

# Bilaga A – Fördjupad kustteknisk utredning

Stranderosion Smygehamn



# Ändringsförteckning

Ver	Datum	Ändringsbeskrivning	Granskad	Godkänd av
1	2022-06-29	Exemplar för extern granskning.		
2	2023-09-06	Slutversion	EXTERN	SEESCH

**Sweco AB**

**Uppdrag**

**Uppdragsnummer**

**Kund**

**Datum**

**Upprättad av**

**Dokumentreferens**

RegNo 556542-9841

Erosionsskydd Smygehamn

30031540

Trelleborgs kommun

2023-09-06

Emanuel Schmidt

p:\21215\30031540\_erosionsskydd\_smygehamn\000\19 original\bilaga a - fördjupad kustteknisk utredning.docx

# Innehållsförteckning

1	Inledning .....	4
2	Tidigare utredningar .....	5
2.1	Stranderosion i Trelleborgs kommun – Sweco 2012 .....	5
2.2	Projekt Skånestrand – SGU 2016 .....	5
2.3	Kustnära sedimentdynamik – SGU 2020 .....	8
2.4	Fysiska och dynamiska förhållanden längs Skånes kust – SGU 2021 .....	9
3	Kusthydraulik .....	12
3.1	Högvatten .....	12
3.1.1	Karaktäristiska högvatten .....	12
3.2	Vågor .....	13
3.3	Kombinerade händelser .....	14
3.4	Klimatförändringar .....	15
4	Sedimentdynamik .....	17
4.1	Flygfotografianalys .....	17
4.2	Strandprofiler .....	18
4.2.1	Volymförändring vid Äspöholm .....	20
4.3	Modellering av sedimenttransport .....	21
4.3.1	Metodik .....	21
4.3.2	Indata .....	21
4.3.3	Kalibrering .....	22
4.3.4	Resultat .....	22
5	Markförlustmodell .....	23
5.1	Metodik .....	23
5.1.1	Historisk erosion .....	23
5.1.2	Bruuns lag .....	23
5.2	Scenarier och nedströmseffekter .....	24
5.3	Resultat .....	25
5.3.1	Markförluster .....	25
5.3.2	Antal påverkade bostäder .....	26
6	Designprinciper .....	27
6.1	Strandfodring .....	27
6.2	Stenskonig .....	27
7	Referenser .....	29



# 1 Inledning

Denna tekniska rapport utgör en bilaga till huvudrapporten *Stranderosion Smygehamn*. De mest tekniska momenten av utredningsarbetet har förlagts i denna rapport för att huvudrapporten ska kunna läsas av en bredare publik.

Denna rapport beskriver följande:

Kapitel 2 belyser viktiga slutsatser från ett antal tidigare studier utförda av såväl Sweco som av myndigheter.

Kapitel 3 beskriver de kusthydrauliska förutsättningarna avseende såväl höga vattenstånd som vågor och stigande medelvattenyta. Därtill redovisas en analys av hur höga vattenstånd och vågor samvarierar.

Kapitel 4 beskriver sedimentdynamiken kring Smygehamn genom nya analyser av flygfotografier, uppskattningar utifrån strandprofiler och genom modellering av sedimenttransport.

Kapitel 5 redogör vidare för den markförlustmodell som använts för att ta fram underlag till den kostnads- och nyttoanalys som beskrivs i huvudrapporten. Modellen avser att beräkna hur erosionen i området kring Smygehamn kan tänkas fortsätta i framtiden, med och utan åtgärder.

Kapitel 6 beskriver slutligen de antaganden och designprinciper som legat till grund för översiktlig dimensionering av kustskydd.

## 2 Tidigare utredningar

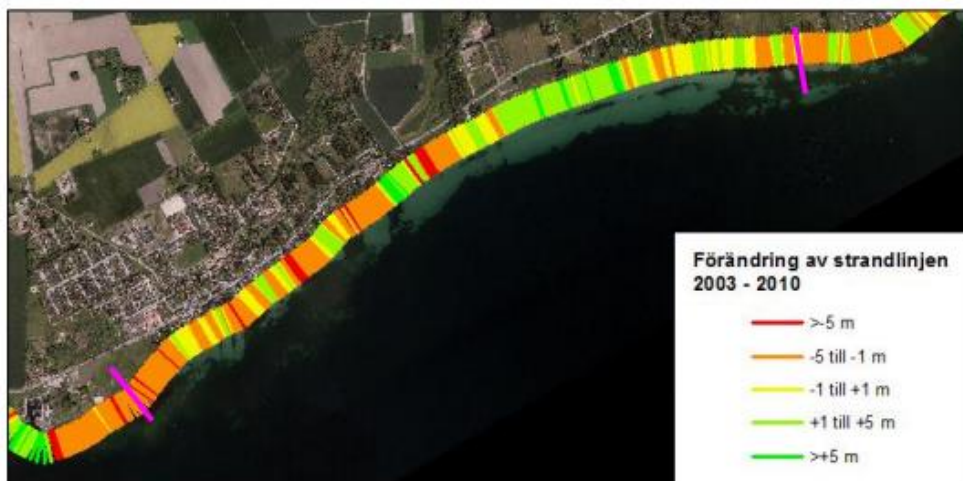
Under följande underkapitel redovisas de huvudsakliga slutsatserna från följande studier:

- Stranderosion i Trelleborgs kommun – Sweco, 2012
- Projekt Skånestrand – SGU, 2016
- Kustnära sedimentdynamik – SGU, 2020
- Fysiska och dynamiska förhållanden längs Skånes kust – underlag för klimatanpassningsåtgärder – SGU, 2021

### 2.1 Stranderosion i Trelleborgs kommun – Sweco 2012

Sweco utredde 2012 stranderosion i Trelleborgs kommun genom fältbesök, litteraturstudier och analys av flygfoton (Sweco, 2012). Det fastställdes att flera stränder i Trelleborg var utsatta för erosion och att nästan hela kuststräckan kan förväntas drabbas av erosion på grund av framtida havsnivåhöjning. Smygehamn bedömdes vara av särskild prioritering vad gäller att skydda bebyggelse och avloppsnät mot erosion.

Under fältbesök till Smygehamn konstaterades att tecken på erosion fanns, med tydliga erosionskanter och omkullvälta träd på flera ställen. Stranden var smal, 5 – 10 m, och stenig. På den östra delen av stranden var strandplanet bredare med mer sand. Undersökning av flygfoton visade att vegetationslinjen retirerat i den västra delen och flyttat fram i den östra mellan 2003 och 2010 (Figur 2-1).

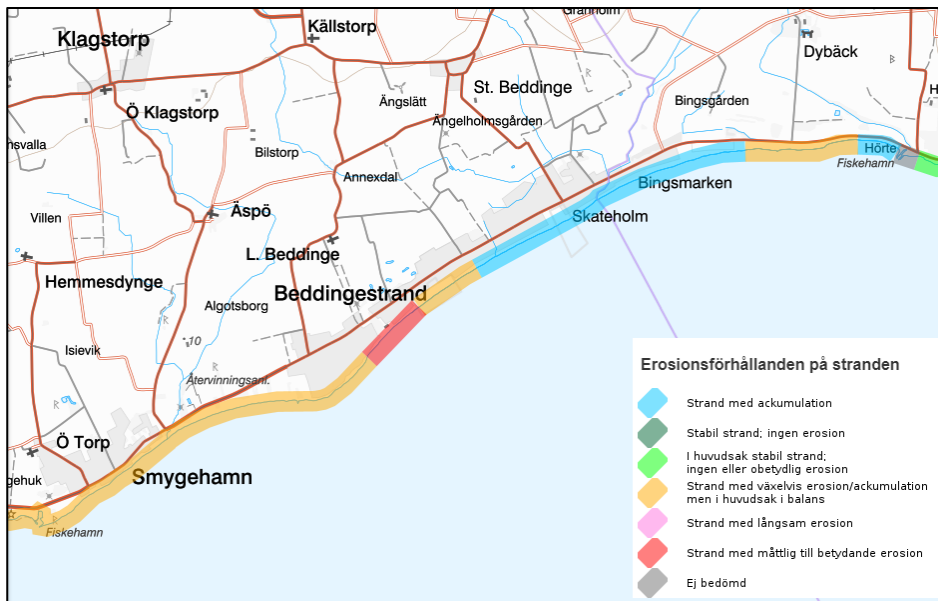


Figur 2-1 Förändring av vegetationslinjen baserat på flygfoton från 2003 till 2010. De lila strecken visar den undersökta strandsträckans början och slut. Bild från Sweco (2012).

