2 – Vind och våg analys

1 Inledning

Syftet med denna rapport är att uppskatta nuvarande bottenerosion som sker inom det planerade muddringsområdet på grund av rådande förhållanden.

Om projektet genomförs kommer förorenat bottensediment i Lövsta att tas bort genom muddring. En mindre del av bottensedimentet spills under muddringen, vilket ger anledning till viss spridning av förorenat sediment. Denna spridning har utretts i detaljer.

Om projektet inte genomförs ligger förorenade bottensedimenten kvar, men är utsatt för transportprocesser från vågor, strömmar och påverkan från propellerströmmar från fritidsbåtar. Även skred kan ha en betydelse som framtida spridningsprocess. Nedan diskuteras möjlig spridning av förorenat bottensediment i Lövsta under förutsättning att projektet inte genomförs.

2 Metodik

2.1 Historik och metodik

Föroreningen av bottensediment antas ha pågått fram till 1986, men att den gradvist upphört under några år. Härefter kan man anta att bottenens topografi gradvis har inställt sig efter rådande förhållanden, format av vågor, strömmar och även skred i massorna under de första åren. Efter att deponeringen av förorenat material upphört kommer detta att erodera gradvist, med störst erosion i början och därefter minskande över tid. Den genomsnittliga årliga erosionen/spridningen kan antas vara ganska liten efter mer än 30 år utan tillförsel av förorenat material. Yttre påverkan varierar med säsongen och botten kan därför antas ha inställt sig i 'dynamisk jämvikt'. Dynamisk jämvikt betyder i detta sammanhang att säsongförändringarna under året på bottenivån troligen är betydligt större än de små årliga medelförändringarna över längre tid.

Faktorer som orsakar erosion på botten är vågor och skeppspropeller som kan erodera botten på relativt grunt djup. Naturliga strömmar förmår inte att bidra till betydande bottenerosion, förutom i strandzonen, men bidrar genom att transportera sediment som redan har lyfts i suspension av vågor och skeppspropeller - eller i event av skred.

Sediment som av strömmar transporteras ut på stort vattendjup (> ca 10 m) och sedimenterar där antas inte längre kunna transporteras av vågor och strömmar. Däremot kan biologiska processer fortfarande orsaka förflyttning av föroreningsämnen.

Sedimentprover visar att ett tunt lager (några få centimeter) av bottenytan har en annorlunda karaktär. Man kan anta att detta lager utgör ett aktivt sedimentlager som flyttas omkring med de säsongvariationer som pågår år efter år. Nedre gränsen av detta lager kan antas representera en erosionshorisont för årsvariationer. Övre gränsen känner vi i princip inte. Denna skulle kunna representeras av ett fall med minimal omrörning och maximal sedimentation av bottensediment, vilket man troligtvis har i slutet av sommaren där klimatpåverkan generellt är lägst förekommande under året.

En metodik till beskrivning av den erosions/sedimentationsprocess som pågår i nuläget och ger upphov till viss spridning av föroreningar om inte projektet genomförs kan beskrivas i följande steg:

1. Fastlägga när föroreningen av bottensedimenten i Lövsta upphörde. Vi har antagit att föroreningen upphörde 1986.
2. Bedöma utifrån bottenprover (foton) tjockleken på ett aktivt yttre lager och beräkna mängden av detta lager av sediment inom området som ska muddras om projektet genomförs. Detta lager har bedömts ha en tjocklek på 1-3 cm (Bilaga 1).
3. Utvärdera om detta yttre lager har större/mindre/samma föroreningsgrad som materialet under. Här har inga signifikanta skillnader konstaterats.
4. Analysera vindtidsserier (hastighet och riktning) med fokus på perioden 1986 till 2019. Separera vindriktningar med relativt lång stryklängd som kan ge upphov till höga/stora vågor. Bedöma om det finns betydande årsvariationer vad gäller vindhastighet och vindriktning samt analysera om sommaren 2019 var typisk eller inte. Detta har gjorts, se Bilaga 2.
5. Utvärdera ner till vilket vattendjup vindgenererade vågor kan erodera sedimenten. Övergripande bedömning med längsta stryklängd och högsta vindhastighet som ingångsparametrar. Här antas att bottensediment kan transporteras vid 0,1-0,15 m/s bottenhastighet enligt resultat från utförda strömningssimuleringar vid extrema vindar (Sweco, 2019). Analysen visar att vågor högst kan erodera botten ned till ungefär 9 m vattendjup (Bilaga 2), vilket begränsar möjlig årlig erosion inom muddringsområdet. Vågpåverkan går till lägre bottenivå vid lägre vattennivå, men vattennivåvariationer är relativt begränsade. Analys av vattennivåer har därför inte genomförts.

2.2 Analys av yttre rörligt sedimentlager

Utifrån analys av sedimentprover kan tjockleken av det yttre rörliga sedimentlagret beskrivas enligt nedan:

- Fotografierna av upptagna bottenprover visar på ett lager på mellan 1-3 cm som troligtvis kan vara tjockleken på ett övre rörligt lager.
- Utifrån antagandet om att sedimentvariationen som syns på omkring 1-3 cm djup är detta rörliga och mindre förorenade bottenlagret kunde en total volym av detta lager uppskattas till 1126 m³ inom en muddringsyta av 51 500 m² erhållit från ritning K11.1-1002 muddringsplan (KFS, 2019b).
- Vågpåverkan kan erodera botten ner till 9 m vattendjup. Bara ca 21 % av muddringsarean ligger på djup mindre än 9 m. Ungefär 10800 m² av de totala 51 500 m² har mindre än 9 m vattendjup.
- Ca hälften av sedimentproverna finns på djup mindre än 9 m. I dessa prover har ytskiktet en medeltjocklek på ca 2,5 cm.

