

Master Thesis
TVVR 26/5018

Falsterbonäsets skyddsvalls sårbarhet mot framtida stormhändelser

*En analys av vågöverspolning och
erosionsbeständighet*

Carl Uddgren
Adam Gyllfors



Division of Water Resources Engineering
Department of Building and Environmental Technology
Lund University

The Vulnerability of the Falsterbo Peninsula Flood Protection Dike to Future Storm Events

An Analysis of Wave Overtopping and
Erosion Resistance

By:
Carl Uddgren
Adam Gyllfors

Master Thesis

Division of Water Resources Engineering
Department of Building & Environmental Technology
Lund University
Box 118
221 00 Lund, Sweden

Water Resources Engineering
TVVR-26/5018
ISSN 1101-9824

Lund 2026
www.tvrl.lth.se

Master Thesis
Division of Water Resources Engineering
Department of Building & Environmental Technology
Lund University

Swedish title:	Falsterbonäsets Skyddsvalls Sårbarhet mot framtida stormhändelser: <i>En analys av vågöverspolning och erosionsbeständighet</i>
English title:	The Vulnerability of the Falsterbo Peninsula Flood Protection Dike to Future Storm Events: <i>An Analysis of Wave Overtopping and Erosion Resistance</i>
Author(s):	Carl Uddgren Adam Gyllfors
Supervisor:	Caroline Hallin
Examiner:	Björn Almström
Language	Swedish
Year:	2026
Keywords:	Overtopping, Falsterbo Peninsula, Sea dikes, Erosion resistance, Sea level rise, Clay till dike, Embankment, Overtopping simulator

Förord

Först och främst vill vi tacka handledare Dr. Caroline Hallin och examinator Dr. Björn Almström för deras hjälp och vägledning genom arbetet. Speciellt tacksamma är vi för vågmodellen vilken har lagt grunden för stora delar av studien.

Ett stort tack ska också riktas till NCC:s organisation där vi först vill tacka platschef/bitr. projektchef Daniel Löfvall som tog oss under sina vingar och försåg oss med material, arbetskraft och erfarenhet. Vidare vill vi tacka arbetsledare Ola Berglund för visat förtroende till oss med tigersåg och andra verktyg, anläggare Laroy Karlsson och maskinist Rolf Hansson, vilka konstruerade skyddsvallen för experimentet och utan vilka experimentet hade varit omöjligt.

Slutligen ska tack även riktas mot Olof Persson för referenser, överblick och sin breda expertis inom kustskydd, Stefan Gustafsson för geoteknisk input som hjälpte oss utforma experimentet och även tänka i geotekniska banor, Sebastian Bokhari Irminger för en god bakgrund till projektet och tillgång till hans breda kontaktnät, Mikael Wärnsby för ett juridiskt perspektiv och djupgående förklaring av tillståndsprocessen, och slutligen Anders Purcell för en inblick i byggprocessen och den politiska avvägning som ligger bakom skyddsvallens utformning.

Abstract

The Falsterbo peninsula is a narrow and low-lying stretch of land in the southwestern corner of Sweden, surrounded by the sea on three sides. Because of its geography, flooding has always been a part of its history. In November 1872, the storm surge known as Backafloeden inundated large parts of the peninsula and caused extensive damage to homes and infrastructure. A few decades later, the New Year's Storm of 1904 brought somewhat less severe, but still comparable, destruction.

More than a century later, the same vulnerability remains. Rising sea levels and changing storm patterns are expected to increase flood risks in many coastal areas, including the Falsterbo peninsula. To address this challenge, Vellinge municipality is constructing a 21-kilometer-long flood protection system consisting of sea dikes and seawalls. The structures are built to a crest level of +3.0 meters in RH2000, the Swedish national height reference system, and are intended to protect the peninsula from future storm surges and high water levels.

The purpose of this study is to evaluate how well this flood protection is likely to perform during its planned lifespan and to identify the conditions under which it may become vulnerable to erosion or failure.

To answer these questions, the study combines two complementary approaches. The first focuses on wave overtopping, which occurs when waves wash water over the crest of a dike or seawall. Although some overtopping can be tolerated, excessive overtopping may erode the landward side of the structure and eventually threaten its stability. Overtopping was calculated along the entire flood protection using EurOtop (2018), the current European standard for overtopping assessments. Wave conditions were obtained from the numerical wave model SWAN, which was used to simulate 120 combinations of water level, wind speed and wind direction. Together, these simulations provide a detailed picture of the storm conditions the flood protection may encounter.

The second part of the study examined how resistant the sea dike is to erosion. To do this, a series of controlled field experiments was carried out on a smaller test dike designed to represent the geometry and materials of the actual structure. Four different test sections were constructed with varying slopes and surface materials, including clay till, sand and grass-covered surfaces. Using an overtopping simulator, the test dikes were exposed to controlled flows ranging from 0.33 to 1.67 liters per second per meter (l/s/m). This made it possible to observe how different surfaces responded to overtopping and to determine when erosion began to develop.

The experiments clearly demonstrated that the condition of the dike surface plays a crucial role in its ability to withstand overtopping. Dense grass cover proved to be by far the most erosion-resistant surface tested. No growing erosion was observed on the grass-covered sections, even at the highest flow rates used in the experiments. Sand showed the opposite behavior. Erosion channels began to form already at 0.33 liters l/s/m, a relatively low flow rate that can occur during moderate storms in the most exposed parts of the flood protection.

The performance of clay till, which is the primary material used in the actual sea dike, fell somewhere inbetween. It proved considerably more resistant than sand, with growing local erosion first appearing at 1.67 l/s/m on a slope of 1:3. The experiments alone were not sufficient to determine the ultimate erosion limit of the material, but when combined with previous studies of clay and mixed till sea dikes, they provide a useful indication of its performance. Based on this combined evidence, the study estimates that the risk of structural damage becomes significant at around 5 l/s/m, while the critical threshold of the dike is likely exceeded somewhere around 10 l/s/m, if the vegetation cover is damaged or absent.

These erosion thresholds become particularly important when viewed together with the overtopping calculations. By combining the results, the study identified Kämpinge and northern Höllviken as the most exposed sections of the flood

protection. In these areas, overtopping could become critical at water levels of approximately +1.5 meters (RH2000) if the dike surface is in poor condition, for example due to a combination of sparse vegetation, holes, pits or other forms of damage. This finding highlights an important point of the study: the effectiveness of the flood protection depends not only on its height and design, but also on how well it is maintained over time.

The importance of maintenance becomes even clearer when considering future water levels. An analysis of historical water level and wind data shows that levels above +1.5 meters (RH2000) are uncommon but certainly possible, where water levels around +2.0 meters (RH2000) are rare but could occur during the lifetime of the sea dike. Under such conditions, critical overtopping could occur in Kämpinge and northern Höllviken if the vegetation cover is not intact. Field observations show that paths and areas with sparse vegetation already exist along parts of the dike today, suggesting that some sections may already be more vulnerable than intended.

But sometimes even a dense vegetation cover is not enough. When examining the overtopping rates of more extreme storm scenarios involving water levels above +2.5 meters (RH2000), some sections of the flood protection would experience overtopping flows that may become critical regardless of the condition of the vegetation cover. In other words, while the flood protection substantially reduces flood risk, there are still storm events (e.g. Backafloden 1872 or The New Years storm of 1904) for which overtopping may exceed what the dike can safely withstand.

Beyond evaluating the current design, the study also provides insight into an important design decision made during the planning process. The sea dike that is currently being built differs significantly from the minimum design approved by the Swedish Land and Environment Court. The approved design allowed a sand core and did not require a protective clay layer on the landward side. The results of this study suggest that such a structure would have been considerably more

vulnerable to erosion. Applying the experimentally observed erosion threshold for sand to the overtopping calculations indicates that water levels around +1.5 meters (RH2000) could have generated overtopping flows capable of causing serious erosion and potentially breaches in the most exposed areas, particularly around Kämpinge and northern Höllviken.

The dike that is actually being constructed is therefore substantially more robust than the legally approved minimum alternative. By using clay till as the core material, its resistance to erosion is greatly improved, reducing the likelihood of damage during overtopping events. Combined with a dense and well-maintained grass cover, this design provides a significantly higher level of protection.

The study therefore leads to two main conclusions. First, under present-day conditions, the flood protection on the Falsterbo peninsula provides meaningful protection against coastal flooding, provided that the grass cover is actively maintained and that surface damage is repaired before it develops into larger weaknesses. Second, there are both historical and plausible future storm scenarios that the current dike may not be able to withstand, regardless of maintenance. For this reason, the flood protection should not be viewed as a complete solution on its own. It should be complemented by a contingency plan that can help prevent or minimise the consequences of overtopping and potential dike failure during extreme storm events.

Sammanfattning

Falsterbonäset i sydvästra Skåne är ett område med hög risk för översvämning. Marken ligger lågt, det är omgivet av havet på tre sidor och historiska stormar har redan visat vad som kan hända när vattnet stiger. År 1872 översvämde Backafloden stora delar av näset och även Nyårsstormen 1904 orsakade omfattande skador. Som svar på det ökande klimathotet bygger Vellinge kommun ett 21 kilometer långt skydd av vallar och murar. Skyddet har en krönnivå på +3,0 meter i höjdsystemet RH2000 vilket innebär att dess synliga höjd varierar beroende på marknivån på platsen.

Studien undersökte dels hur mycket vatten som kan skölja över vallarna, vilket kallas överspolning, vid olika väderförhållanden och vattenstånd, dels hur olika vallmaterial och ytskikt påverkas av sådana flöden och om erosionen visar tecken på att utvecklas mot brott. För att beräkna överspolningen användes beräkningsgångar från EurOtop (2018), EurOtop är en manual som används som branschstandard för denna typ av beräkningar. För dessa beräkningar behövs vågförhållanden, vilka togs fram ur en vågmodell som simulerade 120 olika kombinationer av vattenstånd, vindhastighet och vindriktning.

För att testa erosionsutvecklingen vid olika flöden utfördes experiment på en vall liknande den verkliga skyddsvallen, där en maskin simulerade det strömmande vattnet mot fyra olika typer av vall med olika lutning och material i ytan. Toppmaterialen som testades var lermorän, sand och gräs. Experimenten visade tydligt att ett tätt grästäcke ger det bästa skyddet mot erosion. Sand visade sig vara ett olämpligt ytmaterial eftersom erosionskanaler bildades redan vid låga flöden. Lermorän utan vegetation klarade sig bättre, men visade tecken på erosion vid högre flöden.

Resultaten pekar ut Kämpinge och Norra Höllviken som de mest utsatta sträckorna. Hade vallen varit utformad utan ett skyddande lerlager på landsidan med fyllnad av sand, vilket var godkänt av mark-och miljödomstolen, hade det vanligt förekommande vattenståndet på +1,5 m (RH2000) med stor sannolikhet genererat ett vallbrott. Då vallen idag är utformad med lermorän föreligger ej denna risk, utan först vid ett vattenstånd på +2,0 meter i RH2000 kan kritiska mängder vatten skölja över skyddet. Historiska mätdata visar att sådana nivåer inte uppnåddes under perioden 1992–2023. I dagens klimat kan storskaliga stormar likt Backafloden eller Nyårsstormen pressa vattnet över denna gräns, och vid slutet av vallens planerade livslängd, år 2065, kan ett högvatten med 100 års återkomsttid ge upphov till samma kritiska vattenstånd.

Slutsatsen är att vallens motståndskraft i hög grad beror på hur väl vegetationstäcket underhålls. Utan kontinuerligt underhåll av gräset och topplagret riskerar skyddet att försvagas och brista när det behövs som mest.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
2	BAKGRUND.....	3
2.1	FALSTERBONÅSETS FÖRUTSÄTTNINGAR	3
2.2	HISTORISKA STORMAR OCH ÖVERSVÄMNINGAR.....	6
2.2.1	<i>Backaflo den år 1872.....</i>	<i>6</i>
2.2.2	<i>Nyårsstormen år 1904.....</i>	<i>8</i>
2.2.3	<i>Stormen 4 januari 2017.....</i>	<i>8</i>
2.2.4	<i>Babet år 2023.....</i>	<i>8</i>
2.2.5	<i>Sammanställning av historiska stormar.....</i>	<i>10</i>
2.3	UTFORMNING OCH ANLÄGGNING AV SKYDDSVÄLLEN.....	10
2.3.1	<i>Dimensionering av kustskyddets krö nhöjd.....</i>	<i>16</i>
2.4	PROBLEMFORMULERING.....	21
2.5	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	21
2.6	AVGRÄNSNINGAR	22
3	METOD.....	25
3.1	ÖVERSPOLNINGSBERÄKNINGAR	25
3.1.1	<i>Överspolningsberäkning för vallar.....</i>	<i>27</i>
3.1.2	<i>Överspolningsberäkning för murar.....</i>	<i>32</i>
3.1.3	<i>Inparametrar för överspolningsberäkningar.....</i>	<i>36</i>
3.1.4	<i>Utparametrar från överspolningsberäkningar.....</i>	<i>40</i>
3.2	TEST AV VÄLLENS EROSIONSBESTÄNDIGHET.....	40
3.2.1	<i>Utförning av experiment för test av erosionsbeständighet.....</i>	<i>41</i>
3.2.2	<i>Utförande</i>	<i>45</i>
4	RESULTAT OCH ANALYS	48
4.1	VÄLLENS BESTÄNDIGHET MOT ÖVERSPOLNING	48
4.1.1	<i>Erosionsutveckling vid kontrollerad överspolning.....</i>	<i>49</i>
4.2	BERÄKNAD ÖVERSPOLNING FÖR KOMBINATIONER AV VIND, VATTENSTÅND OCH OMRÅDEN	54
4.2.1	<i>Vindkombinationer och vattenstånd</i>	<i>56</i>

4.2.2	Kämpinge	60
4.2.3	Norra Höllviken.....	62
4.2.4	Norra Ljunghusen	64
4.2.5	Norra Skanör.....	65
4.2.6	Östra Falsterbo.....	66
4.2.7	Södra Ljunghusen.....	66
4.2.8	Flommen.....	68
4.2.9	Östra Skanör	68
4.2.10	Västra Ljunghusen	69
4.2.11	Design or Assessment Approach	69
4.2.12	Mur.....	70
4.3	SAMMANFATTNING.....	70
5	DISKUSSION	73
5.1	ÖVERSPOLNINGSRISKER.....	73
5.1.1	Kritisk överspolning	73
5.2	RISKOMRÅDEN	75
5.2.1	Förväntade kombinationer av vattenstånd, vind och överspolning ..	75
5.2.2	Högriskområden.....	77
5.2.3	Medelriskområden.....	78
5.2.4	Lågriskområden.....	79
5.2.5	Sammanställning riskområden.....	80
5.3	FELKÄLLOR.....	80
5.3.1	SWAN.....	80
5.3.2	Överspolningsberäkningar.....	81
5.3.3	Test av vallens erosionsbeständighet	82
6	SLUTSATS	86
7	LITTERATURFÖRTECKNING.....	88
	APPENDIX	96
	APPENDIX A – FOTOGRAMMETRIRESULTAT AV VALLARNAS EROSIONSTEST	96
	APPENDIX B – PYTHONKOD FÖR ÖVERSPOLNINGSBERÄKNINGARNA OCH GEOPAKET	107
	APPENDIX C – RESULTATET FÖR ÖVERSPOLNINGSBERÄKNINGARNA.....	108

1 Inledning

Med stigande havsnivåer världen över, mer extrema väderförhållanden och en historik av svåra översvämningar är Falsterbonäset i sydvästra Skåne ett område med hög risk för framtida översvämningar (SWEKO, 2011). Mot denna bakgrund tog SWEKO år 2011, på uppdrag av Vellinge Kommun, fram en utredning om behovet av ett översvämningsskydd för att säkra Falsterbonäset och Höllviken/Kämpinge mot framtida översvämningar. I utredningen fastställdes att risk för översvämning föreligger och att byggnation av ett översvämningsskydd i form av skyddsvall och mur kan användas för att skydda bebyggelse och infrastruktur. För skyddsvallen och muren rekommenderades en utformning baserad på framtida extremväderhändelser, där krönhöjden varierade mellan +2,1 och + 4,65 meter relativt RH2000 beroende på skyddets utsatthet.

Utifrån detta underlag utvecklades en handlingsplan av Vellinge kommun som antogs år 2013 (Vellinge Kommun, 2013). Handlingsplanen omfattar byggnationen av en 21 km lång skyddsvall bestående av 14 km naturbaserad vall samt 7 km murliknande element med en krönnivå på +3,0 m (RH2000). Skyddets sträckning framgår av Figur 1 (Vellinge Kommun, 2024). År 2018 ansökte kommunen om tillstånd för översvämningsskyddet hos Mark- och miljödomstolen (Advokatfirman Lindahl KB, 2018). Efter prövning och överklagande gavs slutligt tillstånd för byggnation år 2022 för första etapperna (Sveriges Domstolar, 2020; Mark- och miljööverdomstolen, 2022). Tillstånd för senare etapper planeras att sökas i ett kommande skede.



Figur 1. Sträckning av översvämningsskyddet, (Vellinge Kommun, 2024 a)

En problematik med utformningen av vallen är att bedömningar av hur framtida extremväder påverkar dess funktion och integritet till stor del bygger på generella branschstandarder som inte är representativa för skyddsvallen på Falsterbonäset. Tidigare studier har visat att en skyddsvalls sårbarhet varierar beroende på exempelvis material, vegetation och underhåll (Koelewijn, 2023; EurOtop, 2018; Mozer, et al., 2025; Van der Meer Consulting, 2008; Wolters, et al., 2008). Därför finns ett behov av att undersöka hur Falsterbonäsets skyddsvall påverkas av lokala förutsättningar och hur sårbar den är vid extrema väderhändelser, vilket inte har utförts tidigare. Beräkningar av överspolningsmängder vid olika förhållanden och experimentell utvärdering av skyddsvallens erosionsbeständighet kan därmed skapa en uppfattning om skyddsvallens sårbarhet.

Med grund i bristerna i utformningen analyserar därmed den här studien Falsterbonäsets skyddsvalls sårbarhet längs dess sträckning vid olika kombinationer av vattenstånd, vindriktningar och vindstyrkor. Dels utifrån en utvärdering av vallens erosionsbeständighet genom fältexperiment, dels genom simuleringar av vågklimat som används för att beräkna det förväntade vattenflödet över vallen vid olika stormscenarion.

2 Bakgrund

2.1 Falsterbonäsets förutsättningar

Falsterbonäset är beläget i Sveriges sydvästra hörn med en yta på 2 507 hektar där stora delar av ytan består av privatbostäder (Lantmäteriet, 2025). Majoriteten av bebyggelsen är belägen på en höjd under +3 m (RH2000). Historiskt har den låga landytan lett till omfattande översvämningar, särskilt vid Backafloden 13 november år 1872 och Nyårsstormen 30 december år 1904 (Fredriksson, et al., 2017).

Det låglänta näset har även stor risk för översvämningar framöver. Sjöfartsverket har i en rapport år 2025 sammanställt en prognos för havsnivåerna i Skanör för år 2050, 2100 och 2150. I rapporten inkluderas även värden för 2025 som jämförelsepunkt. I värdena har havsnivåhöjningen beräknats enligt medianvärdet av IPCC:s projektion SSP5-8.5 samt landhöjning inkluderats (SJÖFARTSVERKET, 2025). Nivåerna (rel. RH2000) presenteras i Tabell 1.

Tabell 1. Beräknade vattennivåer (SJÖFARTSVERKET, 2025)

	Beräknade medelvattenstånd (cm RH2000)	Högsta beräknade havsvattenstånd (cm RH2000)	Högsta 100-års återkomstnivå (cm RH2000)
2025	+16,2	+170	+147
2050	+41	+195	+189
2100	+94	+248	+242
2150	+143	+297	+291

Illustrerat i Figur 2 är en uppskattning av hur havsnivåstigningen vid en extremnivå förväntas påverka Falsterbonäset år 2100 och Figur 3 visar de

förväntade konsekvenserna för översvämningen (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), 2025). Värdena för dessa scenarion är inte baserade på de senaste rapporterna från SMHI samt IPCC vilket ger en skillnad i havsnivå jämfört med Tabell 1. I Tabell 2 framgår de havsnivåer Länsstyrelsen Skåne (2021) utgått från vid analys av Falsterbonäset.

Tabell 2. Basscenarion för beräkningar (rel. RH2000) (Länsstyrelsen Skåne, 2021)

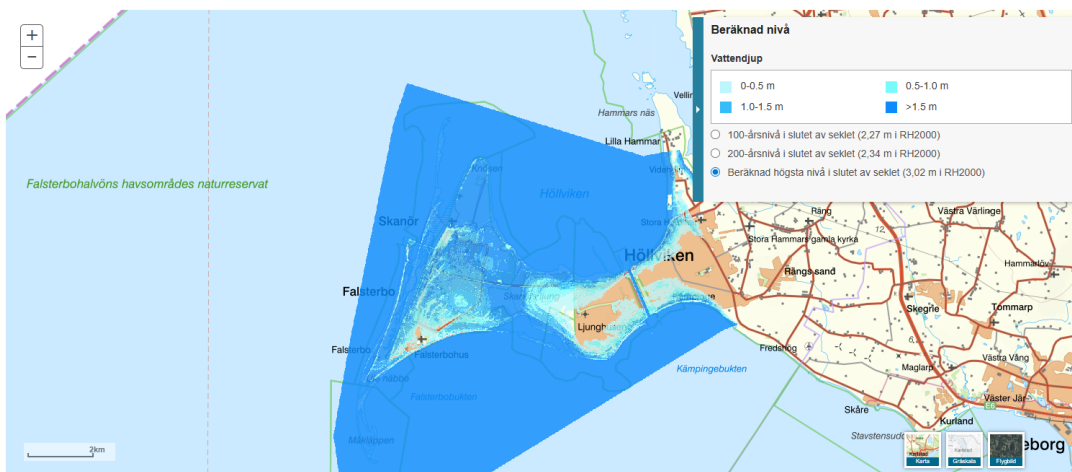
*** Medelvattenståndet anges som summan av referensnivån av medelvattenståndet år 1995 samt den globala höjningen fram till år 2020 och 2100 (övre percentil)**

****Stormnivån anges som summan av den högsta nettohöjningen samt högsta vattenståndet före storm**

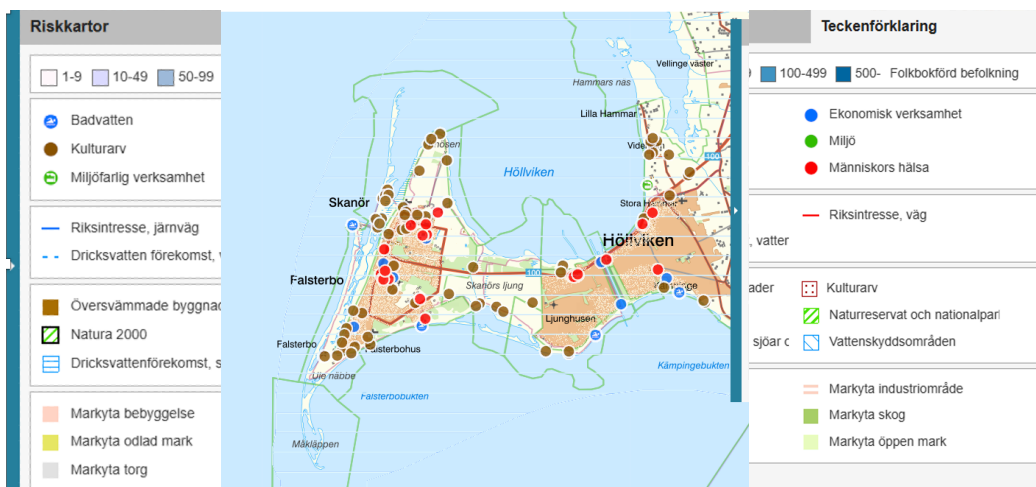
*****Landhöjning varierar lokalt i landet**

	Högsta beräknade havsvattenstånd (cm)	Medelvattenstånd * (cm)	Stormnivå ** (cm)	Landhöjning *** (cm)
2020	+200	-	-	-
2100	+302	+110	+200	-8

Högsta beräknade havsvattenstånd är beräknad genom *Högsta observerade havsnivå före storm (55 cm) + Högsta beräknade havsvattenstånd (145 cm)* för data fram till år 2017 (SMHI, 2017).



Figur 2. Översvämningssyta år 2100 vid beräknad högsta havsnivå (MSB, u.d.)



Figur 3. Förväntad påverkan på Falsterbonäset år 2100 vid beräknad högsta havsnivå (MSB, u.d.)

Enligt MSB (2025) kommer översvämningarna påverka 18 644 folkbokförda, medföra en risk för människors liv och hälsa vid 11 platser samt negativt påverka 159 viktiga samhällsfunktioner. Den ekonomiska påverkan en översvämning år 2020 samt år 2100 enligt förhållanden presenterade i Tabell 2 förväntas medföra framgår av Tabell 3, vilken är framtagen av Ramböll på uppdrag av Länsstyrelsen Skåne (2021).

Tabell 3. Kostnadsanalys översvämning av Falsterbonäset där nutid representerar 2020 (Länsstyrelsen Skåne, 2021)

	Nutid		2100	
	Antal	Mkr	Antal	Mkr
Total	-	633,2	-	2 189
Bostad	3 089	230,2	6 146	1 389
Industri	26	14,2	30	16,6
Samhällsfunktion	111	57,6	179	89,9
Verksamhet	49	10,6	109	23,9
Ekonomibyggnad	3	0,2	4	0,2
Komplementbyggnad	7 590	210,9	15 458	451,3
Övrig byggnad	39	2,2	90	5,2
Planerad bebyggelse	-	-	-	-
Infrastruktur – vägar	707 736 m ²	106,9	1 455 932 m ²	213,0
Infrastruktur – järnväg	-	-	-	-
Infrastruktur – hamn	-	-	-	-
Jordbruk	54 ha	0,2	84 ha	0,4

Näset är även plats för områden med högt naturvärde där delar av riskområdet ingår i Natura-2000. Området vallen skyddar har därtill hög biologisk mångfald och är viktigt för flera utrotningshotade arter (Länsstyrelsen Skåne, 2021 a).

2.2 Historiska stormar och översvämningar

Falsterbonäset har varit bebott under många årtusenden och de dokumenterade stormarna med störst konsekvenser är Backafloden 1872 och Nyårsstormen 1904 (Fredriksson, et al., 2017; Lima-de-Faría, 2010). Utöver dessa har höga vattennivåer uppmätts vid stormen den 4:e Januari 2017 och under Babet 20 oktober år 2023 (SMHI, 2024).

2.2.1 Backafloden år 1872

Backafloden var en stormflod skapad genom en kombination av låg- och högtryck orsakat av starka ostliga till nordostliga vindar (Meyer, et al., 2024). Det högsta lufttrycket var beläget i mitten av Skandinavien, och det lägsta i Lusatien som är ett område vid gränsen mellan Tyskland, Polen och Tjeckien. Placeringarna av dessa låg- och högtryck skapade en högtryckgradient i sydvästra Östersjön. Denna lufttrycksskillnad orsakade kraftiga vindar under ett dygn där topphastigheterna uppskattats till 30–35 m/s. De kraftiga vindarna tillsammans

med tryckskillnaden skapade en stormflod med en topphöjd på +3,5 m (rel. RH2000 med dagens vattennivå).

Höjden varierade med samverkan mellan vattenstånd och vindar vilket resulterade i att låglänta kustområden i Tyskland, Danmark och södra Sverige översvämmades i olika grad. På Falsterbonäset har vattennivån uppskattats till +2,44 m (rel. RH2000), vilket gav översvämningar för stora delar av landytan (Fredriksson, et al., 2017; Hallin, et al., 2021).

