



LUND UNIVERSITY

Klimatanpassning av vägar i strandnära områden

Hallin, Caroline; Adell, Anna; Almström, Björn; Kroon, Aart; Larson, Magnus

2025

Document Version:

Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Hallin, C., Adell, A., Almström, B., Kroon, A., & Larson, M. (2025). *Klimatanpassning av vägar i strandnära områden*. (TVRL-Rapport; Nr 3257). Avdelningen för teknisk vattenresurshantering, Institutionen för bygg- och miljöteknologi, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet.

Total number of authors:

5

Creative Commons License:

CC BY-NC-ND

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00



LUNDS
UNIVERSITET

Klimatanpassning av vägar i strandnära områden

Caroline Hallin, Anna Adell, Björn Almström,
Aart Kroon och Magnus Larson

TVRL Rapport 3257



Klimatanpassning av vägar i strandnära områden

Caroline Hallin, Anna Adell, Björn Almström,
Aart Kroon och Magnus Larson

Copyright Författarna
Foto framsida: Caroline Hallin

TVRL-Rapport 3257
ISSN 1101-9824

Avdelningen för teknisk vattenresurshantering
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola

Datum: 2025-04-23

Den här rapporten har tagits fram inom ramen för projektet *Klimatanpassning av väg och järnväg i strandnära områden* som finansierats av Trafikverket (projekt TRV 2019/96299).

Sammanfattning

I den här rapporten ges en sammanfattning av en del av resultaten och metoderna från projektet *Klimatanpassning av väg och järnväg i strandnära områden*. Projektet har finansierats av Trafikverket och syftar till att studera klimatrisker för kustnära vägar med avseende på översvämnings- och erosionsprocesser, samt hur den riskutsatta infrastrukturen kan skyddas genom hållbara och naturanpassade metoder.

Inom projektet har modellverktyget RoadRAT utvecklats som uppskattar sannolikheten för att kustnära vägar påverkas av översvämnning, våguppspolning och erosion i dagens och framtidens klimat. RoadRAT har applicerats på kustvägen längs med Skånes sydkust. En del av den studerade vägsträckan utgörs av riksväg 9, som av Trafikverket utpekats som en av kustprocesser riskutsatt väg. Sannolikheten för påverkan av kustprocesser beräknades både i dagens klimat och för år 2050, 2100 och 2150 med hänsyn till olika framtida havsnivåhöjningsprognoser kopplade till olika utsläppsscenarier.

Resultaten visar att under nuvarande förhållanden är påverkan av kustprocesser begränsad till några hundra meter av vägen. Men i framtiden kommer flera kilometer av vägen att vara exponerad och den största påverkan väntas bero på kusterosion. Exponeringen väntas öka med tiden och är starkt beroende av utsläppen av växthusgaser och deras påverkan på havsnivån. År 2150 beräknas 47 km av den totalt 89 km långa vägsträckan att vara påverkad av en eller flera kustprocesser. 11 km av vägen beräknas att ligga under 100-årsnivån för vattenstånd och 9 km vara påverkad av 100-årsnivån av våguppspolning. 42 km av vägen beräknas antingen att vara borteroderad till följd av långsiktig erosion eller inom påverkanszonen för stormerosion med 100-års återkomsttid. Beräkningsexemplet ovan är baserat på det högsta utsläppsscenariot från IPCC, SSP-5-8.5, vilket Trafikverket utgår ifrån i sitt klimatanpassningsarbete avseende havsnivåhöjningar.

Vid någon tidpunkt i framtiden kommer höjningen av havsnivån sannolikt att tvinga fram en omlokalisering av vägen. Analysen av olika utsläppsscenarier visar dock att det är då det inte längre är möjligt att skydda vägen är osäkert och beror på samhällets förmåga att begränsa vår klimatpåverkan. Men analysen visar också att redan i ett kortare tidsperspektiv, under de kommande decennierna, kommer åtgärder att behövas för att reducera risken för skador på vägen till följd av kusterosion.

Kustskyddsåtgärder delas traditionellt in i hårda och mjuka skydd. Konstruktioner av sten och betong brukar klassificeras som hårda skydd medan lösningar med sand och vegetation betraktas som mjuka. På senare år har även naturbaserade skydd och hybridskydd (kombination av hårt och mjukt) blivit allt vanligare. Som en del i det här projektet har ett så kallat hybridkustskydd analyserats i en fallstudie. Skyddet består av en betongmur och stenskonning som kombinerats med en strandfodring för att skydda en väg i Faxeladeplats på Själlands ostkust. Genom mätningar och modellstudier har kustskyddet effektivitet, samt strandfodringens utveckling utvärderats.

Under studieperioden drabbades Faxeladeplats av stormen Babet (20-21 oktober 2023) som ledde till skador på muren och uppspolning på vägen. Strandfodringen reducerade vågpåverkan under stormen, men stenskonningens dimensionering var otillräcklig för att skydda vägen från

våguppspolning. Strandfodringen i kombination med de hårda konstruktionerna hade utformats på ett sätt som avviker från den naturliga strandlinjeformen. Redan före stormen hade hybridskyddet försvagats på grund av omfördelning av sanden längs med och ut från kusten.

Lärdomar från Faxö Ladeplats-projektet som skulle kunna överföras till Sveriges sydkust är att strandfodringen skapat positiva effekter som rekreativsmöjligheter inom området och sandackumulation nedströms skyddet. Men strandfodringen form och storlek behöver anpassas efter kustens naturliga form – inte följa vägens läge. Kontinuerlig uppföljning och underhållsfodring är nödvändig för att säkerställa att den dimensionerade skyddsnivån upprätthålls längs hela den fodrade sträckan.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Publikationer inom projektet.....	3
2	Risker för kustnära vägar.....	5
2.1	Påverkan	5
2.2	Konsekvenser	7
3	RoadRAT – riskanalysverktyg för kustnära vägar.....	8
3.1	Modellöversikt	8
3.2	Långsiktig kustlinjeutveckling.....	10
3.3	Vågor och vattenstånd	11
3.4	Översvämning.....	11
3.5	Våguppspolning.....	12
3.6	Stormerosion.....	12
3.7	Osäkerhet och framtida modellutveckling.....	13
4	Fallstudie Skånes sydkust.....	16
4.1	Risker i dagens klimat	18
4.2	Framtida risker	19
4.3	Diskussion av resultat	21
5	Kustskyddsmetoder för vägar.....	23
5.1	Kustskyddstyper.....	24
5.2	Ansvarsfördelning och lagstiftning	25
5.3	Implementering och uppföljning.....	26
6	Fallstudie av hybridkustskydd i Faxe Ladeplats.....	28
6.1	Utformning och lokala förutsättningar	29
6.2	Uppföljning.....	29
6.3	Lärdomar för svenska kusten.....	31
7	Rekommendationer	32
7.1	Användning av RoadRAT	32
7.2	Kustskydd längs Skånes sydkust.....	32

8	Författarnas tack	34
	Referenser	35

1 Inledning

Trafikverket och Sveriges kustkommuner har omfattande kustnära anläggningar av vägar som på flera platser redan idag utsätts för erosions- och översvämningsrisker. I dagsläget är det främst södra Sverige som är drabbat eftersom landhöjningen där är mindre och en stor del av kusten är låglänt och består av eroderbara jordarter. I takt med att havsnivån höjs till följd av klimatförändringar kommer dessa risker förvärras och spridas till större geografiska områden där landhöjningen på sikt inte väntas räcka till för att kompensera för den accelererande havsnivåhöjningen. Även i områden där infrastrukturen inte är belägen på eroderbar mark kommer förekomsten av vågor och strömmande vatten som översvämmar och underminerar vägkroppar att öka med stigande havsnivåer.

I ett examensarbete vid Lunds universitet undersöktes översvämningsrisk för Trafikverkets anläggningar i Skåne utifrån extrema havsnivåer i dagens klimat och med hänsyn till långsiktig påverkan av havsnivåhöjningen (Arnesten, 2019). Resultatet visade att en stor andel av vägar och järnvägar i Skånes kustkommuner ligger inom riskområden för översvämnning. Skånes sydkust är särskilt utsatt; andelen vägar och järnvägar belägna under 5 m över dagens havsmedelnivå är 18%, 27%, 5% respektive 20% för sydkustkommunerna Vellinge, Trelleborg, Skurup och Ystad.

Men i kustnära områden är det inte bara en förhöjd stillvattenyta som kan orsaka problem. Även kusterosion och vågverkan på vägen behöver inkluderas i klimat- och sårbarhetsanalyser för kustnära vägar. När havet stiger ökar sannolikheten för översvämnning och vågverkan på vägar. Vidare orsakar havsnivåhöjningen långsiktiga förändringar av kustlinjen som medför att kustnära vägars exponering ökar men kan också leda till underminering av vägkroppen. Ofta uppstår skadorna i samband med stormar vid så kallad stormerosion. Stormerosionen kan i vissa fall repareras genom återuppbyggnad av naturliga sedimenttransportprocesser. Men de vägar som är belägna inom den dynamiska zonen för erosion och återuppbyggnad riskerar att skadas.

Erosion, översvämnningar och våguppspolning kan leda till såväl tillfälliga driftstörningar som permanenta skador på vägar. För att minska påverkan kan det befintliga vägnätet behöva skyddas med olika kustskyddsmetoder och på sikt kan vägar behöva omlokaliseras bort från riskutsatta områden. Vid omlokalisering eller anläggning av ny infrastruktur fordras grundliga analyser av klimatrisker. En ökande andel av den befintliga infrastrukturen kommer att behöva skyddas. För detta arbete behövs kunskap om lokala våg- och strömningsförhållanden, sedimentdynamik, kustens långsiktiga utveckling, framtida klimateffekter, samt direkta och indirekta effekter av olika skyddsåtgärder.

Enligt Förordning (2018:1428) om myndigheters klimatanpassningsarbete är Trafikverket skyldiga att arbeta med klimatanpassning av sin verksamhet. Trafikverket har en klimatanpassningsstrategi som innebär att Trafikverket ska anpassa nybyggnader och ombyggnader till nuvarande och framtida klimat samt inventera och värdera riskpunkter och risksträckor i befintliga väg- och järnvägsanläggningar (Trafikverket, 2018). Enligt strategin ska ”*klimatrelaterade risker*

identifieras, analyseras och reduceras fortlöpande som en del i underhåll, nybyggnad och ombyggnad av vägar och järnvägar”.

I sin klimat- och sårbarhetsanalys från 2019 (Trafikverket, 2020) definierar Trafikverket risk som ett kombinerat mått på sannolikheten för en negativ händelsetyp eller förhållande samt dess konsekvenser. Rapporten slår fast att påverkan av havsnivåhöjning och stormfloder kommer att öka i framtiden och drabba södra Sverige särskilt hårt. Riksväg 9 som löper längs den skånska sydkusten pekas ut som en särskilt riskutsatt vägsträcka. I utredningens diskussion anges att framtida klimat- och sårbarhetsanalyser i högre grad behöver baseras på detaljerade regionala och lokala analyser.

I dagsläget saknas detaljerad kunskap om kustprocesser för större delen av Sveriges kust. De analyser som har gjorts av svenska myndigheter och kommuner har främst studerat risker på en översiktlig nivå (Malmberg Persson et al., 2016; Nerheim et al., 2017; Simonsson et al., 2017). Analyserna bygger ofta på förenklade koncept, till exempel statistiska analyser av extremvattenstånd och framtida havsnivåhöjningar (Johnsson & Balstrøm, 2021). Den här typen av analyser kan ge en regional överblick, men riskerar att underskatta erosions- och översvämningsriskerna på lokal nivå. Till exempel kan dynamiska processer som våguppspolning lokalt leda till att större områden översvämmas än vad en analys av stillvattennivån visar (EurOtop, 2018). Vågverkan mot väg- och järnvägsroppar kan även leda till urgröpning av material som orsakar underminering (Nasr, Björnsson, et al., 2019; Nasr, Kjellström, et al., 2019). Kunskap om de lokala hydrodynamiska förhållandena och sedimenttransportprocesserna är även nödvändig för en korrekt dimensionering av kustskydd och för att undvika negativa effekter på omkringliggande kustavsnitt.

För olika syften fordras analyser av olika detaljeringsgrad. På en övergripande planeringsnivå bör havsnivåhöjning i kombination med extrema vattenstånds- och vågförhållanden ligga till grund för riskanalyser. I områden med eroderbara kuster bör även kustens framtida utveckling inkluderas i analysen eftersom kusterosion kan utgöra ett direkt hot mot infrastruktur. Kustens morfologiska utveckling leder även till förändringar av kustnära anläggningars exponering för höga vattenstånd och vågverkan, vilket bör beaktas i långsiktiga analyser.

För att stödja Trafikverket i sitt klimatanpassningsarbete har forskare från Lunds Tekniska Högskola (LTH) i samarbete med Köpenhamns universitet utvecklat ett verktyg för analys av påverkan av kustprocesser kustnära vägar och järnvägar. Verktyget har döpts till RoadRAT (Risk Assessment Tool for coastal Roads) och baseras på internationellt vedertagna metoder. Metodiken har anpassats för att kunna appliceras med tillgängliga data från Sveriges kuster. Riksväg 9 längs den skånska sydkusten har valts som studieområde då den av Trafikverket har identifierats som särskilt utsatt. Eftersom vågdata med tillräcklig upplösning i rum och tid saknas, har även dessa tagits fram inom ramen för projektet. Vidare har en kustskyddsåtgärd längs en väg i Faxe Ladeplats i Danmark som bedöms vara lämplig för att skydda vägar längs den skånska kusten följts upp och studerats under projektets gång. Kustskyddet är ett så kallat hybridkustskydd som kombinerar en hård konstruktion med en strandfodring.

Projektets resultat har kontinuerligt rapporterats i artiklar, rapporter och en doktorsavhandling. Föreliggande rapport syftar till att tillgängliggöra en del av resultaten på svenska för Trafikverket och andra intressenter.

Rapporten fokuserar på:

- en översiktlig beskrivning av risker för kustnära vägar i Sverige,
- verktyget för påverkansanalys – RoadRAT - som utvecklats inom projektet,
- identifierad påverkan längs den studerade vägsträckan på Skånes sydkust,
- en översikt av lämpliga kustskydd och specifikt en fallstudie av ett hybridkustskydd, samt
- information om planering, implementering och uppföljning av kustskydd ur ett svenskt perspektiv.

