RAPPORT

GÖTEBORG STAD

Vind- och vågeffekter Göta älv

UPPDRAGSNUMMER 13009377

BERÄKNINGAR AV VÅGHÖJDER, VÅGÖVERSPOLING OCH ERFORDERLIG NIVÅ PÅ HÖGVATTENSKYDD MOT ÖVERSPOLNING

UTKAST

VERSION 2

2020-03-30

KUST OCH VATTENDRAG, MALMÖ

Sweco Environment AB

EMANUEL SCHMIDT
VIKTOR KALÉN
CHARLOTTA LÖVSTEDT

SWECO

Ändringsförteckning

VER.	ÄNDRAD AV	ÄNDRINGAR	GRANSKAD	GODKÄND
2.	SEESCH	REVIDERING EFTER GRANSKNING AV GÖTEBORG STAD		

Sweco
Drottningtorget 14
Box 286
SE 201 22 Malmö, Sverige
Telefon +46 (0)4 016 70 00
Fax
www.sweco.se

Sweco Environment AB
RegNo: 556346-0327
Styrelsens säte: Stockholm

Emanuel Schmidt
Civilingenjör
Malmö

Mobil +46 (0)703 72 94 97
emanuel.schmidt@sweco.se

Förord

Denna rapport har tagits fram av Sweco på uppdrag av Stadsbyggnadskontoret (SBK), Göteborg stad. Arbetet påbörjades i oktober 2019 och färdigställdes i mars 2020.

Beställarens organisation har bestått av:

Lisa Ekström, klimatstrateg på SBK och

Ulf Moback, SBK, klimatanpassning med tonvikt på översvämningar.

Uppdragsorganisationen på Sweco har bestått av:

Charlotta Lövstedt, uppdragsledare, expert modellering

Emanuel Schmidt, biträdande uppdragsledare, vågmodellering och överspolningsberäkningar

Viktor Kalén, överspolningsberäkningar, datahantering (analys, presentation, beräkningar)

Sebastian Bokhari Irminger, kompetensresurs klimatpåverkan och statistik samt reservuppdragsledare

Olof Persson, ombud

Alla fem ovan tillhör gruppen Kust och Vattendrag på Sweco Environment i Malmö.

Magnus Larson, expertgranskare vågberäkningar, Lunds tekniska högskola samt Kust och Vattendrag, Sweco Malmö

Magnus af Petersens, geotekniker, Sweco Civil i Göteborg

Lotte Meldgaard Petersen och Anders Helkjær, vågmodelleringsspecialister på Sweco Danmark har bistått med kompetens kring vågmodellering och uppspolningsberäkningar.

Malmö den 9 mars 2020

Charlotta Lövstedt

Uppdragsledare Sweco

Terminologi

I denna rapport används terminologi som för en läsare som inte är ämnesinsatt kan vara svårförstådd. Detta kapitel avser att ge en förklaring till ett antal begrepp som frekvent används i texten.

(Våg)överspolning – Överspolning av vatten över en konstruktion, naturlig eller byggd, till följd av vågverkan mot konstruktionen.

Krönhöjd – Total höjd av en konstruktion eller ett kustskydd, se Figur 0-1.

Fribord – Den del av en konstruktion som ligger över stillvattenytan, se Figur 0-1.

Kustlinjesländ - den våta delen (under medelvattenytan) av stranden närmast vattnet, se Figur 0-1.

Råhet – ett mått på en konstruktion (eller ett materials) friktion mot vatten.

Batymetri - terrängens fysiska form under vatten (motsvarigheten till topografi på land).

Konfidensintervall – Det intervall inom vilket det är 95% sannolikhet att värdet ligger inom.

RH2000 och RW – RH2000 är Sveriges nationella höjdsystem, RW ger höjder uttryckt relativt medelvattenståndet.

Analytisk lösning – Matematisk beräkning där exakta lösningar, oftast med hjälp av integraler och derivator, används för att hitta gränsvärden för olika funktioner. Det kan till exempel handla om en förändringstakt i exakt en tidpunkt.

Numerisk modell - Till skillnad från en analytisk beräkning, utgår en numerisk modell från analytiska uppställningar som delas in i stegintervall, diskretiserats, för att lösas. När det exempelvis gäller en 2D-modell sker inte beräkningarna kontinuerligt över hela området (vilket vore omöjligt) utan fördelas över området i ett antal punkter som är tillräckligt många för att kunna approximeras till att representera hela ytan och dess variationer.

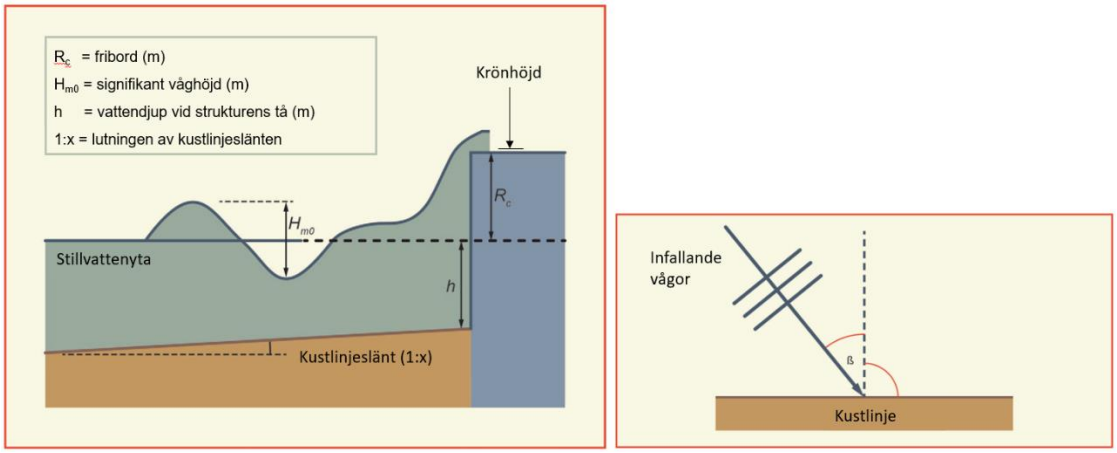
Våghöjd – det vertikala avståndet mellan en vågtopp och föregående vågdal.

Signifikant våghöjd – Medelhöjden av de 1/3 högsta vågorna i en tidsserie. Måttet har uppkommit för att stämma väl med äldre observationer, där sjömän uppskattade våghöjden med ögat.

Våglängd - det horisontella avståndet mellan vågtopp och föregående vågtopp.

Infallsvinkel – vinkel på infallande vågor relativt konstruktionens normal (streckad linje i Figur 0-1 t.h)

Gumbelfördelning – (eng: Generalized Extreme Value distribution). En extremvärdesfördelning som inom statistiken ofta används för att beskriva sannolikheten för extrema händelser, exempelvis översvämningar.



Figur 0-1 Förklaring av vanliga begrepp inom kusthydraulik. Bilder är hämtade från EurOtop (2018) och modifierade.

Sammanfattning

Introduktion

Utgångspunkten för föreliggande utredning är det tematiska tillägget *översvämningsrisker* till översiktsplanen för Göteborg stad (Göteborgs Stad, 2019). Göteborg stad har tagit ett inriktningsbeslut om att på medellång sikt (2040–2070) ha ett högvattenskydd på plats där marknivån inte uppfyller den planeringsnivå som beslutats. Detta älvkantskydd ska stå emot både högvatten och våguppspolning. På längre sikt (2070-framåt) har staden tagit ett inriktningsbeslut om att en yttre barriär ska finnas på plats.

Syftet med föreliggande utredning är att beräkna den extra skyddsnivå som krävs för att reducera överspolningen över älvkanten till acceptabla nivåer. Materialet från utredningen ska utgöra underlag för platsspecifika bedömningar av risker kopplade till vågeffekter och vilken extra hänsyn som behöver tas till dessa.

Bakgrund

De avgränsningar som gäller för föreliggande utredning som beslutats av Göteborg stad är:

- FN:s klimatpanels scenario (IPCC RCP 8,5) ska användas i stadens samtliga modeller för klimatförändringar.
- Älvkantskyddet ska framför allt dimensioneras för att vara verksamma mellan år 2040 och 2070.
- Skydden ska dimensioneras för ett högvattenstånd i havet med 200 års återkomsttid när medelvattenståndet stigit med 0,3 m (ca år 2070). Skyddsnivå för dagens situation med återkomsttid på 200 år ska också inkluderas.
- Staden förordar strategier som bygger på löpande anpassning då det råder stora osäkerheter kring framtida havsvattennivåer.
- Utredningsområdet omfattar älvstranden från Älvsborgsbron i väster till järnvägsbron i Marieholm respektive till motorvägsbron över Säveån i öster.
- Beräkningarna inkluderar befintliga pirar och bryggor med en diskussion kring deras effekt och hur våguppspolningshöjderna kan förändras om dessa tas bort eller ändras. Undantaget är Masthuggskajen, där ska beräkningarna istället utgår från planerade kajer.

Vattennivån i utredningsområdet beror både på älvens flöde och havsvattenståndet samt lokala variationer av dessa. Vattenståndet i älvens styrs således av ett flertal olika processer, däribland vattenföring, vindar och lufttryck. Vågorna inne i hamnen kan förenklat sägas vara en kombination av vågor som byggs upp lokalt inne i hamnen och havsvågor som tagit sig genom skärgården och en bit in i hamnen. Olika delar av utredningsområdet har därmed olika förutsättningar när det gäller både vattenstånd och vågor.

Stillvattenytan vid extremhändelser med 200 års återkomsttid har beräknats till 237 - 249 cm (från havet till Agnesberg) år 2070 (interpolerat från tidigare beräkningar till år 2100 (SMHI, 2018). Den största komponenten är högvattennivån jämfört med medelnivån och den har också den största osäkerheten med ett konfidensintervall på 138–203 cm (kring angiven nivå på 171 cm).

Göteborgs skärgård är genom sin placering i förhållande till Danmarks norra udde, Skagen, relativt skyddad mot de vågor som vid kraftiga lågtryck når de nordliga delarna av Bohuslän. Observationer vid Trubaduren visar däremot att våghöjden utomskärs kan nå uppemot 5 meter. Perioder med höga våghöjder är tydligt kopplade till förhöjt vattenstånd. När vågor från djupt vatten rör sig in mot den grundare kustzonen samspelar många olika fysiska fenomen som omformar vågorna. Förändringen i vågornas storlek, riktning och energi i det kustnära området styrs i stor utsträckning av kustens form, öar och av bottentopografin (batymetrin). Göteborgs hamninlopp ligger väl skyddat bakom en örik skärgård och trots att ytterskärgården är relativt exponerad för vågor är det en mycket liten andel av vågenergin som kan förväntas nå hamninloppet.

När en våg med tillräcklig höjd och energi når en kajkant kan denna sköljas över av vågen (överspolning) och kan orsaka översvämning och skada även om stillvattenytan inte når över kajens kant.

Överspolning kan vara olika till sin karaktär, och således kan det differentieras mellan olika typer av överspolning. En första typ är överspolning över en konstruktion där vattenytan ligger nära konstruktionens högsta punkt och där vågorna kan skölja över hindret som en sammanhållen vattenkolumn. En andra typ av överspolning sker då vågor möter vertikala konstruktioner, bryter mot densamma för att därefter ändra riktning och spola över krönet. En tredje form av överspolning uppstår när vågor bryter mot sjösidan av konstruktionen och skapar stora volymer av spray som överspolar barriären med hjälp av sin egen rörelseenergi eller vinden.

Metodik

En konceptuell bild över metodiken i föreliggande utredning visas i Figur A. Utredningen inleddes med en genomgång av befintliga utredningar och relevanta data. Representativa stormscenarier för vågmodellering togs fram dels med historiska stormar, dels genom fiktiva stormar utifrån en statistisk analys. 16 historiska stormar och 4 fiktiva stormar baserade på statistik användes i utredningen.

För att identifiera lokala variationer i våghöjd simulerades vågklimatet i hamnen med 2D-modellering för de 20 scenarierna. Både inkommande vågor från skärgården och lokalt genererade vågor togs hänsyn till. Nya indata i form av reflektionskoefficienter för kajerna togs fram genom en fältinventering.

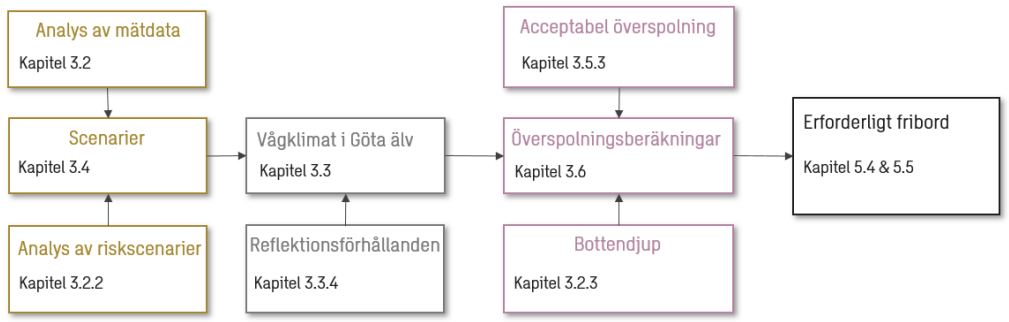
Resultaten längs kajen från samtliga modellerade scenarier sammanställdes i programvaran FME. Med hög upplösning längs kajen beräknades uppspolningshöjd och erforderlig höjd på uppspolningsskydd (fribord) för samtliga scenarier. I varje punkt valdes sedan den högsta erforderliga höjden för fribordet ut tillsammans med vilket scenario som

orsakat höjden. Kajkanten delades därefter in i längre delsträckor med liknade fribordshöjd i ett resulterande GIS-skikt som kan användas inom stadens planeringsarbete.

Vidare analyserades vilka parametrar som visat sig viktigast för fribordets höjd och en osäkerhetsanalys utfördes.

Sättningar och deras påverkan på totala skyddsnivån diskuterades övergripande.

Slutligen sammanställdes hur resultaten bör användas och vad som kan påverka resultattolkningen i framtiden.



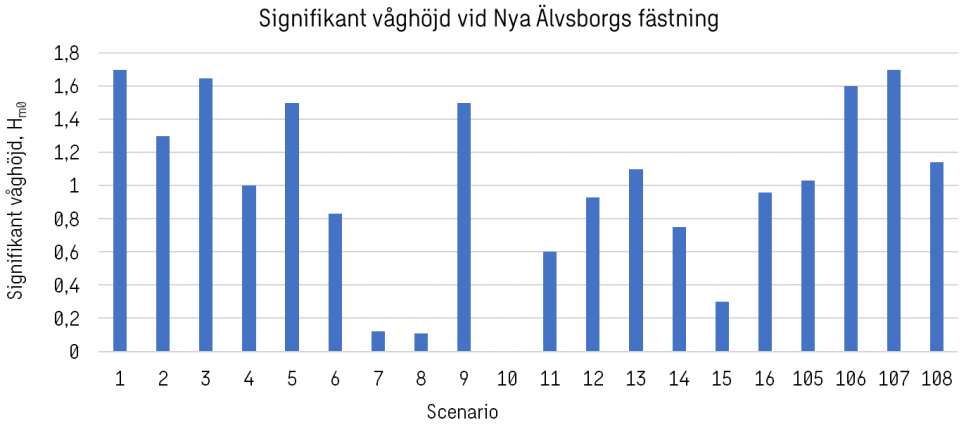
Figur A Konceptuell beskrivning av metodiken i föreliggande utredning. (Även Figur 4-1 i rapporten.)

Känslighetsanalys

Vågmodellerna kalibrerades mot vedertagna analytiska beräkningar och stämde därefter väl med förväntad våghöjd. Överspolningshöjden (fribordets höjd) var känsligast för variationer i våghöjd i jämförelse med infallsvinkel, kajens råhet (friktion på ytan) och typ av kaj (stenskoning eller vertikal kaj).

Resultat

Vågmodelleringen visade, som väntat, att skärgården med sina öar och uppgrundningar har en mycket stor dämpande effekt på vågorna. De dyningar når hamninloppet är således relativt små, och överskuggas av de vågor som lokalt genereras av vinden i skärgården. Modellresultaten indikerar att vågklimatet vid älvmynningen domineras av branta vågor med relativt korta perioder ($T_{m-1,0}$ = 3 - 4 s). Därutöver framgår av resultaten att vågklimatet vid mynningen är fullt utvecklat redan inom en timme av konstant vind. Beräknad våghöjd vid älvens mynning för samtliga scenarier visas i Figur B.



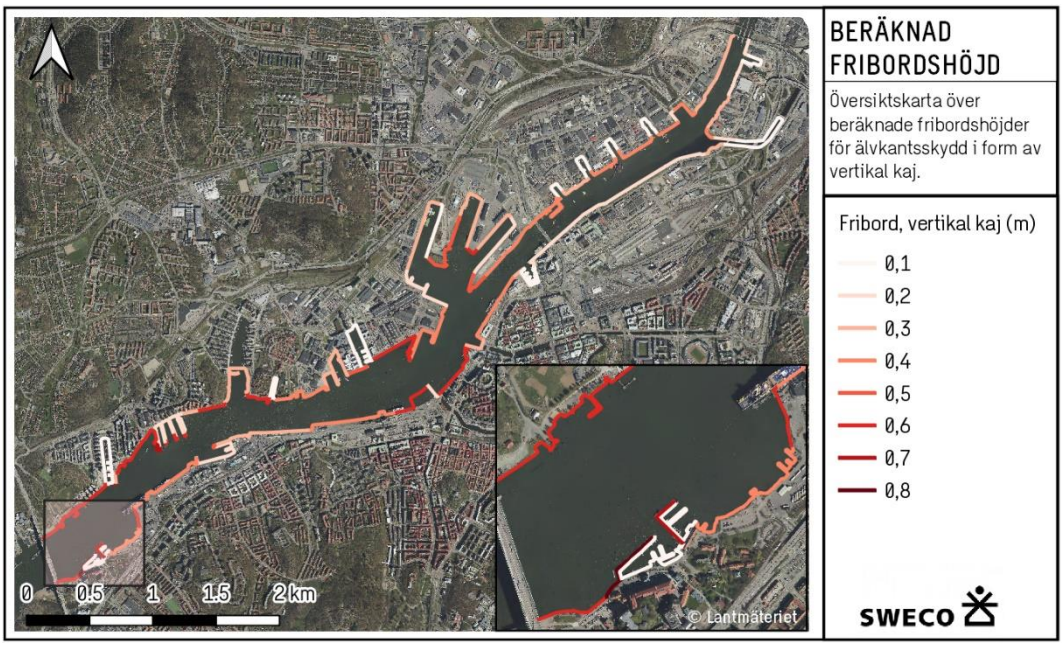
Figur B Modellerade våghöjder vid älvens mynning. (Även Figur 5-4 i rapporten.)

Simuleringen av vågornas penetration in i hamnen samt lokalt genererade vågor visade att våghöjden längs älvstranden är starkt beroende av vindriktning och att betydelsen av de lokalt genererade vågorna ökar med avståndet från hamninloppet. Uppströms Älvsborgsbron dominerar de lokalt genererade vågorna. Ytterligare en slutsats som kan dras från modelleringen är det faktum att pirar, utstickande kajer och bryggor är effektiva vågdämpare och därigenom i stor utsträckning styr våghöjden vid älvkanten.

Beräkningarna av erforderlig höjd på fribordet varierar mellan ca 0,1 – 0,8 meter och att höjden är starkt beroende av hamnens lokala geometri. De högsta fribordshöjderna återfinns i områden med hög vågexponering medan de lägsta höjderna återfinns i områden i lä. En analys av vilka scenarier som ger det högsta beräknade fribordet i varje punkt visar att det är fem scenarier som dominerar.

För södra älvstranden ger scenario 106 (fiktivt scenario - sydvästlig vind), scenario 107 (fiktivt scenario - västlig vind) och i viss mån även scenario 1 (historisk storm - västlig vind) högst fribordshöjder, och då framförallt för strandlinjer som ligger oskyddade från västlig vågexponering. För strandlinjer som vetter åt norr eller ligger skyddade av andra strukturer för västlig vågexponering, så är scenario 108 (fiktivt scenario - nordvästlig vind) dominerande.

För norra älvstranden (Hisingen) är det nästan genomgående scenario 2 (historisk storm - sydlig vind) som ger de högsta beräknade fribordshöjderna. De få undantagen är att scenario 106 (sydvästlig vind) är dominerande i sträckor som vetter mot sydväst och därmed exponeras av vågor från ytterskärgården. I Figur C visas det slutliga resultatet av beräknad fribordshöjd.



Figur C Figuren visar sträckindelning med fribordshöjder för vertikal kaj, totalt 73 sträckor. En generell trend är att fribordshöjden avtar österut. Det är också tydligt att sträckor som är skyddade av konstruktioner har en lägre fribordshöjd än den skyddande konstruktionen. Detta visas i det in zoomade området. Utan den yttra kajens skydd skulle strandlinjen behöva ett mycket högre fribord. (Även Figur 5-11 i rapporten.)

Alternativa tekniska lösningar

En effektiv åtgärd för att minska fribordshöjden är att tillåta vågorna att spola över ett område, en buffertzon, innan de möter en sekundär gränslinje. Överspolningsreduktionen för ett överspolningsskydd förskjutet från den primära gränslinjen (kajkanten) ökar med avståndet till skyddet. Skarpa riktlinjer för utformning av sådana lösningar saknas i litteraturen men senare studier kan ge indikativa resultat. Dessa diskuteras översiktligt i rapportens diskussionsdel.

Geotekniska aspekter

Längs kajstråken där huvuddelen av älvkantskydden kommer att anläggas varierar de pågående sättningarnas storlek mellan någon enstaka millimeter per år till upp emot 15–20 millimeter per år. Generellt återfinns de lägre sättningshastigheterna där kajkonstruktionerna är av modernt slag där konstruktionen grundlagts på längre pålar. Inom områden där denna typ av konstruktion inte förekommer är sättningshastigheten högre och detsamma gäller ofta för områdena bakom själva kajkonstruktionen.

Att tänka på vid användning av resultatet

De fribordshöjder som redovisas i denna utredning kan användas för att i ett tidigt skede få insikt i de platsspecifika utmaningarna kopplade till vind- och vågeffekter längs älvkanten. Utredningen ger en rekommendation för hur högt ett högvattenskydd behöver

byggas för att minimera risker kopplade till personskador, framkomlighet för fordon och skador på byggnadselement. Riktlinjerna för acceptabel överspolning (10 l/s,m) är i enlighet med EurOtop (2018) och berör de direkta riskerna från överspolande vatten.

En sekundär effekt av överspolning är att vatten kan transporteras till låglänt terräng bakom högvattenskyddet och orsaka översvämning. Om den bakomliggande terrängen tillåter att vatten ansamlas eller att det kan rinna ner till en lågpunkt behöver dessa risker utvärderas, vilket kan leda till att det kan behövas strängare överspolningskriterier och högre högvattenskydd. En platsspecifik bedömning bör därmed göras avseende ledningsnätets kapacitet (t.ex. pumpkapacitet), samt till lutningen av marken. Om marken som överspolas sluttar ner mot älven behövs inga strängare krav. I samband med att en utvärdering av lokala översvämningsrisker görs är det viktigt att ta hänsyn till att de extrema förhållanden som utredningen bygger på är med största sannolikhet i tid begränsade till storleksordningen 1–2 timmar.

För att illustrera hur en enkel bedömning kan göras följer ett räkneexempel. Vi utgår från att ett område längs älvstranden har en låg höjdsättning med lutning mot en lågpunkt i terrängen, men en ny kajkant har byggts enligt rekommendationer i denna rapport:

- Kajens längd (L) är 10 m, och designad för en överspolning (q) på 10 l/s,m under en 100-års händelse.
- En storm med 100-års återkomsttid inträffar, och vågklimatet är maximalt ogynnsamt.

Flödet av vatten (Q) som bakomliggande terräng förväntas motta uppgår då till:

$$Q = q\left[\frac{l}{s*m}\right] * L\,[m] = 10 * 10 = 100\frac{l}{s} = 0{,}1\,\frac{m^3}{s}$$

I detta räkneexempel behöver således ledningsnätet ha en kapacitet att avleda 0,1 m^3/s, om det inte kan accepteras att lågpunkten tillåts översvämmas.