Stormflodens påverkan varierade över de drabbade områdena där det i Tyskland och Danmark sammantaget avled cirka 280 personer, över 15 000 blev hemlösa, 415 skepp förstördes och kreatur i de kustnära städerna förlorades. I Sverige var konsekvenserna mildare, minst 23 personer miste livet och över 100 hus förstördes. Av dessa 23 personer var det ingen på Falsterbonäset som avled, då de översvämmade områdena inte hade mycket bebyggelse. Skadorna blev främst materiella, båtar förstördes och husväggar löstes upp av vattenmassorna (Hallin, et al., 2021; Fredriksson, et al., 2017).

Efter Backafloden skedde olika grad av anpassningar i de drabbade länderna, vilket till stor del speglade konsekvenserna av Backafloden, där Tyskland och Danmark upprättade kustskydd, medan Sverige inte har gjort några större insatser (Hallin, et al., 2021).

Hade Backafloden inträffat idag skulle skadorna varit mer omfattande, dels på grund av en högre medelvattenyta och främst orsakat av den stora ökningen av bebyggelse och infrastruktur utan tillräckligt kustskydd. På Falsterbonäset skulle till stor del samma ytor vara översvämmade om Backafloden inträffade idag men skadorna hade varit större på grund av en väsentligt högre exploateringsgrad (Hallin, et al., 2021).

2.2.2 Nyårsstormen år 1904

Vindförhållanden och vattenförhållanden som föranledde Nyårsstormen år 1904 var liknande Backaflodens kombination av västliga vindar som tryckte upp vatten mot ostkusten i Östersjön och sedan en växling till östliga vindar som pressade vattnet västerut. För Falsterbonäset uppskattades vattennivån på land till + 2,07 m (RH2000) i dagens vattenstånd med nordostliga vindar av hastigheter upp mot 33 m/s. Skadorna vid Nyårsstormen omfattades av fastighetsskador samt skador på järnväg (Fredriksson, et al., 2017).

2.2.3 Stormen 4 januari 2017

Vid stormen 2017 uppmättes den högsta havsnivån i Skanör sedan SMHI:s mätningar startade år 1992. Stormen gav en vattennivå på +169 cm (rel. RH2000). Den höga vattennivån orsakades genom ett högt vattenstånd (+50 cm relativt MVY) dagarna innan stormen vilket reducerades till -10 cm (rel. MVY) på grund av starka västliga vindar med hastigheter upp till 17 m/s. De västliga vindarna pressade in vattnet i östersjön och snedställde vattenytan med positiv lutning från väst till öst. Sedan skedde en långsam vridning av vinden till nordlig vilket tillät vattnet att flöda tillbaka och gav därmed det höga vattenståndet i Skanör (SMHI, 2018).

Resultatet av det höga vattenståndet blev översvämning av flertal hus och tomter på Falsterbonäset (Länsstyrelsen Skåne, 2021).

2.2.4 Babet år 2023

Babet är den senaste stormen med höga vattennivåer vid Falsterbonäset. Den högsta vattennivån under stormen i Sverige uppmättes vid Skanör och uppgick till +151 cm (rel. RH2000).

Babet föranleddes av sydvästliga vindar som under en veckas tid i början av oktober tryckt in en mängd vatten mot västkusten och in i Östersjön. Den 7:e oktober vände vinden till nordlig och pressade vattnet söderut. Efter detta var det

en lugnare period fram till den 20:e med periodvis hårdare sydvästliga vindar vilket gav höga vattennivåer i Östersjön (SMHI, 2024).

Stormen Babet anlände den 20:e oktober och hade en nordostlig vindriktning vilket pressade vattnet från Östersjön ned mot Skåne, Danmark och Tyskland. Resultatet blev förhöjda havsnivåer där de högsta nivåerna uppmättes i Tyskland och Danmark och var +227 cm respektive +216 cm över årets medelvattenstånd för platsen (SMHI, 2024). I Falsterbonäset där vattennivån ökade med 135 cm (+1,51 m rel. RH2000) orsakades stora mängder erosion av stränder och viss skada på infrastruktur men större skador på bostäder och infrastruktur undveks genom Vellinge kommuns byggnation av en temporär skyddsvall (Bokhari Irminger, et al., 2024).

2.2.5 Sammanställning av historiska stormar

Tabell 4. Sammanställning av stormhändelser

Händelse	Uppskattat/uppmätt vattenstånd	Dominerande vindriktning under stormkulmen	Högsta uppmätta vindhastighet
Backaflo den 1872	Cirka +2,44 m (RH2000) i dagens nivå	Ostliga/Nordostliga vindar	33 m/s
Nyårsstormen 1904	Cirka +2,07 m (RH2000) i dagens nivå	Nordostliga vindar	32,7 m/s
Stormen 4:e januari 2017	Cirka + 1,69 m (RH2000)	Nordliga vindar	17 m/s
Babet 2023	Cirka +1,51 m (RH2000)	Nordostliga vindar	19 m/s

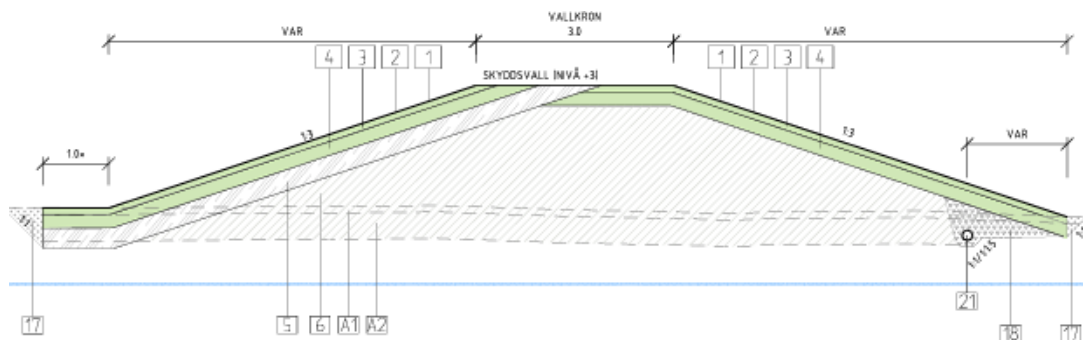
2.3 Utformning och anläggning av skyddsvallen

År 2011 utfördes en utredning av SWECO där skyddsvallen dimensionerades utifrån framtida möjliga scenarion och en lägsta rekommenderad krönhöjd för olika delsträckor av vallen presenterades. En sammanställning av rekommendationen ses i Tabell 5.

Tabell 5. Föreslagna krönnivåer hos skyddsvallar på Falsterbonäset och Höllviken/Kämpinge (SWECO, 2011)

Invallning exponerad mot:	Föreslagen lägsta krönnivå på kort sikt	Föreslagen lägsta krönnivå år 2050
Söder, norr och väster (vall i strandnära läge)	+4,05	+4,65
Norr och väster (vall i mindre utsatt läge)	+2,1	+2,6
Öster (vall i skyddat läge)	+2,1	+2,1
Falsterbokanalen	+2,1	+2,6

Kommunen valde sedan att sätta krönhöjden för skyddsvallen till + 3,0 m relativt RH2000 längs hela sträckningen. Höjden kommer från en politisk avvägning av vad som är försvarbart i tillståndsprocessen och en avrundning av Backaflodens stillvattenyta år 2065, vilken förväntas vara + 2,86 m (RH2000) enligt det högsta havsnivåhöjningsscenariot IPCC RCP 8.5 (A. Purcell, personlig kommunikation, 16 mars 2026; Sjöfartsverket, 2025; SWECO, 2016). Denna motivering återfinns även i mark och miljödomstolens beslut om att godkänna byggnationen av översvämningsskydd till en höjd av +3,0 m (RH2000) (Advokatfirman Lindahl KB, 2018). Utifrån krönhöjden på +3,0 m (RH2000) togs en principsektion för vallen och muren fram av SWECO vilka ses i Figur 4 respektive Figur 7.



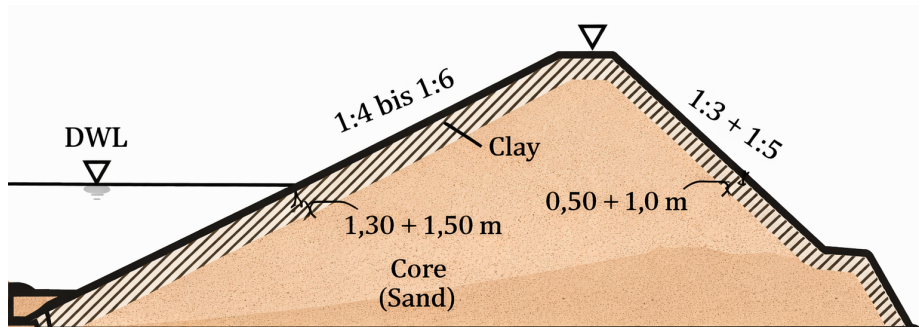
Figur 4. Normalsektion vall, västra Falsterbo (SWECO, 2023 a)

Tabell 6. Materialtabell för Figur 4

1	Släntbeklädnad
2	Beklädnad
3	Vegetationsskikt
4	Växtbädd
5	Lerkappa
6	Uppbyggnad Vallkonstruktion
A1	Avbaning
A2	Avbaning
17	Fyllning, återställning av bef mark
18	Kringfyll
21	Dränledning

Längs vallens sträckning anpassas vegetationen på vallen för att efterlikna områdets befintliga vegetation (Vellinge Kommun, u.d.). Med grund i villkoret från mark- och miljödomstolen om att krönhöjden maximalt får uppgå till + 3,0 m (RH2000) saknas utrymme för växtbädd på vallkrönet. Toppen av vallen utgörs därmed initialt av exponerad lermorän medan sidorna blir vegetationsbeklädda (A. Purcell, personlig kommunikation, 16 mars 2026). Internationellt brukar kärnan bestå av sand då lera i många fall kan vara svårtillgängligt. I dessa fall går lerkappa hela vägen runt kärnan för att göra vallen mer robust och tålig mot överspolning (Schüttrumpf, 2008), principskiss kan ses i Figur 5. Vallen i Figur 4 som blev godkänd av mark-och miljödomstolen har ej en omslutande lerkappa och får bestå av massor reglerade av AMA CEB.1123, vilket innefattar exempelvis, sand, grus och moräner. Den verkliga uppbyggnaden (nummer 6 i Figur 4 och Tabell 6) består av lermorän (A. Purcell, personlig kommunikation, 16 mars 2026; Mark- och miljööverdomstolen, 2022).

Lermoränen skiljer sig från lera genom att flera olika kornstorlekar är blandade i massan. En speciell egenskap för lermoräner är att den vid vattenexponering kan få en armerande förmåga (Chow & Rees, 1994). Den armerande förmågan innebär att en blandning av större och finare fraktioner skapar en matrisliknande struktur med högre erosionsresistens än de olika fraktionerna ensamma. Det här resulterar i en avtagande erosionsgrad när armeringsegenskapen har uppkommit. Armeringseffekten har en tröskelgräns beroende på lutning och uppbygganden av det armerande lagret. När denna gräns uppnås bryts de armerande förmågorna och materialet eroderar väldigt hastigt. För skyddsvallen innebär detta att lermoränen kan ge en högre erosionsresistens än ren lera och det inte är tillräckligt att bedöma materialet enbart utifrån generella riktvärden för lera.

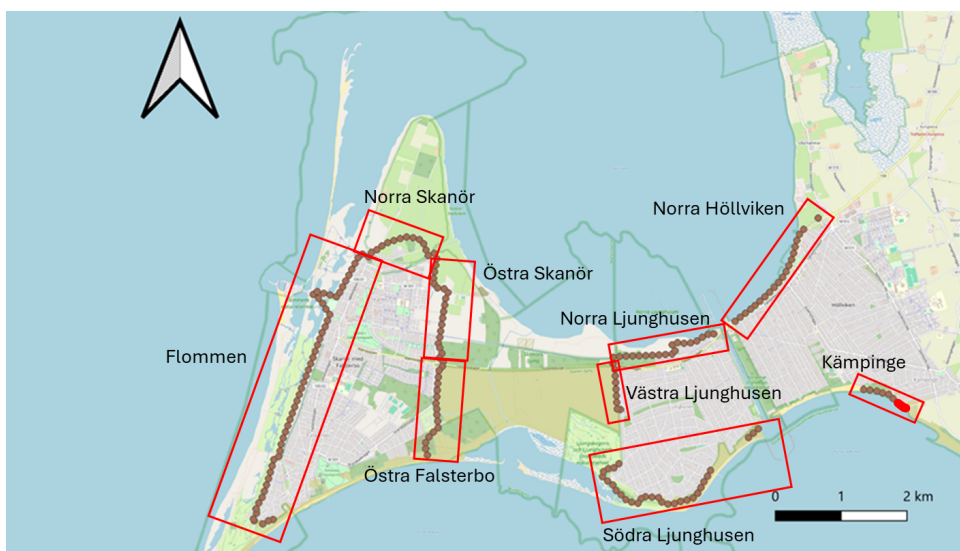


Figur 5. Principskiss av skyddsvallar i Tyskland (Schüttrumpf, 2008)

I Figur 1 visas sträckorna där vall respektive mur kommer anläggas. För delar av sträckorna är ytan begränsad och därför har mur placerats på dessa platser. Vallkonstruktionen föredrogs i jämförelse med mur eftersom muren agerar barriär, har högre kostnad och är svårare att anpassa för att matcha omgivningen (A.Purcell, personlig kommunikation, 16 mars 2026)

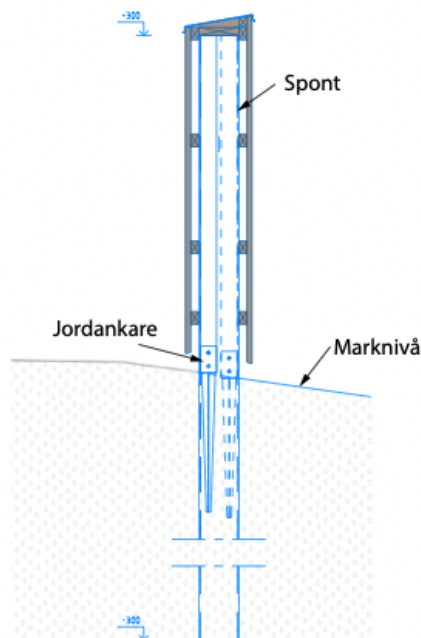
Vallens utformning skiljer sig beroende på omgivningen. Där mycket plats finns har vällen lutningsförhållanden på 1:6 och där ytan är mer begränsad är lutningsförhållandet 1:3, se Figur 6 för de olika lutningsförhållandenas placering. Lutningsförhållandet 1:3 är en avvägning mellan att minimera markanspråket och att den ska vara tillräckligt flack så att djur och människor kan ta sig över och samtidigt få en god stabilitet (Advokatfirman Lindahl KB, 2018). Lutningsförhållandena på 1:6 återfinns i endast sydöstra Kämpingebukten där vällen ligger nära kusten. Den flackare slänten är vald för att minska våguppspolningen, minska erosion samt smälta in tydligare i omgivningen. Krönbredden på vallarna har satts till 3 m för att möjliggöra framförandet av tillsynsfordon vid underhåll och tillsyn. I Tyskland där erfarenheten av kustskydd

är större, är denna krönbredd samt lutningsförhållandet 1:3 standard (Schüttrumpf, 2008).



Figur 6. Karta över Falsterbonäset och utsträckningen av skyddet (bruna och röda punkter). De röda ramarna ramar in de olika delsträckorna. De röda prickarna i Kämpinge är där lutningsförhållanden är 1:6 och de bruna punkterna är lutningsförhållanden 1:3 eller mur.

Nedan i Figur 6 ses en principsektion av murens utformning. Muren ankras i marken med en minst 3 meter djup spont som ska kunna hålla emot framtida vattennivåer utan att gå till brott (Vellinge Kommun, 2025). Även för muren varierar uppbyggnaden längs sträckningen, där majoriteten av muren liknar principsektionen men för begränsade sträckor används gabbion och betongmur.



Figur 7. Principsektion murliknande skydd (Vellinge Kommun, 2025)

Anläggningen av skyddsvallen utförs av byggföretaget NCC och är planerad att pågå fram till år 2031. Efter färdigställande ska vallarna och murarna kontinuerligt underhållas och skydda Falsterbonäset från översvämningar till och med år 2065 (Vellinge Kommun, 2025).

2.3.1 Dimensionering av kustskyddets krönhöjd

SWECO har på uppdrag av Vellinge Kommun kontrollerat att vallen har en erforderlig krönhöjd med avseende på framtida scenarion. Simuleringar har

utförts för att kontrollera om en skyddsvall av höjd + 3,0 m (RH2000) och utformad utefter Figur 4 & 7 klarar av följande vattennivåer år 2015 och 2065;

- Stillvattenyta + 1,85 m (RH2000) – motsvarande 100-årshögvatten år 2015 eller normalhögvatten år 2065.
- Stillvattenyta + 2,30 m (RH2000) – motsvarande Backafloden i dagsläget eller 100-års högvatten år 2065.
- Stillvattenyta + 2,86 m (RH2000) – motsvarande Backafloden år 2065.

(SWECO, 2016)

Utifrån nämnda scenarion studerades överspolning, det vatten som på grund av vågor rinner över ett kustskydd till den skyddade sidan och kan därmed genom erosion påverka integriteten av kustskyddet (EurOtop, 2018; SWECO, 2016). Vid överspolningsberäkningarna antogs att ett värde för medelöverspolningsflöde som leder till skada eller brott av vallen på >10 liter per

sekund och meter (l/s/m) (SWEKO, 2016). Genom simuleringar beräknades för vilka områden skyddet kommer vara aktiverat, illustrerat i Figur 8.

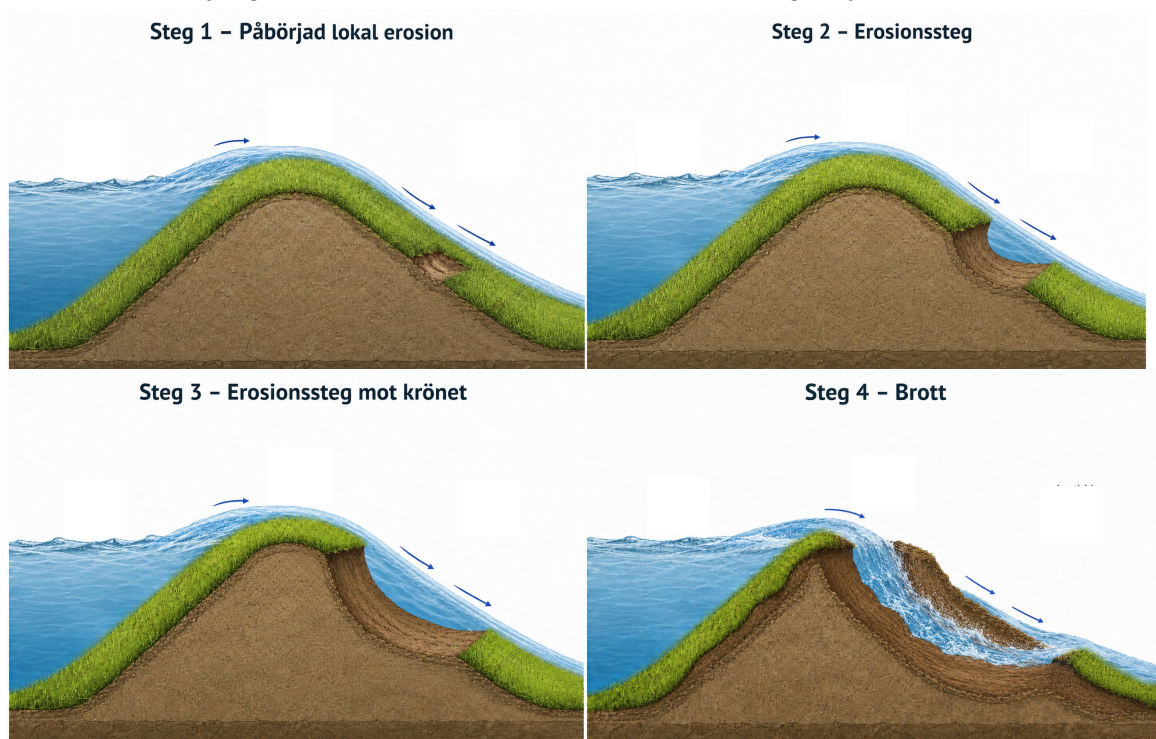


Figur 8. Resultat av SWEKO:s beräkningar genom illustration av kustskyddets aktiverande händelser (SWEKO, 2016)

Värdet 10 l/s/m är hämtat från EurOtop-manualen. Manualen är en branschstandard och handbok för vågöverspolning av kustskydd och relaterade konstruktioner (EurOtop, 2018). I handboken beskrivs att skada på en vall med tät gräsbeklädnad, uppbyggd av lera med 1:3 lutning sker från flöden på 5–10 l/s/m och om vallen har samma uppbyggnad men toppskiktet har kala fläckar, hål och gropar uppstår betydande erosion redan vid 0,1 l/s/m. Enligt EurOtop (2018) ska dessa värden beaktas som gränsvärden vid utformandet av en skyddsvall och

är vad som ger en initial erosion, men är inte representativa för vad som leder till brott för en skyddsvall (EurOtop, 2007).

Den initiala erosionen som beskrivs av EurOtop (2018) är en indikation på att vallen börjar gå till brott. Processen till brott ser ofta ut enligt följande:



Figur 9. Erosionskeden från start till brott

1. Initiering av erosion genom att vegetationslagret eroderar lokalt
2. Bildning av erosionssteg, även kallat headcut, vilket innebär att en brant erosionsfront uppstår på landsidan och förflyttar sig bakåt genom slänten mot vallkrönet
3. Erosionssteget fortplantar sig bakåt mot vallkrönet
4. Erosionssteget når krönet och vallen går till brott

Då vallen saknar vegetationstäckelse är det bildningen av erosionssteget som indikerar att vallen har börjat gå mot brott (Koelewijn, 2023).

I försök av Akkerman et al. (2007) visas erosionsprocessen väl, där en vall av exponerad homogen lera med lutning 1:3 utsattes för de genomsnittliga överspolningsflödena; 0,1, 1, 5 och 10 l/s/m. Resultatet visade att betydande erosion uppstod först vid 5 l/s/m där ett erosionsdjup på 69,49 cm uppmättes efter 6 timmar. Headcut, vilket antas vara en tydlig indikation på att brott är nära, uppstod först efter 6 timmar med ett genomsnittligt överspolningsflöde på 10 l/s/m.

I Tabell 7 kombineras resultat från studien av Akkerman et al. (2007) och EurOtop (2018) för att ge en överblick av hur olika överspolningsflöden förväntas påverka en skyddsvall med lerkappa och toppskikt av gräs.

Tabell 7. Sammanställning av överspolningsflöde och möjlig konsekvens (Akkerman, et al., 2007; EurOtop, 2018)

Beräknat överspolningsflöde	Tolkning
<0,1 l/s/m	Begränsad erosionsrisk
0,1–5 l/s/m	Möjlig skada vid bristande vegetation, hål eller gropar
5–10 l/s/m	Risk för betydande erosion
>10 l/s/m	Hög risk för betydande erosion vid exponerad lermorän
>50 l/s/m	Risk för betydande erosion vid tätt vegetationstäck

EurOtop (2018) beskriver att tröskelvärdena för överspolning är starkt beroende av lokala förhållanden, exempelvis rotdensiteten hos växtligheten på vällen och

vallens material, vilket medför att lokala undersökningar för vallen på Falsterbonäset hade behövts utföras för att ge en korrekt uppskattning om risken för vallbrott på grund av överspolning (Mozer, et al., 2025; EurOtop, 2018). Det har även visats experimentellt att lera och lermorän skiljer sig i sårbarhet mot erosion, och även olika lermoräner har olika beteenden beroende på andelen fint och grovt material (Wolters, et al., 2008). I studien av Wolters et.al. (2008) visades att en högre andel sand i lermoränen gav en högre erosion, samt att vid jämförelse av lera och lermorän sågs en stor skillnad i beteende där leran eroderade snabbare än lermoränen i början av experimentet och sedan långsammare efter den initiala erosionen. Sammanfattningsvis går det inte att direkt använda EurOtops gränsvärden som absoluta värden för skyddsvallen på Falsterbonäset.

2.4 Problemformulering

Tidigare beräkningar av överspolning för kustskyddet har hanterat extremväderhändelser och bedömt hur överspolningen av dessa relaterar till schablonvärden givna av EurOtop (2018). Dessa värden är generaliserade och ej anpassade för Falsterbonäsets skyddsvall specifika förutsättningar, vilken avviker både vegetationsmässigt och strukturellt från de vallar som beskrivs EurOtop (2018).

Genom analys av fler väderscenarion och experimentell utvärdering av skyddsvallens erosionsbeständighet kan därmed en mer detaljerad och verklighetsanpassad beskrivning av kustskyddets sårbarhet ges.

2.5 Syfte och frågeställningar

Syftet med studien är att analysera Falsterbonäsets skyddsvalls sårbarhet längs dess sträckning vid olika kombinationer av vattenstånd, vindriktningar och vindstyrkor.

För att uppnå detta syfte ska följande frågeställningar besvaras:

- Vad är vallens kritiska överspolningsgräns?
- Vid vilka kombinationer av vattennivå, vindriktning och vindhastighet är det sannolikt att vallens kritiska överspolningsgräns överskrids?
- Vid vilka delsträckor är det högst risk för att kritiska överspolningsmängder uppstår inom skyddsvallens livslängd?

2.6 Avgränsningar

Studien behandlar vågöverspolning och dess konsekvenser för skyddsvallen. Fokus ligger på sträckorna bestående av vall eftersom dessa kan påverkas av erosion och därmed har tydlig koppling till brottmekanismer vid överspolning. Mursträckor behandlas endast översiktligt med avseende på beräknade överspolningsflöden. Någon analys av murarnas strukturella kapacitet, dräneringsförmåga eller konsekvenser av vattenansamling på landsidan ingår inte.

Studien behandlar vågöverspolning och dess konsekvenser på skyddsvallen. Studien avgränsas därmed till att enbart hantera överspolningsskyddet och konsekvenserna av ett brott för bakomliggande terräng studeras inte. Med grund i vallens uppskattade sårbarhet relativ mur och sanddyner avgränsas studien till att främst hantera vallarna, vilket gör att murar och andra skydd såsom sanddyner inte kommer analyseras lika djupgående. Överspolningsflöden för muren beräknas och presenteras utan att studera den strukturella påverkan. Sanddyner och andra naturliga skydds överspolning eller sårbarhet analyseras inte men dynerna beaktas genom en påverkan på vågexponeringen för bakomliggande vall i beräkningsmodellen.

Beräkningarna och dess riktlinjer är avgränsade till den europeiska branschstandardsmanualen EurOtop (2018). Vallens ytfriktionskoefficient utgår också från EurOtop (2018), där ytfriktionskoefficienten i beräkningarna beräknas utifrån att ytlager bestående av gräs. Beräkningarna och resultaten är avgränsade till punkter som är placerade 20 meter framför vallen med ett intervall på 100

meter längs vallens sträckning. Punkterna har indata innehållande topografisk höjd, och där vallen har framföriggande sanddynor med en höjd över +3,0 m (RH2000) sätts våghöjden vid vallen till noll.

Studien omfattar ett begränsat antal scenarier med vattenstånd på +1,5, +2,0 och + 2,5 m (RH2000), vindhastigheter mellan 5 och 25 m/s samt åtta vindriktningar. Resultaten ska därför tolkas som en scenarioanalys och inte som en fullständig sannolikhetsbaserad riskanalys. Historiska vind- och vattenståndsdata används för att bedöma vilka scenarier som är mest relevanta, men någon statistisk återkomsttanalys för kombinationer av vind, vågor och vattenstånd genomförs inte. Ingen interpolering av resultaten kommer ske för att analysera scenarion utanför modellens omfång, exempelvis högre vindhastigheter eller vattenstånd, då det inte är en linjär korrelation mellan överspolningen och kombinationerna av väderförhållandena.

