

U-BESTÅR

Utvecklingsprojekt beständig betong med återvunnen ballast



**Linus Brander, Peter Martinsson, Elisabeth Helsing,
Magnus Döse**

2023-08-15

FÖRORD

Projektet har genomförts under perioden 2021-05-01 - 2023-08-15. Ursprungligen var slutdatum 2022-10-31, men på grund av förseningar som uppstod i alla steg – provinsamling, ballastkaraktärisering och betongprovning – så förlängdes projektet med nästan fem månader.

Arbetet i projektet har genomförts hos både Swerock och RISE. Projektledarskapet har delats mellan Peter Martinsson (Swerock) och Linus Brander (RISE), där Peter varit särskilt ansvarig för projektgruppens arbete och Linus för kontakt och uppföljning med referensgrupp. Avstämning mellan projektledarna har skett löpande. Till sin hjälp har projektledarna haft ett team av kollegor i en projektgrupp som kontinuerligt har följt upp tidsplan, aktiviteter, resultat och vägval. Projektgruppen har utöver projektledarna bestått av:

- Staffan Carlström (Swerock),
- Oskar Linderöth (Swerock),
- Fredrik Jörnlind (Swerock),
- Karolinn Jägemar (Swerock),
- Magnus Döse (Swerock, tidigare RISE),
- Elisabeth Helsing (RISE),
- Ida Gabrielsson (RISE).

Projektet har också haft en aktiv referensgrupp som under projektets gång har beretts möjlighet att ta del av resultat och diskutera dessa, samt ge råd och dåd i olika vägval. Referensgruppsmöte har genomförts 2021-08-31, 2022-06-02 och 2023-06-08. Referensgruppen utgjordes av:

- Oskar Esping, Projektledare C-lab, Thomas Betong
- Erik Liljeby, Specialist ballast/betong, Skanska väg-/betongtekniskt centrum
- Lars Björk, Produktansvarig/revisor ballast, Nordcert
- Martin Walfridsson, Biträdande arbetschef råvaruförsörjning, Swerock
- Martin Laninge, Peab anläggning (beställarsidan)
- Johan Silfwerbrand, Professor i betongbyggande, KTH
- Joakim Olsson, NCC

Projektet har möjliggjorts genom ekonomiskt stöd från SBUF och Nordcert. Vi vill rikta ett stort tack till dessa organisationer. Utöver detta har Swerock, RISE och deltagarna i referensgruppen bidragit med motfinansiering i form av arbetad tid. Vi vill rikta ett stort tack till referensgruppens deltagare för att vi fick ta del av deras värdefulla tid, expertis och erfarenhet.

Huvudförfattare för rapporten var Peter Martinsson, Linus Brander, Elisabeth Helsing och Magnus Döse.

Göteborg 2023-08-15

SAMMANFATTNING

Ett hållbart och ansvarsfullt nyttjande av naturresurser är en högprioriterad fråga för många, från enskilda företag och branscher via myndigheter och regering, till EU-nivå. Vad gäller bygg- och rivningsavfall så är återvinningsgraden låg i Sverige idag och den del som återvinns är generellt i lågvärdiga tillämpningar, tex som fyllnadsmassor (down-cycling). Ökade krav på hållbar användning av naturresurser innebär att återvunna ballastmaterial behöver användas i mer kvalificerade applikationer som betong. Även om regelverk och standarder medger användning i betong så är andelen återvunnen ballast som används i betong försumbar i Sverige. En del av den försiktighet som potentiella användare känner hänger samman med betongens beständighet och hur återvunnen ballast eventuellt påverkar denna. Syftet med detta projekt är att bidra med kunskapsuppbyggnad som behövs för att sänka trösklarna för en ökad användning av återvunnen ballast. Fokus för denna studie är att karaktärisera ballast tillverkad av schaktmassor och genom funktionell provning undersöka hur den kan användas i betong.

