Kustnära sedimentdynamik

Johan Nyberg, Bradley Goodfellow,
Jonas Ising & Anna Hedenström

mars 2020

SGU-rapport 2020:04
Diarie-nr: 423-1763/2019

SGU Sveriges geologiska undersökning

Omslagsbild: Löderups camping. Flygsand och aktiv erosion.
Fotograf: Kärstin Malmberg Persson

Författare: Johan Nyberg, Bradley Goodfellow, Jonas Ising och Anna Hedenström
Granskad av: Anette Björlin (SGI), Per Sörensen (Kystdirektoratet)
och Magnus Lund (Kristianstads kommun)
Ansvarig enhetschef: Anna Hedenström

Redaktör: Johan Sporrong

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

INNEHÅLL

Läsanvisning 5
Sammanfattning 6
Summary 8
Inledning 10
Samhällsutmaningar till följd av höjda havsnivåer 10
Bakgrund och begrepp 10
Sedimentdynamik 10
Erosion 10
Kronisk eller långsam erosion 11
Akut erosion 11
Transport av sedimentpartiklar 12
Vågklimat 13
Stränder är dynamiska 13
Sedimenttransport tvärs stranden 15
Sedimenttransport längs stranden 17
Stränders förändringar i tid och rum 18
Korta tidsperioder 19
Längre tidsperioder 19
Väder och klimat, drivande faktorer till kustnära sedimentdynamik 19
Metodik och underlag 20
Jordart, bergart, topografi och batymetri 20
Sedimentdynamik, land 21
Sedimentdynamik, havsbotten 21
Exponering 27
Partikeltransport 27
Resultat 27
Exempel, sedimentdynamik och transport längs sydkusten i Skåne 27
Syfte 27
Området 28
Metodik och underlag 28
Resultat 28
Kämpinge–Trelleborg 30
Trelleborg–Smygehuk 32
Smygehuk–Ystad 33

Ystad–Kåseberga 34
Kåseberga–Sandhammaren 36
Exempel, sedimenttransport och strandmorfologi vid Åhus, ostkusten Skåne 38
Syfte 38
Området 38
Metoder 40
Resultat 41
Bottensediment och vattendjup (batymetri) 47
Diskussion 50
Diskussion med slutsats 52
Referenser 54

LÄSANVISNING

Denna rapport är avsedd för de som generellt är intresserade av och arbetar med klimatanpassning samt kustzons- och fysisk planering, men även de som mer specifikt projekterar åtgärder mot till exempel stranderosion och översvämning. Rapportens inledning samt avsnittet *Bakgrund och begrepp*, ger översiktligt den information som behövs för att förstå den kustnära sedimentdynamiken. I avsnittet *Metodik och underlag* beskrivs vad som har använts i denna studie för att bestämma sedimentdynamik och sedimenttransport i ett kustområde. I avsnittet *Resultat* redovisas samt presenteras resultat av sedimentdynamiken i valda, för studien, kustområden som ett verktyg i form av kartor.

SAMMANFATTNING

För att bedriva ett bra arbete med kustzons- och fysisk planering samt lyckas med åtgärder mot erosion och översvämning behövs kunskap om kustmorfologi och hur tillhörande sedimentdynamik och sedimenttransport vid kusten fungerar. I Sverige finns ett uttalat behov av denna kunskap, vilken idag är mycket bristfällig. Detta gäller både för dagens och framtida högre havsnivåer orsakade av klimatförändringar. Av den anledningen redovisas en metod med ingående nödvändig information för att ta fram kunskap om sedimentdynamik, sedimenttransport och morfologi på land och havsbotten i ett svenskt kustområde. Resultat från användandet av metoden längs Skånes syd- och ostkust presenteras som ett verktyg för arbetet med klimatanpassning i form av sedimentdynamiska kartor. Dessa områden är valda för att här finns den information om fysiska förhållanden som krävs, stor befolkning med mänsklig påverkan, ingen landhöjning samt flacka stränder i huvudsak uppbyggda av jord med en kustlinje som förändras över tid. Kartorna redovisar var sediment eroderas, transporteras eller deponeras och storleken på partiklarna i dessa sediment. Dessutom visar de utbredning, förekomst och tillgång av den rörliga sand som den aktiva sandstranden består av och som interagerar mellan land och hav, från den höjd på land ned till det vattendjup på havsbottnen, som vind, vågor och strömmar påverkar. Transportriktningar samt om sedimentdynamiska systemet för olika kustavsnitt är slutet eller öppet, det vill säga om mängden sand minskar eller ökar redovisas också. Detta är viktiga kunskaper då mängden sand som transporteras mellan olika kustavsnitt påverkar återhämtningen av en strand efter erosionsförlopp, och kan medföra att vissa erosions- och översvämningsåtgärder påverkar en strand i ett annat kustavsnitt negativt.

Verktyget i form av de sedimentdynamiska kartor som presenteras här, tillsammans med information om volym, mäktigheter och transportvolymer av sanden som förekommer i anslutning till sandstränder, är en mycket viktig del i lokalisering samt utformning av eventuella erosions- och översvämningsåtgärder vid en framtida havsnivåhöjning. Dessutom kan verktyget användas i kustzons- och fysisk planering; exempelvis vid lokalisering av land-, dyn- och bottenområden för bevarande och skydd, plantering av ålgräs, biologiska inventeringar och modelleringar samt projektering av anläggningar. Det kan även användas generellt vid planering av muddringsarbete och att hitta områden för deponering av muddermassor, men också för sand till strandfodring samt där den slutliga ackumulationen av finpartiklar, organiskt material, näringsämnen, föroreningar och miljögifter förekommer.

Resultaten som redovisas i kartorna är baserade på

- sammanhängande och enhetliga kunskapsunderlag om ytgeologin, det vill säga jordarter och sediments fördelning på land och havsbotten. I denna studie har, från dessa underlag, beskrivningar av sedimentdynamiska förhållanden för olika områden utvecklats. Fördelningen av olika jordarter och sediment med deras kornstorleksinnehåll i mark- och bottenytan tillsammans med höjd- och djupförhållandena ger ett slags facit av de sedimentdynamiska förhållandena
- sammanhängande höjd- och djupnivåer med morfologi. Dessa underlag ger information om var material eroderar och förflyttas eller deponeras i ett område samt volymer, transportformer och riktningar
- exponering, det vill säga den energi kusten utsätts för från vågor, bottenströmmar och vind med riktningar. I denna studie har exponeringen för Skånes sydkust modellerats fram av observerade vinddata sedan 1941
- förändringar av strandlinjens och dynfotens läge, vilket ger information om kustens erosions- och ackumulationsförhållanden samt stränders morfodynamik, vilket reflekterar den energi stranden utsätts för. Dessa lägen samt klassificering av det strandmorfodynamiska tillståndet

har här studerats i flygbilder längs den skånska östkusten vid Åhus tagna under perioden 2007 till 2018.

Resultaten visar på en relativt liten förekomst och tillgång på havsbotten av den lätteroderade och rörliga sand som är en del av den aktiva strandprofilen längs Skånes sydkust från Kämpinge till Kåseberga. Sanden är generellt ansamlad på östsidan i bukter vilket tillsammans med bukternas form och en bottenström dominerande åt öst, visar på en nettotransport av sand österut längs den skånska sydkusten över tid. Bukterna har bildats och förekommer mellan avgränsande områden bestående av svåreroderad berg och jord. Detta resulterar i utskjutande landuddar där en grundare botten med grövre mindre lättrörliga sediment fortsätter ut från land och mellan vissa bukter försvårar transport på havsbotten. Av den anledningen råder det i vissa bukter en negativ sedimentbudget, till exempel vid Ystad Sandskog, där en större transport av sand sker bort från bukten, från land ut mot havet än tillförsel längs kusten, vilket orsakar erosionsproblem. Nämnda framtagna kunskaper bör användas vid bedömningar av stränders förmåga att utgöra skydd mot erosion och översvämning samt vid erosionsprognoser.

Skånes östkust, från Helge å i söder till Fårabäck norr om Åhus, omfattas av bukter med fyra mer eller mindre slutna sedimentdynamiksystem. Utbredningen av rörlig sand återspeglar de områden där stranderosion och ackumulation förekommer. Det omfattande dynfältet och observationer av dynfotens tillväxt i den centrala delen av bukten från Äspet till Yngsjö indikerar att sand transporteras på havsbottnen längs kusten hit och ackumuleras på landdelen av stranden. I den norra delen av denna bukt eroderas däremot både strandlinjen och dynfoten och sanden transporteras sannolikt längs kusten till den centrala delen och där ackumuleras. I bukten norr om Åhus förekommer sammanhängande sand på land och havsbotten i ett slutet sedimentdynamik-system där erosion äger rum vid den södra delen av stranden. Sandtransport sker norrut för ackumulation i den norra delen av bukten. Tillförsel av sand hindras längs med kusten söderifrån av ett avsnitt av naturligt grundare botten med grövre svåreroderade sediment, en muddrad ränna in till samt själva hamnen i Åhus.

Den här beskrivna och utvecklade metoden tillsammans med presenterade, nödvändiga underlag bör tas fram och presenteras som ett verktyg för arbetet med klimatanpassning och fysisk planering längs delar av Sveriges kust där behov finns, med början vid de områden som är speciellt utsatta för erosion och översvämning, som till exempel i Halland och Skåne.

Detta innebär att i tillägg till befintliga underlag bör

- enhetlig sammanhängande kartläggning av land- och bottengeologi samt höjd- och vatten-djupsförhållanden för de relevanta områden där de inte finns utföras
- återkommande mätningar av höjd- och vattendjupsnivåer, med till exempel drönare, för volymbestämningar och studier av morfodynamiska förändringar utföras i sediment-dynamiksystem för relevanta områden
- fysiska mätningar av sedimenttransport och kornstorleksanalyser utföras i sedimentdynamik-system för relevanta områden
- modelleringar av kustens respons på klimatförändringar med de här presenterade befintliga samt kommande insamlade underlag utföras.

SUMMARY

Knowledge of coastal sediment morphodynamics along the Swedish coast is needed for land use and to mitigate coastal erosion and flooding. Presently, there are large deficiencies in this knowledge base in Sweden and addressing these will be crucial for mitigating and adapting to future climate change, especially with respect to increasing sea level. Doing this requires that rigorous tools for assessing Swedish coastal morphodynamics be developed, tested, documented, and implemented. This report documents one such tool and its application along the south and east coasts of Skåne, in southernmost Sweden. These coastlines were selected for study because they have the information on physical conditions that is required, a high population density, with low-lying urban areas developed in easily eroded Quaternary sediments. Land uplift following the last glaciation is now outpaced by sea-level rise and there is presently localized erosion and flooding risk that is anticipated to worsen under higher future sea levels. This assessment of coastal morphodynamics is presented as sediment-dynamic maps that show the particle size distribution of nearshore sediments to permit analysis of transport rates and locations where these sediments are eroded, transported and deposited. It also presents an analysis of wind-driven waves and currents that drive morphodynamic processes across short (hours-days) and long (weeks to decades) timescales. Sediment transport directions are then analyzed within morphologically defined compartments and an assessment is made as to whether these compartments are closed, such that there is no sediment exchange between compartments, or open, where there is sediment exchange. The compartment analysis helps to determine locations where there is a long-term trend towards erosion, accumulation, or if the sediment transport system is in balance. Understanding of these long-term trends in coastal compartments provides a solid foundation for developing measures to mitigate coastal erosion and flooding that are well adapted to local conditions and which also do not exacerbate erosion or flooding in other compartments.

The tool presented in this report, coupled with additional outlined activities, can be used in coastal zone planning to improve resilience to future climate change through, for example, the design and construction of engineered solutions to coastal erosion and flooding. It could also be used, in general, in identifying areas for marine, shoreline, and dune field conservation, planting of eelgrasses, development of coastal zone biological inventories and modeling. Moreover, it could be used in planning dredging work and finding areas for deposition of dredged material, as well as zones that can potentially be dredged to supply sand to beach nourishment projects and where the final accumulation areas of fine particles, organic matter, nutrients, pollutants and environmental toxins occur.

The sediment dynamic maps presented here are based on

- coherent and uniform surficial sediment characteristics on land and on the seabed. This is crucial to determining the spatial distribution of sediments susceptible to erosion, transport, and deposition by coastal winds, waves, and currents
- coherent and uniform subaerial and submarine surface topography. This provides crucial information on the sizes of sediment sources and sinks and informs transport processes and directions
- exposure of the coastline to winds, waves, and currents that drive coastal morphodynamics. In this study, the exposure of the southern coast of Skåne to this driving energy has been modeled from wind speeds and directions that have been recorded since 1941
- a case study in the Åhus area of changes in beach morphodynamic state and beach lines defined both by the water level and dune foot positions. This analysis is based on biannual aerial photographs for the 2007–2018 period and assists in assessing energy inputs to the

coastal sediment systems as well as short- and long-term processes and patterns of erosion and deposition.

The results highlight the near-shore relatively small presence of easily eroded and transportable sand, with accumulations generally located on the east sides of bays along the southern coast of Skåne. This, together with the gently arcuate shapes of the bays and an eastwards-prevailing bottom current, indicates a net long-term (over decades or longer) eastwards transport of sand along the southern coast of Skåne. The bays have formed between deposits of coarse-grained Quaternary sediments, frequently boulders, that are difficult to erode. These coarse-grained deposits form promontories that in some cases inhibit longshore sediment transport and created closed embayments. This is a key reason why beaches in some bays such as Ystad Sandskog, have a negative sediment budget (i.e are undergoing long-term erosion) because there is more transport of sand from beaches out to sea than is replenished through longshore sediment transport.

The east coast of Skåne, from Helge Å in the south to Fårabäck north of Åhus, is comprised of four gently arcuate bays that display more-or-less closed sediment dynamic systems. Beach erosion and accumulation occur in different segments of these embayments. In the Äspet to Yngsjö embayment, the extensive dune field and ongoing seawards extension of the dune foot indicate that sand accumulates landwards of the beach in the central part of the embayment. This contrasts with shoreline and dune foot retreat in the northernmost part of this embayment, which poses an immediate threat to housing. In the closed embayment containing Evenemangs-stranden, northwards directed longshore sediment transport causes erosion at the southern part of the embayment, which is mitigated by an ongoing beach nourishment program. Accumulation occurs in the northern part of the embayment. The longshore supply of sand from the south into this now-closed embayment is inhibited by a segment of coast that has a shallow bathymetery and contains deposits of coarse-grained sediments, with further disruption caused construction of the port of Åhus and the dredging of a channel into the port.

The methods developed and applied in this report provide a tool that can applied to parts of the Swedish coast where it is needed starting with the areas that are especially vulnerable to erosion and flooding through future rises in sea level.

This tool can contribute to assessments for climate adaptation and mitigation in coastal areas and should be further developed through the following actions:

- Mapping that couples subaerial and submarine surficial sediments with high resolution elevation and bathymetric data.
- A program of regular surveys, for example using drones, of onshore and nearshore coastal morphologies in key localities to allow for assessments of sediment volumes and coastal morphodynamic responses to temporally varying winds, waves and currents. This regular surveying is crucial to improving our understanding of coastal sediment dynamic processes so that future impacts of rising sea level on coastal sediment dynamics and flooding risk can be quantitatively predicted.
- Physical measurements of sediment transport and grain size analyzes in key localities, such as those that presently have an erosion problem or are susceptible to flooding.
- Probabilistic modelling of future coastal responses to sea level rise.

INLEDNING

Syftet med denna studie är att ta fram ett verktyg och en metod för analys av den kustnära sedimenttransport (sedimentdynamik) som interagerar mellan land och havsbotten. Sedimentdynamik definieras här som omfattningen av det naturliga material som eroderas, transporteras och ackumuleras i ett område samt storleken på partiklarna i detta material. Det finns ett uttalat behov i Sverige av denna kunskap, vilken idag är bristfällig. Studien har delfinansierats av SMHIs medel för utveckling av verktyg för anpassning till ett förändrat klimat. Dessa medel ska förbrukas under kort tid, vilket innebär att denna studie är tidsbegränsad. Studien använder därför endast tidigare insamlade dataunderlag samt ska betraktas som en pilotstudie och som fokuserar på ytgeologins, vågors och bottenströmmars verkan på de sedimentdynamiska förhållandena och förändringar i morfologi. Studien är också en del av Regional kustsamverkan Skåne-Halland, som initierades 2018, för att arbeta med klimatrelaterade problem i kustområden i Skåne och Halland. Regional kustsamverkan drivs av en arbetsgrupp bestående av länsstyrelserna i Skåne och Halland samt Statens geotekniska institut (SGI) och Sveriges geologiska undersökning (SGU). Samarbete sker med de myndigheter som är med i Regional kustsamverkan samt relevanta kommuner och universitet.

Samhällsutmaningar till följd av höjda havsnivåer

Kunskap kring sedimenttransport vid kusten är en parameter som behövs för att bedöma nyttan och konsekvensen av olika typer av åtgärder som planeras där. Ett exempel på åtgärd är strandfodring, det vill säga att man tar sand från havsbotten och lägger på stranden. Strandfodring ses ofta som en lösning för att hantera erosion och översvämning vid en framtida havsnivåhöjning. Kunskap kring sedimenttransport behövs för att kunna göra kostnads-nyttoanalyser och konsekvensbedömning av den planerade åtgärden. Ett annat exempel är sanddyner och sandavlagringar som ofta utgör ett naturligt kustskydd både för översvämning och erosion. De är beroende av naturliga kustprocesser och sanddynamik med sedimenttillförsel och ackumulation för att fungera som skydd både mot översvämning och erosion. Konstruktioner, såsom pirer, hamnar och erosionsskydd, eller muddringar och båttrafik etc. kan påverka sandtransporten, både längs med kusten och mot havet, och därmed också sandstränderna och dynerna. Sedimentprocesserna är även nödvändiga för att skapa förutsättningar för ekosystemen och den biologiska mångfalden på stränderna och på havsbotten. Kunskapen om sedimentfördelning, vågor, strömmar och dess betydelse för sedimentdynamiken vid kusten är alltså mycket viktig för att göra bedömningar om till exempel erosionsrisk orsakade av klimatförändringar i framtiden och vilka åtgärder som kan vidtas, exempelvis lokalisering och utformning av översvämningsskydd för att lindra klimatförändringarnas effekter.

BAKGRUND OCH BEGREPP

Sedimentdynamik

Erosion

Erosion definieras som nednötning av berg, jord eller annat material på grund av mekanisk eller kemisk påverkan och transport av materialet från en plats till en annan. För en kustremsa, som ständigt anpassar sig till vågor och havsnivåer vid varje given tidpunkt, är erosion en naturlig process. Erosion kan uttryckas som volym/längd/tid, till exempel $m^3/m/år$, eller som kustlinjens reträtt (tillbakagång) per tidsenhet som till exempel m/år. När kustremsan eroderas förloras inte material, utan materialet förflyttas och eventuellt sorteras, från en plats till en annan.

Förflyttningen sker antingen längs eller in eller ut från kusten. För att bedöma erosionsrisken i ett kustområde måste hänsyn tas till storlek och sätt samt effekterna av kustens förändring.

För att jord- eller bergmaterial ska kunna eroderas krävs dels en vatten- eller vindhastighet som är tillräckligt hög, dels att materialet är erosionskänsligt, se till exempel Malmberg Persson m.fl. (2016). De mest erosionsbenägna jordarterna och sedimenten är välsorterade och har en kornstorleksfördelning motsvarande finsand och mellansand. Mindre känsliga för erosion är måttligt eller dåligt sorterade jordarter (sediment) med en stor andel grövre kornstorlekar, som till exempel morän. Det erosionskänsliga materialet i de ytligaste skikten i sådana jordar kan dock spolas bort av vågor och vattenströmmar. Då lämnas grövre fraktioner kvar i ytan, så kallat residualmaterial, av sten och block och bildar en stenpäls eller till exempel klapper, som har hög motståndskraft mot fortsatt erosion. När jordmaterialet (sedimentet) utgörs av små kornstorlekar, silt och ler, ökar motståndet mot erosion, beroende på bindningskrafter mellan kornen. Därför brukar man skilja på egenskaper av erosion och transport för friktionsjordarter (jordart som inte innehåller silt och ler) och i kohesiv jordart (jordart som innehåller silt och ler).

När material eroderas och förflyttas bort från ett område kan området, i gengäld, få material tillfört från andra närliggande områden. Erosionsproblem uppstår då mer material bort-transporteras än tillförs området under en viss tid. I många fall förflyttas materialet först från stranden tvärs utåt och därefter med längsgående strömmar bort från området. Om nytt material tillförs med de längsgående strömmarna kan det nya materialet med tvärgående vågrörelser och strömmar föras in och deponeras där tidigare deponerat material transporterats bort. I sådana fall sker ingen erosion, sett över en längre tidsperiod. Om de längsgående strömmarna inte för med sig nytt material till området kan däremot erosionsproblem uppstå.

Kronisk eller långsam erosion

Kronisk eller långsam erosion orsakas av att den totala tillförseln av sediment, oftast sand, till ett område (cell) med ett relativt oberoende sedimentdynamiskt system är mindre än borttransporten över tid. En sedimentdynamisk cell (område) är oftast avgränsad genom fysiska hinder; både naturliga såsom grunda bottnar med grövre partiklar än sand, djupare bottnar samt landuddar, och mänskliga som hamnar, pirar och muddrade rännor etc. Kronisk erosion är inte nödvändigtvis kopplad till erosion orsakad av storm. Transporten av mängden sand beror på sandtillgång och gradienten som sanden transporteras över parallellt längs med kusten. Gradienten förändras på grund av djup- och bottenförhållanden, kustens form och naturliga eller mänskligt gjorda strukturer.

Akut erosion

Akut erosion orsakas av höga vågor och högt vattenstånd vilket vanligtvis är förknippat med och förekommer under stormar. I samband med dessa händelser kan sand eller annat material eroderas i den övre delen av den aktiva strandprofilen och föras ned till lägre nivåer och resultera i kusterosion. Om materialet som eroderar huvudsakligen består av sand kan kusten återhämta sig helt eller delvis efter en storm. Om materialet är av grövre karaktär eller av en kusttyp med högre terräng bestående av jord (klintkust) eller berg (klippkust) som bryter av mot havet är erosionen irreversibel, det vill säga kustens förändring är oåterkallelig. Akut erosion kan också inträffa då vågor och strömmar kommer från en annan riktning än normalt och därmed orsakar en förändring i sedimenttransport vid kusten. Säsongsvariationer av kustens läge betraktas också som akut erosion. Vid akut erosion kan det också föreligga risk för översvämning då naturliga översvämningsskydd som sanddyner kan erodera och försvinna.