I resultatet presenteras och analyseras vallens överspolning främst utifrån *Mean value approach*. Resultatet för *Design or assessment approach* presenteras övergripande men ingen djupare analys utförs av detta resultat. *Design or assessment approach*, är mer konservativ och används vid konstruktion av vallar och murar. *Mean value approach* används i stället i ett analytiskt syfte för att beräkna framtida överspolning, vilket passar denna studie bättre.

3 Metod

Metoden består av två huvuddelar. Först beräknas överspolningsflöden längs skyddsvallens sträckning med hjälp av vågdata från SWAN och beräkningsmetodik från EurOtop (2018). Beräkningarna utförs för utvalda kombinationer av vattenstånd, vindriktning och vindhastighet. Därefter genomförs experimentella tester där olika typvallar utsätts för kontrollerad överspolning. Resultaten från beräkningarna används för att identifiera utsatta delsträckor, medan erosionstesterna används för att tolka vilken betydelse de beräknade flödena kan ha för vallens beständighet.

Modellen är uppbyggd av en Pythonkod. Koden genererar olika resultat baserat på typ av översvämningsskydd, plats och meteorologiska kombinationer. Totalt beräknades 120 kombinationer mellan vindhastighet, vattenstånd och vindriktning. Vindhastigheten var 5, 10, 15, 20, 25 m/s, vattenståndet +1,5; 2,0; 2,5 m (RH2000) och vindriktningarna N, NÖ, Ö, SÖ, S, SV, V, NV.

3.1 Överspolningsberäkningar

Två beräkningsmetoder används; *Design or assessment approach* och *Mean value approach*. Skillnaden mellan de olika beräkningsmetoderna är att i *Design or assessment approach* ökar flödet med ett värde på en standardavvikelse i jämförelse med *Mean value approach*, detta är komprimerat i ekvationerna. Det som bestämmer vilka ekvationer som ska användas i båda tillvägagångssätten är brytningsparametern $\xi_{m-1,0}$. Brytningsparametern beskriver om vågorna bryts eller inte, där gränsvärdet ligger på 1,8 (EurOtop, 2018, s. 5), se Tabell 8. Brytningsparametern beräknas genom ekvationen,

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_{m0}}{L_{m-1,0}}}} \quad (1)$$

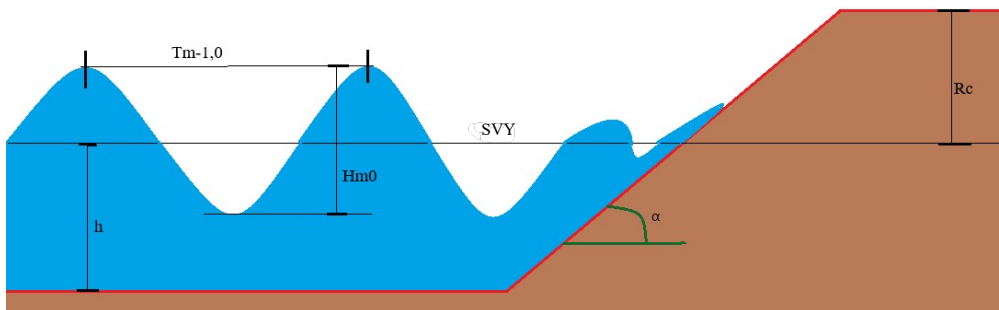
Där våglängden vid djupt vatten är $L_{m-1,0}$ och där lutningen på vallen är α . $L_{m-1,0}$ fås genom följande ekvation,

$$L_{m-1,0} = g * \frac{T_{m-1,0}^2}{2\pi} \quad (2)$$

Tabell 8. Gränsvärde på icke-brytande/brytande vågor för brytningsparametern

$\xi_{m-1,0} < 1,8$	Brytande vågor
$\xi_{m-1,0} > 1,8$	Icke brytande vågor

I Figur 10 ses hur våghöjden (H_{m0}) är framtagen genom skillnaden mellan vågtoppen och botten. Figuren visar även vågperioden ($T_{m-1,0}$) som används, SVY vilket är stilla vattenytan, vattendjupet (h) som är mellan SVY och havsbotten, samt fribordet, R_c .



Figur 10. Visualisering av inparametrar för överspolningsberäkningar; Våghöjd (H_{m0}), period ($T_{m-1,0}$), stilla vattenytan (SVY), vallens lutning (α), vattendjupet (h) och friborden (R_c).

I beräkningarna måste även förstranden tas i åtanke. Förstranden startar där havsbotten påverkar inkommande vågor och slutar vid vallens tå (EurOtop, 2018, s. 7). Förstranden kan definieras i fyra olika kategorier baserat på relationen mellan vattendjupet, h , och den signifikanta våghöjden vid djupt vatten, $H_{m0 \text{ deep}}$.

Tabell 9. gränser för typ av förstrand.

Förstrand	Relativt vattendjup
Djup	$4 < \frac{h}{H_{m0\ deep}}$
Grunt	$1 < \frac{h}{H_{m0\ deep}} < 4$
Väldigt grunt	$0,3 < \frac{h}{H_{m0\ deep}} < 1$
Extremt grunt	$\frac{h}{H_{m0\ deep}} < 0,3$

Vid fallen då havsnivån ligger över vallens eller murens höjd, vilket ger negativt R_c , används samma ekvation för överspolningen i båda tillvägagångssätten (EurOtop, 2018, s. 120).

$$q_{overflow} = 0,54 * \sqrt{g * |-R_c^3|} \quad (3)$$

3.1.1 Överspolningsberäkning för vallar

3.1.1.1 Design or assessment approach

Beroende på vågbrantheten och brytningsparameter tillämpas olika ekvationer. Dessa presenteras i Tabell 10 (EurOtop, 2018, kap 5.3)

Tabell 10. Vilken ekvation som används vid olika förhållanden, ekvationerna följer efter tabellen

Värde för brytningsparameter	Tolkning	Beräkningsmetod
$\xi_{m-1,0} < 1,8$	Brytande vågor	Ekvation 4 med ett maximum av ekvation 5
$\xi_{m-1,0} > 1,8$	Icke brytande vågor med grund förstrand	Ekvation 5
$5 < \xi_{m-1,0} < 7$ och $s_{m-1,0} < 0,01$ eller $\frac{h}{H_{m0}} < 1$	Icke-brytande vågor kombinerat med förstrand	Interpolering av ekvation 5 och 6
$7 < \xi_{m-1,0}$ och $s_{m-1,0} < 0,01$ eller $\frac{h}{H_{m0}} < 1$	Väldigt grund förstrand	Ekvation 6

Då $5 < \xi_{m-1,0} < 7$ och $s_{m-1,0} < 0,01$ eller $\frac{h}{H_{m0}} < 1$ görs en interpolering för att få en jämnare övergång mellan de olika förhållandena. $s_{m-1,0}$ är vågbrantheten.

Ekvationerna som refereras till i Tabell 10 följer nedan.

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = \frac{0,026}{\sqrt{\tan(\alpha)}} * \gamma_b * \xi_{m-1,0} * \exp \left[- \left(2,5 * \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} * \gamma_f * \gamma_b * H_{m0} * \gamma_\beta * \gamma_v} \right)^{1,3} \right] \quad (4)$$

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0,1035 * \exp \left[- \left(1,35 * \frac{R_c}{\gamma^* * \gamma_f * H_{m0} * \gamma_\beta} \right)^{1,3} \right] \quad (5)$$

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 10^{-0,50} * \exp \left(- \frac{R_c}{(0,33 + 0,022 * \xi_{m-1,0}) * \gamma_f * H_{m0} * \gamma_\beta} \right) \quad (6)$$

3.1.1.1.1 Påverkningsfaktorer

Påverkningsfaktorerna för vågöverspolning är tagna från kap 5.4 i EurOtop (2018). Tabell 11 visar hur de olika påverkningsfaktorerna beräknas.

Tabell 11. regler och ekvationer för framtagningen av påverkningsfaktorer.

γ_f	$1,15 * H_{m0}^{0,5}$ då $H_{m0} < 0,75m$ annars $\gamma_f = 1,0$
γ_β	$1 - 0,0033 \beta $ då $0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$ annars $\gamma_\beta = 0,736$
γ_b	$\gamma_b = 1 - r_b(1 - r_{db})$ intervall $0,6 < \gamma_b < 1,0$

Ytfriktionskoefficientn γ_f beror på ytan av vallen. Består vallens topplager av en gräsyta är

$$\gamma_f = 1,15 * H_{m0}^{0,5} \text{ då } H_{m0} < 0,75m$$

och då $H_{m0} > 0,75m$ används $\gamma_f = 1,0$.

Effekten av sneda vågor, γ_β . För överspolning tas γ_β fram ur ekvation

$$\gamma_\beta = 1 - 0,0033|\beta| \text{ då } 0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ,$$

där β är vågens infallsvinkel mot vallen, och om $80^\circ \leq |\beta|$ sätts $\gamma_\beta = 0,736$. Infallsvinkeln som från SWAN ges i grader där 0° är i norr och går medurs, benämnd *Dir*. För att få fram korrekt infallsvinkel β har en rätvinklig normal gjorts ut från vallen som subtraheras med punktens SWAN infallsvinkel. Vilket leder till att $\beta = |Normal - Dir|$.

Där avsatsen innan vallarna finns används ytterligare en påverkningsfaktor, γ_b . Denna faktor är beräknad ur ekvationen

$$\gamma_b = 1 - r_b(1 - r_{db})$$

Där r_b beräknas genom metodiken i Tabell 12.

γ_b är begränsad i intervallet $0,6 < \gamma_b < 1,0$.

På vallarna där avsatsen inte finns är $\gamma_b = 1,0$

Tabell 12. ekvationer för att ta fram avsatsparametern γ_b .

Parameter och när den används	Beräkning av parameter
r_b , används alltid vid avsats	$\frac{B}{L_{Berm}}$
r_{db} , avsatsen ligger över stilla vattenytan	$r_{db} = 0,5 - 0,5(\pi \frac{d_b}{R_{u2\%}})$
r_{db} , avsatsen ligger under stilla havsnivån	$r_{db} = 0,5 - 0,5(\pi \frac{d_b}{2 * H_{m0}})$

3.1.1.2 Mean value approach

Mean value approach är en metod för överspolningsberäkningar som uppskattar det mest sannolika flödet utan säkerhetspåslag (EurOtop, 2018).

Beroende på våglutningen och brytningsparameter tillämpas olika ekvationer. Dessa presenteras i Tabell 13 och är baserade på kap 5.3 i EurOtop (2018).

Tabell 13. Vilken ekvation som används vid olika förhållanden, efter följer refererade ekvationer

Värde för brytningsparameter	Tolkning	Beräkningsmetod
$\xi_{m-1,0} < 1,8$	Brytande vågor	Ekvation 7 med ett maximum av ekvation 8
$\xi_{m-1,0} > 1,8$	Icke brytande vågor	Ekvation 8
$5 < \xi_{m-1,0} < 7$ och $s_{m-1,0} < 0,01$ eller $\frac{h}{H_{m0}} < 1$	Icke-brytande vågor kombinerat med förstrand	Interpolering av ekvation 8 och 9
$7 < \xi_{m-1,0}$ och $s_{m-1,0} < 0,01$ eller $\frac{h}{H_{m0}} < 1$	Väldigt grund förstrand	Ekvation 7

Då $5 < \xi_{m-1,0} < 7$ och $s_{m-1,0} < 0,01$ eller $\frac{h}{H_{m0}} < 1$ görs en interpolering för att få en jämnare övergång mellan de olika förhållandena.

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = \frac{0,023}{\sqrt{\tan(\alpha)}} * \gamma_b * \xi_{m-1,0} * \exp \left[- \left(2,7 * \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} * \gamma_f * \gamma_b * H_{m0} * \gamma_\beta * \gamma_v} \right)^{1,3} \right] \quad (7)$$

Med ett maximum av:

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0,09 * \exp \left[- \left(1,5 * \frac{R_c}{\gamma * \gamma_f * H_{m0} * \gamma_\beta} \right)^{1,3} \right] \quad (8)$$

För väldigt grund förstrand och då $s_{m-1,0} < 0,01$ samt $7 < \xi_{m-1,0}$ används

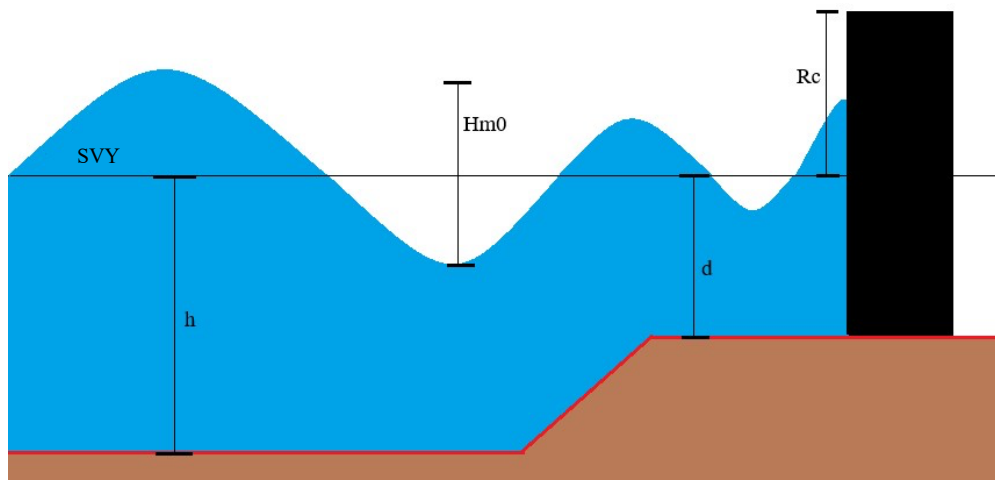
$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 10^{-0,79} * \exp \left(- \frac{R_c}{(0,33 + 0,022 * \xi_{m-1,0}) * \gamma_f * H_{m0} * \gamma_\beta} \right) \quad (9)$$

3.1.1.2.1 Påverkningsfaktorer

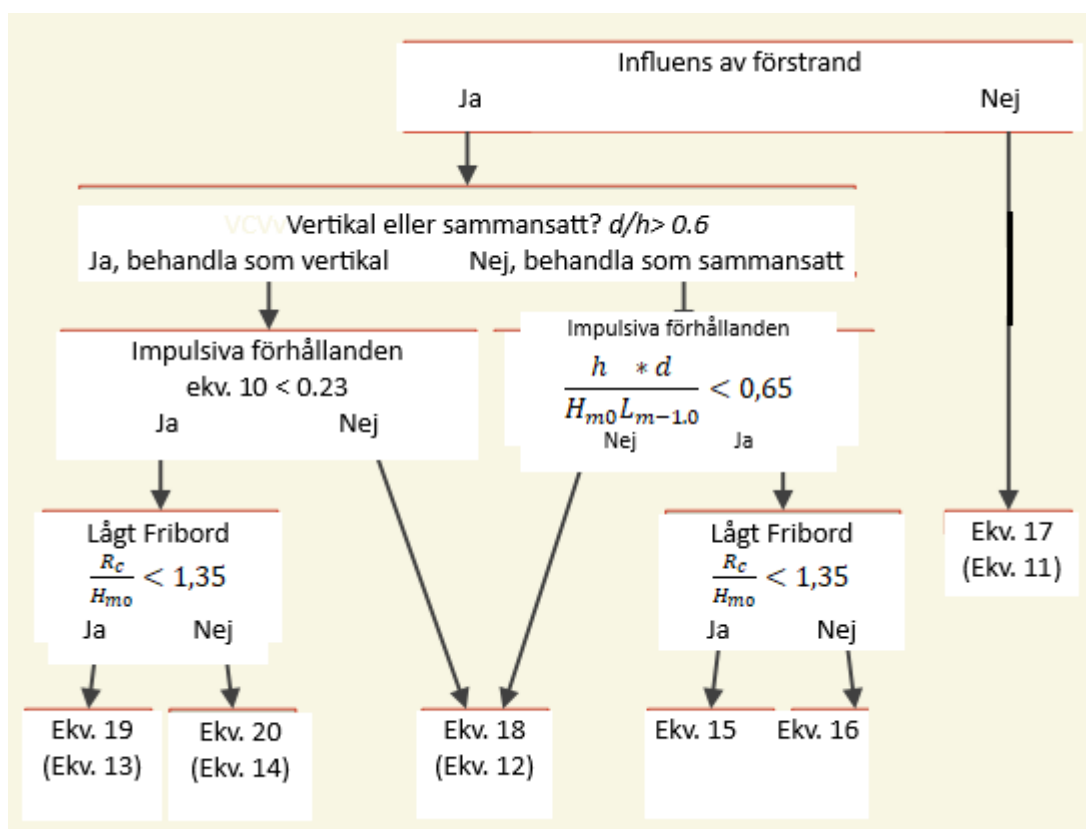
Framtagandet av påverkningsfaktorer för *Mean value approach* har gjorts på samma sätt som i avsnitt 3.1.1.1.1.

3.1.2 Överspolningsberäkning för murar

I beräkningarna för överspolning på partier bestående av murar används samma metodik av att beräkna både *Mean value approach* och *Design or assessment approach*. Skillnaden mellan metoderna är samma som för vallen, att *Design or assessment approach* har en större standardavvikelse som leder till att resultatet har en högre överspolning. Muren har också olika tillvägagångssätt beroende på om det finns en grund förstrand eller en upphöjning innan muren. De olika tillvägagångssätten beskrivs i Figur 12 och förklaring av ingående parametrar illustreras i Figur 11.



Figur 11. Illustration av överspolningsparametrar för mur. Våghöjd (H_{m0}), Stillvattenytan (SVY), höjden mellan en upphöjning och SVY (d), djupet (h) och friborden (R_c).



Figur 12. Tillvägagångssätt för användning av rätt ekvation enligt EurOtop (2018), Mean value approach utan paranteser och Design or assessment approach i parenteser.

$$\frac{h^2}{H_{m0}L_{m-1,0}} < 0,23 \quad (10)$$

Där våglängden är framtagen ur ekvation 2.

3.1.2.1 Design or assessment approach

För design or assessment approach används ekvationerna inom parentes i Figur 12, vilka presenteras i Tabell 14.

Tabell 14. Ekvationer för Figur 12

Ekvation	Ekv. Nummer
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0,054 * \exp\left(-\left(2,12 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{1,3}\right)$	11
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0,062 * \exp\left(-2,61 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)$	12
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0,0155 \left(\frac{H_{m0}}{h * s_{m-1,0}}\right)^{0,5} * \exp\left(-2,2 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)$	13
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0,0020 \left(\frac{H_{m0}}{h * s_{m-1,0}}\right)^{0,5} * \left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-3}$	14
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 1,3 * \left(\frac{d}{h}\right)^{0,5} * 0,0014 * \left(\frac{H_{m0}}{h * s_{m-1,0}}\right)^{0,5} * \left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-3}$	15

$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 1,3 * \left(\frac{d}{h}\right)^{0,5} * 0,011 \left(\frac{H_{m0}}{h * s_{m-1,0}}\right)^{0,5} * \exp\left(-2,2 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)$	16
---	----

3.1.2.2 Mean value approach

Tabell 15. Ekvationer för Figur 12.

Ekvation	Ekv. Nummer
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0,047 * \exp\left(-\left(2,35 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{1,3}\right)$	17
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0,05 * \exp\left(-2,78 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)$	18
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0,011 \left(\frac{H_{m0}}{h * s_{m-1,0}}\right)^{0,5} * \exp\left(-2,2 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)$	19
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0,0014 \left(\frac{H_{m0}}{h * s_{m-1,0}}\right)^{0,5} * \left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-3}$	20
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 1,3 * \left(\frac{d}{h}\right)^{0,5} * 0,0014 * \left(\frac{H_{m0}}{h * s_{m-1,0}}\right)^{0,5} * \left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-3}$	15
$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 1,3 * \left(\frac{d}{h}\right)^{0,5} * 0,011 \left(\frac{H_{m0}}{h * s_{m-1,0}}\right)^{0,5} * \exp\left(-2,2 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)$	16

3.1.3 Inparametrar för överspolningsberäkningar

3.1.3.1 Vågdata och beskrivning av SWAN

Beräkningsmodellen byggdes för att hantera data från olika väderförhållanden genererade från vågmodellprogrammet SWAN, resultatet från SWAN är inparametrar i beräkningarna. SWAN-modellen sattes upp av Dr. Björn Almström och Dr. Caroline Hallin från Lunds Tekniska Högskola. SWAN är en tredje generationens numeriska vågmodell som beräknar vågor i kustområden (Booij, et al., 1999). Modellen är uppbyggd av spektrala energibalanskvationer där vågenergin fördelas över frekvens och riktningar i stället för enskilda vågor och sedan beräknar vågförhållandena ur vågenergin.

Olika fysikaliska processer påverkar energimängden i beräkningsnätet, vinden tillför energi genom dess interaktion med vattenytan. Den mängd energi som tillförs av vinden beror på vindhastighet samt sträckan vinden påverkar vattenytan. Processer som tar bort energi är whitecapping, djupinducerad brytning samt bottendissipation. Andra processer i modellen är refraktion och triadinteraktioner, tillsammans samverkar dessa processer för att få fram energibalansen i beräkningsnätet noder. SWAN modellen som användes var modell 41.51A och kördes med standardinställningar för processerna. Resultatet från modellen togs ut då modellen hade hittat en konstant nivå.

Beräkningsnätet sträcker sig från Helsingborg till finska viken och har en flexibel upplösning som är 10 km i den nordligaste delen och succesivt finare. Över Falsterbonäset är upplösningen 25 meter och för att få med sanddynor och andra högpunkter i terrängen knöts beräkningsnätet till dessa.

Ur energinätet tas vågförhållandena fram för beräkningspunkterna som används i Pythonberäkningarna. Dessa punkters koordinater i X, Y och Z hämtades från Lantmäteriets höjddatamodell (Lantmäteriet, 2025a) där Z-koordinaterna plockades från en höjddatamodell genererad 2025. Datan representerar värden från de noder som ligger närmst beräkningspunkterna. Beräkningspunkterna är placerade 20 meter framför vallen där Z representerar det djup vallens tå startar vid. Alla

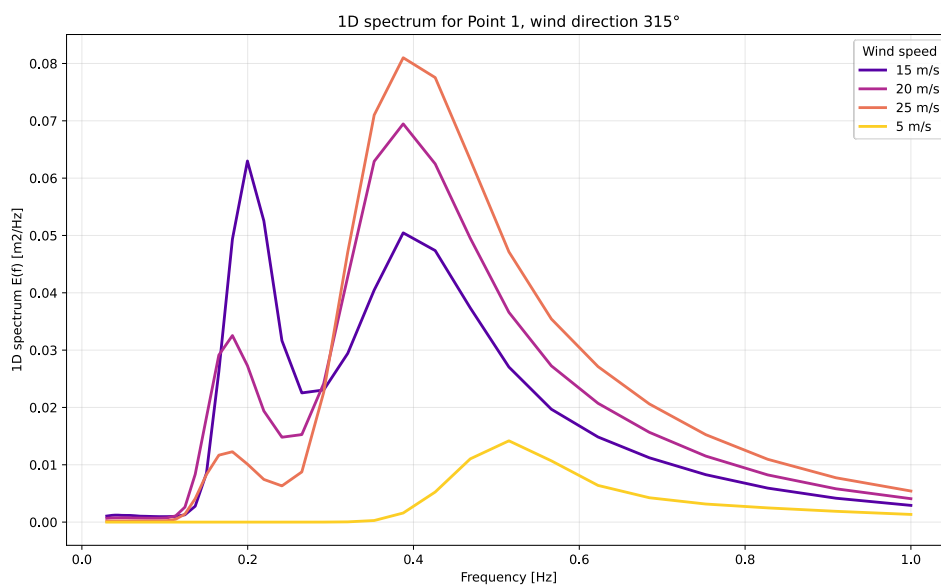
punkter har kontrollerats för avvikande terräng mellan nod och vall, och vid avvikelser justerades dessa värden till mer representativa värden för vallens tå utifrån punkternas omgivning. Vid de punkter där Z är över 3,0 meter antas att H_s vid vallen blir noll. Antagandet görs med grund i att Z -värden högre än vallen innebär att det finns dyner som vid stormscenarion förhindrar vågorna från att nå skyddsvallen. Det resultat från SWAN modellen som används för överspolningsberäkningarna presenteras i nedanstående tabell samt vad de approximeras till i beräkningarna.

Tabell 16 Inparametrar genererade av SWAN

<i>Parameter</i>	<i>Förkortning</i>	<i>Approximeras till</i>
Signifikant våghöjd [m]	H_s	H_{m0}
Topperiod [s]	$T_{psmooth}$	$\frac{T_{psmooth}}{1,1} = T_{p_{m-1,0}}$
Spektral vågperiod [s]	$T_{m-1,0}$	$T_{m-1,0}$
Riktning vågorna kommer från [grader]	Dir	Dir

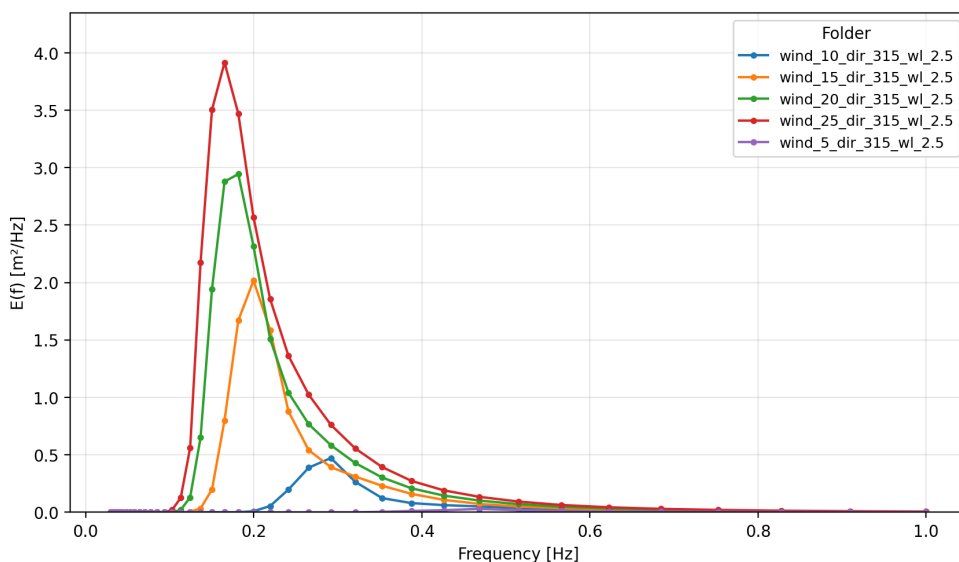
Vid Norra Skanör gav SWAN modellen ett vågenergispektrum med två olika lokala maxpunkter för diverse vindhastigheter, som visualiseras i Figur 13 för vindhastigheterna 15–25 m/s. Bakgrunden till de dubbla maxpunkterna ligger i att spektrumet visar både lokalt genererade vindvågor och långa havsvågor. Där de lokalt skapade vågorna har en högre frekvens. T_p är våglängden där energin är högst och $T_{m-1,0}$ är beräknat som ett viktat spektralt medelvärde. $T_{m-1,0}$ är beroende av frekvens och den spektrala densiteten (Bas Hofland, 2017). I Figur 13 leder detta till att $T_{m-1,0}$ får en längre tidsperiod än T_p för vindhastighet 20–25 m/s då den lägre maxpunkten har en lägre frekvens. För vindhastigheten 15

m/s är den första maxpunkten högre vilket gör att perioden T_p är längre än $T_{m-1,0}$.