Slutsatser

- Vågklimatet I Göta älv styrs huvudsakligen av lokalt genererade vågor, förutom i de yttersta delarna av älven där visst tillskott från skärgården är att förvänta. Våghöjder inom studieområdet understiger 1,0 meter för samtliga modellerade förhållanden.
- Exponeringen för vågor i olika delområden kan förändras till följd av ändringar i hamnens geometri, t.ex. genom förändrad utformning av kajer, pirer och bryggor.
- Erforderlig fribordshöjd för att reducera våguppspolningen till 10 l/s,m har beräknats till ett spann mellan 0,1 – 0,8 m i det avgränsade studieområdet.
    - ➢ De högsta fribordshöjderna återfinns i anslutning till hamnens mynning, och lägen med hög vågexponering.

  - De lägre värdena återfinns i områden i lä från de dominerande vågriktningarna.

- Den enskilt viktigaste parametern som styr höjden av högvattenskydden är vilka volymer överspolning som kan anses acceptabla. Därutöver spelar infallsvinkeln av vågor mot skyddskonstruktionen en viktig roll för fribordets höjd.
- Osäkerheterna i beräkningarna av fribordshöjd är små i förhållande till osäkerheter för medelvattenytans höjning, extremhögvatten och sättningshastighet, vilka alla ligger till grund för den totala erforderliga skyddshöjden.
- Den beräknade fribordshöjden är oberoende av vattenståndet, och denna nivå är således statisk i det avseende att det inte förändras till följd av klimatförändringar.
- Om Göteborgs Stad inte har ett storskaligt skydd på plats till 2070 behöver fribordshöjden längs älvkanten höjas i linje med förväntad stigning av medelvattenytan inom den tidshorisont man avser att skydden ska vara aktiva.
- Återkomsttiden av de dimensionerande metereologiska förhållandena i denna studie är okänd. Återkomsttiden för varje scenario beror på tre faktorer; vattenstånd, vindriktning och vindstyrka. Genom inkludering av extremscenarierna kan det dock konstateras att fribordshöjderna är dimensionerande för händelser med återkomsttider högre än 200 år.
- Stenskoningar är en konstruktionstyp som krävs mer plats än en vertikal kaj, men till gengäld kan erforderlig krönhöjd minskas i exponerade lägen. Vid låga våghöjder är skillnaden dem emellan mindre. Stenskoningar ger även upphov till minskad reflektion jämfört med en kaj, vilket kan bidra till ett lugnare vågklimat i dess närhet.
- När mer fördjupade utredningar eller projektering av älvkantskydden ska ske är det viktigt att sättningarna beaktas så att den erforderliga överkantshöjden på skydden kan säkerställas över tid.

Innehållsförteckning

1 Introduktion 1
1.1 Inledning 1
1.2 Syfte och mål 1
1.3 Avgränsningar 2
1.4 Tidigare studier 2

2 Bakgrund och teori 3
2.1 Göta älvs hydrodynamik 3
2.2 Extremvattenstånd i Göta älv 3
2.3 Planeringsnivåer 5
2.4 Göteborgs vågklimat 6
2.5 Överspolning 8

3 Metodik 10
3.1 Övergripande metodik 10
3.2 Underlag och indataanalys 10
3.2.1 Metereologiska data 11
3.2.2 Historiska stormar 12
3.2.3 Djupdata 13
3.2.4 Sättningar längs älvstranden 15
3.3 Vågmodellering 15
3.3.1 Programvara 16
3.3.2 Skärgårdsmodell 17
3.3.3 Hamnmodell 18
3.3.4 Inventering av reflektionsförhållanden 19
3.3.5 Superpositionering av vågor 20
3.4 Simulerade scenarier 20
3.4.1 Historiska stormar i ett framtida Göteborg 20
3.4.2 Extremscenarier 20
3.5 Överspolningsberäkningar 22
3.5.1 Bakgrund till kustingenjörsmanualen EurOtop 22
3.5.2 Primära faktorer som påverkar överspolning 23
3.5.3 Acceptabel överspolning 23
3.6 Beräkningsverktyg för vågöverspolning 25
3.7 Geotekniska förhållanden och sättningar längs älvstranden 26

4 Känslighetsanalys och kalibrering 28
4.1 Vågmodellering 28

4.2 EurOtop 29
4.2.1 Våghöjd 29
4.2.2 Grund kustlinjesländ 30
4.2.3 Infallsvinkel av vågor 31
4.2.4 Geometri 31
4.2.5 Råhet 31
4.2.6 Konstruktionstyp 32
4.2.7 Osäkerheter 33

5 Resultat 34
5.1 Reflektionskoefficienter 34
5.2 Vågor i innerskärgården 34
5.3 Vågor i hamnen 37
5.4 Överspolning och erforderligt fribord 41
5.4.1 Scenarier som styr beräknad fribordshöjd 42
5.5 Sträckindelning 42
5.6 Sättningar längs älvstranden 45

6 Diskussion 47
6.1 Alternativa tekniska lösningar 47
6.1.1 Förskjuten gränslinje 47
6.2 Geotekniska aspekter 48
6.3 Ackumulerade osäkerheter 49
6.4 Att tänka på vid användning av resultat 50

7 Slutsatser 52

8 Digital leverans 54

9 Referenser 55

Bilagor

1 Introduktion

1.1 Inledning

Utgångspunkten för denna utredning är det tematiska tillägget *översvämningsrisker* till översiktsplanen för Göteborg stad (Göteborgs Stad, 2019). Syftet med det tematiska tillägget till översiktsplanen är ”*att redovisa mål och strategier för klimatanpassning med avseende på översvämningsrisker i stadsplaneringen*.”

Göteborg stad har tagit ett inriktningsbeslut om att på medellång sikt (2040–2070) ha ett älvkantskydd på plats där marknivån inte uppfyller den planeringsnivå som beslutats. Detta älvkantskydd ska stå emot både högvatten och våguppspolning. På längre sikt (2070-framåt) har staden tagit ett inriktningsbeslut om att en yttre barriär ska finnas på plats. I TTÖP beskrivs tidshorisonten även som ”*Den kritiska tidpunkten mellan medellång och lång sikt definieras av när dagens planeringsnivåer inte ger tillräckligt skydd utan behöver kompletteras med någon form av storskaligt tekniskt skydd.*”

I TTÖP framgår syftet med älvkantskyddet: ”*Syftet med ett skydd längs älvkant är att skydda befintlig stad på medellång sikt, göra marken lämplig för stadens planering med avseende på högvatten och skapa förutsättningar för långsiktigt skydd. Älvkantskyddet kommer även behövas vid en eventuell etablering av yttre barriärer eftersom det minskar barriärernas stängningsbehov och minska översvämningsrisken bakom vid stängning.”* Vidare görs en bedömning i TTÖP att ”*ett älvkantskydd ska vara på plats senast år 2035 - 2040 då medelvattenytan då förväntas ha stigit med ca 0,1 m jämfört med dagens förhållanden.*”

Älvkantskydden ska enligt TTÖP ge ett effektivt skydd till en högvattennivå på lägst +2,3 m, vilket motsvarar nivån för högsta högvatten år 2070. Därtill ska marginaler för bland annat vågeffekter läggas till. Vågeffekterna ska utvärderas utifrån platsspecifika förhållanden. Bedömningen av vågeffekter har hitintills skett genom detaljutredningar för varje planområde (t.ex. för Pumpgatan-Lundbykajen (Tyréns; Hydrosense, 2018)) då ett översiktligt material saknats.

1.2 Syfte och mål

Syftet med föreliggande utredning är att beräkna den extra skyddsnivå som krävs för att reducera överspolningen över älvkanten till acceptabla nivåer. Materialet från utredningen ska utgöra underlag för platsspecifika bedömningar av risker kopplade till vågeffekter och vilken extra hänsyn som behöver tas till dessa.

Utredningen omfattar följande:

- Beräkningar av representativa våghöjder för dimensionerande stormar vid nuvarande och framtida vattennivåer längs med Göta älv
- Effekterna av lokala variationer i våghöjd och våguppspolningseffekter där vågorna möter kaj eller älvkantskydd

- Bedömning av risker och utformningsaspekter som kan kopplas till våguppspolningsskydd
- Belysa vilken hänsyn som bör tas till eventuella marksättningar
- Föreslå en lägsta höjd för älvkantskyddet för olika delsträckor för att uppnå stadens uppsatta skyddsnivåer på kort och medellång sikt
- Analys av vilka faktorer som är viktigast för val av skyddsnivå
- Beskrivning av hur resultaten ska användas samt hur de kan modifieras vid förändrade förutsättningar såsom nya rön kring havsnivåhöjning eller om den yttre barriären inte är på plats till år 2070.

1.3 Avgränsningar

De avgränsningar som gäller för utredningen, och som beslutats av Göteborg stad är:

- FN:s klimatpanels scenario (IPCC RCP 8,5) ska användas i stadens samtliga modeller för klimatförändringar.
- Älvkantskyddet ska framför allt dimensioneras för att vara verksamma mellan år 2040 och 2070.
- Skydden ska dimensioneras för ett högvattenstånd i havet med 200 års återkomsttid när medelvattenståndet stigit med 0,3 m (ca år 2070). Skyddsnivå för dagens situation med återkomsttid på 200 år ska också inkluderas.
- Staden förordar strategier som bygger på löpande anpassning då det råder stora osäkerheter kring framtida havsvattennivåer.
- Utredningsområdet omfattar älvstranden från Älvsborgsbron i väster till järnvägsbron i Marieholm respektive till motorvägsbron över Säveån i öster.
- Beräkningarna inkluderar befintliga pirar och bryggor med en diskussion kring deras effekt och hur våguppspolningshöjderna kan förändras om dessa tas bort eller ändras. Undantaget är Masthuggskajen, där ska beräkningarna istället utgår från planerade kajer.

1.4 Tidigare studier

SMHI har under de senaste åren författat två rapporter kring nivån i Göta älv i Göteborg: *Uppdaterad klimatanalys av havsvattenstånd i Västra Götalands Län* (2014) och *Extremvattenstånd i Göteborg* (2018). Den senare innehåller nya analyser av mätningar med hög tidsupplösning på flera platser i älven från mätstationer som installerades 2013 (se Figur 3-2 för geografisk placering av stationer). Dessa har gett nya insikter om vattenståndsvariationerna längs med älven i Göteborg. Rapporten omfattar även framtidsprognoser i enlighet med RCP 8,5 och lämpar sig därmed väl som underlag till denna utredning. (SMHI, 2014, 2018)

Ramböll färdigställde 2014 *Hydromodell Göteborg – översvämningsskydd längs Göta älv*, där framtida vattennivåer till följd av stigande havsnivåer, ökande nederbörd och ökande flöden i vattendragen simulerats. Ramböll har här gett principiella förslag till olika typer av älvkantskydd. (Ramböll, 2014)

Föreliggande utredning kopplar även till *Utformningsaspekter Högvattenskydd* av där konsekvenser av kajkantskydd för stadens dagvattenhantering utreds.

2 Bakgrund och teori

2.1 Göta älvs hydrodynamik

Göteborg är beläget i Göta älvs mynning. Älvflödet varierar vanligtvis mellan 100 och 250 m^3/s uppströms Säveåns mynning. När älven möter havet bildas en saltkil av havsvatten längs botten och ovanpå detta strömmar älvens sötvatten ut och blandar så småningom upp sig i havet. Flödet är reglerat på flera håll uppströms Göteborg, bland annat i Vänern. Dessutom är fördelningen av älvens flöde mellan Nordre älv och Göta älv nedströms förgreningen mot Nordre älv reglerad, så att den större delen av flödet uppströms denna förgreningen leds ut via Nordre älv. Flödet ut genom Nordre älv är ungefär dubbelt så stort som det som leds ut via Göteborg.

Älvens strand inom utredningsområdet består av konstruktioner såsom kajer, pirar och stenskoningar. Det finns i princip inga naturliga stränder inom utredningsområdet. Vidare är en hel del av området utfyllt i områden som tidigare varit en del av älven. Älvens botten muddras för att tillåta sjöfart och har inom större delen av utredningsområdet ett djup på 7–8 m, ofta ända in till kajkanten.

Vattennivån i utredningsområdet beror både på älvens flöde och havsvattenståndet samt lokala variationer av dessa. Vattenståndet i älvens styrs således av ett flertal olika processer, däribland vattenföring, vindar och lufttryck. Vågorna inne i hamnen kan förenklat sägas vara en kombination av vågor som byggs upp lokalt inne i hamnen och havsvågor som tagit sig genom skärgården och en bit in i hamnen. Olika delar av utredningsområdet har därmed olika förutsättningar när det gäller både vattenstånd och vågor.

2.2 Extremvattenstånd i Göta älv

För att beräkna nutida och framtida extremvattenstånd (stillvattenyta) behöver följande faktorer inkluderas:

- Extremvattenstånd, mätt från medelvattenståndet, för vald återkomsttid (här ingår också en tidvattensamplitud)
- Global höjning av medelvattenytan till följd av klimatförändringar
- Isostatisk landhöjning
- Lokal seiche (se nedan)
- Älvens lutning till följd av aktuell vattenföring

Utöver stillvattenytans nivå behöver hänsyn tas till effekter av vågor och sättningar hos skyddskonstruktioner för att få en slutlig bild av erforderlig kajkantshöjd.

SMHI (2018) har beräknat ett extremvattenstånd (relativt medelvattenytan) med 200 års återkomsttid till +171 cm i Göteborg utanför älvmynningen, med ett konfidensintervall (95%) på 138–203 cm. Underlaget för beräkningarna utgörs av mätdata från Torshamnen från 1967 och framåt. Tidvattenamplituden på ca 10 cm ryms inom nivåmätningarna, och ingen extra hänsyn till tidvatten behöver därmed tas.

Vidare har SMHI (2018) redovisat den globala höjningen av medelvattennivån (för RCP 8,5) till +74 cm från år 1995 till år 2100. Under samma period anger SMHI (2018) landhöjningen i Göteborg till 32 cm. Förväntade nivåer till 2040 och 2070 visar, genom interpolation, en global stigning av medelvattennivån på +32 cm och +52 cm för år 2040 respektive 2070 vilket frånräknat landhöjning ger en nettostigning av medelvattenytan till +18 cm år 2040 och 29 cm år +2070.

SMHI (2018) har identifierat en lokal svängning av vattenytan (seiche) mellan inre Göteborg och skärgården utanför hamnen med en period på ca 80 min. Denna seiche har bara kunnat identifierats efter att de nya mätarna med hög upplösning i tid installerades 2013. Seichen har högst amplitud vid mätstationen vid Tingstadstunneln. Eftersom mätserien är kort och det inte är helt klarlagt än vad som ger hög respektive låg amplitud har SMHI valt att lägga till en konstant nivå på 30 cm (vilket är den högsta uppmätta seicheamplituden hittills) på maxnivån i hela Göteborg.

Älven lutar inom Göteborg som en följd av vattenföringen och där anger SMHI (2018) en förhöjning vid Marieberg–Agnesberg på ca 12 cm jämfört med havsnivån.

De olika komponenterna för extremvattennivåerna redovisas i Tabell 2-1 tillsammans med totalsumman för de olika tidshorisonterna 2040 och 2070 samt för tre olika delar av utredningsområdet (samma indelning som SMHI (2018) använder sig av). För 2040 summerar nivåerna till mellan 226 cm och 238 cm (från havet till Agnesberg) och motsvarande summor för 2070 blir 237 cm respektive 249 cm.

Tabell 2-1 Extremvattennivåer och dess komponenter.

(cm)	Älvsborgsbron - Göta älvbron	Göta älvbron-Marieholm	Marieholm-Agnesberg	Kommentar
RH2000-justering	+7	+7	+7	Medelnivå 1995, RH2000 (SMHI, 2018)
Högvatten med 200-års återkomsttid	+171	+171	+171	Torshamnen, konfidensintervall 138–203 cm (SMHI, 2018), inkl. tidvatten.
Global höjning 2040	+32	+32	+32	Linjär interpolation mellan 0–74 cm (1995–2100), SMHI (2018)

Landhöjning 2040	-14	-14	-14	Linjär interpolation mellan 0–32 cm (1995–2100), SMHI (2018)
Global höjning 2070	+52	+52	+52	Linjär interpolation mellan 0–74 cm (1995–2100), SMHI (2018)
Landhöjning 2070	-23	-23	-23	Linjär interpolation mellan 0–32 cm (1995–2100), SMHI (2018)
Lokal seiche	+30	+30	+30	SMHI (2018): ”kan uppgå till ungefär 30 cm” troligtvis lägre ut mot Älvsborgsbron.
Älvens lutning	0	+4	+12	Medellutning enligt SMHI (2018)
SUMMA 2040	**+226**	**+230**	**+238**	RH2000
SUMMA 2070	**+237**	**+241**	**+249**	RH2000

Den största komponenten i extremhögvattennivån är vattennivån jämfört med medelnivån (+171 cm). De högsta nivåerna längs västkusten uppstår framför allt vid stormar med vindar från väst. Dessa skapas då lågtryck passerar och skapar vindar från sydost till syd för att sedan vrida mot sydväst och väst. Vid de västliga vindarna fås de högsta havsvattenstånden. Därefter vrider vindarna ofta mot nordväst och nord under den fortsatta lågtryckspassagen. Förloppet tar vanligtvis 12–24 timmar och de högsta vattennivåerna uppstår därmed alltså relativt kortvarigt. Vattenståndet i Göteborg påverkas framförallt av de storskaliga vindarna i kombination med lågtrycket och den lokala vinden är av mindre avgörande. (SMHI, 2014)

I SMHI (2018) anges inte vinduppstuvning som en komponent i högvattnet. Det framgår inte varför. Troligtvis ryms dock en vinduppstuvningskomponent inom felmarginalen för seichen. I SMHI (2014) anges att vinduppstuvningseffekten kan leda till att vattenståndet i Lärjeholm (mellan Marieholm och Agnesberg) blir 0,2–0,3 m högre än vattenståndet i Torshamnen. Det är dock möjligt att det som i den tidigare utredningen uppfattades som vinduppstuvning i den senare utredningen visade sig vara effekter av seichen.

Utöver skydd mot extrem stillvattennivå tillkommer vid kajkanten även ytterligare en nivå för att skydda mot vågtoppar och vågöverspolning som föreliggande rapport syftar till att komplettera extremvattenståndsanalysen med. Vidare krävs också hänsyn till sättningar i kajkanten som redovisas översiktligt i kapitel 5.6.

2.3 Planeringsnivåer

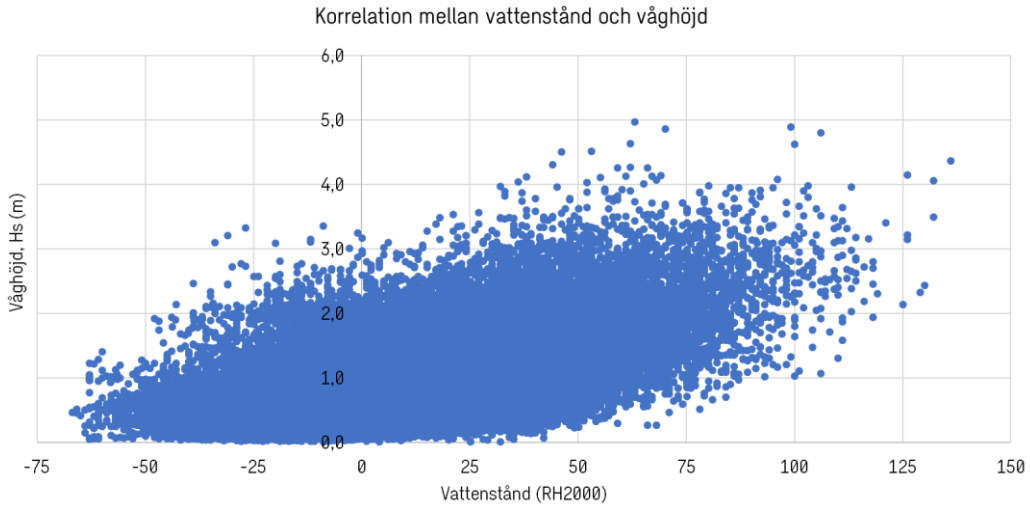
Göteborgs stads tematiska tillägg *översvämningsrisker* till översiktsplanen innehåller information vilka planeringsnivåer som ska gälla för nybyggnation. Underkant bjälklag för samhällsviktig anläggning ska i den centrala staden ligga på +3,8 m. Vid kusten är motsvarande nivå +3,5 m och norr om Marieholmsbron ligger planeringsnivån på +4,0 m.

När det gäller byggnader och byggnadsfunktion är motsvarande siffror +2,8 m för centrala staden, +2,5 m för kusten och +3,0 för norr om Marieholmsbron. Utgångspunkten för dessa nivåer är att ett extremhögvatten med 200 års återkomsttid ligger på +2,3 m i centrala Göteborg. Tabell 2-1 visar att 2,3 m motsvarar ett extremhögvatten med 200 års återkomsttid kan ske redan 2040 och siffran för 2070 borde snarare vara +2,4 m i enlighet med siffrorna från SMHI. Planeringsnivån utgår från en marginal över extremhögvattennivån på +0,5 meter för att ta hänsyn till vind- och vågeffekter.

Längs Göta älv finns både bebyggda områden och planerade nybyggnadsområden på en lägre höjd än planeringsnivån. För att kunna göra undantag från planeringsnivåerna krävs därför skydd mot högvatten med hjälp av ett älvkantskydd på medellång sikt och yttre barriär på längre sikt.

2.4 Göteborgs vågklimat

Göteborgs skärgård är genom sin placering i förhållande till Danmarks norra udde, Skagen, relativt skyddad mot de vågor som vid kraftiga lågtryck når de nordliga delarna av Bohuslän. Observationer vid Trubaduren (se Figur 3-2) visar däremot att våghöjden utomskärs kan nå uppemot 5 meter. Perioder med höga våghöjder är tydligt kopplade till förhöjt vattenstånd, vilket synliggörs i en korrelationsanalys av våghöjder och vattenstånd presenterad i Figur 2-1. Figurens y-axel redovisar uppmätta våghöjder vid Trubaduren boj och x-axeln visar samtida vattenstånd vid Torshamnen.



Figur 2-1 Korrelationsanalys mellan våghöjd (y-axel) och vattenstånd (x-axel). Vågdata är hämtad från Trubaduren boj (SMHI Stationsid 35070) och vattenstånd från Torshamnen (SMHI Stationsid 2109).

När vågor från djupt vatten rör sig in mot den grundare kustzonen samspelar många olika fysiska fenomen som omformar vågorna. Förändringen i vågornas storlek, riktning och energi i det kustnära området styrs i stor utsträckning av kustens form, öar och av bottentopografin (batymetrin). Göteborgs hamninlopp ligger väl skyddat bakom en örik

skärgård och trots att ytterskärgården är relativt exponerad för vågor är det en mycket liten andel av vågenergin som kan förväntas nå hamninloppet. Ett tydligt exempel på detta kan utrönas från ett flygfotografi från Vinga (Figur 2-2) där det tydligt framgår hur vågornas riktning förändras och våghöjden avtar inomskärs. Då skärgården i hög utsträckning reducerar våghöjden in mot hamninloppet, så är de största vågorna som når dit relativt kortperiodiga vågor som skapas av vinden lokalt i innerskärgården.

Figur 2-2 Vågornas diffraktionsmönster kring Vinga. Öarna medför att vågornas riktning ändras och våghöjden minskas. Vågorna rör sig i riktning från övre vänstra hörnet mot nedre högra hörnet i fotot. Bildkälla: Google Earth 2020.

De två huvudsakliga fenomen som styr våghöjden hos vågor som faller in mot en hamn är diffraktion och reflektion. Diffraktion är ett fenomen som uppträder när vågor böjer av runt ett hinder och en del av energin fördelas in mot det område som är i lä bakom hindret. När vågor möter exempelvis öar och pirar sker därmed en riktningsförändring hos vågorna, och generellt medför det en reduktion av våghöjderna bakom hindret. Vågriktningen kan även böja av vid förändringar i bottendjup, vilket kallas refraktion.

När vågor möter ett hinder reflekteras hela eller delar av vågenergin, vilken således rör sig vidare i vattnet med en annan riktning. Reflektion är fenomen som ofta skapar problem i hamnar, där reflektionen mot kajer är stor. Om området genom vilket vågenergin kan lämna hamnen är litet kan hög vågenergi succesivt byggas upp inne i hamnen (vågorna studsar runt i hamnen).