Transport av sedimentpartiklar

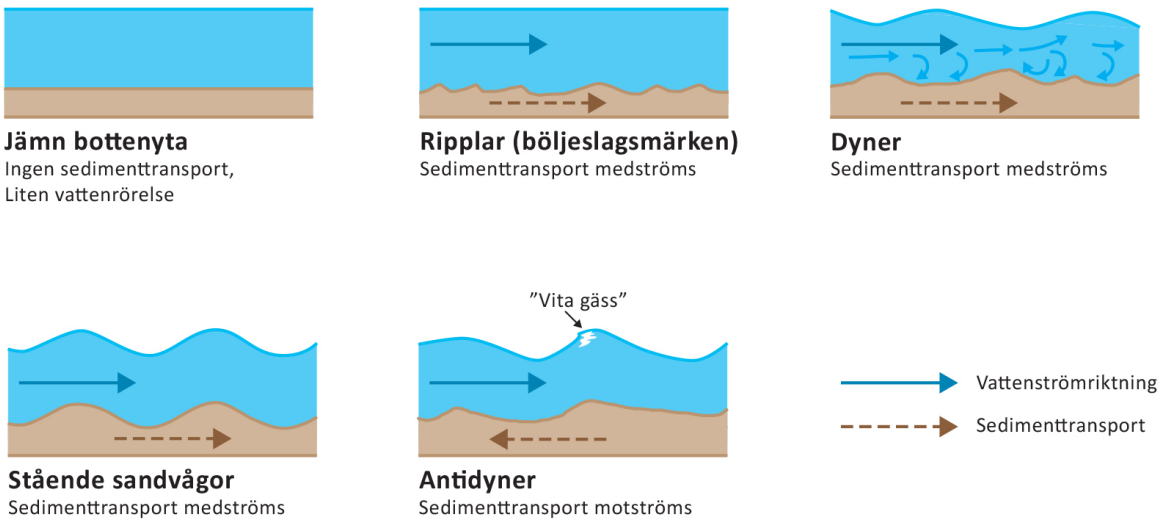
Sedimenttransport är en rörelse av solida partiklar som är orsakad av gravitation eller att ett medium, till exempel luft och vatten, i sin rörelse drar med sig partiklarna. Vid kusten orsakar både vatten och vind en transport av partiklar.

Partikeltransport som orsakas av vind kallas för eolisk och kan resultera i att till exempel sandvågor bildas under erosion, transport och deposition (fig. 1). Partiklarna som förflyttas av vind, till exempel i flygsand, har en typisk storlek av mindre än 1 mm, vilket är finsand (0,06–0,2 mm), och är i regel lite mindre än de sedimentpartiklar som transporteras i vatten. De sedimentpartiklar som lättast transporteras i vatten har en storlek av fin och mellansand (0,06–0,6 mm). Detta beror på att luft har en lägre densitet och viskositet än vatten och utövar därför en mindre kraft på underlaget än vatten.

Det finns tre sätt som partiklar transporteras på i det kustnära havet; saltation, bottentransport och transport i suspension (Chanson 2004).

Då erosionsprocessen inletts sker transporten av det eroderade materialet till en början som en transport av partiklar som rullar och hasar längs botten, vilket benämns bottentransport. Vid ökad vattenhastighet övergår bottentransporten till saltation, vilket innebär att kornen har sådan energi att de mer eller mindre hoppar fram längs botten. Dessa korn kan vid nedslagen på botten orsaka transport av ytterligare partiklar. Nästa hastighetssteg i vattentransporten innebär att de virvelrörelser som uppstår i vattnet förmår att lyfta eroderade partiklar och en transport av uppslammat och suspenderat material erhålls. Finare partiklar än finsand transporteras nästan uteslutande som suspenderat.

Ofta kommer suspenderat material att avsättas och ryckas loss i många omgångar tills de blir avsatta och liggande i tillräckligt lugnt vatten. Områden där sedimenten blir liggande brukar kallas ackumulationsområden och stränder som tillväxer på grund av sedimentansamling kallas ackumulationsstränder. När bottenmaterialet sätts i rörelse bildas olika mönster eller ytformer längs bottnen beroende på bland annat vattenhastighet, vattendjup och typ av sediment. I figur 1 visas vilka former sand tar vid bottentransport.



Figur 1. De olika mönster eller ytformer sand får vid bottentransport vid ökande strömhastighet och skjuvspänning. Illustration: Fredrik Saarkoppel.

Vågklimat

Vågklimatet (vågors storlek och riktning i förhållande till kustlinjens orientering) tillsammans med geologin är de parametrar som framförallt påverkar kustens och strandens sedimentdynamik, utseende och morfologi. Det är primärt vågorna som genom egengenererade vattenrörelser och inducerade strömmar på bottnen samt frigörande av energi när de bryts i svallzonen och i bränningszonen orsakar sedimenttransport (fig. 1–5). Vågornas inverkan på bottensedimenten är som störst i bränningszonen, men påverkar bottenmaterial som förekommer på större vattendjup. Termen konvergensdjup definierar det vattendjup som våginducerade vattenrörelser påverkar sediment ned till. Detta djup varierar men har teoretiskt beräknats att till exempel utanför Skånes kust förekomma mellan cirka 2 och 7 m vattendjup (Birgander m.fl. 2018, Fredriksson m.fl. 2017).

Vågorna som träffar kusten kan delas in i korta och långa vågor, där de korta har perioder på mindre än 20 sekunder och de långa perioder från 20–30 sekunder upp till 40 minuter. De korta vågorna kan delas upp i vindvågor, som också kallas för stormvågor, och dyning medan de långa är till exempel tsunamis och stående vågor.

Vindvågorna, som först och främst påverkar kusten i Sverige, genereras av lokala vindar, är normalt branta (höga och korta), oregelbundna med riktning och destruktiva, vilket orsakar en nettotransport av sediment ut från stranden som resulterar i ett flackt yttre strandområde och ett brant inre strandområde, (fig. 2–5). Dyningar är genererade av vindar långt bort och har därför transporterats över långa distanser vilket kan medföra att vågriktningen inte är densamma som den lokala vindriktningen. Dyningar har en relativt lång period och måttlig höjd samt är regelbundna med en riktning. Dyningar orsakar ofta en brant yttre strandzon, (fig. 2–5).

I stort sett samverkar och interfererar alltid vindvågor och dyningar från olika riktningar och refrakterar mot bottnar och land samt bryts.

Vattendjupet begränsar våghöjden. Det betyder att vågorna börjar bryta när våghöjden utgör en viss andel av djupet, det vill säga på ett visst avstånd från stranden. När kvoten våghöjd/djup är omkring 0,8 bryter vågen. Vågor som bryts delas normalt upp i tre kategorier:

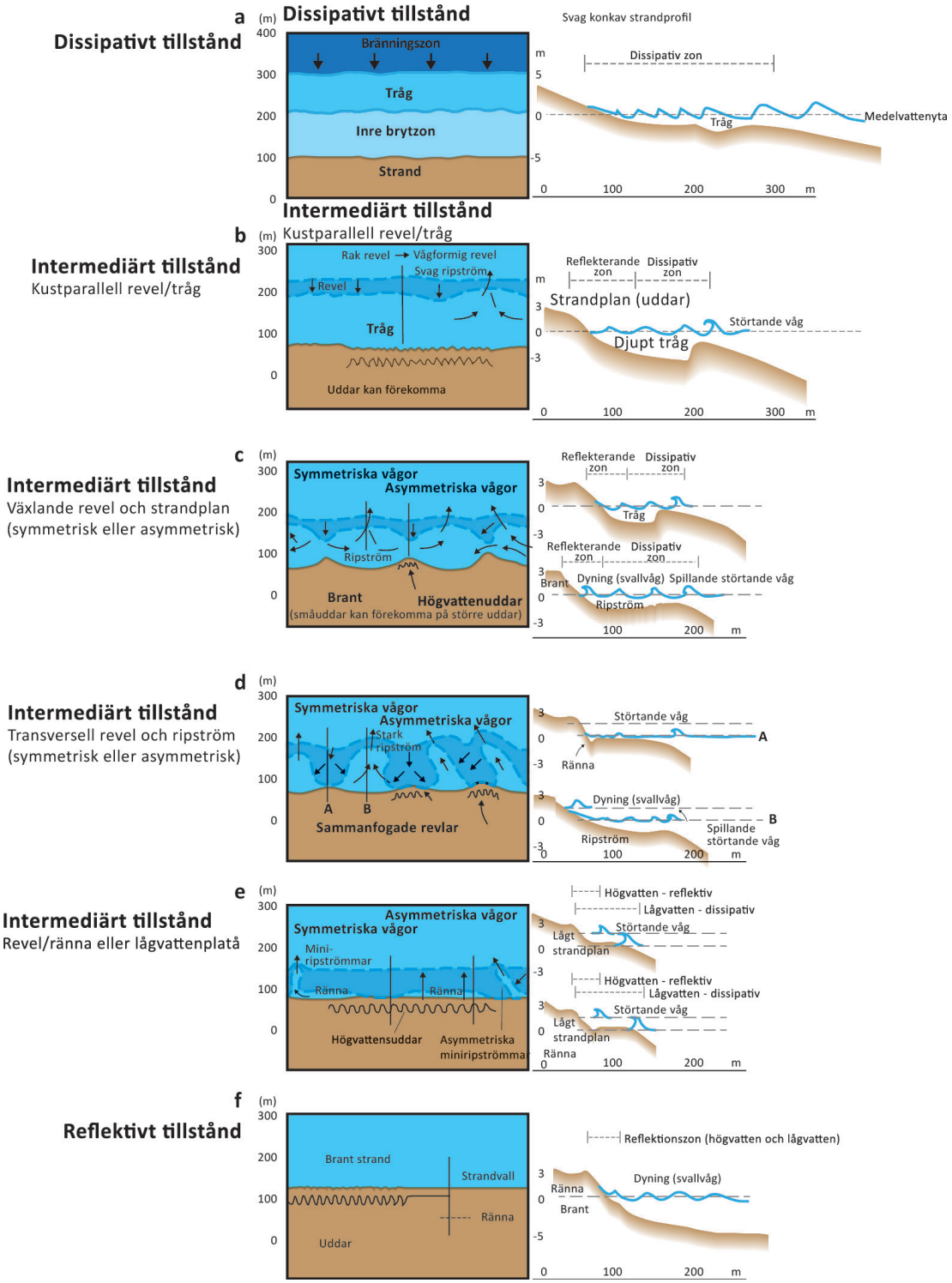
- En spillande brytande våg genereras då vågen propagerar över en flack yttre strandzon, (fig. 2 och 5). En spillande våg bryter gradvis genom att skum bildas på krönet av vågens framkant under en tid och avstånd av upp 6 till 7 våglängder.
- En störtande våg bryter genom att den övre delen av vågen bryter i ett svep över den undre delen, vilket innebär att en stor del av vågens energi förloras snabbt. Denna form av brytande äger rum när måttligt branta vågor når måttligt branta yttre strandzoner (fig. 2 och 5).
- En dyning eller svallande våg bryter genom att den undre delen av vågen drar sig upp och lägger sig i svallzonen. Denna typ av brytning sker när relativt långa vågor möter branta yttre strandzoner (fig. 2–5). Vågenergin reflekteras därmed mer än sprids i denna brytningsprocess (fig. 2 och 5).

Vind som blåser över en vattenyta genererar vågor som blir större vid ökande vindstyrka, varaktighet och stryklängd, det vill säga den sträcka som vinden kan påverka vattenytan över öppet hav.

Stränder är dynamiska

I Sverige uppträder stranderosion i kustområden mestadels där större ansamlingar av sand eller grus förekommer sammanhängande på land och havsbotten. Sandstränder är dynamiska och anpassar sig ständigt till rådande våg- och vattennivåförhållanden. Förhållandet mellan strandens

form och mottagen energi kallas morfodynamik (Wright & Short 1977). Strändernas anpassning till vågenergi sker framförallt genom att sand överförs från de övre till de nedre delarna av strandprofilen och vice versa. Detta innebär att förändringar av strandens utseende kan ske både tvärs



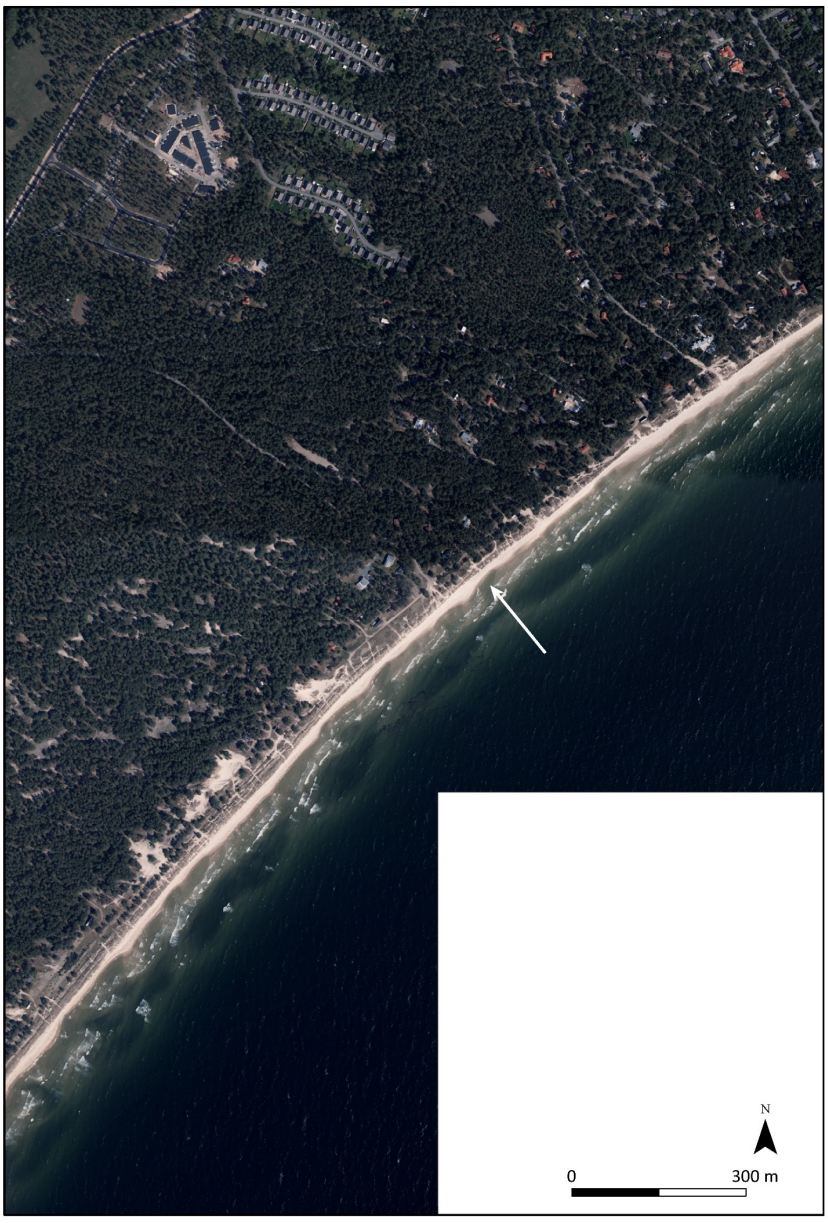
Figur 2. Morfodynamisk modell av Wright & Short (1984) som visar sex dominerande strandtillstånd från (a) högenergi-, dissipativa stränder till (f) lågenergi-, reflekterande stränder. De olika tillstånden för stränderna visas i planvy i vänstra spalten och i profilvy (tvärs kusten) i högra spalten. Strandmorfologier i intermediära tillstånd med planvy (b till e) återspeglar horisontell åtskillnad av returflödet för vattnet, via ripströmmar, i motsats till den vertikala åtskillnaden, via returflöde längs botten (underström) på dissipativa stränder (a). Illustration: Fredrik Saarkoppel.

och längs stranden. Wright & Short (1977) har gjort en morfodynamisk klassificering för olika strandtillstånd baserad på mottagen energi (fig. 2). Tvärs stranden bildas under vattnet olika längsgående formationer. Deras utseende och läge beror på de inkommande vågornas höjd, längd och bottenprofilens utseende. Längst ut, omkring det område där vågorna bryter, bildas bränningsrevlar. Längre in kan svallrevel, strandtråg och strandvall bildas.

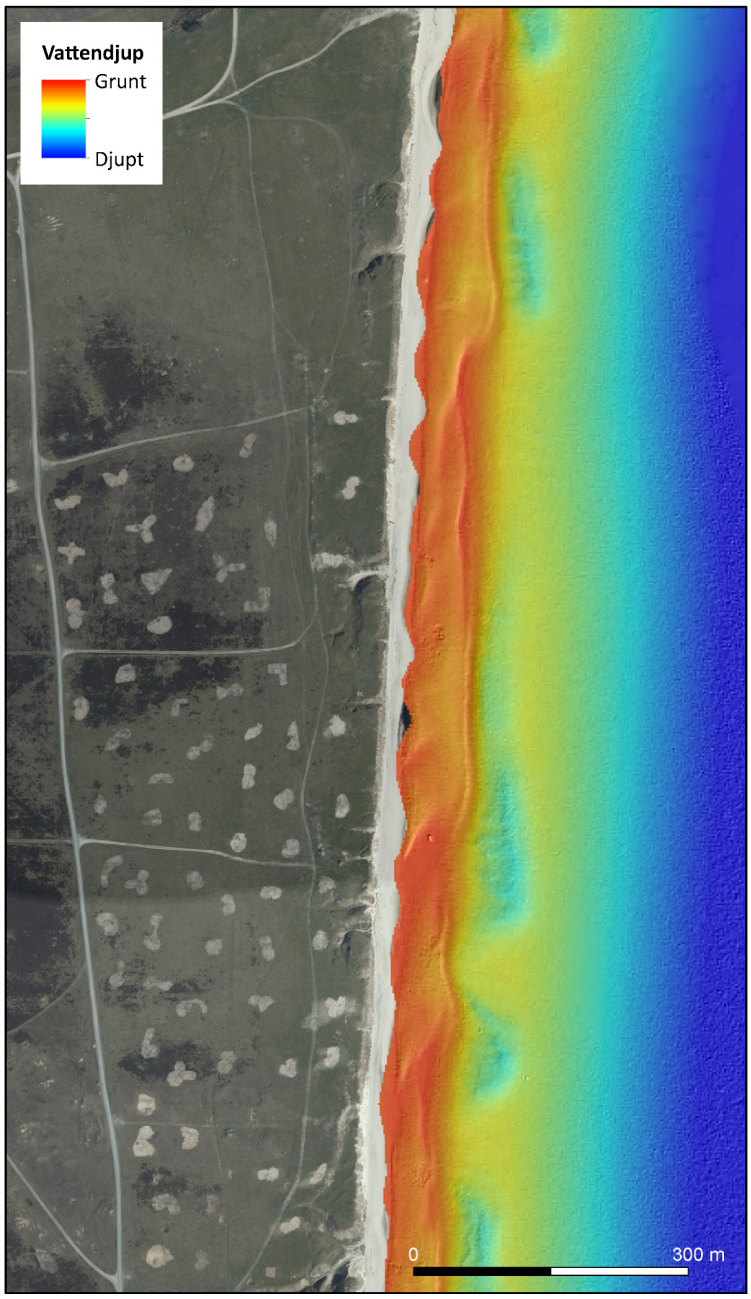
Längs strandlinjen bildas, delvis på grund av längsgående strömmar men även av de inkommande vågornas påverkan, flera typer av formationer som ofta upprepas med jämna intervaller. Exempel på sådana är krumuddar, stranduddar, rivströmsuddar och bukter (Norrman 1967), se figur 2.

Sedimenttransport tvärs stranden

När vattnet flödar tillbaka till havet från stranden hittar det den enklaste vägen, vilket kan bli mellan hinder som brytande vågor och sandbankar. Returflödet orsakar då starka strömmar, som kallas ripströmmar. Dessa har en stor betydelse för transporten av sand från de övre delarna av strandens profil ned till de delarna som är belägna under vatten (Komar 1998), se figur 2–5.



Figur 3. Ortofoto över Yngsjö havsbad, söder om Revhaken, på Skånes östkust som visar områden där sand förflyttas ut från land med så kallade ripströmmar (mörkare områden där vågorna inte bryter, se pil) samt områden där sandrevlar förekommer och bryter vågor och därigenom dämpar våg- och strömrörelser och sandtransport. Ortofoto från Lantmäteriet.



Figur 4. Vattendjupsförhållanden för en sandbotten vid Skånes östkust som tydligt visar en välutbildad sandrevel, den smala och långsträckta sandbanken som förekommer parallellt med stranden. Gropar som förekommer på havssidan, öster om reveln indikerar erosion. Reveln är djupare på vissa ställen vilket indikerar att här transporteras större vattenvolymer med sediment i transport. Från SGUs projekt Skånestrand.

Sandrevlar, det vill säga sandbankar som förekommer parallellt med stranden i vattnet, fungerar som rörliga hinder för vågor, och i miljöer med lågenergi är sandrevlarna belägna närmare stranden, medan när energin ökar och bottenströmmarna blir kraftigare rör sig revlarna längre ut från stranden (fig. 2–5).

För sandstränder orsakas erosion och sedimenttransport av bland annat våg- och ström-processer. Om vågor rör sig i stort sett vinkelrätt mot stranden sker en transport av botten-material vinkelrätt mot land. Vattenpartiklarna rör sig i cirkulära banor i vattenvågor. I vågtoppen rör sig vattnet med vågens rörelseriktning och i vågdalen mot densamma. När en våg rör sig mot

stranden inträffar alltså den maximala påkänningen av bottnen (bottenskjuvspänningen) två gånger: när vågtoppen passerar framåt och vågdalen passerar bakåt. Detta innebär att sediment rör sig framåt (mot stranden) under vågtoppen och bakåt (från stranden) under vågdalen. Under vågtoppen förekommer relativt starkare bottenströmmar, vilket gör att det finns möjlighet för grövre partiklar att transporteras mot land som bottentransport, och även för finare sediment att transporteras mot land i suspension, det vill säga i vattenmassan. Under vågdalen förekommer en relativt svagare bottenström, men under en längre tidsperiod, vilket innebär att finare sediment transporteras ut från stranden. Detta resulterar i en nettotransport av grövre sediment in mot land och en nettotransport av finare sediment ut mot havet (Wright & Short 1984, Komar 1998, Brown 2013).

Stormvågor är branta, korta, brytande vågor som resulterar i en nettotransport av sediment från stranden till skillnad från mindre, icke-brytande, långa vågor, till exempel dyningar, som kan resultera i en nettotransport av sediment till stranden. Ju mindre lutning på bottnen, desto längre tid tar det för stormvågen att bryta, vilket innebär att energin i vågen och vattnet finns kvar längre och därigenom orsakar en större kraft i transporten av sediment från stranden. Detta innebär att en flackare lutning av bottnen resulterar i att stormvågor innehåller en större energi när de når stranden och därför har möjlighet att orsaka en kraftigare erosion än stormvågor som fortplantar sig över en botten med större lutning; de bryts och förlorar en del energi innan de når stranden (Wright & Short 1984, Brown 2013).