Figur 13. Energispektrum för en punkt i Norra Skanör.

Jämförelsevis visas ett annat energispektrum i Figur 14, där det bara finns en maxpunkt för varje vindhastighet. Detta gör att $T_{m-1,0}$ får en kortare tidsperiod än T_p . I resultatet används båda tidsperioderna och presenteras som ett intervall i resultatets kolumndiagram.



Figur 14. Energispektrum för en punkt ca 4 km norr om Skanör.

3.1.3.2 Vall-och murdata

För vallarna antogs en utformning enligt SWECO:s normalsektioner, ett exempel visas i Figur 4 där lutningen för såväl land som havssidan sattes till 1:3. Vegetationen på vallarna förväntas genom en hög biodiversitet ge en tät rotdensitet vilket uppfyller samma funktion som den gräsbeklädnad vilken beskrivs i EurOtop (2018). Vallarna förväntas även underhållas regelbundet vilket medför samma ytfriktionskoefficient för hela vallens livslängd (EurOtop, 2018; Mozer, et al., 2025).

Murens uppbyggnad varierar längs sträckningen där stålspont, gabionmur och betongmur används på olika sträckor. Stålsponten är anlagd med ett djup på 3 meter under markytan, gabionmuren har konstruerats med erosionsskyddat stål och betongmuren har en tjocklek av 300 mm samt en plastspont som går ner minst 3 meter. Sannolikheten för brott genom överspolning för dessa konstruktioner är låg och begränsas till erosion vid skyddet (Yang, et al., 2009; SWECO, 2023). Det här gör att indatan förenklades till att alla murar är vertikala, har en nivå av +3 meter (RH2000) samt att ett strukturellt brott i murkroppen ej är dimensionerande. För de murar anlagda intill vall med överspolningsflöden som

kan föranleda brott kommer vallen troligen gå till brott innan muren och därmed blir vallens sårbarhet mot överspolning dimensionerade för dessa områden.

3.1.4 Utparametrar från överspolningsberäkningar

Utparametrarna som ges är överspolningsflödet enligt *Design or assesement approach* och *Mean value approach*. Överspolningen räknades fram av kod i Python, där koden använder ekvationer baserat på förhållandena som ges av inparametrarna. Pythonkoden lägger resultaten i ett geopaket som kan öppnas i QGIS. Geopaketet innehåller överspolningen för varje punkt och scenario, utifrån resultaten ges också hur ofta flödet på överspolningen överstiger EurOtops (2018) gränsvärden för gräsbeklädda vallar av 5 l/s/m och 10 l/s/m som visas i procent för vallarna. För delar som består av mur visas bara överspolningen eftersom inget definitivt kritiskt överspolningsflöde finns för den i EurOtop (2018).

3.2 Test av vallens erosionsbeständighet

EurOtop (2018) har beskrivit att en skyddsvalls tröskelvärde för överspolning är starkt beroende av lokala förhållanden. Stora skillnader i erosionsbeständighet bestäms av toppskiktet där ett tätt toppskikt av gräs ska klara 5–10 l/s/m utan erosion, medan en vall där vegetationstäcket är fläckigt och har gropar eller hål ligger erosionsgränsen vid 0,1 l/s/m. För vallen i Falsterbo varierar vegetationstäckningen mycket längs sträckningen där stigar över vallen har glesast vegetationstäcke, exempel visas i Figur 15.



Figur 15. Kal yta vid stig över vallen i Norra Skanör.

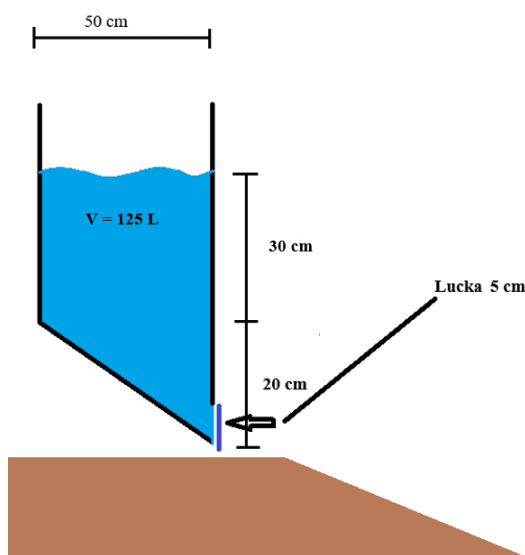
Med grund i EurOtop (2018):s beskrivning av att olika material har olika sårbarhet mot överspolning behöver det kritiska överspolningsflödet för skyddsvallen vid Falsterbonäset tas fram experimentellt samt jämförelse med tidigare studier.

För att experimentet ska representera verkliga förhållanden behöver överspolningen vara lik den som kan förväntas under en stormhändelse. En stormkulmn pågår vanligtvis under ett antal timmar upp till ett dygn (Fredriksson *et al.*, 2016). Kulmen av en storm kan representeras genom antal överspolningar där antalet överspolande vågor beräknade att inträffa under stormens kulm testas utan att intervallet mellan vågorna är verklighetsanpassat (van der Meer, 2008).

3.2.1 Utformning av experiment för test av erosionsbeständighet

Experimentet utformades för att efterlikna de som utförs med en överspolningssimulator som används vid storskaliga experiment, exempelvis av

van der Meer (2008). Med tid, vattentillgång och material som begränsande parametrar utformades detta tests överspolningssimulator i mindre format. Resultatet blev en simulator bestående av en 125-liters vattentank med en bredd på 0,5 m, principskiss illustrerad i Figur 16 och den verkliga tanken i Figur 17. En lucka med höjd 5 cm sattes längst ner där vatten släpps i intervaller på en ramp som leder till vallen. Höjden sattes till 5 cm för att flödet ska vara representativt för en genomsnittlig överspolande våg.

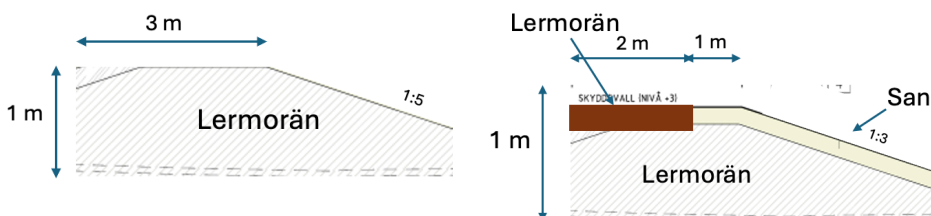


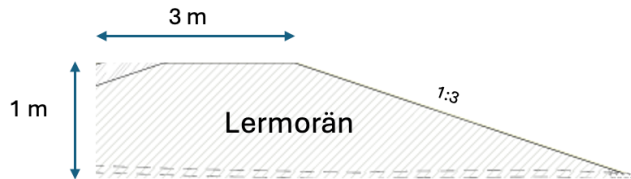
Figur 16. Principskiss av överspolningssimulatoren



Figur 17. Färdigställd överspolningssimulator

Vallarna som testades utformades efter typsektionerna från SWECO (2023 a) och visas i Figur 18. Skillnaden från SWECO:s typsektioner är att topplagret saknar vegetation. Anledningen till detta är bristande tillgång till en vall med lutning och ytvegetation lik typsektionerna. Topplager av lermorän samt sand utan ett vegetationstäckte förekommer dock på den verkliga vallen vid stigar och andra ytor där vegetationen inte har möjlighet att etableras. För att få en förståelse för gräsets motståndskraft användes en tillgänglig prototypvall med topplager av gräs och lutning 1:1,75, där lutningen inte förekommer på den riktiga vallen men med mål om att gräset ger en indikation på erosionsresistens för den gräsbeklädda vallen.

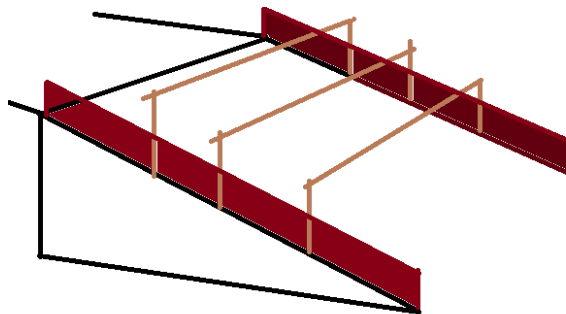




Figur 17. Typsektioner för experimentvall

Överspolningssimulatorns position vid testen sattes till 1 meter från krönet på testvallarna för att möjliggöra simulering av accelerationen över krönet orsakat av överspolning.

I principskissen, Figur 18, visas utformning av testytan på vallen, där väggar på sidan av vallen ses. Syftet med dessa var att det släppta vattnet inte skulle läcka ut på sidorna av provytan. Längs väggarna färdas vattnet med en högre hastighet vilket ger större lokal erosion, detta beaktades därmed i utvärderingen av resultatet.



Figur 18. Principskiss över provyta med väggar

Bredden på provytan sattes till 0,5 meter för att kunna få ett högre flöde per meter utan att den lokala erosionen från väggarna blev för stor.

3.2.2 Utförande

Testvallarna uppfördes på NCC:s etablering i Skanör av anläggare och maskinist. Metodiken och massorna vid anläggningen av testvallarna var densamma som för den verkliga vallen. Färdigställandet av vallen ses i Figur 19.



Figur 19. Typvallarna, senare benämnda 1–4 från vänster till höger.

Inför varje test sattes 14–17 kontrollpunkter ut med bestämda koordinater utifrån en lokal nollpunkt på vallen. För vallen togs 40–80 bilder på provområdet som skapade en heltäckande bild av området och genom bearbetning av bilderna kunde en höjdmodell för vallen skapas med fotogrammetri. Programvaran som användes var MetaShape 1.8.2 med standardinställningar. Utöver fotografering utfördes en kontroll av markens fuktkvot inför varje test för att möjliggöra en utvärdering av sambandet mellan fukthalt och erosion.

Överspolningssimulatorn placerades 1,0 meter från krönet och fylldes med ett flöde på 0,8 l/s. Då utsatt volym för de olika släppen nåddes, presenterade i Tabell 17, drogs luckan upp och den ansamlade vattenvolymen släpptes ner över slänten.

Testerna utfördes på de 4 tidigare beskrivna typvallarna med egenskaper sammanfattade i Tabell 17.

Volymen på släppen varierades för de olika försöken för att få en heltäckande bild över hur olika flöden påverkar de olika toppskikten. I Tabell 17 ses antal släpp samt volym per släpp och vall.

Tabell 17. sammanställning av vallens karaktärsdrag samt släppparametrar

Vall	Lutning	Topplager	Volym på släppen [liter]	Antal	Tid mellan släpp [sekunder]
1	1:5	Lermorän	50/75/100	20/20/20	63/94/125
2	1:3	Lermorän	50/75/125	20/20/20	63/94/156
3	1:3	Sand	25/50	20/20	31/63
4	1:1,75	Gräs	50/100	10/10	125

Eftersom flödet in i tanken var konstant varierade tiden mellan släppen från ca 1 minut för släpp på 50 liter till 4 minuter för släpp på 125 liter. Det olinjära sambandet för uppfyllnadstid förklaras genom ett ökat läckage vid högre vattentryck i tanken. För att undersöka effekten tiden mellan släppen hade på materialet utfördes fuktmätningar vid krönet, mitt på vallen samt vid botten av vallen före och efter ett släpp.

Luckans öppning på 5 cm gav ett relativt konstant utflöde på 83,3 l/s/m från överspolningssimulatorens. Släppen antas motsvara flödet från de 2% av vågorna med högst uppspolning, benämnt $R_{u2\%}$ i EurOtop (2018). Vågperioden sattes till 3 sekunder för att motsvara vanligt förekommande vågförhållanden för överspolande vågor från SWAN-modellen. Flödet för överspolningen räknades fram genom ekvation 21 och 22. Där ekvation 21 beräknar den totala överspolningsvolymen,

$$V_{tot} = \frac{N_{ow}}{P_{ow}} * T_{m-1,0} \quad (21)$$

Ekvation 22 beräknar sedan det genomsnittliga överspolningsflödet. Beskrivning av parametrar finns i Tabell 18.

$$q = \frac{V_w * N_{ow}}{V_{tot}} \quad (22)$$

Tabell 18. förklaring över förkortningar

<i>Beskrivning</i>	<i>Förkortning</i>	<i>Värde</i>
Andel överspolade vågor	P_{ow}	0,02
Vågperiod	$T_{m-1,0}$	3 sekunder
Total överspolad volym	V_{tot}	1000-5000 l
En vågs överspolningsvolym	V_w	50-250 l
Flöde överspolning	q	0,33-1,67 l/s/m
Antal överspolande vågor	N_{ow}	20 st

4 Resultat och analys

4.1 Vallens beständighet mot överspolning

Resultatet av experimentet för typvallarna presenteras sammanfattat i Tabell 19 och mer utvecklat i efterföljande kapitel.

Tabell 19. Erosionsvolym från experimentet vid de olika typvallarna beroende av släppvolym omräknat till flöde.

<i>Vall</i>	<i>Lutning</i>	<i>Topplager</i>	<i>Släpp volym [liter]</i>	<i>Beräknat flöde, ($Tm-1,0$ = $3,0s$) [l/s/m]</i>	<i>Erosionsvolym [m³]</i>	<i>Observation</i>
1	1:5	Lermorän	50	0,67	0,0152	Ytlig erosion
1	1:5	Lermorän	75	1	0,0076	Lokal erosion
1	1:5	Lermorän	100	1,33	0,0116	Lokal erosion och stensläpp
2	1:3	Lermorän	50	0,67	0,0214	Ytlig erosion
2	1:3	Lermorän	75	1	0,0624	Lokal erosion och stensläpp
2	1:3	Lermorän	125	1,67	0,105	Växande lokal erosion
3	1:3	Sand	25	0,33	0,145	Kanalbildning
3	1:3	Sand	50	0,67	0,234	Kraftig kanalbildning

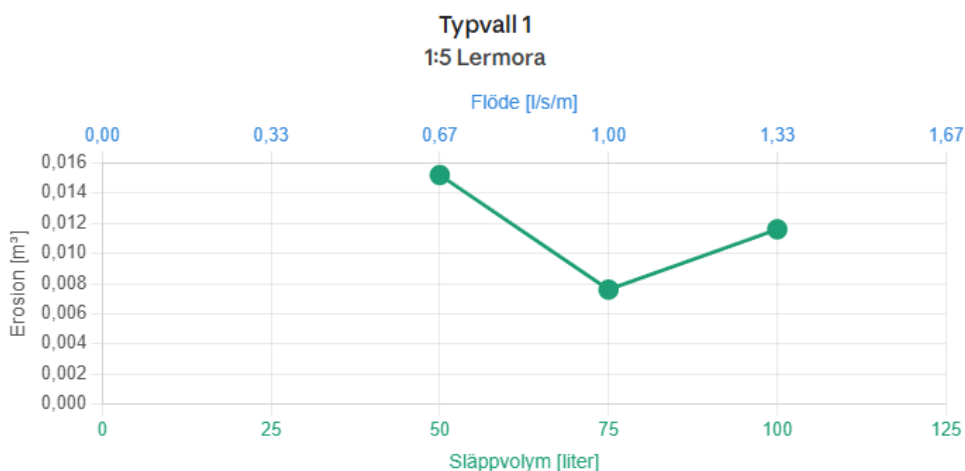
4	1:1,75	Gräs	100	1,33	0,009	Ingen märkbar erosion
---	--------	------	-----	------	-------	-----------------------

4.1.1 Erosionsutveckling vid kontrollerad överspolning

Vid lokala heterogeniteter såsom gropar och stenar var erosionen mer omfattande än omliggande slätare ytor. Vid dessa punkter sågs det hur vattnet och erosionen blev mer koncentrerad. För Typvall 3 med sand som toppskikt hände detta genom att kanaler skapades tidigt. Efterföljande släpp gröpte ur kanalerna mer varje gång, ner till underliggande lermorän. Genomgående för Typvall 1 och 2, med toppskikt av lermorän, var att den största erosionen skedde där finare kornstorlek befann sig närliggande den grövre men avtog under testerna. Typvall 4 fick inga större erosionsvolymmer, synligt fanns det ytor där gräsets rötter blev synliga samt en koncentration av vattnet i dessa punkter. Det här talar för att erosion kunde uppstått vid fler släpp eller högre volym.

För tester med ett större volymsläpp och högre flöde skedde generellt mer erosion. Vid de större volymsläppen kunde det tydas att de tog med sig större kornfraktioner men också mer massor över hela ytan. Nedan följer en mer detaljerad beskrivning av hur de olika typvallarna reagerade vid de testade flödena och möjliga orsaker till den varierande erosionsvolymen.

4.1.1.1 Typvall 1 – 1:5 Lermorän



Figur 20. Erosionskurva för Typvall 1

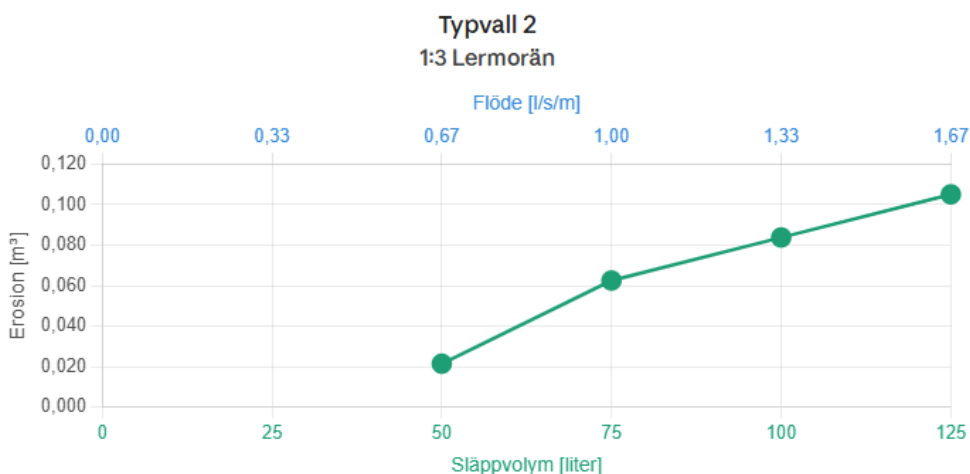
Typvall 1 bestående av lermorän med lutning 1:5 gav den högsta erosionen vid det lägsta flödet på 0,67 l/s/m. Erosionen presenteras i Appendix A och visar att vid detta låga flöde eroderade ett topplager av lösa fraktioner av blandade kornstorlekar utan att ge en högre grad lokal erosion. En möjlig anledning till den relativt höga erosionsvolymen är att vallen inför det första testet hade packats en vecka tidigare medan vid de andra flödestesterna packades vallen i samband med utförandet. Innan och efter vart 5:e test gjordes fuktkvotstester som visade att fukthalten innan det första släppet med 50 liter utfördes var 27,4%vol och efter fem släpp av volymen 50 liter uppnåddes en nivå på 34,6%vol. Fuktkvoten vid samtliga efterkommande mätningar på Typvall 1 låg inom intervallet 32 - 36%vol. Det här visar att vattenmättnadsgraden inte skiljde sig mycket mellan testerna och hade troligen ingen större påverkan på resultatet.

Vid tester med flödet 1,0 l/s/m uppstod en större mängd lokal erosion än vid testet med 0,67 l/s/m samt en mindre mängd total erosion. Den lokala erosionen var främst koncentrerad till strax efter vallens krön där den hade en utbredning av hela testytans bredd och ett djup av 5 cm. Lokal erosion förekom även längre ned

längs vallen där stenar eroderat bort och skapat hål där flödet koncentrerades och gav en högre erosion än omkringliggande yta.

Det sist testade flödet för Typvall 1, 1,33 l/s/m, gav en relativt jämn erosionsprofil där erosionen främst koncentrerades till punktvis lokal erosion av djup mellan 3 - 5 cm. Likt testen med flöde på 1,00 l/s/m uppstod den lokala erosionen vid punkter där stenar hade lossnat och skapat en kanalisering av flödet. Visuellt kunde det konstateras att det översta lagret av finare fraktioner var bortforslat efter 10 försök och ett topplager av blandade fraktioner blottades. Stensläpp i det armerande lagret gav lokal växande erosion men i övrigt uppstod ingen märkbar erosion av detta blandade lager.

4.1.1.2 Typvall 2 – 1:3 Lermorän



Figur 21. Erosionskurva för Typvall 2

Vid överspolningstester av lermorän med lutning 1:3 var startförhållanden liknande för alla testerna. Samtliga packades i samband med testet och fukthalten under hela testet varierade mellan 22 och 28 %vol. Det första överspolningstestet med ett flöde på 0,67 l/s/m gav en erosion på 0,021 m³ vilket är högre än samtliga flöden för vallen med lutning 1:5. Erosion av finare ytmaterial samt lokal erosion

vid stensläpp uppstod under detta flöde. Efter experimentet kunde det ses att det fanns fina fraktioner kvar i toppskiktet.

Då flödet ökades till 1,00 l/s/m ökade erosionen nästintill tredubbelt från 0,021 till 0,062 m³, ytskiktet var bortspolat under de första fem försöken vilket blottade en för detta flöde erosionsresistent yta bestående av kornfraktioner från sten till lera. Stensläpp i det översta lagret gav gropar i vallen vilket föranledde hög grad av punktmässig lokal erosion. Den lokala erosionens maxdjup var 9,3 cm under startytan och kan i Appendix A ses påbörja en spridning nedåt vallen i vissa punkter.

Det högsta flödet på 1,67 l/s/m gav experimentets högsta erosion på 0,105 m³. Noterbart är att erosionen per ökat flöde mellan 1 och 1,67 l/s/m är;

$$\frac{0,105 - 0,062}{1,67 - 1} = 0,0641 \text{ m}^3 / (\text{l/s/m})$$

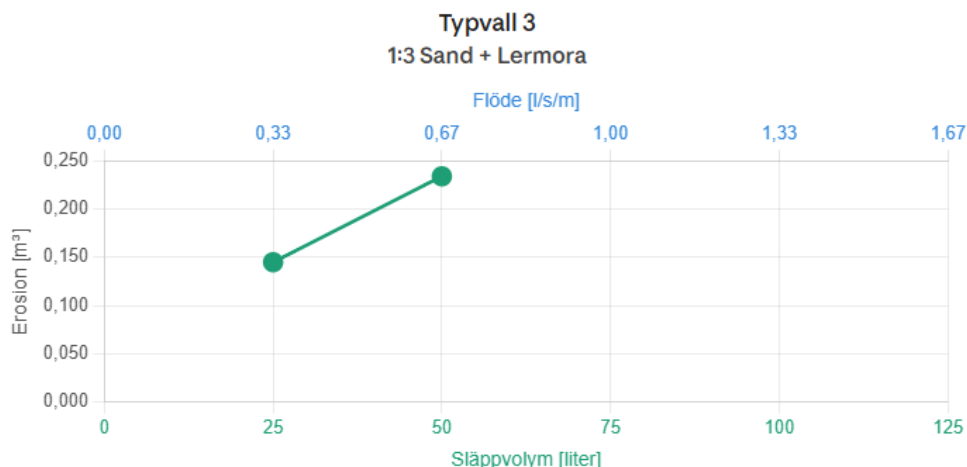
medan förhållandet mellan 0,67 och 1,0 l/s/m är följande;

$$\frac{0,062 - 0,021}{1 - 0,67} = 0,12 \text{ m}^3 / (\text{l/s/m})$$

Under släppen på 125 liter bestod det översta lagret snabbt utav större fraktioner i storlek grus - sten sammanbundna av finare jordarter. Då detta lager var blottat kunde det ses att erosionen avtog i stort och lokal erosion orsakat av stensläpp från ytskiktet växte sig större och djupare. Det maximala djupet för erosionen skiljer sig enbart med 1 cm från släppen med 75 l på samma vall. Vidare kan det ur fotogrammetrin i Appendix A ses att ytan är mer räfflig vilket påvisar att mycket av det ytliga finmaterialet har eroderat. Det kan även ses hur större kanaler börjar bildas som resultat av den lokala erosionen.

Vallarna konstruerades av liknande massor vilket antyder att lutningen har en korrelation med erosionen vid ett visst flöde.

4.1.1.3 Typvall 3 – 1:3 Sand med underliggande lermorän



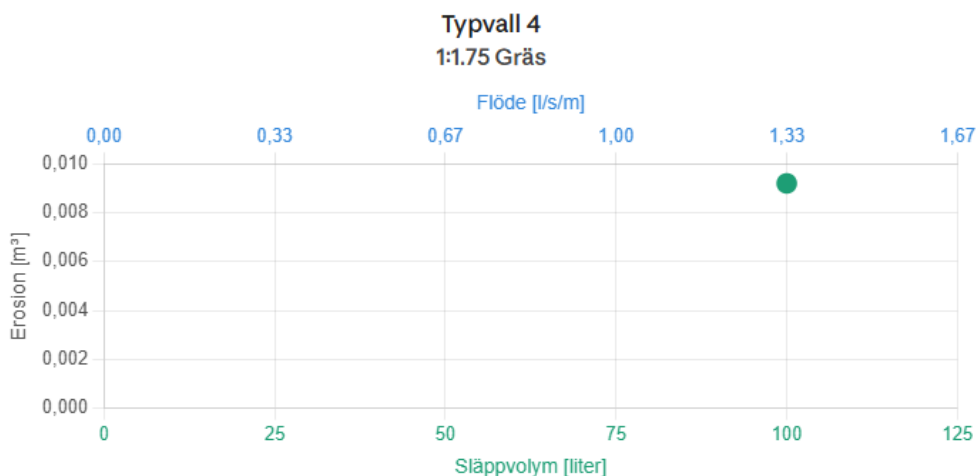
Figur 22. Erosionskurva för Typvall 3

Vid experimentet av Typvall 3, bestående av sand med 1:3-lutning var erosionsvolymerna markant större än vid försök på enbart lermorän. Flödet på 0,33 l/s/m gav en erosionsvolym på 0,145 m³ vilket är 40% högre än vad 1,67 l/s/m genererade för Typvall 2. Efter 20 släpp av volymen 25 liter var ingen lermorän blottad men sanden visade inget ökat erosionsmotstånd under testets gång så som lermoränen har uppvisat.

Det högre flödet på 0,67 l/s/m skapade redan vid det första släppet kanaler genom sanden. Vid efterkommande släpp koncentrerades vattnet till dessa kanaler och sanden eroderade ner till lermoränen under de 10 första släppen. Flödet var fortsatt koncentrerat till kanalerna som nu bestod av lermorän men började breddas. Ingen ytterligare erosion av lermoränen uppmättes vilket resulterade i att erosionsdjupet avstannade vid -30 cm men erosionsvolym ökade fortsatt som resultat av breddning av kanalerna.

Då det inte sågs någon erosion av lermoränen kan det förväntas att vidare erosionsflöden kommer ge en erosion av lermoränen i linje med resultatet för typvall 2.

4.1.1.4 Typvall 4 – Gräsbeklädd vall



Figur 23. Erosion för Typvall 4

Den gräsbeklädda vallen med lutning 1:1.75 uppvisade erosion som faller inom felmarginalen för vad som kan utmätas av fotogrammetrin. Genom visuell analys av Figur A.9 i Appendix A kan det sägas att viss erosion kring grästuvor uppstod vid flödet på 1,33 l/s/m. Erosionen är dock väldigt begränsad och visade inga tecken på att förvärras eller spridas under testets genomförande.

4.2 Beräknad överspolning för kombinationer av vind, vattenstånd och områden

Utifrån vågdata simulerad med SWAN har överspolningsmängder beräknats för varje punkt illustrerad i Figur 24. Punkterna har delats upp i områden utifrån linkande förstrandsförhållanden, riktning mot havet samt bakomliggande landområde. Områdena utgörs av inramade punkter där för varje område den punkt med högst överspolning vid ett visst förhållande har valts som representativ punkt, markerat i rött i Figur 24. Punkterna väljs baserat på högst överspolning eftersom dessa punkter kommer utgöra svagpunkter för vallen. Följande kapitel behandlar *Mean value approach* då detta är mest representativt för den verkliga överspolningen. Enligt tidigare avgränsningar analyseras enbart vallarnas

sårbarhet djupgående. Resultatet för *Design or assessment approach* samt muren presenteras i Appendix C.