### 2.2 Projekt Skånestrand – SGU 2016

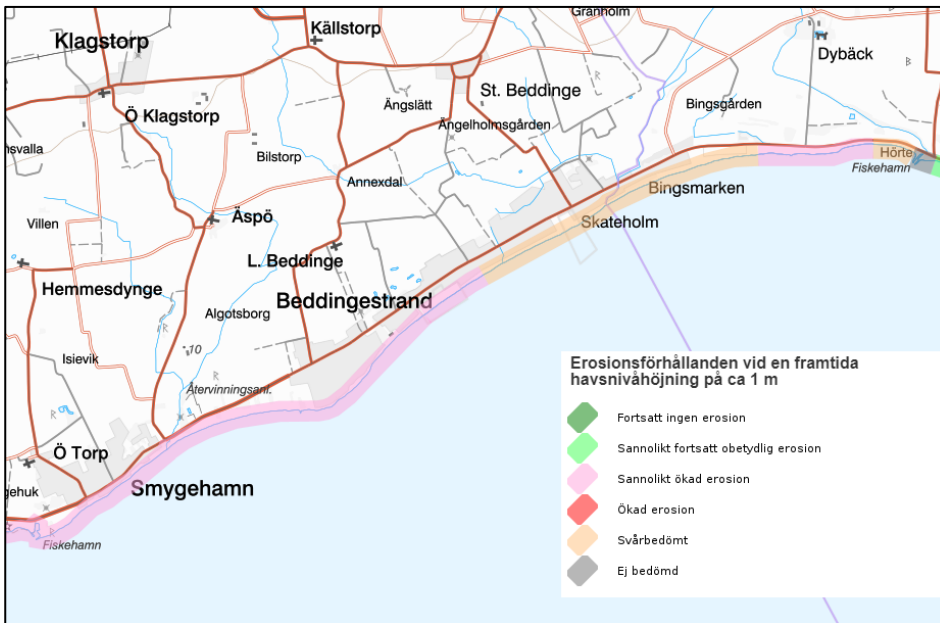
SGU utförde 2016 projektet *Skånestrand* som syftade till att beskriva erosionsförhållanden längs den skånska kusten. (SGU, 2016) Projektet resulterade bland annat i kartvisaren *Stranderosion och geologi, kust* som ger allmänheten tillgång till den information om erosion och geologiska förhållanden som projektet mynnade ut i och finns tillgänglig på [www.sgu.se](http://www.sgu.se).

Enligt SGU är merparten av kusten i Trelleborgs kommun i huvudsak i balans. Detta gäller även Smygehamn, även om växelvis erosion och ackumulering förekommer (Figur 2-2). Kuststräckan längs sydvästra Beddingestrand är enligt kartvisaren utsatt för måttlig till betydande erosion medan området runt Skateholm och Bingsmarken ackumulerar sediment.



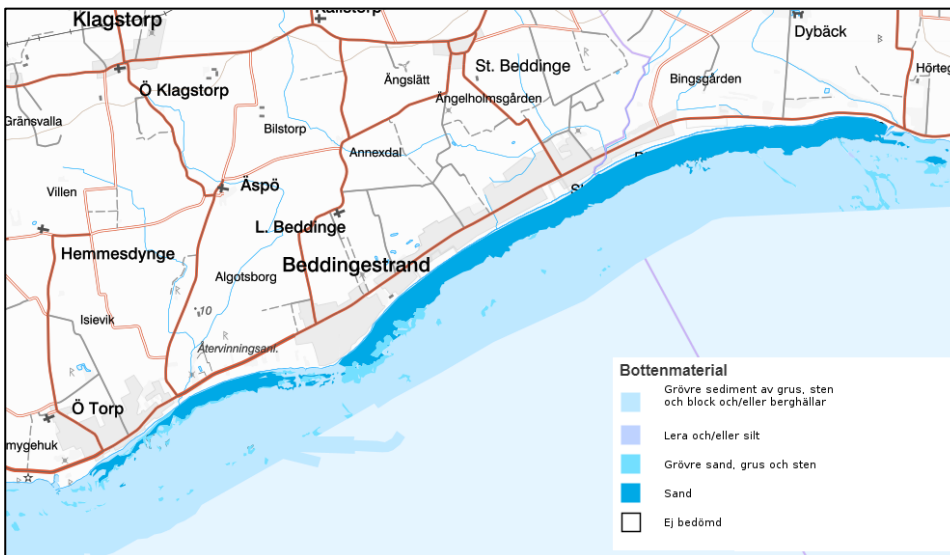
Figur 2-2 Erosionsförhållanden i dagsläget vid kuststräckan Smygehamn - Hörte. Från SGU:s kartvisare Stranderosion och geologi, kust.

Vid en framtida havsnivåhöjning på 1 m bedöms merparten av Trelleborgs kommuns kust enligt SGU sannolikt att uppleva ökad erosion (Figur 2-3). Detta gäller för hela bukten i Smygehamn, samt de södra delarna av Beddingestrand. Framtiden för de områden som i dagsläget ackumulerar sediment, exempelvis runt Skateholm är dock svårbedömd enligt SGU.



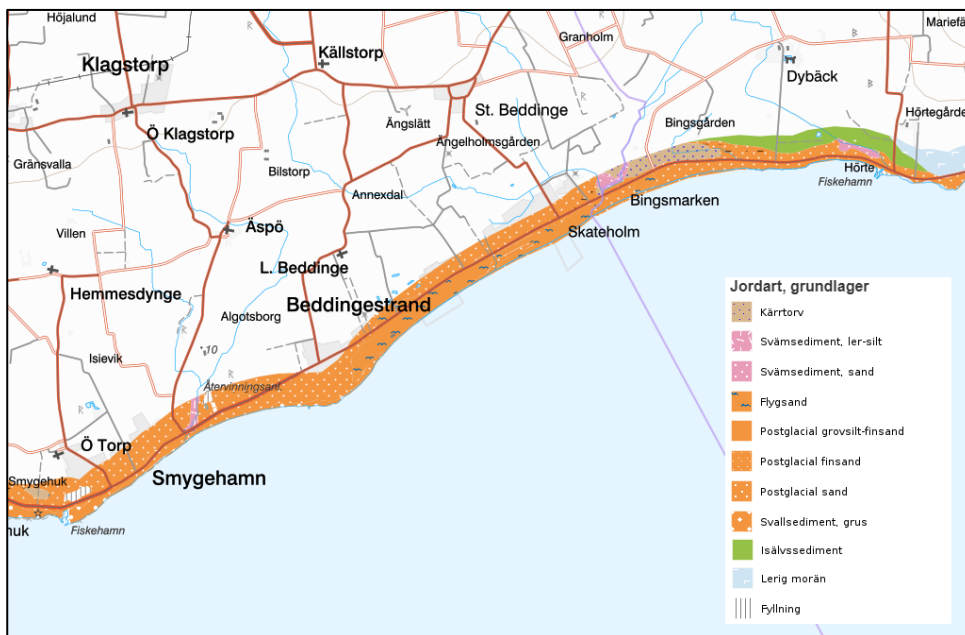
Figur 2-3 Erosionsförhållanden vid en havsnivåhöjning på 1 m vid kuststräckan Smygehamn - Hörte. Från SGU:s kartvisare Stranderosion och geologi, kust.

Inom ramen för projekt Skånestrand har även en sammanställning av tillgänglig geologisk information om materialet på land och i havsbotten nära kusten utförts. Figur 2-4 visar bottenmaterialet utanför Smygehamn och Beddingestrand. I Smygehamn är utbredningen av sand begränsad, särskilt västerut. Figur 2-5 visar jordarter på land vid stranden. Enligt kartvisaren består denna huvudsakligen av postglacial sand och flygsand, vilket ska ses som lätttrörliga material erosionsmässigt.



Figur 2-4 Bottenmaterial i buktena vid Smygehamn och Beddingestrand. Från SGU:s kartvisare Stranderosion och geologi, kust.





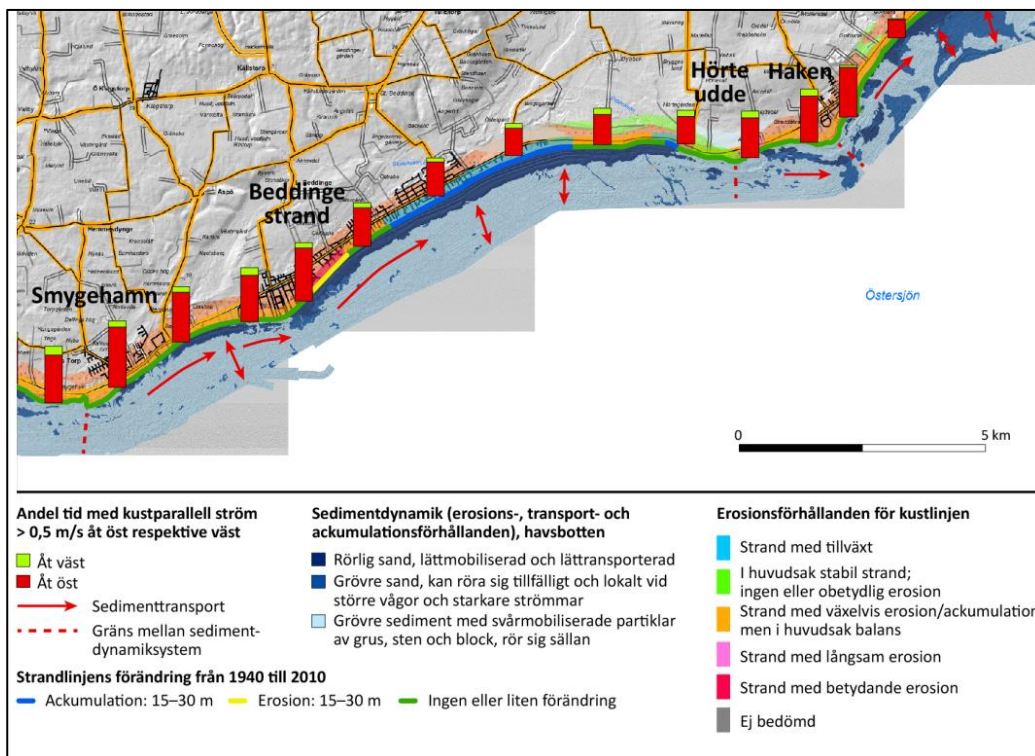
Figur 2-5 Jordarter på stranden vid Smygehamn och Beddingestrand. Från SGU:s kartvisare Stranderosion och geologi, kust.

## 2.3 Kustnära sedimentdynamik – SGU 2020

Inom ramarna för en studie utförd av (SGU, 2020) studerades de sedimentdynamiska förhållandena samt hur strandlinjen förändrats i Skåne sedan 1940-talet.