- Volymen av det rörliga ytlagret inom muddringsområdet som har mindre än 9 m vattendjup ($10\,800\text{ m}^2$) blir ca 270 m^3 .

För detaljer kring använd metodik hänvisas till Bilaga 1.

2.3 Vind- och vågförhållanden

En utredning av rådande vind- och vågförhållanden har utförts för att identifiera känsligheten av bottenerosion av dessa naturliga faktorer, se Bilaga 2. En sammanställning av de viktigaste punkterna ges nedan:

- Den vanligaste vindriktningen är från sydväst både för hela den uppmätta 80 årsperioden samt för åren 1986-2019. Åren 1986-2019 har varit lugnare vad gäller dygnsmedel av vindhastigheten än de senaste 80 åren i stort. Om detta är en indikation att perioden 1986-2019 varit ovanligt lugn vad gäller vind finns risk att sediment som ännu inte spridits kan eroderas av framtida kraftigare vindar.
- Sommarhalvåret och speciellt juli och augusti har lägre vindhastigheter både vad gäller månadsmedelvärde samt månadsmaxvärde än resterande månader.
- Generellt tyder mätningarna på att vindhastigheterna har varit avtagande under den 80 åriga mätperioden.
- Kraftiga vindar har under den senaste 80-årsperioden varit vanligast från väst, nordväst eller syd medan de mellan åren 1986-2019 framförallt kommit enbart från väst. Höga vindhastigheter från nordväst eller syd kan därför tänkas inträffa i framtiden som skulle kunna erodera ej tidigare spridda massor.
- Dagsmedelvind på omkring 14 m/s har en ungefärlig återkomsttid på 80 år.
- Vindhastigheter på omkring 14 m/s som har förekommit från de två längsta stryklängdsriktningarna under senaste 80 åren kan ge bottenhastigheter på över 0,1-0,2 m/s ner till stora vattendjup enligt resultat från utförda strömningssimuleringar vid extrema vindar (Sweco, 2019). Dessa strömningförhållanden genererar dock bottenskjuvspänningar som ligger i princip under $0,1\text{ N/m}^2$ (utom i strandzonen) vilket anses vara en rimlig uppskattning av den kritiska bottenskjuvspänningen för bottensedimenten. Detta innebär att ingen betydande bottenerosion bedöms kunna ske vid extrema vindförhållanden.
- Med vindhastighet 14 m/s, stryklängd 9 km fås vågor på 0,9 m höjd och vågperiod 3,6 sek. Med hjälp av Swarts formel (Swart, 1974) kan vågfriktions-faktorn och därmed den maximala bottenskjuvspänningen beräknas. Vid vattendjup $<9\text{ m}$ uppnås bottenskjuvspänningar som överstiger $0,1\text{ N/m}^2$, vilket innebär att vågorna kan orsaka flyttningar av sedimenten på botten vid vattendjup $<9\text{ m}$.

3 Samlad bedömning

Från resultaten kan en grov bedömning av den rörliga sedimentmängden göras och med antaganden om haltar även en bedömning av årlig förorenings-spridning från muddringsområdet.

En bedömning med stor osäkerhet är att i storleksordning 270 m³ förorenat bottenmaterial från inre delen av muddringsområdet, vilket motsvarar det rörliga ytlagret inom muddringsområdet, transporteras årligen. Vågorna eroderar materialet och en del av detta transporteras därefter i suspension av rådande svaga strömmar. Hur långt materialet transporteras går inte att säga, men en stor andel kommer troligen att deponera inom muddringsområdet men på större vattendjup.

4 Referenser

KFS, 2019a. *Muddring av förorenade sediment*. Underlag till tekniskt möte. 2019-08-27.

KFS, 2019b. *Lövsta energiproduktionsanläggning. Hamnområdet. Geotekniskt PM med beräkningar*. Preliminär handling 2019-10-11.

Swart, D. H. (1974), *Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles*, Delft Hydraulics Laboratory, Publication 131, Delft.

Sweco, 2019. *Spridningsberäkningar vid muddring av bottensediment*. 2019-12-20.

Yoldia Environmental Consulting AB, 2019. *Förslag till kontrollprogram Lövsta*.