1.1 Publikationer inom projektet

Följande publikation presenterar resultat som helt eller delvis tagits fram inom projektet (omvänd kronologisk ordning):

Doktorsavhandling:

Adell A. (2025). *Flooding and erosion of coastal roads – exposure, mitigation and climate change impact*. Doktorsavhandling vid avdelningen för Teknisk Vattenresurslära. ISSN 1101-9824, Rapport TVVR 1102

Vetenskapliga artiklar:

Hallin, C., Adell, A., Almström, B., Kroon, A., Larson, M. (2025) *RoadRAT – a new framework to assess the probability of flooding, wave runup, and erosion impacting coastal roads*. Coastal Engineering 199 (2025) 104741. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2025.104741>

Adell A., Van Wiechen, P., Luetzenburg, G., Almström, B., Kroon, A. and Hallin, C. *Performance of hybrid coastal protection in extreme storm conditions*. (Inskickad)

Bokhari Irminger, S., Adell, A., Karlsson, M., Schöld, S. and Magnusson, Å. (2024) *Impact and response of storm Babet in a Swedish perspective*. Die Küste. (Inskickad)

Adell, A., Kroon, A., Almström, B., Larson, M. and Hallin, C. (2024) *Observed beach nourishment development in a shallow embayment*. Geomorphology. 462, 109324. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109324>

Sukchaiwan, E., Adell, A., Hallin, C., Almström, B. (2024) *Analysis of the wave conditions during the 1872 storm*. VATTEN – Journal of Water Management and Research. 80 (3), 142-151. Tillgänglig: <https://www.tidskriftenvatten.se/wp-content/uploads/2024/10/Artikel-4-2024-3.pdf>

Adell, A., Almström, B., Kroon, A., Larson, M., B Uvo, C., & Hallin, C. (2023). *Spatial and temporal wave climate variability along the south coast of Sweden during 1959–2021*. Regional Studies in Marine Science, 63, Article 103011. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352485523002001?via%3Dihub>

Adell, A., Nunes de Brito Junior, A., Almström, B., Goodfellow, B., Bokhari Irminger, S., Hallin, C., Nyberg, J. (2021) *Open-access portal with hindcast wave data for Skåne and Halland*. VATTEN – Journal of Water Management and Research 77(2), 81-90 Tillgänglig: https://www.tidskriftenvatten.se/wp-content/uploads/2021/06/VATTEN_21_2_81-90.pdf

Examensarbeten:

Sukchaiwan, E. (2023) Dune Erosion on the Falsterbo Peninsula: Assessing the Dune System for Coastal Safety in Regions with Complex Interactions Between Waves and Water levels. Master Thesis Delft University of Technology Tillgänglig: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f392d303-dc5c-49ee-ae6c-ae9c40bd92d3>

Berin, I. and Jacobsson Löwdin, J. (2022) Longshore Sediment Transport Along the Coast of Ystad Municipality. Master Thesis TVVR22/5015 Division of Water Resources Engineering Tillgänglig: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9096094>

van Houwelingen, C. and Ley, T (2021) Wave Damping by Vegetation at Bunkeflo Salt Meadows - Applying an empirical model based on plant biomass. Master Thesis TVVR21/5017 Division of Water Resources Engineering Tillgänglig: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9062592>

Olsson, E. and Engström, S. (2021) Coastal Response to Sea Level Rise in Ystad Municipality - Development, comparison and application of Bruun Rule-based methods. Master Thesis TVVR21/5016 Division of Water Resources Engineering Tillgänglig: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9060526>

Konferensartiklar:

Hallin, C., Adell, A., Almström B., *ROAD-RAT - Regional risk assessment tool for coastal roads in a changing climate*. Proceedings of the Coastal Dynamics Conference 2025 (Manus)

Adell, A., Kroon, A., Almström, B., Larson, M., and Hallin, C. (2023) *Morphological development of a small-scale beach nourishment in a non-tidal area*. Proceedings of the 10th International Conference on Coastal Sediments. World Scientific Publishing.

Adell A., Almström B., Kroon A., Larson M. and Hallin C. (2023) *Multi-scale wave modelling; Field validation in Faxe Bay, Denmark*. Coastal Engineering Proceedings, 37. ASCE publishing.

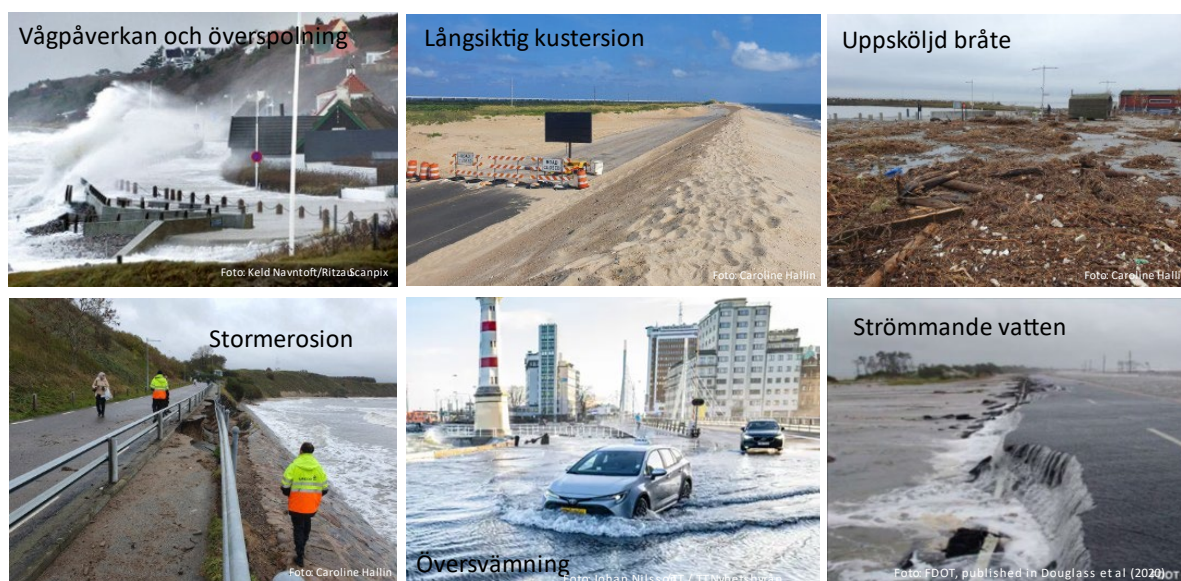
2 Risker för kustnära vägar

Risk definieras ofta som en funktion av påverkan och konsekvenser, till exempel påverkan från översvämning med konsekvens att vägen inte är farbar. Kustnära vägar kan vara exponerade för samma typer av risker som vägar i inlandet såsom skred, översvämning till följd av skyfall och höga flöden i vattendrag. Men därutöver finns ett antal risker som är specifika för kustområden, och det är de riskerna som projektet har fokuserat på. Dessa risker är kopplade till höga vattenstånd i havet, påverkan av vågor och kustmorfologiska förändringar.

2.1 Påverkan

Påverkan på kustnära vägar kan vara olika i olika typer av kustområden. Douglass & Webb (2020) listar möjlig påverkan av kustprocesser för vägar ur ett amerikanskt perspektiv. Många av dessa är relevanta även för Sveriges kuster. Exempel på möjlig påverkan i Sverige är:

- Översvämning till följd av tillfälliga högvatten (stormfloder)
- Översvämning till följd av kombinerade effekter av avrinning och höga vattenstånd
- Höga strömhastigheter i samband med översvämningar
- Lokal erosion till följd av strömmande vatten
- Våguppspolning på vägar
- Uppsköljd bråte (*debris*) på vägen
- Uppsköljd sand på vägen
- Underminering av vägen till följd av långsiktig kustutveckling
- Underminering av vägen till följd av stormerosion
- Erosion och uppspolning på grund av fartygsvågor



Figur 1 Exempel på olika typer av påverkan på kustnära vägar.

I Figur 1 visas exempel på olika typer av påverkan på kustnära vägar. Vägens exponering för de olika typerna av påverkan beror på lokala våg- och vattenståndsförhållanden, geologi, topografi och

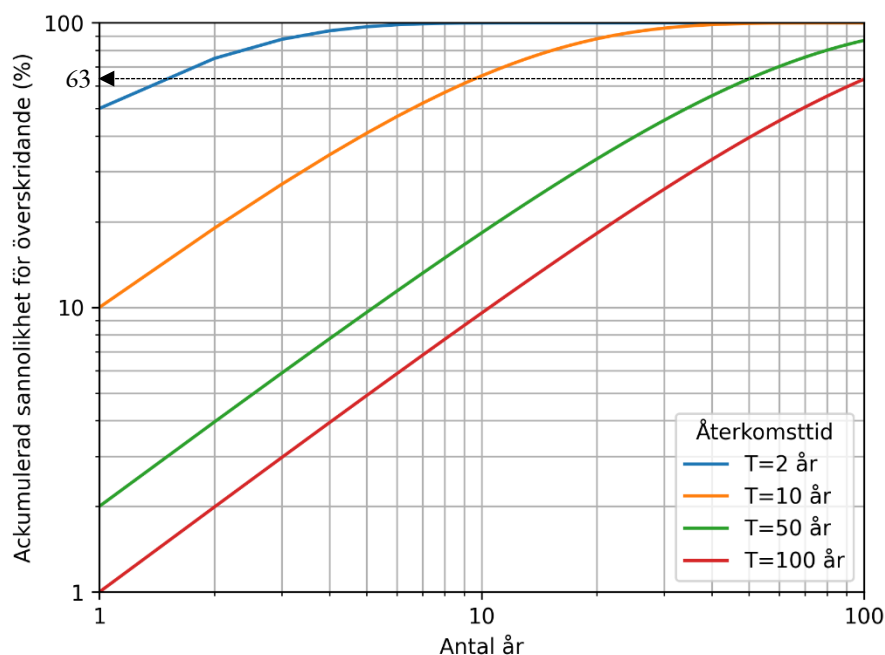
flödesvägar i ledningsnät och terräng. Vägar längs kuster med hård berggrund påverkas till exempel inte av stranderosion. Ett annat exempel är att vägar som exponeras för vågor kan översvämmas även om de är belägna över stillvattenytan.

Gemensamt för samtliga typer av påverkan är att de förvärras till följd av stigande havsnivåer. De kan även förvärras till följd av andra klimatförändringar, såsom förändringar av nederbördsmönster, avrinning, vindstyrka och vindriktning.

I det här projektet har riskanalysen för kustnära vägar avgränsats till att analysera sannolikheten för att vägar påverkas av översvämning till följd av stormfloder, våguppspolning eller erosion till följd av långsiktiga kustlinjeförändringar och stormerosion. Dessa fyra processer driver samtliga typer av påverkan som listats ovan förutom de som kopplas till avrinning och fartygsvågor. Metoder för att analysera påverkan av fartygsvågor och den kombinerade effekten av höga vattenstånd och flöden har behandlats inom tidigare projekt vid LTH som delfinansierats av Trafikverket (Almström, 2022; Inamdeen & Larson, 2024).

Huruvida en väg påverkas av en kustprocesser kan uttryckas i termer av exponering. Ett sätt att kvantifiera exponeringen är att beräkna sannolikheten för att vägen påverkas. Det görs typiskt i termer av återkomsttid eller sannolikhet för överskridande. Återkomsttid (T) och årlig sannolikhet för överskridande (p) förhåller sig till varandra enligt $T=1/p$. Som exempel kan vi ta en stormflödsnivå med 100-års återkomsttid. Om vi hade haft en extremt lång tidsserie på flera tusen år, skulle den genomsnittliga tiden mellan överskridande av 100-årsnivån vara 100 år. Men eftersom händelserna antas vara oberoende så innebär det inte att det går 100 år mellan överskridandena. Den årliga sannolikheten för överskridande är 1% oavsett om det 100-årsnivån senast överskreds förra året eller för 200 år sedan.

För att undvika det här vanliga missförståndet används istället ”årlig sannolikhet för överskridande” allt oftare i riskkommunikation. Problemet är bara att även den årliga sannolikheten kan missförstås ifall inte den ackumulerade sannolikheten över tid beaktas. Sannolikheten för överskridande under n år definieras som $P_n=1-(1-1/T)^n$. Som exempel kan nämnas att sannolikheten för att 100-årsnivån överskrids under en period av 100 år är 63%. I Figur 2 illustreras den ackumulerade sannolikheten över tid för de återkomsttider som senare används för att presentera resultat från RoadRAT analysen.



Figur 2 Illustration av hur sannolikheten för överskridande ackumuleras med tiden, till exempel under en vägs tekniska livslängd. Diagrammets axlar är logaritmiska. Den streckade linjen visar hur diagrammet avläses för exempelvis den ackumulerade sannolikheten för överskridandet av en 100-årsnivå under en tidsperiod av 100 år.

2.2 Konsekvenser

Konsekvenserna av påverkan från kustprocesser kan vara skador på vägen, permanenta eller tillfälliga driftstörningar samt skador på fordon och trafikanter. Det här projektet har fokuserat på sannolikheten för påverkan och inte på dess konsekvenser. Men översiktligt kan de processer som analyseras – stormfloder, våguppspolning eller erosion till följd av långsiktiga kustlinjeförändringar och stormerosion – ge upphov till följande konsekvenser:

- Skador på vägar till följd av underminering
- Skador på beläggning
- Skador på trafikanter och fordon till följd av våguppspolning
- Skador på fordon och drunkningsolyckor till följd av översvämning
- Driftstörningar som gör att vägen behöver stängas helt eller delvis, temporärt eller permanent
- Minskad framkomlighet på grund av reducerad hastighet vid vatten på vägbanan
- Minskad framkomlighet på grund av uppspolad bråte eller sand på vägbanan

Konsekvensernas omfattning beror delvis av hur ofta och länge som störningar uppstår, hur trafikerad vägen är och möjligheter till omledning. Särskilt sårbara är vägar där det saknas alternativa färdvägar och där störningarna påverkar tillgänglighet för evakuering och räddningstjänst.

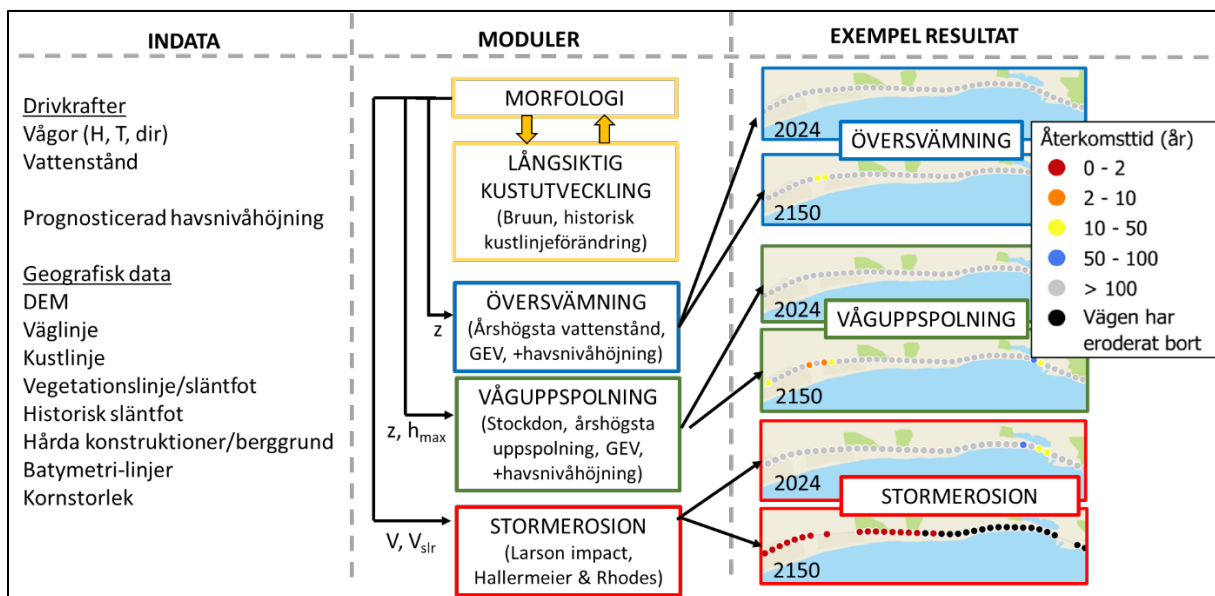
Kostnaderna av konsekvenserna utgörs huvudsakligen av förseningar och reparationskostnader (Douglass & Webb, 2020). Därutöver tillkommer kostnader för klimatanpassningsåtgärder, såsom kustskydd och omlokalisering av kustnära vägar. På längre sikt påverkas även konsekvenserna av framtida utveckling av trafikflöden och transportmönster.