Ett vanligt sätt att beskriva hur mycket vågenergi som reflekteras mot ett hinder är att beskriva det genom ett förhållande mellan den infallande och reflekterade vågens höjd, vilket benämns reflektionskoefficient. Reflektionskoefficienten (C_r) är därmed 1 vid fullständig reflektion. Högst reflektionskoefficienter fås vid släta vertikala konstruktioner där 95–100% av vågenergin kan reflekteras (C_r = 0,95 – 1). För naturlig, svagt sluttande sandstrand reflekteras generellt 5–10% av vågenergin (C_r = 0,05 – 0,1). (CIRIA; CUR; CETMEF, 2012)

Mätningar av vågor saknas både i Göteborgs innerskärgård och i Göta älv, men SMHI konstaterar genom enklare beräkningar att våghöjden vid Älvsborgsbron torde kunna uppgå till en meter. (SMHI, 2014)

2.5 Överspolning

Med överspolning menas i denna rapport den vattenmassa som till följd av vågors interaktion med fasta strukturer spolar över en förutdefinierad gränslinje. I föreliggande rapport innebär denna gränslinje generellt kajkanter och krön av stenslänter längs älvstranden.

Överspolning kan vara olika till sin karaktär, och således kan det differentieras mellan olika typer av överspolning (se Figur 2-3). En första typ är överspolning över en konstruktion där vattenytan ligger nära konstruktionens högsta punkt och där vågorna kan skölja över hindret som en sammanhållen vattenkolumn. En andra typ av överspolning sker då vågor möter vertikala konstruktioner, bryter mot densamma för att därefter ändra riktning och spola över krönet. En tredje form av överspolning uppstår när vågor bryter mot sjösidan av konstruktionen och skapar stora volymer av spray som överspolar barriären med hjälp av sin egen rörelseenergi eller vinden. Notera att vågor kan spola över konstruktioner som är högre än vågtoppen på grund av dess rörelseenergi.

Figur 2-3 Olika typer av överspolning. Bildkällor, fr. vänster HR Wallingford, Leichtweiss-Institute for Hydraulics (LWI), Lloyd Rusell via phys.org.

Konsekvenserna av överspolning av vågor kan delas in i fyra generella kategorier:

- Skador på konstruktioner och översvämningsskydd vid gränslinjen, vilket potentiellt kan leda till översvämning.
- Direkt fara och risk för liv för fotgängare, cyklister eller personer i fordonstrafik i närheten av gränslinjen.

- Skada på fastigheter och infrastruktur i det skyddade området och störningar av exempelvis framkomlighet och transportsystem.
- Översvämningar med lågt vattendjup (vilket kan skada byggnader exempelvis). Dessa översvämningar kan dock leda till materiella skador.

De överspolningskriterier som preciseras som designförutsättningar i kapitel 3.5.3 bygger på att överspolningen ska begränsas till ett acceptabelt flöde under vilket det kan anses säkert för fotgängare, fordonstrafik och byggnadsfunktioner.

I urbana miljöer, likt centrala Göteborg, utgör ofta dagvattennätet den enda avrinningsmöjligheten. I händelse av att dagvattennätets avledande funktion är begränsad av höga vattenstånd kan därmed överspolning orsaka stora skador. I områden där terrängen inte tillåter en direkt avrinning tillbaka till älven kan därmed det vara aktuellt att utvärdera vilken belastning av vatten platsen tål. Överspolningskriteriet kan därmed behöver sänkas om risk för översvämning av bakomliggande terräng föreligger.

3 Metodik

3.1 Övergripande metodik

En konceptuell bild över utredningens metodik visas i Figur 3-1. Utredningen inleddes med en genomgång av befintliga utredningar och relevanta data. Representativa stormscenarier för vågmodellering togs fram dels med historiska stormar, dels genom fiktiva stormar utifrån en statistisk analys.

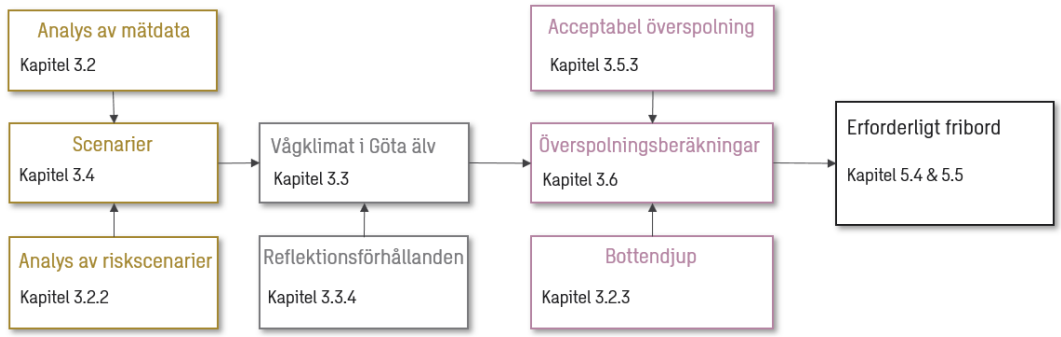
För att identifiera lokala variationer i våghöjd simulerades vågklimatet i hamnen med 2D-modellering. Både inkommande vågor från skärgården och lokalt genererade vågor togs hänsyn till. Nya indata i form av reflektionskoefficienter för kajerna togs fram genom en fältinventering.

Resultaten längs kajen från samtliga modellerade scenarier sammanställdes i programvaran FME. Med hög upplösning längs kajen beräknades uppspolningshöjd och erforderlig höjd på uppspolningsskydd (fribord) för samtliga scenarier. I varje punkt valdes sedan den högsta erforderliga höjden för fribordet ut tillsammans med vilket scenario som orsakat höjden. Kajkanten delades därefter in i längre delsträckor med liknade fribordshöjd i ett resulterande GIS-skikt som kan användas inom stadens planarbete.

Vidare analyserades vilka parametrar som visat sig viktigast för fribordets höjd och en osäkerhetsanalys utfördes.

Sättningar och deras påverkan på totala skyddsnivån diskuterades övergripande.

Slutligen sammanställdes hur resultaten bör användas och vad som kan påverka resultattolkningen i framtiden.



Figur 3-1 Konceptuell beskrivning av utredningsmetodiken.

3.2 Underlag och indataanalys

En viktig hörnsten i arbetet med kustnära planering är att förstå hur olika väderfenomen samspelar. Den kunskap som finns samlad i SMHI:s tidigare studier har kompletterats med ytterligare studier av tillgängliga metereologiska observationer. I följande underkapitel beskrivs vilka metereologiska data som inhämtats, vilken djupdata som

ligger till grund för vågmodellering samt generella datakällor som använts till utvärdering av älvkantens sättningshastighet.

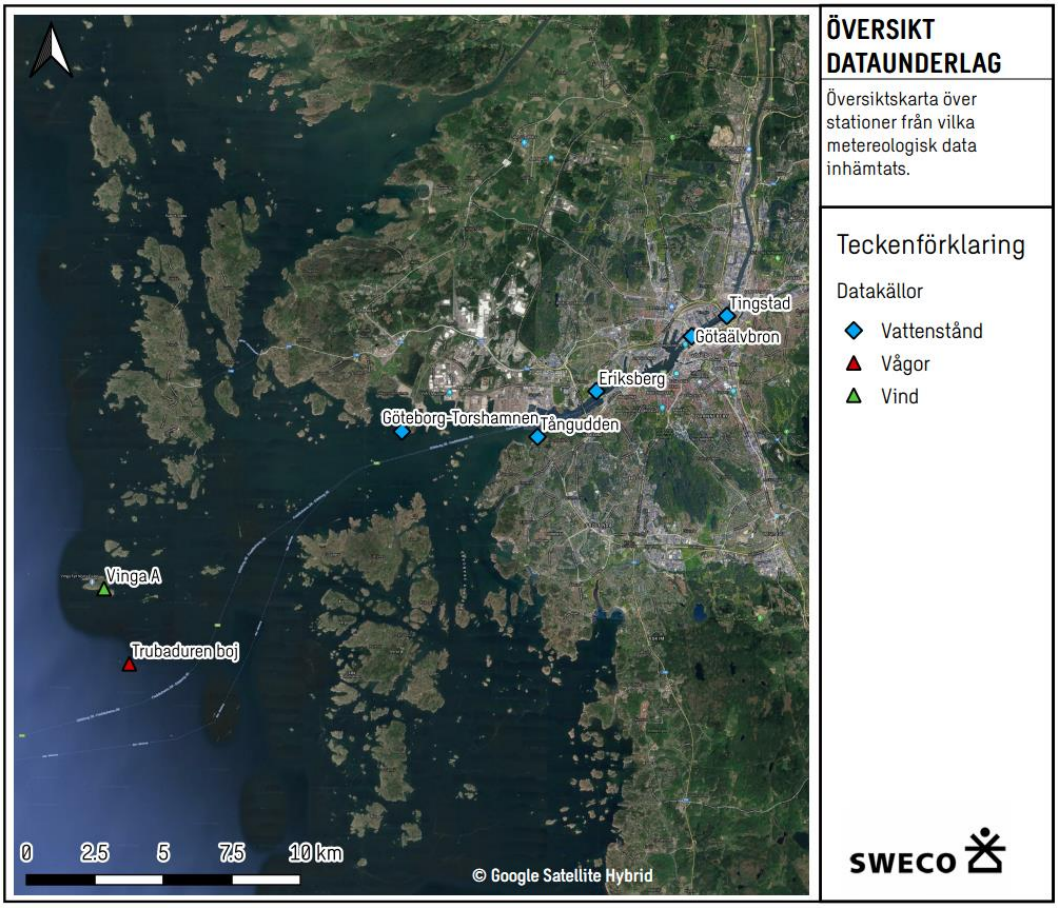
3.2.1 **Metereologiska data**

Den längsta tidsserie av vattenståndsdata i Göteborgsregionen är från SMHI:s station Göteborg-Torshamnen (1967 – 2019). Data från denna station ligger till huvudsaklig grund för tidigare vattenståndsstudier, men från 2013 finns även vattenståndsdata från ett antal stationer uppströms i Göta älv (Tångudden, Eriksberg, Götaälvbron och Tingstad).

Vindriktning och vindhastighet har hämtats från SMHI:s vindstation Vinga A (1949 – 2019) och kompletterats med data från Trubaduren Aut (1978 – 2007).

Vågdata har hämtats från SMHI:s vågboj Trubaduren boj (1978–2003). Vågdata från denna boj har använts för att definiera randvillkor för modeller. Vågmätningar i innerskärgården saknas.

Samtliga mätstationers geografiska placering presenteras i Figur 3-2.



Figur 3-2 Översiktskarta över stationer från vilka metereologiska data inhämtats.

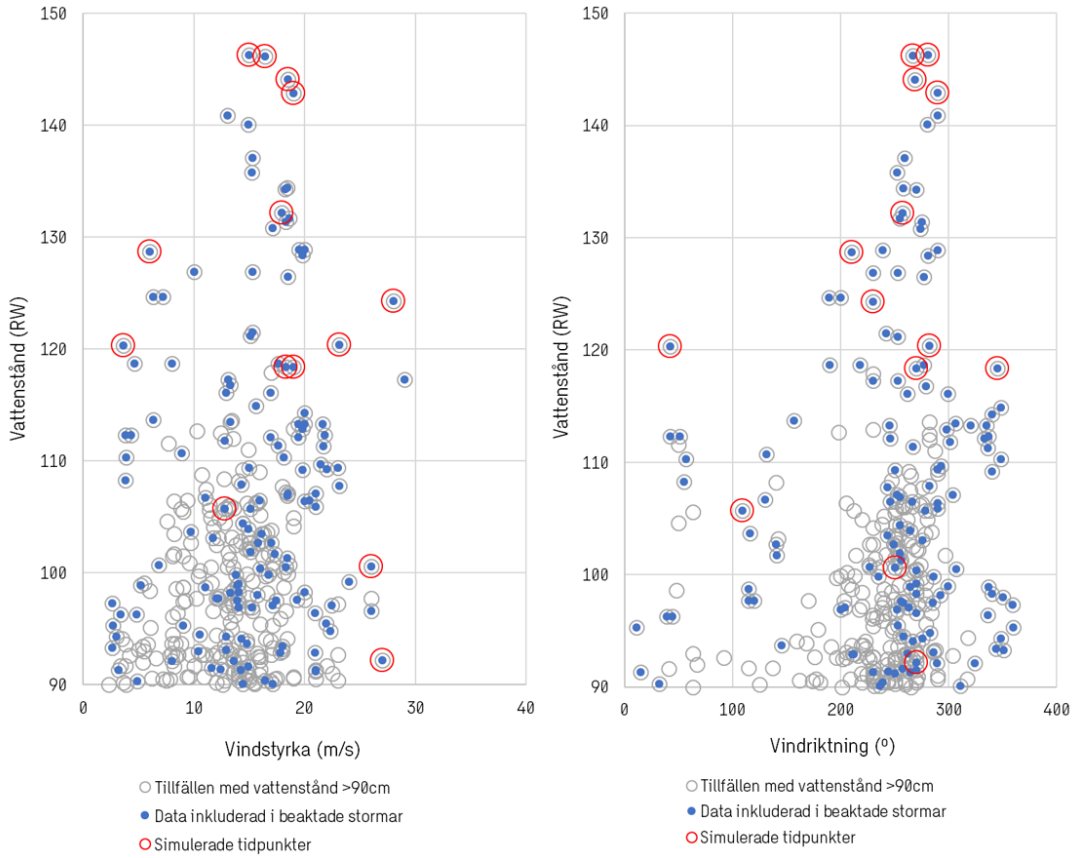
3.2.2 **Historiska stormar**

Vid design och dimensionering av överspolningsskydd på öppna kuster är det ofta tydligt vilka väderförhållanden som bör utgöra en dimensionerande händelse. I sådana händelser är det möjligt att beräkna återkomsttider för maximalt ogynnsamma förhållanden. Studieområdet inom detta projekt är dock stort, och hamnens geometri komplex. Till följd av områdets storlek och varierande geometri är det således omöjligt att utröna ett specifikt händelseförlopp eller storm som kan anses vara dimensionerande och ha en viss återkomsttid för hela området.

För att skapa en överblick över vilka hydrodynamiska förhållanden som är mest problematiska för centrala Göteborg med avseende på vågöverspolning har en studie över historiska stormar utförts. Genom att samla in, sammanställa och analysera historiska stormdata avseende vind (styrka och riktning) samt vattenstånd har en bild över hur dessa samvarierar skapats.

Urvalet i datainsamlingen har begränsats till tillfällen med ett vattenstånd högre än +90 cm (relativt medelvattenståndet, RW) eller en vindhastighet över 33 m/s. Vattenståndsdata har hämtats från SMHI:s station Torshamnen (1967 – 2019) och vindar har hämtats från SMHI:s station Vinga A (1949 - 2019). Dataserierna från dessa stationer är inte kompletta och stormtillfällen har endast inkluderats i analysen då samtida vind- och vattenståndsobservationer varit tillgängliga.

Urvalet av stormar presenteras grafiskt i Figur 3-3. Graferna visar de observationer som uppfyller ovan nämnda kriterier, där den vänstra grafen visar sambandet mellan vattenstånd (RW) och vindstyrka (m/s) och den högra grafen mellan vattenstånd (RW) och vindriktning (°). De grå punkterna visar alla tillfällen som uppfyller urvalskriterierna. Från hela urvalet har 16 relevanta stormepisoder valts ut där samtliga punkter inom händelseförloppet markerats med en blå punkt. Slutligen har kulmen för respektive händelseförlopp markerats med en röd ring.



Figur 3-3 Historiska tillfällen med högt vattenstånd (+90 cm rel. medelvattenyta) vid Torshamnen i Göteborg. Graferna visar hur högvatten historiskt har korrelerat med vindstyrka och riktning.

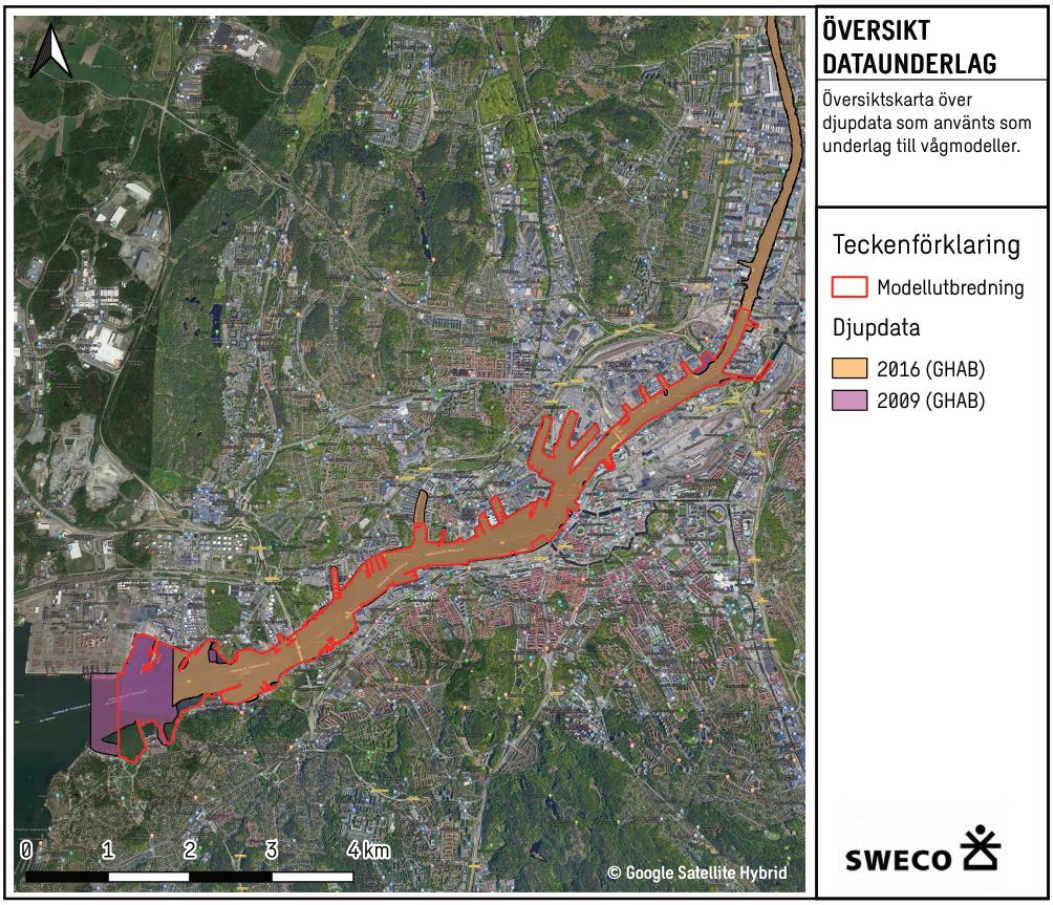
Grafen över vindstyrka visar att kulmen av vattenståndet inte alltid sammanfaller med de kraftigaste vindarna och därmed heller inte alltid med extrema våghöjder. Vindhastigheten vid de maximalt uppmätta vattenståndsnivåerna ligger generellt kring 15 – 20 m/s.

Vindriktningsgrafen synliggör det faktum att de högsta högvattnen uppträder under stormar med en huvudsaklig vindriktning från syd till väst (180–300°), med särskilt tonvikt på riktningar kring väst (250–290°). Det ska dock poängteras att höga vattenstånd kan noteras även under tillfällen med vind från andra riktningar.

3.2.3 **Djupdata**

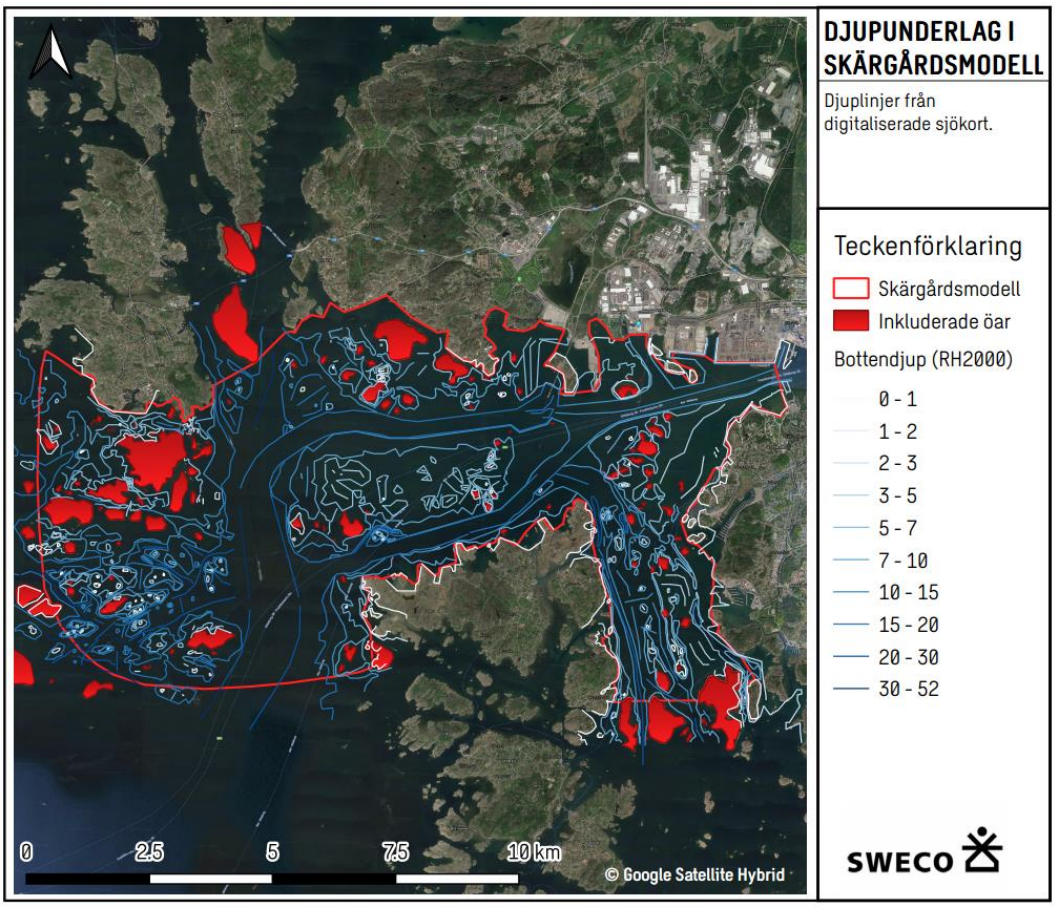
Precisionen i vågberäkningar begränsas ofta av tillgängligheten av högupplöst djupdata, då vågornas riktning och storlek i stor utsträckning styrs av bottens utseende. Underlaget till framtagna vågmodeller bygger på laserscanningar av hög kvalitet utförda av Göteborgs Hamn AB. Två mätningar har utförts i relativ närtid, 2016 och 2009. Data från 2016 års scanning har prioriterats, men då materialet inte är heltäckande har datasetet

kompletterats med den äldre djupinformationen. I Figur 3-4 visas var data från 2016 respektive 2009 använts. I de områden där data saknas (väster om Älvsborgsbron) har underlag skapats genom interpolering av tillgängliga data och digitala sjökort.



Figur 3-4 Översikt över djupdata som använts som underlag till vågmodeller.

För hamninloppet och Göteborgs södra skärgård saknas heltäckande bottenscanningar och djupinformation har istället skapats genom interpolering av digitaliserade sjökort. Inkluderade djuplinjer presenteras i Figur 3-5 och det interpolerade resultatet i Figur 3-7.



Figur 3-5 Djupkonturer, digitaliserade från sjökort.

3.2.4 Sättningar längs älvstranden

För bedömningar av sättningshastigheter längs älvkanten har Sweco nyttjat sin kompetens och erfarenhet av geoteknik i Göteborg. Genom ett stort antal historiska utredningar på många platser i Göteborgs Stad har ett översiktligt material över relevanta sättningshastigheter erhållits.

3.3 Vågmodellering

För att utvärdera vågklimatets inverkan på stadsplaneringen längs Älvstranden har vågklimatet utretts med hjälp av numeriska vågmodeller i 2D.

Syftet med modelleringen har varit att skapa ett heltäckande underlag av vågornas karaktäristik i Göta älv under stormförhållanden. Resultatet från vågmodelleringen har därefter använts som indata för överspolningsberäkningar.

De fysiska processer som huvudsakligen styr utvecklingen av vågor i hamnmiljöer är diffraktion, refraktion/uppgrundning och reflektion, vilket tidigare beskrivits i kapitel 2.4. Därtill kan även kraftiga vindar, beroende på områdets storlek, generera vågor lokalt. För

områden som är av begränsad geografisk storlek (t.ex. mindre hamnar) kan oftast vindens lokala inverkan på vågklimatet anses försumbar och vågklimatet beskrivas väl med en så kallad fasupplöst vågmodell. *Fasupplösta vågmodeller* är utvecklade för att hantera diffraktion, refraktion och reflektion men kan generellt inte beräkna uppbyggnad av vågor till följd av vindverkan, vilket istället utförs med *spektrala vågmodeller*.