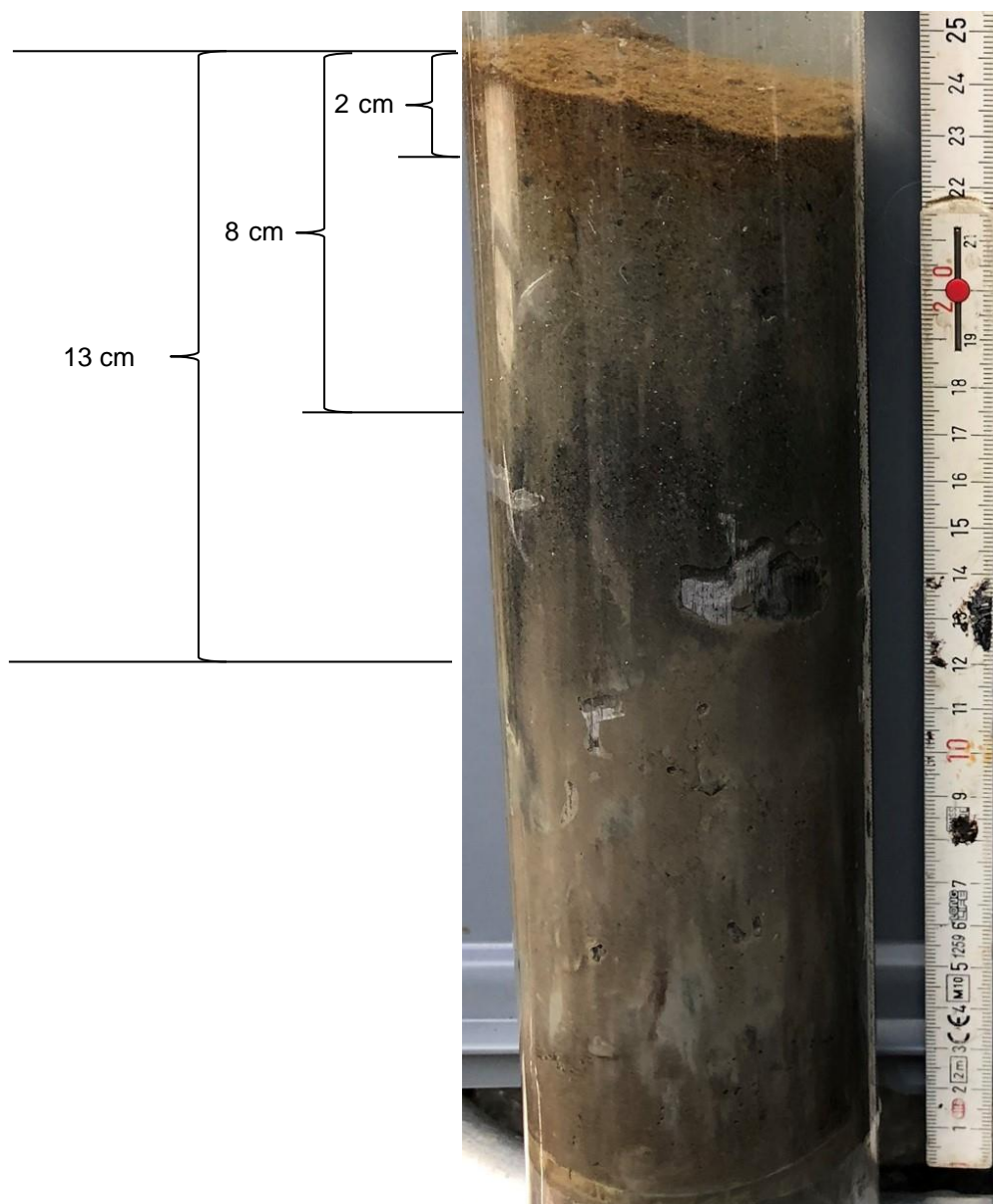
BILAGA 1: TJOCKLEK AV YTTRE RÖRLIGA SEDIMENTLAGRET

UPPDRAG Lövsta tillstånd och DP	UPPDRAGSLEDARE Linn Arvidsson	DATUM 2019-12-20
UPPDRAGSNUMMER 15004422	UPPRÄTTAD AV Julius Fritzell / Carsten Staub	GRANSKAD AV Pierre-Louis Ligier / Non Okumura

Analys av Tjockleken av oförorenat ytskikt av sediment i sjöbotten

Under varje säsong i och med strömmar och stormar antas det översta lagret av bottenytan röra på sig och bytas ut. Detta aktiva lagret kan variera i tjocklek år för år avhängigt av klimatpåverkan. Sediment i detta lagret kan ha sitt ursprung inom muddringsområdet, men oförorenat sediment från utanför muddringsområdet kan tillkomma. Ett övre ytskikt av botten kan därför antas ha en lägre föroreningsgrad än underliggande förorenade sediment. Genom att uppskatta djupet på detta bottenytelager kan slutsatser dras kring hur den säsongsmässiga förändringen av bottenytan ser ut.

För att uppskatta tjockleken på detta lager har foton från provtagningar under 2019 samt analysresultatet av förordningshalter i provpunkterna analyserats (Yoldia, 2019). Från fotografierna togs variationer i sedimentet ut och respektive lagrets tjocklek antecknades, se exempel i Figur 1.



Figur 1 Exempel på ett provresultat och hur indelningen av olika lager gjordes (Yoldia, 2019).