3 RoadRAT – riskanalysverktyg för kustnära vägar

Inom ramen för projektet har ett analysverktyg, RoadRAT, utvecklats för att beräkna sannolikheten att en vägsträcka påverkas av erosion, våguppspolning eller översvämning (Hallin et al., 2025). RoadRAT är en akronym för Risk Assessment Tool for coastal Roads. Syftet är att analysera riskexponeringen på regional nivå (vägsträckor >100 km) både i dagens förhållande och för olika år och klimatförändringsscenarier i framtiden. Verktöget är utformat för att kunna köras med data som finns öppet tillgängliga i Sverige.

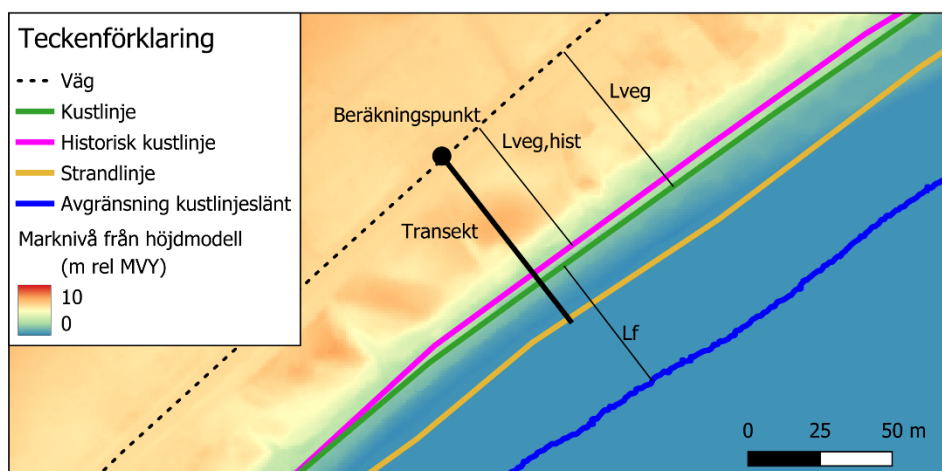
3.1 Modellöversikt

RoadRAT är uppbyggd i moduler (Figur 3). Modellstrukturen fungerar som ett ramverk inom vilket modulerna kan utvecklas i takt med kunskapsutvecklingen och anpassas efter specifika geografiska förutsättningar. Merparten av modellens indata (Figur 3) finns tillgänglig som öppen data från Lantmäteriet eller Kustdataportalen (SGI, u.å.-b). Detaljerad batymetri och digitaliserade vegetationslinjer finns tillgängliga för delar av södra Sverige och tillhandahålls av Sveriges geologiska undersökning (SGU).

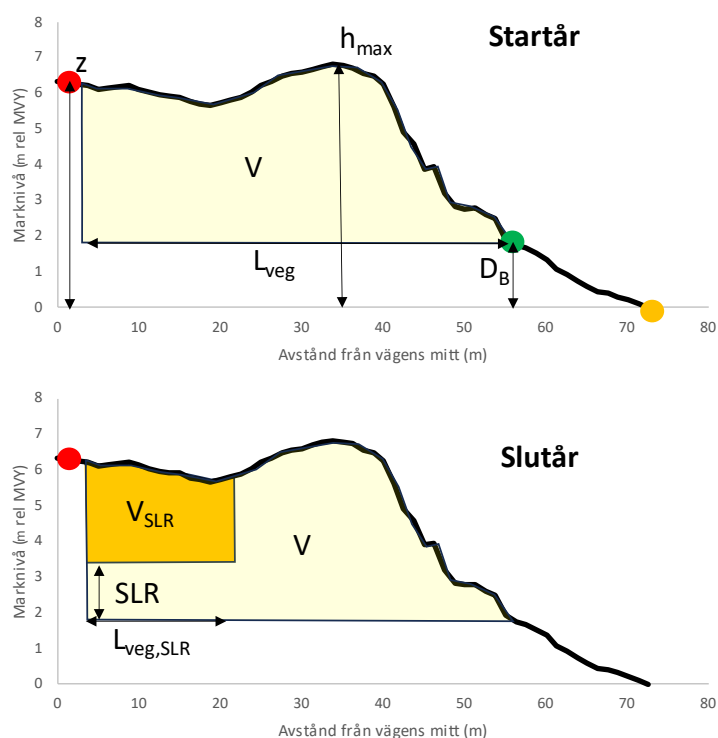


Figur 3 Modellstruktur RoadRAT med en sammanfattning av indata, moduler och deras innehåll, samt ett exempel på hur resultaten kan presenteras för åren 2024 och 2150. De morfologiska parametrar som används i analysen är z = vägnivå, h_{max} = maximal nivå mellan väg och hav, V = volym skyddande material mellan strand och väg, och V_{slr} = volym skyddande material mellan strand och väg i framtida scenarier.

I Figur 4 och Figur 5 visas hur kusten schematiseras utifrån geografiska data, samt hur den långsiktiga kustutvecklingen påverkar morfologin och volymen skyddande material mellan stranden och vägen.



Figur 4 Illustration av geografiska indata och längdmått som genereras i RoadRAT. Den heldragna svarta linjen är en transekt vinkelrät mot kustlinjen som används för att visa morfologiska parametrar i Figur 5. © Lantmäteriet.



Figur 5 Exempel på transekter och definitioner av några morfologiska parametrar i RoadRAT. Transekten motsvarar den heldragna svarta linjen i Figur 4. Den röda punkten anger vägens läge, den gröna punkten kustlinjen (gränsen mellan dyn/slänt och strand) och den gula punkten strandlinjen (transekts skärningspunkt med medelvattennivån). V är volymen skyddande material mellan kustlinjen och vägen vid analysens startår, V_{SLR} är motsvarande volym vid analysens slutår. L_{veg} är det horisontella avståndet mellan vägen och kustlinjen, $L_{veg,SLR}$ är motsvarande avstånd vid analysens slutår. SLR är havsnivåhöjningen, z är vägens marknivå, h_{max} den maximala marknivån mellan vägen och kustlinjen, och D_B är marknivån vid dyn- eller släntfoten. Den övre figuren visar morfologin under startåret för analysen och den nedre figuren visar förändringen av volymen skyddande material fram till analysens slutår.

3.2 Långsiktig kustlinjeutveckling

Beräkningen av kustens långsiktiga utveckling bygger på antaganden om att den historiska trenden för kustlinjeutveckling kommer att fortsätta i framtiden (Fraser et al., 2017) och att effekten av havsnivåhöjningen kan representeras med Bruuns lag (Bruun, 1954, 1962).

Det framtida avståndet från vägen till kusten, $L_{veg,slr}$, beräknas enligt ett tillvägagångssätt liknande det som presenteras i Anderson et al. (2015):

$$L_{veg,slr} = L_{veg} - R - \left(\frac{L_{veg,hist} - L_{veg}}{Y_{base} - Y_{hist}} \right) (Y_{target} - Y_{base}) \quad (1)$$

där R är kustlinjens tillbakadragning på grund av Bruuns lag, Y_{base} är startåret för analysen, Y_{target} är slutåret för analysen och Y_{hist} är året då den historiska observationen gjordes. Om kustlinjen har varit påverkad av havsnivåförändringar under perioden mellan Y_{hist} och Y_{base} , kan Bruuns lag tillämpas retroaktivt på $L_{veg,hist}$ för att subtrahera effekten av havsnivåförändringen från den historiska observerade kustlinjeförändringen.

Kustlinjens tillbakadragning till följd av Bruuns lag (Bruun, 1962) beräknas som,

$$R = \frac{SLR \cdot L_{Dean}}{D_C} \quad (2)$$

där D_C är konvergensdjupet, och L_{Dean} är den aktiva profilens bredd från strandlinjen till konvergensdjupet. Konvergensdjupet, D_C , beräknas med Hallermeiers formel (Hallermeier, 1978),

$$D_C = 2.28 H_{m0,12h/y} - 68.5 \frac{H_{m0,12/y}^2}{g T_{p,12/y}^2} \quad (3)$$

där $H_{m0,12h/y}$ är den spektrala signifikanta våghöjden som överskrider 12 timmar per år, och $T_{p,12h/y}$ är motsvarande peak-period. D_C definieras som genomsnittet av alla D_C som beräknas för samtliga år i vågtidsserien. Vågorna extraheras strax utanför det största brottdjupet och omvandlas till motsvarande våghöjder på djupt vatten genom en omvänd beräkning av uppgrundningseffekten.

L_{Dean} beräknas enligt jämviktsprofilkonceptet (Dean, 1977),

$$L_{Dean} = \left(\frac{D_C}{A} \right)^{3/2} \quad (4)$$

där A definieras som (Kriebel et al., 1991),

$$A = 2.25 w_s^{1/3} \quad (5)$$

Sedimentationshastigheten definieras som (Soulsby, 1997),

$$w_s = \frac{\nu}{D_{50}} \left(\sqrt{10.36^2 + 1.049 D_*^3} - 10.36 \right) \quad (6)$$

med den kinematiska viskositeten, ν , mediankornstorleken, D_{50} , och en dimensionslös kornstorlek, D_* , definierad som,

$$D_* = \left(\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right)^{1/3} D_{50} \quad (7)$$

där s är den specifika densiteten och g är tyngdaccelerationen.

3.3 Vågor och vattenstånd

För att ta hänsyn till vågtransformation nära kusten extraheras vågdatan från vågmodellen på ett djup strax utanför det största brottdjupet. Vågorna propageras mot kusten med hjälp av en så kallad direkt formel för att erhålla våghöjden och riktningen vid begynnande vågbrott (Larson et al., 2010). Sedan beräknas motsvarande våghöjd på djupt vatten, den så kallade ekvivalenta djupvattenvågen, genom en omvänd uppgrundsberäkning. Vågperioden antas vara konstant.

I våguppspolnings- och erosionsekvationerna tas endast hänsyn till den del av vågenergin, H'_{in} , (Hanson & Larson, 2008) som är vinkelrät mot kusten. Den ekvivalenta våghöjden på djupt vatten, H' , modifieras enligt,

$$H'_{in} = H' \sqrt{\cos(\alpha_b)} \quad (8)$$

där α_b är vinkeln mot en normal från kustlinjen vid vågbrott.

3.4 Översvämning

Sannolikheten för översvämning av vägen definieras som sannolikheten för att stillvattenytan överstiger vägens nivå, z . En generaliserad extremvärdesfördelning (GEV) anpassas till årliga maxima från tidsserien av vattenstånd (SWL). De årliga maxima, M_n , rankas så att den högsta vattennivån rankas som 1, $R=1$, och den lägsta nivån rankas som N , $R=N$. Sannolikheten för överskridande beräknas som $p=R/(N+1)$. GEV är en kumulativ fördelning som beskriver sannolikheten för icke-överskridande, $G(x)=\Pr\{M_n \leq x\}=1-p$,

$$G(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (9)$$

där μ är en lägesparameter, σ en skalparameter och ξ en formparameter.

Återkomstnivån, x_p , för en specifik sannolikhet, p , beräknas som,

$$x_p = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \{-\ln(1-p)\}^{-\xi} \right] \quad (10)$$

Sannolikheten för att stillvattenytan ska överskrida vägens nivå, z , erhålls genom att sätta $x_p=z$ och lösa ut p ur ekvation 10.

Sannolikheten för översvämning under slutåret beräknas genom att lägga till den prognosticerade havsnivåhöjningen till lägesparametern, μ .

3.5 Våguppspolning

Våguppspolning beräknas med hjälp av Stockdons ekvationer (Stockdon et al., 2006),

$$R_{u2\%} = 0.043\sqrt{H'_{in}L_0} \text{ for } \xi < 0.3 \quad (11)$$

och,

$$R_{u2\%} = 1.1 \left(0.35\beta_f\sqrt{H'_{in}L_0} + \frac{\sqrt{H'_{in}L_0(0.563\beta_f^2+0.004)}}{2} \right) \text{ for } \xi > 0.3 \quad (12)$$

där L_0 våglängden av djupvattenvågen och ξ , är Irribaren-talet,

$$\xi = \beta_f / \sqrt{H'_{in}/L_0} \quad (13)$$

I RoadRAT definieras kustlinjeslätans lutning, β_f , som den representativa lutningen under extrema våguppspolningsförhållanden. Kustlinjen utgör gränsen mot land. Gränsen mot havet definieras av en bottenkonturlinje som representerar strandlinjeslätans yttre gräns, D_F (Figur 4). β_f beräknas från,

$$\beta_f = \frac{D_B + D_F}{L_F} \quad (14)$$

Den totala uppspolningsnivån inkluderar både våguppspolningen och den simultana stillvattenytan,

$$TWL = SWL + R_{u2\%} \quad (15)$$

En GEV fördelning (ekv 9) anpassas till årsmaxima av TWL , och sannolikheten för att våguppspolningen når vägen beräknas genom att sätta x_p (ekv 10) till det högsta värdet av vägens nivå, z , och den maximala marknivån mellan vägen och havet, h_{max} .

3.6 Stormerosion

Stormerosion beräknas med Larsons *impact formula* (Larson et al., 2004). Larsons *impact formula* är känslig för definitionen av nivån av dyn- eller slänthöjden. För att erhålla en stabil och generisk metod som kan automatiseras över stora rumsliga skalor definieras fotnivån som den totala uppspolningsnivån med 10 års återkomsttid, TWL_{10y} (Pellón et al., 2020).

$$q_D = 4C_S \frac{(R' + SWL - TWL_{10y})^2}{T} \quad (16)$$

där C_S är en kalibreringsparameter. Den årliga stormerosionen erhålls genom att summera volymen av sedimenttransporten, q_D , från dynen under varje år. R' är en modifierad våguppspolning baserad på den våguppspolning som beräknats med ekvationen av Larson et al. (2004),

$$R = 0.158 \sqrt{H_{rms} L_0} \quad (17)$$

där H_{rms} definieras som $H_{rms} = 0.707 H'_{in}$.

Våguppspolningen reduceras för att ta hänsyn till friktionsförluster över stranden (Hanson et al., 2010),

$$R' = R \cdot \exp(-2 \cdot c_f \cdot x_t) + (D_b - SWL) \cdot (1 - \exp(-2 \cdot c_f \cdot x_t)) \quad (18)$$

där c_f är en friktionskoefficient och x_t är den sträcka som vågen spolar upp över. x_t definieras som det horisontella avståndet mellan skärningspunkten mellan transekten och stillvattenytan samt dyn- eller slänthöjden. Dyn- eller slänthöjden definieras initialt vid varje stormhändelse som kustlinjens läge och rör sig sedan bakåt under sekventiella tidssteg med erosionspåverkan. Kustlinjens tillbakagång schematiseras som den eroderade volymen dividerad med den genomsnittliga markhöjden mellan kustlinjen och vägen. Om marken mellan kustlinjen och vägen är väldigt låglänt, i genomsnitt lägre än 0,2 m över dyn/slänthöjden, sätts $x_t = L_{veg}$.