Intresseområdet i denna studie är så stort att vindens inverkan inte kan anses försumbar utan rent av styrande för vågornas utveckling, i synnerhet för områdets inre delar. I enlighet med van der Meer et al., (2002) har därmed vågklimatet modellerats med en fasupplöst vågmodell för att beskriva vågpenetration från skärgården, och med en spektral vågmodell för att beskriva vågor som genereras lokalt i hamnen.

Fartygsvågor har utelämnats från utredningen då det ansetts rimligt att anta att fartygstrafiken i Göta älv sannolikt är begränsad under tillfällen med mycket problematiska väderförhållanden (exempelvis ett 200-års högvatten). Även den effekt som en ytström motriktad vågorna kan ha på våghöjden (svag dämpning) har utelämnats från modelleringen, då strömhastigheterna oftast är så låg att denna effekt anses försumbar.

3.3.1 Programvara

Spektral vågmodell – TOMAWAC

Spektrala vågmodeller används huvudsakligen för att beskriva tillväxten hos vågor till följd av vinden. Inom ramarna för denna studie har två spektrala vågmodeller utvecklats; en skärgårdsmodell och en hamnmodell.

Beräkningarna har utförts med programvaran TOMAWAC, en tredje generationens spektral vågmodell som är en del av TELEMAC-MASCARET-familjen. Beräkningsverktyget är utvecklat för att modellera vågklimat i kustområden. Beräkningarna bygger på finita-element-metoden och tar bland annat hänsyn till följande fysikaliska fenomen:

- Våggenerering av vind
- Bottenrefraktion

Fasupplöst vågmodell – ARTEMIS

För att beskriva penetrationen av vågor från skärgården in i hamnen har en högupplöst hamnmodell skapats i programvaran ARTEMIS. Randvillkor i denna modell utgörs av vågdata skapad i den spektrala skärgårdsmodellen.

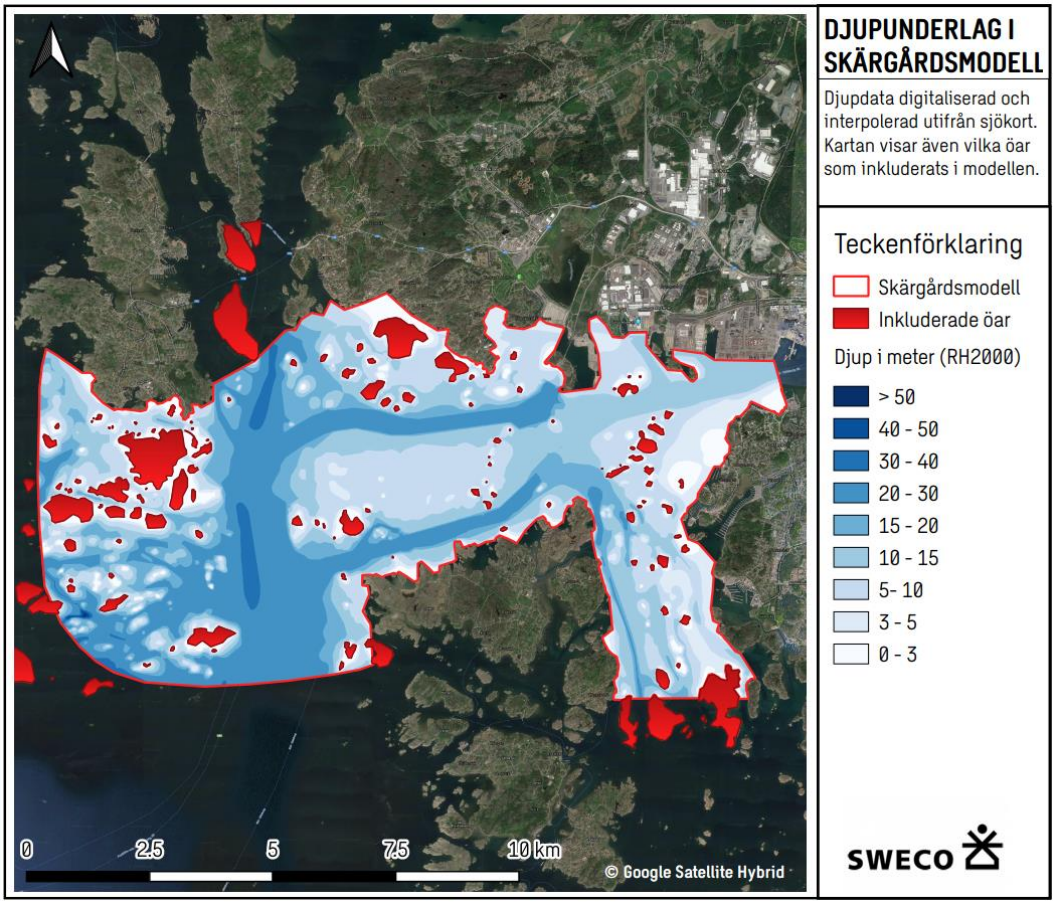
ARTEMIS är en välbeprövad programvara, även den utvecklad inom TELEMAC-familjen. Beräkningsmetodiken är uppbyggd för att lösa Berkhoff's ekvation (Shibayama, 2009) och används för att beskriva vågpenetration i hamnar och inkluderar följande fysiska processer:

- Bottenrefraktion
- Diffraktion kring hinder (öar, pirarmar och dylikt)

- Energiförluster genom brytning av vågor
- Bottenfriktion
- Delvis eller fullständig reflektion av vågor mot pirar, sponter, vågbrytare och liknande.

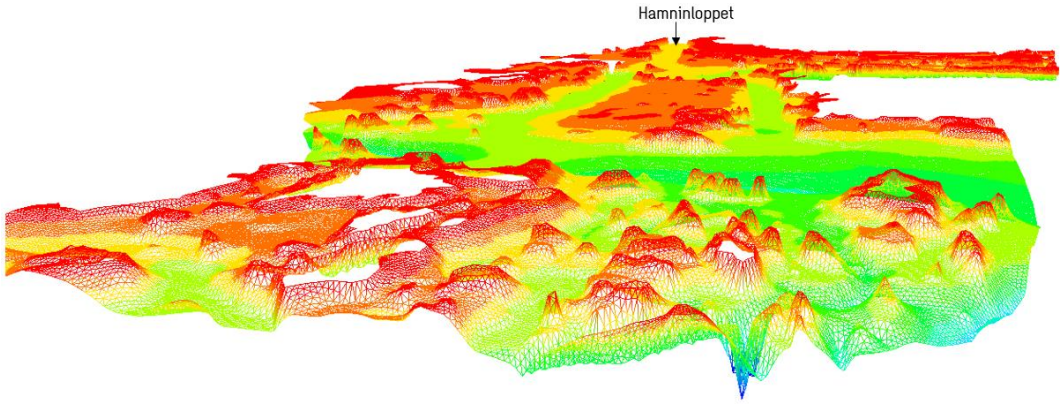
3.3.2 **Skärgårdsmodell**

Skärgårdsmodellen har utvecklats för att beskriva hur vågor från ytterskärgården dämpas i skärgården utanför hamnmynningen samt för att beskriva tillväxten av vågor inom skärgården. Modellens geografiska utbredning begränsas mellan Hönö och Stora Varholmen i norr, Hönö, Vinga och Galterö i väster samt i höjd med Önnered i sydost. Ett stort antal öar i skärgården har inkluderats. Genom djupinterpolering av sjökortdata (se Figur 3-5) har dessutom en god representation av grynnor och skär erhållits. Utbredningen och inkluderade öar visas tillsammans med interpolerad djupinformation i Figur 3-6.



Figur 3-6 Modellutbredning, inkluderade öar och interpolerade djupdata för skärsgårdsmodellen.

I Figur 3-7 visas modellens beräkningsnät som en tredimensionell struktur. Synvinkeln är från väster, och hamnens två inseglingsrännor kan skönjas i grönt. Figuren åskådliggör den täta skärgården och goda vågdämpande egenskaper. Notera att den vertikala skalan är förhöjd.

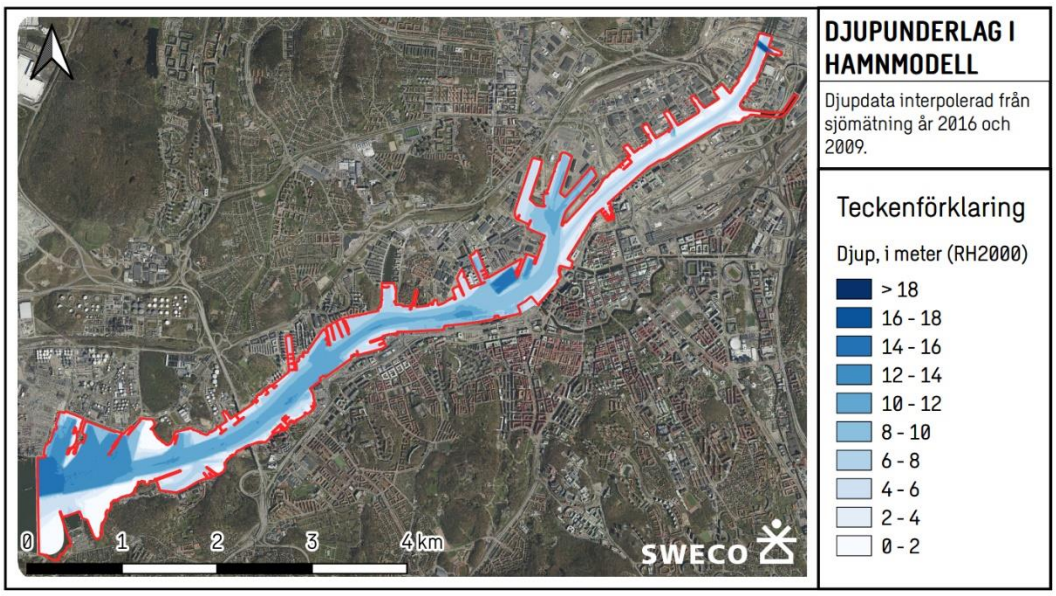


Figur 3-7 Tredimensionell visualisering av skärgårdens batymetri och beräkningsnät. Synvinkeln är från utanför Vinga i väster, den vertikala skalan är förhöjd.

3.3.3 **Hamnmodell**

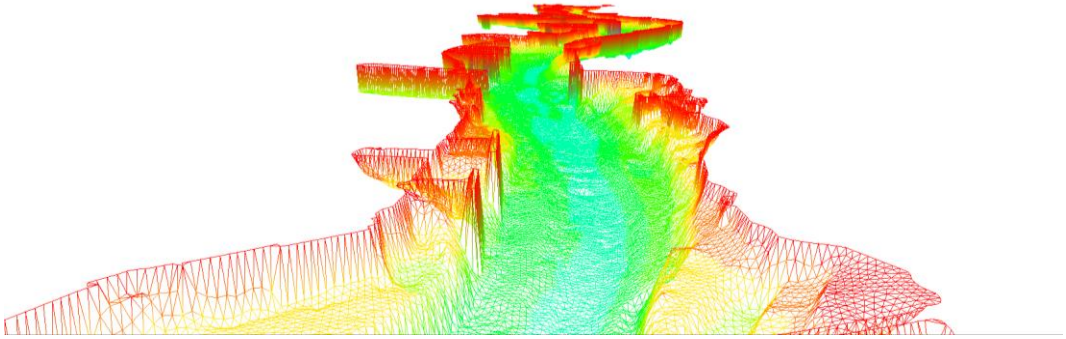
Hamnmodellen har utvecklats för att beskriva penetrationen av vågor från skärgården, samt för att beskriva den lokala tillväxten av vågor i Göta älv. Således har denna modell använts för beräkningar både med fasupplöst och spektral vågmodell (ARTEMIS och TOMAWAC).

Modellens geografiska utbredning sträcker sig från Tångudden – Skandiahamnen i väster och Marieholm i öster. Strandlinjen längs älven är väl upplöst utifrån 2019 års förhållanden, med undantag för den planerade utvecklingen av Masthuggskajen. Figur 3-8 visar modellens utbredning tillsammans med interpolerade djupdata från GHAB:s sjömätningar år 2009 och 2016.



Figur 3-8 Modellutbredning och interpolerade djupdata för hamnmodellen.

I Figur 3-9 visas hamnmodellens beräkningsnät som en tredimensionell struktur. Synvinkeln är från väster, strax utanför Älvsborgsbron. Notera att den vertikala skalan är kraftigt förhöjd.



Figur 3-9 Tredimensionell visualisering av hamnens batymetri och beräkningsnät.

3.3.4 **Inventering av reflektionsförhållanden**

För att på ett tillfredsställande sätt kunna beskriva reflektionen i Göta älv inventerades hamnens konstruktioner från båt. Fältarbetet inkludera fotografering och videoupptagning av älvstrandens konstruktioner med särskilt fokus kring hamninloppet. Bildmaterialet användes sedan för att uppskatta reflektionskoefficienter enligt metodik i *Rock Manual* (CIRIA; CUR; CETMEF, 2012).

3.3.5 **Superpositionering av vågor**

Då utförd modellering bygger på två typer av vågor; de som rör sin in från skärgården och de som genereras lokalt i älven har en representativ våghöjd tagits fram. Den representativa våghöjden bygger på superpositionering av vågorna enligt metodik i liknande forskningsstudier (Gruwez, Bolle, Verwaest, & Hassan, 2012; van der Meer, et. al. 2014):

$$H_{m0} = \sqrt{H_{m0,1}^2 + H_{m0,2}^2}$$

där $H_{m0,1}$ är den signifikanta våghöjden för vågor som rör sig från skärgården in mot Göta älv och $H_{m0,2}$ är den signifikanta våghöjden av de lokalt genererade vågorna i älven.

3.4 Simulerade scenarier

För att skapa en helhetsbild för stadens risk kopplat till överspolning har totalt 20 scenarier valts ut som underlag till överspolningsberäkningar. Av dessa 20 scenarier är 16 ett urval av historiska stormar, modellerade som om de inträffar i Göteborg år 2070. Utöver dessa scenarier har 4 extrema scenarier tagits fram utifrån ett 200-års högvatten 2070 och relevanta vindar.

3.4.1 **Historiska stormar i ett framtida Göteborg**

Urvalet av historiska scenarier bygger på den analys som presenterats under kapitel 3.2.2. I Figur 3-3 presenteras de händelser som kan antas vara de historiskt mest besvärliga ur överspolningssynpunkt. Från observationerna har 16 tillfällen valts ut, vilka representerar kulmen av respektive högvattenförlopp (markerade i rött i figuren). Kulmen har definierats som tillfället med högst vattenstånd. I det fall att mycket snarlika vattenstånd observerats vid två eller fler timmar under samma stormförlopp har den observation med högst vindhastighet av dessa valts ut.

Vattenståndet i respektive observation har förhöjts med en klimatfaktor, vilken motsvarar prognosticerad stigning av medelvattenytan i Göteborg till 2070 (se *Tabell 2-1*). Simuleringarna beräknar således historiska stormar som om de inträffat år 2070.

3.4.2 **Extremscenarier**

Utöver dessa 16 historiska stormar, har 4 fiktiva scenarier inkluderats i modelleringen. Dessa scenarier utgår från ett 200-års högvatten år 2070, varierande vindriktningar (syd-nordväst) och en vindhastighet på 30 m/s. Både SMHI:s tidigare utredningar och de som gjorts inom ramarna för detta projekt visar att extrema högvatten huvudsakligen beror på vind med en västlig komponent, har inga scenarier med östlig komponent inkluderats i modellscenarierna. Starka vindar från ost kan förekomma men till följd av lägre vattenstånd krävs rimligen inga skydd mot vågöverspolning.

För att erhålla en uppfattning om storleksordningen på extrema vindar i Göteborgsområdet har en statistisk analys av vinddata från SMHI:s mätstation Vinga A genomförts. Mätstationen registrerar vindstyrka och vindriktning, och varit var aktiv mellan

1949–1997 och 2007–2019, vilket innebär att det finns totalt 62 år av mätdata. Mellan 1949–1997 registrerades data med mellan 3 – 12 timmars intervall, vindstyrka registrerades med 0,5 m/s noggrannhet och vindriktning i 10 graders intervall. Från år 2007 och framåt registreras data med högre upplösning i tid och rum. Detta innebär att mätvärden från den äldre delen av serien är av lägre kvalitet. Då mätserien från 2007–2019 är för kort för att använda som underlag i en extremvärdesanalys har hela mätserien inkluderats, för att erhålla en så lång dataserie som möjligt.

Mätdata från Vinga visar att kraftiga vindar kan inkomma från samtliga riktningar mellan syd och nordväst. För att bilda en uppfattning om återkomtiden för en vindstyrka med en given riktning har mätserien delats upp i fem vindriktningar; sydlig, sydvästlig, västlig och nordvästlig vind, samt sydlig – nordvästlig vind. Därefter har separata analyser gjorts av data från respektive vindriktning,

Extremvärdesanalysen är genomförd med en så kallad blockmaximametod, vilket innebär att en statistisk fördelning anpassas till uppmätta årsmaxima. Gumbelfördelningen bedömdes ge en god representation av data från samtliga vindriktningar, och har därför använts för analysen.

I Tabell 3-1 presenteras beräknad återkomsttid för vindhastigheten 30 m/s för de studerade vindriktningarna. Observera att återkomsttiden är lägst när mätdata från samtliga vindriktningar S-NV inkluderats. Detta ska tolkas som att återkomstiden för en vind med hastighet 30 m/s är cirka 17 år, men att återkomstiden för en så kraftig vind med en given riktning är högre.

Tabell 3-1 Beräknad återkomsttid för vindstyrka 30 m/s för vindriktningar S – NV. Värden inom parentes är 95% konfidensintervall.

Vindriktning	Återkomsttid för vindhastighet 30 m/s
S (157,5 - 207,5 deg)	39 år (20 – 108)
SV (207,5 – 247,5 deg)	33 år (18 – 82)
V (247,5 – 292,5 deg)	52 år (25 – 154)
NV (292,5 – 337,5 deg)	42 år (22 – 111)
S-NV (157,5 – 337,5 deg)	17 år (10 – 39)

Mot bakgrund av denna analys anses det rimligt att dimensionera staden mot högvattenförlopp med vindstyrka på 30 m/s, även om kulmen av vattenstånd och vindhastighet inte alltid sammanfaller. Samtliga modellerade scenarier presenteras i Tabell 3-2.

Tabell 3-2 Modellerade scenarier.

ID	Datum	Vattenstånd (RW)	Vindriktning	Vindstyrka (m/s)	Vattenstånd 2070 (RH2000)

1	1969-09-29	+83,3	270°	30	+119,3
2	1976-01-05	+47,5	180°	36	+83,5
3	1981-11-24	+124,3	230°	28	+160,3
4	1982-12-16	+118,4	270°	19	+154,4
5	1983-10-19	+100,6	250°	26	+136,6
6	1985-11-06	+142,9	290°	19	+178,9
7	1990-02-27	+128,7	210°	6	+164,7
8	1990-02-27	+105,7	109°	12,8	+141,7
9	1993-01-22	+92,2	270°	27	+128,2
10	2000-01-29	+120,3	42°	3,6	+156,3
11	2005-01-08	+146,3	281°	15	+182,3
12	2008-02-22	+132,2	257°	17,9	+168,2
13	2011-11-27	+120,4	282°	23,1	+156,4
14	2011-12-10	+146,2	267°	16,4	+182,2
15	2013-12-06	+118,4	345°	18,3	+154,4
16	2016-12-26	+144,1	269°	18,5	+180,1
105	Fiktivt	+171,0	180°	30,0	+207,0
106	Fiktivt	+171,0	225°	30,0	+207,0
107	Fiktivt	+171,0	270°	30,0	+207,0
108	Fiktivt	+171,0	315°	30,0	+207,0

3.5 Överspolningsberäkningar

Överspolningsberäkningarna i denna studie har beräknats utifrån metodik i manualen EurOtop 2018 - *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An manual largely based on European research, but for worldwide application.* Bakgrund till EurOtop, en översiktlig presentation av ingående parametrar samt hur metodiken implementerats för Göteborg följer under nedanstående underrubriker.

3.5.1 Bakgrund till kustingenjörsmanualen EurOtop

EurOtop är europeisk kustingenjörsmanual som syftar till att beskriva teori, beräkningsmetodik och en detaljerad sammanställning av senaste kunskapen kring överspolning av vågor över olika typer av kustskydd. Manualen är framtagen genom ett

samarbete av ett flertal europeiska universitet under finansiering av UK Environmental Agency och Rijkswaterstaat – Water, Verkeer en Leefomgeving (Nederländerna).

Manualen bygger på metoder och data från vetenskapliga studier huvudsakligen i Europa och USA och till grund för den beräkningsmetodik som beskriver överspolning ligger en databas med mer än 13 000 fysiska test, både in situ och i laboratorium.

Alla de prediktionsmetoder som ges i EurOtop har begränsningar i sin träffsäkerhet. Trots att det empiriska underlaget är stort finns en betydande spridning i den data som ligger till grund för beräkningsmetodiken. För att hantera osäkerheterna i designprocessen av kustskydd har författarna till manualen har valt att införa en ”design or assessment approach” som introducerar en osäkerhetsfaktor i storleksordningen en standardavvikelse, för att minimera risken att överspolningen underskattas.

Beräkningsmetodiken möjliggör bland annat en uppskattning av medelöverspolningen (i liter per sekund och meter) som en funktion av konstruktionens krönhöjd. Utifrån resultaten kan man således optimera ett skydd utifrån vilken platsspecifik överspolning man anser vara acceptabel. (EurOtop, 2018)

3.5.2 Primära faktorer som påverkar överspolning

Vid beräkning av vågöverspolning finns det ett antal parametrar som styr den erforderliga höjden av skyddet. I första hand behöver den acceptabla överspolningen utvärderas, det vill säga hur stort flöde man kan tolerera över skyddet. Denna avvägning diskuteras närmare i *Kapitel 3.5.3.*

De huvudsakliga fysiska faktorerna som styr skyddets höjd är:

- Förväntande nivåer av extrema vattenstånd (kapitel 2.2)
- Förväntad våghöjd utanför skyddet (kapitel 5.3)
- Vinkel av infallande vågor (kapitel 4.2.3)
- Typ av skyddskonstruktion (kapitel 4.2.6), samt materialval (kapitel 4.2.5).
- Djupförhållanden utanför skyddet (kapitel 4.2.2)

En känslighetsanalys över ovanstående parametrar presenteras i kapitel 4.2.

3.5.3 Acceptabel överspolning

Den acceptabla överspolningen bör alltid utvärderas platsspecifikt utifrån de risker och värden som finns kopplade till översvämningar eller skador av dessa. Med tanke på denna studies stora geografiska område är dock en sådan differentiering svår att överskåda, och en utvärdering bör därmed istället göras i planskedet för berörd lokal.

Manualen EurOtop presenterar generella riktlinjer för acceptabel överspolning med hänsyn till skador på skyddskonstruktioner, skador på fastigheter och båtar (Tabell 3-3) samt med hänsyn till risk för personskador (Tabell 3-4). Riktlinjerna särskiljer dels på

vilken typ av överspolning man kan förvänta sig på platsen samt vilken våghöjd som är att förvänta på platsen.

Ur Tabell 3-3 kan det utläsas att acceptabel överspolning för byggnadselement rekommenderas till 1,0 l/s,m, vilket dock är under förutsättning att våghöjden är mellan 1–3 meter. Med byggnadselement menas känsliga element såsom fönster och dörrar som inte dimensionerats för översvämning. Ur Tabell 3-4 kan det utläsas att överspolningen kopplad till personskador är i storleksordningen 10–20 l/s,m för våghöjder i storleksordningen en meter. För våghöjder mindre än 0,5 meter föreskrivs inga begränsningar i överspolning.

Vid dimensionering av vågbrytare och liknande konstruktioner i exponerade havsmiljöer är det inte ovanligt med dimensioneringsnivåer på 1,0 liter per sekund och meter för en 100-årshändelse. Vid en sådan säkerhetsnivå ligger fokus snarare på risker kopplade till stabilitet av konstruktioner än risker kopplade till översvämning.

Med tanke på att Göta älv har en relativt låg exponering för vågor (våghöjder < 1 meter) och att djupet av älven är så pass stort att ingen kraftig vågbrytning sannolikt sker mot älvskyddet så har den acceptabla överspolningen enhetligt ansatts till 10 liter per sekund och löpmeter längs hela studieområdet. Detta överspolningsflöde anses därmed vara tillräckligt skarpt för att tillgodose tillräckligt skydd för människors hälsa och säkerhet och framkomlighet för fordonstrafik och räddningstjänst.

