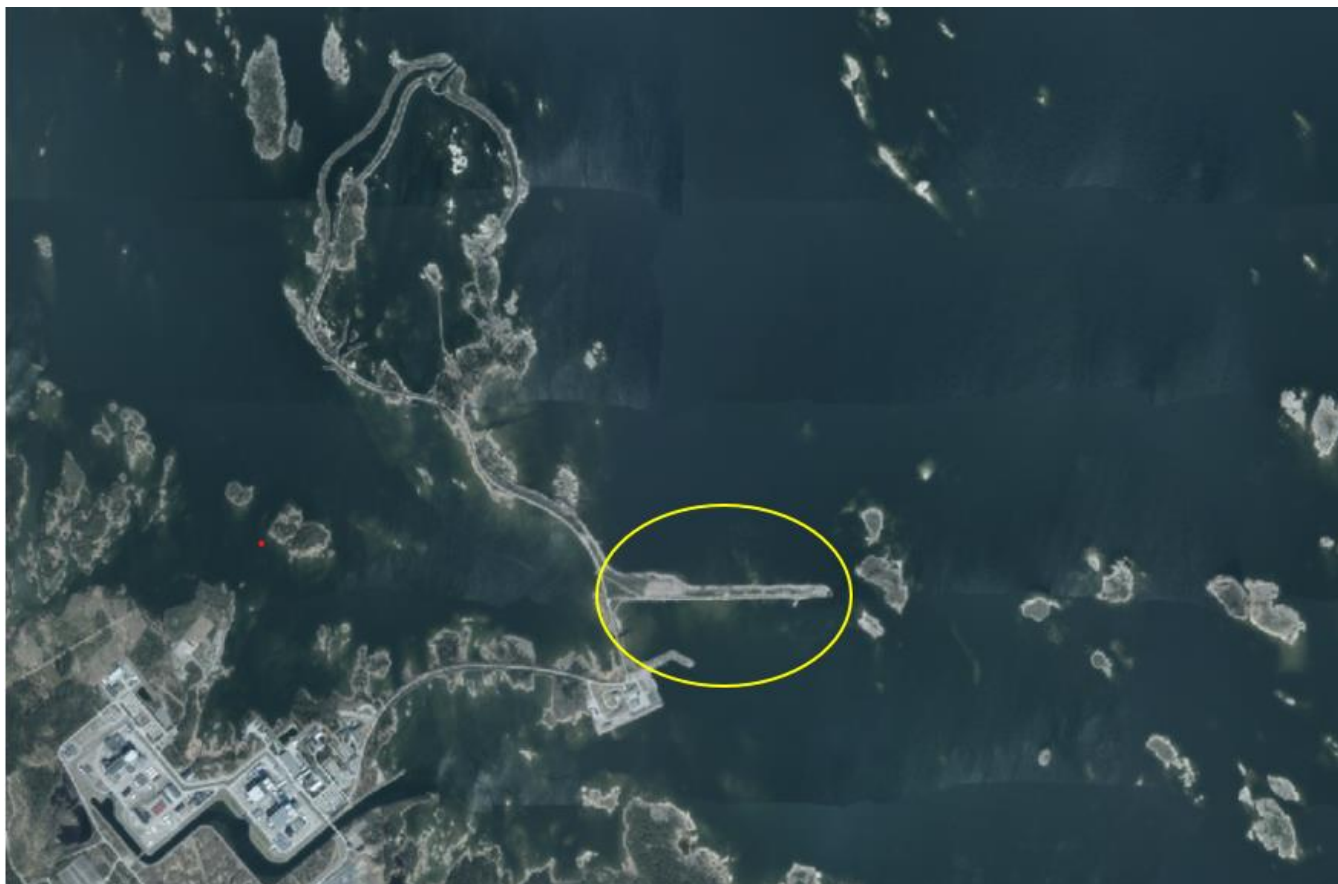




Rening av kväve vid piren, Forsmark

Svensk Kärnbränslehantering AB

Slutrapport

TITEL	Rening av kväve vid piren, Forsmark
RAPPORTNUMMER	2181-A
BESTÄLLARE	SKB
UPPDRAGSANSVARIG	Daniel Stråe, WRS
FÖRFATTARE	Peter Ridderstolpe, Firma Ekologisk Teknik
GRANSKNING	Daniel Stråe, WRS
UTGÅVA	Slutrapport
DATUM	2025-09-30
OMSLAGSBILD	Google

Sammanfattning

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) kommer att spränga stora mängder berg under tiden då slutförvaren anläggs. En stor del av dessa bergmassor måste läggas upp lokalt. SKB har sett piren vid Stora Asphällan som lämplig för detta ändamål. Med en sådan lösning finns möjlighet att skapa ett verksamhetsområde, vilket SKB behöver, bland annat för avyttring av överskottsmassor och tillverkning och lagring av prefabricerade. Bottenytan som påverkas av utfyllnad är 22 hektar om både den norra och södra delen av piren anläggs.

Eftersom bergmassorna innehåller kväve från odetonerat sprängmedel är det önskvärt att rena lakvattnet för att minimera kväveutsläppen till havet. De praktiska förutsättningarna för kväverening för ett upplag i havet är dock utmanande. I samarbete med SKB och deras konsulter, har ett förslag tagits fram som bedöms vara praktiskt och processtekniskt möjligt för att uppnå målet om 70 % kvävereduktion. Förslaget bygger på att kväve avskiljs genom denitrifikation med fast kol-källa (träflis) och i en grund våtmark som byggs på utfyllnadsområdet.

Rapporten syftar primärt till att ge underlag för miljöprövning och i senare skede för projektering. Den principlösning för kväverening som beskrivs kan komma att modifieras i senare skeden om nya förutsättningar uppkommer. Den föreslagna principlösningen är giltig oavsett om hela eller bara halva piren byggs ut.

För att åstadkomma kvävereduktion krävs att en tät vall byggs mot havet. Innanför denna läggs bergmassorna. Vallen byggs med grova massor på vintern då störningar på havet bedöms vara minst. Fyllningen innanför vallen kan göras året runt. Man kommer fylla med osorterade massor. Då dessa massor innehåller fina fraktioner, till vilka merparten av kvävet är associerat, krävs rening under både fyllnads- och driftfas. Utbyggnaden kommer ske stegvis där reningen succesivt byggs ut. Ambitionen är att skapa en reningsfunktion redan vid första etappens fyllning.

Tiden för fyllning bestäms av hastigheten i utdrivning av berg från slutförvaren. Merparten av massorna genereras under en relativt kort period i början, men uttag av berg kan pågå under Kärnbränsleförvarets hela drifttid (fram till cirka 2080-talet). Både vattenflöden och kvävebelastning är störst under fyllnadsfasen. Flödena som uppkommer av utpressat vatten bedöms uppgå till 2–10 L/s. Totalt bedöms 22 ton kväve föras in till piren med bergmassorna förutsatt att hela piren tas i anspråk.

Utlakningen är betydligt snabbare från de massor som läggs i havet än från de massor som läggs ovanför vattenlinjen. Kvävetillförseln kommer när fyllningen väl är genomförd avta snabbt för att efter 20–25 år troligen vara nere på några hundra kilo per år per år. Vid denna tidpunkt har behov av kväverening upphört varför anläggningen för kvävereningen kan avvecklas. Våtmarken kan då tjäna som yngelkammare för havslevande fisk, om den förbinds med havet.