Materialprover togs under sommaren och hösten 2021 löpande ut på nyproducerat material från Swerocks anläggningar i Sundsvall och Malmö. Proverna togs ut med ett anpassat intervall för att erhålla ett representativt urval som speglar variationer i råvara och tillverkningsprocess. På varje anläggning togs 12 samlingsprov på grov ballast och 12 samlingsprov på fin ballast (totalt 48 prover). Materialen utvärderades med avseende på svenska krav. Provernas sammansättning, kornstorleksfördelning, densitet och vattenabsorption undersöktes i en inledande karaktärisering. Resultatet visar på en relativt liten variation i sammansättning, densitet och vattenabsorption. Proverna domineras av jungfrulig ballast. Av människan skapade material som tegel, betong, glas, asfalt och slagg förekommer i mindre mängd. Undersökta prover klarar kravet på sammansättning med avseende på alla typer av komponenter utom kategorin "övrigt". Bidragande orsak är att metallurgisk slagg vid analysen kategoriserats som övrigt.

I den efterföljande detaljerade karaktäriseringen genomfördes kemiska analyser, petrografisk undersökning, frostbeständighet och funktionsprovning av potentiellt alkalisilikareaktivitet (ASR) enligt både RILEM AAR-2 och NT Build 295 på tolv av de ursprungliga 48 proverna, sex från vardera anläggningen. Vad gäller RILEM AAR-2 (tillämpas när långsamt reaktiv ballast noterats i provet) så visade samtliga prover på reaktiv ballast. Genomgående för proverna är att de grova materialen expanderade mer än de finare. Vad gäller NT Build 295 (tillämpas när snabbreaktiva komponenter noterats) så är skillnaden mellan de provade materialen stor, där samtliga material från Sundsvall uppvisar en liten expansion. För materialet från Malmö är expansionen stor, särskilt för den grova fraktionen, där resultaten ligger långt över gränsvärdet. Resultatet från den kemiska analysen visade på att materialen klarar kraven på vattenlösliga sulfat- och kloridjoner, syralösliga sulfatjoner, samt totalhalt svavel med god till mycket god marginal. Materialen från Sundsvall uppvisade en vattenabsorption under 1 vikt-% och kan därför användas i alla miljöer där betongen utsätts för frysning. Materialen från Malmö klarar alltså varken vattenabsorptionskravet eller provningskraven med och utan salt och anses alltså över huvud taget inte lämpligt att användas i miljöer där betongen utsätts för frysning.

Funktionsprovning av betong med inblandning av återvunna ballasten från schaktmassor genomfördes på en betongsammansättning anpassad för husbyggnadskonstruktioner ($v_{bt}=0,47$). Då samtliga ballastmaterial visade sig vara ASR-reaktiva tillverkades betongblandningarna med ett bindemedel som förutom vanligt portlandcement innehöll ca en tredjedel mald granulerad masugnsslugg, vilket hämmar ASR reaktionerna. Förutom en referensblandning med enbart naturlig ballast användes ersättningsnivåer (återvunnen ballast/naturlig ballast) på 20 % och 30 % av den grova ballasten, vilket är nivåer som är accepterade enligt gällande regler. Dessutom

ersattes i ett par blandningar 30 % av de fina fraktionerna med återvunnen ballast. Utöver att studera inverkan på betongens färiska egenskaper och hållfasthetsutveckling, undersöktes betongblandningarnas motstånd mot ASR, frostbeständighet (utan salt) och känslighet mot karbonatisering. De slutsatser som kan dras från användningen av den återvunna ballast, från två olika anläggningar för tvätt av schaktmassor, som studerats i detta projekt är:

- Inverkan på de färiska egenskaperna och hållfasthetsutvecklingen var knappast märkbar.
- Det valda bindemedlet visade sig hämma ASR-expansionen så att samtliga blandningar med god marginal klarade gränsvärdet som gäller för ballast som inte innehåller snabbreaktiva komponenter, även om expansionen ökade något med återvunnen ballast, i synnerhet i det tidiga skedet av provningen. För att helt friskriva betongen vad gäller skadlig ASR bör betongsammansättningarna även provas med den metod som gäller om ballasten innehåller snabbreaktiva komponenter.
- Den återvunna ballasten från Malmö, som inte klarade kriterierna för frostbeständighet, gav en viss ökning av avflagningen vid frostprovningen vilket inte materialen från Sundsvall gjorde. Ökningen var dock inte större än att mycket god frostresistens uppnåddes för samtliga blandningar.
- Ersättning med återvunnen ballast ledde inte till någon ökning av karbonatiseringsdjupet, snarare tvärtom.
- Ersättning av 30 % av även den fina fraktionen ledde inte till några avgörande skillnader. Det fanns dock en tendens till ökat flytmedelsbehov och minskat karbonatiseringsdjup.