Det ska tilläggas att denna studie fokuserar på de direkta riskerna kopplade till överspolande vatten i kajkantens närhet. En indirekt risk av överspolningen är att bakomliggande terräng översvämmas, vilket kan leda till begränsad framkomlighet för trafik. I tillfällen där terrängen är låglänt bör överspolningsflöden utvärderas mot ledningsnätets kapacitet och terrängens förmåga att avleda vatten.

Tabell 3-3 Riktlinjer för risker kopplade till överspolning, byggnader och övrig utrustning. Tabellen är hämtad från EurOtop 2018.

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V_{max} (l per m)
Significant damage or sinking of larger yachts; H_{m0} > 5 m	>10	>5,000 – 30,000
Significant damage or sinking of larger yachts; H_{m0} = 3-5 m	>20	>5,000 – 30,000
Sinking small boats set 5-10 m from wall; H_{m0} = 3-5 m Damage to larger yachts	>5	>3,000-5,000
Safe for larger yachts; H_{m0} > 5 m	<5	<5,000
Safe for smaller boats set 5-10 m from wall; H_{m0} = 3-5 m	<1	<2,000
Building structure elements; H_{m0} = 1-3 m	≤1	<1,000
Damage to equipment set back 5-10m	≤1	<1,000

Tabell 3-4 Riktlinjer för risker kopplade till överspolning, fotgängare och fordonstrafik. Tabellen är hämtad från EurOtop 2018.

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V_{max} (l per m)
People at structures with possible violent overtopping, mostly vertical structures	No access for any predicted overtopping	No access for any predicted overtopping
People at seawall / dike crest. Clear view of the sea.		
H_{m0} = 3 m	0.3	600
H_{m0} = 2 m	1	600
H_{m0} = 1 m	10-20	600
H_{m0} < 0.5 m	No limit	No limit
Cars on seawall / dike crest, or railway close behind crest		
H_{m0} = 3 m	<5	2000
H_{m0} = 2 m	10-20	2000
H_{m0} = 1 m	<75	2000
Highways and roads, fast traffic	Close before debris in spray becomes dangerous	Close before debris in spray becomes dangerous

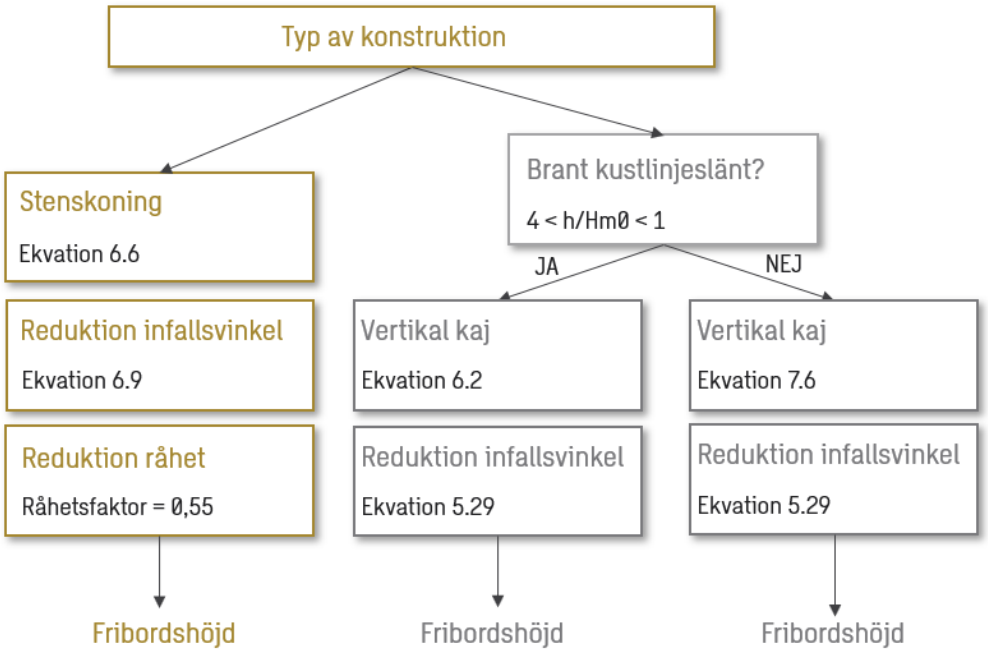
3.6 Beräkningsverktyg för vågöverspolning

Beräkningar för våguppspolning har gjorts i programvaran FME. FME står för Feature Manipulation Engine och är ett verktyg utvecklat att analysera och automatisera spatiala dataflöden. En mängd olika data behöver kombineras för att beräkna den platsspecifika våguppspolningen. Istället för att först harmonisera data i en databas och sedan beräkna våguppspolningen så har FME använts för att läsa indata direkt. Detta har ansetts fördelaktigt då data därmed kan vara i sitt ursprungliga format men ändå hanteras tillsammans.

Erforderlig fribordshöjd (för kriteriet 10 l/s,m) har beräknats var 10:e meter längs hela älvstranden. Rent konkret innebär detta att älvstranden har diskretiserats, och punkter har fördelats jämnt med 10 meters intervall, hädanefter benämnt strandlinjepunkter. Till varje punkt har sedan ett antal parametrar hämtats. För att hämta parametervärden används ett moln av punkter som ligger fördelat utanför strandlinjepunkten i tangentens riktning. Värden hämtas för varje punkt i molnet och medelvärdesbildas. Parametrar som hämtas på detta sätt är:

- Djup utanför varje punkt.
- Älvkantens vinkel.
- Medelriktning hos infallande vågor.
- Signifikant våghöjd för vågor från fasupplöst modell (ARTEMIS).
- Signifikant våghöjd för vågor från spektral modell (TOMAWAC).

Därefter har överspolningsberäkningar utförts enligt det processchema som redovisas i Figur 3-10, där ovanstående parametrar varit ingångsvärden. Överspolningsberäkningarna har gjorts för varje strandlinjepunkt och för varje modellerat scenario. Totalt innebär detta beräkningar för 3375 punkter och för 20 scenarier. Beräkningar har gjorts för vertikala konstruktioner (kaj) och stenskoningar. Dessa beräkningar har därefter använts som underlag för relevant sträckindelning med avseende på fribordshöjd, se kapitel 6.4.

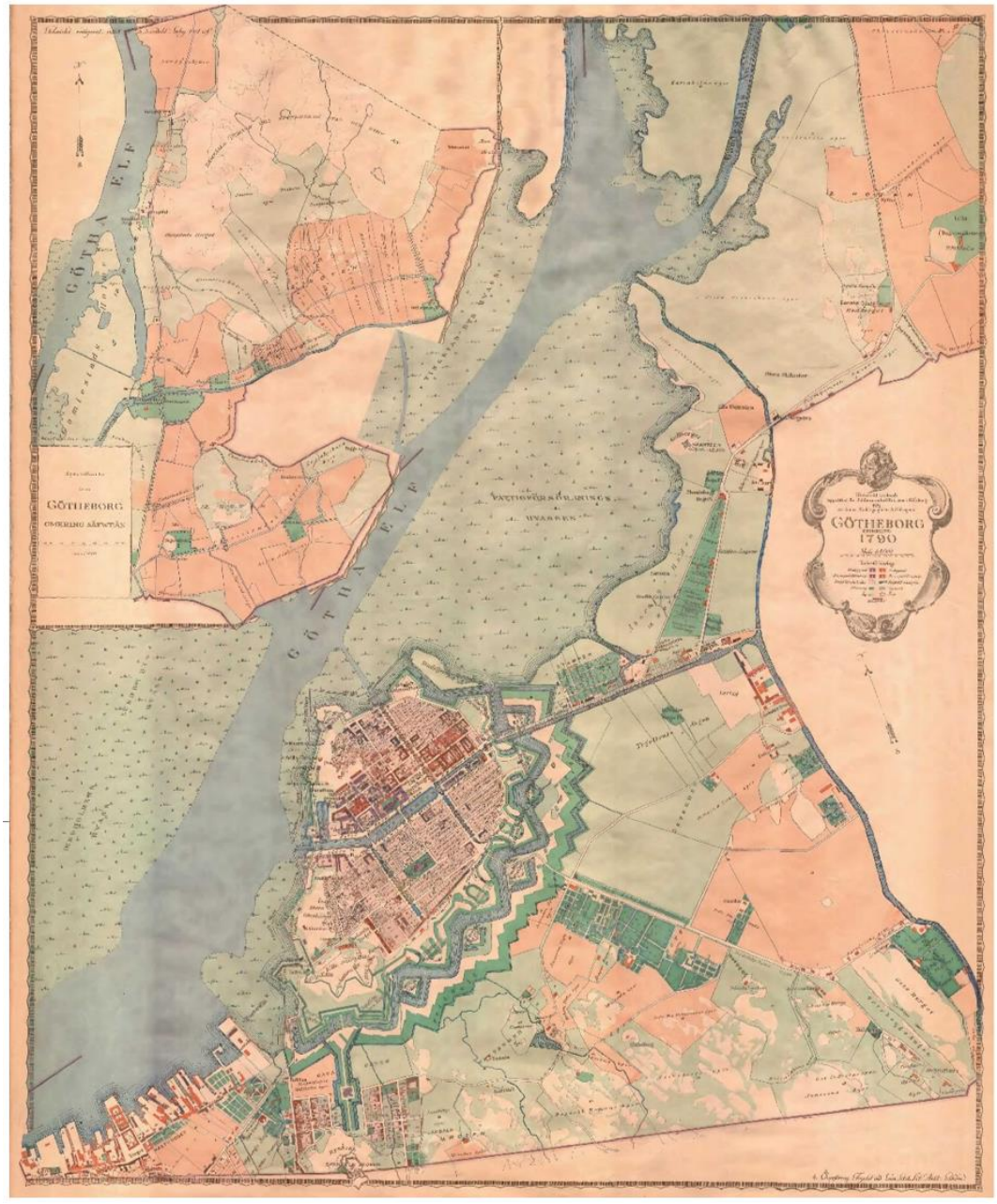


Figur 3-10 Processchema för beräkningar av fribordshöjd i EurOtop. Ekvationsreferenserna är till (EurOtop, 2018).

3.7 Geotekniska förhållanden och sättningar längs älvstranden

De naturligt avsatta jordlagren inom det rubricerade området längs Göta Älv utgörs generellt av mäktiga lager av relativt homogen lös lera. Leran överlagrar en bottenmorän som i sin tur vilar på berg. Lerlagrets mäktighet varierar inom området mellan cirka 10 m till 120 m.

När Göteborg grundades byggdes staden (nuvarande stadskärna) och dess befästningsverk runt Kvarnberget och Otterhällan med syfte att erhålla så bra grundläggningsförutsättningar som möjligt. Vid denna tidpunkt utgjordes områdena närmast älven och runt staden av låglänta sankmarker som ofta låg under vatten. Figur 3-11 visar hur Göteborg såg ut år 1790 och att en utfyllnad av de låglänta områdena då hade påbörjats. Under 1800-talet fortsatte utfyllnadsarbetena och nya kajer anlades mot Älven.



Figur 3-11 Historisk karta över Göteborg från jubileumsutställningen 1923. Kartan visar hur Göteborgs såg ut år 1790.

Belastningen från utfyllnaderna, vars mäktighet varierar från någon enstaka meter till upp emot åtta meter, har medfört stora sättningar vilka fortfarande pågår. Dagens sättningar varierar kraftigt längs med älvkanten och sättningshastigheten är en viktig parameter att beakta för att ett överspolningsskydd ska ha bibehållen funktion över tid.

4 Känslighetsanalys och kalibrering

4.1 Vågmodellering

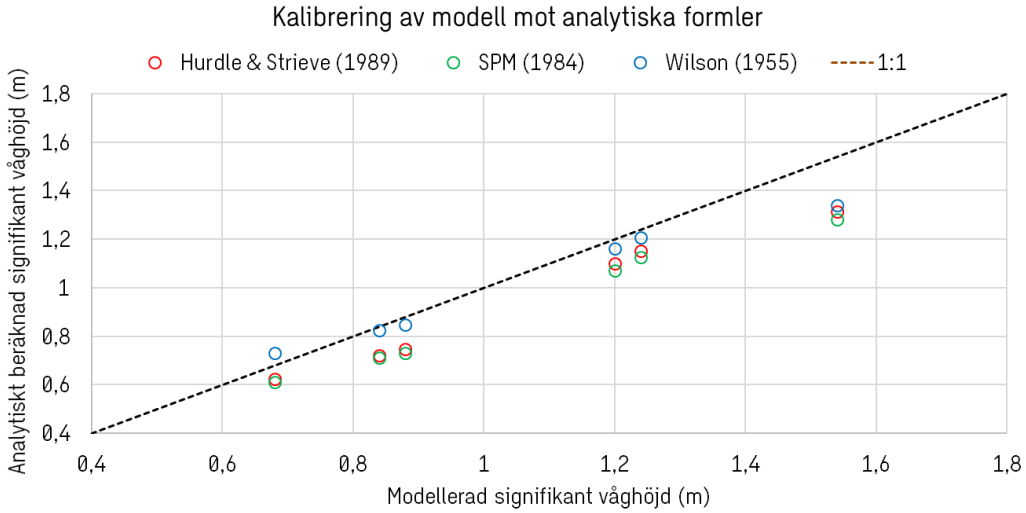
Tidiga beräkningar av vågklimatet vid hamninloppet indikerade att skärgården har en kraftigt dämpande effekt på våghöjden och att de vågor som når hela vägen från ytterskärgården till hamninloppet är små. Huvuddelen av den vågenergi som når hamninloppet skapas lokalt i innerskärgården och hamnen och modellerna har därför kalibrerats för att beskriva dessa processer med så god noggrannhet som möjligt.

I litteraturstudien *Deep water wave growth at short fetches for high wind speeds* (Ris, Hurdle, & Holthuijsen, 2001) går författarna igenom ett stort antal analytiska formler som beskriver tillväxt av vågor vid korta stryklängder (< 1 km) och höga vindhastigheter (>20 m/s). Studien jämför och utvärderar tillämpligheten av de olika formler som finns i litteraturen.

Den metod som studien visar ger bäst resultat under sådana förhållanden är beskriven av B.W Wilson (1955). Litteraturstudien beskriver även hur numeriska modeller (liknande de som använts i denna utredning) klarar att hantera dessa förhållanden. En slutsats är att numeriska modeller tycks underskatta våghöjderna till följd av en för stor dämpning genom ”vita gäss[1]” (Ris et al., 2001). Den spektrala vågmodellen (TOMAWAC) som använts för att utreda vågklimatet har därmed kalibrerats genom modifikation av denna dämpning, med syftet att närma sig vågtillväxten i Wilson (1955).

Valideringsresultat presenteras i Figur 4-1, vilken visar att modellens träffsäkerhet mot analytiska lösningar är god. Modellen har validerats mot ett antal olika vindhastigheter och stryklängder. Vid större våghöjder (> 1,5 m) ger den numeriska modellen en högre våghöjd. Detta kan förklaras av att valideringsområdet då får ett betydande tillskott av vågor från närliggande områden vilket inte tas hänsyn till i de analytiska lösningarna.

[1] Eng: whitecapping, beskrivet i (Komen, Hasselmann, & Hasselmann, 1984)



Figur 4-1 Valideringsresultat från TOMAWAC-modeller. På y-axeln visas våghöjden för analytiska lösningar, medan x-axeln visar modellerade våghöjder. Figuren visar att modellen ger en god representation av våghöjden i förhållande till Wilson (1955).

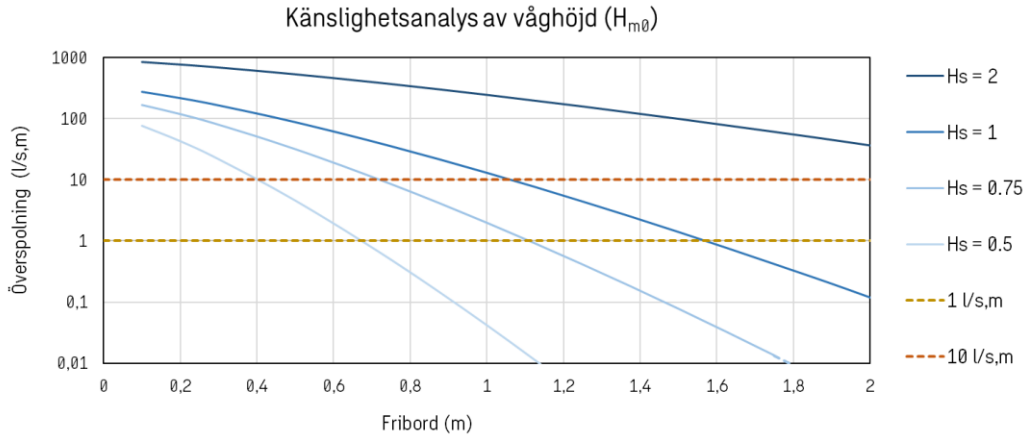
4.2 EurOtop

I följande kapitel redovisas en känslighetsanalys för ett antal av de faktorer som har störst inverkan på överspolningsmetodiken beskriven i EurOtop (2018). Eftersom fribordshöjden ökar med minskad tillåtna överspolningsflöde redovisas överspolningen på y-axeln (i liter per sekund och löpmeter skydd) och erforderlig fribordshöjd (i meter) på x-axeln. Olika linjer i figurer representerar olika värden på den testade parametern. Om det är stora avstånd mellan linjerna betyder det att parametern har stor inverkan på fribordshöjden. För att underlätta att läsa av värden har också överspolningsflödena 1 l/s,m och 10 l/s,m markerats med streckade linjer.

Grundinställningen i känslighetsanalysen är en våg med höjden 1 m, infallsvinkeln är rakt vinkelrät mot kajkanten och råheten på kajen är 0,55.

4.2.1 Våghöjd

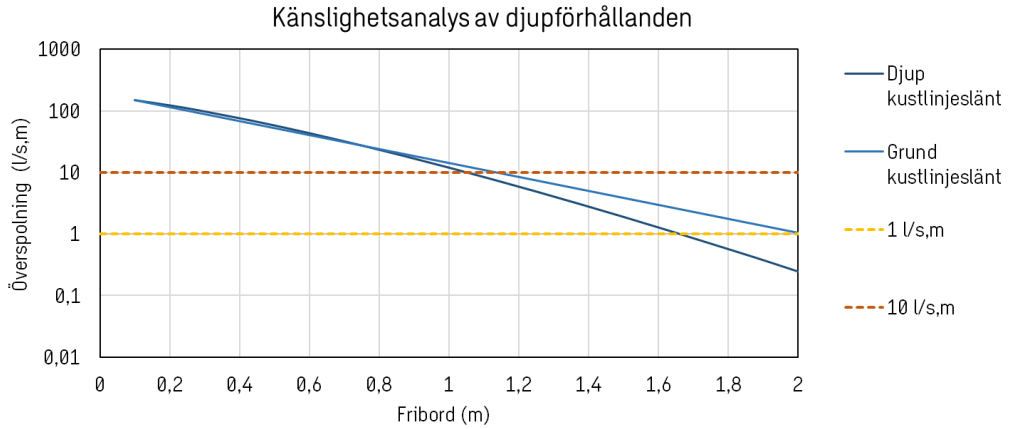
En av de känsligaste faktorerna för överspolningsberäkningar är höjden av infallande vågor. Figur 4-2 visar att erforderligt fribord ökar med våghöjden, och en ökning från 0,5 till 1,0 meters våghöjd ger en fribordsökning på cirka 0,65 meter för ett överspolningskriterium på 10 l/s,m.



Figur 4-2 Stenskoning, H_{m0} = 1 m, råhet = 0,55, infallsvinkel (β) = 0. Figuren visar att erforderligt fribord ökar med stigande våghöjd. En ökning av våghöjden från 0,5 m till 1,0 m ger en ökning av fribordet på drygt 0,65 meter för att hålla överspolningen på 10 l/s,m.

4.2.2 **Grund kustlinjesläntt**

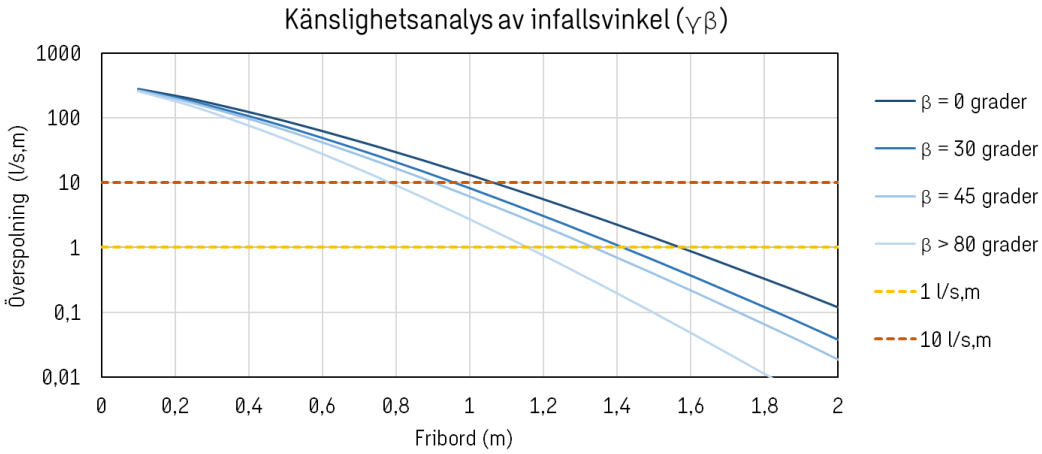
När bottendjupet minskar in mot land kan vågornas karaktäristik förändras, bland annat genom att våghöjden ökar och våglängden förändras. För att hantera de förändringar detta kan leda till med avseende på överspolning presenterar EurOtop en ekvation för områden med grund kustlinjesläntt. En känslighetsanalys för ekvationerna presenteras i Figur 4-3. Denna parameter är avsevärt mindre känslig än våghöjden, men eftersom inga tekniska hinder föreligger att metodiken implementeras i beräkningarna har detta gjorts.



Figur 4-3 Vertikal kaj, H_{m0} = 1 m, β = 0.

4.2.3 **Infallsvinkel av vågor**

Då vågöverspolning är definierad per löpmeter konstruktion ger vågor som har en sned infallsvinkel mot konstruktionen lägre uppspolningsvolym än vågor som infaller vinkelrätt mot konstruktionen. För att hantera denna reduktion rekommenderas en reduktionsfaktor för vågor som har en vinkel (β) mot konstruktionens normal. Figur 4-4 visar att en stenskoning som utsätts för vågor med signifikant våghöjd på 1,0 meter kan behöva ett fribord mellan 0,75 och 1,05 meter, beroende på vågens infallsvinkel (för 10 l/s,m).



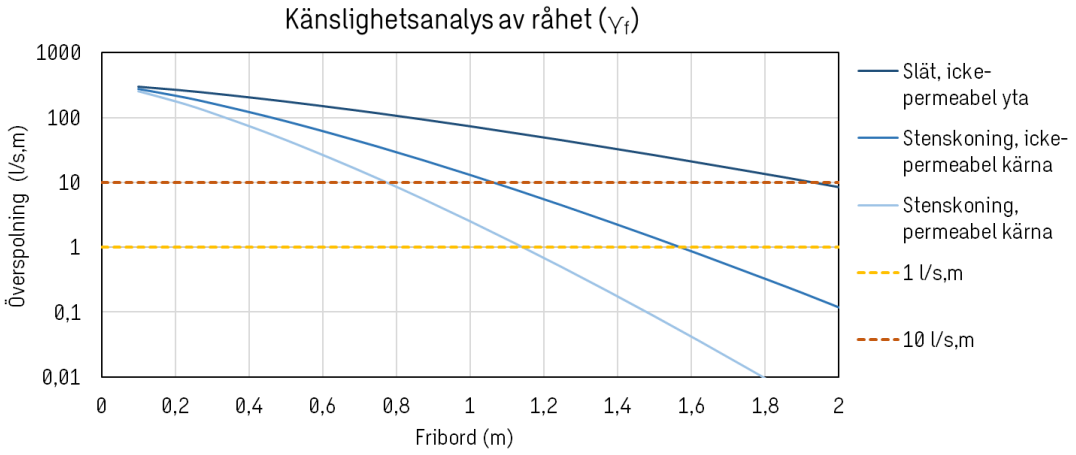
Figur 4-4 Stenskoning, H_{m0} = 1 m, råhet = 0,55, variabel vinkel (β). Figuren visar att erforderligt fribord minskar med ökande infallsvinkel.

4.2.4 **Geometri**

Geometrin av ett kustskydd har stor betydelse för överspolningen över konstruktionen. En konventionell kaj är vinkelrät, men stenskoningar kan utformas med olika lutning och släntskydd, vilket kan vara avgörande för överspolningen. Metodiken i denna utredning bygger på en lutning av stenslänter mellan 1:1,5 – 1:2, med hänsyn till det stora platsanspråk konstruktionerna kräver med en flackare lutning.