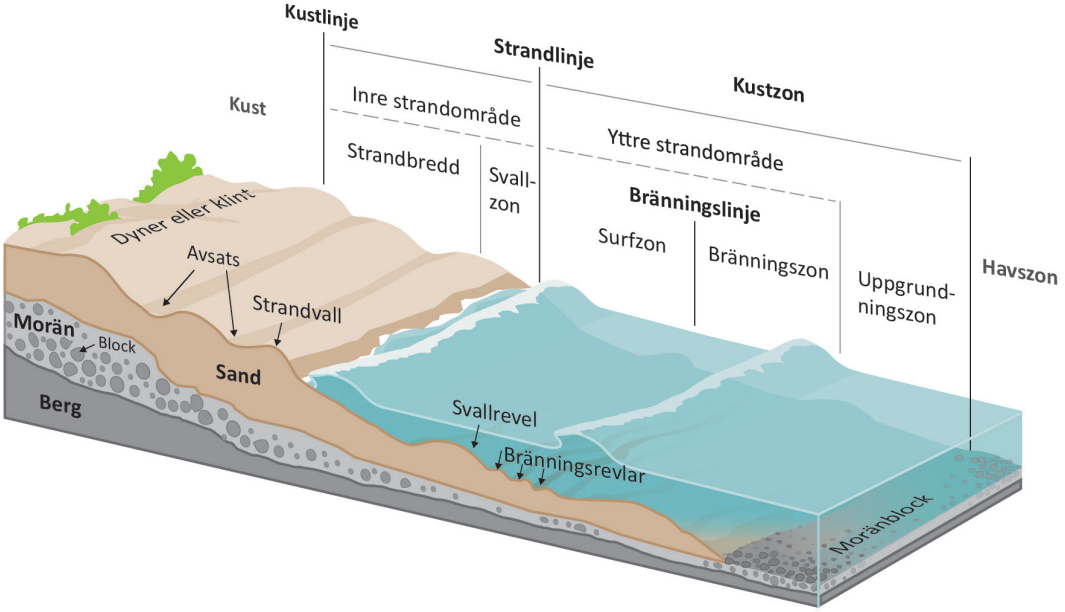
När sand transporteras ut från stranden och ackumuleras bildas revlar i surfzonen, vilket är området mellan de två områden där vågorna främst bryts: svallzonen och bränningszonen, se figur 5. Reveln får vågor att bryta längre ut och reducerar så energin och våghöjden i strandzonen och minskar därmed sedimenttransporten (fig. 2–5).

Stranden anpassar sig ständigt genom förändringar av dess morfologi till att minska mängden vågenergi som träffar stranden (Wright & Short 1984). Processen genom vilken strandsystemet håller sig i balans kallas ett självjusterande system. Ett självförstärkande system inträffar när strandmorfologin förändras så att sandtransporten leder till en ökning av den vågenergi som stranden tar emot. Detta kan inträffa till exempel framför en mur när vågor reflekteras av muren och orsakar en större erosion och borttransport av sand och därmed ett större vattendjup. När vattendjupet är större ökar vågenergin som reflekteras av muren och orsakar ytterligare erosion och borttransport.

Sedimenttransport längs stranden

Om det finns en skillnad i vattenstånd längs en kust, kommer denna att driva en ström från högre mot lägre vattenstånd. Ju större skillnad, desto starkare ström. Vattenståndsskillnaden i sin tur orsakas av vindens och vågornas verkan att föra vattnet i sin respektive riktning. Vinden för vattnet i vindriktningen. Vågorna, däremot, för vattnet i sin utbredningsriktning, vilken kan avvika starkt från vindriktningen. Vågorna tenderar att röra sig mot grundare vatten. Om vågkammarna exempelvis infaller snett mot en strand, böjs de så att de blir allt mer parallella med stranden, förutsatt att djupet ökar med avståndet från stranden. Det är regel snarare än undantag, att vågor och vindström ger olika riktade strömkomponenter (Komar 1998, Johansson 2019).

När vågorna bryter omvandlas en andel av vågens rörelsemängd till ström åt samma håll som vågen och resten till en kraft (skjuvspänning) på bottnen. I denna brottzon är kraften och vattnets innehåll av virvlar (turbulens) mycket högre än längre ut där vågorna ännu inte brutit. För att bottenmaterialet inte skall ackumuleras på samma ställe som det eroderades krävs en transporterande kustparallell ström. En del av en sådan ström orsakas alltså av brytande vågor. Till detta kommer den ström som orsakas av vattenståndsskillnader som nämndes ovan (Komar 1998, Johansson 2019).



Figur 5. Schematisk bild av de olika zonerna i en aktiv strandprofil längs den svenska kusten med uppbyggnaden av havsbotten och land och förekomst samt mäktighet av det sediment, i detta fall sand, som är påverkad av vatten och vind. Illustration: Fredrik Saarkoppel.

Stränders förändringar i tid och rum

Sedimenttransport vid sandstränder sker i den så kallade aktiva strandprofilen (fig. 5). Denna zon sträcker sig i havet från det vattendjup där vågor påverkar bottensedimenten, så kallad vågbas eller konvergensdjup, till den höjd ovan havet på land där vågor och vind påverkar marken. Den aktiva profilen går alltså från vegetationslinjen på stranden ut till konvergensdjupet (eng. *closure depth*), som definierar var bottennivån inte längre förändras till följd av sedimenttransport driven av våginducerade strömmar (Fredriksson m.fl. 2017). Den övre gränsen som vågor påverkar sandstränder på land inkluderar dynsystemet. Under stormperioder transporteras sand från den övre delen av stranden ned till surfzonen, medan under lugnare perioder sker det motsatta. Fredriksson m.fl. (2017) beräknade konvergensdjupet för den skånska sydkusten med hänsyn tagen till skillnader i vågklimat för olika kuststräckor och fann att det varierar mellan cirka 5 och 7 m vattendjup. Birgander m.fl. (2018) beräknade konvergensdjupet för den skånska östkusten till 7,2 m.

När sediment transporteras ut från land och in i surfzonen är, för återhämtningen av en strand, mängden sand som transporteras mellan olika bukter och vikar längs kusten mycket viktig (fig. 2–5). I områden där sanden är innesluten i en bukt med en sedimentbudget i stort sett i balans förändras inte den totala volymen sand som bygger upp stranden vilket resulterar i en stabil strand på längre sikt. I många kustområden transporteras sand dock runt uddar längs kusten till en närliggande bukt och blir en del i det sedimentdynamiska systemet där istället. Detta innebär att det förekommer bukter med en negativ sedimentbudget, det vill säga en så kallad läckande bukt där sandmängden i sedimentdynamiksystemet minskar, och bukter med en positiv sedimentbudget, där sandmängden i sedimentdynamiksystemet ökar. Stränder längs vissa kustavsnitt är därför beroende av närliggande strands sedimentdynamiksystem för att kunna återhämta sig efter exempelvis en storm. Kunskap om sedimenttransport är således mycket viktig eftersom vissa erosionsåtgärder vid en strand kan påverka en annan strand i en annan bukt negativt.

Även den sand som förekommer på djupare delar under mark- och bottenyta och bygger upp stranden medverkar i återhämtningen och självjusteringen av den aktiva stranden. Denna sand

kan man säga lagerhålls för att anpassa stranden till rådande våg- och vattennivåförhållanden. Av den anledningen är kunskap om hur stranden är uppbyggd, både på land och havsbotten, samt mäktigheten av denna sand viktig i arbetet med att prognosticera framtida erosionsrisk (fig. 5).

Korta tidsperioder

Stränder förändrar sig på tidsskalor från år till decennier. Naturliga förändringar, såsom erosion orsakat av stormar, återhämtar stränder sig normalt från, men det kan dröja flera år, medan mänskliga konstruktioner kan påverka den naturliga förändringen på så sätt att en återhämtning inte blir möjlig. Enskilda stormhändelser kan orsaka betydande förändringar i strandprofilen.

Erosionen längs en strand är oftast inte likformig. Det uppstår ”hot spots” med erosion, ofta bildade i anslutning till ripströmmar. Erosionen som observeras i figurerna 2 till 4 visar detta mönster väl där sanden som eroderas och transporteras bort från stranden på land fördelas om till den delen av stranden som förekommer på havsbottnen för att sedan återvända till stranden på land.

Även om ett område upplever större erosion än ett annat från en tid till en annan, är det den totala volymen sand som förflyttas som har betydelse. Varje försök att stoppa erosionen vid en viss plats kommer orsaka en större erosion vid en annan plats. Detta beror på att samma volym sand måste förflyttas för att sedimentdynamiksystemet naturligt ska anpassa sig till den externa påverkan som förekommer från vågor, vatten och vind. Om denna sand inte är tillgänglig (på grund av till exempel bryggor, murar eller hövder) kommer mer material att eroderas från andra delar av stranden. Detta kan orsaka en större reträtt av stränder vid områden där sådana konstruktioner finns än vad som annars vore fallet.

I vissa situationer, som till exempel under stormar, kan sandtransporten ske övervägande längs med kusten. Förutom att sanden transporteras ut från land kan vågor och bottenströmmar orsaka en transport längs kusten.

Längre tidsperioder

En återkommande identifierad förändring av stränder är att de eroderas under vintern och växer till under sommaren. Förändringar av stränder under ett längre tidsperspektiv (decennier) orsakade av klimatförändringar vilka påverkar storm-styrka, -riktning och frekvens och därigenom sediment-dynamik är dock mindre kända. Kunskap om förändringar i stränders reträtt och tillväxt under längre tidsperioder är mycket viktig för förståelsen av sandtransporters riktning och mängd, både längs med och ut från kusten.

Väder och klimat, drivande faktorer till kustnära sedimentdynamik

Klimatets variation har verkan både på den generella och på stormars vind-, våg- och ström-energi samt riktning och följaktligen rådande kustnära sedimentdynamik och erosions-förhållanden. Detta innebär att erosion och tillväxt av en strand kan skifta så att lovartdelen av bukten där erosion förekommit ändras till att bli läsidan där tillväxt sker och vice versa.

Några studier har utförts för att studera förändringar i stormaktivitet och vindriktningar i Sverige, se till exempel Ekman 2007, Larson m.fl. 2016 och Johansson 2019. Förändringar i vindriktning från sektorn nordost–sydost till sektorn syd–väst under vintermånaderna verkar ha förekommit generellt i en jämförelse mellan 1500- och 1800-talet. Antalet väst-oväder i Södra Götaland var signifikant fler under perioden 1904–1926 än tidigare och senare under perioden 1880 till 2018. Vindstyrkan i ovädren i Södra Götaland varierar inte systematiskt över tid. Vindstyrkan har stor spridning, varför endast stora ändringar skulle gå att upptäcka (Johansson 2019).

Orsaken till dessa observationer kan vara till exempel förändringar i Nordatlantiska oscillationen (NAO), Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), Arktiska oscillationen (AO), jetströmmens läge och den globala uppvärmningen.

METODIK OCH UNDERLAG

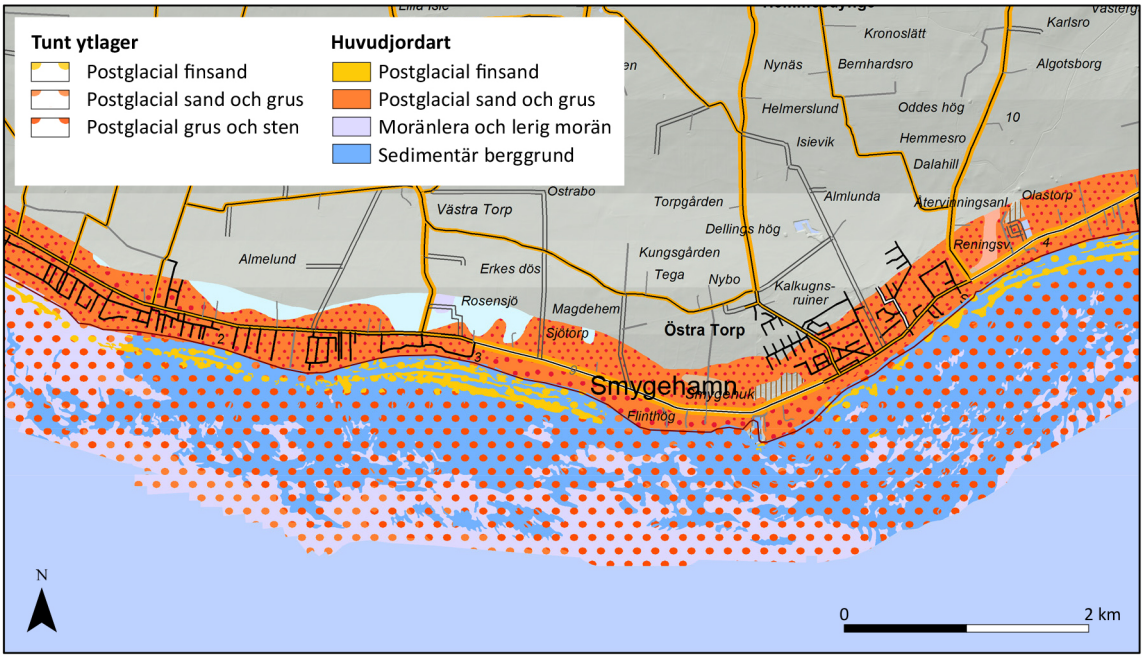
En av de viktigaste parametrarna vid bedömningar av sedimentdynamik och följaktligen erosionsförhållanden är geologin på stranden och omkringliggande botten, alltså utbredningen av den jordart eller bergart som bygger upp strandzonen, både horisontellt och vertikalt, och som påverkas av vågor, strömmar och vind. Andra viktiga faktorer är topografi, batymetri och exponering. Oftast är dessa faktorer starkt sammankopplade (fig. 6–8).

Jordart, bergart, topografi och batymetri

Kunskap om utbredning av den jordart eller bergart som förekommer inom strandzonen på land, i ytan och på djupet, fås genom geologisk kartläggning, se till exempel Malmberg Persson m.fl. (2014) och Malmberg Persson m.fl. (2016). Förhållanden av morfologi och höjd (topografi) på land fås genom till exempel Lidar- eller fotogrammetriska mätningar. Kunskap om den jordart eller bergart som förekommer på havsbottnen, både i ytan och som bygger upp havsbottnen, fås genom maringeologisk kartläggning, se till exempel Malmberg Persson m.fl. (2014), Malmberg Persson m.fl. (2016), Slagbrand & Klingberg (2015), Nyberg (2016), Nyberg m.fl. (2017) och SGUs kartvisare *Stranderosion och geologi, kust*. Kartvisaren samt de geologiska underlagen nås via webbplatsen www.sgu.se. Förhållanden av morfologi och vattendjup (batymetri) fås genom Lidarmätningar med grön laser eller fotogrammetri som även kan ge en sömlös bild av topografi och batymetri samt mätningar med multibeam-ekolod och interferometrisk sonar. Förändringar i morfologi, topografi och batymetri kan ge information om var erosion eller ackumulation sker samt mängden av material som eroderas, transporteras och ackumuleras i ett område.

Jord- och bergarters bildningssätt, kornstorleksfördelning och innehåll av organiskt material, vilket redovisas i den geologiska terminologin, ger information om ålder, bildningsprocess och bildningsmiljö och därigenom en god bild av rådande och tidigare sedimentdynamiska förhållanden, se till exempel Malmberg Persson m.fl. (2014), Malmberg Persson m.fl. (2016), Slagbrand & Klingberg (2015), Nyberg (2016), se figur 6 och 7. Exempelvis ger terminologin information om sedimentet (jordarten) är bildat i en glacial eller postglacial miljö, det vill säga äldre eller yngre, samt formats och avlagrats i en glacial miljö i anslutning till en inlandsis, i havet, brackvatten eller sötvatten eller omarbetats och omlagrats från ett ursprungsmaterial i en postglacial miljö etc. Kornstorleksfördelningen ger upplysning om sorteringsgrad och därigenom den dynamiska miljö som sedimentet är utsatt eller har varit utsatt för. Innehåll av organiskt material ger information om miljö- och ackumulationsförhållanden.

Jordartskartor över land och sedimentkartor över havsbottnen har en redovisningsform som är likadan, vilket innebär att samma geologiska terminologi används, samt att jordarterna (sedimentens) fördelning är uppdelade och redovisas i två skikt (fig. 6). Det ena skiktet visar den jordart eller sedimenttyp som dominerar i den översta metern av marken och havsbottnen och kallas för huvudjordart. Denna huvudjordart ger oftast marken och bottnen dess allmänna karaktär i termer av ytformer, erosionsbeständighet, bärighet etc. Det andra skiktet visar tunna och osammanhängande sedimentlager i mark- eller bottenytan (< 50 cm mäktighet) och kan vara grövre residualmaterial från till exempel morän och isälvsmaterial, eller tunna – för bottnen både rörliga och ackumulerade – sand-, silt-, och lerlager som ibland likt en slöja överlagrar underliggande sediment.



Figur 6. Resultat från SGUs projekt Skånestrand som visar heltäckande och enhetligt den jord- eller bergart i geologisk terminologi som dominerar i de översta delarna av den kustnära marken och bottnen. Huvudjordart dominerar i den översta metern och ger marken samt bottnen dess allmänna karaktär och egenskaper. Tunt ytlager, < 50 cm, kan vara osammanhängande, residual, transport eller ackumulationsskikt.

Sedimentdynamik, land

Sedimentdynamik på land omfattar en sammanvägd bedömning av flera parametrar, se till exempel Malmberg Persson m.fl. (2016): erosionsbenägenheten av jordarten eller bergarten, områden där aktiv erosion observerats, områden där strandlinjen retirerat eller avancerat, områden där höjdförhållanden ändrats. Men även andra faktorer, till exempel förekomst av vassbälten eller marsktorv (omväxlande lager av sand och torv) längs stranden, som indikerar att erosion och transport av naturligt material inte äger rum i nämnvärd utsträckning. Förändringen av strandmorfologi, strandlinje och höjdförhållanden kan ge information om var material eroderar och förflyttas eller ackumulerar i ett område. Kornstorleken i rörliga sedimentskikt, som sand, ger också information om transportprocesser. En sortering av sedimentpartiklar sker under transport från mobilisering till deposition. Vid erosion i rörliga sandskikt, mobiliseras generellt de finare partiklarna och ju finare desto längre transporteras partiklarna innan deposition. Detta resulterar i att sedimentpartiklarna som är kvar i området där partiklar eroderas och mobiliserar är grövre och att sedimentpartiklarna blir finare ju längre bort från erosionsområdet partiklarna deponeras. I den aktiva strandprofilen på land innehåller oftast den sanden som förekommer i dynerna finare partiklar på grund av vindtransport från svallzonen tvärs stranden. Även i områden längs stranden där sand deponeras på grund av längsgående vindtransport innehåller sanden finare partiklar, se till exempel Hallin m.fl. (2019).

Sedimentdynamik, havsbotten

Sedimenten på havsbottnen påverkas kontinuerligt på olika sätt av rörelser i vattenmassan. Strömmars och vågors inverkan kan medföra mobilisering (erosion), transport och ackumulation av bottenmaterial. Fördelningen av olika sediment i bottenytan och djupförhållandena ger därför ett slags facit över vattenrörelser och sedimenttransport och därigenom en god bild av de rådande bottendynamiska förhållandena, (tabell 1, fig. 6 och 7).

Glaciala bildningar omfattar sediment som har bildats direkt av en inlandsis eller dess smältvatten. Hit förs också bildningar som bildats under tidigare istider och deras mellanliggande värmeperioder och som sedan påverkats av den senaste nedisningen. Den organiska halten är mycket låg. Postglaciala bildningar har omarbetats och omlagrats från ett ursprungsmaterial, vilket oftast är i Sverige en glacial bildning. Till nybildningen bidrar i inte oväsentlig grad havets egen produktion av organiskt material, vilket tillsammans med minerogent material sedimenterar som gyttjelera eller lergyttja.

När ett bottenmaterial, som till exempel morän eller glaciallera från början innehåller en blandning av många olika kornstorleksfraktioner, utsätts för erosion genom strömmande vatten kommer de finaste fraktionerna mobiliseras och transporteras bort. Kvar som ett residualskikt på ytan blir de grövre fraktionerna som den rådande vattenhastigheten inte förmår sätta i rörelse. Detta residualskikt kan sedan skydda det underliggande materialet från vidare erosion. Kornstorleken hos residualskiktet vittnar då också om vilka högsta vattenhastigheter som förekommit på platsen.

När bottenmaterial sätts i rörelse och börjar transporteras kommer alltid en viss sortering efter kornstorlek att ske i materialet allteftersom vattenhastigheten varierar och avtar. Transportriktningen kommer också att variera allteftersom vågor och strömmar ändrar riktning. Ibland kan det, exempelvis efter säsongsvisa variationer, bildas en nettotransportriktning som följd av en dominerande våg- eller strömriktning.

Sand och grövre fraktioner transporteras normalt på bottenytan (fig. 1) medan silt och lerfraktioner oftast är suspenderade i vattenmassan (se avsnittet om sedimenttransport). Sandvågor på en sandbotten är tecken på transport och sandvågornas flacka lovartssida och brantare läsida indikerar den för tillfället rådande transportriktningen. Om sand transporteras ut mot djupare områden, där ström- och vågpåverkan inte längre förmår transportera materialet vidare, kan ibland sandackumulationer med en viss mäktighet byggas upp.

Det finaste lermaterialet kan transporteras långa vägar och sedimenterar inte förrän vattenrörelserna avtagit nästan helt. Detta sker vanligen när vattendjup blir relativt större, eller i för vågor och strömmar skyddade områden, såsom vikar och fjärdar.

Bottennära strömmars hastighet och riktning påverkas av bottenytans topografi. Om den strömmande vattenmassans tvärsnittsarea minskar så ökar hastigheten. Därför kan det förekomma erosion eller transport av bottenmaterial i ett sund eller omkring en uppstickande höjd på bottnen, samtidigt som det råder deposition på öppnare och flackare bottenområden i närheten. Inom Östersjön utsätts i dag närmare hälften av bottenarean för erosion eller transport. Sedimentomlagringen, som sker till följd av detta, beräknas vara sex gånger större än den sedimenttillförsel som sker via vattendrag.

Informationen som fås via geologisk kartläggning om ålder, kornstorlek, sorteringsgrad samt innehåll av organiskt material för det sediment som påträffas i bottenytan ger en bra information om sedimentdynamiken. Exempelvis, om kalt berg eller äldre glaciala avlagringar förekommer i bottenytan, som morän, isälvsmaterial eller glaciallera med ytlager av residualmaterial bestående av grus, sten och block samt med ett litet eller inget organiskt innehåll, tyder det på en exponerad botten, och att erosion och borttransport av material dominerar. Här ackumuleras inga sediment och har inte gjort så sedan flera tusen år tillbaka. Sedimentdynamiken är dock oftast låg inom dessa bottenområden då större orörliga partiklar är kvar och dominerar i bottenytan över lättmobiliserade och lättransporterade finkorniga partiklar och organiskt material.

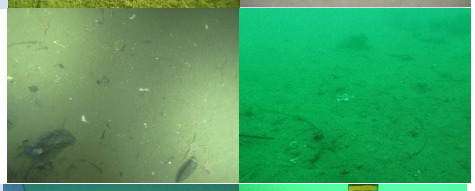
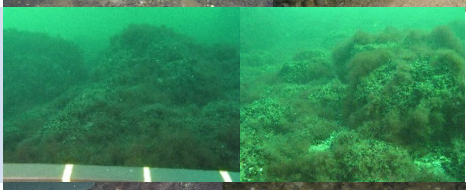
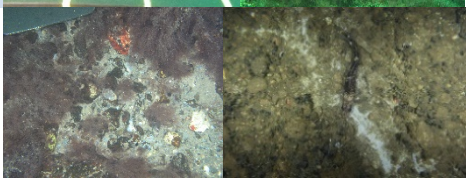
Ett annat exempel är om yngre avlagringar såsom postglacial lera, gyttjelera och lergyttja och postglacial silt, förekommer i bottenytan tyder det på en lågdynamisk botten där ackumulation av finkorniga partiklar och organiskt material i suspension dominerar.