Fördelningen av den resulterande årliga erosionen erhålls genom att anpassa Hallermeier & Rhodes (1988) ekvation till den beräknade årliga erosionen,

$$V_{er} = cT^{0.4} \quad (19)$$

där c är en anpassningskoefficient och T är återkomsttiden, $T=1/p$. Sannolikheten för att stormerosion påverkar vägen erhålls genom att sätta V_{er} lika med den tillgängliga sedimentvolymen mellan kustlinjen och vägen, V och V_{slr} , och lösa ut p .

3.7 Osäkerhet och framtida modellutveckling

Enligt Kaplan and Garrick (1981) ska en riskanalys svara på frågorna: Vad kan hända? Hur troligt är det att det händer? Och vad får det för konsekvenser om det händer? RoadRAT svarar på frågan om sannolikhet, men de studerade processerna och lämpliga metoderna kan variera mellan olika kustområden och med olika kusttypologier. Den version av RoadRAT som presenteras i den här rapporten har utformats utifrån förutsättningarna längs Skånes sydkust. Men den modulära strukturen av verktyget gör att det kan byggas ut eller förändras utifrån behov. Beroende på vilken kusttyp och geografiskt område som RoadRAT tillämpas på kan vissa ändringar eller tillägg av processbeskrivningar behöva göras.

I fallstudieområdet längs Skånes sydkust består kusten av sand- och grusstränder, där Stockdons uppspolningsekvationer (Stockdon et al., 2006) är tillämpliga. När det gäller grusstränder eller hårda konstruktioner skulle andra uppspolningsekvationer härledda för sådana förhållanden (e.g., EurOtop, 2018; Poate et al., 2016) kunna implementeras i RoadRAT.

Implementeringen av Bruuns lag för att ta hänsyn till strandlinjens tillbakagång på grund av havsnivåhöjningen kan också anpassas för att ta hänsyn till variationer i den lokala topografin och geologin (McCarroll et al., 2021). Till exempel, för stränder med bakomliggande klintar, skulle ett tillvägagångssätt likt det som presenteras av Wolinsky and Murray (2009) kunna övervägas. Inom projektet SISLER som utförs i samarbete mellan LTH, SGU och SGI pågår det för tillfället en utveckling av mer komplexa metoder för att beskriva kustlinjeförändringar till följd av havsnivåhöjningen för olika typer av geologi. Resultaten av det projektet kan förhoppningsvis implementeras i RoadRAT och bidra till att öka precisionen i beräkningen av den långsiktiga kustlinjeförändringen.

Det finns dock osäkerheter relaterade till framtidsprediktioner som är svårare att komma tillrätta med. Antagandet att den historiska kustlinjens utveckling kan projiceras in i framtiden bortser från effekten av omorientering av kustlinjen, tidsmässiga variationer i vågklimatet och förändringar i kustlinjens eroderbarhet, t.ex. genom att hårda kustskydd implementeras (Hanson et al., 2003). Samtidigt är det svårt att hitta alternativa analysmetoder som inte samtidigt introducerar nya osäkerheter och gör resultaten mer svårtolkade.

Ett viktigt antagande i modellen är att framtida sannolikheter bedöms utifrån historiska våg- och vattenståndsdata och endast tar hänsyn till klimateffekterna avseende stigande havsnivåer. Men stormfloder och vågklimat kommer sannolikt också att påverkas av klimatförändringarna (Mentaschi et al., 2017; Soomere, 2023) och i södra Östersjön finns mellanårsvariationer i vågklimat som temporärt kan påverka både kustlinjens utveckling och sannolikheten för översvämningar (Adell et al., 2023; Larson et al., 2016). I framtida tillämpningar kan klimatförändringarnas inverkan på våg- och vindklimatet simuleras genom att köra RoadRAT med syntetiska tidsserier (Anderson et al., 2019). Detta fordrar dock prognoser för framtida utveckling av våg- och vindklimatet, vilket idag saknas.

I studien av Adell et al (2023) påvisades korrelation mellan magnitud och riktning av årlig summerad vågenergi och North Atlantic Oscillation (NAO) indexet för vintermånaderna december till mars. NAO-indexet beskriver skillnader i atmosfärstryck över Norra Atlanten under en viss tidsperiod och påverkar bland annat vindstyrka och vindriktning över norra Europa (Hurrell, 1995). Det har visats att extremhändelser i Östersjöområdet är relaterade till storskalig atmosfärisk cirkulation, som NAO, men det finns stora kunskapsluckor kring hur dessa system kan komma att påverkas i ett varmare klimat (Rutgersson et al., 2022).

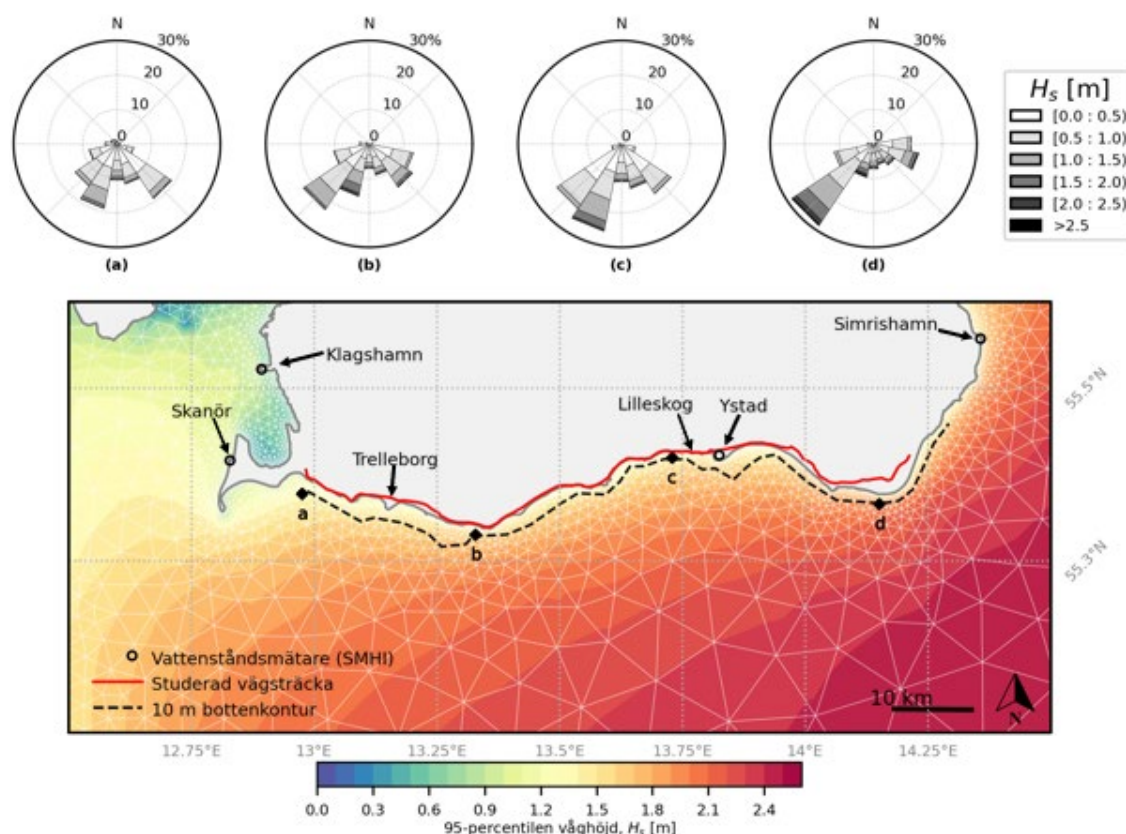
RoadRAT beräknar sannolikheten för påverkan, vilket bara är en del av analysen (Viavattene et al., 2018). Störningar, potentiella kaskadeffekter och relaterade kostnader behöver också studeras för att fullt ut förstå systemets sårbarheter (Ricciardi et al., 2024). Resultaten från RoadRAT skulle kunna användas som indata till andra modeller som beskriver konsekvenserna (e.g., He et al., 2024)

eller påverkan på vägens farbarhet (e.g., Pregolato et al., 2017). Det har gjorts en del studier på hur trafik och säkerhet påverkas av översvämningar och våguppspolning. Gränser för vilken våguppspolning som kan tolereras med avseende på säkerhet finns beskrivna i Eurotop-manualen (EurOtop, 2018) och påverkan av vattendjup på trafik finns beskrivet i Pregolato et al. (2017).

Tvärvetenskapliga studier med kustingenjörer, riskingenjörer och vägförvaltare behövs för att förstå och tolka de osäkerheter som är relaterade till kustprocesser och för att bedöma potentiella samhällskonsekvenser som störningar kan orsaka. Sådana studier skulle behöva kvantifiera avbrottens omfattning i tid och rum, simulera påverkan på trafikflöden och beräkna kostnaden för såväl störningar som åtgärder.

4 Fallstudie Skånes sydkust

RoadRAT applicerades på en 89 km lång vägsträcka längs Skånes sydkust (Figur 6). Sannolikheten för översvämning, våguppspolning och stormerosion som påverkar vägen simulerades för nuvarande och framtida förhållanden med hänsyn till havsnivåhöjningen i beräkningspunkter var 100:e meter längs vägen. De framtida förhållandena simulerades för år 2050, 2100 och 2150.



Figur 6 Karta som visar var studieområdet ligger. Vågrosorna (a-d) är baserade på data som extraherats på 10 m djup från modellerad vågdata från 1959-2021. Rutnätet motsvarar vågmodellens beräkningsnät och färgskalan visar 95-percentilen av den signifikanta våghöjden, H_s , under samma tidsperiod.

Östersjön har ett försumbart tidvatten, och kusten i det studerade området består huvudsakligen av postglacial sand och grus. Det finns sju hamnar längs kusten och två större handelshamnar i Ystad och Trelleborg. Runt dessa större hamnar och längs en 1 km lång eroderande kuststräcka i Löderups strandbad (strax väster om punkt d i Figur 6) domineras kusten av hårda konstruktioner.

Trafikverket använder utsläppsscenarioet RCP 8.5 för havsnivåhöjning i sin strategi för klimatanpassning (Trafikverket, 2018). Därför valdes motsvarande scenario för havsnivåhöjning SSP5-8.5 för analysen, vilket motsvarar RCP 8.5 i de nya illustrativa utsläppscenarierna (Shared Socio-Economic Pathways) från IPCC (IPCC, 2021). Därutöver undersöktes effekterna fram till 2150 för alla fem SSP-scenarier från IPCC: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 och SSP5-8.5. SSP-scenarierna representerar en rad framtida klimat som av IPCC bedömts som troliga.

Prognoser för regionala havsnivåhöjningar baserade på den sjätte utvärderingsrapporten från IPCC (IPCC, 2021) har tagits fram av SMHI (Hieronymus & Kalén, 2020; SMHI, 2020).

Medianprediktionerna för relativ havsnivåhöjning i Ystad har tillämpats i beräkningarna och presenteras i Tabell 1. SMHI har korrigerat den absoluta havsnivåhöjningen för landhöjningen, som i detta område uppgår till 0,08 mm/år.

Tabell 1 Medianprognos för relativ havsnivåhöjning i Ystad fram till slutåret i m relativt havsmedelvattennivån 2023. Endast de fetmarkerade prognoserna ingår i analysen (SMHI, 2020).

År/Scenario	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
2050	0.21	0.24	0.25	0.25	0.27
2100	0.41	0.45	0.59	0.68	0.80
2150	0.59	0.62	0.91	1.11	1.29

Geografiska underlag hämtades från Lantmäteriets öppna data: väglinje (vägbredd = 6 m), strandlinje, DEM från 2019 (1x1 m upplösning), ortofoto från 2018 (0,25x0,25 m) och historiskt ortofoto från 1960 (0,5x0,5 m). Kustlinjen och linjerna som representerar icke-eroderbara strukturer (13 km) digitaliserades från det georefererade ortofotot från 2018. Djupkonturerna extraherades från batymetri tillhandahållen av SGU (Malmberg Persson et al., 2016). Konturlinjen på 10 m djup användes som en gräns för att identifiera extraktionspunkter för vågdata, och konturlinjen på 1 m representerade strandlinjeslätans avgränsning mot havet, D_F .

Vågor extraherades på 10 m djup från vågdata som modellerats med SWAN (Booij et al., 1999, Figur 6). Den timvisa vågdatan från 1959-2023 har simulerats med samma vågmodell som presenteras i Adell et al. (2023). Timvisa vattenståndsdata tillhandahölls som öppna data av SMHI från vattenståndsmätstationer i Klagshamn (år 1929-2023), Skanör (år 1992-2023), Ystad (år 1886-1987; 2014-2023) och Simrishamn (år 1982-2024) (SMHI, u.å., Figur 6). Luckor i mätdata för Skanör och Ystad kompletterades med data från de andra stationerna, vilket gav både Ystads och Skanörs tidsserier kompletta timvärden från 1886 till 2023.

Luckor i tidserien från Ystad fylldes i med värden från Simrishamn som justerades utifrån en linjär korrelation med data från Ystad. Dataserierna har en korrelationskoefficient på 0,96 vilket innebär att de överensstämmer väl. En andra korrigering, även den baserad på linjär korrelation, tillämpades på vattenstånd som översteg 0,9 m över normalvattenståndet. Skanörs data fylldes på med data från i första hand Klagshamn (korrelationskoefficient 0,96) och i andra hand från Ystad (korrelationskoefficient 0,96) enligt samma metodik.

Den 1 juli användes som brytpunkt för analys av årsmaxima, eftersom höga vågor och vattennivåer är vanligare under vintern och årsmaxima på så vis kan antas komma från oberoende händelser. Trenden för stigande medelvattennivå avlägsnades genom att subtrahera de årliga normalvattennivåerna från vattenståndsobservationerna.

Parametrarna i sedimentationshastighetsekvationen (ekv 6 och 7) sattes till värden som representerar lokala förhållanden. Mediankornstorleken, D_{50} , sattes till ett värde av 0,2 mm, den

specifika densiteten, s , till 2,65, tyngdaccelerationen, g , till 9,81 m/s² och den kinematiska viskositeten, ν , till $1,3 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

Friktionskoefficienten, c_f , i ekvationen för reducerad våguppspolning (ekv 18) sattes till 0,02 (Hanson et al., 2010) och ökades till 0.04 i det särskilda fallet med låglänt mark (< 0,2 m över dyn/slänkfot) med vegetation mellan kusten och vägen för att ta hänsyn till vegetationens extra vågreducerande verkan.

Impactkoefficient, C_s , i ekvationen för stormerosion (Larson et al., 2004) kalibrerades baserat på observerade erosionsvolymerna från stranden i Lilleskog väster om Ystad under stormen Babet den 20-21 oktober 2023. Impactkoefficienten justerades till $3 \cdot 10^{-4}$ för att representera den observerade eroderade volymen under stormen Babet. Erosionen från dynen/slänten i de tio uppmätta transekterna varierade från 1 till 6 m³/m. Den kalibrerade koefficienten ligger inom intervallet för värden från tidigare studier, $1,7 \cdot 10^{-4} - 1,4 \cdot 10^{-3}$ (Larson et al., 2004).