Enligt studien består bukten vid Smygehamn huvudsakligen av sand- och grusstränder. Förekomsten av rörlig sand sträcker sig som längst 200 – 300 m ut i havet från strandlinjen, ner till ett djup på 2–4 m. Konvergensdjupet, vilket är hur djupt vågor kan påverka havsbotten, har av SGU beräknats till 6–6,5 m. Mängden sand som kan röra sig mellan land och hav är därför begränsad, vilket också har indikerats i projekt Skånestränd. Sandens utbredning ökar österut. Den förhärskande bottenströmmen i området är enligt rapporten östlig, vilket alltså pekar på en nettotransport av sediment österut.

Figur 2-6 visar riktning av sedimenttransport, strandlinjens förändring 1940–2010 samt sedimentdynamiken av havsbotten mellan Smygehamn och Haken. Figur 2-6 tyder på att strandlinjen inte ändrats märkbart i Smygehamn mellan 1940 och 2010. Det motsäger resultatet från Swecos tidigare utredning som visade att det fanns tydliga tecken på erosion på flera ställen i framförallt västra Smygehamn (Sweco, 2012). Det kan bero på att Swecos dataunderlag var mer högupplöst eller att området växlande ackumulerar och eroderar, med en period av mer erosion under början av 2000-talet.



Figur 2-6 Smygehamns strandlinje uppvisar ingen eller liten förändring. Södra Beddingestrand eroderar medan de östliga delarna runt Skateholm ackumulerar. Bild anpassad från SGU (2020).

En mer detaljerad utredning från SGU år 2021 pekar på att västra Smygehamn har upplevt en reträtt av dynfoten under perioden 2007–2018, se Figur 2-7 nedan. (SGU, 2021)

Mellan Smygehamn och Beddingestrand består havsbotten av mindre rörligt material. Möjligen bidrar detta till att sedimenttransporten stannar av i väster om udden, med ackumulation på havsbotten som följd. Ett liknande mönster syns även i Beddingestrand. Utanför det grövre materialet mellan bukterna finns mindre, mer eller mindre sammanhängande förekomster av sand vilket kan indikera att det över tid sker en nettotransport av sand mellan bukterna österut.

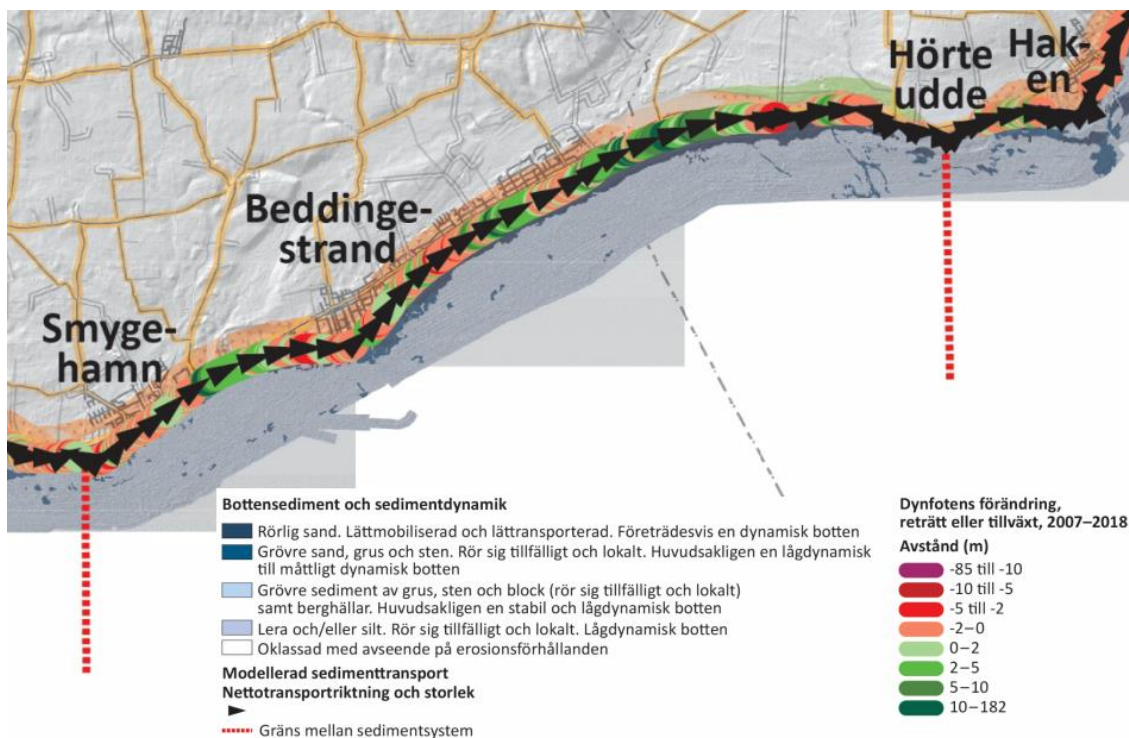
I södra delen av Beddingestrand har en märkbar erosion och reträtt av strandlinjen skett sedan 1940-talet. Samtidigt har en tillväxt av strandlinjen skett i de mittersta och nordliga delarna runt Skateholm. Även detta tyder på en dominerande sedimenttransport österut.

## 2.4 Fysiska och dynamiska förhållanden längs Skånes kust – SGU 2021

Denna rapport från SGU (SGU, 2021) utgör ett planeringsunderlag för klimatanpassning och beskriver mer ingående de rådande erosionsförhållandena längs Skånes kust, bland annat genom att visa hur dynfotens utbredning ändrats över tid samt med hjälp av modellerad sedimenttransport. Dynfotens förändring mellan 2007 och 2018 undersöktes genom ortofoton och den dominerande sedimenttransportens riktning modellerades.

Utredningen bekräftar tidigare uppfattningar om att den huvudsakliga nettotransporten av sediment mellan Trelleborg och Ystad sker österut, med lokala variationer.

Rapporten visar att dynfotens utbredning har växt vid östra delen av Smygehamn (Figur 2-7), vilket även sammanfaller med sandens större utbredning på havsbotten här. Sydvästra Smygehamn uppvisar en reträtt av dynfoten vilket alltså sammanfaller med den mer begränsade utbredningen av rörlig sand på havsbotten här, se Figur 2-6. Detta bekräftar de observationer av erosionstecken som gjordes under Swecos utredning 2012.



Figur 2-7 Dynfotens förändring, bottensediment och sedimentdynamik vid sträckan Smygehamn - Hörte udde. Bild anpassad från SGU (2021).

Även i Beddingestränd sammanfaller en tillväxt av dynfoten i nordöstra delen av bukten med en större lokal utbredning av sand på havsbotten. SGU menar att det indikerar en transport av sand från sydvästra Beddingestränd till nordöstra Beddingestränd och Skateholm. Detta styrks av strandlinjens reträtt och tillväxt i sydvästra respektive nordöstra Beddingestränd som påvisades av SGU (SGU, 2021) ovan.

Mellan bukten vid Smygehamn och Beddingestränd finns ett område med mer erosionståligt material, och det finns även ett mindre sammanhängande område av rörlig sand på havsbotten nedanför det erosionståliga materialet. Eftersom det samtidigt finns en svag modellerad sedimenttransport västerifrån som slutar strax öster om det ackumulerande området i Smygehamns bukt så kan det, tillsammans med den modellerade nettotransporten österut, enligt SGU indikera att det över tid finns en viss transport av sediment österut mellan de två buktena. Det grövre materialet mellan bukten hindrar möjligtvis en del sedimenttransport, vilket leder till ackumulation i den östra delen av bukten vid Smygehamn. Rapporten visar även att bukten vid Smygehamn och

Beddingstrand fram till Hörte udde utgör ett sammanhängande sedimentsystem.

När det gäller befintliga åtgärders påverkan på sedimenttransport påpekar rapporten att det är viktigt att den naturliga sedimenttransporten i området inte hindras. Särskilt hårda skydd, såsom stenskoningar och hövder, kan förhindra lokal sedimenttransport vid skyddet men orsaka erosion nedströms. Detta eftersom stranden fortfarande är utsatt för samma vågenergi och strömriktningar. I Smygehamn skulle ett hårt skydd i västra delen kunna leda till minskad ackumulering i den östra delen, och på sikt även erosion eftersom det finns tecken på att sediment transporteras österut till bukten vid Beddingstrand. Detta är viktigt att ta i beaktande vid design av erosionskydd.

## 3 Kusthydraulik

Detta avsnitt beskriver de kusthydrauliska förutsättningarna avseende såväl höga vattenstånd som vågor och stigande medelvattenyta. Därtill redovisas en analys av hur höga vattenstånd och vågor samvarierar. Dessa data ligger till grund för utformningen av kustskydd i Smygehamn. Grundprinciperna för design av åtgärder presenteras i kapitel 6.

### 3.1 Högvatten

Karaktäristiska högvatten används för att beskriva vilken typ av högvatten som kan förväntas på en viss plats. Högvattnet beskrivs ofta med hjälp av en återkomsttid. Återkomsttiden är ett sätt att beskriva sannolikheten för att ett högvatten med en viss nivå ska inträffa. För närmare beskrivning av begreppet återkomsttid hänvisas till (Sweco, 2017).

Tidigare utredningar har baserats på högvattenstatistik som beräknats för Skanör, då det saknas tillräckligt långa mätserier från Trelleborg för att möjliggöra beräkning av lokal vattenståndsstatistik. Den mätdata som finns tillgänglig från Trelleborg har visat på god överensstämmelse mot data från Skanör (Sweco, 2017). Sedan statistiken för Skanör togs fram har ett antal nya rapporter och underlag tagits fram som behandlar högvattenstatistik för Trelleborg. COWI (2021) beräknar ett 100-årshögvatten i Trelleborg till +170 cm baserat på mätdata från Skanör, och SMHI (2018) beräknar ett 100-årshögvatten till +158 cm baserat på mätdata från Ystad. Detta kan jämföras med beräkningarna från Hallin et. al (2016) som legat till grund för tidigare utredningar, som uppskattar 100-årshögvattnet till +165 cm. Samtliga uppskattningar av 100-årshögvattnet är alltså i samma storleksordning.