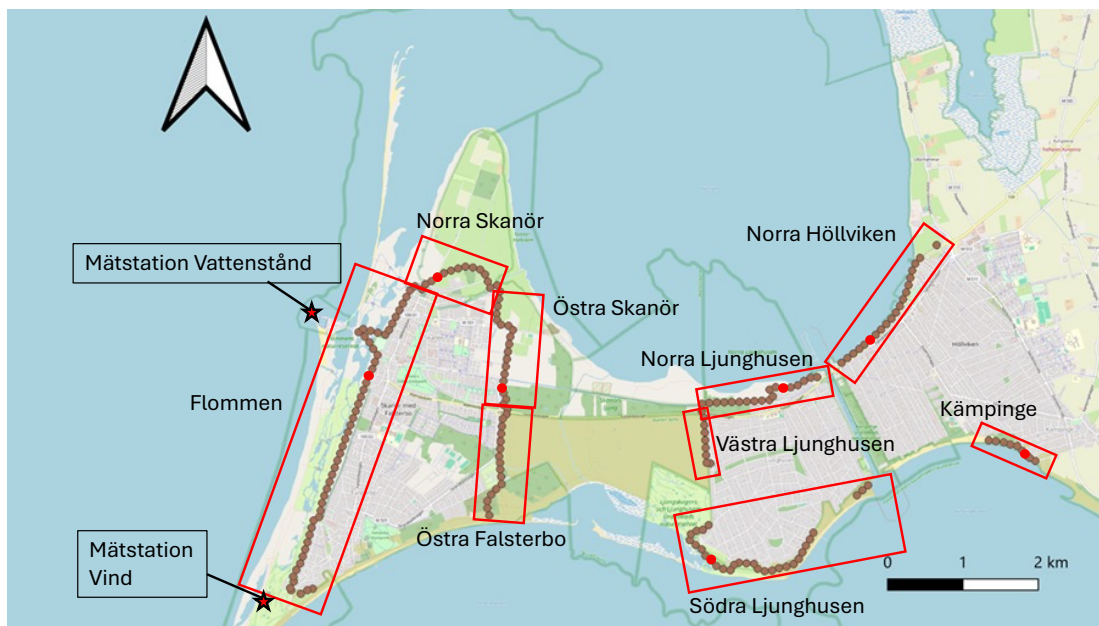
Resultatet för de representativa punkterna illustreras i diagramform kompletterat med analyserande text som sätter överspolningsflödena i förhållande till sannolika kombinationer av vindar och vattenstånd. Konsekvenserna av överspolningsmängderna tas upp under avsnitt 5. Diskussion.

I diagrammen där resultatet för överspolningsberäkningarna presenteras, ses för varje överspolningsstapel en felstapel med magenta och limegröna ändar. Dessa representerar överflödesberäkningar utförda med tidigare beskrivna $T_{m-1,0}$, hämtad direkt från SWAN respektive en omvandling från $\frac{T_p}{1,1}$. Medelvärdet av dessa presenteras som approximativt överspolningsflöde för skyddsvallen. De avvikande överspolningsvärdena som resulterar från denna approximation diskuteras i avsnitt 5.3.1 där felkällor kopplade till SWAN diskuteras.

Vidare presenteras en orange och röd linje i överspolningsdiagrammen med högre flöden, vilket representerar ett flöde mellan 5–10 l/s/m. Detta flöde anser EurOtop (2018) vara ett kritiskt överspolningsflöde för gräsbeklädda vallar. Diskussion kring det kritiska överspolningsflödet för Falsterbonäsets skyddsvall följer i avsnitt 5.1.1 *Kritisk överspolning*. Vid förhållanden där flöden är lägre kan även en gyllne linje ses vid 0,1 l/s/m, vilket representerar EurOtop (2018):s rekommenderade gränsen för kritisk överspolning där vegetationstäckets är skadat samt hål och gropar förekommer.

Nedan följer en områdesuppdelad sammanfattning av det mer detaljerade resultat som återfinns i Appendix C.

I delar av resultatet benämns vindriktningar i ett spann. Spannet startar från första benämnda vindriktning och går medurs till det sistnämnda.

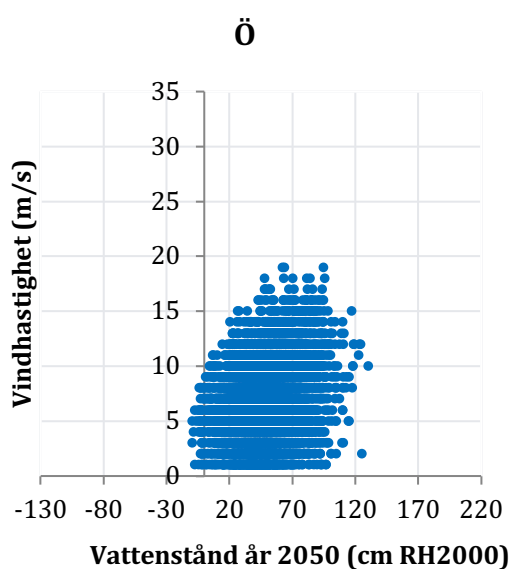
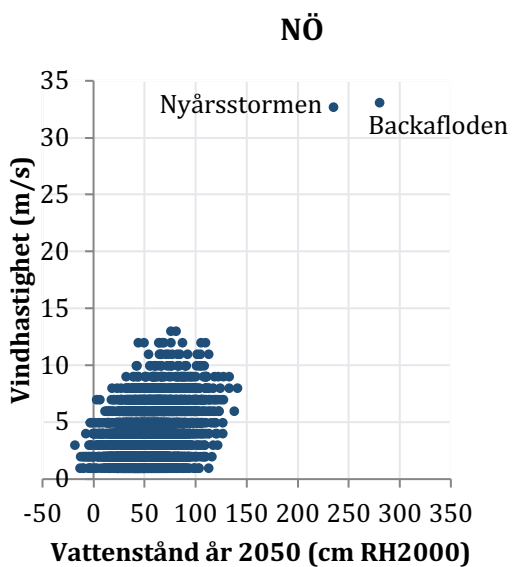
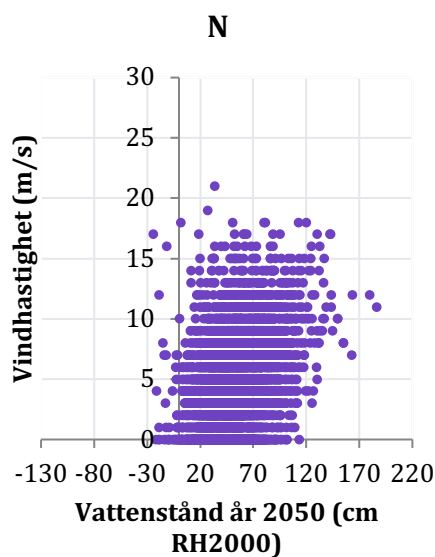
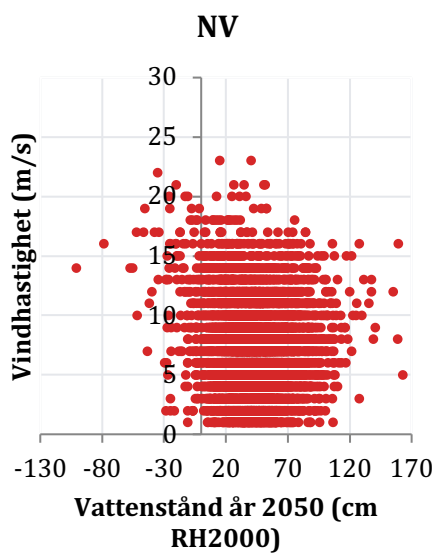


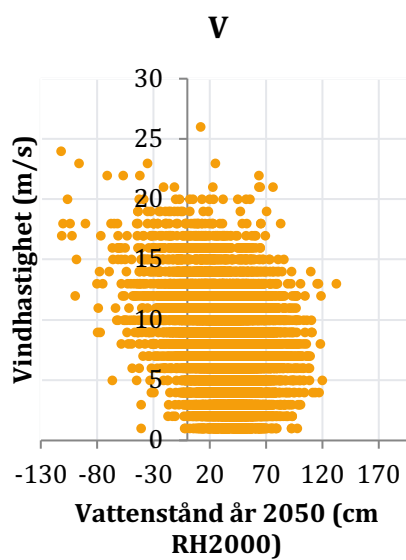
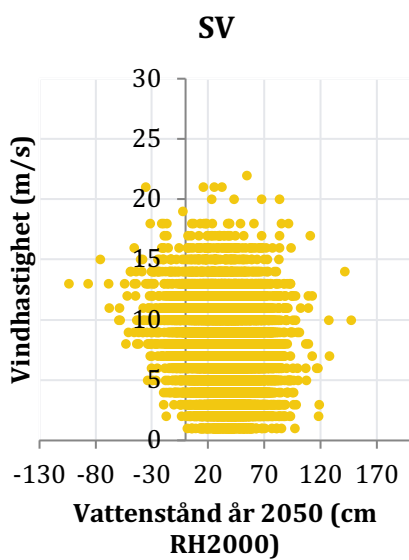
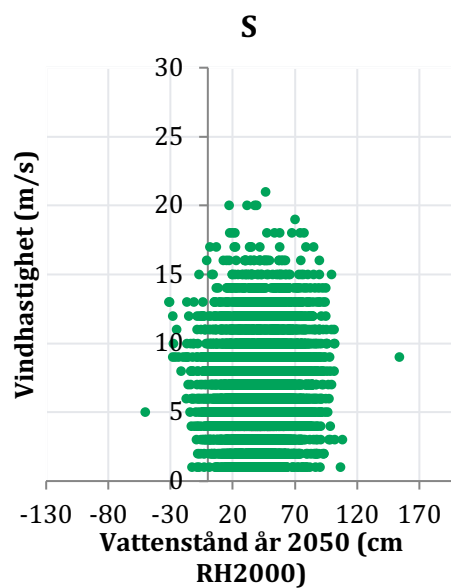
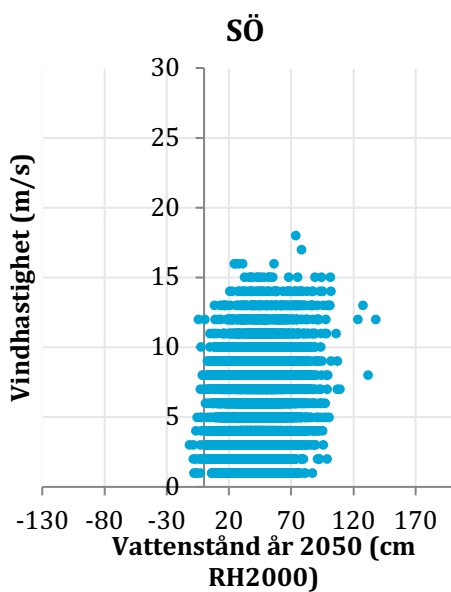
Figur 24. Beräkningspunkter (bruna och röda punkter), områdesuppdelning (röda rektanglar), representativa punkter (röda punkter), mätstationer (röda stjärnor).

4.2.1 Vindkombinationer och vattenstånd

Sannolikheten för att ett visst scenario ska inträffa är svårbedömt. Historiska data används därför för att ge en indikation på vanligt förekommande förhållanden.

I Figur 25 har data för vattenstånd, vindhastighet och vindriktning från SMHI (2025) mellan år 1992 och 2023 sammanställts för 8-delade vindriktningar. Vattenståndet är beräknat med år 2050s förväntade medelvattenstånd på +41 cm (RH2000) för att visa vilket vattenstånd historiska stormar hade givit vid slutet av vallens livslängd då vattenståndet är högre än det var vid tidpunkten för stormarna (SJÖFARTSVERKET, 2025). Vattenståndet för år 2050 valdes i stället för år 2065 eftersom förväntade värden för år 2050 har publicerats av SMHI (2017 a) och Sjöfartsverket (2025) medan värden mellan år 2050 och 2100 behöver uppskattas vilket skapar en större osäkerhet i resultatet. Platserna för SMHI:s mätstationer visas i Figur 24.





Figur 25. Kombination av vattenstånd, vindhastighet och vindriktning per 3:e timme 1992-02-17 – 2023-10-01 (SMHI, 2025)

Figur 25 visar att från N-SÖ syns en positiv korrelation mellan vindhastighet och uppmätt vattenstånd. Vid sydliga och nordvästliga vindar finns inget tydligt samband. Ett negativt förhållande mellan vindhastighet och vattenstånd

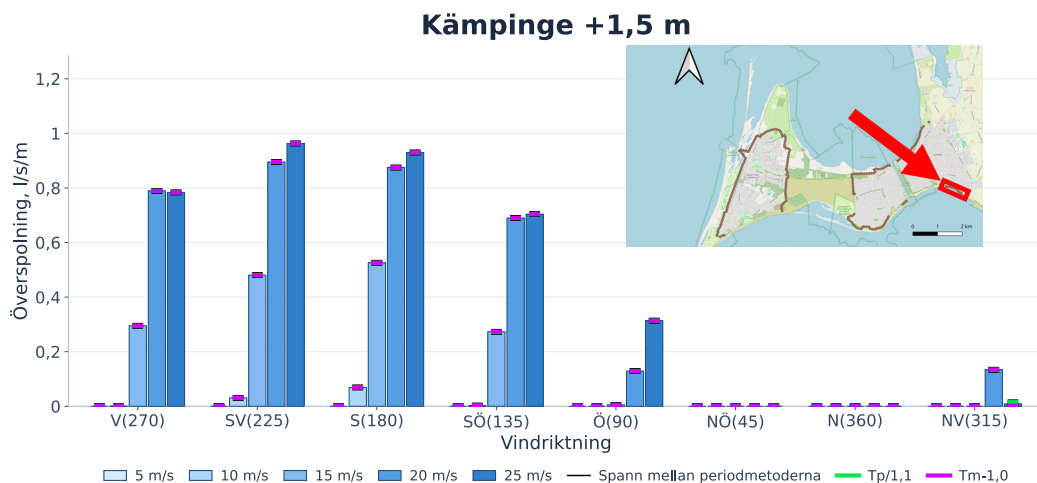
identifieras för västliga vindar. Det ses även att de högsta vattennivåerna sammanfaller med NV-NÖ vindar och de lägsta vattennivåerna genereras av starka västliga och sydvästliga vindar. Sammantaget innebär detta vid analys av överspolningsflöden att högst sannolikhet för en kombination av höga vattennivåer och vindhastigheter är vid nordvästliga till nordostliga vindar, medan det är väldigt osannolikt att starka västliga och sydvästliga vindar genererar höga vattenstånd.

Sannolikheten för olika vindstyrkor varierar där hastigheter upp till 15 m/s är relativt vanligt förekommande för samtliga vindriktningar förutom nordost, där den högsta uppmätta vindhastigheten sedan 1992 för Falsterbonäset är 13 m/s. Det ses även att vindar över 20 m/s är ovanliga och vindstyrkor över 25 m/s enbart har uppmätts en gång sedan 1992. Samtidigt visar extremväderhändelserna Backafloden (1872) och Nyårsstormen (1904) att betydligt högre vindhastigheter förekommer men är sällsynta.

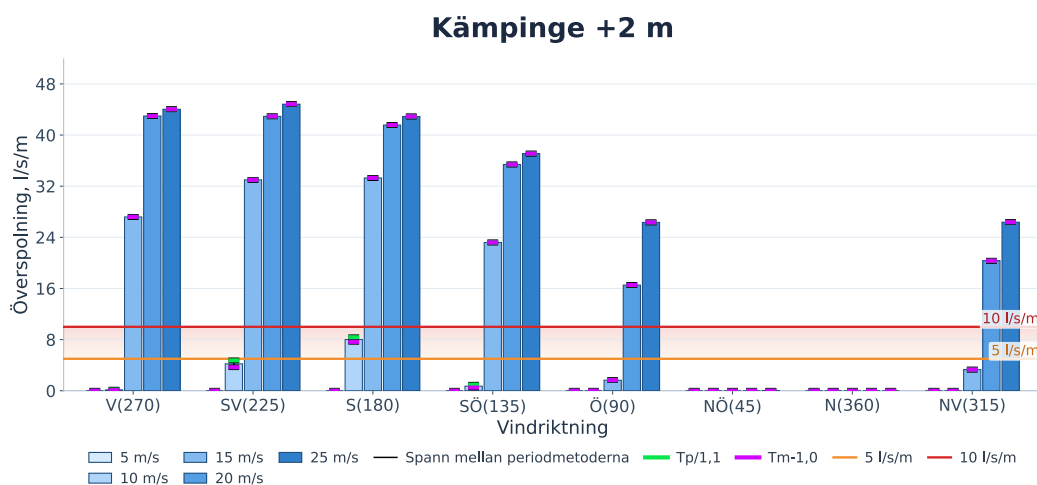
Vattenstånd över +2,5 m (RH2000) har enbart förekommit med ostliga och nordostliga vindar över 25 m/s, varför det främst är överspolningen från dessa vindar som bör studeras vid vattennivåer av +2,5 m (RH2000). Det är även ett vattenstånd som enbart inträffar vid extremväderhändelser och det är osannolikt att det inträffar under skyddsvallens livslängd, men risken finns eftersom det kan genereras av stormar som tidiagre har drabbat Falsterbonäset.

Slutligen är den uppskattade 100-årsnivån av vattenståndet vid Falsterbonäset +189 cm (rel. RH2000) år 2050. Skulle denna nivå uppnås kan det genom vinddata uppskattas att vindriktningen bör vara nordlig till nordvästlig och genom att studera Backafloden och Nyårsstormen kan det konstateras att även nordostliga vindar kan ge upphov till en hög vattennivå. Därmed kan det förväntas att ett vattenstånd på +2,0 m (RH2000) kombineras med vindar från nordväst, nord, eller nordost.

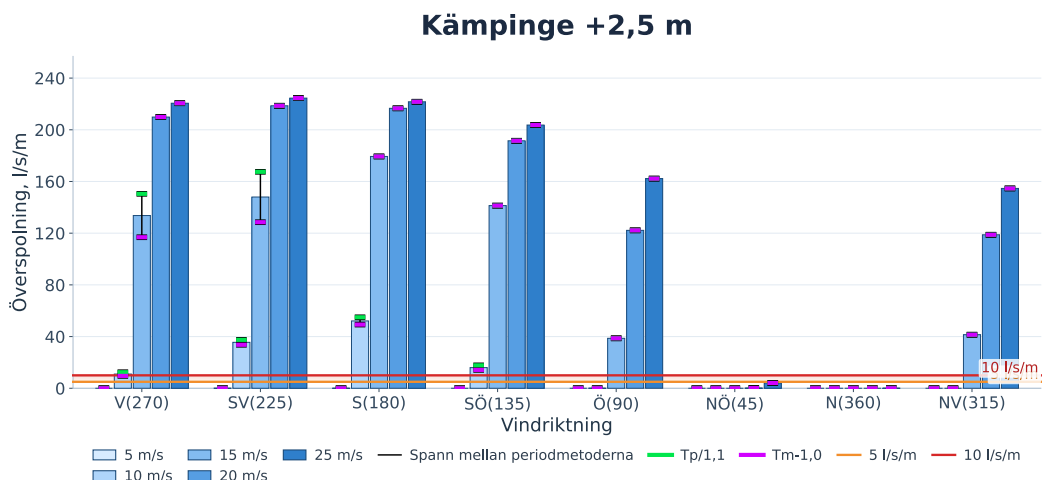
4.2.2 Kämpinge



Figur 26. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +1,5 m (RH2000) för Kämpinge. På grund av förhållanden i Kämpinge ger ekvationerna samma överspolning för Tm-1,0 och Tp/1,1, varför enbart lila ändpunkter syns för staplarna.



Figur 27. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,0 (RH2000) för Kämpinge. På grund av förhållanden i Kämpinge ger ekvationerna vid vissa scenarion samma överspolning för Tm-1,0 och Tp/1,1, varför enbart lila ändpunkter syns för vissa staplar.



Figur 28. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,5 (RH2000) för Kämpinge. På grund av förhållanden i Kämpinge ger ekvationerna vid vissa scenarion samma överspolning för Tm-1,0 och Tp/1,1, varför enbart lila ändpunkter syns för vissa staplar.

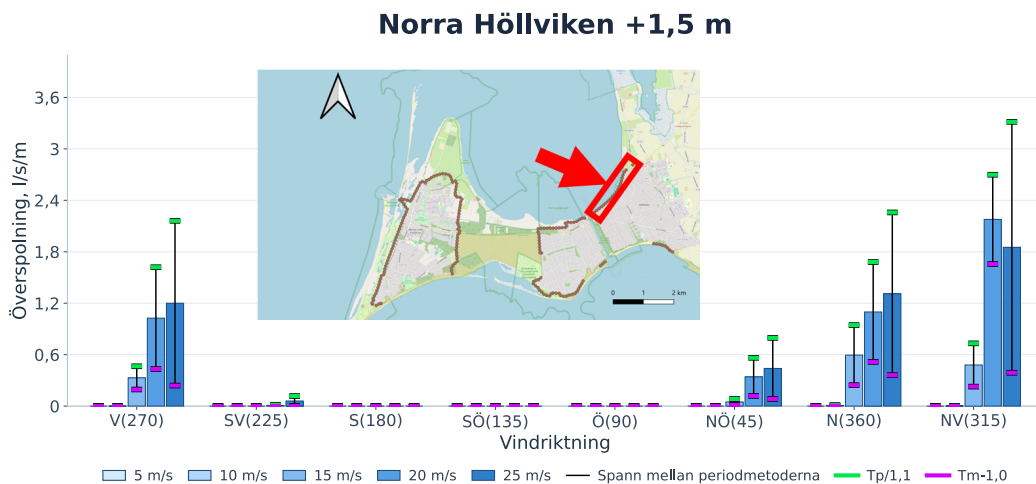
Kämpinge är enligt Figur 26 – 28 ett område med utsatthet mot flertalet vindriktningar. Utifrån historiska data är det högst sannolikheten för överspolning i Kämpinge vid nordvästliga och östliga vindar. Eftersom vattennivån +1,5 m (RH2000) är förekommande vid flertalet vindkombinationer, exempelvis Babet 2023 och Stormfloden 4 januari 2017, är sannolikhet hög att detta låga överspolningsflöde kommer genereras under vallens livslängd.

De högre överspolningsflödena vid +2,0 m (RH2000) är mindre sannolika, dels eftersom nordvästliga och östliga vindar inte har genererat en vattennivå över +2,0 m mellan 1992 och 2023, dels att vindstyrkorna vid de högst uppmätta nivåerna under dessa perioder var lägre än 20 m/s. Vid nordvästliga vindar har dock höga vattennivåer uppmätts med vindhastigheter mellan 15 och 20 m/s, vilket genom interpolering av resultatet hade resulterat i överspolningsflöden mellan 5 och 10 l/s/m.

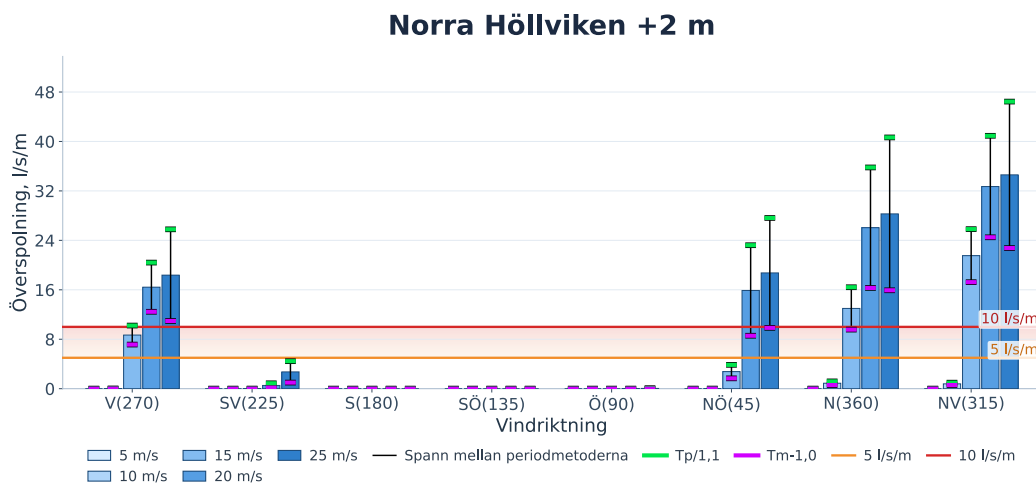
Det här innebär att sannolikheten för betydande överspolning vid höga vattennivåer är hög, men det finns fortfarande en sannolikhet att vattennivåerna genereras av nordöstliga vindar vilket inte skulle ge någon betydande

överspolning för Kämpinge. Vid en vattennivå av +2,5 m (RH2000) är sannolikheten hög att vindarna varierar mellan ostliga och nordostliga vindar, där överspolningen varierar avsevärt mellan dessa scenarion.

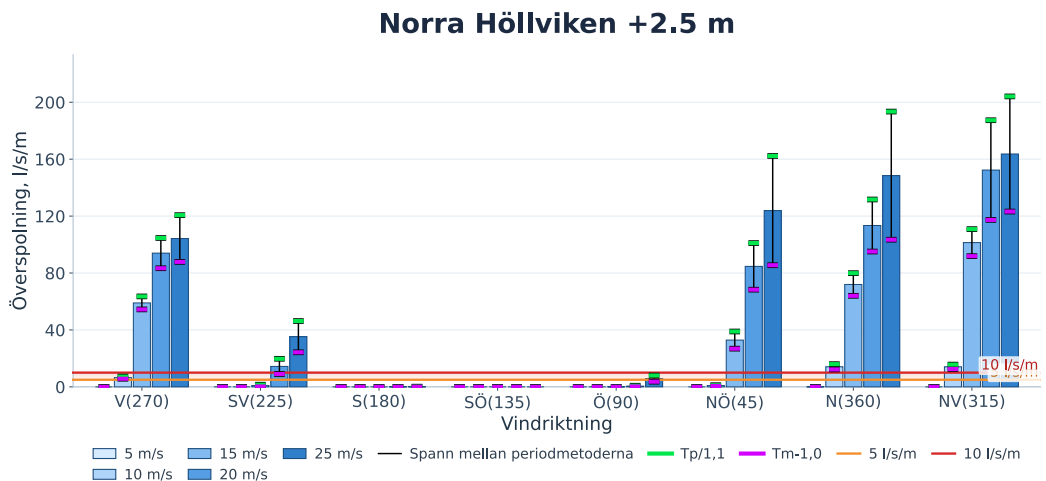
4.2.3 Norra Höllviken



Figur 29. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +1,5 (RH2000) för Norra Höllviken. Vid NV vindar syns det att 20 m/s ger som medelvärde en högre överspolning än 25 m/s.



Figur 30. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,0 (RH2000) för Norra Höllviken.



Figur 31. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,5 m (RH2000) för Norra Höllviken.