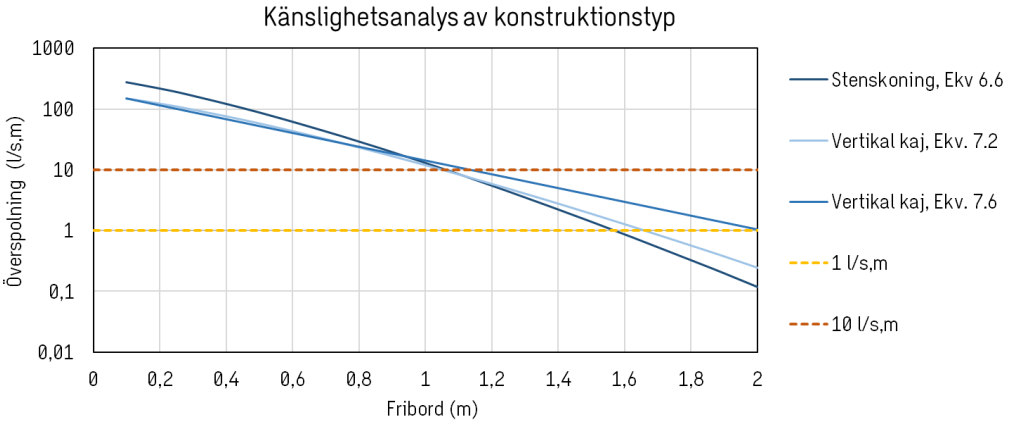
4.2.5 **Råhet**

Uppspolningshöjden och även överspolningen beror av råheten av det material vågor spolar upp över. Ett material med hög råhet, som exempelvis en stenslänt, ökar friktionen mot vågen och dämpar därmed effektivt dess energi. Ett material med låg råhet, som exempelvis släta betongytor, ger ett mindre friktionsmotstånd för uppspolningen. EurOtop (2018) har för överspolning över icke-vertikala konstruktioner inkluderat en reduktionsfaktor som beror på materialets råhet, vilken inkluderats i beräkningarna för överspolning över stenskoning. För beräkningar inom detta uppdrag har värdet för råheten valts som ett referensvärde för stenskoningar med dubbelt skyddslager sten och icke-permeabel kärna. En känslighetsanalys av råheten presenteras i Figur 4-5. Känsligheten för råheten är relativt stor, men parametern har ändå en liten betydelse i denna studie då överspolningen endast beräknas för två typkonstruktioner.



Figur 4-5 Stenskoning, H_{m0} = 1 m, β = 0, variabel råhet.

4.2.6 **Konstruktionstyp**



Figur 4-6 H_{m0} = 1 m, β = 0, γ_f = 0,55. Samtliga inkluderade formler.

Vid låga fribordshöjder är vertikala konstruktioner mer effektiva än stenskoningar, då de senare ger en ”ramp” för vattnet att spolas upp över. Men då fribordshöjden ökar (till följd av exempelvis större våghöjder eller strängare överspolningskriterier) ökar effektiviteten av stenbeklädda konstruktioner. Ur Figur 4-6 går det att utläsa att skillnaden mellan de olika konstruktionerna är mycket liten för de huvudsakligen förväntade förhållandena inom studieområdet. Det är går samtidigt att konstatera att stenskoningar kan vara effektiva i att reducera erforderlig fribordshöjd i exponerade lägen.

4.2.7 **Osäkerheter**

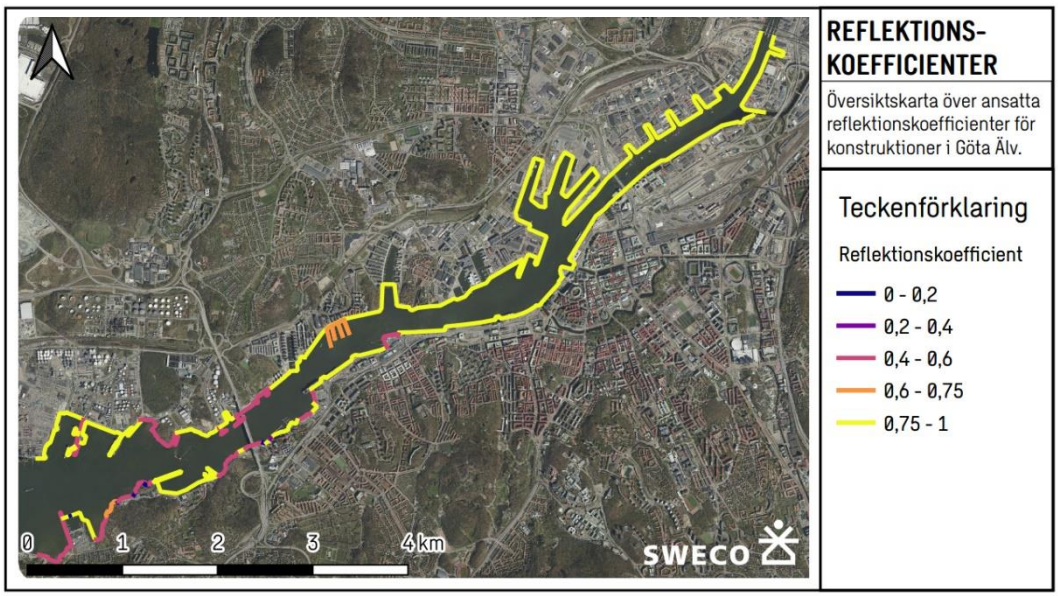
En av de främsta orsakerna till osäkerheter i beräkningar av överspolning är det dataunderlag som ligger till grund för beräkningsmetodiken i EurOtop. Även om manualen är det bästa tillgängliga verktyget för att bedöma överspolningsrisker så ska man vara medveten om att de bygger på ett empiriskt dataset som är begränsat i sin storlek. Huvuddelen av de försök och experiment som metodiken bygger på är utförda i betydligt mer vågexponerade miljöer.

Ett av de mest avgörande antaganden med hänsyn till överspolning är den *acceptabla överspolningen*. Enligt rekommendationer bör överspolningen reduceras till 1,0 l/s,m för att undvika skador på känsliga byggnadselement, som exempelvis fönster och dörrar. Med tanke på vågenergin är relativt låg i förhållande till de flesta studier som ligger till grund för dessa rekommendationer så anses dock 10,0 l/s vara ett rimligare designkriterium.

5 Resultat

5.1 Reflektionskoefficienter

Utifrån fältinventeringen ansattes reflektionskoefficienter i enlighet med riktlinjer i *Rock Manual* (2012), och redovisas i Figur 5-1. För inre delarna av älvstranden har reflektionskoefficienten ansatts till 0,95. Detta är ett något konservativt antagande som bygger på att stora delar av kajerna är i sådant skick att de sannolikt behöver restaureras inom överskådlig framtid (uppgift från SBK, avstämningsmöte 2019-10-30).



Figur 5-1 Översiktskarta över ansatta reflektionskoefficienter för konstruktioner i Göta älv. Koefficienterna har bestämts efter inventering från båt.

5.2 Vågor i innerskärgården

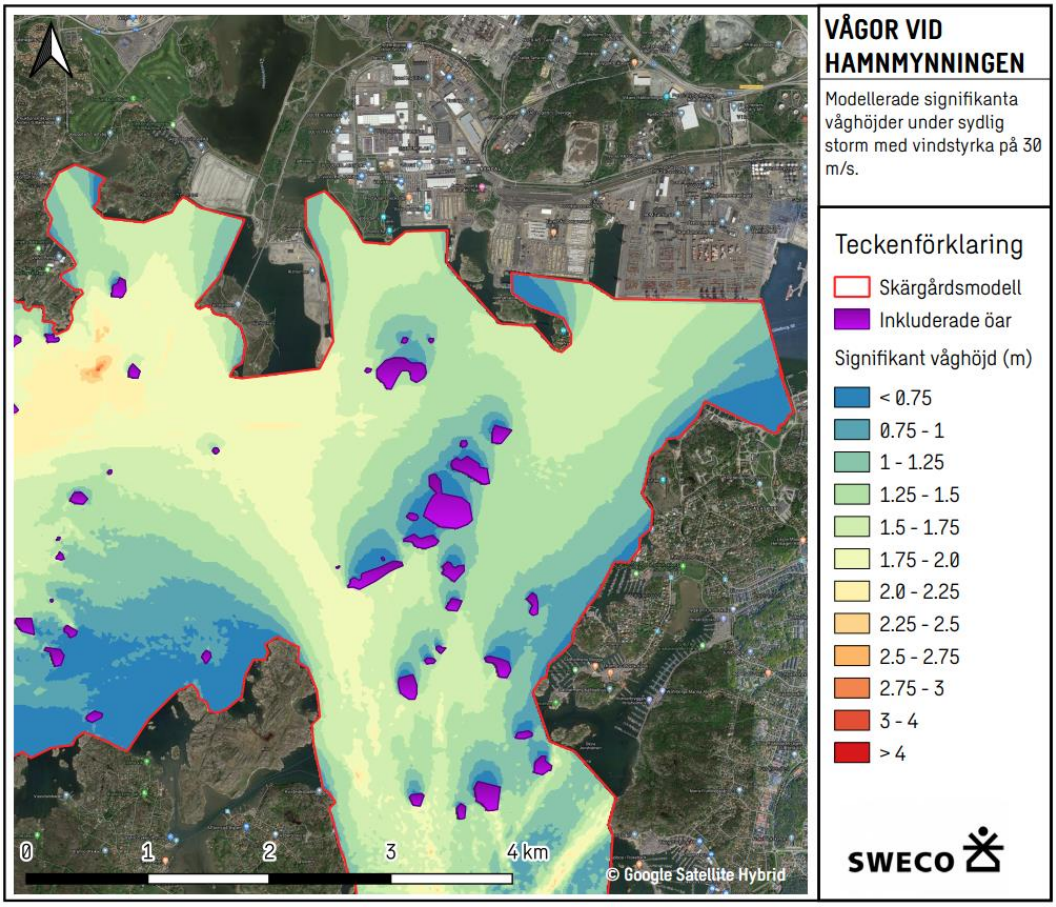
Observationer vid Trubaduren boj (Figur 2-1) visar att den signifikanta våghöjden i ytterskärgården kan uppgå till omkring 5 meter under kraftiga stormar. Trubaduren boj var placerad i ett område som är kraftigt exponerat för vågor och mätningar av våghöjd i innerskärgården saknas. Utförd modellering visar dock att skärgården med sina öar och uppgrundningar har en mycket stor dämpande effekt på vågorna. De dyningar som teoretiskt skulle kunna nå hamninloppet är således mycket små, och överskuggas av de vågor som lokalt genereras av vinden i skärgården.

Modellens beräkningsnät har utformats för att beskriva vågorna vid hamnens mynning med högsta möjliga precision och detaljgraden på ett stort geografiskt avstånd från detta område är därmed lägre.

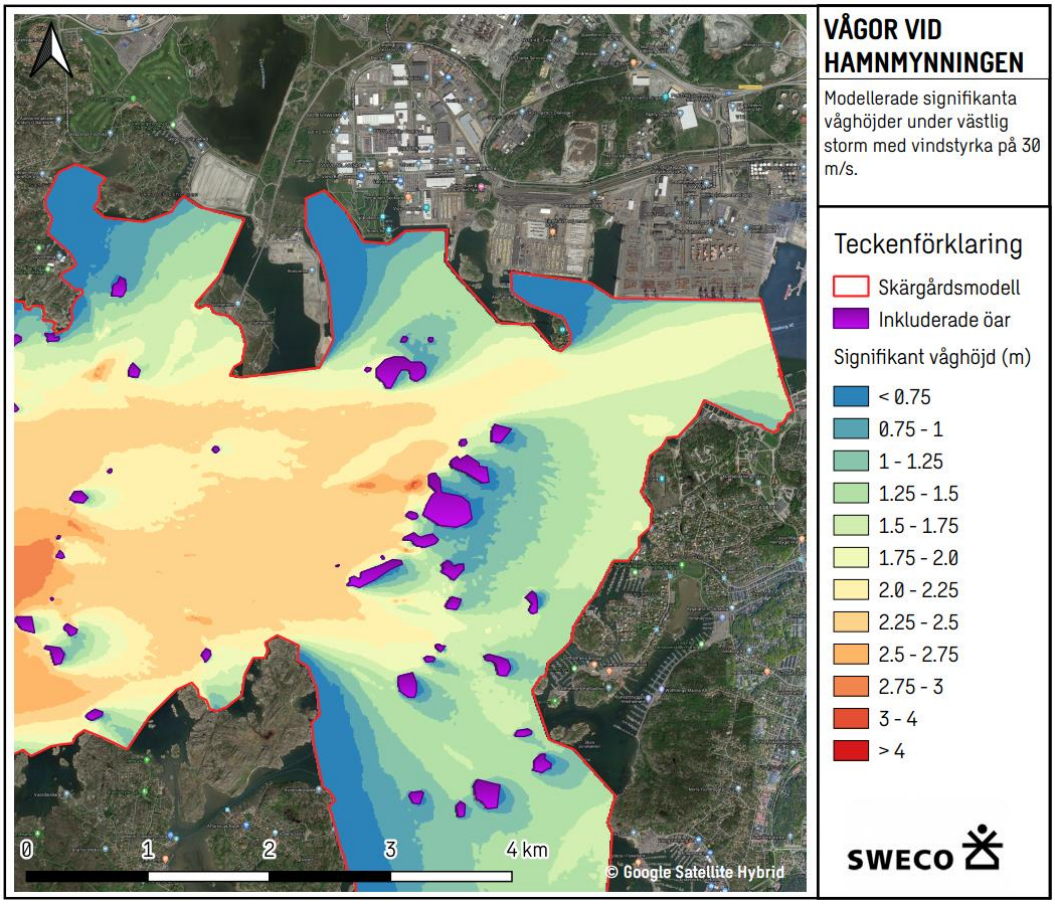
Modellresultaten indikerar att vågklimatet vid älvmynningen domineras av branta vågor med relativt korta perioder ($T_{m-1,0}$ = 3 - 4 s). Därutöver framgår av resultaten att vågklimatet vid mynningen är fullt utvecklat redan inom en timme av konstant vind. Om

de kraftiga vindarna har längre varaktighet än en timme leder detta således inte till en högre våghöjd. Ytterligare en slutsats från modelleringen är att vattenståndet inte påverkar våghöjden vid hamninloppet nämnvärt.

För att synliggöra hur öar, skär och uppgrundningar påverkar vågklimatet kring hamninloppet presenteras två scenarier med sydlig (*scenario 105*) respektive västlig storm (*scenario 107*) i Figur 5-2 och Figur 5-3 nedan.



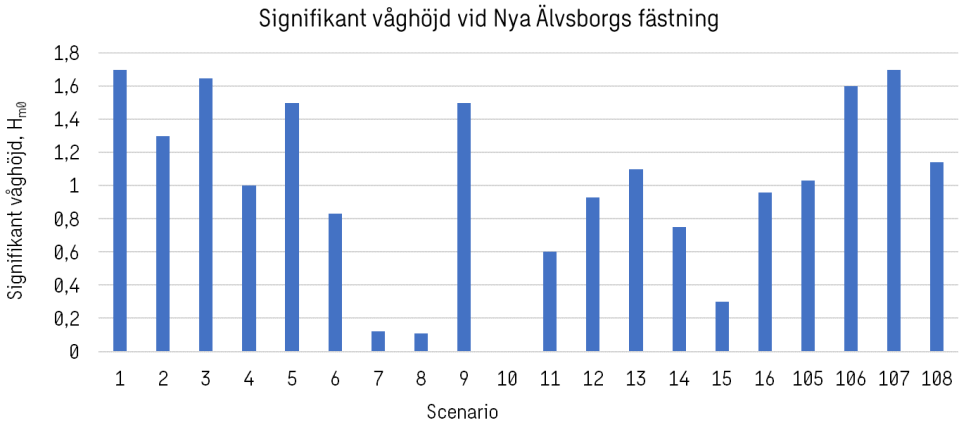
Figur 5-2 Modellresultat från scenario 105, sydlig storm med 30 m/s.



Figur 5-3 Modellresultat från scenario 107, västlig storm med 30 m/s.

I Figur 5-4 presenteras modellerad signifikant våghöjd i höjd med Nya Älvsborgs fästning för samtliga scenarier. Av figuren framgår att våghöjderna är störst för stormar med vindriktning från V-VSV (scenario 1,3,5,9,106,107).

Värt att notera är även att skillnaden mellan 30 m/s och 36 m/s sydlig vind (scenario 2 respektive 105) endast uppgår till ca 0,25 cm vid hamninloppet. En vind på 30 m/s har en återkomsttid än ca 39 år (se Tabell 3-1), medan en vind på 36 m/s sannolikt har en återkomsttid på flera hundra år. Därmed kan man konstatera att val av återkomsttid hos vindar (mellan exempelvis 50 eller 100 år) har en liten effekt på slutresultatet.



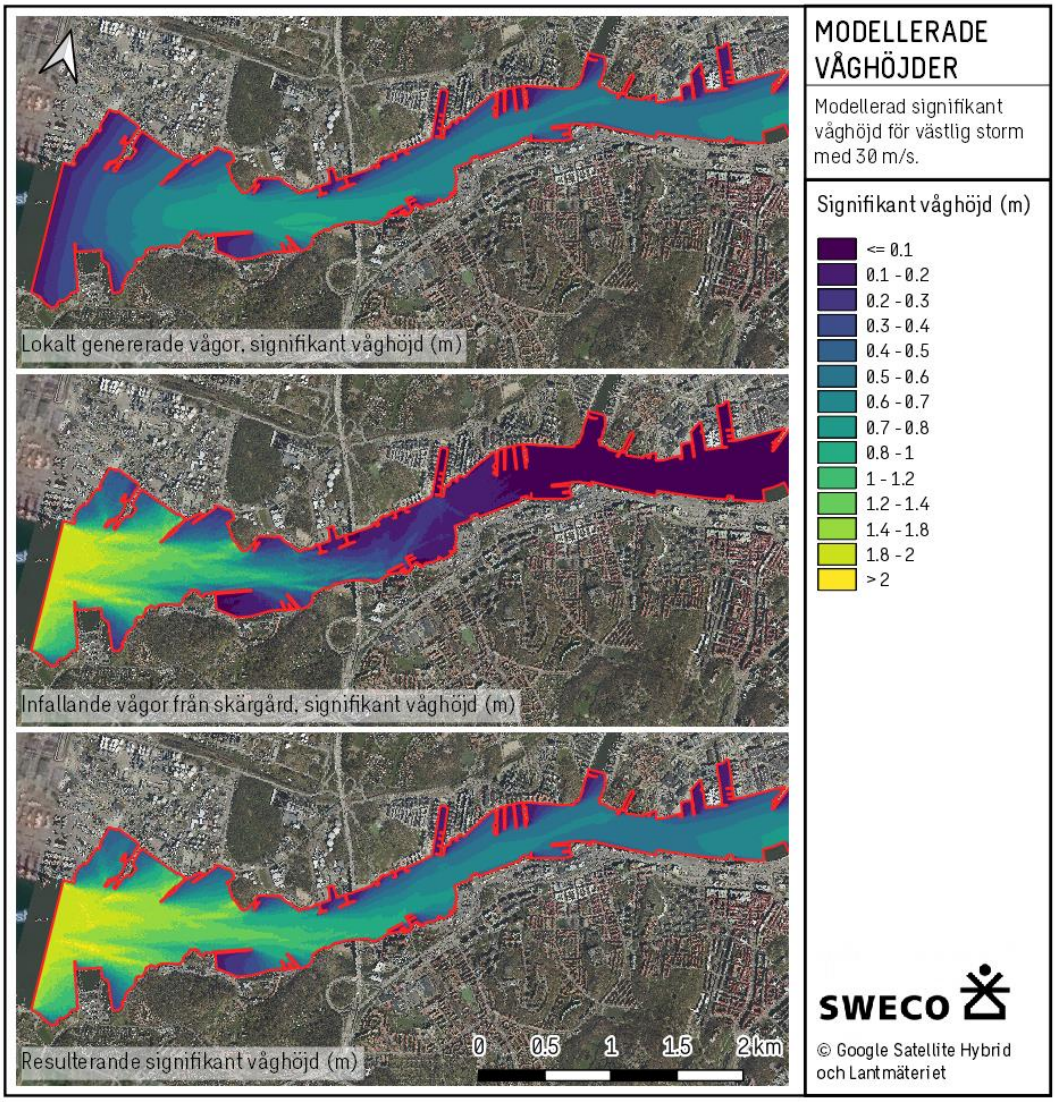
Figur 5-4 Modellerade våghöjder vid älvens mynning.

5.3 Vågor i hamnen

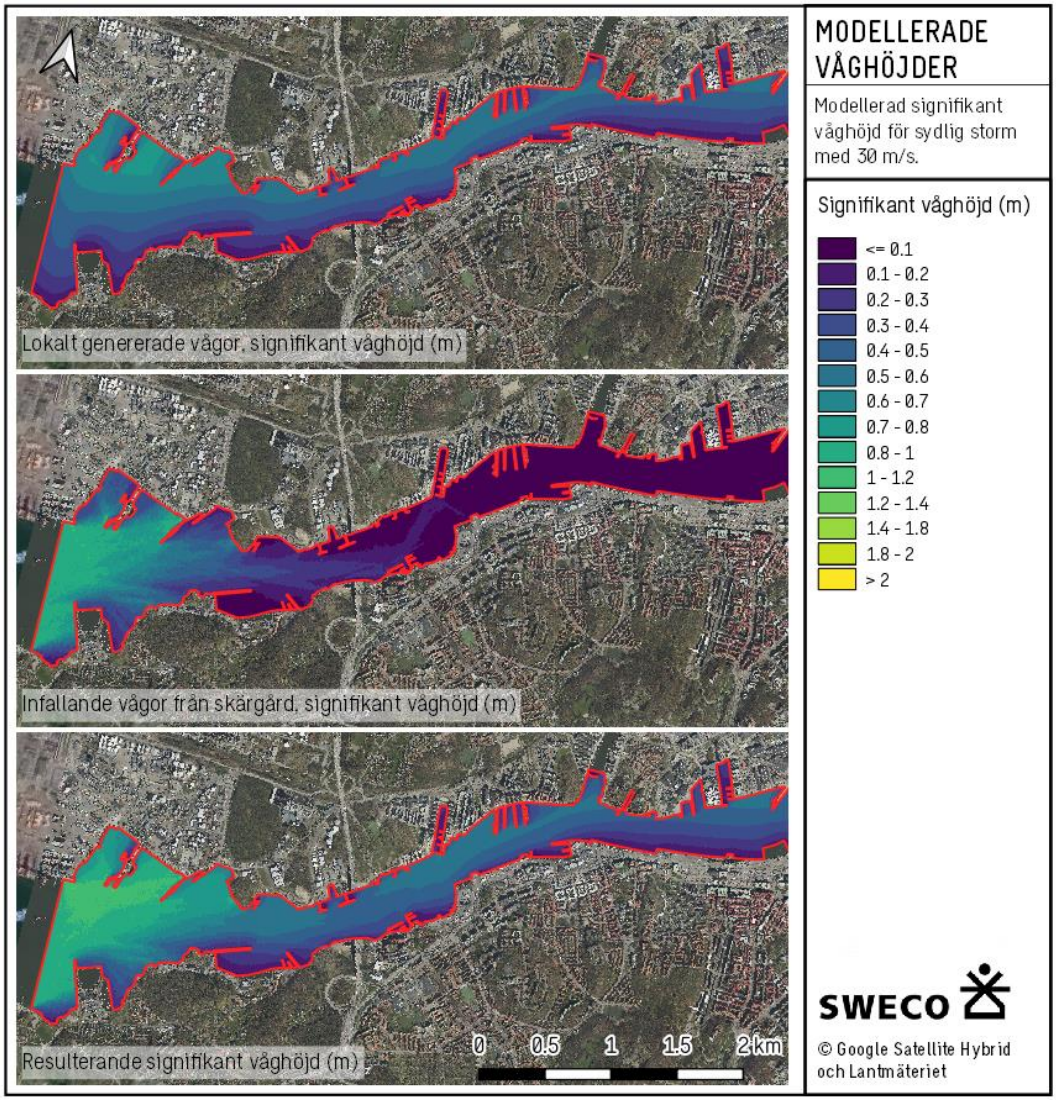
De två vågmodeller som är utvecklade för hamnen är utformade för att i största möjliga mån beskriva både penetration av vågor från skärgården och de lokalt genererade vågorna. Beräkningsnätets detaljgrad är mycket hög, vilket möjliggör att skuggningen av mindre strukturer som pirar och bryggor beräknas med god noggrannhet.