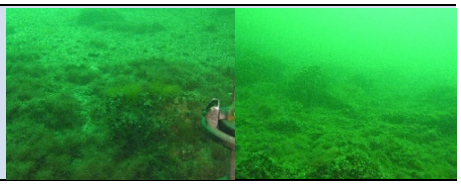
Postglacial finsand och mellansand är ett sediment som är välsorterat och mobiliseras och transporteras lätt samt utvecklar ripplar och sandvågor, vilket innebär erosion- och transportbottnar med hög sedimentdynamik och eventuella lokala avsättningar i sänkor och vid hinder samt avtagande vattenrörelser. Denna typ av sediment är det som interagerar med sanden på stränder och vars utbredning och mäktighet bör ur ett erosions- och sedimentdynamiskt perspektiv identifieras i den aktiva vågzonen. Dessa sammanhängande sandskikts utbredning är, ned till konvergensdjup, en del i sandstrandens sedimentdynamik med erosion, transport och ackumulation. Precis som för kornstorleken på land kan kornstorleken i dessa rörliga sandförekomster i havet ge information om transportprocesser. En sortering av sandpartiklar sker under transport från mobilisering till deposition. Vid erosion i dessa rörliga sandskikt, mobiliseras generellt de finare partiklarna och ju finare desto längre transporteras partiklarna innan deposition. Detta resulterar i att sedimentpartiklarna som är kvar i området, där partiklar eroderas och transporteras bort, är grövre och att sedimentpartiklarna blir finare ju längre bort från erosionsområdet partiklarna deponeras. Normalt sett är sanden till exempel mer finkornig på större vattendjup eller i områden där vattenrörelser avtar. Vid kornstorleksanalys måste dock hänsyn tas till, i ett område med ripplar och sandvågor, var lokalt sanden för analys förekommer. Det är en skillnad i kornstorlek på krönet med dess finare sandpartiklar än tråget i sandvågen.

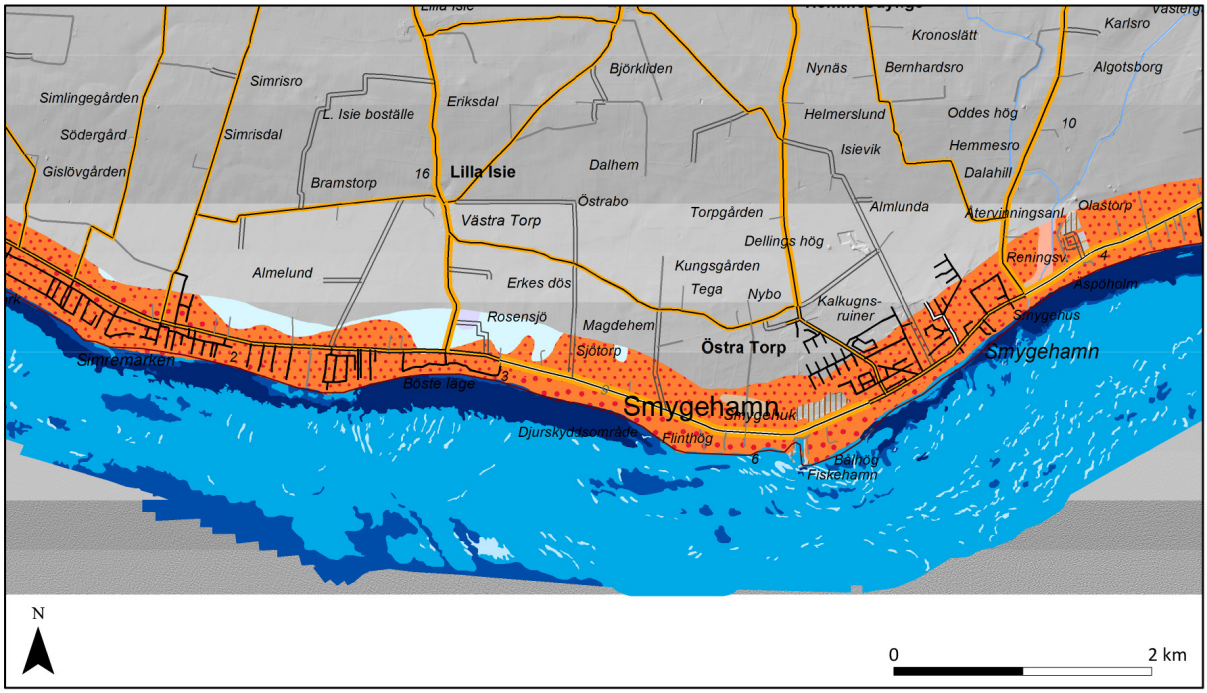
Större mäktigheter av postglacial sand eller grus och dess förekomst upp till bottenytan kan innebära ett område där deponering med tillfälliga transporter av dessa sediment dominerar.

Genom den information som fås i den geologiska terminologin av det ytsediment, vilket kan vara ursprungsmaterial, bildat som residual eller från transport och ackumulation, kan följaktligen sedimentdynamiken, det vill säga de erosions-, transport- och ackumulationsförhållanden, som råder inom olika kustnära områden definieras. Tabell 1 och figur 7 visar den rådande sedimentdynamik som förekommer inom olika områden för olika typer av sediment som finns i bottenytan, klassade enligt den geologiska terminologin och redovisade antingen som huvudjordart eller tunt ytlager i den maringeologiska kartan.

Tabell 1. Rådande sedimentdynamik (erosions-, transport- och ackumulationsförhållanden) för områden i havet med sediment i bottenytan klassade enligt den geologiska terminologin. Bottenbilderna här visar exempel på olika sediment och tillhörande sedimentdynamiska förhållanden utanför Skånes kust och är tagna inom projektet Skånestrand av SGU.

Sediment i bottenytan	Sedimentdynamik (erosions-, transport- och ackumulationsförhållanden)	Bottenbild
Postglacial lera, gyttjelera och lergyttja	Huvudsakligen en stabil och lågdynamisk botten med ackumulation av suspenderade finkorniga sediment och organiskt material, tillfällig och lokal transport av lerpartiklar och organiskt material kan förekomma.	
Postglacial silt	Huvudsakligen en lågdynamisk och stabil botten med tillfällig, lokal mobilisering, transport och ackumulation av framförallt siltpartiklar, men även finsand och lerpartiklar samt organiskt material.	
Postglacial finsand	Huvudsakligen en starkt dynamisk botten med mobilisering och transport av huvudsakligen finsand-, mellansandpartiklar. Ackumulation av fin- eller mellansand sker i sänkor/vid hinder eller avtagande vattenrörelser.	
Postglacial sand och grus	Huvudsakligen en lågdynamisk till måttligt dynamisk botten med mobilisering och transport av huvudsakligen sand- och gruspartiklar. Ackumulation av sand eller grus sker i sänkor/vid hinder eller avtagande vattenrörelser.	
Postglacial grus och sten	Huvudsakligen en stabil och lågdynamisk botten med tillfällig lokal mobilisering, transport och ackumulation av grus- och stenpartiklar.	
Glacial lera	Huvudsakligen en stabil botten med tillfällig lokal mobilisering, transport och ackumulation av sediment med varierande kornstorlek.	
Morän	Huvudsakligen en stabil och lågdynamisk botten med tillfällig lokal mobilisering, transport och ackumulation av framförallt grövre partiklar som grus, sten och block.	
Moränlera och lerig morän	Huvudsakligen en stabil och lågdynamisk botten med tillfällig lokal mobilisering, transport och ackumulation av framförallt grövre partiklar som grus, sten och block.	
Isälvsavlagring i allmänhet	Huvudsakligen en stabil och lågdynamisk botten med tillfällig lokal mobilisering, transport och ackumulation av framförallt grövre partiklar som grus, sten och block.	
Kristallin berggrund	Stabil och lågdynamisk botten med tillfällig lokal mobilisering, transport och ackumulation av framförallt grövre partiklar som grus, sten och block.	

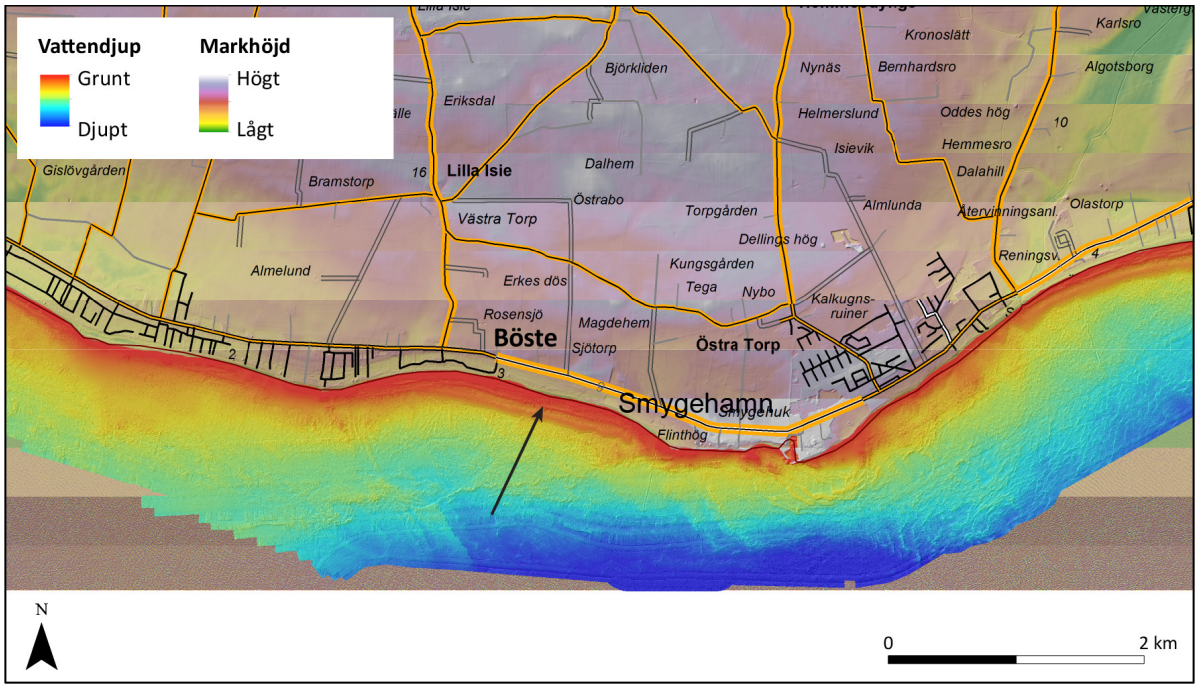
Sediment i bottenytan	Sedimentdynamik (erosions-, transport- och ackumulationsförhållanden)	Bottenbild
Sedimentär berggrund	Stabil och lågdynamisk botten med tillfällig lokal mobilisering, transport och ackumulation av framförallt grövre partiklar som grus, sten och block.	



Sedimentdynamik (erosions-, transport- och ackumulationsförhållanden), havsbotten

- Starkt dynamisk botten – Mobilisering och transport av huvudsakligen finsand/mellansandpartiklar
  Ackumulation av fin/mellansand sker i sänkor/vid hinder
- Låg till måttlig dynamisk botten – Mobilisering och transport av huvudsakligen sand/gruspartiklar
  Ackumulation av sand/grus sker i sänkor/vid hinder
- Stabil till låg dynamisk botten – Tillfällig lokal mobilisering, transport och ackumulation av framförallt grövre partiklar som grus/
- Stabil botten – Tillfällig lokal mobilisering, transport och ackumulation av framförallt grövre partiklar som grus/sten/block

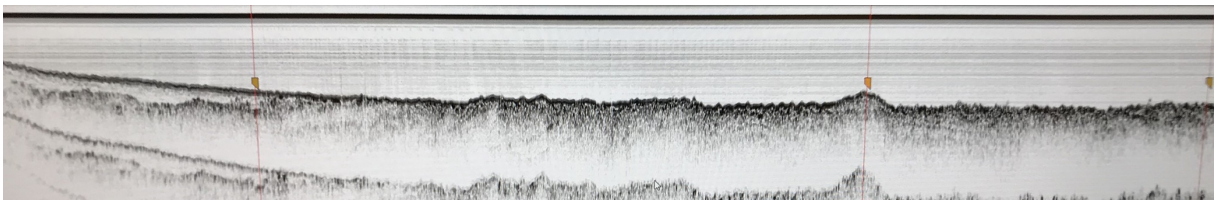
Figur 7. Heltäckande sedimentdynamisk karta som visar erosions- och ackumulationsförhållanden för olika bottenområden genom studier och översättning av de sediment som förekommer i bottenytan enligt den geologiska kartan. De mörkare blå områdena redovisar förekomst av den lättmobiliserade och lättransporterade sanden som kan interagera med sand-stranden på land. I övriga områden förekommer sediment i bottenytan med grövre partiklar som sten, grus och block vilka är svårmobiliserade och därför inte är så rörliga. Från SGUs projekt Skånestrand.



Figur 8. Djup- och höjdförhållanden, heltäckande bild av mark och botten från strandkant och cirka 1 000 m ut (RH 2000). Sandrevlar längs stranden syns tydligt vid Böste, se pil, och indikerar sand i rörelse och som kan interagera med land. Från SGUs projekt Skånestrand.

Precis som på land ger förändringar av bottenmorfologi och vattendjupsförhållanden information om var material eroderar och förflyttas eller ackumulerar i ett område (fig. 8). I dessa underlag kan också information fås om sandens transportformer och riktningar. Dessutom kan beräkningar av mängden material som eroderas, transporteras och ackumuleras i olika områden göras i detaljerade underlag av mätningar i förändring av höjd och djup.

Mäktigheten på de rörliga sammanhängande sandskikt som är viktiga att identifiera för den kustnära sanddynamiken kan fås genom mätningar med sedimentekolod och seismik (fig. 9). Dessa profiler ger också kunskap om havsbottnens uppbyggnad och följaktligen även kunskap om orsaken till observerad bottenmorfologi.



Figur 9. Sedimentekolodsprofil som visar havsbottnens uppbyggnad. Profilens vänstra del visar botten in mot land och mäktigheten på det sandlager, syns som ett transparent skikt, som förekommer där. Från SGUs projekt Skånestrand.

Exponering

Sedimentdynamiken och strandens samt den strandnära bottnens utformning bestäms av befintligt berg- och jordartsmaterial och av vindgenererade vågor och strömmar, av vattenståndsväxlingar och av direkt vindpåverkan på landstranden. För havsstränder är både den materialtransport som kan ske genom vågornas och bottenströmmars samt vindens inverkan av intresse.

Vågornas storlek bestäms av vindens styrka och varaktighet samt den så kallade stryklängden (eng. *fetchen*), det vill säga den fria vattenyta som vinden kan verka över. Vattendjupet kan också vara en begränsande faktor för vågstorleken.

Då det inte finns så många mätningar av strömmar och våghöjder får man beräkna dem genom att använda ström- och vågmodeller som kopplas ihop så att den växelverkan som finns mellan ström och vågor efterliknas. Det som då krävs för modellerna är vinddata av styrka och riktning, vilket finns med olika perioder bakåt i tiden, beroende på område (se till exempel Johansson 2019).

Partikeltransport

Direkta mätningar av sedimenttransport längs botten (bottentransport) kan göras med hjälp av att mäta ackumulation i sedimentfällor (grävda hål, byggda ”uppfångare”), spåra radioaktiva ämnen, märka sedimentpartiklar eller genom en kombination av koncentrations- och vattenhastighetsmätning (se till exempel Rijn 2007, Larson 2008). Precisa mätningar med mekaniska provtagare (uppfångare) av bottentransport är svårt att tillämpa då provtagarna fångar, förutom partiklar i transport nära bottenytan, även oundvikligen finare partiklar i suspension.

Ett annat sätt att bestämma bottentransport är genom analys av bottenformer vid olika tidsintervall med liknande strömhastigheter. Måttet på bottentransport kan bestämmas genom att mäta exempelvis sandvågors höjd, längd, volym och hastighet (De Boer 1996).

För mätning av mängden partiklar som transporteras i suspension finns bland annat olika typer av fällor, flaskor, pumpar samt optiska och akustiska metoder.

RESULTAT

Exempel, sedimentdynamik och transport längs sydkusten i Skåne

Syfte

Med syfte att testa metodiken och underlagen beskrivna i avsnittet *Metodik och underlag* för verktyget utfördes en studie för att analysera och bestämma sedimentdynamik, erosions-, transport- och ackumulationsförhållanden, längs Skånes sydkust. Den skånska sydkusten valdes då det är ett av få områden i Sverige där de geologiska och morfologiska underlagen med höjd- och djupnivåer är framtagna med den detaljeringsgrad som krävs. Dessutom är denna kust starkt exponerad. Det förekommer områden längs kusten där erosion är ett problem varav två områden, Ystad Sandskog och Löderups Strandbad, strandfodras för att lindra erosionsproblemen. Löderups Strandbad är den strandlinje som rycks tillbaka mest i Sverige.

Området

Precis som för en stor del av Sveriges kust är de sand- och grusavlagringar, som förekommer längs den skånska sydkusten, framförallt skapade ur isälvs- och moränavlagringar utsatta för olika graders omlagring, svallning och förflyttning. Omlagringen är orsakad av tidigare och nuvarande våg -, bottenström- och vindförhållanden. Eftersom både land och havsbotten har höjt sig sedan de varit nedpressade av inlandsisen, har strandlinjen och kusten förskjutits och därmed i delar förändrats. Variationen i strandlinjens läge beror på ett växelspel mellan havsytans stigning och jordskorpans höjning. Därmed har vågor och strömmar, som orsakar omlagring och svallning av de ursprungliga sedimenten, också ändrats. Skånes sydkust har tidvis både varit täckt av vatten och torrlagd många meter under nuvarande havsyta sedan den senaste istiden.

Metodik och underlag

Erosionsförhållanden, detaljerade sammanhängande underlag av geologin på land och havsbotten samt vattendjupförhållanden med morfologi som använts är från SGUs projekt Skånestrand (Malmberg Persson m.fl. 2014, Malmberg Persson m.fl. 2016)och SGUs kartvisare *Stranderosion och geologi, kust*. Detaljerade höjdförhållanden med morfologi är från Lantmäteriet. Metodiken med de utvecklade beskrivningar framtagna i denna studie, beskriven och presenterad i avsnittet *Jordart, bergart, topografi och batymetri*, för att analysera och uppskatta sedimentdynamiken på land och havsbotten från ytgeologi har använts. Kartor med rådande sedimentdynamik, erosions-, transport- och ackumulationsförhållanden för områden i havet med sediment i bottenytan klassade och redovisade enligt den geologiska terminologin framtagen i denna studie och sammanställd i tabell 1 visas i figur 10.

Exponering av kusten, det vill säga vågor och bottenströmmar har räknats fram med en ström- och vågmodell driven med 158 oväder, > 20,8 m/s, sedan 1941 baserad på observerade vinddata (Johansson 2019), se figur 11–15. Gränsen är satt då 0,1 % av den starkaste vinden vid Falsterbo mellan 1941 och 2018 är starkare än 20,8 m/s. Den kustparallella strömmen orsakas dels direkt av vinden via vattenståndsskillnader längs kusten, dels indirekt genom vågor som skapas i Östersjön, utbreder sig in mot kusten och där böjs (refrakteras) och till slut bryter. När vågorna bryter omvandlas deras rörelsemängd till dels ström och dels krafter på bottnen. I figur 11–15 visas andelen tid med bottenström över 0,5 m/s längs Skånekusten som orsakats av alla 158 oväder sedan 1941. De blå och röda staplarna är indikatorer för erosion och transport.

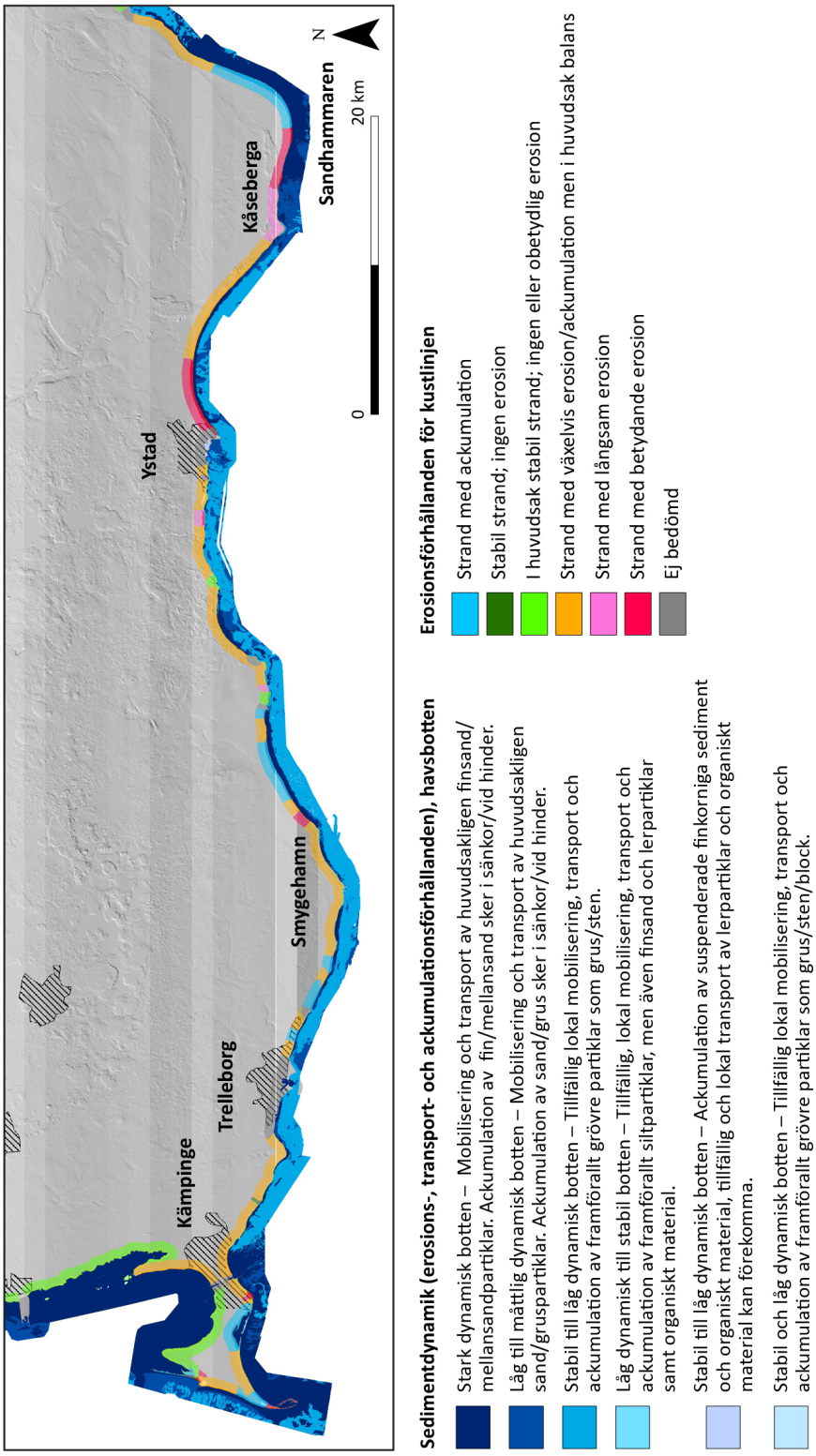
Den erosion som kan orsakas av vind och medför att sand transporteras ut till havs, inåt land eller längs med kusten och lämnar den aktiva strandprofilen med en negativ sandbudget bedöms vara av sekundär betydelse längs Skånes sydkust, se Fredriksson m.fl. (2017), och tas inte hänsyn till i detta fall i beräkningen av exponering.