Utredningen visar att:

- Målet om 70 % kvävereduktion kommer med föreslagna åtgärder uppnås med god marginal sett över hela driftperioden.
- Under den initiala fasen när kvävereduktionen inte är fullt utbyggd är det osäkert om målet om 70 % avskiljning kan uppnås.
- Efter att andra etappen byggts bedöms kapacitet för kvävereduktion vara högre än behovet. Möjligen kan därför storleken på kvävereningszonen därefter minskas.
- Kväverening för bergmassor upplagda i havet kräver komplicerade och resurskrävande åtgärder, speciellt där havet är djupt, som på norra sidan av piren.

Innehåll

1	Inledning	5
1.1	Bakgrund.....	5
1.2	Syfte.....	5
2	Avgränsningar	5
3	Inledande arbeten	6
3.1	Piren	6
3.2	Massornas kväveinnehåll och porositet	6
4	Aktuellt förslag	7
4.1	Planeringsförutsättningar.....	7
4.2	Kvävebelastning och flöden.....	7
5	Förslag till behandlingslösning	8
5.1	Förutsättningar och principer	8
5.2	Flisdel	9
5.3	Våtmark	9
5.4	Flytande kolkälla	10
5.5	Pumpning	10
5.6	Stegvis utbyggnad	10
6	Bedömning av kvävereduktion	12
6.1	Processer.....	12
6.2	Våtmarkens kapacitet vid piren	13
6.3	Kvävereduktion under olika skeden.....	15
6.4	Kvävebudget.....	16
7	Egenkontroll	17
8	Avveckling av reningsanläggning.....	18
9	Slutsatser och diskussion	18
9.1	Diskussion	18
	Referenser	19

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) kommer spränga stora mängder berg vid anläggandet av slutförvarn, varav en betydande del under det inledande mer intensiva byggskedet. En stor del av dessa bergmassor måste lagras upp lokalt. Brist på tillgängliga ytor på land har gjort det intressant att undersöka möjligheten att anlägga nya verksamhetsytor genom att fylla massor i havet vid piren intill Biotestsjön.

Den planerade utfyllnaden bedöms uppta en yta om maximalt 22 ha och rymma två miljoner ton bergmassor. Utfyllnaden görs i syfte att anlägga verksamhetsytor som behövs för SKB:s slutförvar, bland annat för avyttring av överskottsmassor och för tillverkning och lagring av prefabricerade betongelement.

Eftersom bergmassorna innehåller relativt stora mängder kväve från odetonerat sprängmedel, är det önskvärt med någon form av kväverening för det lakvatten som bildas under utfyllnaden av havsområdet och under driftfasen när området är utfyllt.

Ett tidigt förslag till kväverening togs fram av SKB i början av år 2025. Förslaget innebar att runt utfyllnadsområdet anlägga en vall och innanför denna ett grunt våtmarksområde. I detta område, som tidigare benämndes den ”blå zonen” skulle kvävereningen ske. Detta förslag har utvecklats vidare under det arbete som redovisas här.

1.2 Syfte

Syftet med detta arbete har varit att tillsammans med SKB och deras konsulter att utveckla det ursprungliga förslaget till en lösning som bedömts vara både praktiskt och processtekniskt genomförbar. Kvävereduktionen åstadkommes i en kombination av rening med fast kolkälla (träflis) och denitrifikation i våtmark. Förslaget har benämnts kvävereningszon med våtmarksdel och flisdel. Rapporten syftar primärt till att utgöra underlag för miljöprövning men också i ett senare skede till projektering.

I rapporten sammanfattas

- Allmänna förutsättningarna för anläggande
- Tekniska förutsättningar kring kvävemängder och flöden utifrån underlag från SKB
- Konceptuell beskrivning av behandlingssystem
- Förväntad kväveavskiljning och kväveutsläpp
- Möjligheter till att tillvarata naturvårdsintressen och andra intressen

2 Avgränsningar

Bedömning av piren med dess verksamhetsytor och den ingående kvävereningens påverkan på vattenområdet vid utfyllnadsområdet har ej ingått i uppdraget. Ej heller har det ingått att beräkna kostnader för de åtgärder som syftar till kväverening.

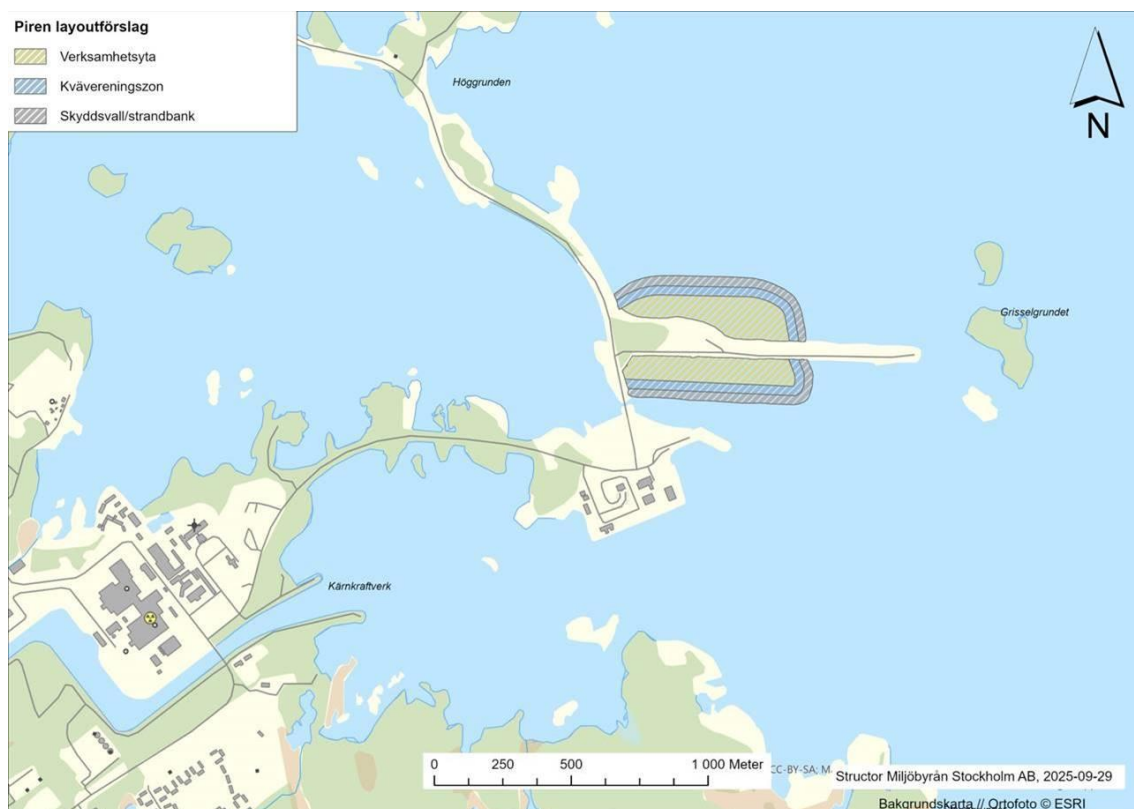
3 Inledande arbeten

3.1 Piren

Piren ligger strax norr om Stora Asphällan. Den är byggd med krossmassor på ett grundområde mellan ett antal öar och sträcker sig i väst-östlig riktning. Piren är cirka 50 meter bred och uppbyggd med bergmassor från SFR.

De områden SKB valt ut för fyllning och verksamhetsområde vid piren är totalt cirka 25 hektar stora (utöver befintligt område tillkommer 11 hektar på norra sidan och 10 hektar på södra sidan). Bottenarealen som berörs är cirka 22 hektar (Figur 1). De kommer byggas upp till en nivå drygt tre meter över havet och rymmer totalt två miljoner ton bergmassor. Söder om piren är havet grunt, bara cirka två meter djupt och utgörs mest av mjukbotten (ackumulationsbotten). Den norra delen är djupare och mer exponerad för havet. Här är bottenarna hårda med stora stenar med djup upp mot åtta meter.