Figur 5-5 och Figur 5-6 visar modellerade våghöjder för två scenarier med en vindstyrka på 30 m/s för västlig (scenario 107) respektive sydlig (scenario 105) vindriktning. Den övre bilden i figurerna visar resultat från lokalt genererade vågor, den mittersta visar infallande vågor från skärgården och den nedersta visar den resulterande våghöjden beräknad enligt metodik i van der Meer et al. (2014). Figurerna illustrerar även att våghöjden längs älvstranden är starkt beroende av vindriktning och att betydelsen av de lokalt genererade vågorna ökar med avståndet från hamninloppet.

Generellt visar resultaten att våghöjden är som störst vid hamnmynningen, utanför Älvsborgsbron. Våghöjden i detta område kan sannolikt uppnå 1,2 – 1,4 meter. Det område som är utsatt för högst vågexponering inom studieområdet är kring Röda Sten och Sockerbruket med våghöjder uppemot en meter. Modelleringarna visar att vågklimatet i älven är fullt utvecklat inom 10–30 minuter beroende på geografiskt läge och vindriktning.

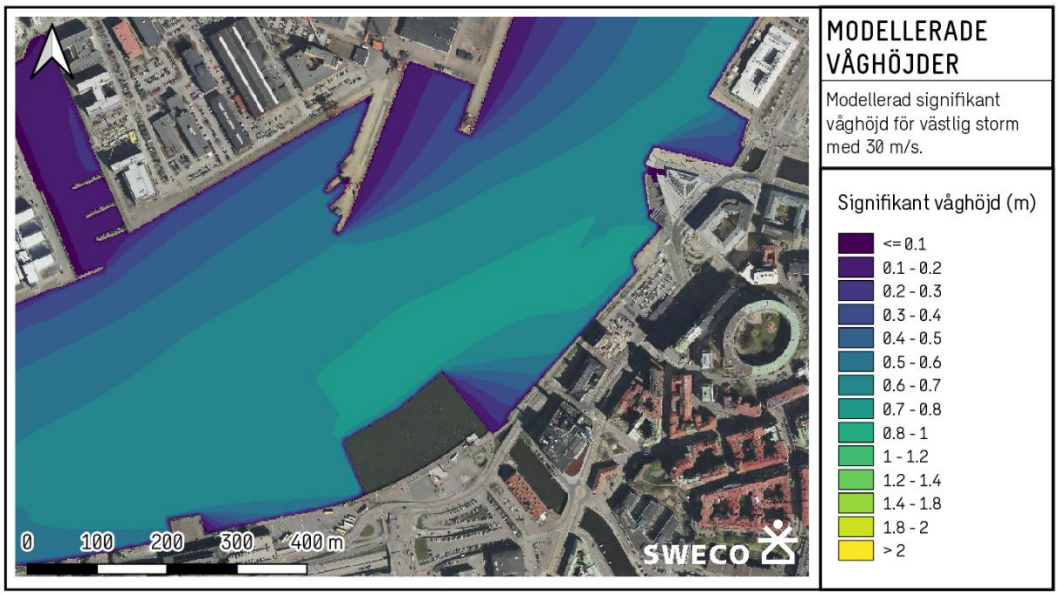


Figur 5-5 Modellerade våghöjder för ett scenario med 30 m/s västlig storm (scenario 107). Figuren visar att infallande vågor från skärgården har en betydande dämpning innan de når studieområdet. Det synliggörs även att lokalt genererade vågor är av störst betydelse längre in i älven.



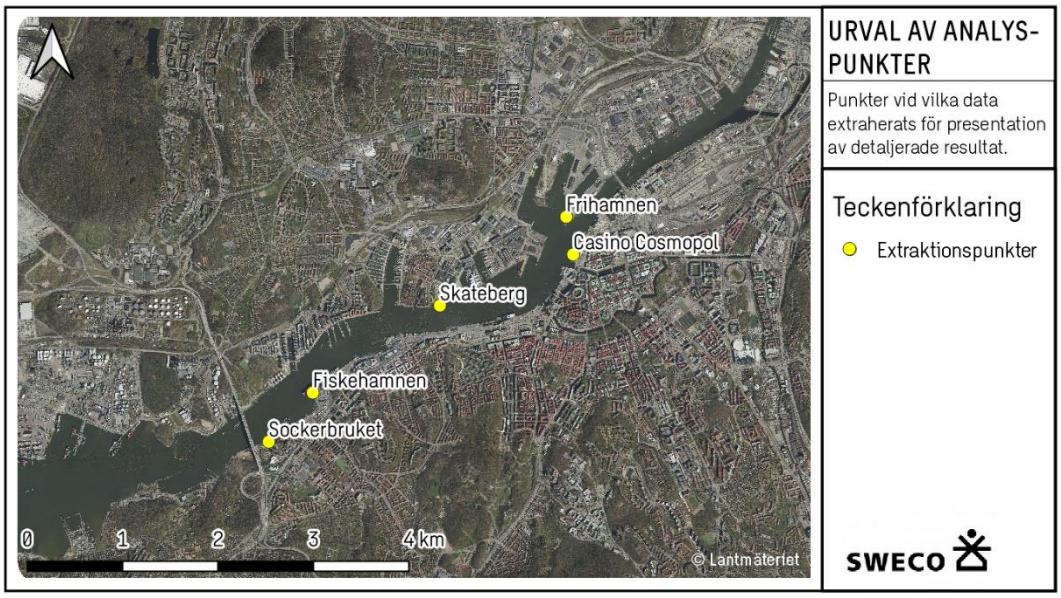
Figur 5-6 Modellerade våghöjder för ett scenario med 30 m/s sydlig storm (scenario 105). Figuren visar att infallande vågor från skärgården har en betydande dämpning innan de når studieområdet. Det synliggörs även att lokalt genererade vågor är av stor betydelse.

Ytterligare en slutsats som kan dras från modelleringen är det faktum att pirar, utstickande kajer och bryggor är effektiva vågdämpare och därigenom i stor utsträckning styr våghöjden vid älvkanten. I Figur 5-7 visas en bild över modellerade våghöjder (scenario 107) vid den planerade utbyggnaden av Masthuggskajen. Figuren synliggör storleksordningen av skuggningen och att våghöjden till följd av denna kan ha stor lokal variation.

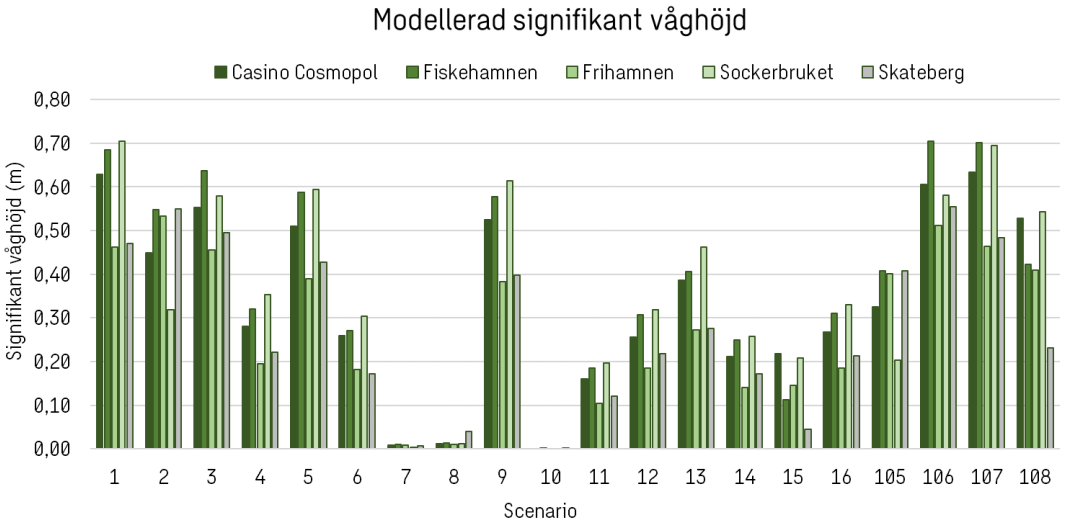


Figur 5-7 Modellerad signifikant våghöjd (m) i centrala Göteborg under ett tillfälle med 30 m/s västlig storm (scenario 107).

För att på ett översiktlig plan visa vilka våghöjder samtliga modellerade scenarier ger upphov till, har den resulterande våghöjden extraherats i fem punkter längs med älvstranden. Punkternas geografiska placering presenteras i Figur 5-8 och våghöjden i Figur 5-9.



Figur 5-8 Urval av analyspunkter för vilka detaljerade resultat har extraherats.



Figur 5-9 Beräknade resulterande signifikanta våghöjder (superpositionerade) för de fem utvalda punkterna längs älvstranden.

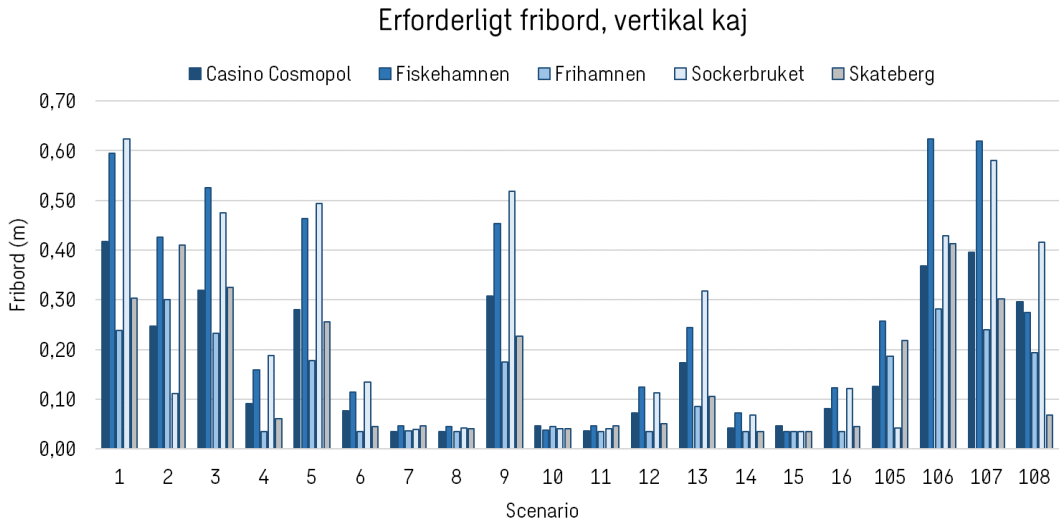
Figur 5-9 visar att olika delar av hamnen är olika exponerad för vågor, men att exponeringsgraden varierar med vindriktningen. Därutöver visar figuren att våghöjden i framtidsscenarierna är i paritet med de ur historisk synpunkt extrema händelserna.

5.4 Överspolning och erforderligt fribord

I följande avsnitt presenteras resultat från överspolningsberäkningar, där resultatet presenteras som en fribordshöjd (i meter). Fribordshöjden är den höjd över stillvattenytan som krävs för att reducera överspolningen till en förutbestämd nivå, i detta fall 10 l/s,m.

På ett översiktligt plan visar resultaten att älvkantskyddets erforderliga fribordshöjd varierar mellan ca 0,1 – 0,8 meter och att höjden är starkt beroende av hamnens lokala geometri. De högsta fribordshöjderna återfinns i områden med hög vågexponering medan de lägsta höjderna återfinns i områden i lä.

I Figur 5-10 presenteras beräknade fribordshöjder för samtliga scenarier i de fem extraktionspunkterna i Figur 5-8. För den slutgiltiga bedömningen av erforderligt fribord har den maximala fribordshöjden från samtliga 20 scenarier använts. Notera att beräknad fribordshöjd är oberoende av stillvattenytans nivå och endast bör adderas till det dimensionerande högvatten som staden önskar att skydda sig emot.



Figur 5-10 Beräknade fribordshöjder för de fem utvalda punkterna längs älvstranden.

Då beräkningarna av fribordshöjder har skett med en mycket hög upplösning (10 m) längs med älvkanten innehåller resultaten en mycket stor datamängd. I ovanstående figur presenteras alltså en mycket liten delmängd med syftet att belysa de olika scenariernas inverkan på slutresultatet samt hur älvkantens geografiska placering spelar in på fribordshöjden.

5.4.1 Scenarier som styr beräknad fribordshöjd

En analys av vilka scenarier som ger det högsta beräknade fribordet i varje punkt visar att det är fem scenarier som dominerar. En tydlig uppdelning ses mellan södra och norra älvstranden (fastlandet och Hisingen).

För södra älvstranden ger scenario 106 (fiktivt scenario - sydvästlig vind), scenario 107 (fiktivt scenario - västlig vind) och i viss mån även scenario 1 (historisk storm - västlig vind) högst fribordshöjder, och då framförallt för strandlinjer som ligger oskyddade från västlig vågexponering. För strandlinjer som vetter åt norr eller ligger skyddade av andra strukturer för västlig vågexponering, så är scenario 108 (fiktivt scenario - nordvästlig vind) dominerande.

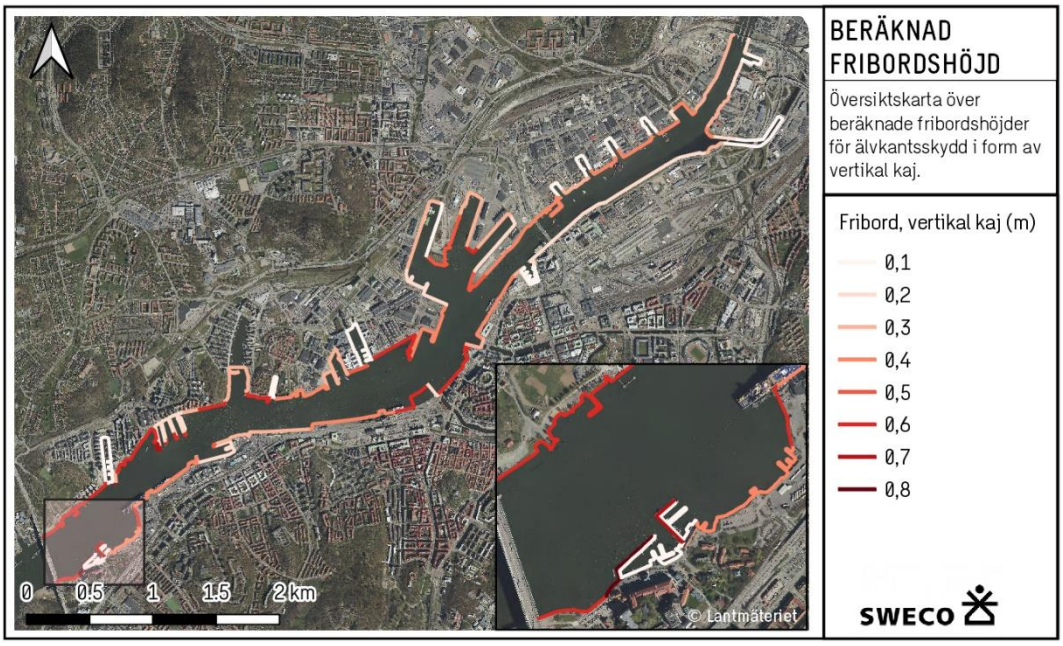
För norra älvstranden (Hisingen) är det nästan genomgående scenario 2 (historisk storm - sydlig vind) som ger de högsta beräknade fribordshöjderna. De få undantagen är att scenario 106 (sydvästlig vind) är dominerande i sträckor som vetter mot sydväst och därmed exponeras av vågor från ytterskärgården.

5.5 Sträckindelning

Utifrån strandlinjepunkter med föreslagna höjdvärden för de 20 scenarierna har maximalt höjdvärde för varje strandlinjepunkt valts ut. Detta betyder att för varje punkt har det

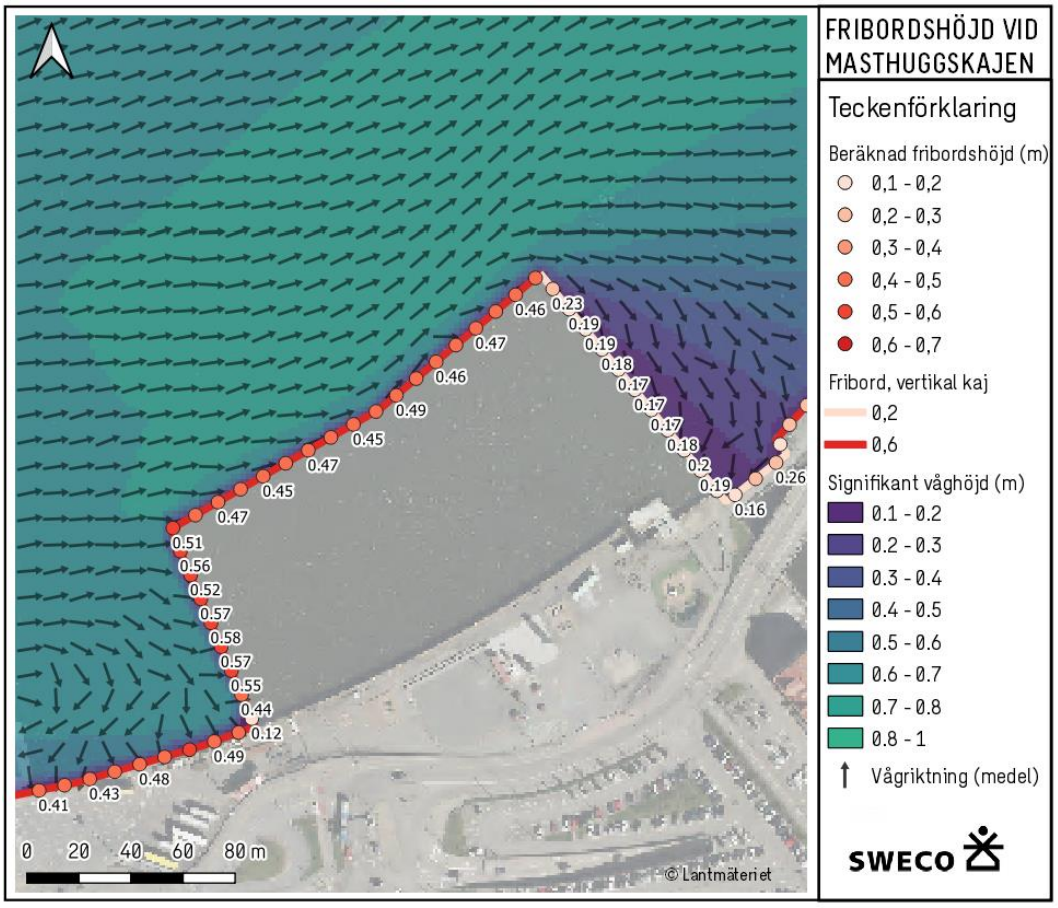
scenario som ger det högsta fribordet valts. På detta sätt får varje punkt ett värde för fribordshöjd för vertikal kaj, och ett för stenskoning.

För att erhålla ett dataunderlag som kan presenteras som representativa delsträckor gjordes en manuell gruppering av strandlinjepunkter med liknande fribordshöjd. Resultatet av sträckindelningen visas i Figur 5-11. De värden som presenteras här är fribord för vertikal kaj. Sträckindelningen är densamma för stenskoning men andra höjdvärden för fribordet.



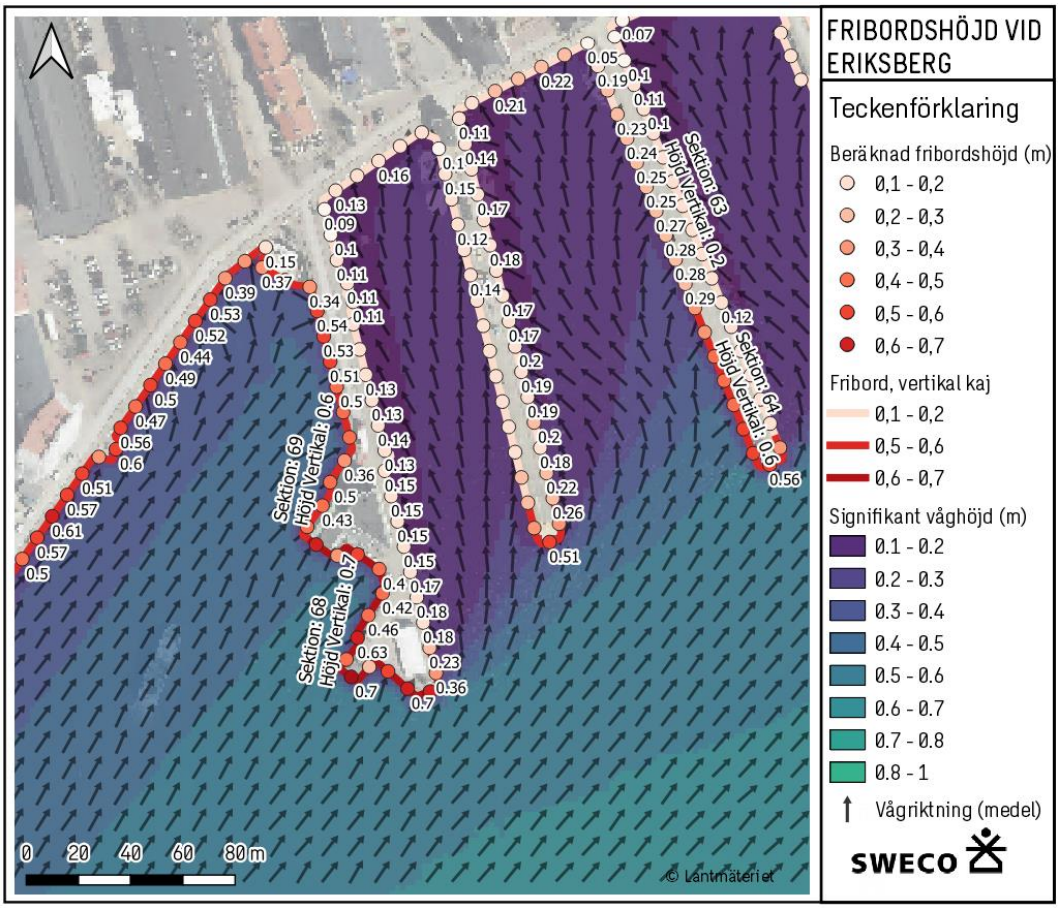
Figur 5-11 Figuren visar sträckindelning med fribordshöjder för vertikal kaj, totalt 73 sträckor. En generell trend är att fribordshöjden avtar österut. Det är också tydligt att sträckor som är skyddade av konstruktioner har en lägre fribordshöjd än den skyddande konstruktionen. Detta visas i det in zoomade området. Utan den yttra kajens skydd skulle strandlinjen behöva ett mycket högre fribord.

För att undgå allt för korta delsträckor har i vissa fall ganska stora variationer mellan punkterna godtagits och fribordshöjd för sträckan har satts till de strandlinjepunkterna med högst värden. Dock har en ensam punkt med högt värde inte varit tillräckligt för att tilldela en hel sträcka ett högre fribord, utan det har krävts ett antal strandlinjepunkter med högt värde för att välja ett högre fribord, vilket illustreras i Figur 5-12. I figuren visas två delsträckor där den västra av de två har strandlinjepunkter med ett fribord i spannet 0.12–0.58 m. Flera strandlinjepunkter har värden som är nära 0,6 (se den västra delen av den utstickande piren), därav har 0,6 m valts som fribordshöjd. Detta trots att det på den norra delen av piren inte finns några strandlinjepunkter som är högre än 0,5 så har denna del inkluderats i sträckan och fått höjdvärde 0,6. Detta för att undvika allt för korta sträckor. Däremot, när kajen böjer av söderut ses ett tydligt trendbrott och en ny sträcka inleds som fått höjden 0,2.



Figur 5-12. Detaljskiss som visar på hur sträckor skapas utifrån strandlinjepunkterna.

I Figur 5-13 visas ett exempel där det inte varit möjligt att undvika kortare sträckindelningar. Av de tre pirarna i figuren så fungerar den som ligger längst västerut som en vågbrytare för strandlinjen samt för de två övriga pirarna. Längt ut på den västra piren är fribordet satt till 0,7 m. I lä bakom denna är det satt till 0,1–0,2 m. Om den västra piren tas bort kommer alltså ett högre fribord att behövas längs strandlinjen. Värt att notera är att ändarna på de båda andra pirarna också har ett fått ett högre fribordsvärde med korta sträckindelningar. Detta eftersom dessa är inte lika skuggade som övriga delar av pirarna och därför är mer vågutsatta. Sträckindelningen här visar på dynamiken av skuggeffekter och kan ev. underlätta bedömning av vad som händer om en eller flera pirar avlägsnas.



