

PM

**KAPPELSHAMN – LAKNING FRÅN
UTFYLLNAD MED MUDDERMASSOR**

Slutrapport

2025-12-09

Christian Maurice

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

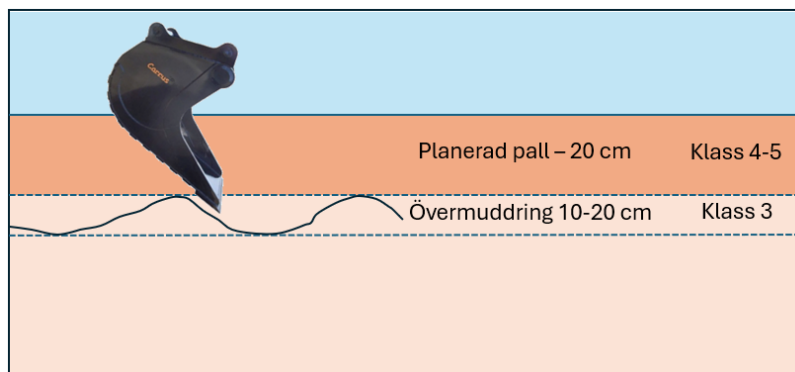
Sedimentundersökningar har utförts i syfte att kartlägga förekomsten av föroreningar i bottensedimenten samt på vilket djup dessa föroreningar förekommer. En sammanställning av resultaten och vilken typ av muddermassor som kommer att uppstå redovisas i AFRY (2025a).

I projektet får muddermassor i klass 1–3 dumpas i ett djuphål, medan massor som uppvisar halter över klass 3 behöver omhändertas i en utfyllnad som utgör en del av hamnkonstruktionen. Klassindelning för organiska föroreningar såsom PAH, PCB och TBT följer SGU (2017), medan bedömning av tungmetaller baseras på Naturvårdsverkets Bedömningsgrunder för miljö kvalitet – kust och hav, Rapport 4914 (Naturvårdsverket, 1999).

Muddring kan inte utföras med samma precision som sedimentprovtagning. En *muddringspall* definieras i föreliggande PM som den sedimentmaktighet som tekniskt kan muddras i ett skoptag. Pallens maktighet avgör vilka sedimentlager som bildar de muddermassor som behöver bedömas och klassificeras. Mudderverkets skopa – dess storlek och typ – bestämmer den minsta möjliga pallmaktighet som tekniskt kan uppnås samt den övermuddring som krävs för att säkerställa önskad pallmaktighet. Den minsta möjliga pallmaktigheten har, i det aktuella projektet, satts till 20 cm (AFRY 2025b).

Övermuddring innebär att man muddrar något djupare än det planerade djupet för att säkerställa att hela ytan muddras till minst det önskade djupet. Användning av skopa medför att botten får en konkav form, vilket innebär att material från djupare lager än nödvändigt tas upp och bildar muddermassor. Eftersom halterna i sediment normalt avtar med djupet sker övermuddring ofta vid gränsen mellan klass 4–5 och klass 3. För att säkerställa att den översta nivån (klass 4–5) tas upp över hela ytan kommer även massor från underliggande nivå (klass 1–3) att tas upp, vilket leder till en blandning och därmed en sänkning av halterna i muddermassorna från den övre nivån.

Begreppet *övermuddring* används även för att beskriva den muddring som sker under det planerade muddringsdjupet för att säkerställa önskat ramfritt djup. Den typen av övermuddring är dock inte relevant för diskussionen i föreliggande PM.



Figur 1 Principskiss över pallindelning och övermuddring

1.2 Föroreningar

De muddermassor som inte får dumpas planeras att omhändertas inom en utfyllnad. Det finns därför behov av att bedöma hur utfyllnaden kan påverka recipienten. En övergripande beskrivning av föroreningssituationen i sedimenten är följande:

- Sedimentprovtagningen har visat förekomst av föroreningshalter motsvarande klass 4 och 5 enligt valda bedömningsgrunder, främst i de översta sedimentlagren närmast befintliga kajer.
- De ämnen som förekommer i förhöjda halter är PAH, TBT samt metallerna bly, kadmium, koppar och zink.

Muddring av dessa sediment kommer att medföra att muddermassor med halter motsvarande klass 4 eller 5 uppkommer. Vilken klass de upptagna muddermassorna tillhör bestäms av medelhalten i den pall som tas upp.