#### 3.1.1 Karaktäristiska högvatten

Sweco har tidigare beräknat olika typer av högvatten för Trelleborg baserat på statistiska analyser av vattenståndsdata från Skanör (Sweco, 2020b). Detta eftersom tillräckligt långa tidsserier inte fanns tillgängliga från Trelleborg för en trovärdig sannolikhetsanalys samtidigt som data från Skanör och Trelleborg under en högvattensituation år 2017 överensstämde väl. Tabell 3-1 nedan anger de olika högvattennivåer relativt medelvattenytan samt RH2000 som kommer att användas i denna studie, baserat på tidigare resultat från Sweco (Sweco, 2020b).

Tabell 3-1 Tabellen beskriver ett normalhögvatten, ett 100-årshögvatten samt ett extremhögvatten, dels som en avvikelse från medelvattenytan (MVY) dels som en absolutnivå relativt RH2000.

	Avvikelse relativt MVY	Avvikelse relativt RH2000
Normalhögvatten	+1,20 m	+1,35 m
100-årshögvatten	+1,65 m	+1,81 m
Extremhögvatten	+2,20 m	+2,36 m

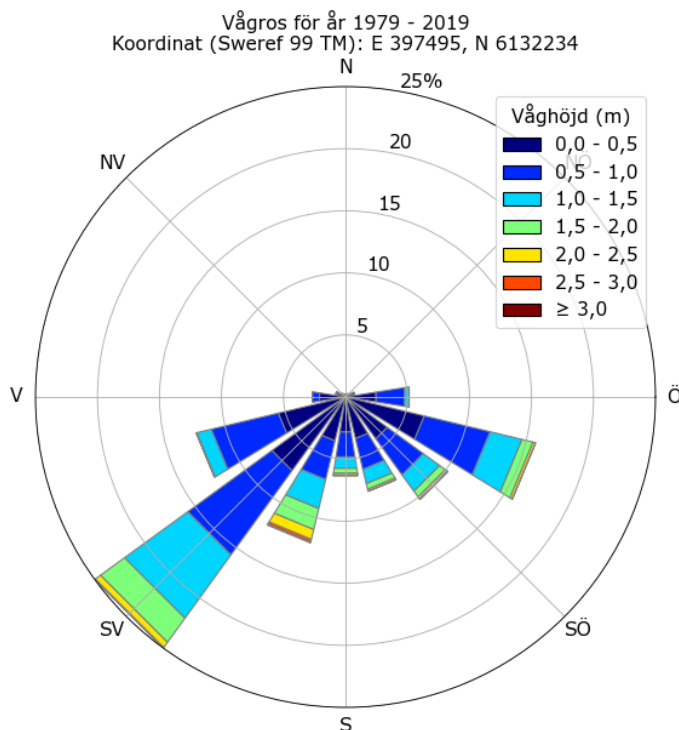
Med ett normalhögsvatten avses en högsvattennivå som kan förväntas inträffa eller överträffas med något eller några års mellanrum. Högsvattnet representerar ett högt men ingalunda extremt vattenstånd.

Ett 100-årshögsvatten är ett högsvatten med återkomstperioden 100 år. Som beskrivits ovan innebär det att sannolikheten att ett högsvatten med den nivån inträffar under ett godtyckligt år är 1/100, eller 1 %.

Det mest extrema högsvatten i sydvästra Östersjön som finns dokumenterat är den så kallade Backafloden som inträffade år 1872. Det finns inga vattennivåmätningar från denna händelse, istället har ögonvittnesskildringar och minnesmärken använts för att uppskatta hur högt vattennivån steg vid denna händelse. Det har beräknats att om motsvarande högsvatten skulle inträffa idag skulle det motsvara en nivå av +2,20 m relativt medelvattenytan (Sweco, 2017).

### 3.2 Vågor

Genom ett samverkansprojekt mellan SGI, SGU och Lunds Tekniska Högskola har en vågmodell som beräknar vågförhållandena för Sveriges sydkust tagits fram. Modellen täcker tidsperioden 1979 – 2019 och finns tillgänglig på SGI:s hemsida under karttjänsten Vågdataportalen (SGI, 2022). I Figur 3-1 visualiseras modellerad vågdata från en punkt utanför Smygehamn i form av en vågros. De olika staplarnas längd illustrerar hur ofta vågor med en viss riktning förekommer, och färgen av staplarna indikerar storleken av vågorna. Figuren illustrerar att den förhärskande vågriktningen är SV – SSV, men att även vågor från ÖSÖ förekommer relativt ofta. Höga vågor verkar kunna förekomma från alla riktningar.

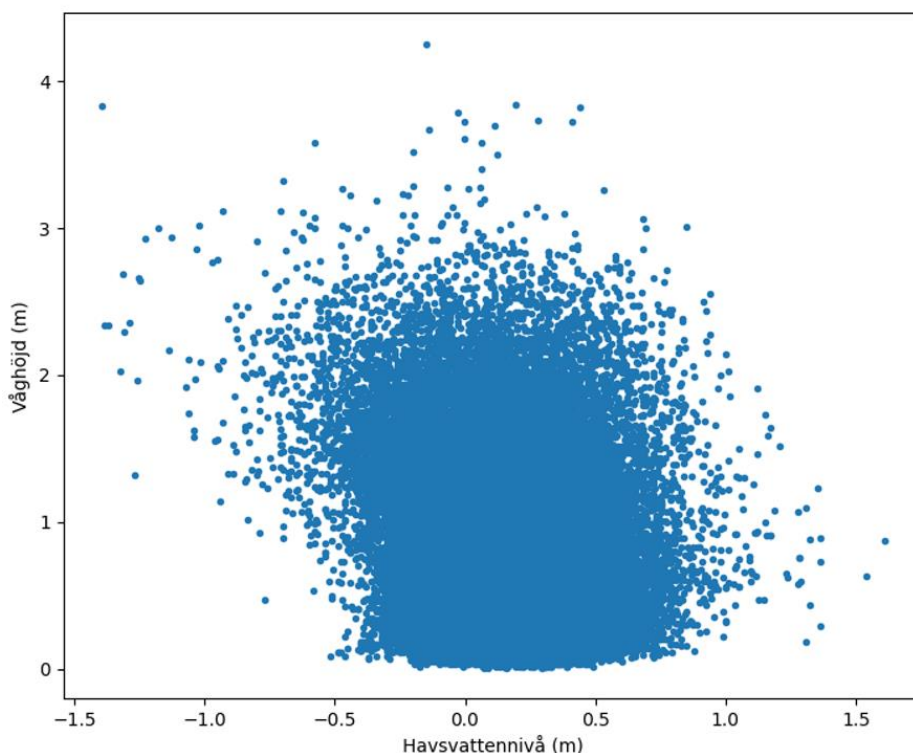


Figur 3-1 Vågros för Smygehamn. Från SGI:s karttjänst Vågdataportalen.

### 3.3 Kombinerade händelser

Vid design och dimensionering av kustskydd är det av stor vikt att utreda hur höga vattenstånd och vågor samvarierar. De största vågorna i Trelleborg uppstår generellt vid vindar från sydväst till sydost, där vinden kan skapa vågor över långa havsområden från Tyskland och Polen. Vid dessa vindförhållanden är dock höga vattenstånd mycket sällsynta, vilket snarare uppträder vid vindar med en nordlig komponent, då stora vattenmängder stuvas upp i södra Östersjön. Det finns dock även exempel på när vågor med östlig riktning rör sig in mot sydkusten i samband med höga vattenstånd, och det finns även en möjlighet att lågtrycken snabbt ändrar bana och möjliggör höga vattenstånd och höga vågor.

Figur 3-2 visar en analys av samvariation mellan högvatten och höga vågor. Analysen bygger dels på en mätserie av havsvattenstånd från stationen i Skanör, dels på modellerad vågdata som finns tillgänglig på SGI:s karttjänst Vågdataportalen. Mätserien från Skanör täcker tidsperioden 1992 – 2019. Som tidigare påpekats i denna utredning bedöms mätdata från Skanör stämma tillräckligt väl överens med faktiska vattenstånd i Trelleborgs kommun för att kunna användas för de analyser som görs inom ramen för denna utredning. Figuren illustrerar att de största vågorna sällan inträffar samtidigt som de högsta vattenstånden. Våghöjden vid dessa tillfällen har under den studerade tidsperioden varit under 1,0 meter. Höga vågor över 2,0 meter förekommer dock vid vattenstånd i storleksordningen +1,0 meter relativt medelvattenytan.