Resultat

Från de geologiska kartunderlagen syns det tydligt att i de områden där en förändring av den skånska sydkusten sker är det där sammanhängande sandansamlingar över land och havsbotten förekommer (fig. 10). Sandansamlingarna på havsbotten är koncentrerade i havsbukter som har olika storlekar och till del form. Dessa bukter med sandansamlingar på havsbotten och stränder avgränsas av områden som består av svåreroderat material och som resulterar i utskjutande uddar där en grundare botten med grövre mindre lättrörliga sediment fortsätter ut från land. Där sand inte förekommer på havsbotten utanför landudden indikerar det att någon större sandtransport på bottnen inte sker mellan bukterna. Då kan stranden i bukten utgöras av ett mer eller mindre slutet sandtransportsystem. Sandmaterialet pendlar här längs med eller in och ut från kusten inom bukten. En viss förlust av sand kan dock ske ut från kusten mot djupare vatten.

Bukternas cirkelbågsform bestäms av sandtransportbalansen som återspeglar våg- och bottenströmenergins riktningsfördelning över tid. Östgående ström är överlägset vanligast, men

episoder med västgående ström förekommer, dock inte alls lika ofta. Andelen tid varierar kraftigt längs kusten. Den östgående strömmen förekommer mycket oftare väster om Ystad än öster om. Österut tilltar andelen tid med ström snabbt fram till Kåseberga och är stor fram till Sandhammaren (Johansson 2019).



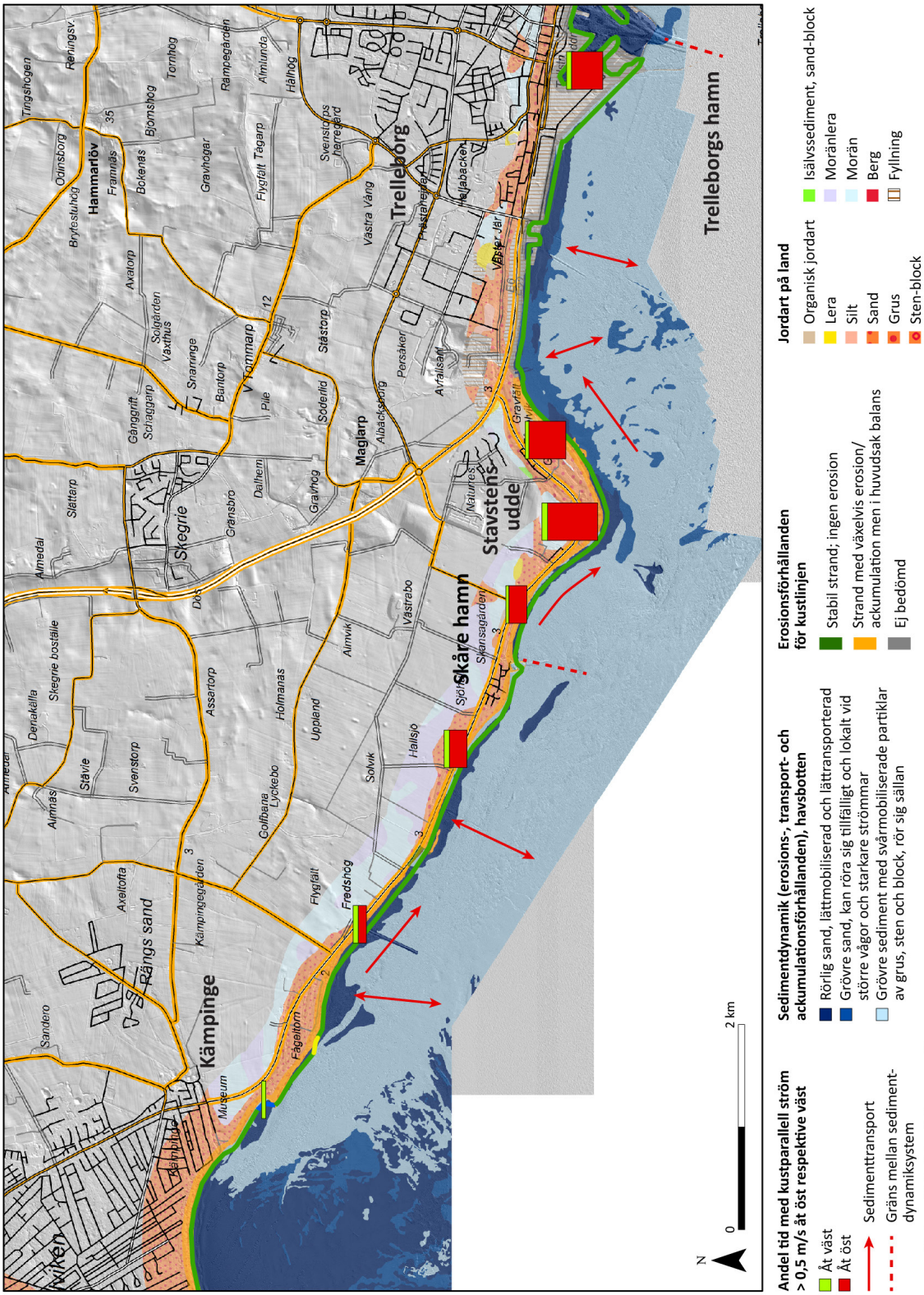
Figur 10. Sedimentdynamiska förhållanden längs Skånes sydkust. Från SGUs projekt Skånestrand. De mörkaste blå områdena redovisar förekomst av lättmobiliserad och lättransporterad sand. I övriga områden förekommer bottensediment med grövre partiklar som sten, grus och block som är svårmobiliserade. Erosionsförhållanden för kustlinjen, också framtaget i SGUs projekt Skånestrand visas också.

Kämpinge–Trelleborg

Nästan hela denna kuststräcka domineras av sand- eller grusstränder med växelvis erosion och ackumulation (tillväxt). Förekomst av den rörliga sand på havsbottnen som är en del av sandtransportsystemet och interagerar med stranden på land har en relativ liten utbredning från strandkant ned till mellan 1 och 3 m vattendjup, det vill säga en sträcka som längst cirka 250 m från strandkanten (fig. 11). Sandtillgång och förekomst når inte ned till teoretiskt beräknat konvergensdjup för kustavsnittet. Djupare och längre ut från kusten domineras bottenytan av morän och sedimentär berggrund som utgörs av svåreroderade större partiklar såsom grus, sten och block som inte ofta är i rörelse och därför inte interagerar med stranden på land.

I den östra delen av bukten i väster vid Gamlegårdstornen har stranden vuxit sedan 1940-talet, vilket innebär en östlig nettotransport som avstannar på buktens insida då en vidare transport inte kan ske och en ackumulation av sand äger rum. I övrigt indikerar sandförekomsten att det kan förekomma transport mellan bukterna ned till västsidan om Skåre hamn, men att transport huvudsakligen sker in och ut från land. Den kustparallella strömmen är relativt jämnt fördelad mellan öst och väst väster om hamnen och därför styrker en huvudsaklig transport in och ut från land (fig. 11). Skåre hamn tillsammans med en uppgrundning väster om hamnen samt ett längre erosionsskydd kan vara orsaken till att förekomsten av sand är mindre här.

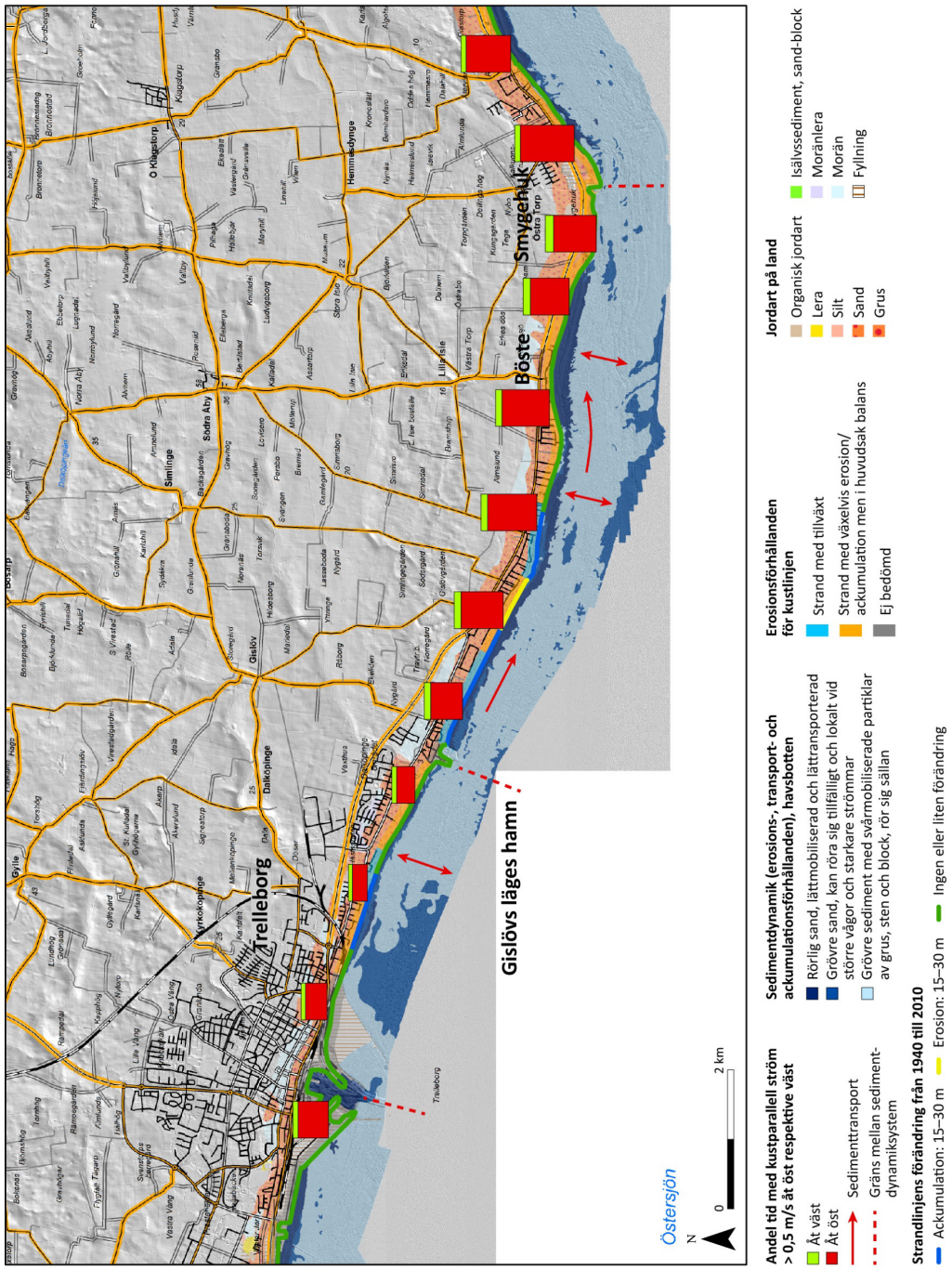
I bukten öster om Skåre hamn ned till Stavstensudde ökar utbredningen av rörlig sand på bottnen och förekommer även utanför udden, vilket indikerar en rörelse österut och transport in i bukten väster om Trelleborg. En övervägande andel tid av bottenströmmen är också här mot öst och styrker en nettotransport av sand mot öst. I bukten väster om Trelleborg verkar en ackumulation pågå då sandförekomsten ökar vilket kan bero på att Trelleborgs hamn stoppar en stor del av transporten österut samt att den längsgående våg- och strömkomponenten här är svag.



Figur 11. Sedimentdynamiska förhållanden mellan Kämpinge och Trelleborg längs Skånes sydkust. Från SGUs projekt Skånestrand. De mörkaste blå områdena redovisar förekomst av lättmobiliserad och lättransporterad sand. I övriga områden förekommer bottensediment med grövre partiklar som sten, grus och block som är svårmobiliserade och därför inte så rörliga. Erosionsförhållanden för kustlinjen och jordarternas fördelning på land, framtaget i SGUs projekt Skånestrand, samt den kustparallella strömmens, med en hastighet över 0,5 m/s, andel tid åt öst respektive väst under perioder med vind kraftigare än 20,8 m/s sedan 1941, visas också.

Trelleborg–Smygehuk

Nästan hela denna kuststräcka domineras också av sand- eller grusstränder med växelvis erosion och ackumulation (tillväxt). Förekomst av den rörliga sand på havsbottnen som är en del av sandtransportsystemet och interagerar med stranden har en relativ liten utbredning från strandkant ned till mellan 1 och 3 m vattendjup, det vill säga en sträcka som längst cirka 250 m från strandkanten (fig. 12). Sandtillgång och förekomst når inte ned till teoretiskt beräknat konvergensdjup för kustavsnittet. Längs hela denna kusträcka dominerar den östliga kustströmmen, vilket



Figur 12. Sedimentdynamiska förhållanden mellan Trelleborg och Smygehuk längs Skånes sydkust. Från SGUs projekt Skånestrand. De mörkaste blå områdena redovisar förekomst av lättmobiliserad och lättransporterad sand. I övriga områden förekommer bottensediment med grövre partiklar som sten, grus och block som är svårmobiliserade och därför inte så rörliga. Erosionsförhållanden för kustlinjen och jordarternas fördelning på land, framtaget i SGUs projekt Skånestrand, samt den kustparallella strömmens, med en hastighet över 0,5 m/s, andel tid åt öst respektive väst under perioder med vind kraftigare än 20,8 m/s sedan 1941, visas också.

med stor sannolikhet ger en nettotransport av sand mot öst. Gislövs läges hamn verkar stoppa en del av den kustparallella transporten och resultera i ett relativt slutet system mellan Trelleborg och Gislövs läge. Därefter förekommer sand sammanhängande längs hela kusten med en ökande utbredning österut, vilket styrker en östlig kusttransport, ned till Smygehuk.

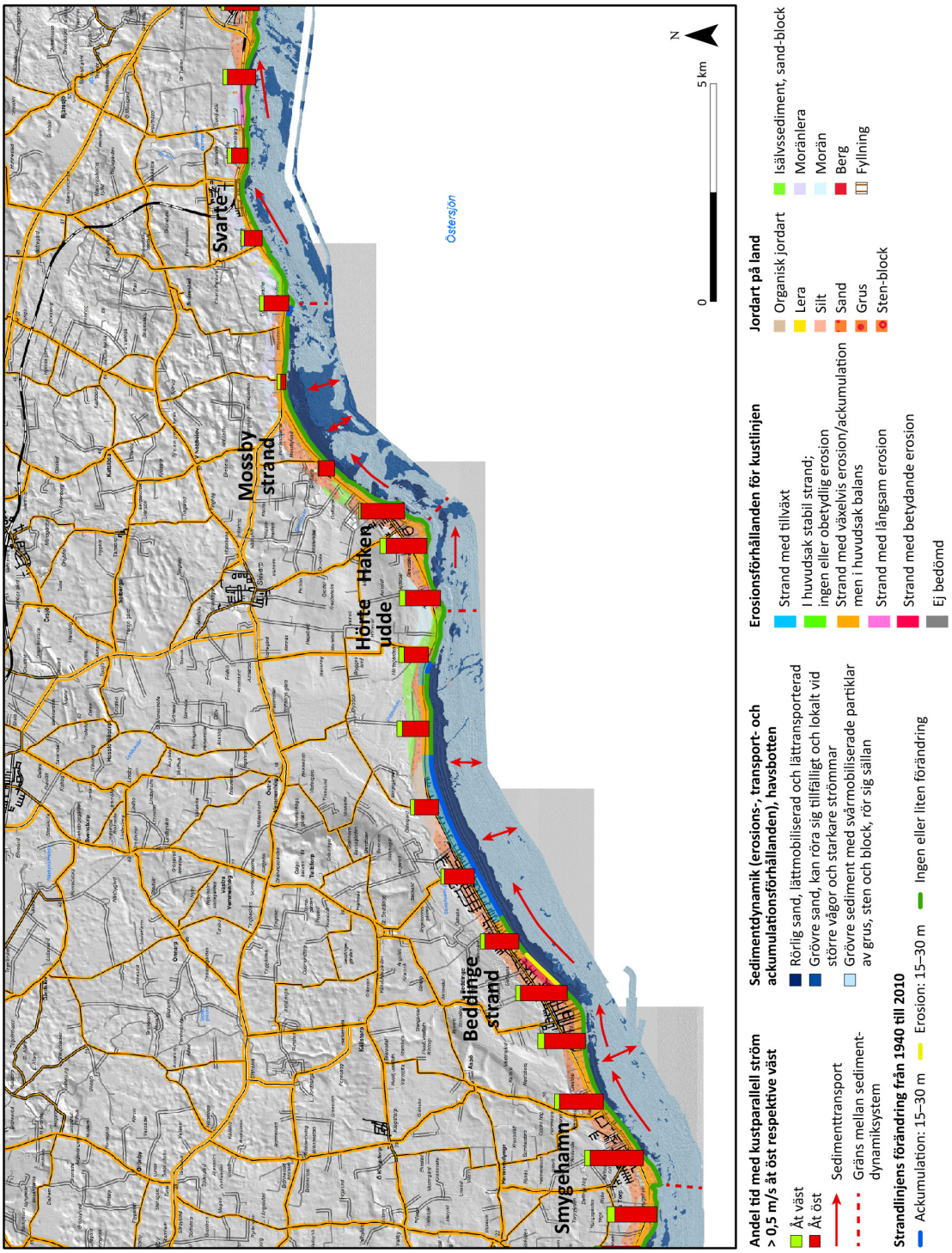
I bukten i Böste läge förekommer en relativt stor utbredning av sand, vilket indikerar ett stopp av transport österut med ackumulation och nettotillförsel hit västerifrån och ett slutet sediment-dynamiskt system från Gislövs läge och hit.

Smygehuk–Ystad

Längs denna kuststräcka förekommer fyra större bukter med ansamlingar av rörlig sand på havsbottnen (fig. 13). Kuststräckan domineras av sand-eller grusstränder med växelvis erosion och ackumulation (tillväxt). Mellan de två västliga bukterna, Smygehamn och Beddinge strand, förekommer mindre mängder rörlig sand lite längre ut från land, vilket kan tyda på en mindre sandtransport häremellan. Sanden, där den förekommer längs denna kuststräcka, sträcker sig från strandkant och cirka 200–300 m ut, ned till cirka 2-4 m vattendjup, och utbredningen ökar mot nordost i bukten vid Smygehamn, vilket indikerar en östlig nettotransport. Detta styrks även av att en östlig bottenström har dominerat starkt i tid sedan 1941. I bukten vid Beddinge strand förekommer i mitten av bukten större ansamlingar sand på havsbotten. I den södra delen av bukten har en märkbar erosion och reträtt av strandlinjen förekommit sedan 1940-talet och i mitten samt den norra delen av bukten en märkbar tillväxt av strandlinjen. Detta tyder på att det eroderade materialet har en nettotransport åt nordost längs stranden, vilket även indikeras av att den östliga strömkomponenten dominerar. Sandtillgång och förekomst når inte ned till teoretiskt beräknat konvergensdjup för kustavsnittet.

Det verkar inte förekomma någon större kustparallell transport åt nordost förbi uddarna Hörte Udde och Haken. I detta område har inte strömmen heller någon kustparallell övervägande komponent. Däremot kan sedimentfördelningen tyda på en östlig och vinkelrätt transport ut från land. Längst in i bukten vid Mossbystrand förekommer större sandansamlingar, men rörlig sand förekommer även i denna bukt kontinuerligt och fläckvis ned till 10–12 m vattendjup, cirka 1 km vinkelrätt ut från land, till skillnad från i de andra bukterna. Detta kan tyda på en pendlande transport in och ut från land. Sedimentens fördelning tillsammans med en östgående bottenström indikerar dock att en sedimenttransport ut från land kan dominera här.

Från Svarte till Ystads hamn förekommer mindre bukter med strandnära ansamlingar av rörlig sand cirka 200–300 m ut ned till cirka 2–4 m vattendjup. Rörlig sand förekommer också fläckvis och sporadiskt längre ut från stranden. Sandtillgång och förekomst når inte ned till teoretiskt beräknat konvergensdjup för kustavnittet. Här dominerar den östliga våg- och strömkomponenten och mer sand påträffas väster om Ystads hamn. Hamnutbyggnaden tillsammans med den grundare moränbotten med större icke rörliga sten- och blockpartiklar som förekommer ut från Revnäbbet hindrar transport österut.