SKB söker tillstånd till att få fylla ut både norr och söder om piren. Därutöver har ett alternativ utretts som innebär att endast halva utfyllnaden görs (södra delen).



Figur 1. Piren med den norra och södra delen som är aktuell för fyllning av bergmassor (SKB/Structor, 2025-09-29)

3.2 Massornas kväveinnehåll och porositet

Totalt beräknas 22 ton kväve föras in i området med bergmassorna (norra och södra piren tillsammans). Merparten av detta kväve finns associerad till finpartiklar. Erfarenheter från andra projekt visar på att ungefär 90 % av kvävet finns i fraktionen 0–150 mm och 10 % i fraktionen 150–600 mm. Detta är utgångspunkten för SKB:s antaganden för prognoserna.

Porositeten i den grövre fraktionen är 40 % medan den är lägre i den finare fraktionen.

För närvarande undersöker SKB om uttag av berg kan ske utan kväverika sprängmedel. Om detta visar sig tekniskt och miljömässigt möjligt kommer betydligt mindre kvävemängder uppstå än vad som redovisas här.

4 Aktuellt förslag

Arbetet med att ta fram ett förslaget för kväverening har pågått i en kreativ process i samarbete med SKB:s konstruktörer, där idéer och förslag utvecklats i takt med att förutsättningar och önskemål tillkommit eller ändrats. Alla uppgifter om ytor, mängder och flöden som redovisas i denna rapport, är hämtade från arbeten som pågått parallellt inom SKB.

Det förslag som här presenteras skall ses som en grundmodell för hur kväverening för lakvattenrening kan byggas upp och drivas vid piren. Grundmodellen är tillämplig oavsett om hela piren kommer tas i anspråk för utfyllnad eller bara delar av den kommer användas. De ingående komponenterna i behandlingssystemet är allmänt beskrivna och förutsätts preciseras vid projektering.

4.1 Planeringsförutsättningar

Allmänna förutsättningar som styr val av konstruktion och behandlingslösning är att:

- Båda sidorna om piren kan bli aktuella för fyllning.
- Större delen av massorna ej kommer att sorteras. Endast vallen kommer att byggas med grova massor. Detta för att minimera kvävepåverkan på havet.
- Vall mot havet byggs tät och anläggs vintertid för att begränsa påverkan på vattenmiljön.
- Fyllning av områden innanför vallen kan göras året runt. Verksamhetsytan byggs upp med osorterade massor upp till + 3,5 m. Våtmarken skapas på fyllnaden och för ett vattendjup om cirka 0,4 m.
- Tillgången på massor av betydelse för hur lång skyddsvall som hinner anläggas vintertid, och därmed hur stor respektive etapp blir. Utbyggnaden planeras preliminärt att ske i sex etapper, tre på vardera sida om piren.
- Varje utbyggnadsetapp byggs som ”tårtbitar” som avgränsas med tät vall mot havet för att sedan fyllas invändigt, se Figur 4.

4.2 Kvävebelastning och flöden

Den totala mängden kväve som kan föras in med bergmassorna har beräknats till 22 ton, varav 12 ton till den norra delen och 10 ton till den södra. Denna beräkning baseras på att vallen byggs upp av grova massor (150–600 mm) men att övriga massor är osorterade (0–600 mm). Utlakningen av kvävet går snabbast i de massor som läggs under vattenlinjen. Riktigt hur fort utlakningen går är inte helt klarlagt.

Den maximala kvävebelastningen på reningsanläggningen bedöms under en rullande tolv månadersperiod bli drygt 3 ton under anläggningsskedet. Därefter kommer belastningen avklinga för att närma sig noll efter 20 till 25 år. För att erhålla säkrare underlag för bedömning av kväveutlakningen har ”containerförsök” nyligen påbörjats av SKB, där utlakningens omfattning och hastighet kommer att studeras för olika fraktioner av bergmassor under mättade förhållanden.

Modellberäkningar för piren visar att av de totala kvävemängderna som förs in med bergmassorna kommer ungefär en femtedel, efter rening, tillföras havet under anläggningsskedet. Under anläggningsskedet då massorna fylls upp under vattenlinjen, tillförs vattnet både ammonium och nitrat. Ett konservativt antagande är att fördelningen mellan ammonium och nitrat då är 50/50. Så snart massorna läggs upp ovanför vattenlinjen kommer större delen av tillfört ammonium nitrifieras när kvävet lakas ut genom massorna. Under driftsfasen förväntas mer än 90 % av kvävet föreligga som nitratkväve.

Under fyllnadsfasen beräknas flödena ligga inom intervallet 2–10 L/s. Detta flöde motsvarar det flöde av bergmassor som kommer köras till området och tippas i vattnet. När fyllningen är slutförd kommer flödena avta markant. Bergmassorna som läggs ovan vattenlinjen är mycket torra så det kan dröja flera år innan lakvatten börjar avrinna. Därefter kommer flödet uppgå till högst 1 L/s, fördelat ungefär lika mellan norra och södra delen. Troligen blir flödena under drifttiden betydligt lägre än så.

5 Förslag till behandlingslösning

5.1 Förutsättningar och principer

De praktiska förutsättningarna för att bygga upp en behandlingslösning för kväverening vid fyllning runt piren är utmanande. Förutsättningarna för konstruktionen är bland annat:

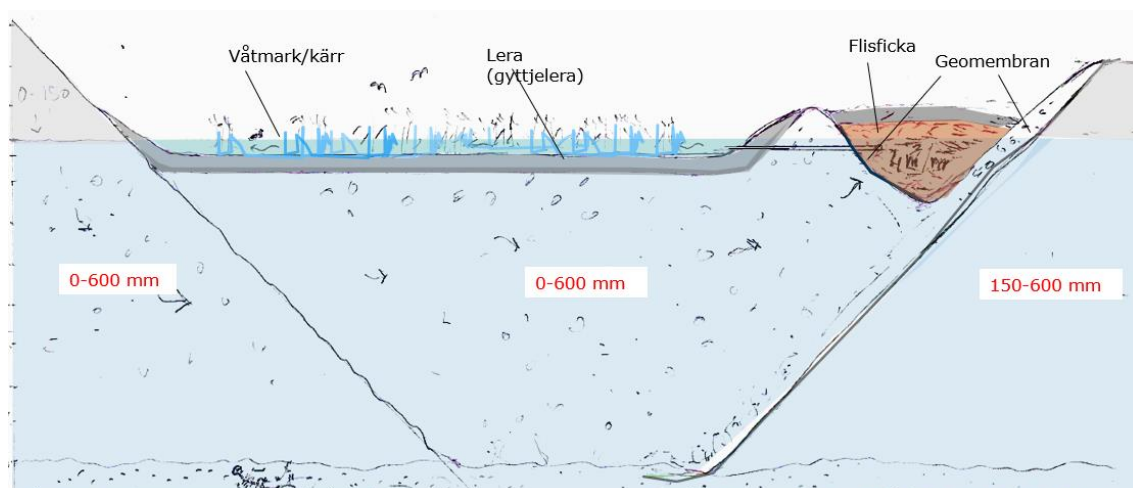
- Vattendjup upp till åtta meter (norra sidan om piren).
- Havsnivåvariationerna är stora och snabba.
- Kraftiga vågor kan uppstå, framför allt på den norra sidan om piren.
- Olika typer av bottnar. Norr om piren är bottnarna djupa och uppbyggda av blockig morän. På södra sidan om piren är bottnarna grundare och mjuka.
- Fyllning med cirka 2 miljoner ton bergmassor varav en större andel på norra sidan.
- Utträngd vattenvolym vid fyllning cirka 250 000 m³ varav 150 000 m³ på norra sidan.