Detta gjordes för samtliga 64 prover där fotografier fanns, vilka var; 1ab, 2ab, 4ab, 5ab, 7ab, 8ab, 11ab, 13ab, 14ab, 15ab, 16ab, 17ab, 18ab, 19ab, 20ab, 21ab, 22a, 23ab, 24ab, 25ab, 26ab, 28a, 30ab, 31ab, 32ab, 35ab, 36ab, 39ab, 40ab, 41 ab, 42ab, 43ab, samt 44ab. För de flesta proverna kunde ett eller två lager identifieras där det översta lagrets tjocklek normalt varierade mellan 1-3 cm och där nästa bottenvariation återfanns på omkring 6-10 cm djup från bottenytan. Analysen från fotografierna jämfördes också med givna kommentarer i analysresultatet för respektive prov. För att kunna bedöma huruvida dessa identifierade lager består av förorenade massor eller av ett potentiellt mindre förorenat ytskikt jämfördes dessa nivåer med analysresultatet av föroreningshalterna på olika nivåer. Intervallen där föroreningshalterna är analyserade varierar beroende på prov men är oftast gjorda i intervaller om 10 cm enligt 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm etc., vilket är väl grovt för just detta syfte eftersom vi ser på tjocklek bara några få cm. Analysen

av föroreningshalterna visar att för vissa prover ökar föroreningsgraden från det översta lagret till det näst översta, i andra prover är det oförändrat och i andra fall minskar det. Det bör nämnas att för samma prov kunde ibland halten av vissa metaller och föroreningar minska medan den ökar för andra, från en nivå till nästa. Med detta resultat är det inte möjligt att konkludera att yttre lagret är mindre förorenat än det som ligger under.

Sammantaget kan analysen av jämförelsen mellan fotografierna och föroreningshalterna på olika nivåer tyda på att det oförorenade ytskiktets tjocklek inte är omkring 10 cm då ingen tydlig trend kunde dras mellan föroreningshalter på 0-10 cm respektive 10-20 cm. Det indikerar att den sedimentvariation som på flera av fotografierna låg mellan 6-10 cm troligtvis inte är nivån för det oförorenade lagret av bottenytan. Det är därför troligare att nivån som från fotografierna identifierades på omkring 1-3 cm skulle kunna vara gränsen för det oförorenade lagret av bottenytan. För att med stor säkerhet kunna säga att detta lager är gränsen för det oförorenade ytsedimentet skulle analys av föroreningsnivåer med tätare intervall än 10 cm ha behövts göras. Däremot kan det ses som troligt att detta rörliga ytsediment skulle kunna ha en tjocklek på omkring 1-3 cm vilket också fotografierna av proverna tyder på.

Detta lagers tjocklek är förhållandevis konstant inom det intressanta området. Medelvärde av detta lagers tjocklek beräknades därför från samtliga fotografier där en gräns kunde utskiljas. Medelvärdet blev 2,2 cm och detta värde användes till att uppskatta volymen för hela detta lager. Den totala muddrings arean är 51 500 m², och total volym för ytskiktets beräknas till 1126 m³.

- Fotografierna av upptagna bottenprover visar på ett lager på mellan 1-3 cm som troligtvis kan vara tjockleken på ett mindre förorenat övre rörligt lager.
- Utifrån antagandet om att sedimentvariationen som syns på omkring 1-3 cm djup är detta rörliga och mindre förorenade bottenlagret kunde en total volym av detta lager uppskattas till 1126 m³.
- Vågpåverkan kan erodera botten ner till 9 m vattendjup (se Bilaga 2). Bara ca 21 % av muddringsarean ligger på djup mindre än 9 m. Ungefär 10 800 m² av de totala 51 500 m² har mindre än 9 m vattendjup.
- Ca hälften av sedimentproverna ligger på djup mindre än 9 m. I dessa prover har ytskiktet en medeltjocklek på ca 2,5 cm.
- Volymen av det rörliga ytlagret inom muddringsområdet som har mindre än 9 m vattendjup (10 800 m²) blir ca 270 m³.

Referenser

Yoldia Environmental Consulting AB, 2019. Sedimentundersökningar Lövsta 2018.

BILAGA 2: VÅGOR OCH VIND

UPPDRAG Lövsta tillstånd och DP	UPPDRAGSLEDARE Linn Arvidsson	DATUM 2019-12-20
UPPDRAGSNUMMER 15004422	UPPRÄTTAD AV Julius Fritzell / Carsten Staub	GRANSKAD AV Pierre-Louis Ligier / Non Okumura