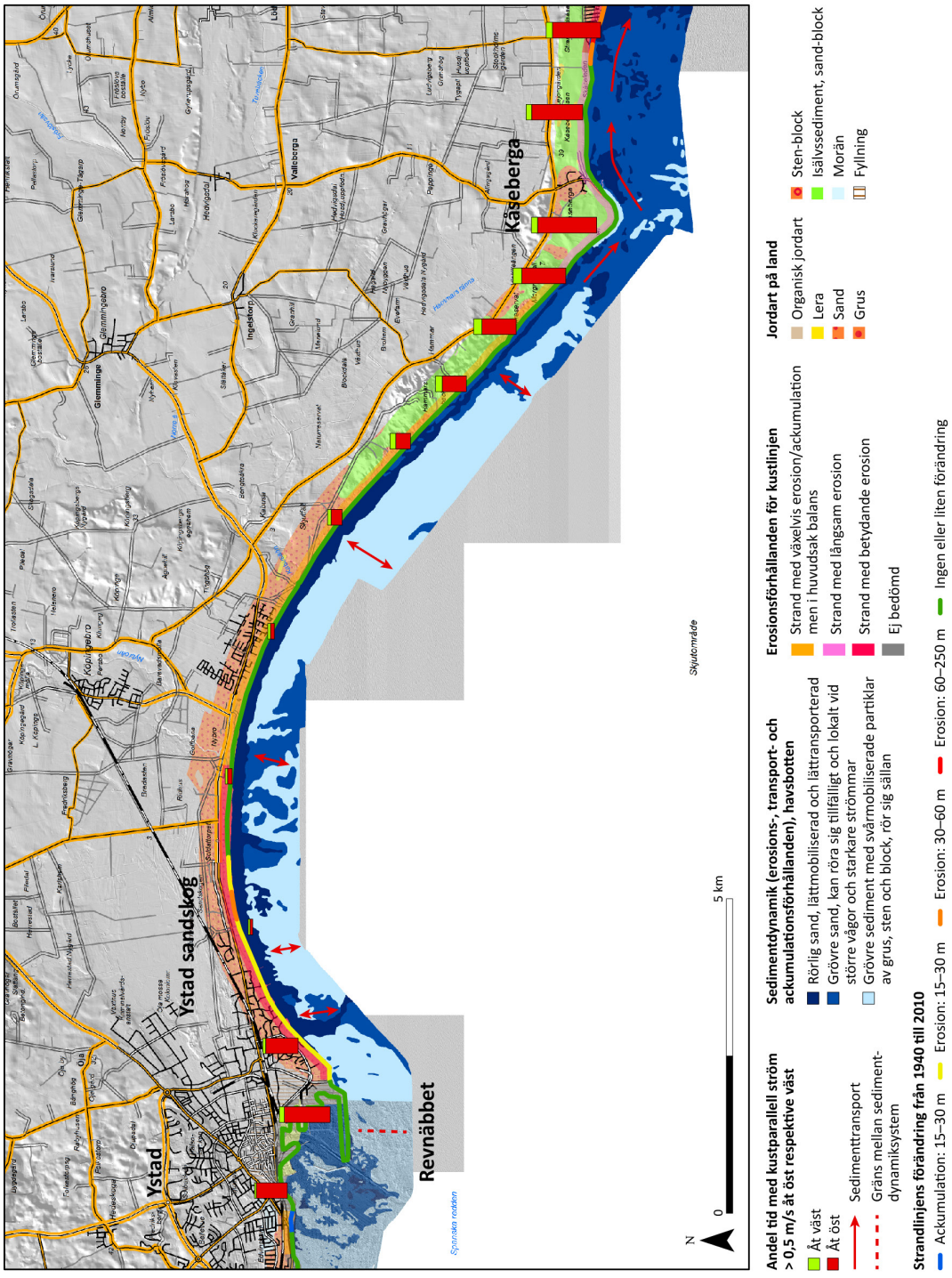


Figur 13. Sedimentdynamiska förhållanden mellan Smygehuk och Ystad längs Skånes sydkust. Från SGUs projekt Skånestrand. De mörkaste blå områdena redovisar förekomst av lättmobiliserad och lättransporterad sand. I övriga områden förekommer bottensediment med grövre partiklar som sten, grus och block som är svårmobiliserade och därför inte så rörliga. Erosionsförhållanden för kustlinjen och jordarternas fördelning på land, framtaget i SGUs projekt Skånestrand, samt den kustparallella strömmens, med en hastighet över 0,5 m/s, andel tid åt öst respektive väst under perioder med vind kraftigare än 20,8 m/s sedan 1941, visas också.

Ystad–Kåseberga

I den västra delen av bukten är stranden vid Ystad Sandskog måttligt till betydande eroderande och stranden på kustremsan ned till Kåseberga växelvis eroderande och ackumulerande och har en balanserad sandbudget (fig. 14). Den rörliga sanden på havsbottnen vid Ystad Sandskog före-

kommer ut från stranden fläckvis åtminstone 1 km och ned till 10 m vattendjup. I detta område har inte strömmen någon kustparallell övervägande komponent, vilket innebär att sanden transporteras här in och ut från land med en nettotransport ut eftersom sedimentdynamiksystemet är läckande och erosion förekommer i området.



Figur 14. Sedimentdynamiska förhållanden mellan Ystad och Kåseberga längs Skånes sydkust. Från SGUs projekt Skånestrand. De mörkaste blå områdena redovisar förekomst av lättmobiliserad och lättransporterad sand. I övriga områden förekommer bottensediment med grövre partiklar som sten, grus och block som är svårmobiliserade och därför inte så rörliga. Erosionsförhållanden för kustlinjen och jordarternas fördelning på land, framtaget i SGUs projekt Skånestrand, samt den kustparallella strömmens, med en hastighet över 0,5 m/s, andel tid åt öst respektive väst under perioder med vind kraftigare än 20,8 m/s sedan 1941, visas också.

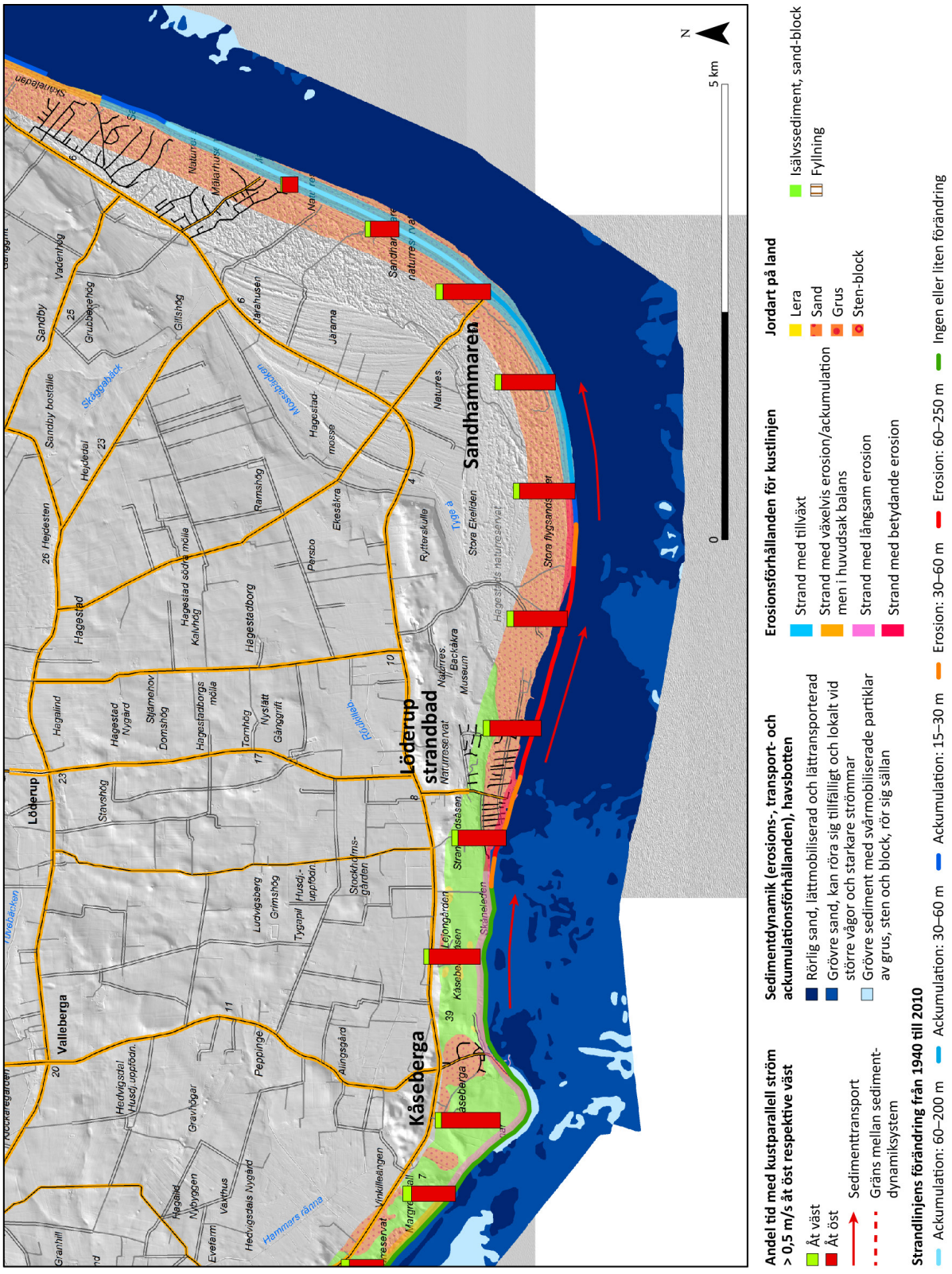
Längs med östsidan av bukten är utbredning av den rörliga sanden relativt liten, cirka 200–300 m ut från strandkanten ned till cirka 2–4 m vattendjup, men ökar sedan åter österut, vilket kan tyda på en viss nettotransport åt sydost. Sandtillgång och förekomst når inte ned till teoretiskt beräknat konvergensdjup för detta kustavsnitt. Här ökar också den östliga strömkompomeneten sydost mot Kåseberga.

Kåseberga–Sandhammaren

Stränderna vid Kåseberga och Löderup strandbad har en måttlig till betydande erosion och stranden vid Sandhammaren en betydande nettotillväxt. Här har den kustparallella strömmen en betydande östlig komponent och sedimentfördelningen indikerar en kraftig nettotransport mot öst till Sandhammaren, där sanden ackumulerar (fig. 15). Sedimentdynamiksystemet är läckande vid Kåseberga och Löderup strandbad med en kraftig negativ sedimentbudget. De marin-geologiska undersökningarna ger vid handen att den lättrörliga sandförekomsten väster om Löderup är av mindre omfattning, vilket förklarar att källan av sand för tillförsel österut till Löderup inte är så pass stor att en balanserad sandbudget kan hållas. Öster om Löderup förekommer rörlig sand på havsbotten upp till åtminstone 1 000–1 500 m ut från kustlinjen och ned till åtminstone cirka 10 m vattendjup.

Den mest påtagliga erosionen sker i samband med högvatten och stormar, vilka ofta inträffar under vintern. Till exempel skedde kraftig stranderosion vid Löderup och på andra ställen vid Skånes sydkust vid ett stormtillfälle i januari 2007 (Daniel 2007).

Den dominerande vindriktningen från väst och sydväst gör också att stora mängder sand transporteras med vinden österut och avsätts som vidsträckta flygsandfält med dyner innanför strandplanet vid Sandhammaren. Sandhammaren präglas för närvarande av pålagring av sand men perioder av stark erosion har också förekommit (Åhman 1980). De historiska strandlinjerna från ortofoton som kan ses i SGUs kartvisare *Stranderosion och geologi, kust* visar till exempel att strandlinjen 1970 låg innanför strandlinjen 1950. Den nuvarande situationen kan därför komma att ändra sig i framtiden och tillväxten kan komma att avlösas av erosion.



Figur 15. Sedimentdynamiska förhållanden mellan Kåseberga och Sandhammaren längs Skånes sydkust. Från SGUs projekt Skånestrand. De mörkaste blå områdena redovisar förekomst av lättmobiliserad och lättransporterad sand. I övriga områden förekommer bottensediment med grövre partiklar som sten, grus och block som är svårmobiliserade och inte så rörliga. Erosionsförhållanden för kustlinjen, också framtaget i SGUs projekt Skånestrand, samt den kustparallella strömmens, med en hastighet över 0,5 m/s, andel tid åt öst respektive väst under perioder med vind kraftigare än 20,8 m/s sedan 1941 visas också.

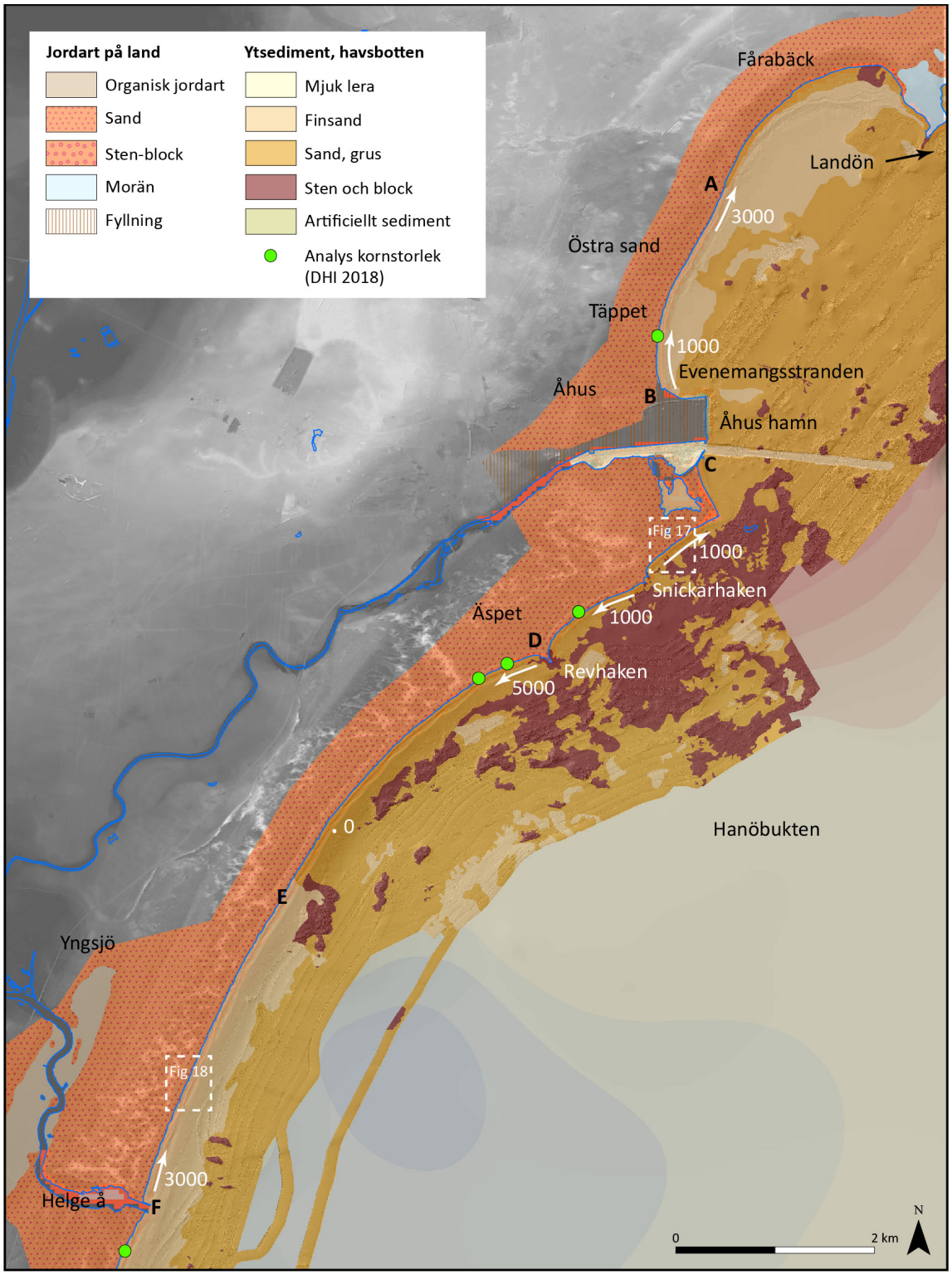
Exempel, sedimenttransport och strandmorfologi vid Åhus, ostkusten Skåne

Syfte

En studie av sedimenttransport mellan land och hav samt strändernas morfodynamik längs kustlinjen från Yngsjö till Fårabäck norr om Täppetstranden och Åhus har gjorts. Detta område valdes då delar av denna låglänta, bebyggda kust är utsatt för stranderosion, vilket här utgör ett hot mot fast egendom. Detta hot förväntas förvärras de kommande decennierna på grund av stigande havsnivå kopplat till klimatförändringar och eftersom privata hus och tillhörande allmän infrastruktur fortsätter att byggas i utsatta områden. För att utveckla en förvaltningsstrategi för nuvarande och framtida erosionsrisk har Kristianstads kommun beställt rapporter om sediment-transport av DHI (2018a, b). Sedan våren 2019 har Kristianstads kommun också initierat en drönarundersökning varannan månad av stranden vid Äspet. Dessutom har SGU tidigare identifierat områden med både erosion och ackumulation i Åhusområdet från en serie flyg-fotografier tagna mellan 1960 och 2012 (Malmberg Persson m.fl. 2016). Denna studie komplett-erar de tidigare studierna genom att vidare analysera sedimenttransport nära kusten längs denna sträcka, inleda en bedömning av det morfodynamiska tillståndet för stränder efter stormar och under lugnare perioder samt undersöka förändringar i ackumulations- och erosionsområden under perioden 2007 till 2018. Studierna genomfördes genom analys av en tvåårig serie orto-rektifierade flygfotografier i kombination med Lantmäteriets LiDAR-baserade digitala höjdmodell i ArcGIS.

Området

Studieområdet omfattar en 13,5 km lång kuststräcka, som utgörs mestadels av sandstrand, från Helge å i söder till Täppetstranden cirka 1 km norr om Åhus i norr (fig. 16). Kustlinjen är orienterad i en sydvästlig–nordostlig riktning och utgör en del av Hanöbukten samt är belägen i ett flackt landskap som utvecklats på glaciala och post-glaciala sediment. Sandstränderna avbryts av lokala ansamlingar av glaciala stenar och block, som sträcker sig ut i havet vid Revhaken och Snickarhaken. En ytterligare ansamling av glaciala block som bildar ett rev markerar den norra gränsen för studieområdet. Stränderna består av fin- och mellansand (0,25–0,5 mm; bilaga A i DHI 2018a, där den rapporteras som fin sand), men varierar både längs och tvärs stranden.



Figur 16. Studieområdet sträcker sig från norr om Åhus till mynningen av Helge å i söder längs med den skånska ostkusten. Kustlinjen består mestadels av sandstränder där strandnära sanddyner har stabiliserats av tallplantager. Storlek och riktning av sedimenttransport för olika kustpartier, från DHI (2018), visas med grå pilar och värden. I den här studien har sandstränderna delats upp i fyra segment: Täppet (sträckan mellan A och B), Snickarhaken (sträckan mellan C och D), Äspet (sträckan mellan D och E) och Yngsjö (sträckan mellan E och F). Provplatser för kornstorleksanalyser i DHI (2018) visas med fyllda gröna cirklar. Ytsediment på havsbotten och jordart på land är från SGUs projekt Skånestrand.

Tätorterna Yngsjö, Äspet och Åhus ligger längs denna kuststräcka och tar upp totalt cirka 8 km av kusten. Den största mänskliga påverkan av den naturliga kustlinjen är hamnområdet i Åhus, beläget på norra sidan av Helge ås gamla å-fåra. Denna fåra snördes av 1795, då ån fick sitt nuvarande utlopp vid Gropahålet. I övrigt består den mänskliga påverkan av utplaning av sanddyner för byggen av vägar, bostäder och andra typer av hus. I områden som saknar infrastruktur har dynfältet stabiliserats genom tallplantering.

Vågor som träffar kusten kommer vanligen från ost till syd. De största vinterstormvågorna, som kan ha en höjd av cirka 2 m och period upp till 8 sekunder vid ett vattendjup av 5 m enligt modellering, återkommer varje år (DHI 2018a). Kusten norr om Åhus rapporteras vara relativt skyddad av skärgården öster om Landön (DHI 2018a). Det är emellertid oklart hur effektivt detta skydd är med tanke på att inkommande vågor vanligen kommer från sydost.

Kuststräckan bedömdes av DHI (2018a och b) vara nära jämvikt under nuvarande förhållanden, vilket innebär att dess läge i stort sett inte förändras genom varaktig erosion längs vissa sträckor eller ackumulation i andra. Det finns dock utpekade avsnitt där erosion för närvarande sker, till exempel söder om Revhaken och norr om Evenemangsstranden. Uppfattningen att kustlinjen i allmänhet är nära morfodynamisk jämvikt stöds av en sedimentbudgetanalys, som visar mindre nettotransport av sand, jämfört med mycket större bruttotransport (det vill säga kustparallell transport av sand i båda riktningarna; DHI 2018a).

Metoder

Förändringar i strandmorfologi har analyserats i ortorektifierade flygbilder, tagna under åren 2007, 2010, 2012, 2014, 2016 och 2018, i ArcGIS. I studien har även Lantmäteriets LiDAR-baserade höjdmodell och batymetriska data från SGUs projekt Skånestrand, båda med 2 m horisontell upplösning, använts. Från dessa underlag har en kvalitativ bedömning av stränderna enligt den morfodynamiska klassificeringen (fig. 2) av Wright och Short (1984) utförts. Sandstränder har benägenhet för att visa en modal morfologi som är i jämvikt med rådande våg- och strömförhållanden. Morfologin svarar på stormvågorna genom att ändra tillstånd som återspeglar stormstorlek, varaktighet och inkommande vågriktning. Efter återgång till lägre energiförhållanden återgår stranden till sitt tidigare tillstånd under en period av veckor till månader, men läget kan också kvarstå under längre perioder efter en större storm. Kunskap om strandförändringar, både under stormcykler och lugna perioder, hjälper till att skapa en bild av hur stränder kan reagera på framtida stormar under en framtida havsnivåhöjning.

De fotografiska, topografiska och batymetriska underlagen användes också för att kvantitativt utvärdera stranderosion och strandackumulation under perioden 2007 till 2018 med hjälp av ArcGIS. Linjer ritades längs strandlinjerna enligt metodiken från Malmberg Persson m.fl. (2016, 2019) i en skala på 1:1000 eller mindre, och jämfördes sedan mellan år i syfte att bestämma trender i ackumulation och erosion under denna period.

Malmberg Persson m.fl. (2016, 2019) redovisar en noggrannhet av 15 m för positionering och vattenstånd vid tolkningen av strandlinjen i äldre ortofoton. Detta innebär att de förändringar av strandlinjen i den studien som är analyserade i ortofoton från 1930-talet och som är mindre än 15 m inte anses som tillförlitliga och betecknas med ”Ingen förändring”. I denna studie är dock noggrannheten av studerade förändringar uppskattad till bättre än 3–4 m då analyserna är utförda med högre upplösning längs en kortare kuststräcka (13,5 km). Kuststräckan är också okomplicerad genom att den saknar större grunda bukter där det är svårt att särskilja sand belägen ovanför, från sand belägen nedanför vattenlinjen, särskilt i äldre svartvita ortofoton. Här åstadkoms en högre upplösning då analysen av förändringar i strandlinjens och dynfotens lägen utfördes på ortofoton i färg i en skala av 1:500 längs 30 m långa kustsegment.

En nackdel med denna metod är att rådande havsnivå vid flygfototillfället påverkar strandlinjens läge. Under kortare perioder (timmar till dagar) påverkar framförallt lufttryck, vind och vågor havsnivån. I denna studie antas att havsnivån är ungefär densamma i använda underlag då flygfotograferingen utfördes i klart väder. Under 2016 och 2018 genomfördes dock flygfotograferingen under förhållanden med större vågor, vilket innebär att strandlinjen är flyttad längre in i landet än under lugnare förhållanden. Detta kan ge felaktiga intryck av erosion, troligen begränsat till några meter horisontellt. En ytterligare felkälla är att mätningarna görs i planvy och därmed saknar en vertikal komponent. En strand som eroderats av den senaste tidens stormaktivitet kan verka bredare, med en havsförskjuten strandlinje, eftersom sand har transporterats ut från strandplanet, där den lagras under lugna förhållanden. Denna sänkning av strandplanet kan inte ses uppifrån. För att motverka dessa potentiella fel (vilka är i allmänhet mindre i södra Sverige) konstruerades också linjer för varje flygfotografi längs dynfoten, där sanddynerna möter strandplanet. Denna linje är i allmänhet lätt att identifiera genom förekomsten av ett erosionshak, även om begynnande (ofta tillfälliga) delvis vegeterade sanddyner belägna vid havet på fält med större sanddyner komplicerar det hela. För att minimera fel baserades därför bedömningarna av stranderosion och ackumulation på två mätningar; strandlinjer och dynfoten.