Utöver de kunskaper om användning av återvunnen ballast från schaktmassor som erhöles i projektet, har ett flertal problem när det gäller tolkning av regelverk och standarder samt provning vid tillämpning på denna typ av ballast identifierats.

Innehållsförteckning

1	INTRODUKTION.....	6
1.1	SYFTE OCH MÅL MED PROJEKTET.....	6
1.2	ANKNYTNING TILL SBUF:S MÅL.....	6
1.3	PROJEKTETS UPPLÄGG OCH GENOMFÖRANDE.....	7
1.4	PROJEKTETS AVGRÄNSNINGAR.....	8
2	BAKGRUND.....	9
3	FRAMSTÄLLNING AV ÅTERVUNNEN BALLAST	11
3.1	VÅSIKTNING AV SCHAKTMASSOR I MALMÖ OCH SUNDSVALL.....	11
3.2	MALMÖ – GEOLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR.....	12
3.3	MALMÖ – INDUSTRIHISTORIA.....	14
3.3.1	<i>Järnverk - Industri-tillverkning.....</i>	<i>14</i>
3.3.2	<i>Tegeltillverkning.....</i>	<i>14</i>
3.3.3	<i>Cement och kalksten.....</i>	<i>14</i>
3.3.4	<i>Allmän kommentar.....</i>	<i>14</i>
3.4	SUNDSVALL – GEOLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR.....	14
3.5	SUNDSVALL – INDUSTRIHISTORIA.....	16
3.5.1	<i>Sågverk.....</i>	<i>16</i>
3.5.2	<i>Järnbruk.....</i>	<i>16</i>
3.5.3	<i>Tegeltillverkning.....</i>	<i>17</i>
3.5.4	<i>Allmän kommentar.....</i>	<i>17</i>
4	INLEDANDE KARAKTÄRISERING AV 48 PROVER	18
4.1	KORNSTORLEKSFÖRDELNING.....	18
4.1.1	<i>Metodik.....</i>	<i>18</i>
4.1.2	<i>Resultat.....</i>	<i>18</i>
4.1.3	<i>Kommentarer.....</i>	<i>19</i>
4.2	VATTENABSORPTION OCH KORNDENSITET.....	19
4.2.1	<i>Metodik.....</i>	<i>20</i>
4.2.2	<i>Resultat.....</i>	<i>20</i>
4.2.3	<i>Kommentarer.....</i>	<i>21</i>
4.3	SAMMANSÄTTNING GROV ÅTERVUNNEN BALLAST.....	22
4.3.1	<i>Metodik.....</i>	<i>22</i>
4.3.2	<i>Resultat.....</i>	<i>22</i>
4.3.3	<i>Kommentarer.....</i>	<i>24</i>
5	DETALJERAD KARAKTÄRISERING OCH PROVNING.....	25
5.1	URVAL AV PROVER FÖR DETALJERAD KARAKTÄRISERING OCH ANALYS.....	25
5.2	KEMISKA ANALYSER.....	26
5.2.1	<i>Metodik.....</i>	<i>26</i>
5.2.2	<i>Resultat.....</i>	<i>26</i>
5.2.3	<i>Kommentarer.....</i>	<i>26</i>
5.3	PETROGRAFISK SAMMANSÄTTNING.....	27
5.3.1	<i>Metodik.....</i>	<i>27</i>
5.3.2	<i>Resultat Malmö.....</i>	<i>28</i>
	<i>Okulär analys.....</i>	<i>28</i>