I de fall sediment i klass 4–5 utgör ett tunt skikt kan muddringsspallens minsta möjliga mäktighet medföra att de muddermassor som faktiskt tas upp i praktiken tillhör klass 1–3.

1.3 Vattenbalans för utfyllnaden

De muddermassor som inte får dumpas uppgår till cirka 7 900 m³ och föreslås placeras i en kassun byggd av spont och täckt med betongplatta. Konstruktionen har följande geometri:

- Längd: 110 m
- Bredd: 13 m
- Mäktighet: 5,5 m

Muddermassor som kan läggas i konstruktionen, utgörs av 5 660 m³ från område C1, D1 och E samt av 2 200 m³ från muddring av den intilliggande småbåtshamnen (AFRY 2025a).

Påslaget av föroreningar som utfyllnaden kan ge upphov till kan beräknas utifrån ämnenas lakbarhet och vattenbalansen för konstruktionen.

Genom att anta en viss infiltration av nederbörd genom betongplattan samt ett vattenutbyte genom spontväggen till följd av variationer i havsnivån kan den mängd vatten som kommer i kontakt med muddermassorna beräknas, liksom den resulterande årliga belastningen på recipienten (se Tabell 3).

Antaganden:

- Mängd muddermassor: ca 11 000 ton (7 860 m³ med torr densitet 1,4 ton/m³)
- Infiltration: 14 m³/år (motsvarande 10 mm/år genom betongplattan ovanför kassunen med en yta av 1430 m²)

Havsvatteninfiltration: Beräknad för en punkt mitt i utfyllnaden; totalt cirka 12 m³/år havsvatten bedöms kunna strömma in och sedan ut igen.

- Havsnivåvariation: Antas öka med 1 meter under sex månader och därefter sjunka under resten av året.
- Skarv mellan spont: Antas vara 0,5 cm mellan varje spont (60 cm).
- Hydrauliska förhållanden: Flödes hastigheten styrs av muddermassornas genomsläpplighet (10⁻⁶ m/s) och den hydrauliska gradienten (1/6,5).

I verkligheten varierar havsnivån betydligt snabbare, vilket innebär att en medelhavsnivå stabiliseras i utfyllnaden. Denna nivå kommer endast att variera marginellt vid förändringar i havsvattenståndet, eftersom systemets tröghet gör att vattnet inte hinner strömma in eller ut i takt med kortvariga variationer. Det beräknade inflödet på 12 m³/år bedöms därför ha en hög säkerhetsfaktor.

Även antagandet om skarvens storlek (0,5 cm) bedöms vara konservativt. I verkligheten kommer skarven att minska och bli tätare genom korrosion och avlagringar, vilket innebär att det antagna läckaget är överskattat med god säkerhetsmarginal.

Beräkningarna visar att den totala vattentransporten genom utfyllnaden (11 000 ton muddermassor) uppgår till högst 27 m³/år, vilket motsvarar en årlig L/S-kvot på 0,002.

Tabell 1 Beräkning av vattenbalansen för utfyllnaden och dess årlig L/S-kvot.

Utfyllnad			Kommentar
Längd	m	110	
Bredd	m	13	
Djup	m	5,5	
Yta	m ²	1430	
Volym	m ³	7900	
Torr densitet	kg/m ³	1 400	Uppmätt från prov 25AF06 och 25AF10
Mängd	kg	11 E6	
Vattenbalans			
Nederbörd			
Infiltration	mm/år	10	Tät konstruktion (betongplatta)
Lakvattenbildning	m ³ /år	14	
Havsvatten			
Andel öppning		0,008	0,5 centimeter i skarven mellan spont, var 60:de centimeter i spont
k sediment	m/s	10 ⁻⁶	Fin sand
H	m	1	Havsnivån stiger med en meter under 6 månader och faller till normalnivå för 6 månader
L	m	6,5	Beräknat i mitten på utfyllnaden
Vattenflöde			
Hastighet	m/s	1,5E-07	
Flöde	m ³ /år	12	Påfyllning 6 månader, tömning 6 månader
L/S för utfyllnaden			
L	/år	0,002	
L	l	27 E3	
S	kg	11 E6	

2 Utlakning och Miljöpåverkan

2.1 Bedömning av muddermassor klass 4 och 5

Metaller

Från de inre delarna av hamnområdet, längs kajerna, kommer muddermassor motsvarande klass 4 och 5 att uppkomma. Laktester utförda vid L/S 2 och 10 på tre sedimentprover (25AF03, 25AF07 och 25AF15) visar på mycket låg lakbarhet hos de analyserade metallerna.