Principer för konstruktion och behandlingslösning är:

- Att en tät och erosionssäker vall byggs mot havet.
- Att vallen byggs med grova massor för att minimera kväveläckage till havet.
- Att vallen förses med tätskikt på insidan i syfte att minimera vattenutbyte mellan hav och fyllningen innanför vallen.
- Att fyllning innanför vallen sker med osorterade massor, dvs 0–600 mm eftersom det inte finns möjlighet att mellanlagra eller avyttra finfraktioner av massorna.
- Att utbyggnaden görs stegvis. Detta för att möta de krav som är uppställda för fyllningen i havet, men också utifrån behov av tillgång till verksamhetsytor och tillgängliga bergmassor från framdrivningen av slutförvaren.
- Att utträngande vatten vid fyllning samt lakvatten från verksamhetsytan tvingas genom kvävereningszonen med våtmarksdel och flisdel genom pumpning, för denitrifikation av kväve.

Av konstruktionsmässiga skäl förläggs kvävereningszonen med våtmarksdel och flisdel intill insidan om begränsningsvallen (Figur 2). För att säkerställa att vatten kommer röra sig igenom

träflisen och våtmarken krävs pumpning. Pumpningen medger också att man under driftfas när flödena är mycket långa kan recirkulera vattnet mellan flisdel och våtmark.



Figur 2. Principlösning för den föreslagna konstruktionen för kväverening (skiss Peter Ridderstolpe, Firma Ekologisk Teknik)

Ytterligare en möjlighet att avskilja gynna kvävereduktionen kan också flytande kolkälla tillsättas i det fyllnaden. Detta görs i så fall när uppfyllnaden är genomförd och inget utträngande vatten längre bildas.

5.2 Flisdel

Flisdelen anläggs med tät botten innanför skyddsvallen och beskickas med pump med intag från porvolymen i fyllnadskroppen. Flisdelen fylls med träflis (tall- och lövträ). En liten tillsats av näringsrik (fosforrik) jord kan bli aktuell att tillföra flisen. Detta för att gynna mikrobiella processer för nedbrytning och denitrifikation.

Anläggs flisdelen så som skissen visar (med tvärsnittsarea på 4 m²) och längs hela insidan av yttervallen (1,2 km) erhålls en volym om cirka 4 500 m³ (norra och södra sidorna tillsammans).

5.3 Våtmark

Våtmarken anläggs med tät botten på utfyllnaden. Botten byggs upp av finkrossat berg och om möjligt lera och gyttja. Detta för att uttryckande vatten och lakvatten ej ska kunna tränga in i våtmarken utan att först passera flisdelen. Vattendjupet är cirka 0,4 m vilket är ett lämpligt för den miljö man vill skapa med produktiva vassväxter, s.k. helofyter, såsom bladvass, sjösäv, havssäv och kaveldun (Figur 3).

Bladvass etableras som pluggplantor övriga arter kan etableras genom sådd (frön blandas med jorden i som läggs i toppskiktet). Till våtmarken ympas också in undervattensvegetation av hornsärv, ax- och kransslinga samt kransalger och havsnajas.

De nämnda undervattensväxterna är vanliga i upplandskustens mjukbottnar och bidrar till mikromiljöer för denitrifikation samt motverkar uppkomst av mikroalger. Kransalger och Havsnajas skapar undervattensängar med ett rikt djurliv av marina evertbrater. På sikt när anläggningen är avvecklad kan våtmarken tjäna som yngelkammare för olika fiskarter.



Figur 3. Flisdelen fylls med grov träflis av tall och löv. Våtmarken etableras med vass-vegetation s.k. helofyter samt med undervattensväxter. På bilden syns bland annat vass, havssäv och rödräse (*Chara tomentosa*). (Foton: Lundgrens skafferier, Vegtech och Peter Ridderstolpe)

Byggs våtmarken enligt förslaget, dvs cirka 600 meter lång och 20–25 meter bred, erhålls en blå zon om cirka 1,5 hektar på vardera sida (1,5 hektar för norra piren och 1,4 hektar för den södra). Med ett medeldjup på 0,4 m erhålls en vattenvolym för norra och södra piren tillsammans om 12 000 m³, vilket i fyllnadsfasen ger en cirka två till tre veckors uppehållstid och efter fyllning många månader. Den totala ytan (norra och södra tillsammans) blir knappt tre hektar.

5.4 Flytande kolkälla

Som framgått inledningsvis finns osäkerheter kring hur mycket kväve som kommer tillföras området med bergmassorna och hur snabbt det kommer laka ur. Om man finner behov av extra kväverening, utöver den som uppnås med flisdel och våtmark, finns möjlighet att tillsätta flytande kolkälla för denitrifikation. Flytande kolkälla kan då tillsättas ”grundvattenrör” som ändå behövs för kontroll av kvävehalter i porvolymen i fyllnadsområdet, se vidare avsnitt 7 egenkontroll.

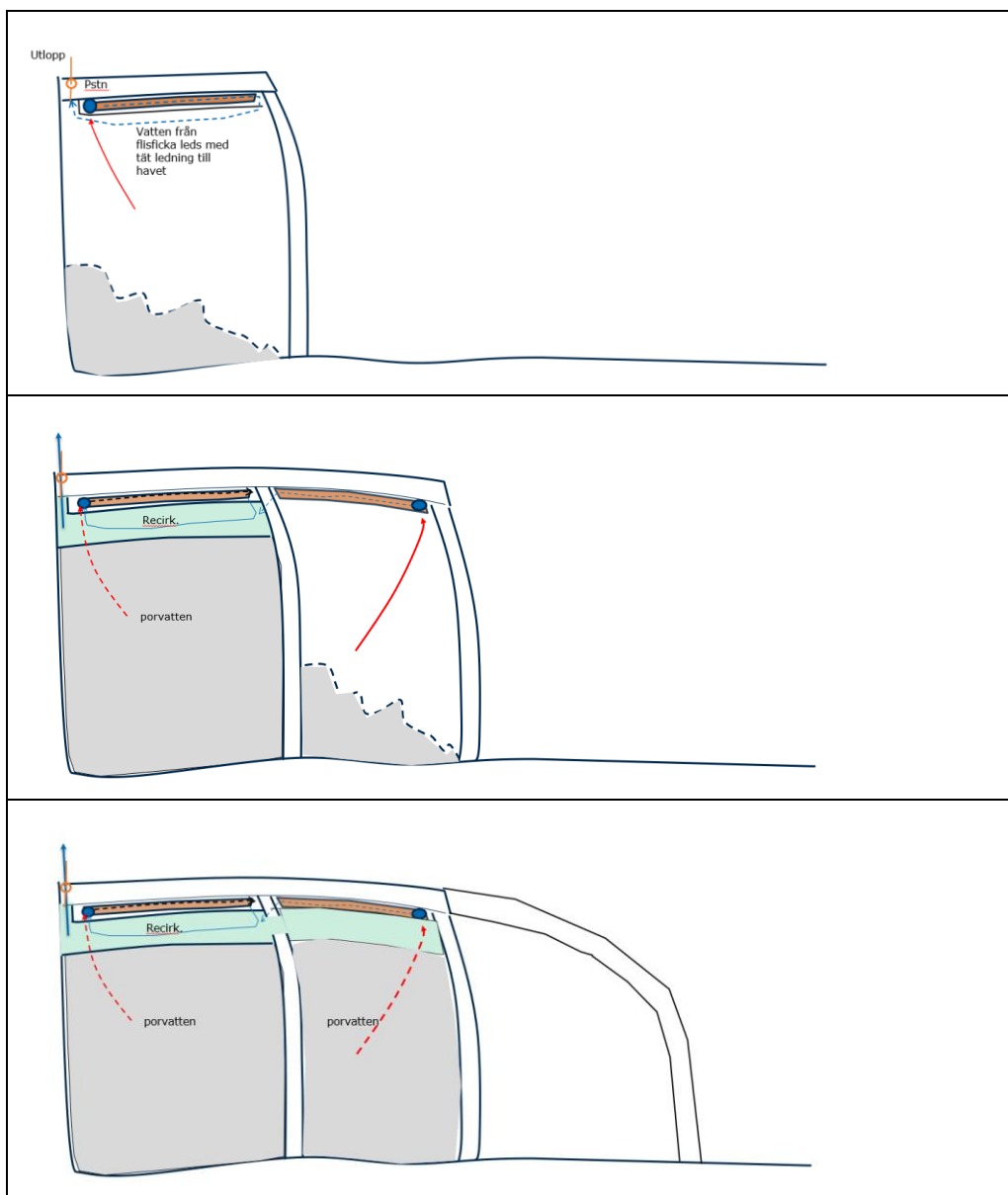
Brenntapplus är en produkt som kan användas för ändamålet. Den är väl beprövad och pumpbar ner till -15° C och tekniken kan snabbt installeras om behov skulle uppstå. Brenntapplus kräver inte miljötillstånd och kan köpas tex i IBC-tankar som placeras på lämplig plats tillsammans med doserpump och styrutrustning.