Resultat

Först gjordes en kvalitativ bedömning av strandens morfodynamiska tillstånd, baserad på klassificeringen av Wright och Short (1984), genom att studera den tvååriga flygfotoserien. För att underlätta för läsaren har vi delat upp den 13,5 km långa kustlinjen i fyra segment vilka kallas i ordning från norr till söder: Åhus, Snickarhaken, Äspet och Yngsjö. De har längder på 2 300 m, 3 000 m, 4 000 m och 3 500 m (fig. 16). Den morfodynamiska beskrivningen har använts för att utvärdera variationerna i tid för strandlinjernas samt dynlinjernas läge mellan 2007 och 2018. Läget mättes i ArcGIS.

Strandmorfodynamiskt tillstånd: halvårsbedömning under 2007–2018

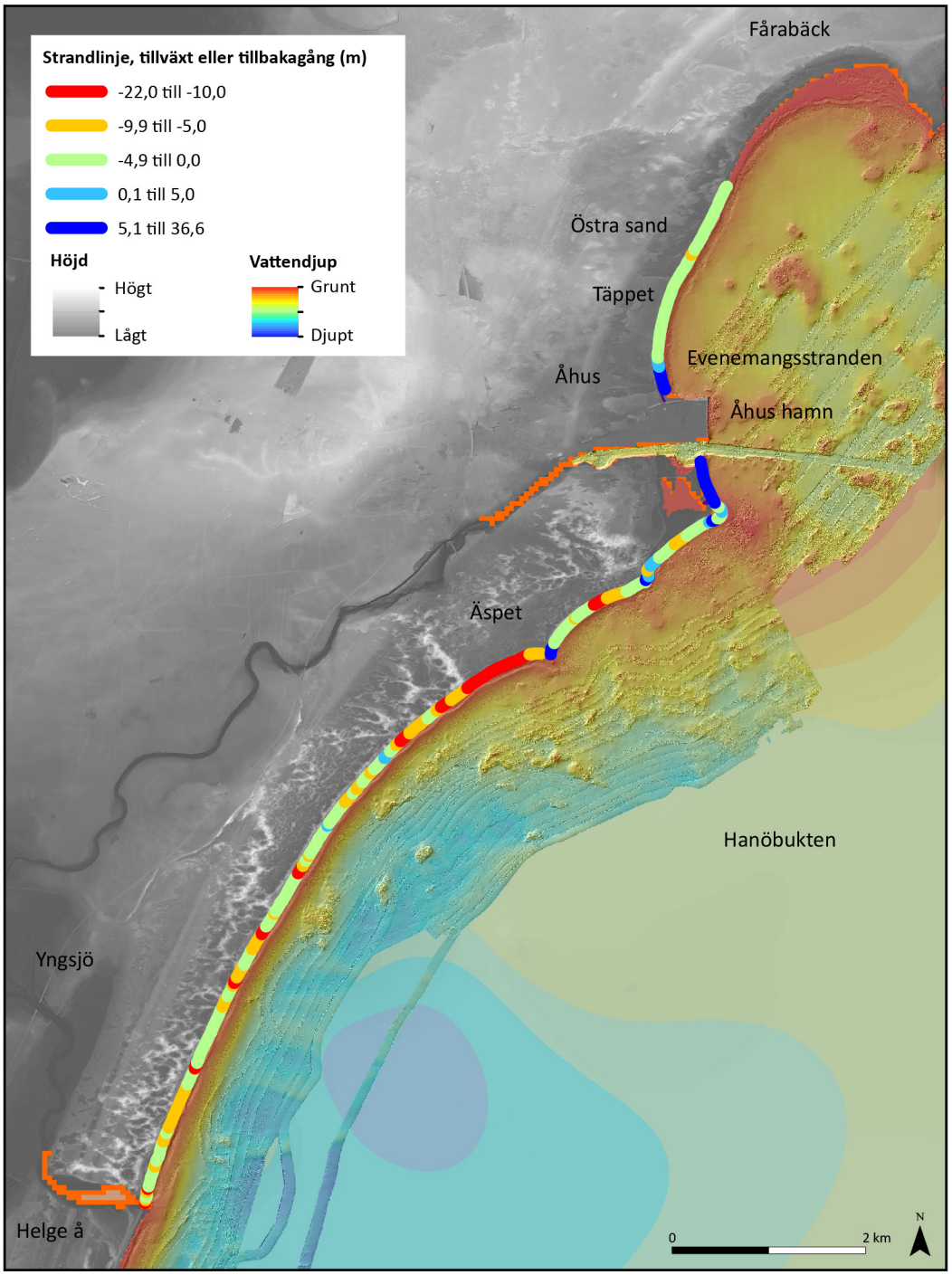
Sandsträndernas morfodynamiska tillstånd i studieområdet varierar både rumsligt och tidsmässigt mellan ”intermediär – revel/ränna eller lågvattenplatå” och ”intermediär – transversell revel och ripström” (fig. 2d, e och 17). De förekommer ofta även i övergångar mellan dessa två klassade tillstånd. Strandmorfologin är som mest dynamisk längs segmentet mellan Äspet och Yngsjö och som minst i avsnittet norr om Evenemangsstranden. Ripströmmarnas orientering varierar beroende på den infallande vågriktningen; vågor från nordost producerar kustparallella strömmar och ripströmmar med en riktning mot sydost–sydväst, medan vågor från sydost producerar kustparallella strömmar och ripströmmar med en riktning mot norr och nordost.

Figur 17. En strand i det morfodynamiska tillståndet ”Revel/ränna eller lågvattenplatå”, enligt klassificeringen av Wright och Short (1984), på den del av Snickarhakensegmentet som är åt sydost. Flygfotografiet är från 2012 och platsen visas med den vita streckade rutan i figur 16. Ortofoto från Lantmäteriet.

Figur 18. En strand i det morfodynamiska tillståndet ”Transversell revel och ripström”, enligt klassificeringen av Wright och Short (1984), strax norr om Helge Å vid Yngsjö. Flygfotografiet är från 2012 och platsen visas med den vita streckade rutan i figur 16. Ortofoto från Lantmäteriet.

Strandlinjeförändring mellan 2007 och 2018

Uppmätta strandlinjeförändringar mellan 2007 och 2018 visas i figur 19. De nordligaste 750 m av Täppet-segmentet visar upp till 5 m tillbakagång (erosion). Söder om detta avsnitt visar en sträcka av 60 m upp till 9 m tillbakagång, och en sträcka av 1 km visar ingen förändring. De sydligaste 350 m av Täppetstranden visar upp till 37 m tillväxt, vilket beror på den 200 m långa stenskoningen längst söderut och det årliga återställandet av den cirka 100 m långa stranddelen norrut från stenskoningens slut.



Figur 19. Strandlinjeförändring mellan 2007 och 2018. Negativa värden (linjer med varma färger) visar tillbakagång (erosion) medan positiva värden (linjer med kalla färger) visar tillväxt (ackumulation). Vattendjupsförhållanden är från SGUs projekt Skånestrand.

Den delen av Snickarhakensegmentet som vetter mot nordost visar 7 till 16 m tillväxt. Udden visar ingen nettoförändring, medan det mesta (~ 1 km längd) av det sydost-vettande segmentet norr om Snickarhaken visar på en tillbakagång av mindre än 5 m, förutom de centrala 150 m, som visar upp till 10 m tillbakagång. En sträcka på 180 m direkt norr om Snickarhaken visar växlande tillväxt och tillbakagång, varvid tillbakagången når maximalt 10 m. En tillbakagång på maximalt 10 m kännetecknar de nordliga två tredjedelarna av viken mellan Snickarhaken och

Revhaken. Upp till 17 m tillväxt har skett över en 130 m lång sträcka omedelbart norr om Revhaken.

Tabell 2. Tillbakagång (erosion), ingen förändring och tillväxt (ackumulation) under perioden från 2007 till 2018 för den undersökta strandlinjen.

Strandlinjeförändring	Total längd (m)	Total längd (%)
Sammanlagd tillbakagång	10 118	82
Ingen förändring	810	7
Sammanlagd tillväxt	1 410	11
Totalt	**12 338**	**100**

Tabell 3. Tillbakagång (erosion), ingen förändring och tillväxt (ackumulation) av dynfoten under perioden 2007 till 2018 längs med den undersökta kustlinjen.

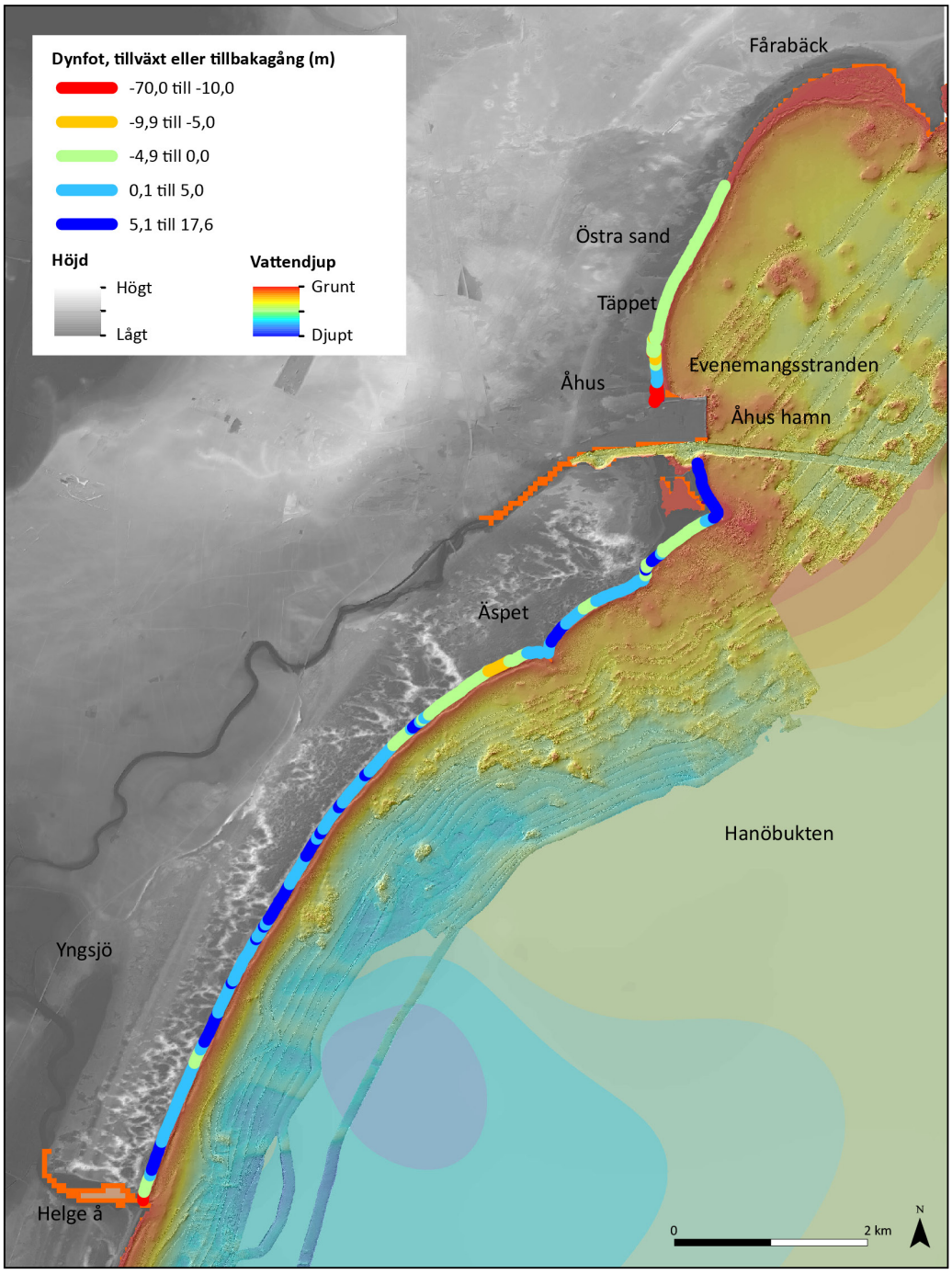
Förändring av dynfotens läge	Total längd (m)	Total längd (%)
Sammanlagd tillbakagång	2 279	18
Ingen förändring	2 999	23
Sammanlagd tillväxt	7 604	59
Totalt	**12 882**	**100**

Längs Äspet-segmentet verkar det som om upp till 20 m tillbakagång har inträffat av strandlinjen över de nordligaste 1,8 km. Denna observerade tillbakagång koncentreras till en sträcka som börjar cirka 100 m söder om Revhaken och fortsätter cirka 750 m därifrån söderut. Denna sträcka är ett känt problemområde. Söder om denna förekommer mestadels tillbakagång, i allmänhet < 5 m och lokalt upp till 10 m. En 80 m lång sträcka indikerar också tillväxt. På liknande sätt indikerar segmentet Yngsjö generell tillbakagång av strandlinjen på upp till 5 m, lokalt upp till 15 m.

Sammanfattningsvis visar en total längd på 10 118 m (82 %) av strandlinjen mellan 2007 och 2018 en tydlig tillbakagång (erosion), 810 m (7 %) visar ingen förändring och 1 410 m (11 %) visar tillväxt (tabell 2). Ackumulation begränsas till Evenemangsstranden, den nordost-vettande delen av Snickarhakensegmentet och 130 m-sträckan omedelbart norr om Revhaken (tabell 3).

Dynfotens förändring av läge mellan 2007 och 2018

Den uppmätta förändringen av dynfotens läge mellan 2007 och 2018 visas i figur 20. Täppet-segmentet visar 0–5 m tillbakagång (erosion) för de nordligaste 1 800 m, sedan en generellt högre tillbakagång inåt land av dynfoten för de sydligaste 500 m. Ett undantag utgör ett 130 m centralt segment, som visar upp till 3 m tillväxt. Tillbakagång av dynfoten, upp till 7 m, har skett över en 150 m lång sträcka norr om detta centrala segment och är ännu större för de sydligaste 220 m, varierande mellan 10 och 80 m.



Figur 20. Dynfotens förändring av läge mellan 2007 och 2018. Negativa värden (linjer med varma färger) indikerar tillbakagång medan positiva värden (linjer med kalla färger) indikerar tillväxt (ackumulation). Vattendjupsförhållanden är från SGUs projekt Skånestrand.

Dynfoten i Snickarhakensegmentet uppvisar 7–16 m tillväxt längs den delen som vetter åt nordost. Däremot uppvisar bukten som vetter åt sydost och har sin södra ände vid Snickarhaken 0 till 5 m tillbakagång, men upp till 6 m tillväxt i både de norra och södra ändarna. Bukten mellan Snickarhaken och Revhaken uppvisar mestadels 0–5 m tillväxt, med mindre tillbakagång (upp till 3 m) längs de centrala 150 m av bukten. Den mesta ackumulationen (upp till 7 m) har skett vid den södra änden av bukten, på norra sidan av Revhaken.

Allmän tillbakagång (erosion) har skett i de nordligaste 1 800 m av Äspet-segmentet. Tillbakagången, som når maximalt 12 m, är mest allvarlig i en zon som börjar 100 m söder om

Revhaken. Söder om dessa 1 800 m visar dynfoten allmänt tillväxt. Det fortsätter även genom Yngsjö-segmentet. Tillbakagång, upp till 11 m, har inträffat över en 270 m lång sträcka omedelbart norr om Helge å mynning.

Sammanfattningsvis har en total längd på 2 279 m (18 %) dynfot haft en tillbakagång in mot land mellan 2007 och 2018, 2 999 m (23 %) visar ingen förändring och 7 604 m (59 %) visar på tillväxt (tabell 3). Endast enstaka sträckor med tillbakagång av dynfoten, mot mer allmän tillväxt, står i kontrast till den mer allmänna tillbakagången i strandlinjen (tabell 2). Tillbakagången är koncentrerad till Täppet-segmentet, delen av Snickarhaken-segmentet som vetter åt sydost söder till Snickarhaken, söder om Revhaken och norr om Helge å. Tillbakagången är i allmänhet mindre och begränsas till några meter.

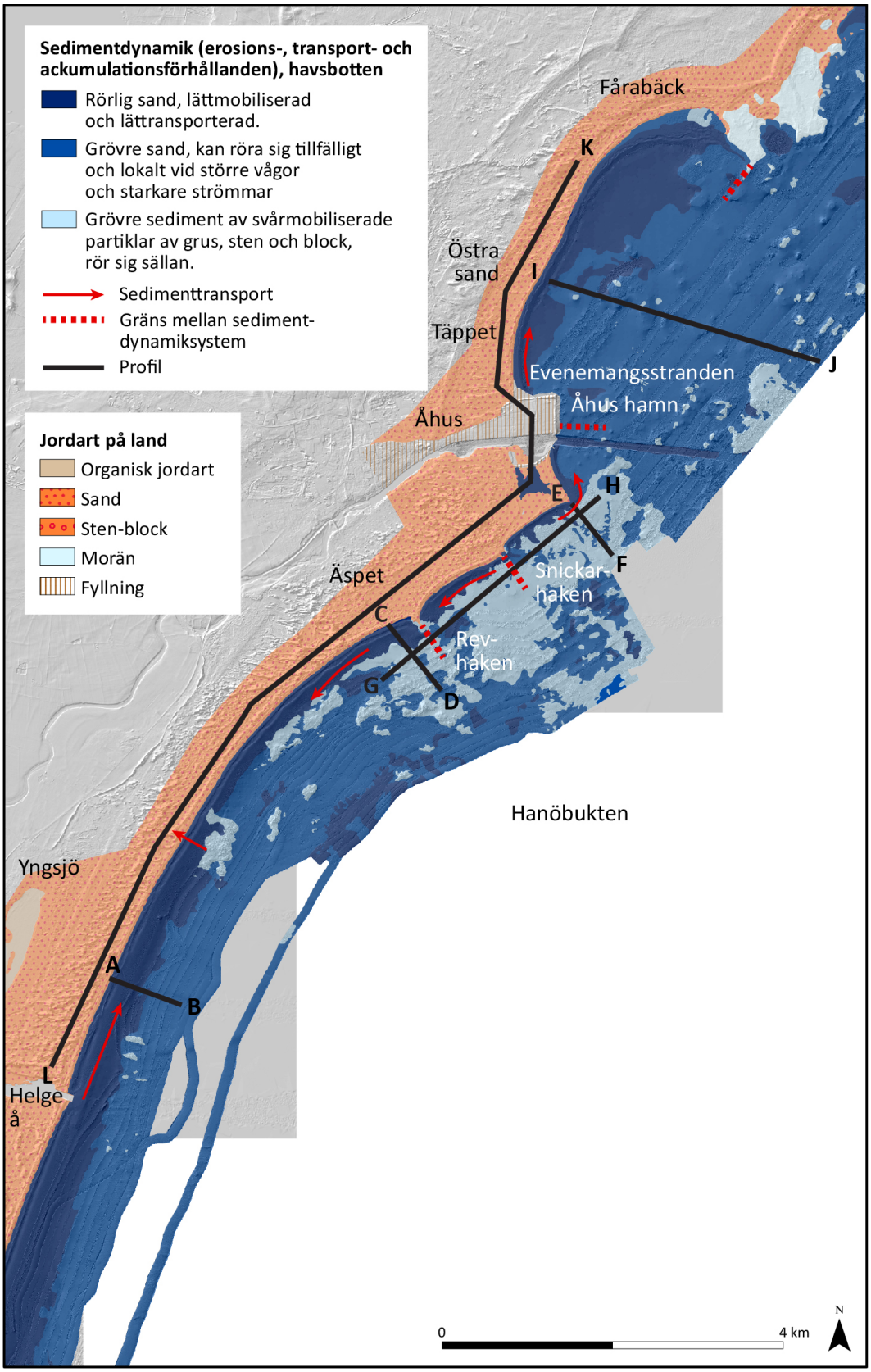
Bottensediment och vattendjup (batymetri)

Vattendjupen varierar från söder till norr genom studieområdet (fig. 21 och 22). Bottenlutningen är jämförelsevis brant norr om Helge Å vid Yngsjö, vilket illustreras av profilen A–B (fig. 20 och 21), som visar en nedgång till cirka 14 m under havsnivån på ett avstånd av cirka 500 m från strandlinjen. Den lätteroderade och lättransporterade sanden på botten som kan interagera med landdelen av stranden förekommer ned till cirka 5–6 m vattendjup, vilket är cirka 300 m från stranden. Nära Revhaken (profil C–D) ökar vattendjupet till 7 m, cirka 700 m från strandlinjen. Här förekommer den lätteroderade och lättransporterade sanden som kan interagera med stranden ned till cirka 4–5 m vattendjup, vilket är cirka 200–300 m från stranden, och sedan dominerar svallat isälvsmaterial med grövre svåreroderat och svårrörligt material bestående av grus, sten och block i bottenytan. Revhakens grundare fortsättning på botten ut från land med grövre material i bottenytan syns tydligt i utbredningen av bottensediment och batymetri (fig. 21). Längre norrut vid profil E–F (fig. 21 och 22) är det grundare och profilen når ned till 4 m vattendjup cirka 700 m från strandlinjen. Här förekommer den lätteroderade och lätt-transporterade sanden ned till cirka 1–2 m vattendjup, cirka 100 m från stranden och sedan dominerar svallat isälvsmaterial med grövre svåreroderat och svårrörligt material bestående av grus, sten och block i bottenytan.