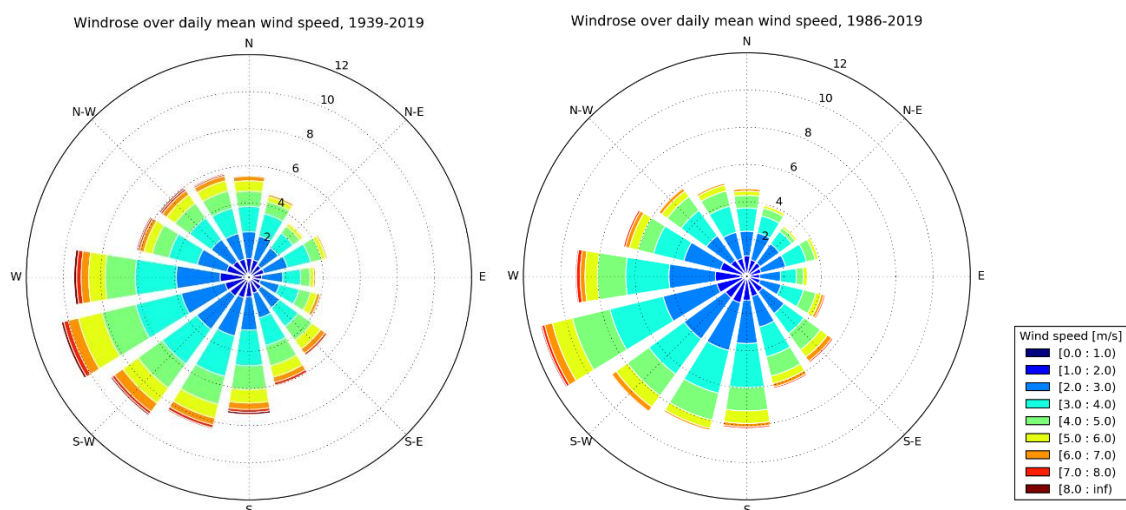
1. Inledning

Inom ramen av uppskattning av nuvarande bottenerosion som sker inom det planerade muddringsområdet på grund av rådande vind- och vågförhållanden har analyserats. De två viktigaste naturliga faktorerna som orsakar erosion är strömmar och vågor. Både dessa faktorer styrs i huvudsak av vindar och därför har vind- och vågförhållanden utretts för att identifiera känsligheten av bottenerosion.

I vidare analysen antas att strömmar inte förmår erodera bottnen men bidrar genom att transportera sediment som har lyfts i suspension av vågor.

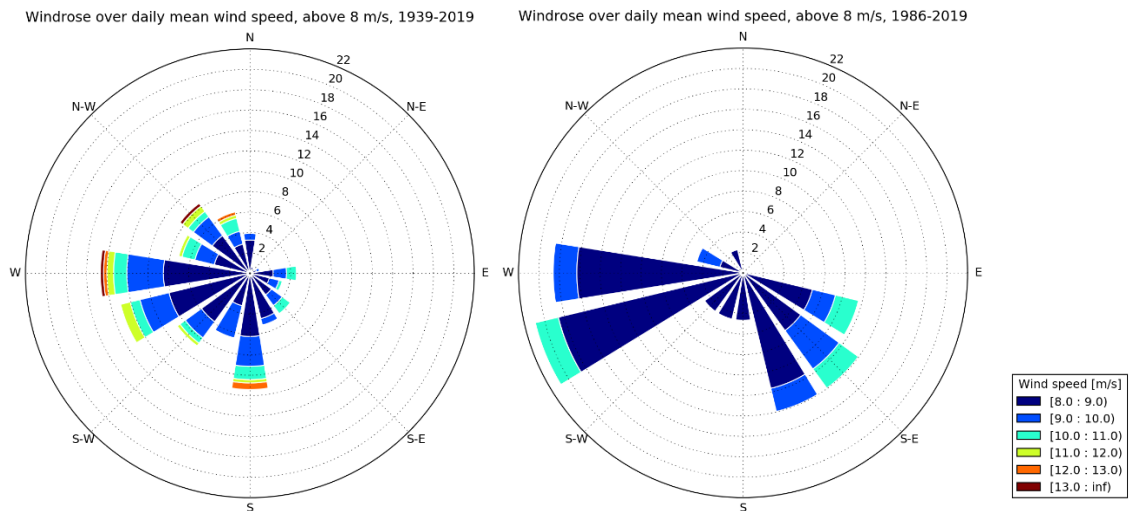
2. Vindanalys

Vinddata från SMHI:s mätstation i Brommas flygplats (59.3537 N, 17.9513 Ö) har använts i vindanalysen. Vindhastighet samt vindriktning har mätts på 10 m höjd över omgivande marknivå. Vindhastighet och vindriktning är uträknade som 10 min medelvärden ett antal gånger per dygn. Första mätningarna är från 1939 och sträcker sig fram till idag. Antalet mätningar per dygn varierar däremot under åren med mätningar endast var sjätte timme vissa år upp till varje timme för andra år. För att kunna jämföra dessa mätningar under lång tid har därför dygnsmedelvärden för hastighet och vindriktning beräknats. Resultatet över hela mätperioden kan sedan jämföras med resultatet mellan åren 1986-2019. En vindros för respektive period 1939-2019 samt 1986-2019 har tagits fram med illustration av dygnsmedelvärdet för vindhastighet och vindriktning, se Figur 2-1.



Figur 2-1. Vindrosor över dygnsmedelvärden för hela mätperioden 1939-2019 samt över perioden 1986-2019.

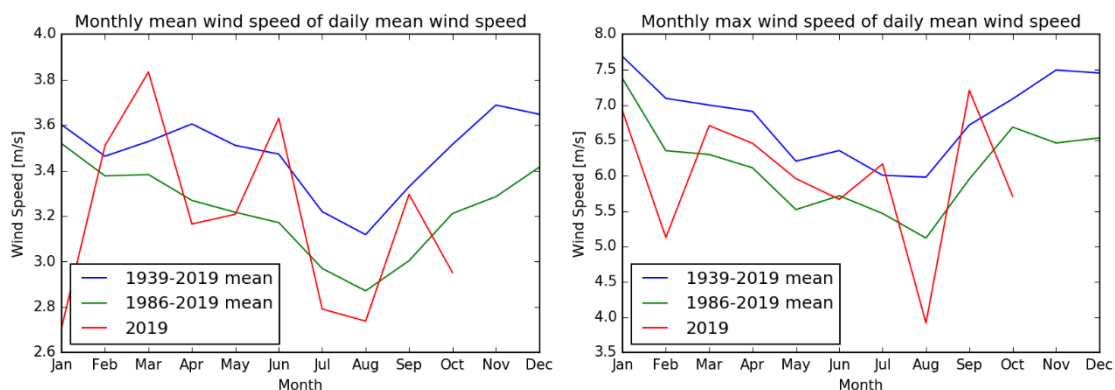
Resultatet från Figur 2-1 visar att den vanligaste vindriktningen är från sydväst både för hela den uppmätta tiden samt för åren mellan 1986-2019. Skillnaden som kan uppfattas är att dygnmedelvärden med en vindhastighet över 8 m/s är mer sällan förekommande under åren 1986-2019 än under hela mätperioden generellt. Detta kan studeras mer i detalj om motsvarande jämförelse görs endast för vindhastigheter över 8 m/s, se Figur 2-2.