5.5 Pumpning

Vattnet pumpas in i flisdelen från en pumpbrunn placerad i flisdelen ena sida. Intag till brunnen görs från en ledning som har sitt intag i porvolymen. Under fyllningen, innan våtmarken är anlagd, leds utgående vatten till havet. När våtmarken är etablerad leds utgående vatten från flisdelen dit. Då placeras också ett intag från våtmarken till pumpstationen till flisdelen. På detta sätt kommer både lakvatten som tränger ned i fyllnaden och vatten från våtmarken, föras in till flisdelen. Detta innebär i driftsfasen att vattnet kommer kunna recirkuleras genom både flisdel och våtmark valfritt antal gånger, vilket förstås kommer att gynna kvävereningen.

5.6 Stegvis utbyggnad

Då vallen endast får byggas under vinterperioden, men framdrivning av förvaret pågår hela tiden, är det nödvändigt att bygga ut utfyllnaden och reningsanläggningen stegvis. Varje steg innebär att en ”tårtbit” med tät vall byggs mot havet, och som när den är klar kan fyllas med massor. För varje tårtbit byggs också reningsanläggningen ut. Illustration nedan beskriver hur denna utbyggnad kan ske för den norra piren. Samma princip gäller för den södra. Den stegvisa utbyggnaden beskrivs nedan och illustreras i Figur 4.



Figur 4. Stegvis utbyggnad av anläggning. Brunt= träflisdel, ljusgrönt= våtmark, Grått = utfyllt område. Röda pilar markerar intag av orenat vatten (heldraget från öppet vatten, streckat från porvolym).

Steg 1 (övre bilden i Figur 4):

1. Tätvall byggs runt den första "tårtbit" i nordväst. I den västra delen anläggs ett utlopp. Utloppet, som kommer försörja hela anläggningen, byggs med en munk med bräddfunktion. Eventuellt förses ledning till munk med backventil och munkens första kammare med pump.
2. Flisdelen anläggs på insidan av vallen och förses med tät botten. Pumpstation (med intag från porvolym i utfyllnadsområdet) placerad på västra sidan om flisdelen. Pumpning ger frihetsgrader för placering av flisdelen samt möjlighet att välja punkt för intag.
3. Utpressat vatten under fyllningen (ca 5 L/s) pumpas med nivåstyrd pump i pumpstationen genom flisdelen för kväverening. Utgående vatten till havet går ut med självfall, alternativt kan det pumpas ut.

Steg 2 (mellersta bilden i Figur 4):

1. Den täta vallen byggs vidare för inneslutning av nytt fyllnadsområde. Vid vallen byggs samtidigt en flisdel (som i tårtbit 1)
2. Våtmarken i tårtbit 1 färdigställs. Botten byggs upp med fyllnadsmassor som överlagras med i ordning underifrån; nollfraktion kross, lera och gyttja. Mäktighet minst en meter för att maximera täthet (minimera risk för vassrötter skall skapa porer). Från den södra piren kan sannolikt detta material hämtas ur botten från tårtbit 2. Detta innebär också fördelen att man undviker grumling av havet. På den norra sidan, där bottnarna utgörs av stenig morän är detta inte möjligt. Här måste ler och gyttjemassor för att bygga botten till våtmarken tas från något annat håll.
3. Tårtbit 2 fylls med bergmassor. Utpressat vatten pumpas genom flisfikan och förs ut till våtmarken i tårtbit 1

Steg 3 (nedre bilden i Figur 4): Sista tårtbiten byggs (på samma sätt som beskrivs ovan).

6 Bedömning av kvävereduktion

6.1 Processer

Träflis innehåller cellulosa, lignin, hemicellulosa och andra långmolekylära föreningar som långsamt bryts ned av svampar och andra mikroorganismer. Trä (framför allt barrträd) innehåller också extraktivämnena som hartser, terpenar och fenoler som trädet bildar som skydd mot svamp- och insektsangrepp. I de låga halter som uppstår i det aktuella fallet bedöms att dessa ämnen inte kommer utgöra någon negativ påverkan på recipienten eller för biotan i våtmarken.

Kolkällan som finns i träflis är långsamverkande och kan inte fullständigt användas som energikälla av denitrifierande bakterier. Viktiga faktorer som påverkar denitrifikation är nitratbelastning, temperatur och uppehållstid. I det aktuella fallet kommer alla dessa faktorer variera. Under byggfasen kommer koncentrationen av nitrathalterna variera mellan 0–40 mg/l och vattnet kommer mestadels vara kallt (cirka 4–6 °C). Upphållstiden kommer under byggfasen (fyllnadsfasen) uppgå till 5–6 dygn. Efter fyllning, då huvudsakligen endast nederbörd kommer att generera lakvatten, skulle uppehållstiden bli cirka två månader om inte vattnet recirkuleras mellan flisdelen och våtmarken. Genom en väl anpassad recirkulation kan tillräckligt lång uppehållstid skapas för denitrifikation, samtidigt som redoxpotentialen förhindras att sjunka till så låga nivåer att toxiska nedbrytningsprodukter, så som svavelväte, uppkommer.

Sannolikt är också tillgång på fosfor (och eventuellt andra näringsämnen som tex svavel och kalium) en faktor som påverkar nedbrytningen av flisen och dess kvalitet som kolkälla för nitrifierande bakteriers kapacitet för nitratomvandling. Att så kan vara fallet visar den uppföljning som under året påbörjats av redan byggda bioreaktorer för länshållningsvatten från FKA:s slutförvar.

Med utgångspunkt från litteraturuppgifter där olika empiriska försök med så kallade bioreaktorer (flisbassänger) beskrivs (Herbert, R och Nordström A, 2021), givet bedömda förhållanden som kan skapas i flisfickorna vid piren, antas att 600 m³ flis (tall och löv) ger reduktion av ett ton nitratkväve per år under cirka tio års tid. Flisfickorna kommer inte kunna svara för någon nitrifikation.

Även i våtmarken är det denitrifikation som är den viktigaste mekanismen för kvävereduktion. Men våtmarken som skapas har även kapacitet för nitrifikation, något som kan vara

betydelsefullt vid anläggningens byggske, då en betydande del av det kväve som tillförs föreligger som ammonium.