4.1 Risker i dagens klimat

Nivån på den studerade vägbanan varierar mellan 1,3 - 20,4 m över dagens normalvattenstånd, med ett genomsnitt på 5,4 m. Avståndet mellan vägen och vegetationslinjen varierar från 12 - 2000 m med ett genomsnitt på ca 400 m. Den maximala uppmätta tillbakadragningen av kustlinjen sedan 1960 var 204 m, och den maximala uppmätta strandlinjens tillväxt var 191 m. Den genomsnittliga förändringen för alla beräkningspunkter var 8 m (tillväxt), och den genomsnittliga absoluta förändringen var 21 m. Under samma period har normalvattenståndet stigit med 4 cm i Ystad, vilket teoretiskt sett borde ha orsakat erosion.

Att den uppmätta kustlinjeförändringen inom studieområdet i medeltal är positiv, det vill säga att kusten har växt till, beror delvis på att eroderande områden har uteslutits från analysen på grund av de hårda kustskydd som har implementerats där sedan 1960-talet. Sanden förflyttar sig längs med kusten vilket resulterar i att vissa områden bygger på och andra eroderar. När en del av de eroderande områdena uteslutits blir således nettoresultatet positivt. Vidare har det i Ystad utförts strandfodringar som även de i mindre utsträckning bidragit till kustens progression. Bortsett från den östligaste delen av studieområdet med den största tillbakagången och progressionen av kustlinjen (Sandhammaren och Löderup), är den årliga förändringstakten mestadels i storleksordningen några decimeter.

Stillvattennivån med 100 års återkomsttid var 1,44 m över normalvattenståndet i Ystad, vilket är inom det intervall som SMHI beräknat: 1,41 – 1,45 m över normalvattenståndet (Andersson et al., 2022). Den totala våguppspolningsnivån med 100 års återkomsttid ($TWL = SWL + R_{u2\%}$) varierade från 1,3 till 3,7 m över normalvattenståndet, med ett genomsnitt av 2,1 m och en standardavvikelse på 0,4 m. Den ackumulerade årliga stormerosionsvolymen med en återkomsttid på 100 år varierade från 0 till 80 m³/m med ett genomsnitt av 20 m³/m och en standardavvikelse av 14 m³/m. Variationen av den totala våguppspolningsnivån och erosionsvolymerna återspeglar variationen i vågexponering längs kusten som illustreras i Figur 6.

Resultaten visar att under nuvarande klimatförhållanden är sannolikheten för påverkan från översvämning, våguppspolning och stormerosion låg och begränsad till ett fåtal vägsträckor, som uppgår till några hundra meter (Figur 7; övre delen av Figur 8).

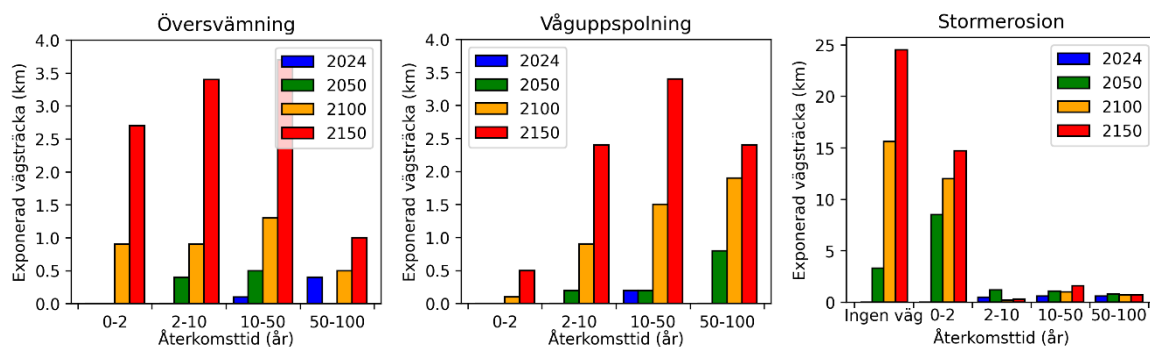
Eftersom resultaten uttrycker sannolikheten för påverkan är det svårt att validera modellens resultat. Resultaten av de identifierade riskerna bedöms dock sammanfalla med områden där det finns erfarenhet av påverkan på vägen. Till exempel överlappar lokaliseringen av de områden som riskerar att översvämmas med områden i Trelleborg där översvämning rapporterades under en stormflod den 4 januari 2017, som mätte 1,36 m över normalvattenståndet i Ystad och 1,53 m över normalvattenståndet i Skanör.

4.2 Framtida risker

I framtidsscenarierna ökar sannolikheten för påverkan från alla fyra processer gradvis med tiden och påverkar allt längre sträckor av vägen. År 2150 beräknas totalt 47 km av vägen att vara påverkad av en eller flera kustprocesser. 11 km av vägen beräknas ligga under 100-årsnivån för vattenstånd, 9 km påverkas av 100-årsnivån av total våguppspolning och 42 km påverkas av långsiktiga kustlinjeförändringar eller ligga inom 100-årsnivån av årlig stormerosion.

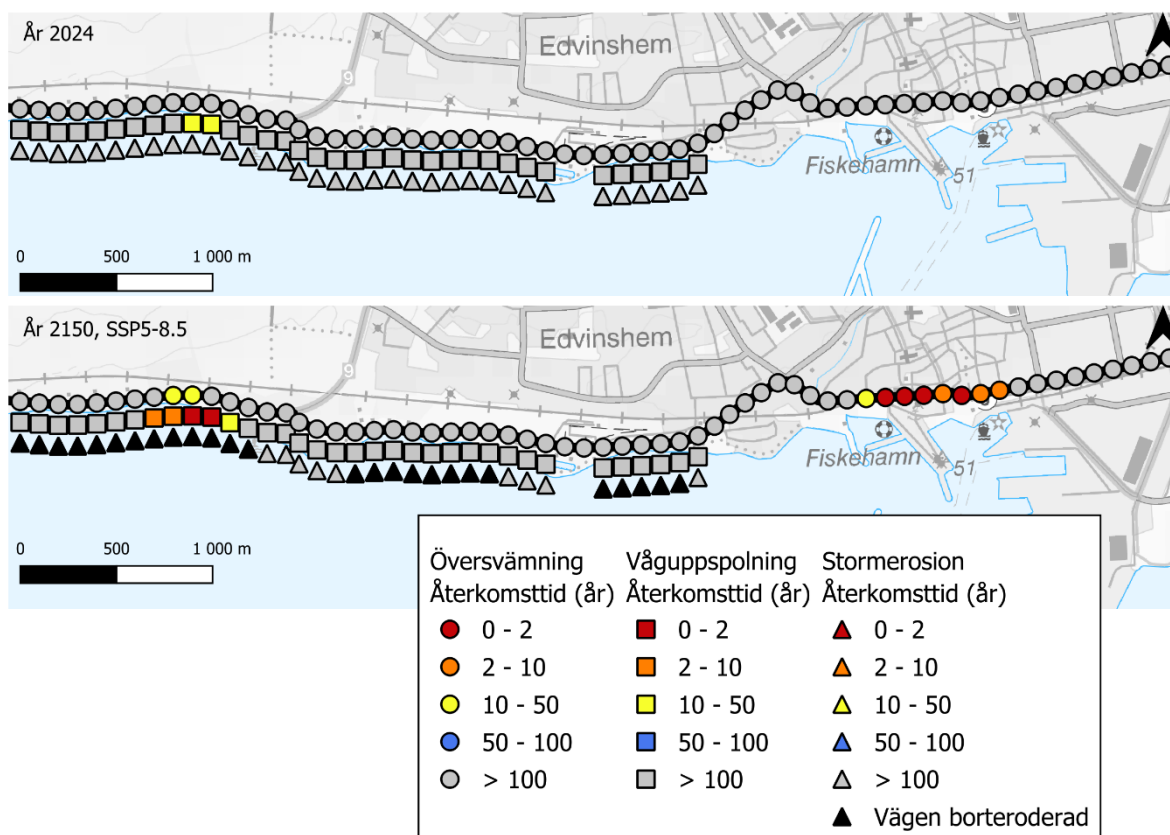
Resultatet att stillvattennivån påverkar en längre sträcka av vägen än den totala våguppspolningsnivån kan verka kontraintuitivt men beror på förekomsten av icke-eroderbara strukturer, såsom hamnar i några av de mest låglänta delarna av studieområdet, stadskärnorna i Trelleborg och Ystad. I framtidsscenariot kommer det att vara större delar av vägen som påverkas i det lägre intervallet av återkomstperioder (0-50 år) än i det högre intervallet (50-100 år). Detta återspeglar den avtagande lutningen på GEV-funktionen (ekv 9), vilket ger ett lägre nivåintervall för längre återkomsttider.

Den högre sannolikheten för effekter av stormerosion beror främst på den långsiktiga utvecklingen av kustlinjen som svar på havsnivåhöjningen och antagandet att den historiska kustlinjeutvecklingen fortsätter i framtiden. Längden på kuststräckor som påverkas av stormerosion med en återkomsttid på 0–2 år är troligen överskattad på grund av den förenklade representationen av den framtida volymen av skyddande dyner/slänt (Figur 5). Det är möjligt att vissa dyner i framtiden kommer att växa sig högre med havsnivåhöjningen som ett resultat av överspolning och deposition av vindtransporterad sand på dynkrönet (Psuty, 1988).



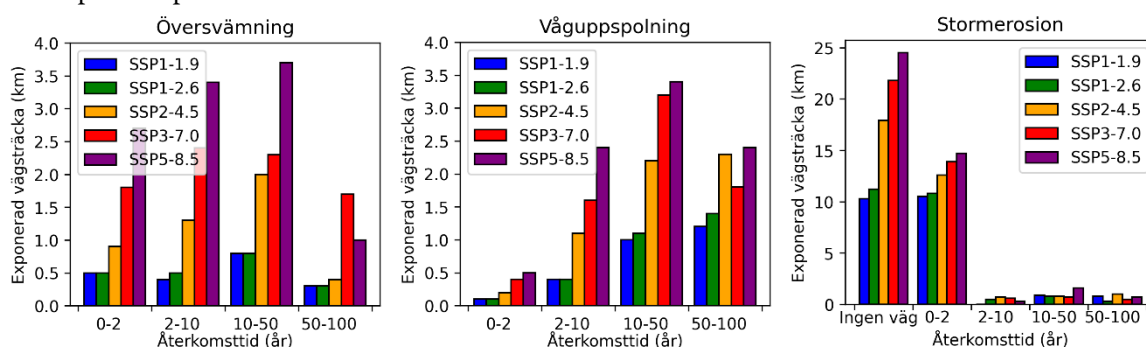
Figur 7 Längden på de vägsträckor som påverkas av översvämning (till vänster), våguppspolning (i mitten) och stormerosion (till höger) under nuvarande och framtida förhållanden (2050, 2100 och 2150) för medianprognosen för havsnivåhöjning enligt SSP5-8.5. De vägsträckor som betecknas med "Ingen väg" i det högra diagrammet antas vara bortoroderade då den framtida kustlinjen beräknas ligga bakom (på landsidan av) vägen.

Figur 8 visar ett exempel på hur resultaten kan visualiseras i ett GIS-baserat planeringsverktyg. Exemplet är hämtat från vägen mellan Lilleskog och Ystad. Resultaten visar att det i dagsläget endast är en kort sträcka av vägen som riskerar att påverkas av våguppspolning med återkomsttider på 50-100 år. I framtidsscenarioet år 2150 med SSP5-8.5, är en stor del av vägen utsatt för flera processer, där frekventa översvämningar av vägen i stadskärnan och erosion av kustlinjen väster om staden väntas ha störst påverkan.



Figur 8 Exponering för översvämning, våguppspolning och stormerosion för kustvägen väster om Ystad.

SSP5-8.5 har den högsta beräknade havsnivåhöjningen bland de studerade scenarierna och väntas nå 1,29 m år 2150 (Tabell 1). Som jämförelse visas de resulterande sannolikheterna för alla enligt IPCC troliga SSP-scenarier fram till 2150 i Figur 9. Alla scenarier visar ett liknande mönster av exponering för de olika processerna, men längden på de påverkade vägsträckorna varierar avsevärt. I det lägsta scenariot, SSP1-1.9, sträcker sig vägen inom 100-årsnivån för stillvattennivån, total våguppsspölningsnivå och årlig stormerosion 2 km, 3 km respektive 23 km. Jämfört med SSP5-8.5-scenariot minskar de vägsträckor som påverkades av en 100-årshändelse med 80 %, 70 % och 50 % för respektive process.



Figur 9 Stapeldiagram som visar längden på de vägsträckor som påverkas av översvämning (till vänster), våguppsspölning (i mitten) och stormerosion (till höger) år 2150, med hänsyn till medianprognosen för havsnivåhöjning enligt fem olika utsläppsscenarioer. De vägsträckor som betecknas med "Ingen väg" i det högra diagrammet antas vara borteroderade då den beräknade framtida kustlinjen ligger bakom (på landsidan av) vägen.

4.3 Diskussion av resultat

Resultaten visade att under nuvarande förhållanden är sannolikheten för påverkan av kustprocesser begränsad till några hundra meter av vägen. Men i framtiden kommer flera kilometer av vägen att vara exponerad och den största påverkan väntas bero på kusterosion. Exponeringen väntas öka med tiden. Figur 8 visar att vid SSP5-8,5-scenariot kommer det att behövas åtgärder för att motverka erosion längs flera kilometer av vägen redan innan 2050. Det kommer att krävas åtgärder både för att minska risken för erosion och översvämningar. Översvämningsrisken är främst i städerna Trelleborg och Ystad, medan erosionen påverkar vägen utanför städerna där det inte finns några befintliga hårda konstruktioner eller hamnar.

I ett längre tidsperspektiv, fram till 2150, är skillnaden i längden av exponerad vägsträcka stor, beroende på vilket utsläppsscenario som antas. Dessutom kommer översvämning och vågor i de högre scenarierna att ha en större påverkan på vägen och trafiken på grund av ökade översvämningsdjup och vågkrafter. Vid någon tidpunkt i framtiden kommer höjningen av havsnivån sannolikt att kräva en omlokalisering av vägen. Analysen av olika SSP-scenarier visar dock att det är då det inte längre är lönsamt att skydda vägen är osäkert och starkt relaterat till de framtida utsläppen av växthusgaser.

Den relativt blygsamma ökningen av exponering fram till 2050 skulle kunna motivera investeringar i mer kortsiktiga, *no-regret*-lösningar som olika typer av strandfodring (Fredriksson et al., 2017). De mest extrema framtidsscenarierna med långa tidsperspektiv skulle kunna ligga till grund för större investeringar och lokaliseringsstudier för nya vägar. På så sätt kan resultaten användas för att

vägleda Trafikverket och andra väghållare när de formulerar anpassningsstrategier med varierande planeringshorisonter.

5 Kustskyddsmetoder för vägar

För vägar som påverkas av olika typer av kustprocesser kan det behövas någon form av anpassning. I de fall där anpassningen syftar till att adressera ett problem som uppstår till följd av klimatförändringarna, brukar detta benämnas klimatanpassning. Men som tidigare nämnts finns det olika väderrelaterade fenomen som även utan effekten av klimatförändringarna kan ställa till problem för vägar och trafik.