Proverna valdes från delar av bassängen där sediment i klass 4–5 förekommer, i syfte att karakterisera de mest förorenade muddermassorna. En jämförelse av resultaten med Naturvårdsverkets (2004) föreskrifter om mottagning av avfall vid anläggningar för deponering av avfall (NFS

2004:10) visar att lakbarheten för metaller var mycket låg i samtliga undersökta prover och motsvarade mottagningskriterierna för deponi för *inert avfall*.

Resultaten är förväntade, eftersom metallhalterna generellt är låga i de aktuella sedimenten. Ett neutralt eller svagt alkaliskt pH, till följd av Gotlands kalkrika geologi, minskar metallernas rörlighet och bidrar till att de förblir stabila under dessa förhållanden.

Tabell 2 Sammanställning av laktestresultat

	Enhet	25AF03		25AF07		25AF15	
		L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10
E.C.	mS/m	471	39	1170	129	2960	434
pH		7,9	8,1	7,6	7,9	7,7	8,2
As	mg/kg TS	0,08	0,22	0,04	0,08	0,16	0,57
Ba	mg/kg TS	0,06	0,09	0,28	0,38	0,61	0,63
Cd	mg/kg TS	<0.0001	<0.0005	<0.0001	<0.0005	<0.0004	<0.0006
Cr	mg/kg TS	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02
Cu	mg/kg TS	0,03	0,09	0,01	0,03	<0.1	<0.09
Hg	mg/kg TS	<0.00004	<0.0002	<0.00004	<0.0002	0,00	0,00
Mo	mg/kg TS	0,14	0,19	0,16	0,29	0,50	0,62
Ni	mg/kg TS	0,02	0,04	0,02	0,04	0,14	0,30
Pb	mg/kg TS	0,003	0,020	0,004	0,018	0,006	<0.02
Sb	mg/kg TS	0,004	0,008	0,004	0,010	0,004	0,011
Se	mg/kg TS	<0.004	<0.02	<0.004	<0.02	0,02	0,04
Zn	mg/kg TS	0,04	0,09	0,03	0,08	0,07	<0.1
fluorid	mg/kg TS	0	<1	1	1	1	3
klorid	mg/kg TS	2380	2370	7360	7200	17500	17900
DOC	mg/kg TS	124	160	195	230	1590	1840
sulfat	mg/kg TS	1230	1330	2360	2850	5720	5500

Svavel och sulfidmineral

Fem prover från 2024 karakteriserades med avseende på förekomst av sulfidmineral (AFRY 2024). Det undersökta området låg i farleden, där mäktigheten av lösa sediment är liten. Proven analyserades med avseende på förekomst av sulfid (inte svavel, vilket annars är brukligt vid bedömning av sulfidhaltiga jordar och sediment). Laboratoriet har inte kunnat specificera vilket eller vilka sulfidmineral som detekterats med den aktuella metoden (Tabell 4).

Järnsulfider (FeS och FeS₂) är de dominerande sulfidmineralen i sediment. Halterna av sulfid, oavsett mineral, är låga. En uppmätt halt på 1 600 mg/kg

TS motsvarar som högst cirka 850 mg/kg TS svavel (53 % av pyritens molvikt) vilket är en låg svavelhalt. Med hänsyn till Gotlands kalkrika geologi samt den observerade förekomsten av snäckskal i sedimenten bedöms ingen risk föreligga för försurning eller efterföljande läckage av metaller om muddermassorna skulle hanteras under syrerika förhållanden.

Tabell 3 Halter av Sulfid, total (mg/kg) Klorid (vattenlöslig) (mg/kg) och Torr substans (TS i %).

	Sulfid mg/kg TS	Klorid mg/kg TS	TS %
AF24214	370	1 900	65
AF24220	120	2 300	72
AF24228	580	2 100	64
AF24237	1 600	9 500	24
AF24253	83	1 600	66

Klorid

Förhöjda halter av klorid har noterats (AFRY 2024 och 2025c). Dessa beror på att havsvatten följer med vid provtagning av sediment. Lakbarheten hos klorid är helt tillgänglighetsstyrd – samma mängd klorid lakas vid L/S 2 som vid L/S 10 (Tabell 2).

Utvärderingen av resultaten visar att sediment med lägre torrsubstanshalt (TS) uppvisar högre halter av klorid (Tabell 3 och Tabell 4).