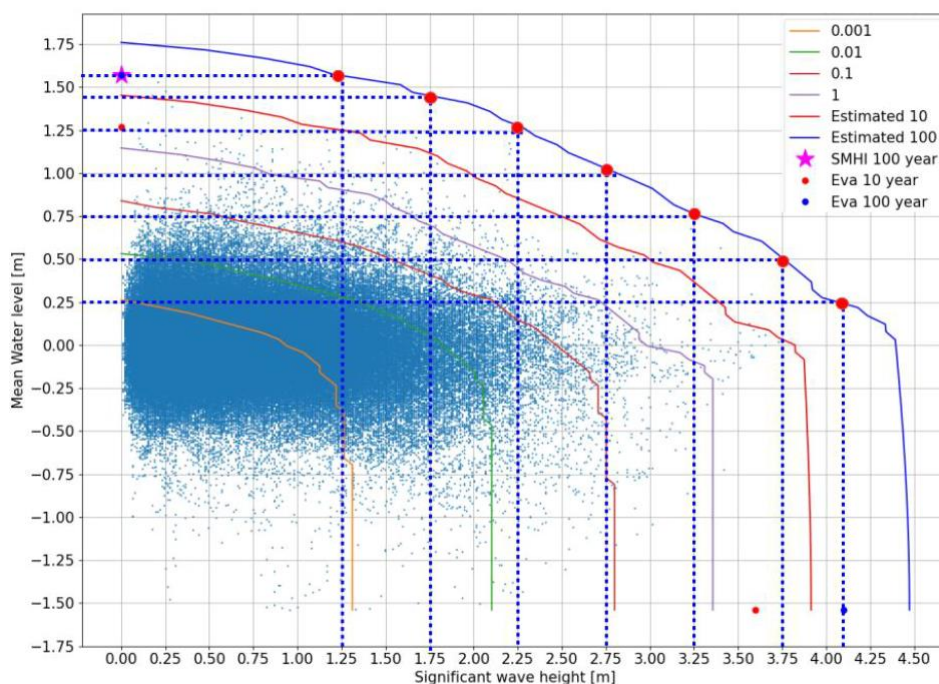


Figur 3-2 Samvariation mellan havsvattennivå och våghöjd. Inget tydligt samband mellan höga vattennivåer och höga vågor kan urskiljas.

Sweco har på uppdrag av Trelleborgs kommun under 2022 arbetat med design och dimensionering av ett erosionsskydd öster om Trelleborgs hamn. (Sweco,

2022) I samband med det uppdraget utfördes en grov analys av kombinerade händelser (höga vågor och höga vattenstånd). I Figur 3-3 presenteras resultat från denna analys. De små blå punkterna utgörs av samma dataunderlag som i Figur 3-2, och de olika linjerna utgör uppskattningar av kombinerad återkomsttid. Alla värden utmed dessa linjer har alltså samma återkomsttid. De röda punkterna utgör olika scenarier av vattenstånd och vågor med en kombinerad återkomsttid av 100 år. Av figuren framgår att det under en 100-års händelse av vattenstånd kan förväntas vågor med drygt en meters våghöjd.

Dessa scenarier har använts för dimensionering av kustskydd inom föreliggande studie.



Figur 3-3 Analys av kombinerade händelser och uppskattade återkomstnivåer. Från (Sweco, 2022). Y-axeln visar vattenståndet (rel. MVY) och x-axeln visar signifikant våghöjd.

### 3.4 Klimatförändringar

De pågående klimatförändringarna kommer att ha stora framtida konsekvenser för högvattensituationer genom att de leder till en stigande medelvattenyta. Det är av stor vikt att kunna uppskatta hur stor denna höjning kommer att bli. Förenta nationernas klimatpanel, IPCC, reviderade år 2019 tidigare prognoser av havsnivåhöjningen i sin rapport *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (IPCC, 2019). Medianvärdet för den globala havsnivåhöjningen fram till år 2100 under RCP 8,5 uppgår till +0,84 m. De olika RCP-scenarierna utgår från hur de globala utsläppen förändras över tid, där RCP 8,5 är ett scenario där stort fossilberoende kvarstår och där koldioxidutsläppen år 2100 är tre gånger dagens.

Havet stiger inte lika mycket överallt, och SMHI publicerade i januari 2022 nya regionala prognoser över hur medelvattenytan kan komma att förändras fram till 2150. Dessa prognoser ligger till grund för utförda beräkningar i detta projekt.



För dimensionering av kustskydd och beräkning av framtida erosion har medianvärdet för klimatscenario SSP5-8,5 använts. Havsnivåhöjningen fram till år 2070 har antagits vara linjär.

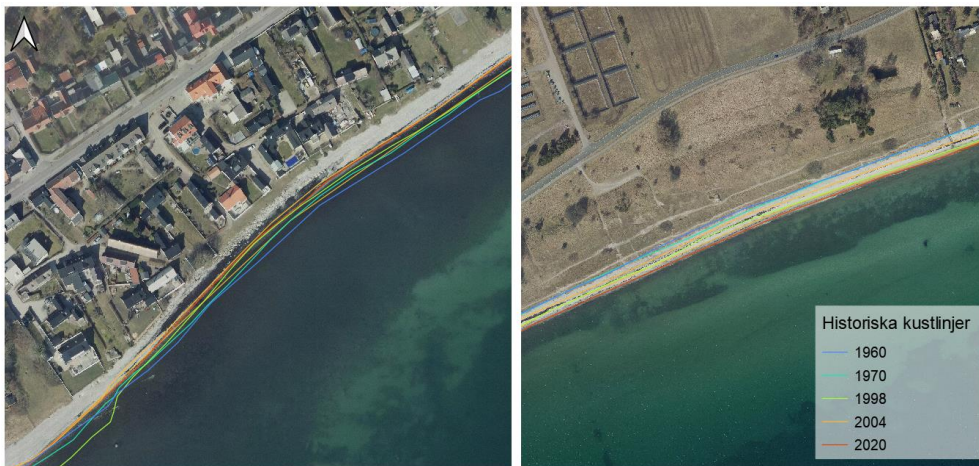
## 4 Sedimentdynamik

I följande kapitel görs en fördjupad analys av sedimentdynamiken kring Smygehamn. Fördjupningen inleds med en uppdaterad flygfotografianalys och studie av strandprofiler. Baserat på dessa analyser har en enklare sedimenttransportmodell kalibrerats, vilket därefter använts för att beräkna livslängden av olika strandfodringsalternativ.

### 4.1 Flygfotografianalys

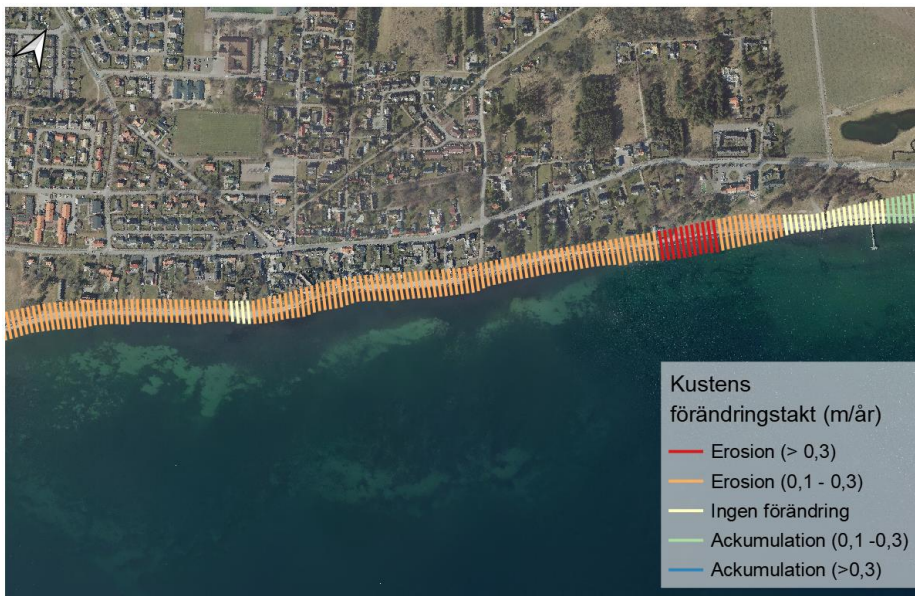
I Swecos utredning från 2012 kartläggs erosionstakten utmed kommunens kust mellan åren 2003-2010. För att skapa en förståelse för det längre tidsperspektivet har det inom ramen för detta uppdrag utförts en utökad analys av strandlinjens läge.

Den historiska erosionstakten har beräknats utifrån en statistisk analys av strandlinjens läge. Till underlag ligger digitaliserade strandlinjer från åren ca 1960, ca 1970, 1998, 2004 och 2020, se Figur 4-1.



Figur 4-1 Digitaliserade strandlinjer från 1960, 1970, 1998, 2004 och 2020. Den vänstra bilden visar erosion framför fastigheterna i västra Smygehamn medan den högra bilden visar ackumulation i östra delarna.

Förändringstakten har beräknats med hjälp av programvaran DSAS (Digital Shoreline Analysis Model) för transekter med 10 meters mellanrum, från Smygehamn i väster till Skateholm i öster. Resultat från beräkningen presenteras i Figur 4-2 nedan.



Figur 4-2 Beräknad förändringstakt av strandlinjens läge för tidsperioden 1940-2020.

Vid jämförelse mot tidigare studie av Sweco kan det konstateras att både erosion och ackumulation varierade kraftigare under tidsperioden 2003-2010 än den längre tidsperiod som studeras här (se Figur 2-1). Vid studier av korta tidsperioder kan mellanårlig variation och vattenstånd få stor inverkan på resultaten, och den analys som utförts inom ramen för detta projekt bedöms vara mer rättvisande. I huvudrapporten *Stranderosion Smygehamn* beskrivs hur stranden ändrat karaktär kring Smygehamn, från sandig till stenig kust. Denna utveckling kan även ses i flygfotografier. Sedan 1940-talet tycks uppemot 10-15 meter strand försvunnit vid Smygehamn och sedan 1970 cirka 6 meter. Vid analys av erosionstakten tycks tidsperioden 1970-1998 varit särskilt intensiv.

Längre österut, mot Äspöholm, har stranden istället byggts på. Ackumulationstakten tycks ha varit som störst mellan 1970-1998 men sedan 1940-talet har både strand och dyn växt till med nästan 20 meter.