För att denitrifikation ska bli effektiv, krävs förutom en riklig produktion av biomassa, att vattenmiljöer där den döda biomassan hamnar är syrefattig. I annat fall kommer biomassan brytas ned med syre i stället för nitrat. För att nitrifikation ska äga rum krävs däremot syre och miljöer utan rik tillgång på kolkälla. I den våtmark som skapas i den blåa zonen kommer finnas mikromiljöer som både tillgodoser nitrifikation och denitrifikation.

I flisdelen, men framför allt i våtmarken, finns en tidsaspekt att beakta när man bedömer kapaciteten för kvävereduktion. I flisdelen är kapaciteten för denitrifikation högst i början för att så småningom avta. Kunskapen om flisens kvalitet som kolkälla över tid är bristfällig men det kan förväntas att kapaciteten har avtagit signifikant efter 5–10 år. Behov att regenerera flisfickorna (byta flis) kan därför förväntas.

Till skillnad från funktionen i flisdelen förbättras våtmarkens reningsfunktion över tid. Detta då det tar minst två till tre år innan vassvegetationen hunnit utvecklas. Studier av våtmarker där vassvegetation etablerats visar dock att kvävereduktionen förvånansvärt snabbt når sitt maximum för att sedan plana ut. Den första behandlingsvåtmarken för kommunalt avloppsvatten nådde sin fulla kapacitet redan efter ett år (Halvarsson, Ridderstolpe m.fl. 2024). Opublicerade data från pilotförsök med grunda vassbevuxna bassänger för kväverening av lakvatten vid en deponi i Skåne visar på oväntat hög initial kvävereduktion. Utvärdering av de tre första åren i drift visar på en kvävereduktion på mer än två ton per hektar och år.

Att anlagda våtmarker så här snabbt kan uppnå hög kväverening kan förklaras av att primärproduktionen i våtmarkens tidiga successionsfas är allokerad till snabbväxande filamenta alger (t.ex. grönslick). Denna växtlighet kan bilda en ansenlig produktion och i biomassan finns mikromiljöer för kväveomvandling. En tolkning av den höga kvävereduktionen i pilotförsöket i Skåne är att kvävet under denna tidiga fas binds in i ett snabbt tillväxande rotsystem.

6.2 Våtmarkens kapacitet vid piren

Det kan förefalla motsägelsefullt att en våtmark med permanent stående vatten kan skapa miljöer för både denitrifikation och nitrifikation. Förutsättningen för nitrifikation är, som nämnts ovan, att syrerika miljöer där nitrifierande bakterier kan utvecklas i skydd från starkt solljus och utan konkurrens från heterotrofa bakterier och predatorer, såsom ciliater och andra protozoer. Sådana miljöer uppstår framför allt i bladmassan på filamenta alger och undervattensväxande växter, samt på sedimenttytor med lågt organiskt innehåll. I den våtmark som anläggs vid piren kommer filamenta alger spontant etablera sig, men undervattensväxter som tillhör den lokala mjukbottenfloran kommer införas aktivt. Arter som kransalger, havsnajas och hornsärv är väl anpassade till den skapade vattenmiljön i blå zonen och kommer snabbt kunna kolonisera bottenarna och breda ut sig i vattenmassan. Redan efter en till två växtsäsonger kan dessa arter förväntas ha skapat mer eller mindre heltäckande undervattenängar i våtmarken. De vassväxter som samtidigt etableras kommer utvecklas långsammare. Först efter några år kan man förvänta att denna vegetation kommer skapa täckande ytor i våtmarken vid piren. Sedimenterad biomassa kommer snabbt brytas ned, varför bottenarna kommer utgöras av den råa lera och gytta som man bygger upp våtmarken med.

Erfarenheter av nitrifikation i våtmarker finns från uppföljningar som gjorts av svenska spillvattenvåtmarker. Vattnet som tillförs sådana våtmarker (till skillnad från våtmarker i jordbrukslandskapet) innehåller förutom nitrat också ammonium. I Sverige finns två stora spillvattenvåtmarker som enbart är uppbyggda med permanent dränkta vattenytor, nämligen Magle våtmark (20 000 pe) i Hässleholm och Ekeby våtmark (99 000 pe) i Eskilstuna.

Båda dessa våtmarker anlades på 1990-talet som kompletterande processdelar till avloppsreningsverken. Utgående halter och flöden har därför följts upp noga, vanligen månadsvis. Sammanställningar av data visar att nitrifikationen i våtmarkerna ligger runt 400–500 kg/ha och år.

Den högsta nitrifikation uppvisar Ekeby våtmark (540 kg/ha och år). Inkommande ammoniumhalt ligger här runt 5 mg/l och utgående halt på 0,9 mg/l. Primärproduktionen i Ekeby våtmark domineras helt av mikroalger, varför en markant årstidsvariation kan noteras med hög nitrifikation sommartid och låg vintertid.

I Magle våtmark domineras vattenmassan i stället av undervattensväxter vilket medför att nitrifikationen där fungerar jämnare under året. I Magle våtmark har nitrifikationen under åren i medeltal legat på 380 kg/ha och år. Inkommande ammoniumhalt har samtidigt legat runt 12 mg/l och utgående halt på 1,7 mg/l.

I båda våtmarkerna har den procentuella ammoniumreduktionen således legat över 85 %. Uppehållstiderna är cirka en vecka i båda våtmarkerna (Halvarsson m.fl. 2024).

Tabell 1. Faktorer av betydelse för nitrifikation i våtmarken under driftskede och i spillvattenvåtmarkerna Magle och Ekeby (Understruken text anger faktor till fördel)

Faktor	Enhet	Våtmarken	Magle/Ekeby våtmarker
Ammoniumhalt	mg/l	<u>10–100</u>	5–12
Specifik ammoniumbelastning	mg/m ² /d	100–300	<u>750–900</u>
Temperatur	C°	2–25	<u>6–30</u>
Näring		Fosfor kan begränsa	<u>Fosfor ej begränsande</u>
Miljöer för nitrifikation		<u>God tillgång på substrat.</u> <u>God syretillgång, liten konkurrens och predation från heterotrofa bakterier och protozoer.</u>	God tillgång på substrat. Ofta syrebrist och <u>hög konkurrens och predation från heterotrofa bakterier och protozoer.</u>
Uppehållstid		<u>Flera månader</u>	6–7 dygn

Jämförs våtmarken med spillvattenvåtmarkerna i Magle och Ekeby framkommer både likheter men också olikheter som sammantaget talar för att våtmarken kommer uppvisa ungefär samma kapacitet för nitrifikation som de båda spillvattenvåtmarkerna (Tabell 1). När våtmarken vid piren är fullt utvecklad bedöms nitrifikationen även där komma att uppgå till ca 0,5 ton/ha och år.

Faktorer som man funnit vara avgörande för denitrifikation i våtmarker är näringstillstånd, nitratkvävebelastning, temperatur och uppehållstid. I det aktuella fallet bedöms fler av dessa faktorer vara gynnsamma. Våtmarken kommer belastas med vatten när nitralthalterna är som högst, dvs när bergmassorna har fyllt ut hela porvolymen i ”tårtbitarna”. Uppehållstiden i våtmarken då anläggningen byggs ut kommer uppgå till ett par veckor och i driftsfasen många månader. Recirkulationen av vattnet gynnar möjligheterna för att kvävet i vattnet ska komma i kontakt med mikromiljöer för denitrifikation. Sommartid kommer det grunda vattnet i våtmarken värmas upp vilket också gynnar reningsprocessen.