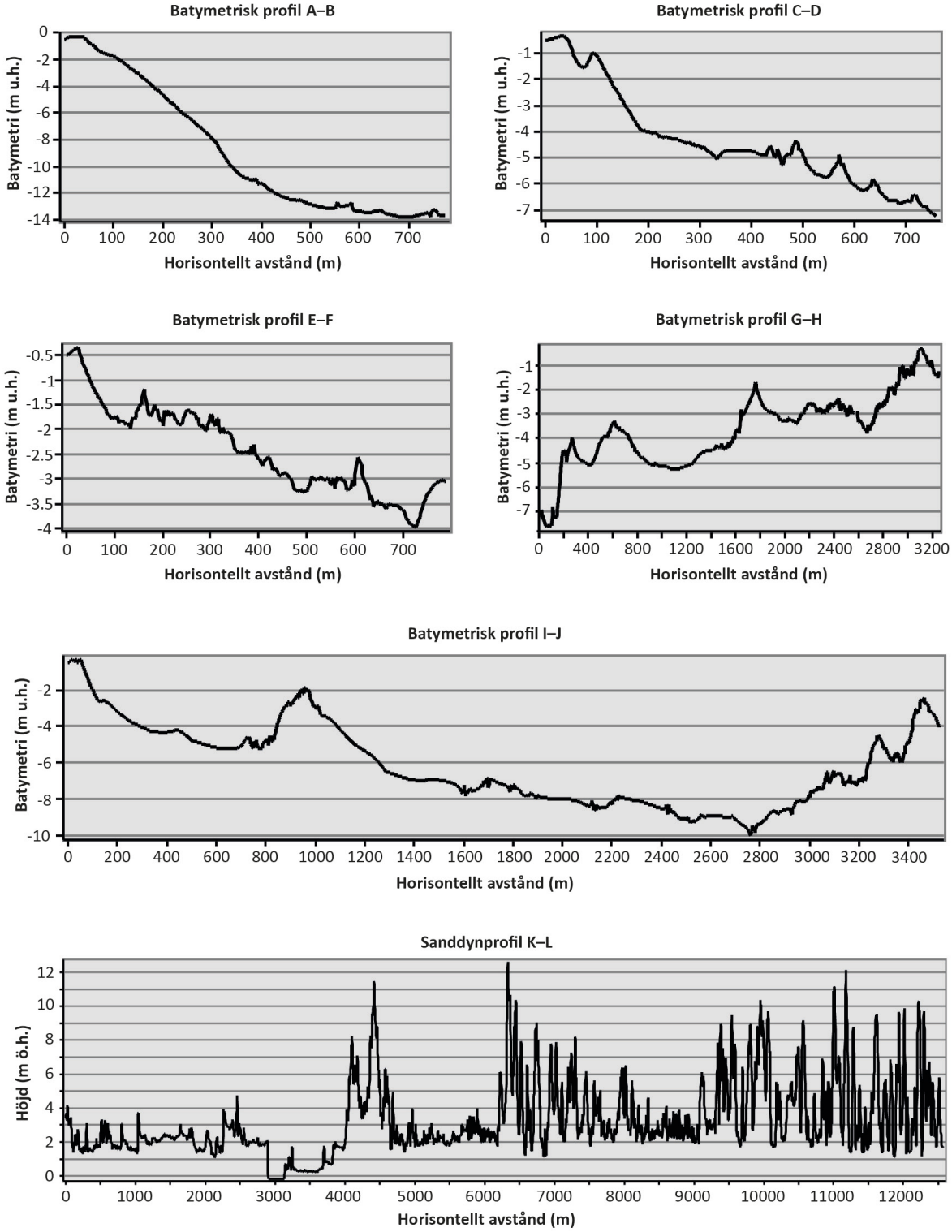
I den kustparallella profilen G–H (fig. 21 och 22) syns tydligt en uppgrundning från Revhaken mot Åhus Hamn och utbredningen av lätteroderad sand minskar ut från stranden. Svallat isälvsmaterial bestående av grus, sten och block dominerar bottenytan i den norra delen av profilen, figur 21. Norr om Åhus (profil I–J) ut från Östra Sand når vattendjupet 10 m cirka 2,7 km ut från land och grundar sedan upp till 2,4 m cirka 3,4 km ut från land (fig. 21 och 22). I denna bukt förekommer den lätteroderade och lättransporterade sanden från cirka 50 m utbredning i söder till cirka 400 m utbredning i norr ut från stranden. Detta tyder på en nord-gående transport. I profil I–J förekommer denna sand ned till cirka 4–5 m cirka 500–700 m från stranden och sedan tar en grund moränhöjd över med grövre ytsediment, och morän tillsammans med glaciallera dominerar sedan bottnen längs profilen.

I allmänhet i området minskar bottenprofilens lutningen ut från land på grund av en grundare botten från söder mot norr, med en markant övergång i närheten av Revhaken–Snickarhaken. Detta kan bero på att den stora isälvsavlagring som uppträder på havsbottnen med grövre svåreroderat residualmaterial i området förekommer närmre in mot land här, se SGUs kartvisare *Stranderosion och geologi, kust.*

Denna kuststräcka omfattar fyra mer eller mindre slutna sedimentdynamiksystem (fig. 21). Gränserna mellan de olika systemen markeras med röda linjer. Avsaknaden av rörlig sand på havsbottnen utanför Revhaken, Snickarhaken och Åhus hamn och den delning av de sammanhängande sandskikt som återfinns på varsin sida av dessa områden indikerar att sedimenttransporten häremellan är av mindre omfattning. Bottnen är här också grundare och består av större mer svåreroderade partiklar som försvårar transport.



Figur 21. Sedimentdynamiska förhållanden samt jordarter på land. Från SGUs projekt Skånestrand. De mörkaste blå områdena redovisar förekomst av lättmobiliserad och lättransporterad sand. I övriga områden förekommer botten-sediment med grövre partiklar som sten, grus och block som är svårmobiliserade och inte så rörliga. Lägen av de batymetriska profiler som är i figur 22 samt pilar och streckade linjer som åskådliggör sedimenttransportriktning samt gränser mellan olika sedimentdynamiksystem visas också.



Figur 22. Batymetriska profiler och en sanddynprofil. Lägen visas i figur 21.

Utbredningen av rörlig sand återspeglar även de områden där stranderosion och ackumulation förekommer (fig. 19 och 20) och även transportriktning modellerad av DHI (2018), se figur 16. Thom m.fl. 2018 fann också slutna sedimentdynamiksystem vid kuster. Det omfattande dynfältet och observationer av dynfotens tillväxt indikerar att sand ackumuleras på landdelen av stranden från Äspet till Yngsjö (fig. 20).

Diskussion

Under lågenergiförhållanden har stränderna ett ”Intermediärt stadium – revel/ränna-lågvattenplatå”, enligt den morfodynamiska klassificeringen i Wright och Short (1984), se figur 2e. Stränderna övergår till ”Intermediärt stadium – transversell revel och ripström” (fig. 2d) under förhållanden med högre energi. Vi ser inga belägg i ortofotona att strandtillstånd som kräver högre vågenergier än dessa förekommer. Relativt höga vågenergier åtföljer oftast vinterstormar och stränderna kan ändras långsamt, under veckor till månader, tillbaka till ett ”Intermediärt stadium – revel/ränna-lågvattenplatå” under de lägre vågenergier som är vanliga under sommarmånaderna. Stränderna kan förbli i ett ”Intermediärt stadium – transversell revel och ripström” under perioder av veckor till månader, om låga vågenergiförhållanden kvarstår. Detta morfologistillstånd utgör en potentiell risk för badande under dagar med starka pålandsvindar och höga vågor på grund av att vattenflödet i retur från stranden sker genom ripströmmar. De studerade stränderna är mestadels i ”Intermediärt stadium – revel/ränna-lågvattenplatå” under perioder med låga vågenergier och i ”Intermediärt stadium – transversell revel och ripström” vid relativt höga energier, vilket också är typiskt för stränder med begränsad stryklängd (våg-fetch) som periodvis utsätts för stark vind (Greenwood & Sherman 1984, Brander 1999, Goodfellow & Stephenson 2005, 2008). Denna kortvariga (årliga eller mindre) periodicitet kan studeras på Äspet med hjälp av det tvåmånatliga drönarundersökningsprogram som Kristianstads kommun har inrättat.

Växlingen mellan de morfodynamiska tillstånden ”Intermediärt stadium – revel/ränna-lågvattenplatå” och ”Intermediärt stadium – transversell revel och ripström” tyder på att returflödet av vatten som drivits in mot land av vågor är främst horisontellt, snarare än vertikalt segregerat. Denna iakttagelse står i motsats till (DHI 2018) där det rapporteras om att återflödet av vatten på dessa stränder är vertikalt segregerat (undertröm). Ett vertikalt segregerat botten-returflöde brukar inträffa på stränder med högre energi.

Stränder som är i lågenergistadiet (reflektivt stadium) i den morfodynamiska klassificeringen är mycket känsliga för erosion under stormar. Sand som är lagrad på ett strandplan med en brant reflekterande slänt och ett lågvattenplan eroderas lätt, transporteras tvärs ut från och sedan längs kusten med snett infallande vågor, under stormar. Revelbildning genom ackumulation av sediment kan också bidra till att sandtransport sker längs kusten i den kanal som förekommer mellan stranden och reveln, se figur 4. Om stormarna ökar i styrka eller blir mer frekventa i framtiden kan sand som transporteras från kusten deponeras på sådana vattendjup att den inte förmås av vågor och bottenströmmar återtransporteras för återhämtning av stranden. Även utan någon ökning i stormstyrka eller frekvens kan stormvind- och vågförhållanden kombinerat med en stigande havsnivå innebära extrema högvattenstånd i södra Östersjön. Sådana högvattenstånd kan förekomma med återkommande intervall av 1 på 100 år och öka i frekvens till en gång på tio år vid 2050 och årligen vid 2100 (Pörtner m.fl. 2019). Stormar som orsakar en höjd vattenyta kommer sannolikt att leda till en större reträtt av strandlinjen, vilket oftast inträffar under enstaka händelser snarare än konstant över tid.

Morfologin med ”transversell revel och ripström” eller en övergång mellan denna och ”revel/ränna-lågvattenplatå” förekommer oftare söder om Revhaken än längre norrut, där tillståndet ”revel/ränna-lågvattenplatå” generellt råder. Denna skillnad i strandmorfologi indikerar att kustzonen söder om Revhaken är mer exponerad och tar emot högre vågenergi. Större stormvågor, som oftast inträffar från SE-kvadranten (DHI 2018), och en brantare bottenlutning (fig. 21), innebär att exponeringen är högre i surfzonen söder om Revhaken.

Denna studie indikerar att sand transporteras och ackumulerar i mitten av sektionen mellan Äspet och Yngsjö, och stödjer därmed de iakttagelser gjorda av DHI (2018). Istället för att ackumuleras och bli kvar på strandplanet och bygga ut det, transporteras sand av vind och avsätts i sanddyner. Detta bidrar till framryckningen av dynfoten längs denna kuststräcka (fig. 20). Det är också troligt

att sand transporteras från strandplanet och avsätts i sanddyner under stormar, men mätningar krävs för att verifiera den hypotesen. Huruvida den observerade framryckningen av dynfoten fortsätter i framtiden under en förändrad exponering samt vilka förhållanden som uppstår mellan dynfotens position och bredden på strandplanet är en fråga som kräver ytterligare studier.

De största sanddynerna (upp till 18 m höga) förekommer längs bukten som sträcker sig från Yngsjö till Äspet och är mycket högre än sanddynerna som förekommer från Äspet till Snickarhaken (fig. 20–22). Detta beror på att sedimenttillförseln till de olika områdena skiljer sig åt över tid. Förändringar i strandlinjens lägen mellan 2007 och 2018 stödjer tidigare slutsatser att kustparallella strömmar orsakar en nettotransport av sand, både mot norr och söder, i området vid Äspet och Snickarhaken (SGU 2016, DHI 2019). Detta begränsar tillgången på sand för dynformation här. Vi antar också att sand som transporteras söderut från Äspet på havsbottnen med kustparallella strömmar ackumulerar och transporteras vidare med vind in i landet i den centrala delen av Yngsjö–Äspetbukten och bidrar till bildandet av det omfattande fältet med stora sanddyner och tillväxt av dynfoten som förekommer här.

Kustlinjen norr om Revhaken, och särskilt norr om Åhus, är utsatt för relativt låga energiförhållanden (Malmberg Persson m.fl. 2016, DHI 2018). Detta beror på att havsbottnen är grundare och gradienten utåt lägre i denna norra del av Hanöbukten (fig. 21). Dessa havsbottenförhållanden medför att vågor med hög magnitud bryter och sprider sin energi från cirka några kilometer till 100 m innan de når kusten. Detta resulterar i att kusten är relativt lågt exponerad. Den rörliga sand som interagerar mellan land och hav förekommer i ett slutet sedimentdynamiksystem i bukten norr om Åhus (fig. 21). Det faktum att denna bukt är relativt skyddad genom att vågor bryts relativt långt ut och att den glaciallera och morän som skapar de grundare förhållanden är svallad med mindre förekomst av rörlig sand, innebär att tillförseln av rörlig sand är liten till bukten. En del av den sand som tidigare förekommit på moränen och glacialleran är nu förmodligen i bukten. Den riktning för vind, vågor och bottenström som mestadels råder tillsammans med lågenergiförhållandena orsakar en kustparallell transport åt norr i området (DHI 2018). Detta kan också ses i utbredningen av rörlig sand som ökar norrut vilket indikerar en nordlig transport och ackumulation i den norra delen av bukten (fig. 21). Sanddynerna är av mindre storlek norr om Åhus. Detta kan förklaras av att mindre sand tillförs strandplanet av vågor på grund av de lägre energiförhållandena samt att kustparallelltransport av sand är liten då sedimentdynamiksystemet är slutet med en mer eller mindre obetydlig tillförsel. Detta innebär en begränsning av den sand som tillförs och finns tillgänglig på strandplanet för vinderosion och efterföljande deponering i dynfält.

Förändringarna i strandlinjens läge längs med den studerade sträckan på Skånes ostkust visar att cirka 82 % av kustlinjen har haft en tillbakagång och endast 7 % respektive 11 % har varit stabil eller vuxit mellan år 2007 och 2018 (tabell 2). Bedömningen av dynfotens läge visar att 18 % av den har ryckts tillbaka, 23 % är oförändrad och 59 % har tillvuxit (tabell 3). Längs hela den bedömda kustlinjen visar 17 % av sträckan en tillbakaryckning av dynfoten och 7 % förekommer vid Evenemangsstranden och norrut. Vid Evenemangsstranden verkar vinderosion av strandplanet vara orsaken. Strandplanet vid Evenemangsstranden i det här området påverkas genom strandfodring och störning av vegetation på grund av de olika evenemang som här hålls. Kuststräckan här är ändå vald att ta med i analysen då det i detta fall inte anses ha någon betydelse om sanden i dynerna eller på strandplanet är naturligt eller mänskligt påverkade.

Endast 10 % av den totala kustlinjen har utsatts för en lateral tillbakaryckning av stranden genom våg- och ström-erosion av dynfoten. Detta har förekommit som mest vid Äspet (6 %) men också för stranden norr om Evenemangsstranden, som har lägst exponering i studieområdet. Detta är i kontrast till dynfotens tillväxt i den södra delen av Äspet och Yngsjö-segmentet där en relativt hög exponering förekommer.

Den troliga överskattningen av strandlinjens tillbakagång från 2007 till 2018 kan bero på att ortofotografierna från 2018 och 2016 togs under dagar med relativt starka vind- och vågförhållanden. Omvänt kan tillväxten överskattas i analysen av dynfotens läge genom att delvis vegeterade begynnande sanddyner, vilka eventuellt enbart är övergående delar av stranden som kan eroderas under en framtida storm, är medtagna. Ett exempel på begynnande dyner förekommer norr om Revhaken.

Sammanfattningsvis är stranderosion längs den bedömda kuststräckan på Skånes ostkust under nuvarande förhållanden begränsad till huvudsakligen två områden; norr om Evenemangsstranden och söder om Revhaken. Erosionen precis norr om Evenemangsstranden beror på att sedimentdynamiksystemet i bukten är mer eller mindre slutet med en nettotransport norrut av tillgänglig sand. Tillförseln av sand söderifrån hindras av en naturligt grundare botten med grövre svåreroderade sediment, en muddrad ränna in till samt själva hamnen i Åhus. Detta orsakar en negativ sedimentbudget i den södra delen av bukten. Erosionen kan mildras av ett aktivt strandfodringsprogram. Vid Äspet kan stranderosionen hänföras till naturliga processer och utgöra ett hot mot bostäder. Även om erosionen i området i dagens läge är ett lokalt problem, så kan man förvänta sig att erosions- och översvämningsproblem kommer bli en mycket viktigare och mer generell fråga att lösa i framtiden.

DISKUSSION MED SLUTSATS

Kunskap om kustnära sedimentdynamik, det vill säga omfattningen av det naturliga material som eroderas, transporteras och ackumuleras i ett kustområde tillsammans med storleken på partiklarna i materialet, är en viktig del i förståelsen av pågående erosion och prognostisering av framtida erosionsrisk. Sedimentdynamiken påverkar lokalisering samt utformning av eventuella erosions- och översvämningsskydd vid en framtida havsnivåhöjning orsakad av klimatförändringar. Erosion bestäms av sättet och omfattningen som material förflyttas och sorteras från en plats till en annan. Detta innebär att ett inledande kunskapsunderlag om var det material som eroderas, transporteras och ackumuleras förekommer är avgörande för att förstå erosionsprocesserna i ett område. Underlaget erhålls genom heltäckande, sömlös geologisk kartläggning av land och havsbotten. Den jordart och det bottensediment som ur ett erosions- och sedimentdynamiskt perspektiv i Sverige är viktig att identifiera utbredning och mäktighet på är den lätteroderade, rörliga sand som förekommer i anslutning till sandstränder och som interagerar mellan land och havsbotten. Dessa sammanhängande sandskiktsutbredningar är, från den höjd på land ned till det vattendjup vind, vågor och strömmar påverkar, en del i sandstrandens sedimentdynamiska system med erosion, transport och ackumulation. Detta innebär att ett andra underlag är kunskap om förändringar i morfologi, höjd- och djupnivåer i dessa sammanhängande områden. Sandansamlingarna är oftast koncentrerade i havsbukter med olika storlekar och form beroende på geologisk miljö och exponering. Ett tredje underlag är därför den vind-, våg- och strömenergi med riktning som ett kustområde och följaktligen den kustnära sedimentdynamiken och erosionsförhållanden är utsatt för.

Dessa tre underlag tillsammans med återkommande mätningar av höjd- och vattendjupsnivåer samt volymbestämningar i sedimentdynamiksystem, morfodynamiska tillstånd och utvecklade modelleringar av sedimenttransport ger ett mycket bra verktyg i arbetet med klimatanpassning. Verktyget ger information och kunskap om erosionsrisk och översvämningsrisk och vilka åtgärder som är lämpligast att använda för olika områden. Dessutom bidrar det till ett hållbart användande eller bevarande av kustzonen ur ett miljö-, georisk- och materialförsörjningsperspektiv.

Generellt kan sägas att sandtillgången och förekomsten av den rörliga sand som är i den aktiva strandprofilen längs med Skånes sydkust är relativt liten och når bland annat inte ned till det

beräknade konvergensdjupet. Denna kunskap om förekomst och tillgång på sand bör användas vid bedömningar och modelleringar av stränders potentiella förmåga att utgöra erosion- och översvämningsskydd, sedimenttransporter samt vid erosionsprognoser.

Av dessa anledningar bör ett framtagande av de underlag samt utveckling av verktyget som beskrivits här fortsätta längs fler kustavsnitt i Sverige, med början där hotet från ett förändrat klimat med höjda havsnivåer är som störst.

REFERENSER

Birgander, J., Persson, P. & Nilsson, T. 2018: Verktyg för sandvolymer och erosionskänslighet. Länsstyrelsen 2018-04, 70 s.

Brander, R.W., 1999: Field observations on the morphodynamic evolution of a low-energy rip current system. *Marine Geology 157,* 199–217.

Brown, J., 2013: Waves, Tides and Shallow-Water Processes: Prepared by an Open University Course Team. Elsevier.

Chanson, H., 2004: *The hydraulics of open channel flow: an introduction.* Second edition. Elsevier Ltd.

Copper, J.A.G. & Pilkey, O.H., 2004: Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change 43,* 157–171.

Daniel, E., 2007: Fotodokumentation av erosionssituationen utmed den skånska sydkusten i januari 2007. *SGU-rapport 2007:34*. Sveriges geologiska undersökning, 48 s.

De Boer, A.G., 1996: The applicability of the dune-track method. Department of Physical Geography, University of Utrecht, Utrecht, The Netherlands.

DHI, 2018a: Erosionsutredning Kristianstad. DHI Sverige, 93 s.

DHI, 2018b: Kustskyddsstrategier för Kristianstads kommun: Med fokus på Äspet. Gropahålet och Evenemangsstranden. DHI Sverige, 48 s.

Ekman, M., 2007: A secular change in storm activity over the Baltic sea detected through analysis of sea level data. *Small publications in historical geophysics, No 16*.

Fredriksson, C., Almsyström, B., Hansson, H., Larsson, M., & Persson, O., 2017: Sandbehov för att motverka stranderosion utmed Skånes sydkust under perioden 2017-2100. *VATTEN – Journal of Water Management and Research 73:77–84*.

Goodfellow, B.W. & Stephenson, W.J., 2005: Beach morphodynamics in a strong-wind bay: a low-energy environment? *Marine Geology 214,* 101–116.

Goodfellow, B.W. & Stephenson, W.J., 2008: Role of infragravity energy in bar formation in a strong-wind bay: observations from Seaford Beach, Port Phillip bay, Australia. *Geographical Research 46,* 208–223.

Greenwood, B. & Sherman, D.J., 1984: Waves, currents, sediment flux and morphological response in a barred nearshore system. *Marine Geology 60,* 31–61.

Hallin, C., Almström, B., Larson, M. & Hanson, H., 2019: Longshore transport variability of beach face grain size: Implications for dune evolution. *Journal of Coastal Research, 35(4*), 751–764.

Johansson, L., 2019: Erosionstryck i Skåne på sekelskala. *SMHI Rapport Dnr: 2019/685/9.5,* sid 29.

Komar, P.D., 1998: Beach processes and sedimentation. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ.

Larson, M., Fredriksson, C. & Hanson, H., 2016: Changing wind properties in south Sweden since the days of Tycho Brahe. Vatten, 2–16.

Malmberg Persson, K., Nyberg, J., Ising, J. & Persson, M., 2014: Skånes känsliga stränder – ett geologiskt underlag för kustzons-planering och erosionsbedömning. *SGU-rapport 2014:20*. Sveriges geologiska undersökning, 30 s.

Malmberg Persson, K., Nyberg, J., Ising, J. & Rohde, L., 2016: Skånes känsliga stränder – erosionsförhållanden och geologi för samhällsplanering. *SGU-rapport 2016:17*. Sveriges geologiska undersökning, 61 s.

Malmberg Persson, K., Ising, J., Goodfellow, B.W., Magnusson, E. & Smith, C., 2019: Erosionsförhållanden längs södra Hallands kust. *SGU-rapport 2019:07*. Sveriges geologiska undersökning, 22 s.

Norrman, J. O., 1967: Strandens och kustens morfologi och de formskapande processerna. Meddelanden från Uppsala universitets geografiska institution, *Ser. A Nr 228*. Särtryck ur Ymer, Årsbok 1967.

Nyberg, J., 2016: Maringeologisk karta och beskrivning, Sydöstra Östersjön. *Sveriges geologiska undersökning K 542*.

Nyberg, J., Schoning, K., Grånäs, K., Nordström, S., Nordgren, P., Svensson, A., Lingsten, L., Hammar, L., Hemmingsson, M. & Tingström, L. 2017: Förutsättningar för utvinning av marin sand och grus i Sverige. *SGU-rapport: 2017:05*. Sveriges geologiska undersökning.

Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B. & Weyer, N. (Eds), In press. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.

Rankka, K. & Rankka, W., 2003: Mekanismer vid stranderossion. *SGI Varia 533*.

Ranasinghe, R., Callaghan, D. & Stive, M.J.F., 2012: Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule. *Climate Change 110,* 561–574.

Rijn, L.C. van, 2007: Manual sediment transport measurements in rivers, estuaries and coastal seas, Aquapublications, The Netherlands, 500 s.

Slagbrand, P. & Klingberg, F., 2015: Maringeologisk karta och beskrivning, Kriegers flak–Ystad. *K 510 Sveriges geologiska undersökning.*

Thom, B.G., Eliot, I., Harvey, N., Rissik, D., Sharples, C., Short, A.D. & Woodroffe, C.D., 2018: National sediment compartment framework for Australian coastal management. *Ocean and Coastal Management 154,* 103–120.

Wright, L.D. & Short, A.D., 1984: Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology 56,* 93–118.

Åhman, R., 1980: Stranderosion vid Löderup. *Svensk geografisk årsbok 56*, 38–46.