Det faktum att kustens förändringstakt avtagit, både vad gäller erosion vid Smygehamn och ackumulation vid Äspöholm, tyder på att storleken av sedimenttransporten avtagit. I takt med att strandens karaktär förändrats till ett grövre substrat har sannolikt sedimentet tillgängligt för transport minskat.

## 4.2 Strandprofiler

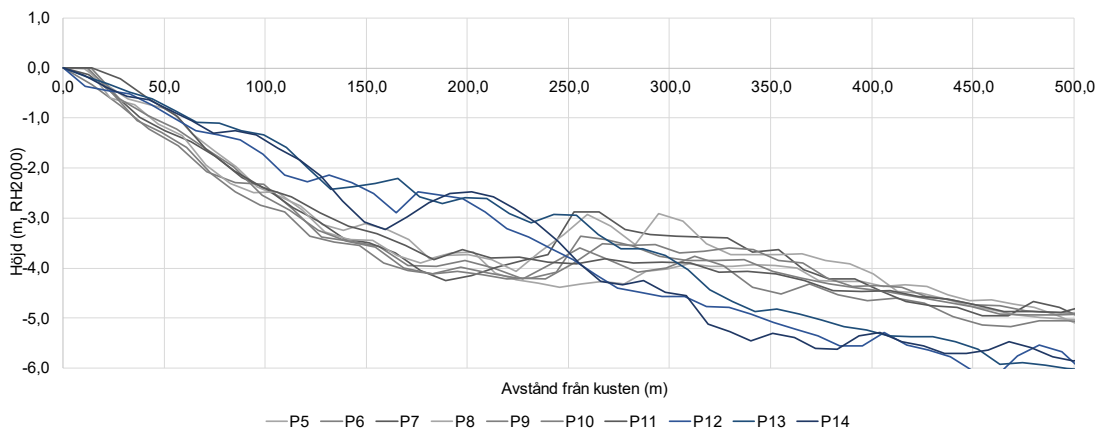
Ett viktigt underlag vid kusttekniska studier är inmätningar av strandprofiler utmed kusten. Erosion kan även ske under vattenytan, och mängden sediment i en strandprofil kan alltså minska utan att det omedelbart syns på land.

För att förstå hur botten djupen varierar har en bearbetning av data insamlad av kommunen och av SGU inom projekt Skånestrand utförts. Datakällorna har satts ihop till ett antal strandprofiler längs med aktuell kuststräcka, se Figur 4-3.



Figur 4-3 Karta visandes de strandprofiler som analyserats. De vitmarkerade profilerna är belägna inom studieområdet och de blå i referensområdet Äspöholm.

De markerade strandprofilerna presenteras grafiskt i diagrammet i Figur 4-4. I figuren har P5-P11, vilka är belägna inom studieområdet, markerats med grå linjefärg. De blå profilerna P12-P14 ligger längre österut. Ur figuren framgår tydligt att bottenlutningen skiljer sig åt. Kring Smygehamn är stranden betydligt brantare än i de presenterade profilerna längre österut.



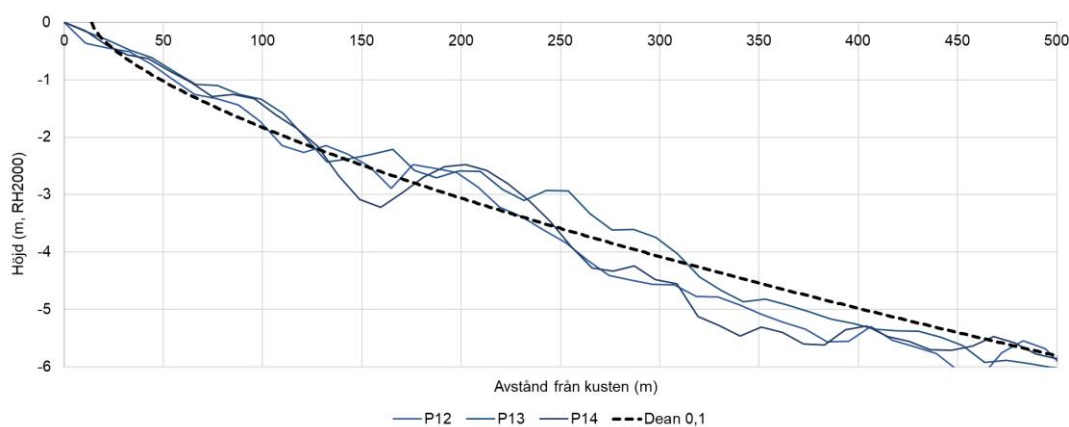
Figur 4-4 Uppmätta botten djup vid profil P5-P14, se Figur 4-3. De gråmarkerade profilerna är belägna kring Smygehamn och de blå längre österut.

Det faktum att stranden är betydligt brantare i Smygehamn tyder på att bottenstrukturer är grövre, vilket även SGU:s maringeologiska karta antyder. Det förefaller möjligt att betydande erosion skett under vattenytan, och att detta sediment förflyttats mot Äspöholm där dynen och stranden vuxit till.

## 4.2.1 Volymförändring vid Äspöholm

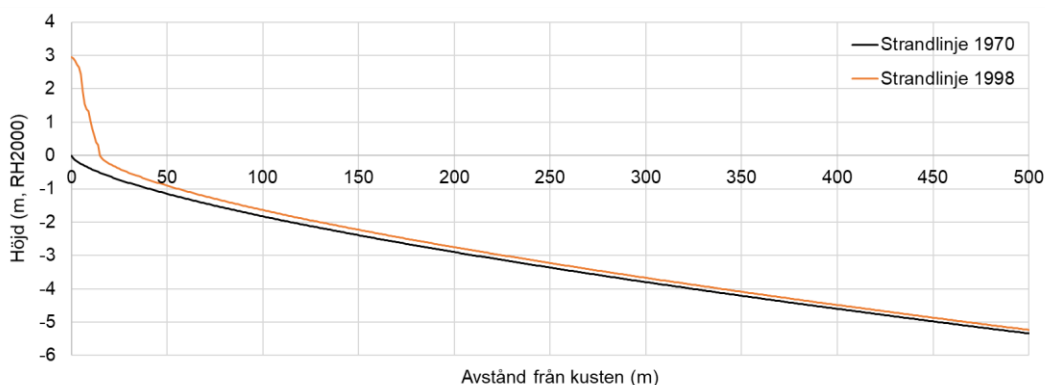
Som nämnts i kapitel 4.1 kan en tydlig tillväxt av stranden noterats kring Äspöholm. I denna del av bukten består strandprofilen huvudsakligen av sand. Vid design av mjuka kustskyddslösningar, som strandfodring, är det av stor vikt att kartlägga hur stora volymer sediment som förflyttas längs kusten.

Som indata till påföljande modellering av sedimenttransport har en beräkning av ackumulerad volym sand i Äspöholm utförts. Anledningen till att beräkningen sker just i Äspöholm beror på att stranden i större utsträckning är homogen och bestående av sand. Därmed antas stranden i detta område kunna beskrivas av en jämviktsprofil enligt Dean (2001), med en kornstorlek av 0,1 mm. Den föreslagna jämviktsprofilen presenteras jämte de uppmätta profilerna i Figur 4-5.



Figur 4-5 Anpassning av Dean-jämviktsprofil till uppmätta strandprofiler i Beddingstrand.

I Figur 4-6 presenteras en schematiserad bild av strandprofilerna för år 1970 och 1998. Höjden av dynen antas ha varit konstant över tid. Höjderna har extraherats ur Lantmäteriets höjdmodell *Laserdata Skog*.



Figur 4-6 Schematisering av strandprofiler för år 1970 och 1998. Volymen sand som ackumulerat kan beräknas genom att beräkna skillnaden mellan de två strandprofilerna.

För att hantera osäkerheterna kopplade till volymuppskattningen har de beräknats på två vis:

- Volymskillnad mellan profilerna till ett avstånd av 235 m från kusten, där den sandiga botten övergår i grövre material.
- Volymskillnad till det beräknade konvergensdjupet (5,5 m).  
Konvergensdjupet har beräknats utifrån vågdata beskriven i kapitel 3.2.

De beräknade volymerna, och den årliga ackumulationstakten presenteras i Tabell 4-1. De beräknade volymerna har vidare använts för att kalibrera en sedimenttransportmodell, se nästa kapitel.

Tabell 4-1 Uppskattningar av volymförändringar vid Äspöholm.

Scenario	Volymförändring	Volymförändringstakt
Volym inom sandregim	74 (m <sup>3</sup> /m)	2,6 (m <sup>3</sup> /m/år)
Volym inom konvergensdjup	119 (m <sup>3</sup> /m)	4,2 (m <sup>3</sup> /m/år)

## 4.3 Modellering av sedimenttransport

För att skapa en ökad kunskap kring sedimenttransportens förmodade storlek och riktning utmed den aktuella kusten har en endimensionell sedimenttransportmodell upprättats. Det huvudsakliga syftet med modelleringen är att uppskatta hur stora årliga volymförluster som kan förväntas vid en eventuell strandfodring i Smygehamn.