TOC och DOC

Förekomst av TOC och DOC har analyserats i ett antal prov (AFRY 2025c). Sediment från punkt 25AF15, längst in vid småbåtshamnen, uppvisar höga halter av både DOC och TOC (Tabell 4). Sedimentet kommer från ett lugnt område som är skyddat från vågor, där organiskt material lättare kan sedimentera jämfört med andra delar av hamnen som är mer utsatta för strömmar och omrörning. I dessa mer exponerade områden, som är representativa av merparten av muddermassorna, är TOC-halterna lägre.

Tabell 4 Halter av Torr substans (TS i %), Klorid (mg/kg) DOC och TOC (%) från sediment som lakats ut vid L/S 10.

	Klass	TS %	Klorid mg/kg TS	DOC mg/kg TS	TOC %
25AF07	Klass 3, PAH	31	7 200	230	4,1
25AF15	Klass 5, PAH, TBT	16	17 900	1 840	7,3
25AF03	Klass 5, PAH	56	2 370	160	1,5

PAH

Det är inte brukligt att undersöka lakbarheten hos PAH-föreningar med skaktester. PAH är stora, hydrofoba, molekyler med begränsad löslighet i vatten. Spridning av PAH bedöms därför ske huvudsakligen med partiklar, det vill säga via suspenderat material (grumling). De halter som påträffats i sedimenten bedöms inte kunna spridas, förutsatt att muddermassorna inte utsätts för erosion som skulle kunna leda till partikelflykt.

TBT

Kompletterade undersökningar avseende lakbarheten av TBT och andra tennorganiska föreningar har utförts i två prover (25AF06 och 25AF10). Materialet består av *fin sand* och har en torrsbstanshalt (TS-halt) på cirka 70–75 % när överskottsvattnet har runnit av samt en densitet på cirka $1,3–1,4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Erhållna sediment var blöta och täckta med en tunn vattenfilm. För analys av tennorganiska ämnen behövs cirka 600 ml vatten. Inför testet blandades 600 ml destillerat vatten med sedimenten till en slurry. Omrörning har genomförts vid två tillfällen under perioden. Efter 24 timmar, när sedimenten blandats en sista gång och slurryn fått sedimentera, togs cirka 550 ml vatten ut för analys (Tabell 5).

Tabell 5: Halter tennorganiska ämnen i lakvatten och sedimentprov.

	Enhet	25AF06	25AF10
MBT, monobutyltenn	ng/L	<1	<1
DBT, dibutyltenn	ng/L	<1	<1
TBT, tributyltenn	ng/L	<0.2	1,48
TBT, tributyltenn	µg/kg TS	1,5	1,3

Mängden uttaget vatten har räknats om till en L/S-kvot (liquid to solid) för respektive prov. För varje prov har följande parametrar beräknats (Tabell 6):

- Mängd sediment
- Mängd vatten (ursprunglig och tillsatt)
- Mängd TBT som lakats ut
- L/S-kvot för aktuellt prov
- Mängden TBT som lakas per kg sediment vid given L/S-kvot

Beräkningen har utförts för respektive prov och ger ett spann för hur mycket TBT som kan antas vara tillgängligt för lakning.

Tabell 6 Beräkning av lakbar mängd TBT från respektive prov.

	Enhet	25AF06	25AF10
TBT, tributyltenn	ng/L	<0,2	1,48
TS	%	0,74	0,63
Mängd sediment	g	2 552	2 426
Vatten			
Porvatten	g	665	891
Tillsatt	g	600	600
L/S		0,7	1,0
Mängd TBT			
Utlakat (totalt)	ng	< 0,25	2,21
Mängd TBT/mängd sediment	ng/kg TS	< 0,48	3,39

Sammanfattning

Halterna i sedimenten innebär att muddermassor i klass 4 och 5 kommer att uppstå. De ämnen som förekommer i förhöjda halter är metaller, PAH och TBT.

Sedimentens konsistens varierar. Större delen av bottensedimenten består av sand med en TS-halt mellan 60 och 75 %. I de lugnare delarna av hamnbassängen förekommer även lösare ytsediment med lägre TS-halt och högre innehåll av organiskt material (TOC).

Lakbarheten hos dessa ämnen är låg. Laktester har visat att påslaget av metaller och TBT kommer att vara mycket litet. PAH bedöms inte vara vattenlösliga eller rörliga.

2.2 Påslag till recipienten

Utifrån erhållna resultat kan det beräknas vilket påslag av föroreningar som utfyllnaden kan ge upphov till.