Övergripande finns det fem strategier för att anpassa kustnära vägar till extrema händelser och havsnivåhöjningar (Douglass & Webb, 2020):

- Hantera och underhålla
- Öka redundans
- Skydda
- Tillpassa
- Omlokalisera

Hantera och underhålla innebär att infrastrukturen lämnas oförändrad, men att beredskapen höjs för att minimera skador kopplade till extrema händelser och för att påskynda reparationer av skador. Det kan exempelvis innebära att väghållaren lagerför vissa material eller ökar personalberedskap kopplat till vädervarningar.

Ökad redundans kan minska trafiksystemets sårbarhet och de negativa konsekvenserna av trafikstörningar. Det kan till exempel uppnås genom att trafik och godstransport omleds till alternativa vägar eller transportsätt. Det kan också vara en strategi vid planering av nya vägar - att bygga flera tätt belägna vägar istället för en stor.

Att skydda är en vanlig kategori av anpassningsåtgärder som innebär att man reducerar eller eliminerar påverkan genom olika typer av skyddande fysiska barriärer, som till exempel vallar eller strandfodringar. Olika kustskyddstyper kommer att diskuteras mer ingående i nästa avsnitt.

Vid tillpassning av infrastrukturen görs förändringar som innebär att läget och funktionen bibehålls men att påverkan reduceras. Det kan till exempel innebära att broar eller vägar höjs för att undvika översvämning och vågverkan eller att vägens material anpassas för att undvika skador till följd av vågverkan och översvämning.

Omlokalisering tillgrips typiskt när kostnaden för skydd eller tillpassning överstiger kostnaden för att bygga en ny väg eller när miljöpåverkan av andra åtgärder blir för stor. En synonym till omlokalisering är *reträtt*, men ordet kan i vissa sammanhang upplevas som negativt. Vidare implicerar termen omlokalisering till skillnad från reträtt att funktionen upprätthålls på annan plats och behöver därmed inte betyda att övriga samhällsfunktioner i kustområdet överges.

Strategier för anpassning bör inkludera alla relevanta typer av påverkan. Om till exempel en väg är exponerad både för översvämnings- och erosionsrisker, kan dessa hanteras i en gemensam strategi. Vidare bör planeringen av strategin beakta olika tidshorisonter. Till exempel kan både den tekniska livslängden av ett skydd eller av vägen vara vägledande. Man bör även beakta andra intressen inom det skyddade området och fundera på hur den framtida utvecklingen ser ut vid slutet av den aktuella planeringshorisonten. Prognoserna för havsnivåhöjningar är behäftade med stora osäkerheter vilket talar för att det kan vara en fördel att välja strategier med relativt kort livslängd och som möjliggör byte av strategi i framtiden, så kallade *no-regret*-lösningar. Exempel på *no-regret*-lösningar är planeringsstrategier som till exempel flexmark (Göransson et al., 2023), eller naturbaserade erosionskydd som strandfodringar och vegetationsplantering.

5.1 Kustskyddstyper

Kustskydd kan ha olika syften, som att förhindra erosion eller översvämning, dämpa vågor eller en kombination av dessa. De brukar delas in i hårda och mjuka skydd. Hårda skydd är typiskt konstruerade av sten, betong eller stålspons som till exempel stenskoningar, hövder och vågbrytare. Mjuka skydd använder sig av sand eller andra sediment och vegetation genom till exempel strandfodring, dynuppbbyggnad och bevarande eller anläggning av strandängar och våtmarker. Det finns även kombinerade lösningar, så kallade hybridskydd som innehåller både mjuka och hårda skyddselement.

För skydd av kustnära vägar kan åtgärderna mer konkret innebära (Douglass & Webb, 2020):

- Nya eller förstärkta strandskoningar med murar, spons eller stenskonig - hårda skydd som syftar till att skapa en barriär som skyddar vägen och marken framför vägen mot påverkan av vågkrafter.
- Strandfodring - ett mjukt skydd som syftar till att skapa en buffert mellan havet och vägen.
- Dynrestaurering och vegetationsplantering i dyner - mjuka skydd som syftar till att skapa dynamiska barriärer.
- Levande stränder (eng: *Living shorelines*) – bevuxna vågdämpande områden som är en naturbaserad åtgärd lämplig i områden med låg vågexponering.

Principerna för dessa olika typer av kustskydd har utförligt redogjorts för i rapporterna *Strandfodring - Skydd av kuster mot erosion och översvämning* (Hanson et al., 2006) och *Stranderosionskydd Typer – Dimensionering – Modellering* (Johansson, 2003). Även om rapporterna har några år på nacken så är informationen i dem fortfarande aktuell. Dock har det sedan rapporterna skrevs skett en utveckling mot ett mer multifunktionellt förhållningssätt till kustskydd och klimatanpassning.

Genom utbredd historiskt användande av hårda kustskydd finns stor internationella erfarenhet av de negativa konsekvenser som hårda konstruktioner kan medföra, som förlust av sandstränder och ökad erosion i närliggande områden (Dean, 1986; Manno et al., 2016; Nawarat et al., 2024). För att motverka den negativa påverkan av kustskydd har strandfodringar blivit allt vanligare för att återställa sandstränder och säkerställa fullgott skydd mot erosion och översvämning (de Schipper et al., 2016; Dean, 2002; Hanson et al., 2002; Stive et al., 2013).

Strandfodring är en globalt erkänd kustskyddsmetod med över 100 år av dokumenterad erfarenhet (de Schipper et al., 2021). Som erosionsskydd fungerar strandfodring genom att ersätta sediment som transporteras bort från kusten, men strandfodringen kan även användas för att öka strandens bredd och volym (Hanson et al., 2006). Till skillnad från hårda skydd så ökar inte erosionen i närliggande områden, tvärtom kan transporten av sand till dessa områden öka. Internationellt sett har strandfodring länge varit den föredragna metoden (de Schipper et al., 2021), men i Sverige är de storskaliga projekten färre; Ystad sandskog har strandfodrats fyra gånger mellan 2011 - 2020 och Ribersborgsstranden i Malmö byggdes med strandfodring på 1920-talet.

På senare år har intresset för naturbaserade lösningar, dit strandfodring ibland räknas, ökat även i Sverige (LIFECostAdapt, 2024; Naturvårdsverket, 2021; SGI, u.å.-a; Trafikverket, 2024). Internationellt har även hybridskydd blivit allt vanligare. En anledning är att det förr anlades mest hårda skydd, medan mjuka skydd oftare förespråkas idag på grund av de hårda skyddens negativa konsekvenser. Därför blandas hårt och mjukt då ett gammalt skydd ska förstärkas genom tillägg av ett nytt, mjukt. Det byggs även nya hybridskydd vilket ofta beror på platsbrist eller att det saknas förtroende för de mjuka skyddens effektivitet. Dock riskerar den typen av lösningar att bli dyra, eftersom man i princip bygger två skydd och en tillräcklig skyddsnivå kan ibland istället nå genom att öka dimensioneringen av den naturbaserade lösningen.

Det har även utförts en del experiment med ålgräsplantering utmed den svenska kusten för att restaurera ålgräsängar (LIFECostAdapt, 2024; Moksnes et al., 2021; Moksnes et al., 2016). Åtgärderna görs primärt av ekologiska skäl, men ibland anförs även kustskydd som en funktion (Naturvårdsverket, 2021). Sjögräs dämpar vågenergin och kan därmed påverka den kustnära batymetrin (Agulles et al., 2024). Det finns till exempel vågtanksstudier som visar att revlar flyttar närmare kusten som effekt av sjögräsets vågdämpning (Astudillo et al., 2022).

Att ålgräs skulle kunna fungera som ett kustskydd på sandiga kuster är dock tveksamt. Teoretiskt sett kan ålgräsets vågdämpande effekt på en öppen sandig kust innebära att den brytande våghöjden minskar och därmed leda till minskad kustparallell sedimenttransport. Sett över ett större område skulle dock en sådan gradient i transporten leda till både erosion och ackumulation längs kusten. Vidare slits ålgräs ofta av vid stormar vilket kan innebära att skyddseffekten då minskar för transport av sand utifrån kusten under stormen. Samtidigt kan den vågdämpande effekten innebära att transporten av sand tillbaka till kusten mellan stormperioderna minskar. Sammanfattningsvis kan man säga att ålgräsets påverkan på sandiga kusters utveckling är osäker, varierande i tid och rum, och skulle behöva utredas mer innan ålgräsplantering eventuellt skulle kunna rekommenderas som ett kustskydd.

5.2 Ansvarsfördelning och lagstiftning

Trafikverket skriver själva i sin klimat- och sårbarhetsanalys att lagstiftningen kopplad till deras klimatanpassningsåtgärder är mycket begränsad (Trafikverket, 2020). I princip är klimatanpassning fastighetsägarens ansvar. Kommunerna har enligt Plan- och Bygglagen (PBL, 3 kap 5§ 7 p) endast ett ansvar för att i Översiktsplanen ge sin syn på risken för skador på den bebyggda miljön till följd

av översvämning och erosion som är klimatrelaterad samt hur dessa risker kan minska eller upphöra. Men kommunerna har alltså ingen skyldighet att organisera eller finansiera åtgärder.

Förutom PBL finns det även EU-lagstiftning som styr Sveriges arbete med att begränsa just översvämningsrisker. EUs översvämningsdirektiv (2007/60/EC) implementeras av Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB). Men i den första implementeringscykeln som genomfördes 2009–2015 utelämnades kustöversvämningar från analysen av översvämningsbenägna områden (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2011). I den andra implementeringscykeln, 2016–2021, inkluderades kustöversvämningar och 16 översvämningsbenägna områden utmed kusten identifierades (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2018). Under 2020–2021 tog Länsstyrelserna fram riskhanteringsplaner för de identifierade översvämningsbenägna områdena. SMHI har bistått med beräkningar av extrema vattenstånd.

Riskhanteringsplaner har tagits fram för Trelleborgs- och Ystadområdet av Länsstyrelsen i Skåne (Länsstyrelsen i Skåne, 2021; Länsstyrelsen Skåne, 2021). Länsstyrelsen har identifierat översvämningsbenägna områden med hänsyn till stigande havsnivåer fram till år 2100 och skriver att åtgärder behövs för att undvika skador orsakade av översvämningar. Dock har Länsstyrelsen inget ansvar för att genomföra några åtgärder och inte heller mandat att besluta om åtgärder som andra aktörer ska genomföra eller hur dessa ska finansieras. Riskhanteringsplanerna kan istället ses som en sammanställning av åtgärder som andra aktörer avser att genomföra, men saknar juridiskt stöd för att följa upp att dessa faktiskt genomförs. I planerna är det främst kommunernas åtgärder som presenteras, men även Trafikverket nämns som ansvariga för att ta fram regionala klimat- och sårbarhetsanalyser för vägar, järnvägar och hamnar av riksintresse, att påbörja arbetet på långsiktiga planer för den infrastruktur som är hotad av översvämning och genomföra en åtgärdsvalsstudie för riksväg 9 längs sträckan Trelleborg och Ystad samt öster om Ystad.

Kustskydd kräver tillstånd från mark- och miljödomstolen enligt Miljöbalken (1998:808) 11 kap. Vattenverksamhet. Det finns dock undantag för mindre omfattande projekt som endast kräver anmälan till Länsstyrelsen. Avseende kustskydd handlar detta om anläggningar där den påverkade ytan understiger 3000 m². Det förutsätter dock att den inte påverkar värdefull natur eller att inte någon enskild inte samtycker. Oavsett anmälan eller tillstånd krävs dispens från Strandskyddet ifall åtgärden utförs inom ett strandskyddat område. Den dispensen söks från kommunen eller mark- och miljödomstolen. Mer information om tillstånd för och anmälan om Vattenverksamhet finns på Länsstyrelsen i Skånes hemsida (Länsstyrelsen i Skåne, u.å.).

5.3 Implementering och uppföljning

Med utgångspunkt i väg 9 och de problem som finns där bedöms kusterosion utanför tätorterna och översvämningar inom tätorterna att vara de primära riskerna som behöver hanteras med någon form av strategi. Även om lagrum och formellt ansvar saknas, bör val av strategi och en eventuell implementering av kustskydd ske i samverkan mellan intressenter. Små, avgränsade lösningar på fastighetsnivå som skyddar enskilda intressen riskerar att omvandla den skånska kusten till ett lappverk av ineffektiva hårda kustskydd med omfattande negativa miljökonsekvenser (Hallin et al.,

2024). Kustskydd är mer effektiva då de utförs över ett större geografiskt område och tar ett helhetsgrepp på det skyddade områdets värden.

I tätorterna inom fallstudieområdet finns det en mångfald av intressen som också är hotade, såsom bebyggelse, kulturvärden och annan infrastruktur till exempel VA- och elledningar. Här kommer vägen att vara ett intresse bland många andra i större projekt för att skydda Trelleborgs och Ystads stadskärnor. I de områden där vägen ligger närmast havet och hotas av erosion borde samma princip råda. Även utanför detaljplanelagda områden bör ett helhetsgrepp tas över ett större område som beaktar flera intressen och intresseägare inom området. Men som sagt saknas det lagstiftning som tydliggör ansvar och finansiering vilket även det är en del av en pågående utredning som ska *”identifiera hinder mot att kunna planera, genomföra och förvalta effektiva klimatanpassningsåtgärder”* (Dir. 2024:31 Ett samhälle anpassat till klimatförändringarna).

Statens väg och transportforskningsinstitut (VTI) har på uppdrag av Trafikverket tagit fram ett ramverk för att prioritera och bedöma nyttan av klimatanpassningsåtgärder (Andersson-Sköld et al., 2023). I rapporten exemplifieras metoder för faro- och riskidentifiering, riskanalys, utvärdering av möjliga åtgärder och slutsatser som exemplifieras i ett antal fallstudier. Dock saknas det fallstudier som avser risker kopplade till kusterosion, kustöversvämningar och våguppspolning.

Innan strategi väljs behöver sedimentdynamiken inom området förstås. Därefter behöver de olika strategiernas påverkan på kustutvecklingen utredas. Kustskyddsåtgärder ska dimensioneras av kustingenjörer och förutsätter kunskap om de vattenstånd och vågor som området kan exponeras för. I detta avseende är det underlag avseende vågklimat och sedimentdynamik som tagits fram inom ramen för detta projekt (delfinansierat av SGU och Trafikverket) och tillgängliggjorts via SGIs Kustdataportal till nytta (SGI, u.å.-b).

Efter att åtgärden implementeras är det viktigt att mäta och följa upp hur kustskyddet utvecklas. Det finns flera anledningar till detta, dels behöver skyddets integritet och skyddsnivå säkerställas, dels behövs kunskap inför anläggning av nya skydd och dels kan negativ påverkan av skyddet behöva kompenseras. Vägledning kring planering, implementering och uppföljning av kustskydd finns i tidigare nämnda rapporter (Hanson et al., 2006; Johansson, 2003).

6 Fallstudie av hybridkustskydd i Faxe Ladeplads

Som ett exempel på ett hybridskydd har en stenskoning med strandfodring framför studerats längs en väg i Faxe Ladeplads i Danmark (Figur 10). Skyddet har utförligt analyserats i två vetenskapliga artiklar från projektet (Adell et al., 2024, Adell et al., manus).



Figur 10 Fallstudie kustskydd Faxe Ladeplads, (a) visar schematisk utformning, (b) överblicksbild över den fodrade kuststräckan från juli 2021, foto: Kystdirektoratet, (c) karta över området.