### 4.3.1 Metodik

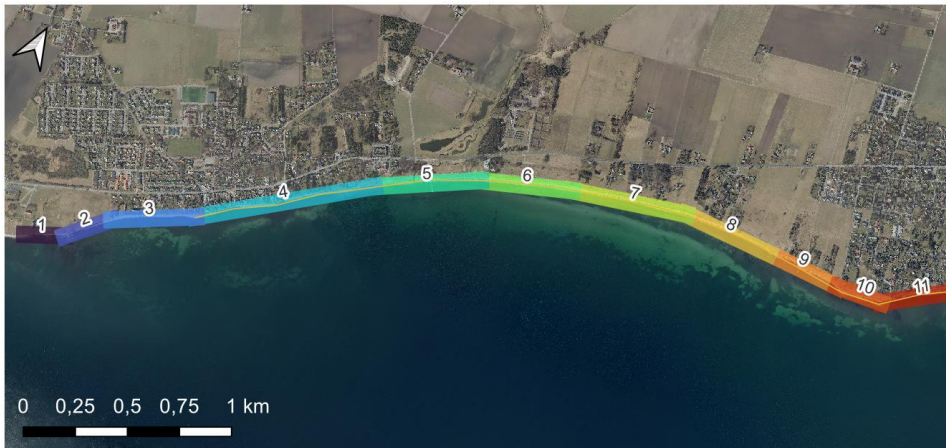
Beräkningsmodellen bygger på CERC-metodiken (CERC, 1984), vilket kortfattat är en formel som beskriver hur den kustparallella sedimenttransporten beror av vågklimatet och kustlinjens orientering. Modellen är inte dynamisk, utan förutsätter att kustlinjens orientering inte förändras över tid. En beskrivning av indata till modellen ges i kapitel 4.3.2. Metoden är en kraftig förenkling av verkligheten och från början inte framtagen för svenska förhållanden, där vågklimatet är relativt stillsamt och tillgången till sand ofta begränsad. För att anpassa modellen för de lokala förhållandena i Smygehamn har de empiriska koefficienterna i modellen bestämts utifrån en kalibrering mot beräknad erosion, vilket beskrivs närmare i kapitel 4.3.3.

### 4.3.2 Indata

Som indata till modellen har vågdata från SGI:s webbtjänst Vågdataportalen nyttjats. Detaljerad information om vågmodellens prestanda går att hitta i rapporten *Fysiska och dynamiska förhållanden längs Skånes kust* (SGU, 2021). Vågorna har extraherats på ett djup av cirka 10 meter och därefter räknats in till brytpunkten<sup>1</sup> med metodik i Hanson & Larson (2010).

En digital kopia av kustlinjen mellan Smygehamn och Beddingestrand har skapats, och dess orientering mot norr har beräknats. Den digitala modellen består av totalt 12 delsträckor med varierande längd och orientering, se Figur 4-7.

<sup>1</sup> Det avstånd från kusten varvid vågorna i genomsnitt bryter.



Figur 4-7 Indelning av kustremsan i olika beräkningssektioner. Delområde 4 utgör det huvudsakliga åtgärdsområdet.

### 4.3.3 Kalibrering

För att uppskatta den förmodade framtida erosionstakten i Smygehamn (delområde 4 i Figur 4-7) har modellen kalibrerats mot kustlinjens förändring i andra delar av bukten. I delområde 6 och 7 har en tydlig ackumulation av sediment konstaterats, och förändringstakten har beräknats i kapitel 4.2. Vid kalibrering av sedimenttransportmodellen har volymförändringarna mellan referensåren 1970-1998 använts, då dessa ger en hög sedimenttransport och således ett konservativt resultat för framtida erosion i Smygehamn. Havsnivåhöjningen mellan 1970-1998 antas försumbar, och alla förändringar antas därmed kunna härledas till kustparallell transport.

Modellens empiriska koefficienter har i en iterativ process kalibrerats till dess att nettotillförseln av sediment inom delområde 6 uppgår till de beräknade värden som presenteras i Tabell 4-1.

### 4.3.4 Resultat

Resultat för den modellerade volymförändringen inom delområde 4 presenteras i Tabell 4-2. Spannet av volymförändringar baseras ursprungligen på de antaganden om jämviktsprofiler som görs i 4.2.1 och är således behäftade med osäkerheter.

Tabell 4-2 Beräknad förändringstakt inom delområde 4.

Volymförändringstakt (m <sup>3</sup> /m/år)	Min	Max
Delområde 4	-4,2	-6,8

Modellresultaten visar att den eroderade volymen sand (per meter strand) är större inom delområde 4 än ackumulationstakten i delområde 6. En del av den sand som eroderar vid delområde 4 kan alltså förväntas transporteras än längre österut, vilket överensstämmer med tidigare studier (se kap 2.3 - 2.4).

Vid beräkning av livslängd av strandfodring har även den framtida förlusten av sediment till följd av havsnivåhöjningen inkluderats.

## 5 Markförlustmodell

För att kunna kvantifiera kostnaden av erosion och utvärdera vilka åtgärdsalternativ som är mest fördelaktiga ur ekonomisk synvinkel har en markförlustmodell tagits fram. Metodiken bygger huvudsakligen på den metodik som presenteras i studie av Hallin et. al (2017), men med en betydligt högre detaljeringsgrad och geografisk upplösning.

### 5.1 Metodik

Den beräkningsmodell som nyttjats är en empirisk modell som beskriver förändring både till följd av kustparallell transport och havsnivåhöjning. Modellen ska ses som en grov fingervisning snarare än ett exakt beräkningsverktyg. Det material rörande markförluster och skaderisker som presenteras i följande underkapitel är indikativa och bör kommuniceras med försiktighet och ska inte användas som underlag i fysisk planering.

Den beräknade erosionstakten utgörs av summan av nedanstående fysikaliska processer och antaganden om dessa:

- Den historiska erosionstakten representeras av en tidsperiod från 1940-2020 och antas fortsätta oförändrad fram till år **2070**. Vidare antas denna förändringshastighet vara linjär över tid. I avsnitt 5.1.1 beskrivs hur den historiska erosionstakten inkluderats i beräkningsmodellen och vilket underlag som ligger till grund för denna.
- I takt med att medelvattenytan stiger antas strandens utveckling kunna beskrivas enligt Bruuns lag. En genomgång av Bruuns lag, hur modellen applicerats och hur resultaten ska tolkas beskrivs i avsnitt 5.1.2.

#### 5.1.1 Historisk erosion

Den historiska erosionstakten har hämtats som ett medelvärde vid respektive kustsektion för tidsperioden 1940-2020, som beräknat i kapitel 4.1, Figur 4-2.

#### 5.1.2 Bruuns lag

För att kvantifiera hur stora landtytor som kan komma att eroderas bort till följd av medelvattenytans stigning har, i enlighet med Hallin *et al* (2017), beräkningar utförts enligt *Bruuns lag*. Bruuns lag är en grovt förenklad konceptuell modell, framtagen för sandiga och homogena kuster längs öppna hav. Till dags dato är detta den enda applicerbara metoden för uppskattning av erosion till följd av havsnivåhöjning, även om mycket forskning sker på ämnet.

Bruuns lag ger en prognos av strandlinjens tillbakadragning till följd av stigande havsnivåer och baseras på kustens topografi och vågklimatet. Med hjälp av ekvationen nedan, har erosion (i meter strandbredd) längs kusten uppskattas.

$$R = \frac{S}{\tan(\beta)}$$

I ekvationen anger  $R$  strandens tillbakadragning,  $S$  är medelvattenytans stigning och  $\beta$  lutningen av stranden från toppen av sanddynen till det så kallade konvergensdjupet. Konvergensdjupet kan beskrivas som det djup där vågor



slutar ha en inverkan på sedimenttransport längs botten och kan beräknas med hjälp av Hallermeier's ekvation (Hallermeier, 1978):

$$d_c = 2.28H_{s, \frac{12h}{y}} - 68.5 \frac{H_{s, \frac{12h}{y}}^2}{gT_s^2}$$

I ekvationen motsvarar  $g$  tyngdaccelerationen,  $H_{s, 12h/y}$  den våghöjd som statistiskt motsvarar våghöjden som överskrider 12 timmar årligen och  $T_s$  tillhörande vågperiod. Dessa våghöjdsparametrar har inhämtats från den regionala vågmodell som har tagits fram av SGI/LTH. En djupbegränsning på >10 meter som undre begränsning har använts för att undvika att få med vågor som påverkats av botten och påföljande falskt låga konvergensdjup.

För att uppskatta dynens högsta nivå (för uträkning av strandlutningen,  $\tan(\beta)$ ) har höjdmодellen "Sweden Skog" från Lantmäteriet nyttjats. Detta lager täcker hela den aktuella geografiska utsträckningen med en upplösning på 1 x 1 m.

## 5.2 Scenarier och nedströmseffekter

För att kunna hantera geografiska variationer i historisk erosionstakt, samt konsekvenser av olika åtgärder, har kustlinjen delats in i fyra olika kustsektioner. Dessa sektioner är desamma som använts för modellering av sedimenttransport, med undantag för avsnitt 4 som delats in i två kustsektioner, se Figur 5-1.



Figur 5-1 Indelning av kustsektioner för beräkning av framtida markförluster. Indelningen följer den som presenterats vid modellering av sedimenttransport, med undantag för avsnitt 4 som delats in i kustavsnitt 4-1 och 4.2.

Åtgärder sker inom kustområde 4-2 och 5. Nedströmseffekter från kustskyddsåtgärderna förväntas i område 6. I Tabell 5-1 presenteras bakgrundserosionen i respektive kustområde, med och utan åtgärder. För nollalternativet, som innebär att inga åtgärder vidtas, förväntas denna utveckling fortgå i oförändrad takt. Beroende på åtgärdsval antas bakgrundserosionen fortskrida i olika takt.

Följande antaganden har gjorts för att belysa nedströmseffekter av åtgärdsförslagen:

- **Alternativ A – strand- och dynfodring:** fortsatt erosion i åtgärdsområdet (4-1 och 5) förhindras. Nedströms, i delområde 6, minskar bakgrundserosionen till 0 då sedimenttillförseln ökar. Erosionen till följd av havsnivåhöjning förväntas dock fortgå oförändrat.
- **Alternativ B – Släntskydd i sten:** fortsatt erosion i åtgärdsområdet (4-1 och 5) förhindras. Nedströms, i delområde 6, ökar bakgrundserosionen med 25% till följd av minskad sedimenttillförsel och ökad vågenergi.