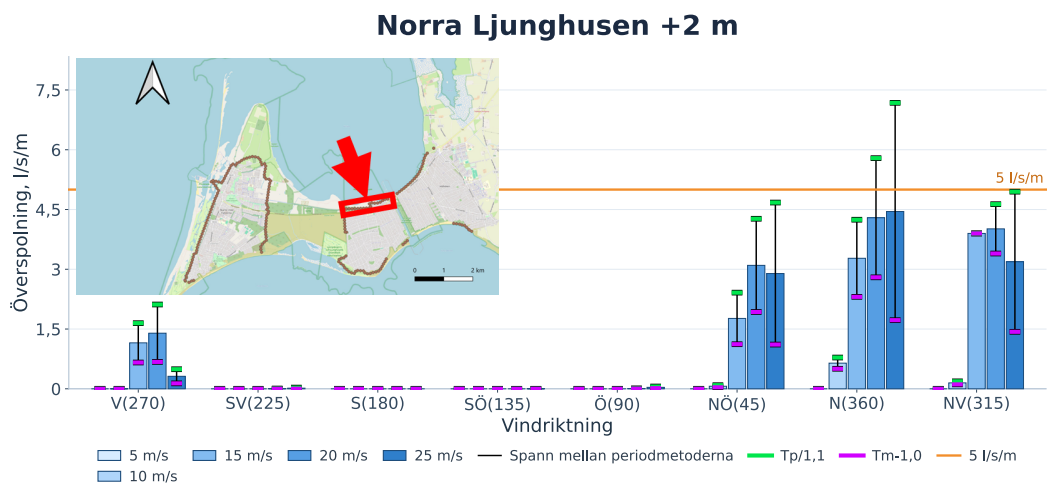
Norra Höllviken är likt Kämpinge ett område där relativt höga överspolningsflöden förväntas redan vid en nivå av +1,5 m (RH2000). Eftersom de överspolningsgenererande vindarna (NV-NÖ) även är de vindar som ofta kombineras med ett vattenstånd över +1,5 m (RH2000) enligt Figur 29, föreligger hög risk att dessa nivåer av överspolning nås inom vallens designade livslängd. Enligt figur syns det även att vid nordvästerliga vindar med vindhastighet 20 m/s sker en högre överspolning än vindhastigheten 25 m/s. Detta är ett tydligt exempel på det som tagits upp i avsnitt 3.1.3.

Vidare uppvisas höga överspolningsflöden vid nivån +2,0 m i kombination med vindar som ofta genererar högt vattenstånd. Därmed ökar sannolikheten för betydande överspolning under vallens livslängd med ökande vattennivåer, och inträffar förhållanden likt Nyårsstormen idag med kraftiga nordostliga vindar, alternativt ett 100-års högvatten vid slutet av vallens livslängd genereras betydande överspolning.

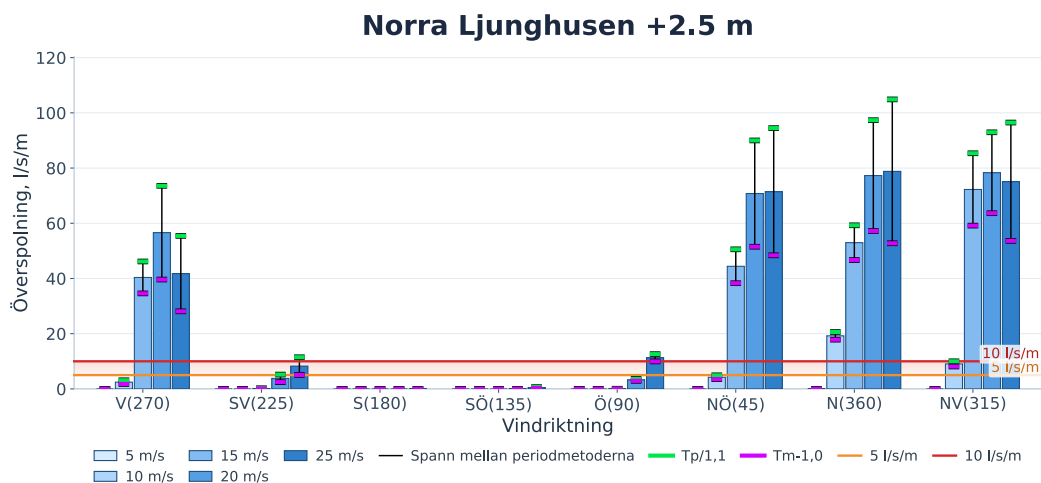
De högsta historiska vattennivåerna över +2,5 m (RH2000) har inträffat vid kraftiga nordostliga vindar och enligt Figur 31 genererar detta ett högt överspolningsflöde från vindhastigheter av 15 m/s. Backafloden och

Nyårsstormen genererade scenarion likt detta och då kombinerades det höga vattenståndet med vindhastigheter mellan 25 och 33 m/s vilket hade givit omfattande överspolning av skyddsvallen.

4.2.4 Norra Ljunghusen



Figur 32. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,0 (RH2000) för Norra Ljunghusen. Vid V och NV vindar syns det att 15 - 20 m/s ger som medelvärde en högre överspolning än 25 m/s. Vid NÖ vindar syns det att 20 m/s ger som medelvärde en högre överspolning än 25 m/s.

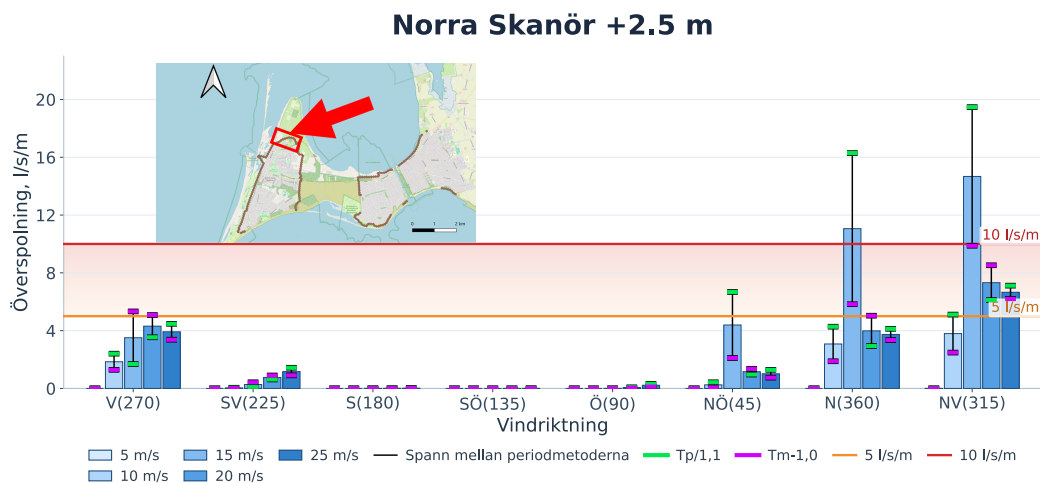


Figur 33. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,5 (RH2000) för Norra Ljunghusen. Vid V och NV vindar syns det att 20 m/s ger som medelvärde en högre överspolning än 25 m/s.

Norra Ljunghusen är beläget intill Norra Höllviken och har därmed liknande exponering mot vågor. Till skillnad från Kämpinge och norra Höllviken förväntas ingen överspolning vid ett vattenstånd av +1,5 m och vindhastigheter under 25 m/s.

Likt Norra Höllviken genereras överspolningsflöden främst i samband med vindkombinationer som förorsakar höga vattennivåer (NV-NÖ). Eftersom vattenstånd av +2,0 och +2,5 m (RH2000) i dessa vindriktningar ofta sammanfaller med höga vindhastigheter är sannolikheten hög att högsta beräknade överspolningsflödena för respektive vattenstånd genereras.

4.2.5 Norra Skanör



Figur 34. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,5 (RH2000) för Norra Skanör. Vid NÖ-NV vindar syns det att 15 - 20 m/s ger som medelvärde en högre överspolning än 25 m/s. Vid V vindar syns det att 20 m/s ger som medelvärde en högre överspolning än 25 m/s.

I Norra Skanör är det enbart sannolikt med överspolning vid ett vattenstånd på +2,5 m (RH2000). Med grund i de vindarna som historiskt har genererat detta vattenstånd är det överspolningen från ostliga och nordostliga vindar som med högst sannolikhet kommer genereras.

4.2.6 Östra Falsterbo

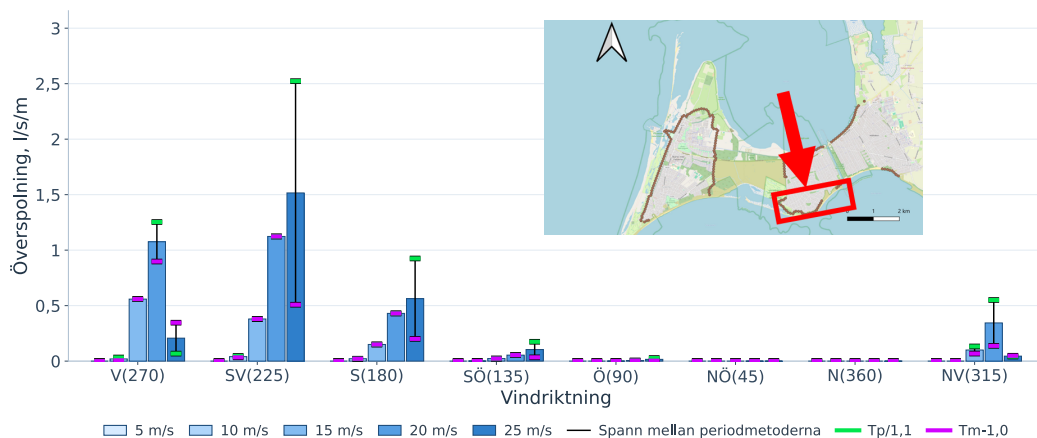


Figur 35. Området Östra Falsterbos placering på Falsterbonäset

Ingen märkbar överspolning genereras i Östra Falsterbo för de undersökta scenarierna.

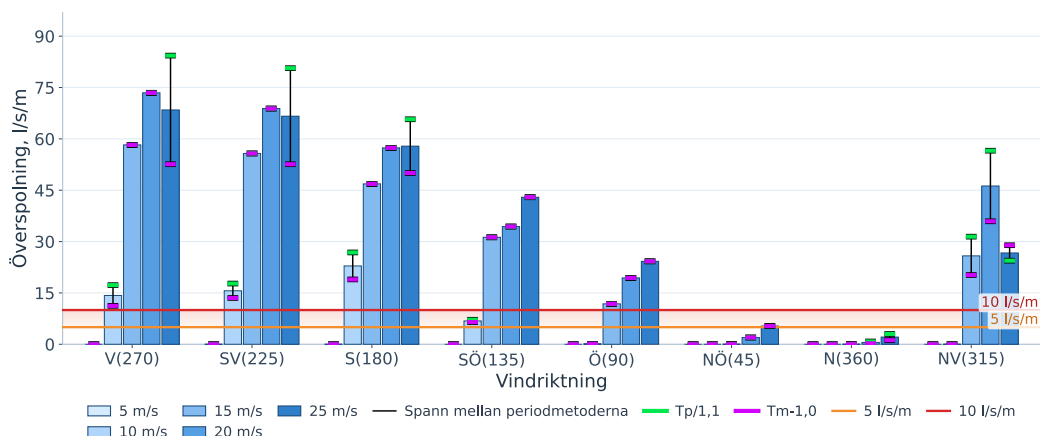
4.2.7 Södra Ljunghusen

Södra Ljunghusen +2 m



Figur 36 Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,0 (RH2000) för Södra Ljunghusen. Vid V och NV vindar syns det att 15 - 20 m/s ger som medelvärde en högre överspolning än 25 m/s.

Södra Ljunghusen +2.5 m

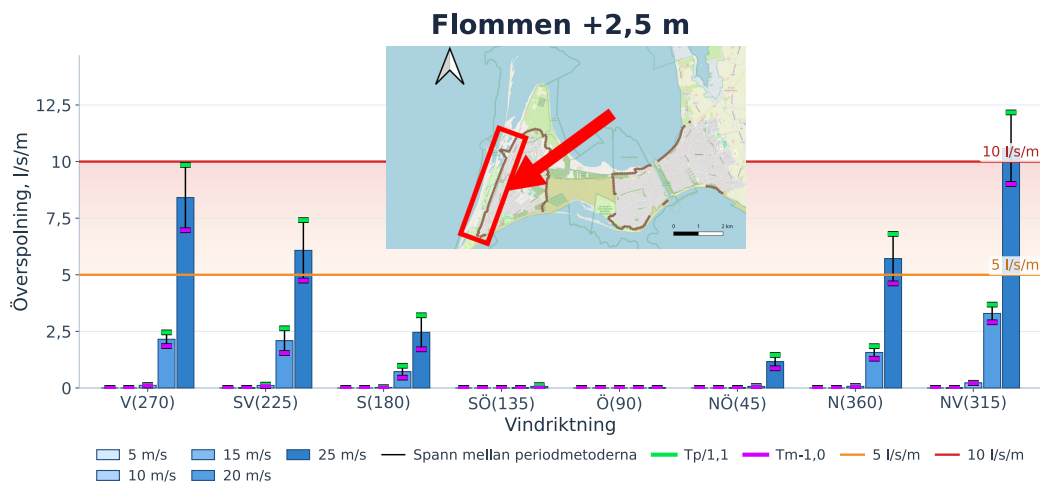


Figur 37. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,5 (RH2000) för Södra Ljunghusen. Vid NV-SV vindar syns det att 20 m/s ger som medelvärde en högre överspolning än 25 m/s.

Södra Ljunghusens utsatthet vid en stillvattenyta på 2,0 och +2,5 m (RH2000) är låg relativt Kämpinge, Norra Höllviken och Norra Ljunghusen. Detta beror på historiska data som visar att sannolikheten för höga vattennivåer i kombination med västliga till sydostliga vindar är mycket låg.

Vid en nivå av +2,5 m (RH000) genereras fortfarande överspolning vid de vindriktningar som ofta förknippas med högt vattenstånd, vilket främst är ostliga och nordostliga vindar. Flödet vid förhållanden likt Backafloden idag eller Nyårsstormen år 2065 hade genererat överspolning över 10 l/s/m.

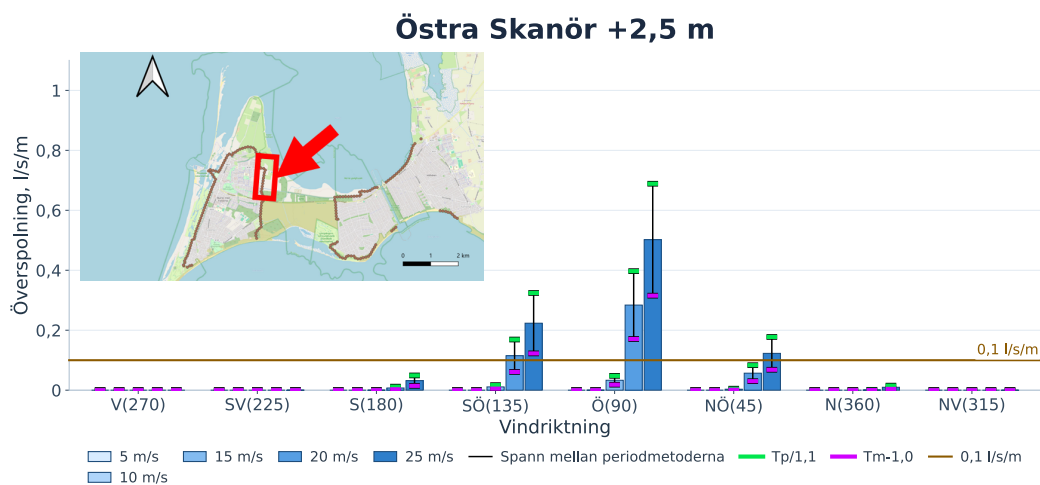
4.2.8 Flommen



Figur 38. Överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,5 (RH2000) för Flommen.

I Flommen uppstår enbart överspolning vid vattenståndet +2,5 m (RH2000). Med grund i tidigare kända scenarion som Backafloden och Nyårsstormen, där höga vattennivåer har genererats med ostliga till nordostliga vindar, vilka för Flommen ger ett lågt överspolningsflöde, är sannolikheten för överspolning vid vattenståndet +2,5 m (RH2000) lågt.

4.2.9 Östra Skanör



Figur 39. överspolning utifrån vindriktning, vindstyrka och vattenståndet +2,5 (RH2000) för Östra Skanör.

Överspolningsflöde vid östra Skanör uppstår inte vid en stillvattenyta av +1,5 eller +2,0 m (RH2000), och är lågt vid ett vattenstånd av +2,5 m (RH2000). Med grund i data från Backafloden och Nyårsstormen som genererades av nordostliga/ostliga vindar är det sannolikt att den högsta beräknade överspolningsmängden inträffar vid denna stillvattenyta.

4.2.10 Västra Ljunghusen



Figur 40. Området Västra Ljunghusens placering på Falsterbonäset

Ingen märkbar överspolning genereras i Västra Ljunghusen under de undersökta scenarierna.

4.2.11 Design or Assessment Approach

Resultaten från *Design or assessment approach* är genomgående högre än resultaten från *Mean value approach*. I Tabell 20 visas detta för en av de beräknade punkterna. Skillnaden mellan metoderna ökar i absoluta tal vid högre överspolningsflöden, men minskar procentuellt. Detta beror på att *Design or assessment approach* inkluderar en säkerhetsmarginal genom en justering motsvarande en standardavvikelse i förhållande till *Mean value approach*. Resterande resultat från *Design or assessment approach* redovisas i Appendix C.

Tabell 20. En jämförelse mellan *Mean value approach* och *Design or assessment approach* för punkt 181 i Kämpinge

Vattenstånd (RH2000) [m]	Vindriktning (25 m/s)	<i>Mean value approach</i> [l/s/m]	<i>Design or assessment approach</i> [l/s/m]	<i>Procentuell ökning från Mean till Design</i>
+1,5	SV	0,963	2,144	+123 %
+2,0	SV	44,83	65,05	45 %
+2,5	SV	224,5	256,9	23%

4.2.12 Mur

Överspolningsresultatet för murarna följer resultatet för närliggande vallar. Generellt är överspolningen något lägre vid murarna än vallarna där den högst beräknade överspolningen sker i Kämpinge vid sydliga vindar på 25 m/s och ett vattenstånd på +2,5 m (RH2000), vilket genererar 181 l/s/m i överspolning. Det här innebär att vid höga överspolningsflöden kommer stora volymer överspolat vatten ansamlas på landsidan av muren om inte dräneringen kan hantera dessa mängder.

Muren i Flommen är unik i att den har ett högre överspolningsflöde än gränsliggande vall. Överspolningsflödet här uppgår till 19,5 l/s/m vid sydvästlig vind på 25 m/s och ett vattenstånd av +2,5 m (RH2000), vallen har under dessa förhållanden en maximal överspolning runt 7,5 l/s/m.

Resterande resultat för muren presenteras i Appendix C.

4.3 Sammanfattning

För att ge en samlad överblick av studiens resultat följer en övergripande sammanställning av de viktigaste resultaten.

- Överspolningsexperimentet i denna studie visade att vallens erosionsbeständighet påverkas av material, lutning och lokala heterogeniteter i ytan.
- Växande erosion uppstod i sanden vid ett flöde på 0,33 l/s/m, för lermoränen krävdes en lutning av 1:3 och flöde av 1,67 l/s/m. För den gräsbeklädda vallen kunde ingen växande erosion påvisas.
- Sannolikheten för ett vattenstånd av +1,5 m (RH2000) under vallens livslängd är hög, lägre sannolikt är en stillvattenyta på +2,0 m (RH2000) vilket sker vid 100-årshögvatten år 2065 eller om Nyårsstormen 1904 skulle inträffa med dagens medelvattenyta. Lägst sannolikhet är vattenståndet + 2,5 m (RH2000) som inträffar vid extremväderförhållanden likt en Backaflod idag eller Nyårsstorm år 2050.
- Höga vattennivåer sammanfaller oftast med nordvästliga till ostliga vindar, vilket påverkar vilka delar av skyddet som är mest utsatta för överspolning.
- Risken för betydande överspolning är störst i Kämpinge, Norra Höllviken och Norra Ljunghusen, se Figur 41.
- Murens överspolning är liknande intilliggande valls överspolning.



Figur 41. Skyddsvallens sträckor med högst sannolikhet för betydande överspolning

5 Diskussion

5.1 Överspolningsrisker

Resultatet visar att flertalet scenarion genererar överspolningsflöden högre än EurOtop (2018):s rekommenderade gränsvärde på 5–10 l/s/m. Många scenarion ligger även nära eller under detta gränsvärde. Värde på 5–10 l/s/m är enligt EurOtop (2018) baserat på en vall med tätt grästäckte. I fältundersökningar visades att vallens ytskikt inte kan approximeras till ett tätt skikt med gräs för hela vallen. Exempelvis ger stigar över vallen helt kala ytor vid flera platser. Vid förhållanden där vegetationstäcket inte är heltäckande samt gropar och hål förekommer rekommenderar EurOtop (2018) en kritisk gräns på 0,1 l/s/m. Ett brett intervall ges därmed för vad som kan anses som ett kritiskt värde. Går gränsen vid 0,1 l/s/m finns det stor risk vid relativt vanligt förekommande förhållanden längs vallen medan ett kritiskt flöde på 5–10 l/s/m kräver mer extrema förhållanden för att generera brott.

5.1.1 Kritisk överspolning

För skyddsvallen på Falsterbonäset, konstruerad av lermorän med lutning 1:3 – 1:5 kan det med grund i fältexperimenten konstateras att EurOtop (2018):s rekommendation på 0,1 l/s/m inte är ett överspolningsflöde som kommer leda till brott även där vegetationstäckte saknas. Detta bygger på att vallen underhålls för att förebygga gropar och hål. Hade vallen varit utan lerkappa på baksidan med underliggande lager av sand hade detta flöde kunnat leda till stora konsekvenser då brottskapande erosion av sanden uppmättes vid ett flöde av 0,33 l/s/m. Mark- och miljödomstolen godkände en vall liknande detta, utan lerkappa och med möjlighet att använda sand som underliggande lager. Vegetation hade kunnat höja gränsen för det kritiska överspolningsflödet för sandvallen men den hade fortfarande varit betydligt mer sårbar än dagens skyddsvall av lermorän.

För att växande erosion på skyddsvallen skulle uppnås krävdes ett flöde på 1,67 l/s/m och lutning 1:3. Flödet var inte tillräckligt för att skapa ett erosionssteg och det kan därmed sägas att brott inte var nära med det antal släpp och flöde som

testades. Experimentet studerade en stormkulmn på två timmar och längre perioder av överspolning studerades inte. Eftersom erosionen var växande föreligger det en risk för skada eller brott om vallen utsätts för detta flöde under lång tid och erosionen fortsätter växa för att bilda en erosionsfront/erosionssteg. Samtidigt kan det konstateras att erosionen var som djupast 10 cm och ingen acceleration av erosionsgraden identifierades under testets gång. Därmed krävs troligen långa tidsperioder för att brott ska uppstå genom flödet 1,67 l/s/m.

Vidare var erosionen vid maxflödet 1,67 l/s/m koncentrerad till gropar från bortspolade stenar och andra heterogeniteter i vallens ytlager. Våldigt liten mängd erosion uppstod för ytan som helhet. Armeringsbeteendet från lermoränsens blandning av fraktioner kan vara en anledning till att erosionen koncentrerades till lokala punkter efter det finkorniga materialet i ytskiktet spolades bort. Ytlagret stod emot flödet på 1,67 l/s/m men vid de punkter där det hade blivit en grop i ytlagret genom stensläpp eller andra omständigheter skapade flödet en kanalisering vilket ledde till ytterligare erosion.

Att erosionen i experimenten var hög till en början och sedan avtog kan förklaras av att lermoränsen har en självvarmerande förmåga, att olika kornstorlekar ordnas och sköljs på plats av vattenflödet vilket låser dem mot varandra i en matris som är starkt erosionstålig. Det visuella samt den avtagande erosionsgraden vittnade om att detta kan vara fallet. Samtidigt uppstod fortfarande släpp av fraktioner vilket visar att erosion fortfarande var förekommande. Även fast lagret har armerande förmågor visar litteraturen att en tröskelgräns finns där matrisen kollapsar och erosionen blir hastig och kraftig. Nivån för detta har inte påvisats genom testet men genom att konstatera att högst flöde uppnåddes i erosionskanalerna kommer tröskeln uppnås där först.

Sammantaget går det inte att konstatera vid vilket flöde vallens kritiska gräns överskrids genom experimenten. Den växande erosion som ses vid 1,67 l/s/m är liknande den erosion som sågs i lervallsexperimentet av Akkerman et.al. (2007) vid 1 l/s/m. I studien av Akkerman et al. (2007) genererades ett tydligt

erosionssteg vid 5 l/s/m på exponerad lera och ett erosionssteg som rörde sig mot krönet observerades vid 10 l/s/m på samma vall. Detta resultat i kombination med studien av Wolter et.al. (2008) som visade att lera har en högre initial erosion och att lermoränen har högre erosionshastighet efter den initiala, kan det argumenteras för att skyddsvallen vid Falsterbonäset kommer få en erosionsbrant vid 5 l/s/m och en växande erosionsfront vid 10 l/s/m. Det som talar emot det här är blandningen av kornstorlekar vilket kan höja den kritiska gränsen genom armering men även sänka den om stor lokal erosion uppstår genom släpp av större stenar. Det mest sannolika efter experimenten och litteraturstudien är därmed att risk för att vallens kritiska gräns överskrids föreligger vid 5 l/s/m och att den kritiska gränsen troligen har passerats vid 10 l/s/m. Eftersom en större skillnad i erosion sågs mellan 1:3 och 1:5 kan det antas att gränsen för vallarna med 1:5 lutning är något högre än nämnda värden.

5.2 Riskområden

För att identifiera för vilka områden högst risk för överspolning över det kritiska överspolningsflödet föreligger, behöver först sannolikheten för olika scenarion tydliggöras för att sedan kunna utvärdera riskutsattheten och hur denna kan minimeras.

5.2.1 Förväntade kombinationer av vattenstånd, vind och överspolning

I de historiska stormarna som togs upp i inledningen har samtliga haft en initial sydvästlig till västlig vind som tryckt in vatten i Östersjön och därefter har vinden vridits till nordlig/ostlig vilket har gett en markant ökning av vattenståndet vid Falsterbonäset. Dessa scenarion översätts bra i Figur 25. Korrelationen mellan vindriktning, vattenstånd och vad som skedde under stormarna är tydligt. Då vinden blåser SV-V blir det ett lägre vattenstånd och då vinden blåser i riktning N-SÖ händer motsatsen. Vilket betyder att starka vindar från SV-V i kombination med högt vattenstånd har varit ovanliga historiskt sett. Detta beror på att Östersjön kan ses som en sluten bassäng och Falsterbo halvön ligger i sydvästra

delen. Vid en längre konstant vind från vindriktningarna N-SÖ kommer därför vattnet i Östersjön tryckas mot Falsterbonäset och vattenståndet ökar.

5.2.1.1 Extremväderhändelser

Överspolningsberäkningarna representerar väl den historiska data från 1992 till 2023 där såväl vattenstånd som vindhastigheter ligger inom ramarna för överspolningsberäkningarnas begränsningar. Stormscenarion likt Backafloden idag kan generera en vattennivå på +2,44 m (RH2000), vilket med SMHI:s projektion om stigande vattennivåer blir +2,85 m (RH2000) år 2050. Det här är ett scenario som inte har behandlats av vågmodellen. Eftersom krönnivån är +3,0 m (RH2000) behövs inte höga vindhastigheter för att överspolning ska genereras vid detta högre vattenstånd. Därmed föreligger hög risk för att den kritiska gränsen överskrids vid platser som är utsatta redan vid +2,5 m (RH2000). Områden som i resultatet ser ut att vara skonade från överspolning kan därmed utsättas för stora mängder överspolning på grund av den låga skillnaden mellan stillvattenyta och krönnivå. Vid scenarion av denna magnitud är det därmed viktigt att se över underhållet för hela vallsträckningen och förvänta överspolning även där modellen inte har påvisat det.