Figur 2-2. Vindrosor över dygnmedelvärden för hela mätperioden 1939-2019 samt över perioden 1986-2019.

Resultatet från Figur 2-2 visar att under åren 1986-2019 har inga dygnmedelvärden med vindhastighet över 11 m/s förekommit medan det under hela den uppmätta tidsperioden gjort det vid ett antal tillfällen. Det går också att utläsa att de allra högsta medelvindhastigheterna (över 12 m/s) kommit från väst, syd eller nordväst.

För att analysera säsongsvariationer beräknades för vindhastigheten varje månads medelvärde samt maxvärde ut från samtliga dygnmedelvärden. Detta gjordes för alla år mellan 1939-2019 och för att representera ett normalår beräknades medelvärdet, dels för hela perioden samt för åren 1986-2019 och jämförde också mot 2019 separat, se Figur 2-3.

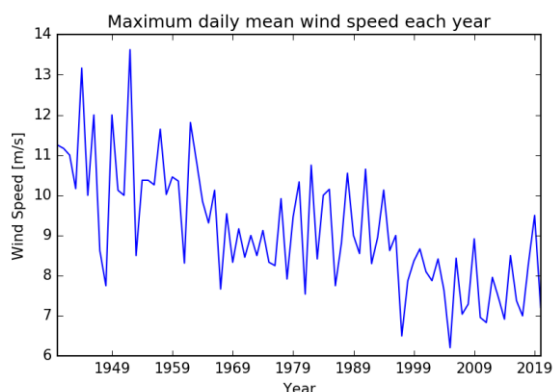


Figur 2-3. Medelvind samt maximal vind per månad beräknat från dagsmedelvind för hela mätperioden 1939-2019, 1986-2019 samt 2019 separat.

Resultatet i Figur 2-3 visar att sommarhalvåret och speciellt juli och augusti har lägre vindhastigheter både vad gäller månadsmedelvärde samt månadsmaxvärde än resterande

månader. Resultatet visar också att åren mellan 1986-2019 har haft lägre vindhastighet både vad gäller månadsmedel och månadsmax än under hela mätperioden. Vinddata för 2019 visar på stora variationer i vindhastighet i förhållande till ett medelår vilket är förväntat då årliga variationer jämnas ut i medelvärdesberäkningar. Vad gäller maximal dygnsmedelvind per månad har det i juni och september 2019 påträffats något högre vindar än för ett normalår medan augustis högsta dygnsmedelvind är omkring 2 m/s lägre än för ett normalår.

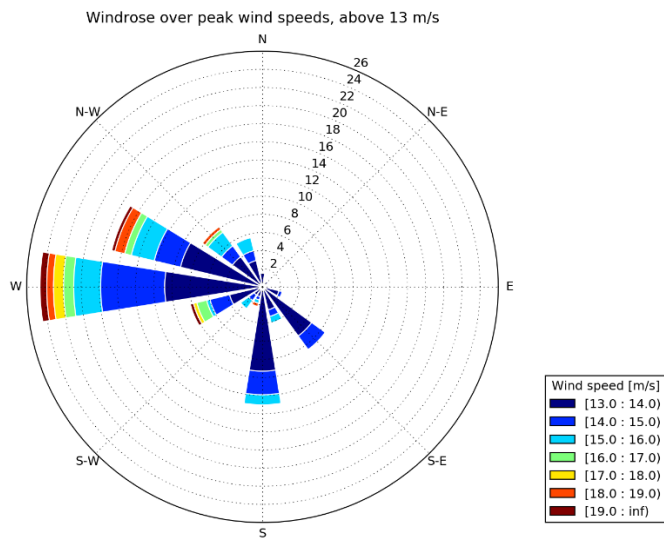
För att se hur den maximala dygnsmedelhastigheten varierat över hela mätperioden togs varje maximala dygnmedelvärde för varje år fram, se Figur 2-4.



Figur 2-4 Maximala dygnsmedelvärdena över vindhastighet varje år från 1939-2019.

Från Figur 2-4 går det att utläsa att de maximala dygnsmedelvärdena för varje år varierar från ungefär 6 m/s till 14 m/s. Det är en stor skillnad och visar på att vissa år är mycket lugna vad gäller maximala dygnsmedelvärden medan andra år där stormar inträffat kan visa på höga dygnsmedelvärden. Generellt har åren från 1965 och framåt varit lugnare än tidigare och inga maximala dygnmedelvärden över 11 m/s har uppmätts. Från 1995 och framåt har inga dygnsmedelvärden över 10 m/s påträffats.