Det positiva tillskott av landareal som alternativ A ger upphov till (inom utfyllnadsområdet) har inte medräknats som "positiv markförlust". Erosion till följd av havsnivåhöjning förväntas fortgå oförändrat för samtliga åtgärdsalternativ, utom inom åtgärdsområdet.

Tabell 5-1 Beskrivning av indata till markförlustmodell beroende på åtgärdsalternativ.

Delsektion		4-1	4-2	5	6
Nollalternativ	Bakgrundserosion (m/m strand/år)	-0,16	-0,19	-0,2	-0,26
	Stigande hav	Linjär mot 2070	Linjär mot 2070	Linjär mot 2070	Linjär mot 2070
Strandfodring	Bakgrundserosion (m/m strand/år)	-0,16	0	0	0
	Stigande hav	0	0	0	Linjär mot 2070
Stenskonung	(m/m strand/år)	-0,16	0	0	-0,32
	Stigande hav	0	0	0	Linjär mot 2070

## 5.3 Resultat

Resultat från markförlustmodellen extraherats för samtliga delsträckor och för 10-års intervall (2030, 2040, 2050, 2060 och 2070). Baserat på beräkningarna har geografiska analyser utförts för att i varje delsträcka beräkna följande:

- Markförluster ( $m^2/år$ )
- Antal bostäder som ligger inom erosionsriskområdet vid slutet av varje decennium.

Dessa beräkningar används vidare som indata för kostnads-nyttoanalysen.

### 5.3.1 Markförluster

Då den historiska erosionstakten förväntas fortgå och då havsnivåhöjningen har antagits vara linjär fram till 2070 blir även markförlusterna linjära. Till följd av åtgärdernas olika nedströmseffekter skiljer sig dock markförlusterna beroende på åtgärdsval. Ett utdrag av resultat för markförlusterna sammanfattas i Tabell 5-2.

Tabell 5-2 Beräknad årlig markförlust för hela påverkansområdet.

Beräknad årlig markförlust			
	Nollalternativ	Strandfodring	Stenskoning
Årlig markförlust (m <sup>2</sup> /år)	780	370	560

### 5.3.2 Antal påverkade bostäder

Precis som indata i tabell 5-1 antyder blir markförlusterna är olika stora i de olika delområdena, och även olika beroende på åtgärdsval. Utmed varje delsträcka har en analys av antalet påverkade bostäder utförts. De beräknade markförlusterna för respektive åtgärd (inklusive nollalternativ) har överlagrats med Lantmäteriets GIS-lager *Byggnad* för att beskriva antalet byggnader som hotas av erosion vid start av varje årtionde till 2070.

Eftersom beräkningarna bygger på grova antaganden är de behäftade med stora osäkerheter, och kartmaterial som pekar ut riskutsatta fastigheter presenteras därmed inte i denna rapport.

Tabell 5-3 Beräknat antal byggnader som riskerar att förstöras till följd av erosion inom påverkansområdet.

Antal påverkade bostäder			
Årtal	Nollalternativ	Strandfodring	Stenskoning
2030	1	0	0
2040	6	1	1
2050	7	0	3
2060	5	1	1
2070	3	2	0

## 6 Designprinciper

### 6.1 Strandfodring

Dimensioneringen av strandfodringens volym bygger i föreliggande utredning på en metod som ofta benämns som den holländska metoden (SGI, 2006) (Verhagen, 1992). Metoden är enkel och bygger på:

- Beräknad erosionstakt (i  $m^3/år$ ) för aktuellt strandavsnitt
- Livslängd av fodringen
- Volymfaktor för hänsyn till sedimentförluster och förändrad erosionshastighet<sup>2</sup>.

Beräkning av erosionstakten (i  $m^3/år$ ) bygger på ett antagande om att strandprofilens utseende inte varierar över tid utan konsekvent kan beskrivas utifrån en jämviktsprofil. Erosionstakten har sedermera uppskattats genom den sedimenttransportmodellering som beskrivs i kapitel 4.3. Längre tidsserier av strandprofiler, mätningar som beskriver strandens utseende över och under vattenytan, ger en bättre bedömning av volymförluster men denna typ av mätningar finns inte att tillgå i studieområdet.

Två olika strandfodringsalternativ har tagits fram, ett med en prognosticerad livstid på 8-14 år och ett med 19-27 år, vilket således medger 4 respektive 2 fodringstillfällen till år 2070. Strandfodringen har utformats som en dyn- och strandplansfodring. Den befintliga kustslänten förstärks med en femton meter bred sandig fördyn, vilket utgör en buffer mot framtida stormerosion. Samtidigt tillförs sand för att höja strandplanet och vidare utöka dagens strandplansbredd med tio meter.

### 6.2 Stenskonig

Den erforderliga krönhöjden för stenskonig utmed Smygehamn har beräknats utifrån metodik i manualen *EurOtop 2018 - Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.* (EurOtop, 2018) Alla de prediktionsmetoder som ges i EurOtop har begränsningar i sin träffsäkerhet. Trots att de ekvationer som föreslås bygger på ett stort empiriskt underlag så finns en betydande spridning i den data som ligger till grund för beräkningsmetodiken. För att hantera osäkerheterna i designprocessen av kustskydd har författarna till manualen valt att införa en ”*design or assessment approach*” som introducerar en osäkerhetsfaktor i storleksordningen en standardavvikelse, för att minimera risken att överspolningen underskattas.

Som indata till beräkningarna har de kombinerade händelser av vattenstånd och vågor som presenteras i kapitel 3.3 använts. Antaganden om medelvattenytans läge beskrivs i 3.4.

Beräkningsmetodiken möjliggör bland annat en uppskattning av medelöverspolningen (uttryckt i liter per sekund och meter) som en funktion av konstruktionens krönhöjd. Utifrån resultaten kan man således optimera ett skydd utifrån vilken platsspecifik överspolning man anser vara acceptabel.

<sup>2</sup> Faktorn kompenserar bland annat för förlust av finmaterial, naturlig omfördelning av sand till fodringens flanker samt ökad sedimenttransport efter fodringen.

(EurOtop, 2018). I denna utredning har de överspolningskriterier som presenteras i Tabell 6-1 ansatts:

Tabell 6-1 Använda kriterier för överspolning.

Dimensionerande händelse	Klimatscenario	Acceptabel överspolning (l/s,m)
10-års händelse	SSP5-8,5 (median)	5,0
100-års händelse	SSP5-8,5 (median)	10,0

Vågor har antagits falla in vinkelrätt mot kusten. Stenskoningen har antagits ha en lutning av 1:2 och konstrueras med ett dubbelt skyddslager av sprängsten.

## 7 Referenser

- CERC . (1984). *Shore Protection Manual*. Washington: CERC Dept. of the Army, U.S. Army Corps of Engineers.
- COWI. (2021). *Utredning gällande framtida hav och översvämningar i Trelleborg kommun*.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2001). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge: Cambridge University.
- EurOtop. (2018). Overtopping velocities and distributions. i J. Van der Meer, N. Allsop, T. Bruce, J. De Rouck, A. Kortenhaus, T. Pullen, . . . B. Zanuttigh, *EurOtop* (ss. 222-223).
- Hallermeier, R. J. (1978). Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion. . *16th Coastal Engineering Conference*, (ss. 1493–1512). doi:<https://doi.org/10.1061/9780872621909.090>
- Hallin, C., Almström, B., Hanson, H., Larson, M., & Persson, O. (2017). Sandbehov för att motverka stranderosion utmed Skånes sydkust under perioden 2017 – 2100. *Journal of Water Management and Research*, *73*(November), 77-84.
- Hallin, C., Tajvidi, N., Hanson, H., & Larson, M. (2016). Statistical Analysis of Extreme Sea Water Levels at the Falsterbo Peninsula, South Sweden. *Vatten - Journal of Water Management and Research*, ss. 72:129-142.
- Hanson, H., & Larson, M. (2010). Direct Formula to Compute Wave Height and Angle at Incipient Breaking. *Journal of Waterways, Port, Harbor and Ocean Engineering*, *136*(2): 119-122.
- IPCC. (2019). *Special Report: Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. IPCC.
- IPCC. (2021). *Summary for Policymakers In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- SGI. (2006). *Strandfodring - Skydd av kuster mot erosion och översvämning*.
- SGI. (den 01 01 2022). *Vågdataportalen v.2*. Hämtat från <https://gis.swedgeo.se/vagmodell/>
- SGU. (2016). *Skånes känsliga stränder - erosionsförhållanden och geologi för samhällsplanering, SGU Rapport 2016:17*. Uppsala: SGU.
- SGU. (2020). *Kustnära sedimentdynamik, SGU Rapport 2020:04*. Uppsala.
- SGU. (2021). *Fysiska och dynamiska förhållanden längs Skånes kust – underlag för klimatanpassningsåtgärder*.
- SMHI. (2018). *Extremvattenstånd i Trelleborg*.
- Sweco. (2012). *Stranderosion i Trelleborgs kommun*. Malmö.
- Sweco. (2017). *Kustskydd Trelleborg - En idéstudie för hur Trelleborgs tätort kan skyddas mot höga havsnivåer, nu och i framtiden*. Malmö.
- Sweco. (2021a). *Översiktlig nationell riskkostnadsanalys av ras och skred, översvämningar och erosion*.
- Sweco. (2022). *Teknisk PM - Kustskydd Trelleborgs hamn - Angrepp och evakueringsväg*.
- Verhagen, H. J. (1992). Method for artificial beach nourishment. *International Conference on Coastal Engineering*. Venedig.