Beräkningen av påslag av TBT till recipienten presenteras som ett exempel. Motsvarande beräkning kan även göras för metaller. För denna typ av beräkning har nickel valts som exempel, eftersom den uppvisar den högsta lakbara halten (0,09 mg/kg TS vid L/S 2, medelvärde av de tre analyserade proverna).

Påslag av TBT

Baserat på erhållna resultat uppskattas den totala mängden TBT som är tillgänglig från muddermassorna till mellan 5 och 38 mg. Givet den beräknade L/S-kvoten, beräknas det årliga påslaget uppgå till mindre än 0,1 mg per år (se Tabell 7).

Tabell 7 Beräknat påslag av TBT i recipienten baserat på resultat från de två undersökta sedimentproverna.

Utlakning av TBT		25AF06	25AF10
Årligt L/S-kvot		0,002	0,002
Mängd TBT vid L/S 1	mg	< 5,3	37,5
Påslag	mg/år	< 0,02	0,09

Påslag av metaller

Samma beräkning för nickel (och övriga metaller) visar på ett påslag från utfyllnaden i storleksordning 0,5-1,2 g per år eller lägre.

3 Hantering av muddermassor klass 4 och 5

I en utfyllnad kan muddermassorna utsättas för utlakning genom vattentransport i porvolymen (advektion) samt genom diffusion. Diffusion är en mycket långsam process och bedöms vara irrelevant för den föreslagna hanteringen.

Advektion, det vill säga vattenrörelse och spridning av den lakbara fraktionen, utgör den styrande mekanismen. Beräkningar visar att påslaget av metaller och TBT genom den planerade konstruktionen är försumbart.

Hur mycket vatten som transporteras genom muddermassorna beror på:

- **Täckningens täthet** och dess förmåga att avleda nederbörd.
- **Invallningens täthet** och dess förmåga att hindra havsvatten från att tränga in i massorna vid högt vattenstånd, samt att motverka partikeltransport (partikelflykt).
- **Muddermassornas egen täthet**, som styr hur mycket havsvatten som kan sippra in.

Muddermassorna har en låg hydraulisk konduktivitet. Den tilltänkta spontkonstruktionen bedöms effektivt minska vattenutbytet som orsakas av variationer i havsnivån. Spontkonstruktionen kan även effektivt dämpa effekterna av vågrörelser och hindra spridning av partiklar.

De antaganden som gjorts beträffande infiltration av nederbörd genom kassunens tak samt mängden havsvatten som kan sippra genom skarven mellan spontsektionerna bedöms vara konservativa. Beräkningarna utgår från ett konstant tryck under en längre tidsperiod för att vatten ska kunna tränga in. I verkligheten sker havsnivåvariationer i betydligt kortare cykler, vilket medför att en mindre mängd vatten hinner tränga in innan systemet

börjar tömmas. Nivåvariationerna in i kassunen och vattenutbytet blir därmed mindre än vad som antagits för beräkningen.

I utfyllnaden kommer klass 4–5-muddermassor att placeras under havsnivån. Vattenutbytet kan styras till den övre delen av utfyllnaden, där icke förorenade muddermassor placeras. Effekten av den gradient som orsakas av variationer i havsnivån kan minskas genom att skapa en kontakt mellan havet och utfyllnadens övre del, genom vilken tryckskillnader snabbt kan jämnas ut. En sådan anordning kan även leda bort infiltrerande vatten förbi de klass 4–5-massor som ligger under havsnivån. På så sätt blir vattenrörelsen genom de förorenade massorna försumbar.

Beräkningarna visar även att det inte finns behov av ytterligare tätskikt på insidan av utfyllnaden.

4 Referenser

AFRY. 2024. PM – Miljöteknisk undersökning Kappelshamn.

AFRY 2025 a: Resultatsammanställning av sedimentundersökningar vid Kappelshamn under perioden 2023–2025

AFRY 2025 b: Kappelshamn tillståndsprocess. Projektmöte AFRY-SjöV-FortV. 25-04-15

AFRY. 2025 c - Rapport kompletterande undersökning av sediment i Kappelshamnsviken.

Naturvårdsverket. (1999). *Bedömningsgrunder för miljö kvalitet – Kust och hav. Rapport 4914.*

Naturvårdsverket. (2004). *Deponering, kriterier och förfaranden för mottagning av avfall vid anläggningar för deponering av avfall (NFS 2004:10).*

SGU. (2017). *Klassning av halter av organiska föroreningar i sediment. SGU-Rapport 2017:2.*