Då maximala vindhastigheter under kortare perioder än under hela dygn kan ha stor betydelse för vågor är det intressant att även studera från vilka riktningar de allra högsta uppmätta vindhastigheterna har inträffat. Dessa data är alltså inte dygnsmedelvärden utan av SMHI uppmätta 10 min medelvärden. Figur 2-5 visar en vindros där endast vindhastigheter över 14 m/s tagits med samt från vilken riktning de kommit. Figur 2-5 visar att rakt västlig vindriktning är den vanligaste för vindar över 14 m/s men att nordvästliga samt sydliga också förekommer.



Figur 2-5. Vindros över 10 min vindmedelvärden där endast vindhastigheter över 14 m/s tagits med för att visa varifrån de strakaste vindarna kommer.

Utifrån ovanstående analys kan följande slutsatser formuleras:

- Åren 1986-2019 har varit lugnare vad gäller dygnsmedel av vindhastigheten än de senaste 81 åren i stort. Om detta är en indikation att perioden 1986-2019 varit ovanligt lugn vad gäller vind finns risk att sediment som ännu inte spridits kan eroderas av framtida kraftigare vindar.
- Kraftiga vindar har under den senaste 81-årsperioden varit vanligast från väst, nordväst eller syd medan de mellan åren 1986-2019 framförallt kommit enbart från väst. Höga vindhastigheter från nordväst eller syd kan därför tänkas inträffa i framtiden som skulle kunna erodera ej tidigare spridda massor.
- Den maximala dygnsmedelvinden varje år har under den senaste 81-årsperioden varierat mellan omkring 6-14 m/s där en dygnsmedelvind på omkring 14 m/s har en ungefärlig återkomsttid på 81år.
- För vågbildning har vindar som håller i sig under ett antal timmar större påverkan än kortade vindbyar, men mycket kraftiga vindar under kortare perioder kan också ha en betydelse. De allra kraftigaste vindbyarna, över 17 m/s, har genom åren kommit från väst.

3. Våganalys

Utifrån vindanalysen har en våganalys utförts där först de längsta stryklängderna togs fram, d.v.s. de längsta sträckorna med fritt vatten som vinden kan blåsa över. För analysen användes kartor från Google Maps och den lägsta stryklängden återfanns i nästan rakt sydlig vindriktning och är på omkring 9 km, se Figur 3-1. En stryklängd på omkring 3 km i nordvästlig vindriktning finns också. Dessa två stryklängder och dess riktningar används som underlag för våganalysen.



Figur 3-1. Karta över Lövstafjärden och längsta stryklängder. (bakgrundkarta från google maps).

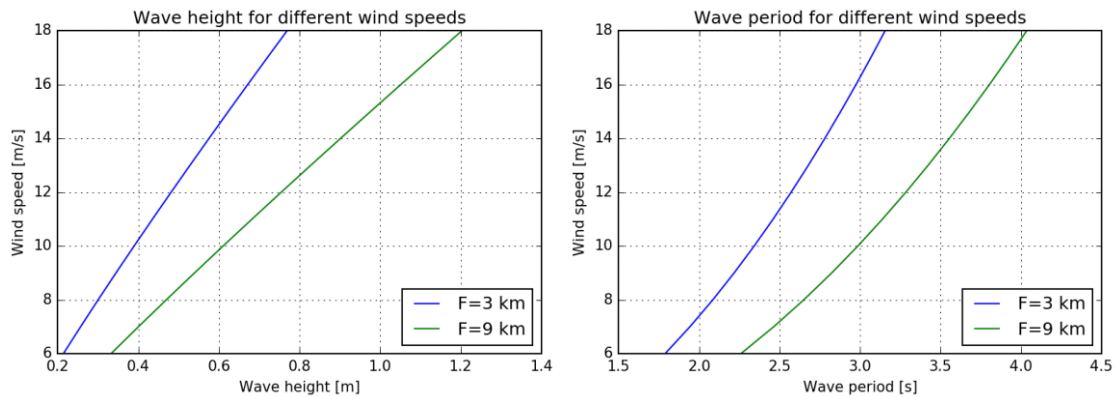
Från vindanalysen och Figur 2-2 framgår det att dessa två riktningar vid flera tillfällen haft höga dygnsmedelvindhastigheter under den senaste 81-årperioden men att de inte varit så vanliga mellan åren 1986-2019. Våganalysen bygger på att vågor genererade av kraftig vind gör att vattnet vid botten börjar röra på sig. Här antas att bottenvattenhastigheter på mellan 0,10-0,25 m/s kan bidra till att transportera botten sediment. Bottenvattenhastigheten u_b , beräknades utifrån vindhastigheten u_v , styrklängden F , samt från det generella botten djupet h (Schiereck-Verhagen, 2012). Det generella botten djupet skall här beskriva ett generellt djup under sträckan där vågen byggs upp, d.v.s. stryklängden. Vattendjupet i den relevanta delen av Mälaren varierar mycket, ett generellt botten djup på mellannivån 30 m valdes för vidare analys. Utifrån vindhastighet, stryklängd och generellt botten djup kunde våghöjd och vågperiod beräknas enligt följande ekvationer (3-1 och 3-2):

$$H_s = \frac{u_w^2}{g} \cdot 0,283 \cdot \tanh \left[0,578 \cdot \left(\frac{gh}{u_w^2} \right)^{0,75} \right] \cdot \tanh \left[\frac{0,0125 \cdot \left(\frac{gF}{u_w^2} \right)^{0,42}}{\tanh \left[0,578 \cdot \left(\frac{gh}{u_w^2} \right)^{0,75} \right]} \right] \quad (3-1)$$

$$T_s = \frac{2\pi u_w}{g} \cdot 1,20 \cdot \tanh \left[0,833 \cdot \left(\frac{gh}{u_w^2} \right)^{0,375} \right] \cdot \tanh \left[\frac{0,077 \cdot \left(\frac{gF}{u_w^2} \right)^{0,25}}{\tanh \left[0,833 \cdot \left(\frac{gh}{u_w^2} \right)^{0,375} \right]} \right] \quad (3-2)$$