Den något mildare Nyårsstormen år 1904, hade år 2050 genererat en stillvattennivå på +2,48 m (RH2000) vilket representeras av modellens projektion av överspolning vid + 2,5 m (RH2000). Vindarna var dock högre än vad modellen hanterar.

Både Nyårsstormen och Backaflodens högsta vattenstånd sammanföll med nordostliga vindar av hastigheter upp till 33 m/s. Enligt vinddata från 1992 till idag kan det ses att nordostliga vindar har haft hastigheter upp till 13 m/s, vilket belyser rariteten av dessa scenarion. Vattenståndet + 2,5 m (RH2000) bör därmed ses som ett extremfall vilket har en låg sannolikhet att inträffa under vallens livslängd.

I analysen av resultatet har vindhastigheten 25 m/s använts för att skapa en uppfattning av de överspolningsflöden som kan förekomma vid vattenståndet +2,5 m. Eftersom de historiska vattenstånden på dessa nivåer har sammanfallit med vindhastigheter över 25 m/s kommer överspolningen med hög sannolikhet överskrida de presenterade nivåerna. Hur mycket högre överspolningen blir kommer variera mellan områdena eftersom det kan ses att skillnaden i överspolningsflödena mellan 20 och 25 m/s skiljer mellan olika områden. Exempelvis ses en relativt liten skillnad i Kämpinge medan en ökning runt 300 % ses vid Flommen. Vid Flommen där överspolningen vid 25 m/s och nordostliga vindar är runt 1,5 l/s/m kan den förväntade högre vindhastigheten leda till värden över vallens kritiska överspolningsflöde. Detta understryker vikten av underhåll för områden där modellen inte visar överspolningsvärden över det kritiska överspolningsflödet.

5.2.2 Högriskområden

Med hänsyn till historiska data är sannolikheten för överspolning över det kritiska överspolningsvärdet för exponerad lermorän hög i Norra Höllviken, och fortfarande hög men något lägre i Kämpinge. Den högre risken i Norra Höllviken beror på en högre sårbarhet mot vindriktningar som historiskt sett har varit förenliga med höga vindhastigheter och vattenstånd över +2,0 m (RH2000).

Redan vid den vanligt förekommande vattennivån, +1,5 m (RH2000) genereras flöden som kan vara kritiska om vallen har ett glest vegetationstäck med håll och gropar. Eftersom en underhållsplan finns kan det antas att dessa flöden inte kommer vara kritiska för vallens integritet. De låga men frekvent förekommande flödena kan dock vara problematiska då det i experimenten har påvisats att de eroderar exponerad lermorän och gör det därmed svårt för vegetationen att etableras. Det här kan utgöra ett problem vid stigar, håligheter skapade av djur och andra områden på vallen där vegetationstäck skadas.

Risken för ökad mängd exponerad lermorän genom flödena vid en nivå av +1,5 m (RH2000) ökar sårbarheten mot flöden genererade vid +2,0 m (RH2000)

eftersom dessa främst förväntas vara kritiska vid ett bristande vegetationsskikt. Preventiva åtgärder för att förebygga skador i toppskiktet som att minimera stigar upp för vallen och säkerställa att vegetationstäcket hålls i bra skikt är därmed kritiskt för dessa högriskområden.

Underhållet är något som spelar mindre roll vid extremvattennivåer över +2,5 m (RH2000), där de mest sannolika flödena över 160 l/s/m troligen även når det kritiska gränsvärdet för en vall med tät vegetation.

Sammantaget är det kritiskt med kontinuerlig översyn och underhåll i Norra Höllviken och Kämpinge för att förhindra att det kritiska överspolningsflödet överskrids vid vanligt förekommande förhållanden. Vid scenarion som genererar en nivå på +2,0 m (RH2000) bör en beredskap finnas eftersom stigar och andra ytor med exponerad lermorän kan nå sin kritiska överspolningsgräns. Slutligen behövs en plan för hur scenarion med vattennivåer runt +2,5 m (RH2000) ska hanteras.

5.2.3 Medelriskområden

Vid Norra och Södra Ljunghusen förekommer överspolning från en nivå av +2,0 m (RH2000). Norra Ljunghusen är vid denna nivå mest utsatt där flöden vid ogynnsamma vindförhållanden kan överskrida 5 l/s/m, vilket enligt tidigare diskussion kan vara kritiskt för en vall med exponerad lermorän. Risker är dock lägre än vid högriskområdena där överspolningsflödet vid liknande scenarion är betydligt högre. Området Södra Ljunghusen är mindre utsatt eftersom det är väldigt låg sannolikhet att den lägsta kritiska gränsen för skadad exponerad lermorän på 0,1 l/s/m överskrids vid en vattenyta på +2,0 m (RH2000).

Även vid ett vattenstånd på +2,5 m (RH2000) är Norra Ljunghusen mer utsatt där vindar förenliga med detta vattenstånd genererar överspolning långt över den kritiska överspolningsgränsen för exponerad lermorän. Det föreligger även risk för att vegetationsbeklädda delar av vallen når sitt kritiska överspolningsflöde då starka nordostliga vindar som historiskt har förekommit vid vattenståndet +2,5 m

(RH2000) kan generera flöden över 90 l/s/m. Samtidigt är Södra Ljunghusen också utsatt vid dessa extremförhållanden där det sannolika förhållandet av nordostliga och ostliga vindar genererar överspolning över den kritiska överspolningsgränsen för exponerad lermorän (10 l/s/m) och kan vid ostliga vindar uppgå till ca 40 l/s/m.

Sammantaget är Norra Ljunghusen mer utsatt än Södra Ljunghusen. Till skillnad från högriskområden genereras ingen överspolning vid ett vattenstånd av + 1,5 m (RH2000) och sannolikheten är lägre för kritisk överspolning vid + 2,0 m (RH2000). Även fast sannolikheten är lägre än för högriskområdena, är det fortfarande hög sannolikhet att en vattennivå på +2,0 m (RH2000) generar flöden som kan vara kritiska för Norra och Södra Ljunghusen om vegetationstäcket inte är intakt. Ett vattenstånd på +2,5 m (RH2000) kan vara kritiskt för båda områden, där underhållet är den avgörande faktorn i Södra Ljunghusen medan Norra Ljunghusen har en hög riskutsatthet oavsett vegetationstäcket. Eftersom underhåll kommer vara skillnaden mellan att det kritiska överspolningsflödet uppnås eller inte, är översyn och underhåll kritiskt för dessa områden. Det behövs även en beredskapsplan för att hantera de scenarion där den kritiska överspolningsgränsen med hög sannolikhet överskrids.

5.2.4 Lågriskområden

En låg sannolikhet för överspolning och låga överspolningsflöden gör Flommen, Norra Skanör, Östra Falsterbo och Östra Skanör till lågriskområden.

Av lågriskområdena föreligger risk för överspolning i Flommen, Norra Skanör och Östra Skanör. Vid områdena kan ett vattenstånd på +2,5 m (RH2000) generera flöden över 0,1 l/s/m vilket kan vara kritiskt om vegetationstäcket är skadat och har hål och gropar. Som tidigare nämndes kan extremväderförhållandens vindhastigheter som är utöver modellens ramar generera högre mängder överspolning. Detta medför att även fast sannolikheten är låg för kritiska överspolningsvärden är det viktigt med kontinuerligt underhåll

och översyn. Det är dock inte lika kritiskt som vid medel och högriskområden, varför underhåll vid områden med högre risk bör prioriteras.

5.2.5 Sammanställning riskområden



Figur 42. Sammanställning av riskutsatthet för de analyserade delsträckorna

5.3 Felkällor

5.3.1 SWAN

Energispektrumet för en punkt i Norra Skanör (avsnitt 3.1.3) visade att vid vindstyrkor på 15–25 m/s finns det två typer av vågor samtidigt. Lokalt genererade vågor med kort vågperiod och hög energi, samt långperiodiga havsvågor med lägre energi. Dessa två vågtyper ger upphov till två toppar i energispektrumet som visualiseras i Figur 13.

När SWAN beräknar vågperioden påverkas resultatet av båda topparna. Eftersom de lokalt genererade vågorna har högre energi dominerar de beräkningen, vilket ger en kortare vågperiod och därmed en lägre beräknad överspolning än vad havsvågorna ensamma skulle ge.

Beroende på hur energin fördelas mellan de två vågrupperna kan de två beräkningsmetoderna för vågperiod, T_p och $T_{m-1,0}$, ge olika resultat. I de flesta fall är $T_{m-1,0}$ kortare än T_p , men om havsvågornas energi är relativt hög men fortfarande lägre än de lokala kan förhållandet bli omvänt.

Eftersom det finns en osäkerhet i vilken vågperiod som bäst representerar verkligheten används båda metoderna och resultaten presenteras som ett intervall. Ett stort glapp mellan T_p och $T_{m-1,0}$ innebär en större osäkerhet. Det går därför inte att fastslå ett exakt överspolningsvärde, utan det verkliga värdet förväntas ligga inom intervallet av T_p och $T_{m-1,0}$. Även med denna osäkerhet är påverkan liten för vilka kombinationer av vindförhållanden och vattenstånd som är kritiska. Därmed har osäkerheten inte stor påverkan på resultat och diskussion kring kritiska förhållanden och sannolikheten för dessa utan ger främst en osäkerhet i vilket exakt överspolningsflöde som kommer genereras.

5.3.2 Överspolningsberäkningar

Samtliga beräkningar utgår från EurOtop (2018) vilket begränsar metodiken till just dessa beräkningar. Ytfriktionskoefficienten, γ_f , som används vid överspolningsberäkningar gäller för en tät heltäckande gräsyta. På den verkliga vallen kommer vegetationen att följa omliggande vegetation. Olika vegetationer ger olika ytfriktionskoefficienter vilket gör att ytfriktionskoefficienten kommer att skilja sig utmed sträckan. På de platser där vegetationen är begränsad kommer ytfriktionskoefficienten bli mindre vilket gör att överspolningen, enligt EurOtop (2018), blir högre.

I beräkningarna för överspolningen är punkterna placerade med 100-meters intervall vilket gör att resultatet från beräkningarna begränsas till dessa punkter och är ej helt representativt för sträckan mellan punkterna. En interpolation för intervallet mellan punkterna hade kunnat göras men intervallet bedömdes vara tillräckligt för att identifiera överspolningsriskerna.

8 olika vindriktningar med intervall 45° användes vid beräkningarna. Detta ger en approximation på vilken vindriktning som leder till högst överspolning. Den korrekta vindriktningen kan ligga mellan de vindriktningar som har högst överspolning vilket innebär att maximala överspolningen underskattas. Vid scenarion som inte överstiger ett satt gränsvärde utifrån dessa beräkningar hade det kunnat göras det, därför att data för alla vindriktningar inte finns eller är beräknade.

5.3.3 Test av vallens erosionsbeständighet

5.3.3.1 Metod

Varje scenario testades under 20 släpp vilket representerar kulmen av en storm. Denna tidsperiod kan anses vara för kort, kulmen av stormar brukar ligga på några timmar upp till en dag, men med en begränsad tid för utförandet har en avgränsning gjorts. Längre scenarion hade givit mer rättvisande resultat. Innan varje nytt test återställs vallen till sitt ursprungliga skick i största möjliga utsträckning.

5.3.3.2 Utförande

Överspolningssimulatoren hade läckage vid lucköppningen. Detta gjorde att under tiden volymen fylldes upp sipprade vatten utmed vallen. Mängden läckage var begränsad men inte försumbart och ökade med den hållna vattenvolymen i simulatoren. Felkällan med detta är att vallen blev konstant utsatt för vatten under uppfyllnadstiden. Den största delen av läckaget omdirigerades men en liten mängd vatten sipprade ner för vallen. Beroende på vilken typvall som testades ledde läckaget till erosion i olika grader. För typvallarna 1, 2 och 4 hade läckaget ingen erosion. För Typvall 3, med sand som toppskikt avleddes läckaget och ingen betydande erosion uppstod.

Under släppen åkte vatten ut under plankorna på sidorna av typvallen. Detta ledde till att vallen blev utsatt för en mindre volym, även denna mängd var inte hög men den fanns. Glappet mellan plankorna och vallen minimerades så gott som det gick men för vissa tester var det större och för andra mindre.

Typvallarna var från start konstruerade med hjälp av en hjullastare samt en grävmaskin. Typvall 3 eroderade mycket vid första testet och återställdes med spade inför det andra testet. Detta gjorde att packningsgraden för första och andra testet skiljde sig vilket kan ha påverkat resultatet i jämförelse med varandra. Packningsgraden för alla testade typvallar var inte heller identisk med den riktiga vallen, typvallarna konstruerades ungefär en vecka innan testerna genomfördes och packades inte med padda utan bara nertryckt med skopa från hjulgrävare. De utsatta släntlutningarna följdes inte heller exakt utan skiljde sig utmed slänten. Genom enkla mätningar visade mätningar att lutningen var relativt nära den önskade, vilket speglades i resultatet där en tydlig skillnad sågs i eroderad mängd material mellan 1:3 och 1:5-lutningarna.

Inmätningen för erosionen gjordes genom fotogrammetri. Höjdmodellen som skapades var beroende av lokala koordinater på vallen. Placeringen av dessa koordinater gjordes med hjälp av sprejfärg. När vallen var blöt efter testerna hade sprejfärgen svårt att fästa och rann ut, detta gjorde det svårare att sätta ut exakta punkter i programmet Metashape som kan ha lett till ett mindre felresultat i höjdmodellerna. Detta problem reducerades genom att sätta in en noggrannhetsparameter som programmet räknade med. Dock kan detta ge ett missvisande resultat där den framräknade erosionen av mätningarna inte är exakta. De lokala koordinaterna som matades in i fotogrammetriprogrammet baserades på att typvallarna var utformade med en topphöjd på 1 meter och jämn lutning enligt tvärsektionerna.

5.3.3.3 Sammanfattning

Trots de identifierade osäkerheterna bedöms resultaten vara tillräckligt robusta för att identifiera områdenas utsatthet för överspolning samt överspolningens erosionspåverkan. De största osäkerheterna är kopplade till SWAN där vågperioderna inte är helt pålitliga. Även packningsgraden för typvallarna är en felkälla som troligtvis har haft en större påverkan på resultatet. Resultaten bör därför främst betraktas som en bedömning av vilka områden som är mest utsatta

för överspolning samt av valluppbyggnadens erosionsbeständighet, snarare än som exakta beräkningar av absoluta överspolningsflöden.

6 Slutsats

Syftet med föreliggande studie var att undersöka Falsterbonäsets skyddsvalls sårbarhet längs dess sträckning vid olika kombinationer av vattenstånd, vindriktningar och vindstyrkor, där det varit centralt att uppskatta vilket överspolningsflöde som kan betraktas som kritiskt för vallens integritet.

Resultaten visar att vallens sårbarhet i hög grad är beroende av ytskiktets skick. Där vegetationstäcket är intakt uppvisar vallen en hög motståndskraft mot överspolning, medan skador i topplagret, såsom kala ytor, gropar och stigar, ökar risken för erosion och därmed vallens sårbarhet. Även om något exakt kritiskt överspolningsflöde inte kunnat fastställas indikerar resultaten att flöden omkring 5 l/s/m kan vara kritiska för skadade ytor och att erosionsrisken blir tydlig vid högre flöden. Hade dock vallen varit uppbyggd enligt mark-och miljödomstolens lägre krav på fyllningsmaterial hade risken för kritisk överspolning varit hög. I de godkända handlingarna saknas lerkappa på landsidan av vallen samtidigt som sand tillåts som fyllnadsmaterial. En sådan utformning skulle markant öka sårbarheten för samtliga delsträckor och innebära att mer vanligt förekommande förhållanden hade varit kritiska. Exempelvis hade det frekvent förekommande förhållandet på +1,5 m (RH2000) sannolikt genererat kritisk överspolning för Kämpinge och Norra Höllviken.

Vidare visar studien att Kämpinge och Norra Höllviken utgör de mest utsatta delsträckorna, där kritiska överspolningsflöden kan uppstå redan vid vattenståndet +1,5 m (RH2000) om vallen är skadad. Övriga delsträckor uppvisar generellt ett lägre överspolningsflöde för de analyserade scenarierna. Samtidigt visar studien att vattenståndet +2,0 m (RH2000) kan inträffa under vallens livslängd och generera överspolning som överskrider vallens dimensionerande förutsättningar på flera delsträckor.

Studiens huvudslutsats är att skyddsvallen idag är sårbar mot stormar som kan förekomma under dess livslängd. För att minska sårbarheten måste underhållet

av vallen skötas väl, där stigar och andra skador i ytskiktet hanteras. Vidare finns historiska stormscenarion som dagens skyddsvall inte kommer kunna hantera, oavsett underhåll, vilket medför att en beredskapsplan behöver tas fram för att förebygga eller minimera konsekvenserna av vallbrott vid dessa scenarion.

Rekommendationer för vidareutveckling av studien,

- Överspolningstester med en fullskalig överspolningssimulator på flera sektioner av den verkliga vallen för att utvärdera vallens verkliga kritiska överspolningsflöde.
- Ytfriktionskoefficientn bör bestämmas platsspecifikt för vallens olika vegetationstyper och täckningsgrad för att ge mer verklighetstroga överspolningsberäkningar.
- Analysera högre vindhastigheter som är representativa för Backafloden och Nyårsstormen.
- Studera hur vallen kan skyddas för att förhindra vallbrott vid extremväderförhållanden.
- Framtagning av en områdesspecifik beredskapsplan baserad på överspolningsresultatet.

7 Litteraturförteckning

Advokatfirman Lindahl KB, 2018. 51. [Online]

Tillgänglig via: <https://vellinge.se/siteassets/planer-och-projekt-i-vellinge-kommun/dokument/skydd-mot-hoga-havsnivaer/ansokan-om-oversvamningsskydd-mmd.pdf>

[Använd 24 Mars 2026].

Akkerman, G., van Gerven, K., Schaap, H. & van der Meer, J., 2007.

Workpackage 3: Development of Alternative Overtopping-Resistant Sea Defences, Phase 3: Wave Overtopping Erosion Tests at Groningen Sea Dyke, u.o.: ComCoast.

Bas Hofland, X. C. C. A. P. O., 2017. Prediction formula for the spectral wave period $T_{m-1,0}$ on mildly sloping.

Bokhari Irminger, S. o.a., 2024. Impact and response of storm Babet from a Swedish perspective. *Die Küste*, Volym 94.

Booij, N., Holthuijsen, L. H. & Ris, R. C., 1999. A third-generation wave model for coastal regions. *Journal of geophysical research*, pp. 7649-7666.

Chow, T. L. & Rees, H. W., 1994. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall. *Canadian Journal of soil science*, pp. 227-232.

EU, 2007. *Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks*. [Online]

Tillgänglig via: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32007L0060>

EurOtop, 2007. *EurOtop, Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*, u.o.: u.n.

EurOtop, 2018. *EurOtop*. [Online]

Tillgänglig via: <https://www.overtopping-manual.com>

Fredriksson, C., Feldmann Eellend, B., Larson, M. & Martinez, G., 2017. Historiska stormhändelser som underlag vid riskanalys, Studie av översvämningarna 1872 och 1904 längs Skånes syd- och ostkust. *VATTEN - Journal of Water Management and Research*, Volym 73, pp. 93-108.

Hallin, C. o.a., 2021. A Comparative Study of the Effects of the 1872 Storm and Coastal Flood Risk Management in Denmark, Germany, and Sweden. *Water*, 13(1697).

Koelewijn, A., 2023. *Dike erosion landside slope*, u.o.: Deltares.

Koelewijn, A. R. o.a., 2022. Overflow Test on Grass-Covered Embankments at the Living Lab Hedwige-Prosperpolder: An Overview. *Water*, 14(18).

Lantmäteriet , 2025a. *Markhöjdmodell för området 61_3, som höjdgrid med 1 meters upplösning i formatet GeoTIFF/COG*. [Online]

Tillgänglig via: https://radianteearth.github.io/stac-browser/#/external/api.lantmateriet.se/stac-hojd/v1/collections/mhm-61_3
[Använd 20 Februari 2026].

Lantmäteriet, 2025. *Min karta*. [Online]

Tillgänglig via: <https://minkarta.lantmateriet.se>
[Använd 20 Januari 2025].

Lima-de-Faría, A., 2010. Seashore archeology Reveals a prehistoric site in Falsterbo and elucidates the middle age occupation of Skanör. i: *Vetenskssocieteten i Lund. Årsbok 2010*. Lund: Vetenskapsocieteten i Lund, pp. 73-118.

Länsstyrelsen Skåne, 2021 a. *MILJÖKONSEKVENSBESKRIVNING av riskhanteringsplan för Falsterboområdet*. [Online]

Tillgänglig via:

<https://www.lansstyrelsen.se/download/18.792af7217dc2822143b899/1640084579905/Falsterboområdet%20Miljökonsekvensbeskrivning.pdf>

Länsstyrelsen Skåne, 2021. *Kostnadsanalys av översvämningsskydd 7 områden längs skånes kust*. [Online]

Tillgänglig via:

<https://www.lansstyrelsen.se/download/18.635ba3017c11a69d57788b/1633086420651/Kostnadsanalys%20av%20översvämningsskydd%20-%207%20områden%20längs%20Skånes%20kust.pdf>

[Använd 30 Januari 2025].

Länsstyrelsen Skåne, 2021. *RISKHANTERINGSPLAN FÖR FALSTERBOOMRÅDET*. [Online]

Tillgänglig via: <https://www.mcf.se/siteassets/dokument/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/naturolyckor-och-klimat/oversvamnning/riskhanteringsplaner-2022-2027/riskhanteringsplan-falsterbo-inkl-bilagor.pdf>

[Använd 1 Februari 2025].

Mark- och miljööverdomstolen, 2022. *DOM Mål nr M 6552-20*. [Online]

Tillgänglig via:

<https://www.domstol.se/globalassets/filer/domstol/markochmiljooverdomstolen/avgoranden/2022/m-6552-20-dom-2022-06-17.pdf>

[Använd 13 Maj 2026].

Meyer, E. M., Gaslikova, L., Groll, N. & Weisse, R., 2024. The Baltic storm surge of 1872 and 2023 - what do they have in common. *Die Küste*, Volym 94, pp. 121-131.

Mozer, A., Alström, B., Olsson, P. A. & Schüttrumpf, H., 2025. Estimating erosion resistance of vegetated sea dike embankments through in situ experiments. *Frontiers in Built Environment*, 27 Februari.

MSB, 2025. *Översyn av områden med betydande översvämningsrisk, cykel 3*, u.o.: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).

MSB, u.d. *Översvämningsportalen*. [Online]

Tillgänglig via: <https://gisapp.msb.se/apps/oversvamningsportal/avancerade-kartor/hot-och-riskkartor/falsterbo/hotkartor.html>

Pullen, T. o.a., 2007. *EurOtop Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*, u.o.: EA, ENW, KFKI.

Schüttrumpf, H., 2008. Sea Dikes in Germany. i: *Die Küste*. u.o.:u.n., pp. 189-199.

SJÖFARTSVERKET, 2025. *Framtida havsnivåer i Sverige*. [Online]

Tillgänglig via: https://www.bshc.pro/wp-content/uploads/Future_sea_levels.pdf

[Använd 13 Maj 2026].

SMHI, 2017 a. Framtida havsnivåer i Sverige. *KLIMATOLOGI*, Volym 48.

SMHI, 2017. Beräkning av högsta vattenstånd längs Sveriges kust. *Klimatologi*, Issue 45.

SMHI, 2018. *EXTREMVATTENSTÅND I FALSTERBO*. [Online]

Tillgänglig via: <https://lastkaj.msb.se/Karteringar/oversvamning-kust/skanor-falsterbo.pdf>

[Använd 1 Februari 2026].

SMHI, 2024. *Oktober 2023 - Stormen Babet gav höga vågor och vattenstånd*. [Online]

Tillgänglig via: <https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/manadens-vader-och-vatten-i-sverige/manadens-vader-och-vatten-i-sverige/2023-11-10-oktober-2023---stormen-babet-gav-hoga-vagor-och-vattenstand>
[Använd 23 Januari 2026].

SMHI, 2025. *Data*. [Online]
Tillgänglig via: <https://www.smhi.se/data>
[Använd 27 April 2026].

Sveriges Domstolar, 2020. *Mark- och miljödomstolen ger tillstånd till översvämningsskydd mot havet på Falsterbohalvön*. [Online]
Tillgänglig via: <https://www.domstol.se/nyheter/2020/04/mark--och-miljodostolen-ger-tillstand-till-oversvamningsskydd-mot-havet-pa-falsterbohalvon/>
[Använd 13 Maj 2026].

Sveriges Riksdag, 2018. *Förordning (2018:1428) om myndigheters klimatanpassningsarbete*. [Online]
Tillgänglig via: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-20181428-om-myndigheters_sfs-2018-1428/
[Använd 1 Februari 2026].

SWECO, 2011. *Höga havsnivåer. Falsterbonäset samt områdena vid Höllviken/Kämpinge, u.o.: Vellinge Kommun*.

SWECO, 2016. *ÖVERSVÄMNINGSRISKER KRÖNNIVÅ +3,0 METER (RH2000)*, Malmö: SWECO.

SWECO, 2023 a. *Normalsektioner översvämningssvall, Förfrågningsunderlag*. [Online]
[Använd 24 Mars 2026].

SWECO, 2023. *K-01-0-09*. Vellinge Kommun: u.n.

The SWAN team, 2026-03-13. *Swanmodel.sourceforge*. [Online]

Tillgänglig via:

https://swanmodel.sourceforge.io/online_doc/swanuse/node4.html

[Använd 7 Maj 2026].

The SWAN Team, 2026. *SWAN USER MANUAL*, Delft: Delft University of Technology.

Van der Meer Consulting, 2008. *Erosion strength of inner slopes of dikes against wave overtopping*, u.o.: Van der Meer Consulting.

Vellinge Kommun, 2013. *Vellinge kommuns handlingsplan för höga havsnivåer*, u.o.: Vellinge Kommun.

Vellinge Kommun, 2024 a. *Här ska vallen byggas*. [Online]

Tillgänglig via: <https://vellinge.se/planer-och-projekt-i-Vellinge-kommun/aktuella-byggprojekt/trafik-och-infrastruktur/skyddsvallen/karta/>

[Använd 22 Januari 2026].

Vellinge Kommun, 2024. *Så här ska skyddsvallen se ut*. [Online]

Tillgänglig via: <https://vellinge.se/planer-och-projekt-i-Vellinge-kommun/aktuella-byggprojekt/trafik-och-infrastruktur/skyddsvallen/sa-har-ska-skyddsvallarna-se-ut/>

[Använd 22 Januari 2026].

Vellinge Kommun, 2025. *SKYDDSVALLNING*. [Online]

Tillgänglig via: <https://vellinge.se/siteassets/planer-och-projekt-i-vellinge-kommun/bilder/skydd-mot-hoga-havsnivaer/pdf/presentationmaterial-skanor.pdf>

[Använd 22 Januari 2026].

Vellinge Kommun, u.d. *Skyddsvallen*. [Online]

Tillgänglig via: <https://vellinge.se/planer-och-projekt-i-Vellinge-kommun/aktuella-byggprojekt/trafik-och-infrastruktur/skyddsvallen/>
[Använd 27 Januari 2026].