6.1 Utformning och lokala förutsättningar

Kustskyddsåtgärden i Faxeladeplads valdes som studieobjekt eftersom den ligger i ett område med liknande hydrodynamiska och geologiska förutsättningar som Skånes sydkust och att det bedöms vara en relevant åtgärd att utvärdera för implementering som skydd av väg även längs Skånes sydkust.

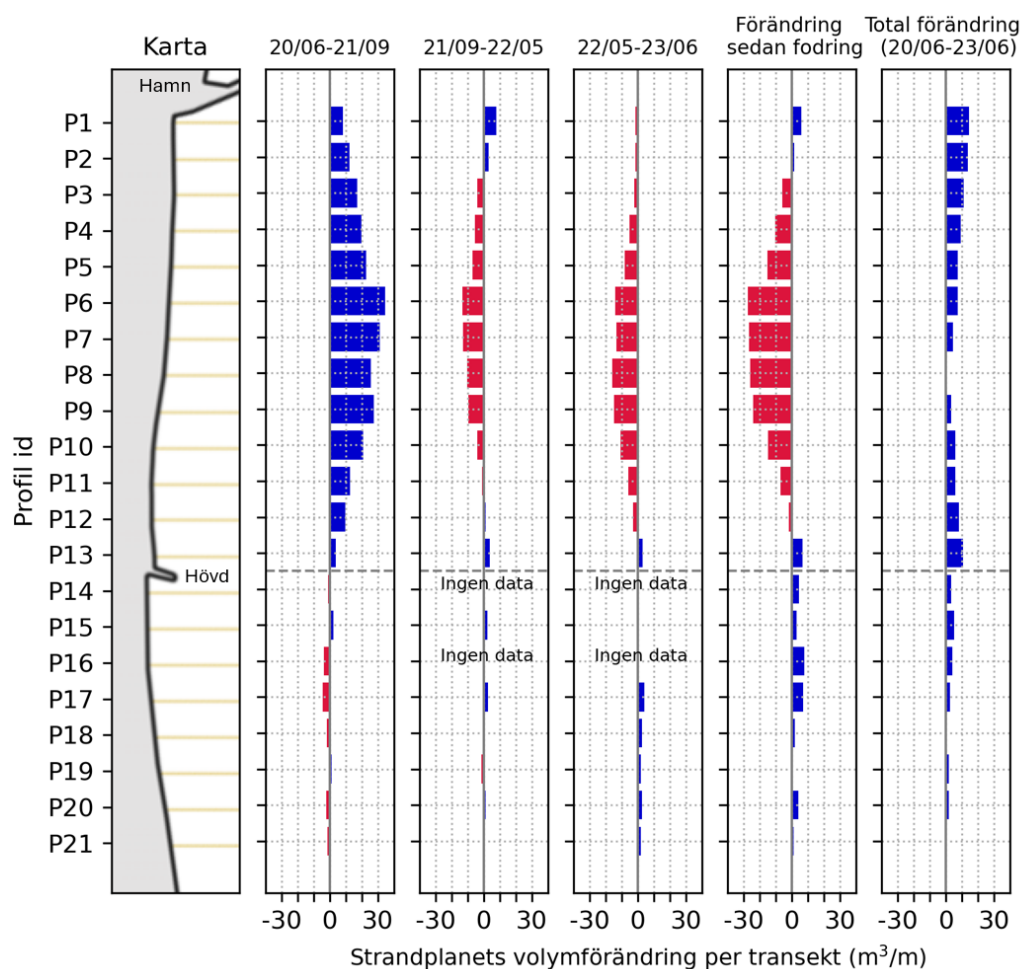
Bakgrunden till skyddet är att hårda konstruktioner hindrar sandtillförsel till kustavsnittet genom naturliga processer. Hamnens läge hindrar tillförsel av sediment genom kustparallelltransport, den dominerande riktningen är markerad på kartan i Figur 10. Tillika innebär stenskonings och vägens placering att inget sediment tillförs systemet genom erosion av marken bakom skyddet. Därför behövs en konstgjord tillförsel av sediment genom strandfodring för att hålla sedimentbudgeten i balans och motverka erosionen.

Strandfodringen utfördes i november 2018 och juli 2021 med 70 000 och 20 000 m³ sand vid respektive tillfälle. Efter strandfodringen 2018 omfördelades sanden snabbt och lade sig längre ut i profilen varför en påfyllnad senare gjordes. Vid båda tillfällena placerades sanden som en ca 40 m bred homogent utformad strand längs vägen mellan hamnen i norr och en hövd i söder. En hövd är en kustvinkelrät konstruktion med syfte att minska transporten av sand längs med kusten. Hövden vid projektområdet är dock för kort för att fungera som en inneslutande hövd (eng: *terminal groin*). Men både hövden och hamnen har ändå en påverkan på strandfodringens morfologiska utveckling.

6.2 Uppföljning

Kustskyddsåtgärden har följts upp genom att samla in mätdata över vågor och strand- och bottenivåförändringar (Adell et al., 2024) samt genom att modellera strandfodringens utveckling och vågdämpande effekt under stormen Babet med den hydro-morfologiska modellen XBeach (Roelvink et al., 2009; Adell et al., manus).

Resultaten visar att strandfodringens utveckling från 2021–2023 (Figur 11) styrts av episodiska stormförhållanden med höga vågor som endast inträffar några gånger om året och som vid enstaka tillfällen sammanfaller med högt vattenstånd. Sanden omfördelades både vinkelrät och parallellt med kusten. Efter två år hade sanden omfördelats så att stranden återfått sin ursprungliga form med bredare strand intill hamnen och hövden och smalare på mitten. En del sand hade förflyttats från strandplanet ut i profilen och en del sand hade förflyttats till området söder om projektområdet. Även det området är erosionsutsatt och sandtillskottet hade därför en positiv inverkan på området.



Figur 11 Volymförändringar på strandplanet inom och nedströms projektområdet mellan 2020 och 2023.

När stormen Babet inträffade den 20-21 oktober 2023 hade alltså strandplanets bredd, särskilt i mitten av det fodrade området minskat. Även om strandfodringens designförutsättningar inte är kända så överskred Babet sannolikt dessa. I Faxö var Babet en värre stormhändelse än längs den svenska kusten. Vattennivån under stormen hade en återkomsttid på 200 år (Kystdirektoratet, 2024). Under Babet skedde våguppspolning på vägen och muren bakom stenskoningen skadades på något ställe. Som en konsekvens blockerades vägen av vattenmassor och sten- och betongavfall som behövde röjas bort innan vägen kunde öppnas.

Genom modellering med XBeach har alternativa utformningar av strandfodringen utförts för att undersöka om en större fodringens volym före stormen hade kunnat förebygga skadorna under stormen. Resultaten visar att en bredare sandstrand före stormen reducerar våghöjden framför skyddet, men inte i tillräcklig omfattning för att helt undvika uppspolningen på vägen. Förlusterna av sand nedströms (söderut) blev större ju bredare stranden var.

Stenskonings krönhöjd hade behövt ökas för att stå emot våguppspolningen under Babet. Alternativt hade ett dynlandskap bakom strandplanet kunnat fungera som både sandbuffert och översvämningsskydd, men det har inte undersökts närmare inom studien. Det är många faktorer som kan påverka skyddets effektivitet under en stormflodshändelse likt Babet, exempelvis vattenstånd, stormens varaktighet och sandstrandens utformning vid stormtillfället. Det är därför

viktigt att övervaka utvecklingen av strandfodringen och underhålla den för att kunna säkerställa skyddsnivån vid en stormhändelse.

Slutsatsen från Faxestudien är att påverkan på vägen och stenskoningen under stormen Babet minskade till följd av strandfodringen, men inte i tillräcklig omfattning. Dock är det viktigt att poängtera att Babet troligtvis överskred skyddets dimensionerande händelse. Nedströmseffekter av hybridskyddet har varit positiva och stranden har även ökat rekreativvärdena i området och nyttjas som badstrand av de boende. Det har förekommit viss sandflykt som blåst upp på vägen, problemet hade kunnat minskas genom att täcka den befintliga stenskoningen med sand och plantera vegetation på den. Det hade också gett stranden ett mer naturligt utseende under normalförhållanden.

6.3 Lärdomar för svenska kusten

Erfarenheterna från Faxe visar att det är viktigt att utforma strandfordringar i enlighet med strandens jämviktsform. På den skånska kusten är detta en stor utmaning eftersom jämviktsformen kan ändras beroende på variationer i vågriktningen. I Adell et al. (2023) studerades hur den ostliga och västliga vågenergikomponenten varierade mellan olika år. Oftast dominerar den västliga komponenten, men vissa år kommer det mer vågenergi från öst. Den typen av variationer kan ha stor påverkan på kusten. Omfördelning av sand som påverkar strandbredd och strandorientering kan även ske under tidskalor av stormar vilket blev tydligt under stormen Babet. För att säkerställa skyddets funktion under den här typen av omväxlande vågriktningsförhållanden behöver skyddets dimensionering ökas för att kunna härbärgera strandens växlingar.

Andra lärdomar att ta med sig Faxestudien till svenska projekt är:

- Strandfodring framför stenskoningar kan öka områdets rekreativvärden och motverka stenskonings negativa effekter nedströms.
- Strandfodring reducerar våguppspolning under stormhändelser.
- Ifall åtgärden inte kompletteras med vegetationsplantering eller sandstaket kan det leda till att sand blåser upp på vägbanan.
- Skyddsnivån förändras med tiden när sanden omfördelar sig.
- Regelbunden uppföljning och komplementfodring kan behövas för att uppnå en tillräcklig skyddsnivå längs hela den strandskyddade sträckan.
- Vid extrema händelser, med mycket högt vattenstånd är skyddets krönhöjd avgörande. Då räcker det inte bara med en strandfodring utan det kan behövas sanddyner eller någon form av vall för att skydda mot översvämning.

7 Rekommendationer

7.1 Användning av RoadRAT

Syftet med RoadRAT är att tillhandahålla ett modellverktyg som kan sättas upp med tillgängliga data och producera resultat i en regional skala som ska vara lätta att tolka för vägförvaltare och planerare. Denna förutsättning kräver förenklade antaganden, särskilt när det gäller beräkningarna av framtida kustlinjeutveckling, våguppspolning och stormerosion. En fördel med det förenklade tillvägagångssättet är att modellens beräkningseffektivitet gör det möjligt att simulera flera scenarier och att göra känslighetsanalyser av kalibreringsparametrar. En nackdel är att resultaten är behäftade med osäkerheter.

Trots förenklingar så bedöms RoadRAT kunna ge ett robust underlag för såväl Trafikverkets klimat och sårbarhetsanalyser som framtida planeringsunderlag och kan på samma sätt användas för kommunala och privata vägnät. RoadRAT kan i sin nuvarande form sättas upp med data från andra kuststräckor i Sverige men arbetet bör utföras av kustingenjörer för att analysera och bedöma resultatens rimlighet.

Längs den studerade vägsträckan på sydkusten finns det på flera platser kommunala och privata vägar som ligger närmare kusten än riksvägen och som skulle kunna inkluderas i en utökad analys. Längs den skånska sydkusten där RoadRAT redan kalibrerats och all indata har förberetts skulle den typen av analyser enkelt kunna göras.

I den här studien tillämpades RoadRAT på en bilväg. Men den kan också användas för bebyggelse och andra transportanläggningar såsom järnvägar, cykelvägar och vandringsleder, som ofta är belägna i områden som påverkas av kustprocesser. Ledningsnät för el och VA-ledningar eller viktiga punktobjekt såsom pumpstationer är ett annat möjligt framtida tillämpningsområde.

Ifall resultatet från RoadRAT kopplas till andra verktyg som beräknar konsekvenser och kostnader av påverkan kan det även användas för att prognosticera framtida kostnader kopplade till klimatförändringarna.

7.2 Kustskydd längs Skånes sydkust

RoadRAT-analysen längs Skånes sydkust visar på att vägen i framtiden sannolikt kommer att behöva flyttas längs vissa sträckor men att tidpunkten för en sådan åtgärd beror på takten på havsnivåhöjningen som i sin tur styrs av samhällets förmåga att reducera utsläpp av växthusgaser. Men redan på kortare sikt, inom ett par decennier kommer delar av vägen att behöva skyddas.

Med beaktande av den samlade internationella erfarenheten av kustskydd och de negativa konsekvenser som hårda skydd leder till på mjuka kuster avråds från anläggning av hårda kustskydd längs Skånes sydkust. De hårda kustskydd som redan anlagts bör kompletteras med strandfodring för att minska skyddens negativa miljöpåverkan. Strandfodringsprojekt har visat sig vara effektiva i Ystad kommun och skulle sannolikt fungera även på andra ställen utmed sydkusten. Studier har

visat att stora volymer sand finns att tillgå i sandtäckter på havsbotten utan alltför omfattande negativ miljöpåverkan (Fredriksson et al., 2017; Nyberg et al., 2017). I vissa fall skulle strandfodringar kunna användas som en *no-regret*-lösning för att köpa tid, se utvecklingen an, och förbereda lokalbefolkningen på framtida förändringar såsom omlokalisering av vägen och reträtt ifrån alltför riskutsatta områden.

I dagsläget är det inte kunskap, teknik eller resurser som saknas för att genomföra strandfodringar som kustskydd. Flaskhalsarna förefaller vara brister i lagstiftning, ansvarsfördelning och finansieringsmodeller. Det är en förhoppning att vissa av dessa knutar kan rätas ut genom den pågående statliga utredningen (Dir. 2024:31 Ett samhälle anpassat till klimatförändringarna). Men oavsett utgång så bör samverkan, åtgärdernas effektivitet och långsiktig planering vägleda arbetet.

8 Författarnas tack

Projektet Klimatanpassning av väg och järnväg i strandnära områden som finansierats av Trafikverket (projekt TRV 2019/96299) har pågått augusti 2020 till december 2024. Under projektiden har vi fått värdefulla inspel och kommentarer från Trafikverket genom Markus Lundkvist, Björn Åstedt och Malin Lind och från projektets referensgrupp som har bestått av Sebastian Bokhari Irminger (SGI), Bradley Goodfellow (SGU), Per Sørensen (Kystdirektoratet, Danmark), Emanuel Schmidt (Sweco), Mona Skoog (Ystad kommun), Sofie Schöld (SMHI) Gunnel Göransson (VTI) och Charlotte Sparrenbom (Lunds universitet).