Här, H_s är signifikant våghöjd, u_w är vindhastighet, g är gravitation, h är vattendjup och F är stryklängd.

Hur våghöjd och vågperiod beror av vindstyrkan, mellan 6-18 m/s, för de två olika stryklängderna, F = 3 km samt F = 9 km, visas i Figur 3-2.



Figur 3-2. Våghöjd och vågperiod beroende på vindhastighet för ett generellt bottendjup på 30 m för de två olika stryklängderna, 3 km respektive 9 km.

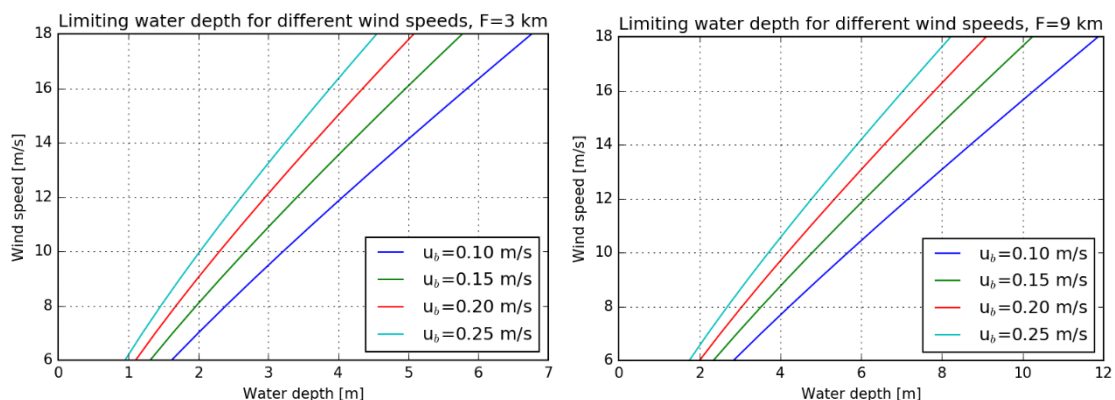
Från de beräknade våghöjderna och vågperioderna kunde sedan bottendjupet där bottenhastigheten överskrider 0,10-0,25 m/s beräknas enligt den följande formeln (3-3):

$$u_{bmax} = \omega \cdot a_b \quad (3-3)$$

$$\text{Där, } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ och } a_b = \frac{0,5H}{\sinh(kh)}$$

Här, ω är vinkelhastighet av vågor, T är vågfrekvens, a_b är vågampplitud på botten, H är våghöjd (alltså signifikant våghöjd i detta fall), k är vågtal, och h är vattendjup.

I Figur 3-3 visas resultatet för de två olika stryklängderna, F=3 km respektive F=9 km, för vindhastigheter mellan 6-18 m/s.



Figur 3-3. Bottenhastigheter som funktion av vindhastighet och vattendjup, med två olika stryklängder, 3 km respektive 9 km.

Resultatet från Figur 3-3 visar att vid en vindhastighet på 14 m/s som är den högsta uppmätta dygnsmedelvindhastigheten under mätperioden fås en bottenhastighet på 0,10 m/s på 5 m djup för en stryklängd på 3 km, och på ungefär 9 m djup för en stryklängd på 9 km. För att bottenhastigheten ska bli högre måste vattendjupet minska, vilket kan ses i figuren. Det är svårt att uppskatta hur kraftiga vindbyar under kort tid påverkar vågstyrkan då vind under en längre tid

krävs för att bygga upp stora vågor, med det går att se att en vindhastighet på 18 m/s skulle kunna ge bottenhastigheter på över 0,10 m/s ner till 12 m djup. Värt att notera är här dock att 10 min medelvärden av vindhastigheten från syd, vilket är den längsta stryklängden, under de senaste 80 åren aldrig överskridit 16 m/s.

Utifrån ovanstående analys kan följande slutsatser formuleras:

- Vindhastigheter på omkring 13-14 m/s som har förekommit från de två längsta stryklängdsriktningarna under de senaste 80 åren kan ge bottenhastigheter på över 0,10 m/s ner till 8-9 m djup.
- Utifrån denna analys kan inte vågor genererade av vind bidra till att erodera sediment på ett större djup än 9-10 m om en bottenhastighet på minst 0,10 m/s antas krävas.

4. Referenser

Roubeyrie, L., Celles, S., 2019. *Windrose Documentation*. 2019-06-10. Hemsida: <https://github.com/python-windrose/windrose>

Schiereck-Verhagen, 2012. *Introduction to bed, bank and shore protection*.