Bra sammanställningar av hur denitrifikation fungerar i våtmarker och vilka reduktionsnivåer man funnit i olika studier finns i den systematiska utvärdering som genomfördes av EVIEM ”Hur bra är anlagda och restaurerade våtmarker på att rena vatten från kväve och fosfor” 2016, samt den nyligen publicerade rapporten ”Multifunktionella våtmarker i förändrat klimat” publicerad av Naturvårdsverket 2024. Dessa rapporter visar att kväveavskiljningen i naturliga och anlagda våtmarker i jordbrukslandskapet kan variera mycket, från nära noll till drygt 1 ton per hektar och år. I svenska spillvattenvåtmarker där närmast ideala miljöer kan skapas för denitrifikation, har avskiljningsnivåer på mellan 750 kg och upp till 2 ton kväve per hektar och år uppmätts (Halvarsson m.fl. 2024).

Ett rimligt antagande är att kväveavskiljningen i våtmarken kommer hamna i det mellersta till det övre spannet som redovisas i de nämnda rapporterna. För en hög denitrifikation talar framför allt mycket lång uppehållstid. För en lägre denitrifikation talar framför allt att brist på fosfor kan begränsa växtproduktionen. Här ansätts siffran 500 kg/hektar och år, vilken bedöms vara ett konservativt antagande.

6.3 Kvävereduktion under olika skeden

Som beskrivs i kapitel 5, kommer bergmassor under anläggningsskedet läggas ut i etapper i havet. Under dessa etapper kommer kvävereduktionen vara begränsad, men komponenter för kväveavskiljning byggs in i varje steg, varför förutsättningarna för kvävereduktion i anläggningsskedet successivt förbättras. Nedan diskuteras vilken kvävereduktion som kan förväntas under anläggningsskedets olika etapper och under den fortsatta driftsfasen.

Anläggningsskedet

Fyllningen i havet kommer gå snabbt vilket genererar höga flöden av utträngande vatten. Kvävehalterna kommer successivt att öka från havets bakgrundshalt (cirka 0,3 mg/l) till cirka 100 mg/l i slutet av fyllnadsetappen. Vattentemperaturerna kommer vara genomgående låga från några få plusgrader upp till kanske 10–15 grader sommartid.

Principen för den etappvisa fyllningen och successiva utbyggnaden av kvävereningen illustreras i Figur 4. Tidsåtgången för att färdigställa en etapp planeras till ett år. Det kan dröja något år innan nästa etapp påbörjas.

Med tanke på de höga flödena, den låga temperaturen, tidvis mycket låga kvävehalterna (varav kanske 50% ammonium) och att miljöer för kväverening är under uppbyggnad, kommer kvävereningen under anläggningsskedet vara klart begränsad. I takt med att kvävereningen byggs ut etapp för etapp, kommer dock kvävereningen förbättras succesivt. Under etapp 1 kommer förutsättningarna för kvävereduktion vara mycket begränsad. Under denna är det endast flisdelen som kan bidra till kväverening, men då bara i form av denitrifikation. Under etapp två och tre kommer förutom flisdelen också våtmarkerna etablerats och vatten kan börja recirkuleras mellan flisdelen och våtmark. Så redan i etapp 2 kommer förutsättningarna för kvävereduktion förbättras avsevärt.

Tabell 2 anger lakvattenflöden under olika etapper vid anläggande och drift av norra piren

Tabell 2. Beräknade flöden vid Norra piren som uppkommer vid fyllning i anläggningsskedet samt under driftskedet. Tabellen visar också bedömd kväveavskiljning i de olika skedena uttryckt som procent av förväntad avskiljning vid fullt utbyggtanläggning, se asterisker.

Skede	Flöde	Ettapp	Våtmark		Flisficka ***
			Nitrifikation*	Denitrifikation**	
Anläggningskede	2-5 l/s	ettapp 1	0%	0%	30%
Anläggningskede	2-9 l/s	ettapp 2	50%	50%	75%
Anläggningskede	1-10 l/s	ettapp 3	75%	100%	100%
Driftskede	<0,5 l/s	drift	100%	100%	100%

* Nitrifikation i fullt utvecklad våtmark (100%) uppskattas till 500 kg/ha.år

** Denitrifikation i fullt utvecklad våtmark (100%) uppskattas till 500 kg/ha.år

*** Denitrifikation i flisficka med recirkulation uppskattas till mer än 500 kg/flisficka (en ficka i varje ettapp)

I tabellen redovisas också en kvalitativ bedömning av hur mycket kväve som kan förväntas avskiljas under olika etapper, jämfört med en full utbyggd kvävereduktion vid piren (dvs alla flisfickor byggda och alla våtmarker fullt utvecklade med recirkulation mellan flisfickor och våtmarker).

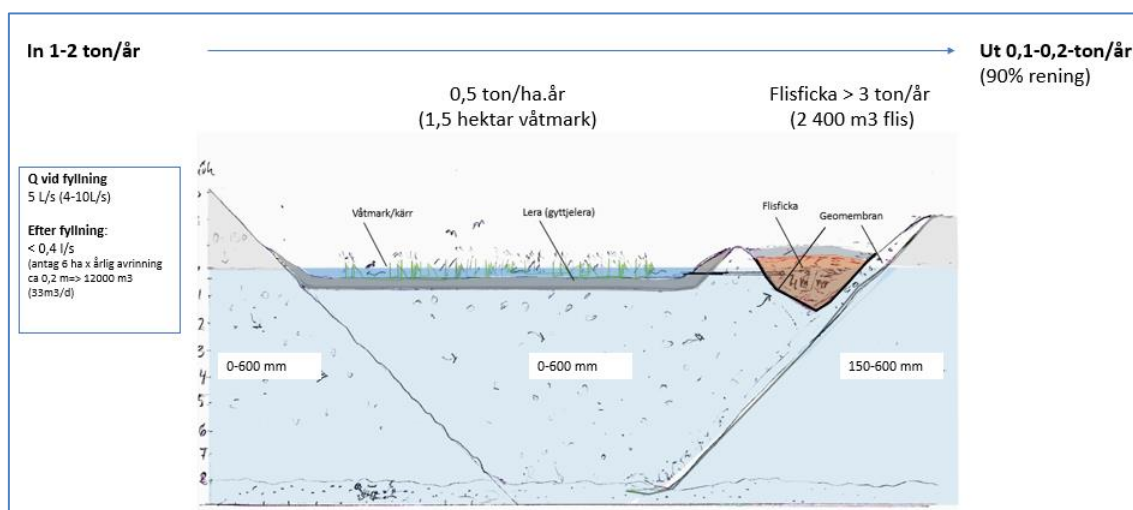
Tabellen visar att reduktionen av kväve under ettapp 1 är låg. I ettapp 2 ökar den tillförda mängden kväve men också kapaciteten för kväverening, varför utsläppen under denna ettapp blir ungefär lika stor som under den första. När tredje ettappen byggs har tre flisfickor och två våtmarker kommit på plats, varför utsläppen minskar ytterligare.

Driftskedet

I driftskedet när flisdel och våtmark nått full kapacitet och flödena minskat drastiskt uppnår reningsystemet sin fulla potential. Våtmarkerna bedöms då avskilja cirka 500 kg kväve per år medan flisfickorna har kapacitet för ännu större avskiljning.

6.4 Kvävebudget

Med ovan redovisade ingångsdata kan en kvävebudget upprättas för det föreslagna behandlingssystemet. I Figur 5 är en sådan beskriven för den norra piren.



Figur 5. Kvävebudget för behandlingssystemet för norra piren.

Kvävebudgeten beskriver ett medelvärde under bygg- och driftfas och visar att man med stor sannolikhet kommer klara målsättningen med 70 % kväveavskiljning över tid. Kritiskt är

egentligen bara första skedet av utbyggnaden (steg 1). Då kommer reningsgraden understiga målet om 70 %.