Figur 5-13 Detaljskiss som visar på hur sträckor skapas utifrån strandlinjepunkterna. Samt ett exempel på hur en konstruktion kan skydda bakomliggande strandlinje.

Totalt har 73 delsträckor skapats. Värt att notera är att sträckorna är desamma för vertikalt fribord som för stenskoning. Först skapades sträckorna för vertikal kaj. Samma sträckor fick sedan ett nytt fribord för stenskoning. Även om det var viss skillnad mellan många strandlinjepunkter för fribordet mellan vertikal kaj och stenskoning, så blev den faktiska skillnaden mellan sträckorna liten. Vissa sträckor fick i storleksordningen 0,1 m lägre fribord för stenskoning. Detta speciellt för sträckor med fribord i de högre spannen. En slutsats som kan dras av detta är att effekter av stenskoning är mer effektivt på mindre skala (storleksordning <100 m) i särskilt vågutsatta områden. Detta är något som kan beaktas vid detaljstudier.

5.6 Sättningar längs älvstranden

Sättningarnas storlek i Göteborg uppgår inom många delar av området till över en meter och i vissa upp emot två meter sedan det mer omfattande utfyllnadsarbetet påbörjades under den andra halvan av 1800-talet. Sättningarna på 1–2 meter bör därmed ha

utbildats under de senaste 100-150 åren. Dessvärre har sättningarna inte avstannat utan pågående sättningar förekommer, i stort sett, inom hela Göteborg där utfyllnader utförts.

Längs kajstråken där huvuddelen av älvkantskydden kommer att anläggas varierar de pågående sättningarnas storlek mellan någon enstaka millimeter per år till upp emot 15–20 millimeter per år. Generellt återfinns de lägre sättningshastigheterna där kajkonstruktionerna är av modernt slag där konstruktionen grundlagts på längre pålar. Inom områden där denna typ av konstruktion inte förekommer är sättningshastigheten högre och detsamma gäller ofta för områdena bakom själva kajkonstruktionen.

Sett till år 2070 kan således sättningarna längs älvstranden variera mellan 0,1 – 1 meter. Det ska dock poängteras att sättningshastigheten kan begränsas genom god grundläggning.

6 Diskussion

Denna utredning visar att de faktorer som spelar störst roll för älvkantens skydd är dess utsatthet för olika vindriktningar (och därigenom vågriktning). Både vågens höjd och infallsvinkel beror således på kajens orientering. Dessa faktorer är av betydligt större vikt än exempelvis bottendjupet utanför konstruktionen, val av konstruktion och om den dimensionerande vindhastigheten väljs som en 50-års händelse eller 200-års händelse.

I nedanstående underkapitel redovisas lite resonemang kring alternativa tekniska lösningar, hur det geotekniska underlaget kan förbättras, vilka osäkerheter som högvattenskyddets totala höjd har och slutligen hur materialet från denna utredning är avsett att användas.

6.1 Alternativa tekniska lösningar

6.1.1 Lämpligheten av stenskoning

Stenskoningar är en konstruktion som effektivt kan bidra till att reducera skyddshöjden i kraftigt vågexponerade lägen. Stenskoningar är flexibla lösningar som kan byggas på med tiden, men i förhållande till en enkel skyddsmur har de betydligt större platsanspråk och sannolikt även större komplexitet i förhållande till sättningar. En bedömning av vilken konstruktion som är lämplig bör alltid göras platsspecifikt.

6.1.2 Förskjuten gränslinje

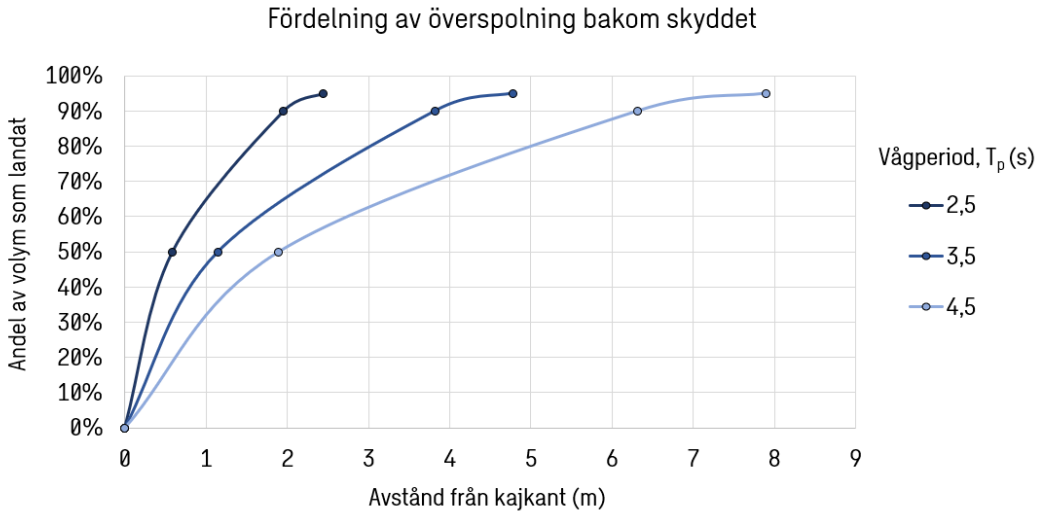
En effektiv åtgärd för att minska fribordshöjden är att tillåta vågorna att spola över ett område, en buffertzon, innan de möter en sekundär gränslinje. Överspolningsreduktionen för ett överspolningsskydd förskjutet från den primära gränslinjen (kajkanten) ökar med avståndet till skyddet.

I EurOtop (2018) saknas riktlinjer för hur avstånd och höjd av det sekundära skyddet ska utformas i urbana miljöer. För överspolning som sker som en sammanhängande vattenmassa (Figur 2-3 t.v.) på terrängens lutning och dränering bakom skyddet, och ingen generell bedömning kan då ges. Vid överspolning då vatten spolar/sprayar över konstruktionen (Figur 2-3 mitten och t.h.), finns dock studier utförda på fördelningen av flödet som en funktion av avståndet från krönet. Studierna är utförda på vertikala konstruktioner. Resultaten bör endast ses som indikativa, men visar att:

- 50% av de överspolade volymerna landar inom ett avstånd av 0,06 $\times$ $L_{m-1,0}$
- 90% av de överspolade volymerna landar inom ett avstånd av 0,2 $\times$ $L_{m-1,0}$
- 95% av de överspolade volymerna landar inom ett avstånd av 0,25 $\times$ $L_{m-1,0}$.

Där $L_{m-1,0}$ är våglängden, vilken inom studieområdet sannolikt ligger inom spannet 10 – 35 meter. När vågor faller in vinkelrätt mot en konstruktion kan således följande indikation ges för centrala Göteborg:

- 50% av de överspolade volymerna landar inom ett avstånd av 0,6 – 2,1 m.
- 90% av de överspolade volymerna landar inom ett avstånd av 2 – 7 m.
- 95% av de överspolade volymerna landar inom ett avstånd av 2,5 – 9 m.



Figur 6-1 Fördelning av överspolning bakom vertikalt högvattenskydd, vid kraftig pålandsvind. Den mittersta kurvan, för en vågperiod på 3,5 s är mest sannolik för förhållandena i Göta älv. Med denna graf landar 95 % av överspolade volymer inom 5 meter från kajkanten. Observera dock att detta endast är indikativt.

Det sekundära skyddet kan utformas som trappsteg, lägre bänkar eller liknande. Under 2014 utförde Ramböll en studie över olika utformningsförslag av högvattenskydd, vilket kan vara till god hjälp för att avgöra var dessa sekundära skydd är lämpliga att placera (Ramböll, 2014). Nivåangivelserna i Rambölls rapport avviker dock från nivåer presenterade i denna rapport, då rapporterna utgår från olika högvattenscenarier och då tidigare utredning inte inkluderar vågeffekter.

6.2 Geotekniska aspekter

När mer fördjupade utredningar eller projektering av älvkantskydden ska ske är det viktigt att sättningarna beaktas så att den erforderliga överkantshöjden på skydden kan säkerställas över tid. För att säkerställa detta behövs god kunskap om sättningshastigheterna vilka ofta är svåra att uppskatta. Inom ramen för Västlänken-projektet genomförs kontinuerliga sättningsuppföljning genom satellitscanning. Denna uppföljning omfattar den större delen av området som denna utredning beaktar och det rekommenderas därför att möjligheten att nyttja underlaget undersöks.

De nya skydden kommer att medföra tillskottslaster på de markytor eller konstruktioner där skydden placeras. Det är därför viktigt att tillskottslasterna beaktas med avseende på

hur de påverkar konstruktionernas bärighet och när det gäller stabilitet, bärighet och hur lasterna påverkar sättningshastigheten där skydden placeras på oförstärkta markytor.

6.3 Ackumulerade osäkerheter

De faktorer som huvudsakligen styr högvattenskyddens höjd till 2070 kan sammanfattningsvis delas in i fyra kategorier:

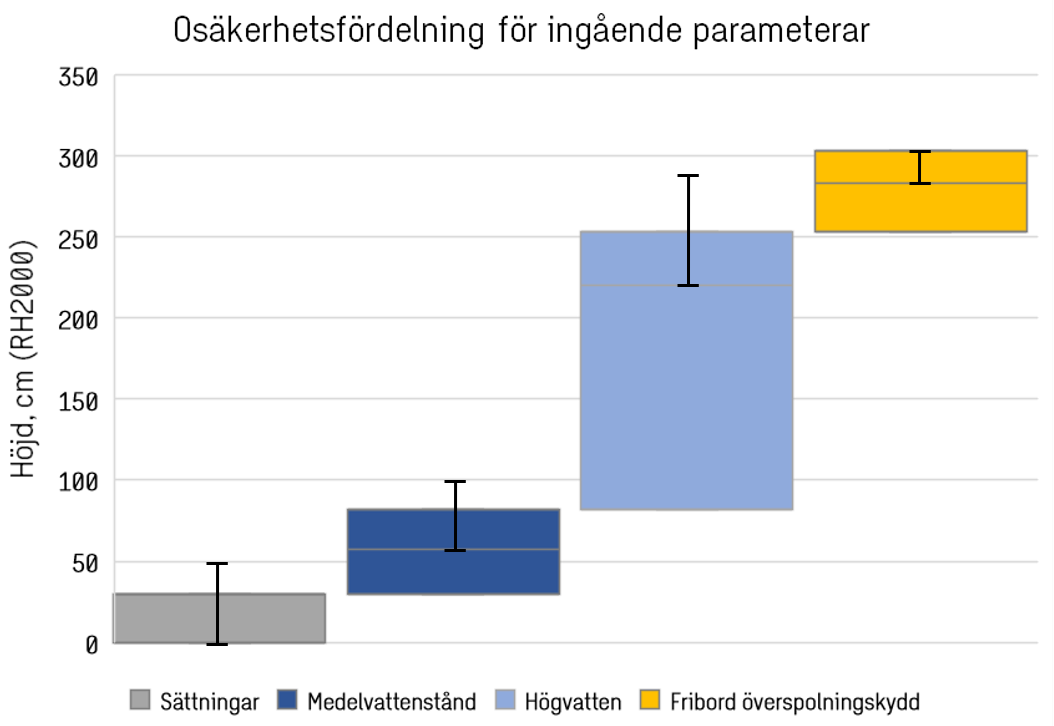
- Medelvattenytans stigning (kapitel 2.2)
- Beräknat extremvattenstånd (kapitel 2.2)
- Förväntade sättningar av skyddet (kapitel 5.6)
- Vind- och vågeffekter (kapitel 5.5)

För att åskådliggöra de sammanlagda osäkerheterna i relation till denna studiens resultat, presenteras ett diagram över den ackumulerade osäkerheten för älvkantskyddets höjd i Figur 5-1.

Inkluderade osäkerhetsintervall är följande:

- Medelvattenytans stigning till 2070, +52 cm (27 – 70) för 95% konfidensintervall.
- Beräknat extremvattenstånd, +171 cm (138 – 203) för 95% konfidensintervall.
- Sättningar, 2 – 10 mm/år, med utgångspunkt i modernare konstruktioner.
- Erforderligt fribord för överspolningskriteriet vid godtyckligt vald punkt längs älvstranden, +0,3 (0,17 – 0,5 för en standardavvikelse).

Även om osäkerheterna kopplade till beräknad fribordshöjd för ett vågskydd är stora, så visar figuren att är de i förhållande till andra osäkerheter som styr skyddsnivån är relativt liten. Notera även att EurOtop 2018 infört en *”design and assessment approach”,* med en säkerhetsfaktor på en standardavvikelse, vilket innebär att resultat presenterade i denna rapport kan anses utgå från en något konservativ beräkningsmetodik.



Figur 6-2 Osäkerhetsfördelning mellan olika parametrar som styr den totala höjden av högvattenskyddet.

Om inte det yttre skyddet är på plats till 2070 så behöver fribordet höjas i samma takt som medelvattenytan stiger, för att hålla nere överspolningen till rekommenderade nivåer. Detta bygger på förutsättningen att beräkningarna för ett extremhögvatten hålls oförändrade.

6.4 Att tänka på vid användning av resultat

Det slutgiltiga resultatet från denna studie är en kompromiss mellan användarvänlighet och detaljeringsgrad. Utifrån ett användarperspektiv blir ett allt för detaljerat material svårt att förhålla sig till, och därmed har beräkningsresultaten delats in i olika representativa delsträckor efter erforderligt fribord. De fribordshöjder som redovisas i denna utredning kan användas för att i ett tidigt skede få insikt i de platsspecifika utmaningarna kopplade till vind- och vågeffekter längs älvkanten.

Det ska poängteras att beräkningarna i utredningen bygger på en acceptabel överspolning på 10 liter per sekund och löpmeter skydd. De extrema förhållanden som utredningen bygger på är med största sannolikhet i tid begränsade till storleksordningen 1–2 timmar. Riskerna till överspolning ska utvärderas platsspecifikt med hänsyn till vad man avser att skydda.

En faktor som på flera delsträckor är avgörande för skyddets höjd är hamnens geometri. Pirar och bryggor påverkar i stor utsträckning vågornas storlek och riktning, och vid större

förändringar av dessa kan således resultaten komma att bli inaktuella. Vid planering av större ändringar av pirar, kajer och bryggor bör därmed en bedömning av effekten på närliggande områden utföras.

Användning av resultat presenterade i denna studie bör tas med extra försiktighet när det gäller samhällsviktig bebyggelse och infrastruktur. Till viss del kan detta dock anses redan vara implementerat i Göteborgs arbetsgång då man i TTÖP tar hänsyn till osäkerheter med en extra säkerhetsmarginal.

7 Slutsatser

I detta kapitel följer en sammanställning av resultat och slutsatser som kan dras från utredningen.

- Vågklimatet I Göta älv styrs huvudsakligen av lokalt genererade vågor, förutom i de yttersta delarna av älven där visst tillskott från skärgården är att förvänta. Våghöjder inom studieområdet understiger 1,0 meter för samtliga modellerade förhållanden.
- Exponeringen för vågor i olika delområden kan förändras till följd av ändringar i hamnens geometri, t.ex. genom förändrad utformning av kajer, pirer och bryggor.
- Erforderlig fribordshöjd för att reducera våguppspolningen till 10 l/s,m har beräknats till ett spann mellan 0,1 – 0,8 m i det avgränsade studieområdet.
    - De högsta fribordshöjderna återfinns i anslutning till hamnens mynning, och lägen med hög vågexponering.
    - De lägre värdena återfinns i områden i lä från de dominerande vågriktningarna.
- Den enskilt viktigaste parametern som styr höjden av högvattenskydden är vilka volymer överspolning som kan anses acceptabla. Därutöver spelar infallsvinkeln av vågor mot skyddskonstruktionen en viktig roll för fribordets höjd.
- Osäkerheterna i beräkningarna av fribordshöjd är små i förhållande till osäkerheter för medelvattenytans höjning, extremhögvatten och sättningshastighet, vilka alla ligger till grund för den totala erforderliga skyddshöjden.
- Den beräknade fribordshöjden är oberoende av vattenståndet, och denna nivå är således statisk i det avseende att det inte förändras till följd av klimatförändringar.
- Om Göteborgs Stad inte har ett storskaligt skydd på plats till 2070 behöver fribordshöjden längs älvkanten höjas i linje med förväntad stigning av medelvattenytan inom den tidshorisont man avser att skydden ska vara aktiva.
- Återkomsttiden av de dimensionerande metereologiska förhållandena i denna studie är okänd. Återkomsttiden för varje scenario beror på tre faktorer; vattenstånd, vindriktning och vindstyrka. Genom inkludering av extremscenarierna kan det dock konstateras att fribordshöjderna är dimensionerande för händelser med återkomsttider högre än 200 år.
- Stenskoningar är en konstruktionstyp som krävs mer plats än en vertikal kaj, men till gengäld kan erforderlig krönhöjd minskas i exponerade lägen. Vid låga våghöjder är skillnaden dem emellan mindre. Stenskoningar ger även upphov till

minskad reflektion jämfört med en kaj, vilket kan bidra till ett lugnare vågklimat i dess närhet.

- När mer fördjupade utredningar eller projektering av älvkantskydden ska ske är det viktigt att sättningarna beaktas så att den erforderliga överkantshöjden på skydden kan säkerställas över tid.

8 Digital leverans

Den digitala leveransen består av två stycken SHAPE filer som visar de 73 delsträckorna och deras respektive fribordshöjder. En SHAPE filer för vertikal kaj och en SHAPE filer för stenskoning.

Namn på SHAPE filerna samt namn och datatyp för attributen redovisas nedan:

Stenskoning.shp

Antal delsträckor: 73 st

Attribut:

Sektion_nr (Integer)	"Id för respektive sektion”
Stenskon_h (Float)	"Innehåller höjder i meter för kajkonstruktion med stenskoning framför".

Kaj_Vertikal.shp

Antal delsträckor: 73 st

Attribut:

Sektion_nr (Integer)	"Id för respektive sektion”
Vertikal_h (Float)	"Innehåller höjder i meter för vertikal kajkonstruktion"

Koordinatsystem är: Sweref 99 12 00 (EPSG: 3007)

9 Referenser

CIRIA; CUR; CETMEF. (2012). *Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering* (2nd editio). London: CIRIA.

EurOtop. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An manual largely based on European research, but for worldwide application.* (Vol. 2). https://doi.org/10.5034/inquiryjrnl_46.02.140

Göteborgs Stad. (2019). *Översiktsplan för Göteborg - tillägg för översvämningsrisker*. Göteborg.

Gruwez, V., Bolle, a, Verwaest, T., & Hassan, W. (2012). Numerical and physical modelling of wave penetration in Oostende harbour during severe storm conditions. *5th SCACR International Short Conference on Applied Coastal Research: Proceedings, 6th-9th June, 2011 - RWTH Aachen University, Germany. Mitteilungen Des Lehrstuhls Und Instituts Für Wasserbau Und Wasserwirtschaft Der Rheinisch-Westfälischen Technischen H*, *165*, 198–205.

Komen, G. J., Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.*, *14*(8, Aug. 1984), 1271–1285. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1271:oteoaf>2.0.co;2

Ramböll. (2014). *Översvämningsskydd längs Göta älv*. Retrieved from https://goteborg.se/wps/wcm/connect/177be77d-264d-4a2e-8841-e3d8dcb1b422/Oversvmningsskydd_GotaAlv.pdf?MOD=AJPERES

Ris, R. ., Hurdle, D. ., & Holthuijsen, L. . (2001). *Deep water wave growth at short fetches for high wind speeds*. Delft, Netherlands.

Shibayama, T. (2009). *Coastal Processes: Concepts in Coastal Engineering and Their Applications to Multifarious Environments* (Volume 28). World Scientific.

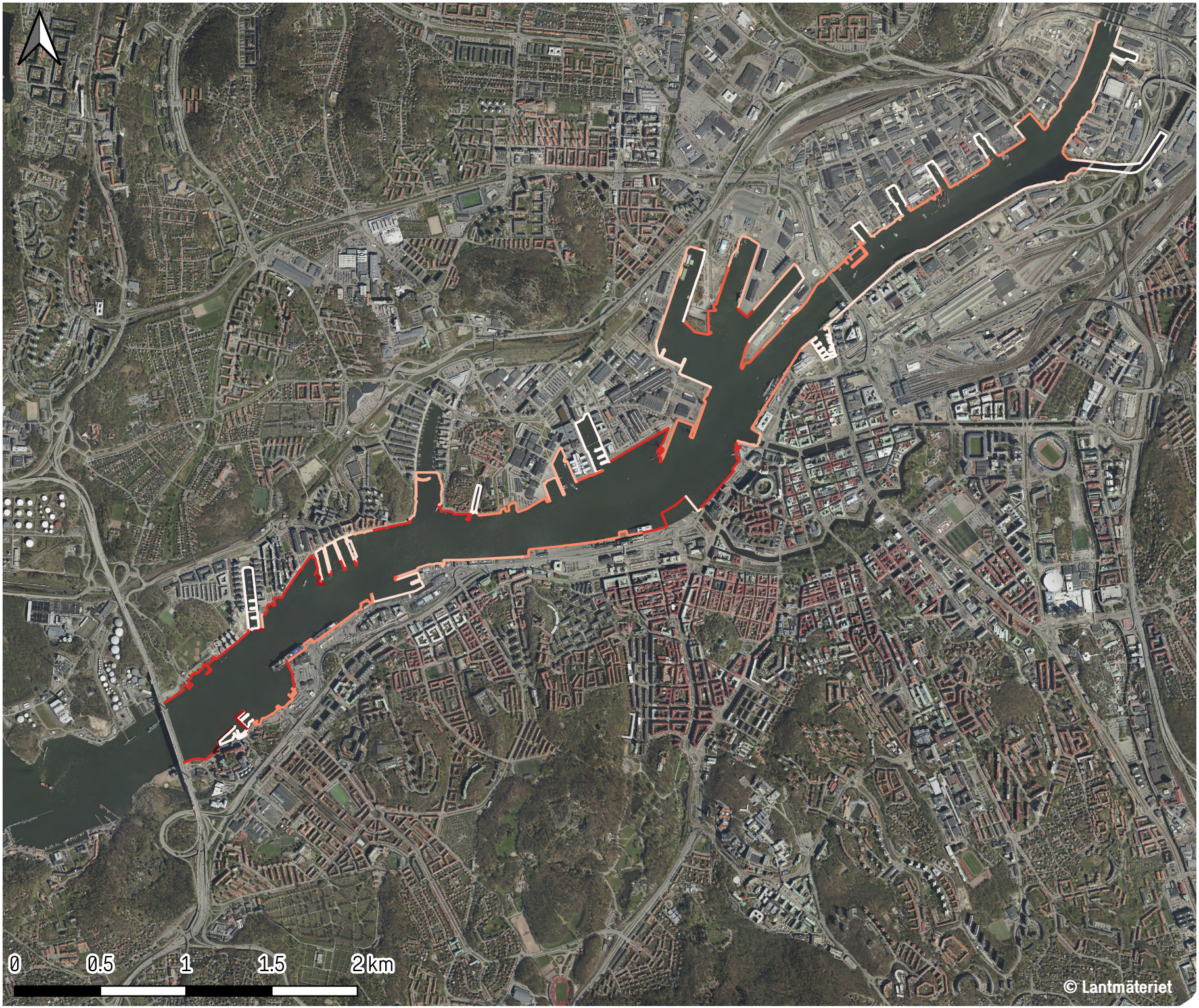
SMHI. (2014). *Uppdaterad klimatanalys av havsvattenstånd i Västra Götalands Län*. (2011–45).

SMHI. (2018). *Extremvattenstånd i göteborg*.

Tyréns; Hydrosense. (2018). *Expertstöd i tillämpningsprocessen av strategier framtagna i Tematisk tillägg för översvämningsrisker. Fördjupad utredning – Våghöjder och översköljning Pumpgatan / Lundbyhamnen*.

van der Meer, J. W., Langenberg, J. W., Breteler, M. K., Hurdle, D. P., & den Heijer, F. (2014). *Wave Boundary Conditions and Overtopping in Complex Areas*. https://doi.org/10.1142/9789812791306_0176

Wilson, B. . (1955). Graphical Approach to the Forecasting of Waves in Moving Fetches. *U.S Army Corps of Engineers, Technical Memorandum No. 73*.



BERÄKNAD FRIBORDSHÖJD

Översiktskarta över beräknade fribordshöjder för älvkantsskydd i form av vertikal kaj.

Fribord, vertikal kaj (m)

- 0,1
- 0,2
- 0,3
- 0,4
- 0,5
- 0,6
- 0,7
- 0,8

SWECO