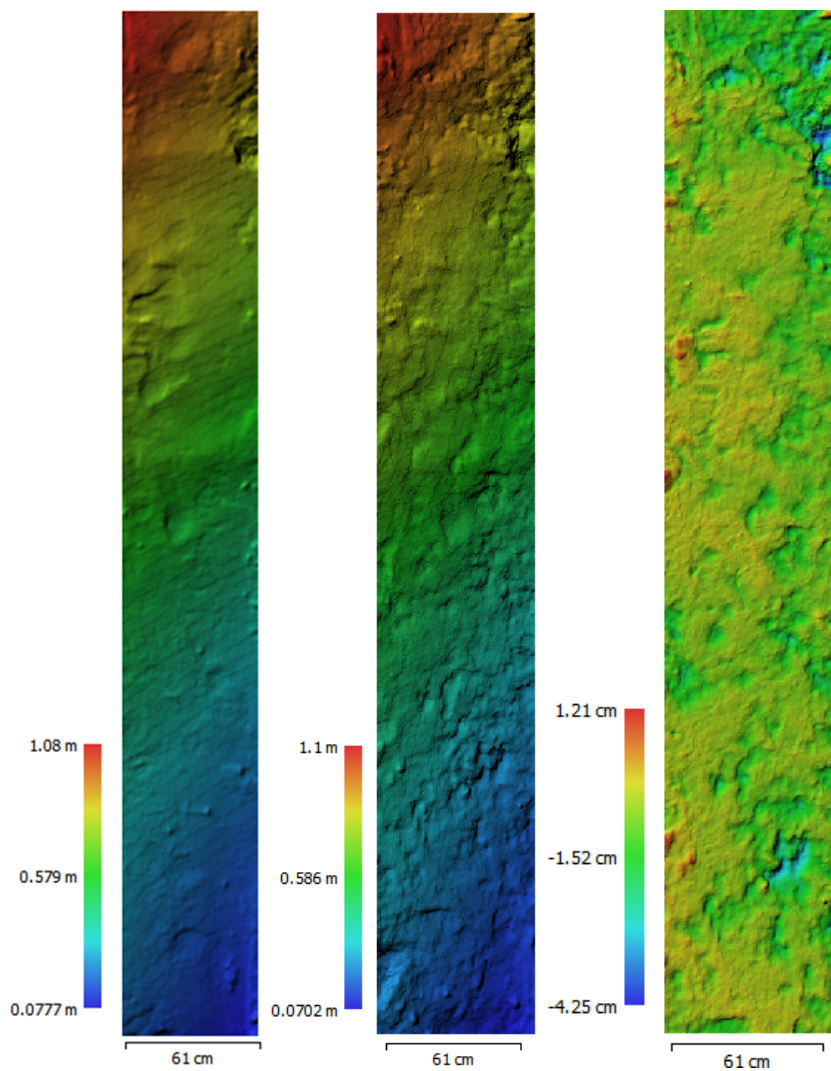
Wolters, G., Nieuwenhuis, J.-W., van der Meer, J. & Klein Breteler, M., 2008. *LARGE SCALE TESTS OF BOULDER CLAY EROSION AT THE*, u.o.: van der Meer consulting.

Yang, G.-L., Liu, Z.-Z., Xu, G.-L. & Huang, X.-J., 2009. Protection Technology and Applications of Gabion. i: Y. Chen, L. Zhan & X. Tang, red. *Advances in Environmental Geotechnics*. Hangzhou, China: Zhejiang University Press, pp. 915-919.

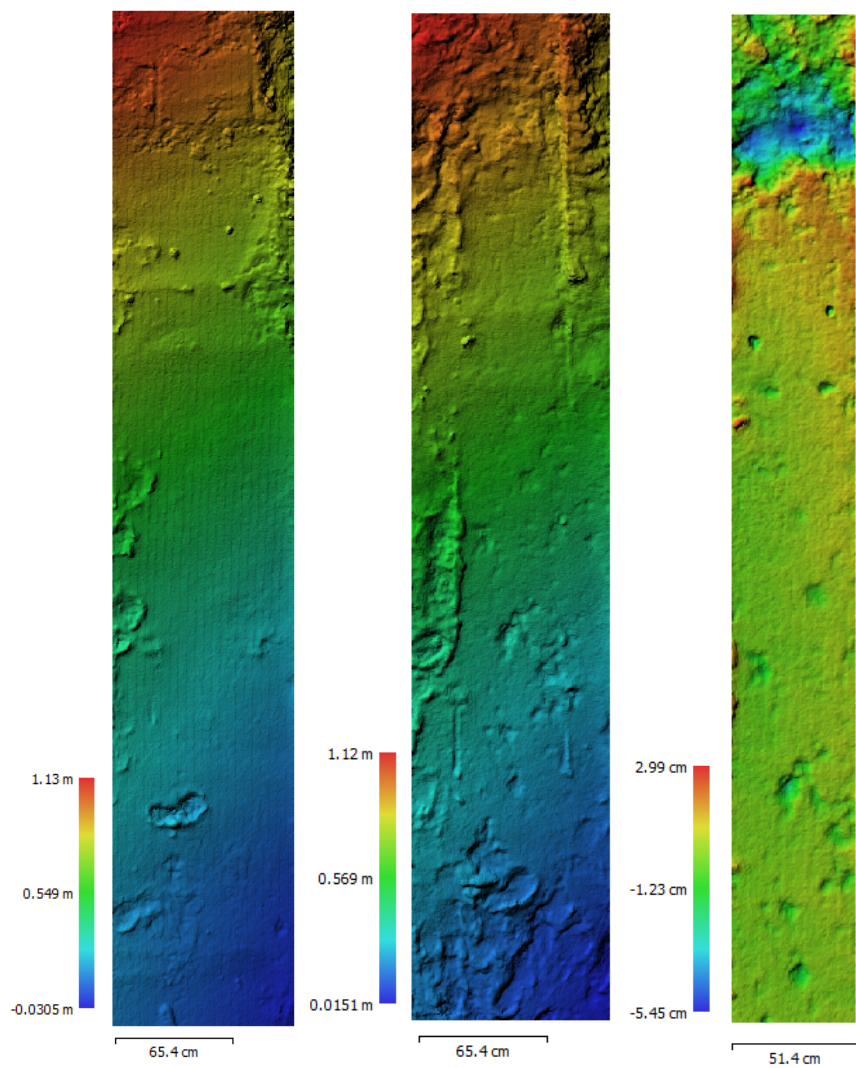
Yunmin, C., Xiaowu, T. & Liangtong, Z., 2009. *Advances in Environmental Geotechnics*. Hanzhou, China: International Symposium on Geoenvironmental Engineering.

Appendix

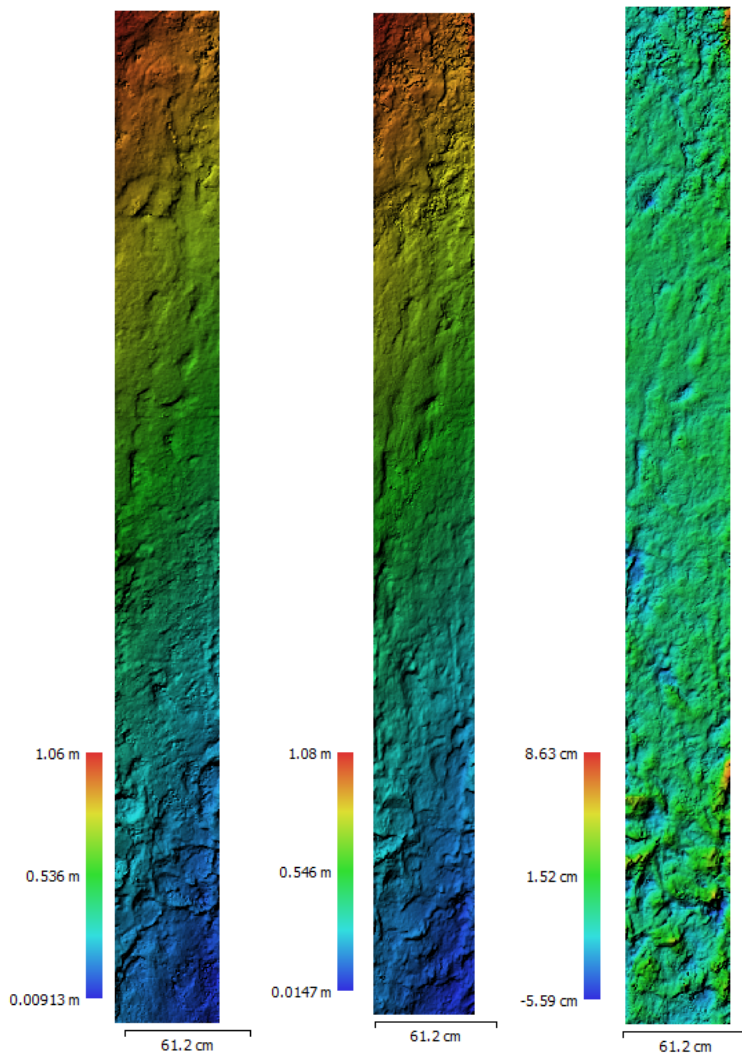
Appendix A – Fotogrammetriresultat av vallarnas erosionstest



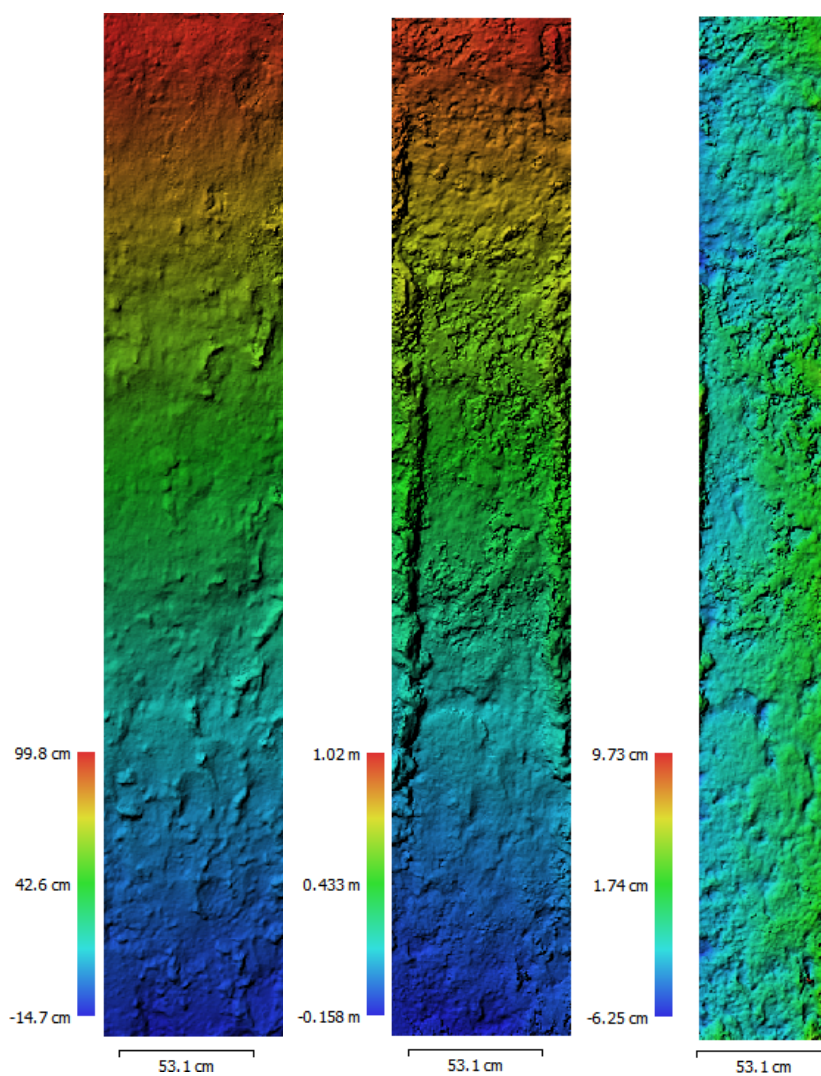
Figur A.1. Erosionsutveckling från före test (vänster) till efter (mitten) och dess skillnad (högre) för Typvall 1 med 50 liter per släpp.



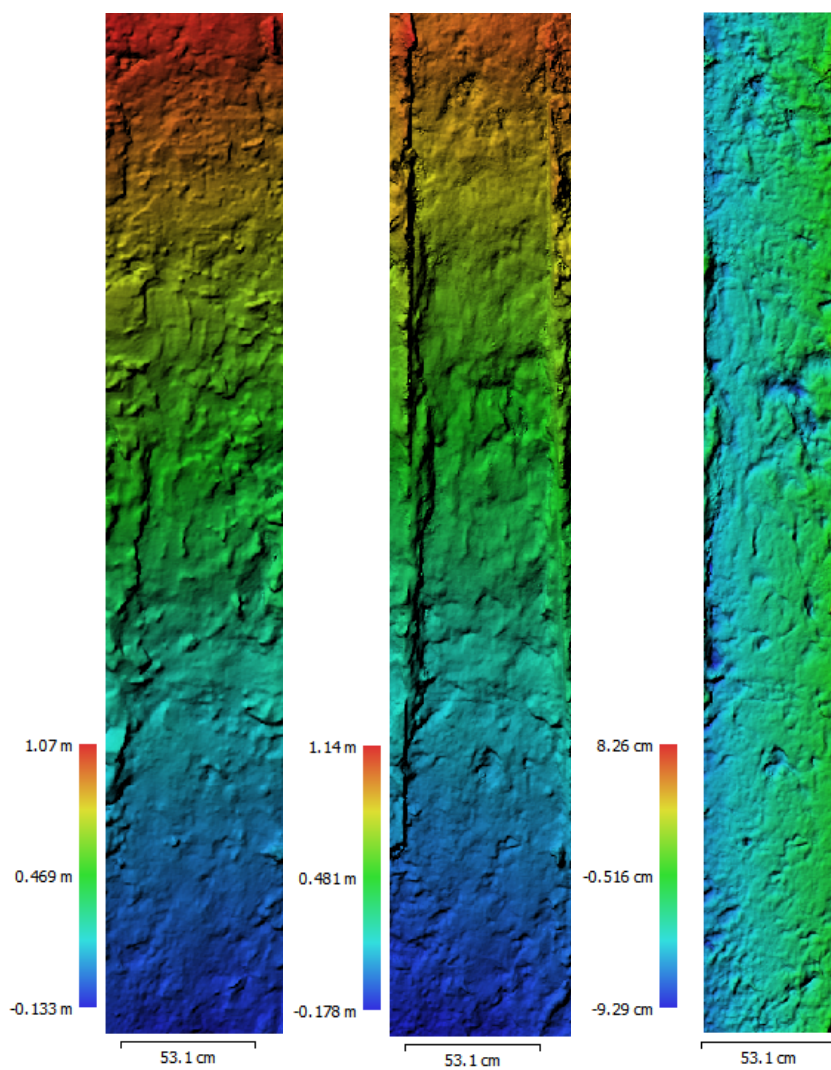
Figur A.2. Erosionsutveckling från före test (vänster) till efter (mitten) och dess skillnad (högre) för Typvall 1 med 75 liter per släpp.



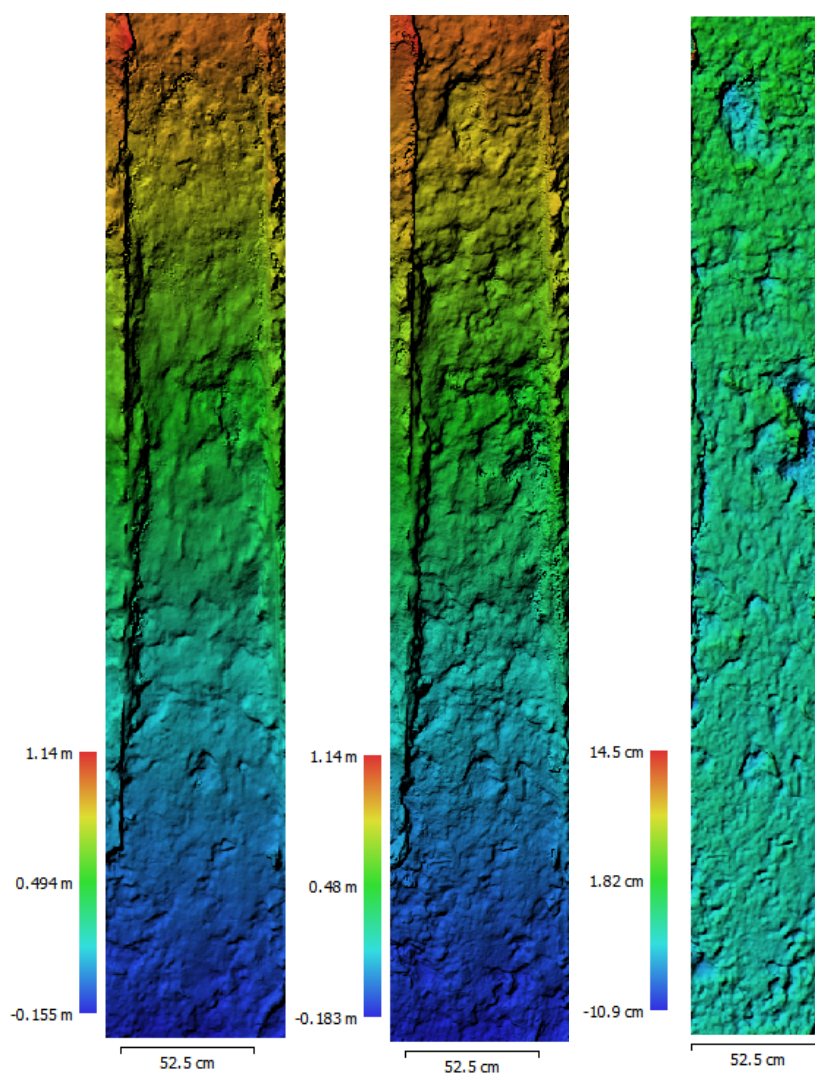
Figur A.3. Erosionsutveckling från före test (vänster) till efter (mitten) och dess skillnad (högre) för Typvall 1 med 100 liter per släpp.



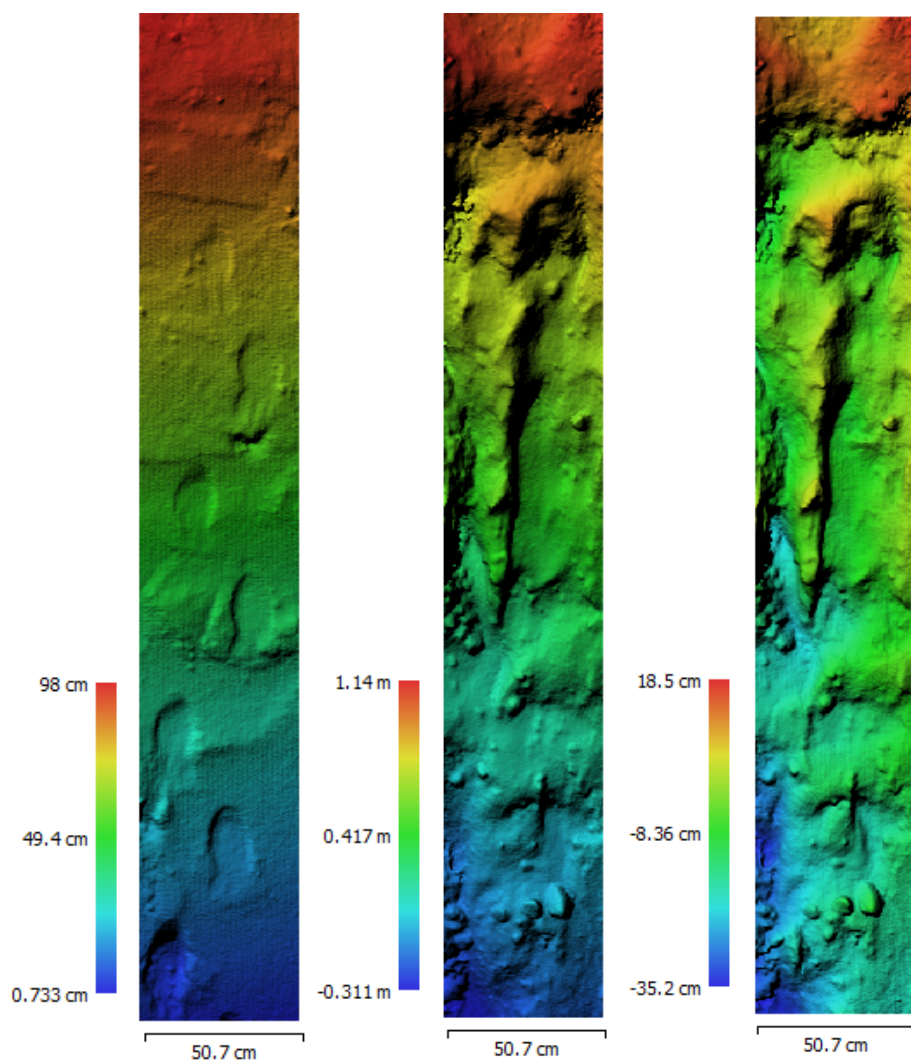
Figur A.4. Erosionsutveckling från före test (vänster) till efter (mitten) och dess skillnad (högre) för Typvall 2 med 50 liter per släpp.



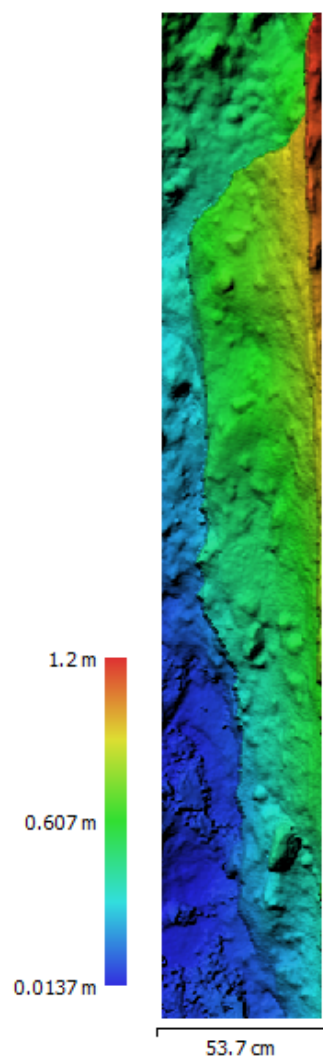
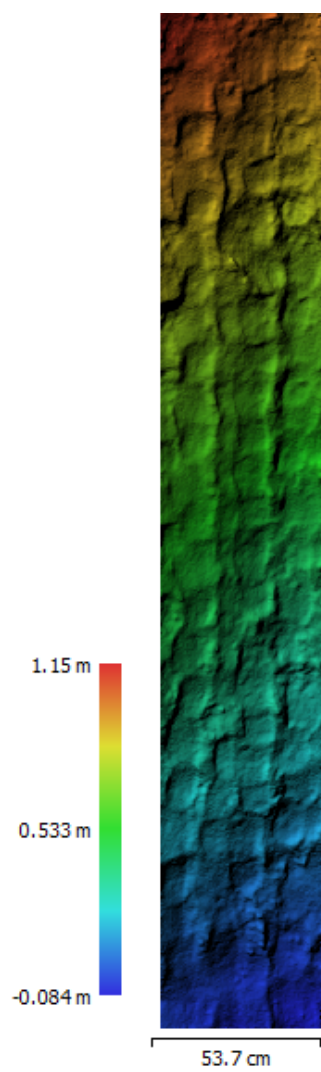
Figur A.5. Erosionsutveckling från före test (vänster) till efter (mitten) och dess skillnad (högre) för Typvall 2 med 75 liter per släpp.

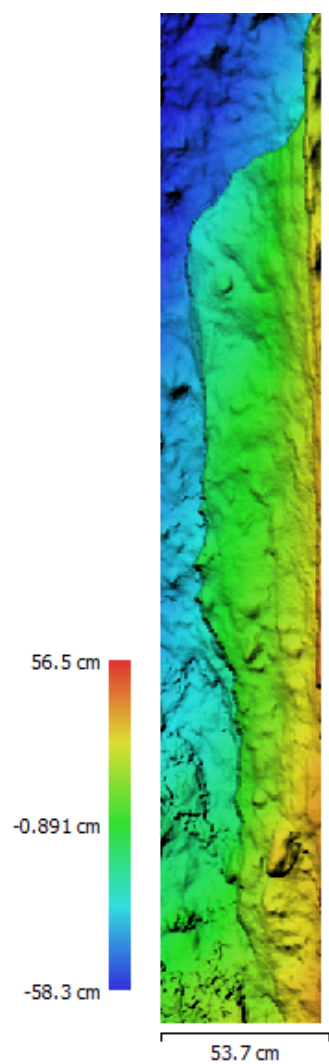


Figur A.6. Erosionsutveckling från före test (vänster) till efter (mitten) och dess skillnad (högre) för Typvall 2 med 125 liter per släpp.

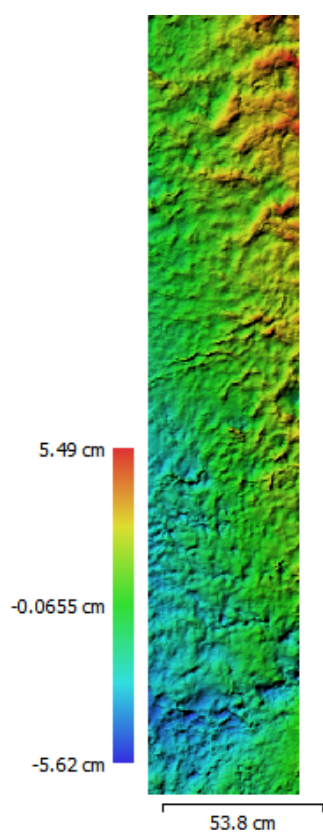
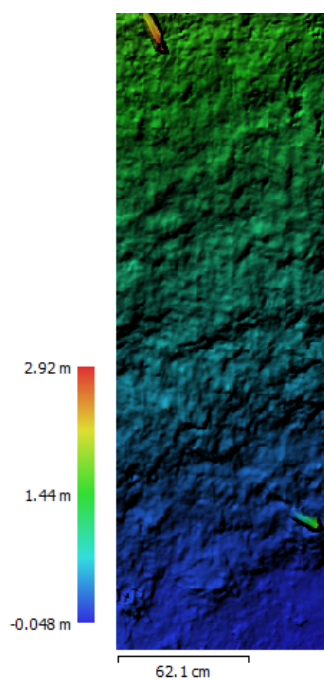
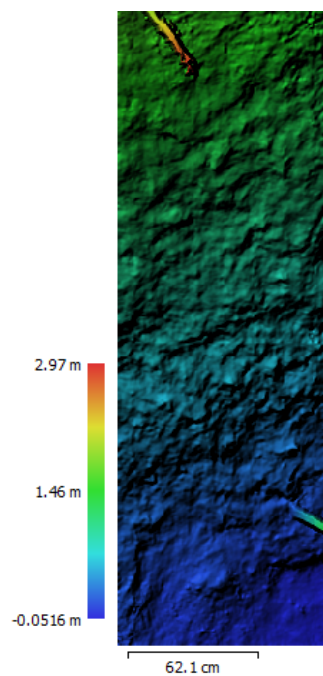


Figur A.7. Erosionsutveckling från före test (vänster) till efter (mitten) och dess skillnad (högre) för Typvall 3 med 25 liter per släpp.





Figur A.8. Erosionsutveckling från före test (vänster) till efter (mitten) och dess skillnad (högre) för Typvall 3 med 50 liter per släpp.



Figur A.9. Erosionsutveckling från före test (vänster) till efter (mitten) och dess skillnad (högre) för Typvall 4 med 100 liter per släpp.

Appendix B – Pythonkod för överspolningsberäkningarna och geopak

Vid brukande av koden ska instruktioner i README följas för att garantera att koden genererar önskat resultat.

https://drive.google.com/drive/folders/1ocBr79olHTeYZpdMvP_jSBSj4GN2Sz2j?usp=drive_link

Appendix C – Resultatet för överspolningsberäkningarna

Resultat för samtliga punkter presenterade med Mean value approach och Design or assessment approach för mur och vall. Punkternas geografiska representation ses i geopaketet i Appendix B.

https://drive.google.com/drive/folders/1vaUo2pJTH0_KVzFaa51gfn6Ja40vn_4w?usp=drive_link