Under den fortsatta fyllningen (steg 2 och 3) kommer kvävereningen förbättras. Som beskrivs i avsnittet ovan förbättras reningen avsevärt redan under etapp 3, och därefter blir utsläppen mycket små. Under driftperioden kommer kväveutsläppen sannolikt understiga 100 kg per år. I det skedet ligger avskiljningsgraden sannolikt runt 90 % av inkommande mängd.

För den södra delen är förutsättningarna för att klara målsättningarna för kvävereningen mer gynnsamma än på den norra sidan. Detta eftersom de havsvolymer som skall fyllas ut här (volymer utpressat lakvatten) är mindre än på norra sidan.

7 Egenkontroll

Egenkontrollen handlar i grunden om att tillse att alla komponenter nödvändiga för kvävereningen fungerar, till exempel vattenutbytet med havet, att pumpar fungerar, att växtlighet i våtmarken utvecklas som den ska. För detta ändamål bör en drift- och skötselplan upprättas inför att anläggningen tas i bruk.

I egenkontrollen kan också ingå att utföra en utsläppskontroll och en funktionskontroll. De relativt små mängder kväve som det handlar om innebär att fokus här bör läggas på funktionskontroll snarare än utsläppskontroll.

Utsläppskontroll syftar till att bedöma tillförda mängder till och mängdreduktion av kväve i behandlingsystemet.

- Inkommande mängder räknas fram som en funktion av införda bergmassor och kännedom om deras kväveinnehåll.
- Tillförda mängder till behandlingsystemet bedöms utifrån kännedom om kväveläckagets omfattning och tidsförlopp. Indata till detta hämtas från containerförsök för läckagestudier som SKB arbetar med. Denna information paras med mätningar av kvävehalter i porvolymen. Detta görs med observationsrör som placerade radiellt ut mot vallen.
- Utgående mängder kväve är svårare att kontrollera. I det fall man pumpar ut vatten ur våtmarken erhålls information om detta genom haltprovtagning och loggning av utpumpade flöden. Vid självfall och under perioder då det sker ett utbyte av vatten med havet är kontroll av flöden inte möjligt. Därför bör utgående flöden även beräknas. Indata för beräkning är: mängd utträngt vatten (volym införda massor), nederbörd och avdunstning.

Funktionskontrollen syftar till att inhämta kunskap för att så bra som möjligt driva kvävereduktionen. Kontrollpunkter för kan vara provtagning av vattenkemi i porvolymen genom kontrollrör (se ovan), haltprovtagning och loggning av inpumpade flöden till flisdelen, samt haltprovtagning vid dess utlopp. Med funktionskontrollen erhålls underlag för att till exempel besluta om tillsats av flytande kolkälla (i observationsrör), byte av flis mm.

Även om man bygger en tät vall mot havet kommer ett visst vattenutbyte ske mellan vattnet innanför och utanför vallen. Ett sätt att bedöma tätheten dvs vattenutbytet mellan fyllnadsområdet och havet, är att övervaka salthalt (konduktivitet/salinitet) innanför och utanför begränsningsvallen. På detta sätt kan utsötningen och eventuell inblandning av havsvatten i fyllnaden följas. Även vattennivåer innanför och utanför vallen kan loggas.

8 Avveckling av reningsanläggning

Den information som tillkommit under senare tid visar att utlakningen av kväve från upplagda bergmassor kan gå långsammare än vad SKB tidigare antagit. Bergmassor som läggs i havet lakar ut sitt kväve betydligt snabbare än de massor som läggs ovan vattenlinjen. Det betyder att kväve sannolikt kommer läcka ut från bergmassorna under lång tid, kanske 20–25 år. Genom funktions- och utsläppskontrollen kan man klarlägga hur mycket av inkommande mängd kväve som avskiljs år från år, och klargöra när halterna är så låga att driften av behandlingssystemet kan avslutas och våtmarkerna kan sammankopplas med havet.

Vid avvecklingen av anläggningen föreslås att några mindre öppningar görs i begränsningsvallen för att låta våtmarken kommunicera med havet. Detta innebär att fisk kan söka sig in i grundområdet för lek. Det är viktigt att öppningarna inte innebär omfattande vattenutbyte. Detta för att vattnet i våtmarken inte skall kylas ned onödigt mycket och för att minska införsel av mikroalger som grumlar vattnet och konkurrerar med undervattensväxter.

9 Slutsatser och diskussion

- Målet om 70 % kvävereduktion kommer med föreslagna åtgärder uppnås med god marginal sett över hela perioden (drifttiden 20–25 år).
- Sannolikt kommer målsättningen om 70 % kvävereduktion uppnås även under år med maximal kvävetillförsel. Endast tiden när den första etappen byggs och enbart en flisdel deltar i reningen bedöms vara kritisk.
- Efter det att andra etappen byggts bedöms kapacitet för kvävereduktion vara högre än behovet. Möjligen kan därför storleken på kväverensingsanläggningen minskas i andra och/eller tredje etappen.
- Kväverening för utfyllnader av bergmassor i havet kräver komplicerade och resurskrävande åtgärder, speciellt där havet är djupt (som på norra sidan av piren).

9.1 Diskussion

Fyllning med osorterade massor innebär att kvävemängderna blir större än vid fyllning med grövre massor. Om fyllning endast skedde med grova massor skulle kväverening sannolikt inte behövas. Av logistiska skäl och bergmaterialets faktiska storleksfördelning har SKB dock funnit att ett sådant alternativ inte är möjligt. En positiv effekt av att fylla med osorterade massor, är att det skapar en hydraulisk tröghet i fyllnadskroppen. Det innebär att vattenutbytet mot havet minskar och därmed risken för ursköljningseffekter av kväve. Detta i sin tur underlättar möjligheterna till rening.

Utredningen visar att det går att anlägga miljöer för kväverening för de bergmassor som läggs i havet. Konstruktionen är dock krävande och resursåtgången stor.

När anläggningen på den södra sidan om piren är färdigbyggd (dvs när fyllningen där är avslutad) kommer det finnas viss överkapacitet för kvävereduktion i kväverensingszonen med våtmarksdel och flisdel. Denna överkapacitet kan nyttjas för den norra sidan så att hög reningsgrad uppnås redan från början vid utfyllnaden av den första etappen. Detta kan göras genom att pumpa över lakvattnet från den norra till södra sidan. Denna möjlighet innebär att effektivare kväverening erhålls, liksom en enklare och säkrare egenkontroll. Vid projektering bör denna möjlighet studeras.

Referenser

- Halvarsson, L, Ridderstolpe, P, Forkman-Fahlgren, Nyholm E, Svanberg A, 2024. Spillvattenvåtmarker som del i kommunal avloppsrening, Svenskt Vatten Utveckling, Rapport 2024-1.
- Herbert, R och Nordström, A, 2021. Denitrifierande bioreaktorer: rening av kväve i lakvatten, VATTEN – Journal of Water Management and Research 77: 3. 2021
- Land M m.fl., 2016. ”Hur bra är anlagda och restaurerade våtmarker på att rena vatten från kväve och fosfor, EVIEM/Mistra
- Martin Krus, Werner Theuerkorn, Theo Grosskinsky, 2014. TYPHA CULTIVATION IN AGRICULTURE, 2nd International Conference - Water resources and wetlands. 11-13 September, 2014 Tulcea Romania.
- Nilsson, Josefin m.fl., 2024. Multifunktionella våtmarker i ett förändrat klimat, NV Rapport 7147.
- WRS, 2017. Kompensationsåtgärder för kvävereduktion vid Alunda och Gimo avloppsreningsverk, PM nr 2017-1122-A.
- WRS, 2020. Kompensationsåtgärder för kväve – möjliga våtmarksområden och andra åtgärder. Rapport 2020-1513-A.