Referenser

- Adell, A., Almström, B., Kroon, A., Larson, M., Uvo, C. B., & Hallin, C. (2023). Spatial and temporal wave climate variability along the south coast of Sweden during 1959–2021. *Regional Studies in Marine Science*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103011>
- Adell, A., Kroon, A., Almström, B., Larson, M., & Hallin, C. (2024). Observed beach nourishment development in a semi-enclosed coastal embayment. *Geomorphology*, 462. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109324>
- Agulles, M., Marbà, N., Duarte, C. M., & Jordà, G. (2024). Mediterranean seagrasses provide essential coastal protection under climate change. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81026-5>
- Almström, B. (2022). *Nature-based shore protection against ship waves in intra-coastal fairways*.
- Anderson, D., Rueda, A., Cagigal, L., Antolinez, J. A. A., Mendez, F. J., & Ruggiero, P. (2019). Time-Varying Emulator for Short and Long-Term Analysis of Coastal Flood Hazard Potential. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(12), 9209–9234. <https://doi.org/10.1029/2019JC015312>
- Anderson, T. R., Fletcher, C. H., Barbee, M. M., Frazer, L. N., & Romine, B. M. (2015). Doubling of coastal erosion under rising sea level by mid-century in Hawaii. *Natural Hazards*, 78(1), 75–103. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1698-6>
- Andersson, M., André, E., & Hieronymus, M. (2022). *Beräkning av extremnivåer – höga havsvattenstånd*.
- Andersson-Sköld, Y., Mirzanamadi, R., Nyberg, E., Erlingsson, S., Torstensson, P., Göransson, G., & Nordin, L. (2023). *Ramverk för att prioritera och bedöma nyttan av klimatanpassningsåtgärder*.
- Arnesten, E. (2019). *Emilie Arnesten Impacts of future sea level rise and high water on roads, railways and environmental objects A GIS analysis of the potential effects of increasing sea levels and highest projected high water in Scania, Sweden. Master Thesis*.
- Astudillo, C., Gracia, V., Cáceres, I., Sierra, J. P., & Sánchez-Arcilla, A. (2022). Beach profile changes induced by surrogate *Posidonia Oceanica*: Laboratory experiments. *Coastal Engineering*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104144>
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104, 7649–7666.
- Bruun, P. (1954). Coast erosion and the development of beach profiles. *Beach Erosion Board Technical Memorandum. US Army Corps of Engineers, Washington DC*, 44, 79 pp.
- Bruun, P. (1962). Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE* 88, 117–130.
- de Schipper, M. A., de Vries, S., Ruessink, G., de Zeeuw, R. C., Rutten, J., van Gelder-Maas, C., & Stive, M. J. F. (2016). Initial spreading of a mega feeder nourishment: Observations of the Sand Engine pilot project. *Coastal Engineering*, 111, 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.10.011>
- de Schipper, M. A., Ludka, B. C., Raubenheimer, B., Luijendijk, A. P., & Schlacher, T. A. (2021). Beach nourishment has complex implications for the future of sandy shores. In *Nature*

- Reviews Earth and Environment* (Vol. 2, Issue 1, pp. 70–84). Springer Nature.
<https://doi.org/10.1038/s43017-020-00109-9>
- Dean, R. (2002). *Beach nourishment, theory and practice*.
- Dean, R. G. (1977). Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. *Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report No. 12, University of Delaware, Newark, Delaware*.
- Dean, R. G. (1986). COASTAL ARMORING: EFFECTS, PRINCIPLES AND MITIGATION. *Coastal Engineering*.
- Douglass, S. L., & Webb, B. M. (2020). *Highways in the Coastal Environment, Hydraulic Engineering Circular No. 25, FHWA-HIF-19-059*.
- EurOtop. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrump*.
- Fraser, C., Bernatchez, P., & Dugas, S. (2017). Development of a GIS coastal land-use planning tool for coastal erosion adaptation based on the exposure of buildings and infrastructure to coastal erosion, Québec, Canada. In *Geomatics, Natural Hazards and Risk* (Vol. 8, Issue 2, pp. 1103–1125). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1294114>
- Fredriksson, C., Almström, B., Hanson, H., Larson, M., & Persson, O. (2017). Estimation of required beach nourishment volumes along the south coast of Sweden during 2017–2100. *VATTEN - Journal of Water Management and Reserach*, 73, 77–84.
- Göransson, G., Van Well, L., Bendz, D., Hedfors, J., & Danielsson, P. (2023). Opportunities for planned retreat and flexible land use in Sweden: Local, regional and national governance perspectives. *Climate Risk Management*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100530>
- Hallermeier, R. J. (1978). Uses for a calculated limit depth to beach erosion. *Proc. 16th Coastal Eng. Conf Hambur, Germany*, 1493–1512.
- Hallermeier, R. J., & Rhodes, P. E. (1988). Generic treatment of dune erosion for 100-year event. *Conference on Coastal Engineering*, 1197–1211.
- Hallin, C., Adell, A., Almström, B., Kroon, A., & Larson, M. (2025). RoadRAT – A new framework to assess the probability of inundation, wave runup, and erosion impacting coastal roads. *Coastal Engineering*, 199, 104741. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2025.104741>
- Hallin, C., Knaggård, Å., Alexanderson, H., Zander, U., Persson, A., Sahlin, U., Wingren, C., & Thorén, H. (2024). De värsta konsekvenserna av Babet ligger framför oss. *Sydsvenskan*. . <https://www.sydsvenskan.se/2024-02-28/de-Varsta-Konsekvenserna-Av-Babet-Ligger-Framfor-Oss>.
- Hanson, H., Aarninkhof, S., Capobianco, M., Jimenez, J. A., Larson, M., Nicholls, R. J., & de Vriend, H. J. (2003). Modelling of coastal evolution on yearly to decadal time scales. *Journal of Coastal Research*, 790–811.
- Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H. H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A., & Spanhoff, R. (2002). Beach nourishment projects, practices, and objectives - A European overview. *Coastal Engineering*, 47(2), 81–111. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00122-9)
- Hanson, H., & Larson, M. (2008). Implications of extreme waves and water levels in the southern Baltic Sea. *Journal of Hydraulic Research*, 46, 292–302.
<https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521962>

- Hanson, H., Larson, M., & Kraus, N. C. (2010). Calculation of beach change under interacting cross-shore and longshore processes. *Coastal Engineering*, 57(6), 610–619.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.02.002>
- Hanson, H., Rydell, B., & Andersson, M. (2006). *Strandfodring Skydd av kuster mot erosion och översvämning*. www.swedgeo.se
- He, K., Pregnotato, M., Carhart, N., Neal, J., & De Risi, R. (2024). Functionality assessment of road network combining flood roadworthiness and graph topology. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104354>
- Hieronymus, M., & Kalén, O. (2020). Sea-level rise projections for Sweden based on the new IPCC special report: The ocean and cryosphere in a changing climate. *Ambio*, 49(10), 1587–1600.
<https://doi.org/10.1007/s13280-019-01313-8>
- Hurrell, J. W. (1995). Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. In *New Series* (Vol. 269, Issue 5224).
- Inamdeen, F., & Larson, M. (2024). Compound effects of sea level and flow on river-induced flooding in coastal areas of southern Sweden. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102032>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, J. B. R. Matthews, S. Berger, M. Huang, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, E. Lonnoy, T. K. Maycock, T. Waterfield, K. Leitzell, & N. Caud, Eds.; Issue In Press). Cambridge University Press.
- Johansson, L. (2003). *Stranderosionsskydd Typ-er-Dimensionering-Modellering*. www.swedgeo.se
- Johansson, I., & Balstrøm, T. (2021). A GIS-based screening method to identify climate change-related threats on road networks: A case study from Sweden. *Climate Risk Management*, 33.
<https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100344>
- Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). *On The Quantitative Definition of Risk*. I(I).
- Kriebel, D., Kraus, N., & Larson, M. (1991). Engineering Methods for predicting beach profile response. *Coastal Sediments '91*, 557–571.
- Kystdirektoratet. (2024). *Højvands-statistikker 2024*.
<https://kyst.dk/media/ikykmzej/hoejvandsstatistikker-2024-05-11-2024.pdf>
- Länsstyrelsen i Skåne. (n.d.). *Vattenverksamhet*. <https://www.lansstyrelsen.se/Skane/Miljo-Och-Vatten/Atgarder-Och-Verksamheter-i-Vatten/Vattenverksamhet.Html>
- Länsstyrelsen i Skåne. (2021). *Riskhanteringsplan för Trelleborgsområdet 2022-2027*.
- Länsstyrelsen Skåne. (2021). *Riskhanteringsplan för Ystadområdet 2022-2027*.
- Larson, M., Erikson, L., & Hanson, H. (2004). An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 675–696.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.003>
- Larson, M., Fredriksson, C., & Hanson, H. (2016). Changing wind properties in south Sweden. *VATTEN – Journal of Water Management and Research*, 72(2), 117–128.
- Larson, M., Hoan, L. X., & Hanson, H. (2010). Direct Formula to Compute Wave Height and Angle at Incipient Breaking. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 136(2), 119–122. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000030)
- LIFECOASTADAPT. (2024). *Protection of coastal values*.

- Malmberg Persson, K., Nyberg, J., Ising, J., & Rodhe, L. (2016). *Skånes känsliga stränder - erosionsförhållanden och geologi för samhällsplanering*. www.sgu.se
- Manno, G., Anfusio, G., Messina, E., Williams, A. T., Suffo, M., & Liguori, V. (2016). Decadal evolution of coastline armouring along the Mediterranean Andalusia littoral (South of Spain). *Ocean and Coastal Management*, 124, 84–99.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.02.007>
- McCarroll, R. J., Masselink, G., Valiente, N. G., Scott, T., Wiggins, M., Kirby, J. A., & Davidson, M. (2021). A rules-based shoreface translation and sediment budgeting tool for estimating coastal change: ShoreTrans. *Marine Geology*, 435.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106466>
- Mentaschi, L., Voudoukas, M. I., Voukouvalas, E., Dosio, A., & Feyen, L. (2017). Global changes of extreme coastal wave energy fluxes triggered by intensified teleconnection patterns. *Geophysical Research Letters*, 44(5), 2416–2426. <https://doi.org/10.1002/2016GL072488>
- Moksnes, P. O., Gipperth, L., Eriander, L., Laas, K., Cole, S., & Infantes, E. (2021). *Handbook for restoration of eelgrass in Sweden - National guideline*. www.havochvatten.se
- Moksnes, P.-O., Gipperth, L., Eriander, L., Laas, K., Cole, S., & Infantes, E. (2016). *Förvaltning och restaurering av ålgräs i Sverige-Ekologisk, juridisk och ekonomisk bakgrund*. www.havochvatten.se
- Myndigheten för samhällsskydd och Beredskap. (2011). *Identifiering av områden med betydande översvämningsrisk Steg 1 i förordningen (2009:956) om översvämningsrisker - preliminär riskbedömning [Identification of areas with significant flood risk Step 1 in the ordinance (2009:956) about flood risks - prelimi.*
- Myndigheten för samhällsskydd och Beredskap. (2018). *Översyn av områden med betydande översvämningsrisk Enligt förordning (2009:956) om översvämningsrisker [Review of areas with considerable flood risk according to the ordinance (2009:956) about flood risk]*.
- Nasr, A., Björnsson, I., Honfi, D., Larsson Ivanov, O., Johansson, J., & Kjellström, E. (2019). A review of the potential impacts of climate change on the safety and performance of bridges. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 00(00), 1–21.
<https://doi.org/10.1080/23789689.2019.1593003>
- Nasr, A., Kjellström, E., Björnsson, I., Honfi, D., Ivanov, O. L., & Johansson, J. (2019). Bridges in a changing climate: a study of the potential impacts of climate change on bridges and their possible adaptations. *Structure and Infrastructure Engineering*, 0(0), 1–12.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1670215>
- Naturvårdsverket. (2021). *Naturbaserade lösningar-ett verktyg för klimatanpassning och andra samhällsutmaningar*.
- Nawarat, K., Reynolds, J., Voudoukas, M. I., Duong, T. M., Kras, E., & Ranasinghe, R. (2024). Coastal hardening and what it means for the world's sandy beaches. *Nature Communications*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54952-1>
- Nerheim, S., Schöld, S., & Persson, G. (2017). *Framtida havsnivåer i Sverige*. 48.
- 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*.

- Pellón, E., de Almeida, L. R., González, M., & Medina, R. (2020). Relationship between foredune profile morphology and aeolian and marine dynamics: A conceptual model. *Geomorphology*, 351. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106984>
- Poate, T. G., McCall, R. T., & Masselink, G. (2016). A new parameterisation for runup on gravel beaches. *Coastal Engineering*, 117, 176–190. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.08.003>
- Pregolato, M., Ford, A., Wilkinson, S. M., & Dawson, R. J. (2017). The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.020>
- Psuty, N. P. (1988). Sediment budget and dune / beach interaction. *Journal of Coastal Research*, 3(3), 1–4.
- Ricciardi, G., Ellena, M., Barbato, G., Alcaras, E., Parente, C., Carcasi, G., Zarelli, C., Franciosi, A., & Mercogliano, P. (2024). Risk assessment of national railway infrastructure due to sea-level rise: an application of a methodological framework in Italian coastal railways. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12942-2>
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- Rutgersson, A., Kjellström, E., Haapala, J., Stendel, M., Danilovich, I., Drews, M., Jylhä, K., Kujala, P., Larsén, X. G., Halsnæs, K., Lehtonen, I., Luomaranta, A., Nilsson, E., Olsson, T., Särkkä, J., Tuomi, L., & Wasmund, N. (2022). Natural hazards and extreme events in the Baltic Sea region. In *Earth System Dynamics* (Vol. 13, Issue 1, pp. 251–301). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/esd-13-251-2022>
- SGI. (n.d.-a). *Katalog över naturanpassade erosionsskydd*. <https://www.sgi.se/Sv/Vagledning-i-Arbetet/Stranderosion/Fran-Inventering-till-Atgard/Atgarder-for-Skydd-Mot-Stranderosion/Katalog-over-Naturanpassade-Erosionsskydd/>.
- SGI. (n.d.-b). *Kustdataportal*. <https://gis.sgi.se/Kustdataportal/>.
- Simonsson, L., Liljedahl, B., Wikström, P., & Waleij, A. (2017). Höga havsnivåer och översvämningar. In *FOI Rapport*. FOI. <https://www.msb.se/contentassets/b92f1d4d7b174d9f8614aafa3af83c7d/foi-hoga-havsnivaer-och-oversvamningar.pdf>
- SMHI. (n.d.). *Ladda ner oceanografiska observationer*. <https://www.smhi.se/Data/Oceanografi/Ladda-Ner-Oceanografiska-Observationer>.
- SMHI. (2020, November 30). *Framtida medelvattenstånd*. <https://www.smhi.se/Klimat/Stigande-Havsnivaer/Framtida-Medelvattenstand-1.165493>.
- Soomere, T. (2023). Numerical simulations of wave climate in the Baltic Sea: a review. *Oceanologia*, 65(1), 117–140. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.01.004>
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sand*.
- Stive, M. J. F., De Schipper, M. A., Luijendijk, A. P., Aarninkhof, S. G. J., Van Gelder-Maas, C., Van Thiel De Vries, J. S. M., De Vries, S., Henriquez, M., Marx, S., & Ranasinghe, R. (2013). A new alternative to saving our beaches from sea-level rise: The sand engine. *Journal of Coastal Research*, 29(5), 1001–1008. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00070.1>

- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>
- Trafikverket. (2018). *Regeringsuppdrag om Trafikverkets klimatanpassningsarbete: Vol. 2018:195*.
- Trafikverket. (2020). *Trafikverkets klimat- och sårbarhetsanalys 2019*.
- Trafikverket. (2024). *Naturbaserade lösningar för att hantera klimatrelaterade risker vid trafikinfrastrukturprojekt*.
- Viavattene, C., Jiménez, J. A., Ferreira, O., Priest, S., Owen, D., & McCall, R. (2018). Selecting coastal hotspots to storm impacts at the regional scale: a Coastal Risk Assessment Framework. *Coastal Engineering*, 134, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.09.002>
- Wolinsky, M. A., & Brad Murray, A. (2009). A unifying framework for shoreline migration: 2. Application to wave-dominated coasts. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114(1). <https://doi.org/10.1029/2007JF000856>