<i>Analys i mikroskop</i>	29
<i>Kommentarer</i>	29
5.3.3 Resultat Sundsvall	30
<i>Okulär analys</i>	30
<i>Analys i mikroskop</i>	30
<i>Kommentarer</i>	31
5.4 ALKALISILIKAREAKTIVITET	32
5.4.1 Metodik	32
<i>RILEM AAR-2</i>	32
<i>NT Build 295</i>	32
5.4.2 Resultat	32
5.4.3 Kommentarer	35
5.5 BALLASTENS FROSTBESTÄNDIGHET	36
5.5.1 Metodik	36
5.5.2 Resultat	36
5.5.3 Kommentarer	37
6 BETONGPROVNING	38
6.1 VAL AV MATERIAL OCH BETONGPARAMETRAR	38
6.1.1 <i>Val av bindemedel</i>	38
6.1.2 <i>Val av $v_{ct_{ekv}}$</i>	38
6.1.3 <i>Val av ersättningsnivåer av återvunnen ballast</i>	38
6.1.4 <i>Val av återvunnen ballast</i>	38
6.1.5 <i>Val av referensballast</i>	38
6.1.6 <i>Val av bindemedelsmängd och korngradering</i>	40
6.2 BETONGRECEPT	40
6.3 GJUTNING OCH PROVNING FÄRSKA EGENSKAPER SAMT HÄRDNING	41
6.3.1 <i>Provning på hårdnad betong</i>	41
6.4 RESULTAT	42
6.4.1 <i>Sättningsmått, lufthalt och densitet hos den färska betongen</i>	42
6.4.2 <i>Hållfasthetsutveckling</i>	43
6.4.3 <i>Frostbeständighet</i>	45
6.4.4 <i>Motstånd mot karbonatisering</i>	45
6.4.5 <i>Beständighet mot skadlig ASR</i>	46
7 DISKUSSION OCH SLUTSATSER	48
8 REKOMMENDATIONER	52
8.1 TILLVERKAREN AV BALLAST	52
8.1.1 <i>Återvunnen ballast ska CE-märkas</i>	52
8.1.2 <i>Åtgärder som kan behöva vidtas för återvunnen ballast</i>	52
<i>Kännedom om materialet</i>	52
<i>Provningsfrekvens</i>	52
<i>Kontroll av inkommande schaktmassor och upplag</i>	53
<i>Provning och deklarerings av alkaliskreaktivitet</i>	54
<i>Flockningsmedel</i>	54
8.1.3 <i>Radioaktivitet</i>	55
8.2 BETONGTILLVERKAREN	55
REFERENSER	57

1 INTRODUKTION

Detta utvecklingsprojekt initierades mot bakgrund av att branschens kunskap om återvunnen ballast och dess egenskaper är mycket begränsad. En kunskapsuppbyggnad ansågs därför nödvändig för att sänka trösklarna för användning av återvunnen ballast i betong. Även om regelverk och standarder medger användning av sådan ballast idag är andelen återvunnen ballast som används i betong försumbar i Sverige. Den försiktighet som potentiella användare visar hänger samman med osäkerhet kring hur återvunnen ballast påverkar betongens beständighet, samt andra aspekter av återvunnen ballast som betongtillverkaren måste beakta, till exempel en högre porositet och större variation i materialegenskaper jämfört med jungfrulig ballast. Ballast kan återvinnas från olika källor, till exempel rivna konstruktioner, överblivna betongelement, restbetong från betongfabriker eller schaktmassor från anläggningsprojekt. Detta projekt fokuserar på återvunnen ballast från schaktmassor, dess variation i kvalitet och inverkan på betongens beständighet. Resultaten kommer att kunna tillämpas av återvinningsaktörer och användare (betongtillverkare) av denna typ av återvunnen ballast.

1.1 Syfte och mål med projektet

Det övergripande syftet med projektet var att öka kunskapen om återvunnen ballast från schaktmassor och vilken inverkan den kan ha på ny betongs beständighet, framför allt med avseende på alkalisilika-reaktioner (ASR), men även upprepade frysning-upptining och karbonatisering. Vilka naturliga ballastmaterial som för med sig ökad risk för ASR-relaterade skador är relativt väl känt. Däremot är kunskapen låg om vilka eventuella risker beståndsdelar specifika för återvunnen ballast (tex tegel, glas och keramik) medför.

Ett ytterligare syfte var att utreda tillämpligheten på återvunnen ballast från schaktmassor för de två provningsmetoder som används för att avgöra om en ballast är alkalisilika-reaktiv. Den ena är RILEM AAR-2, som används på ballast som inte innehåller snabbreaktiva komponenter och den andra är NT Build 295, som används på ballast där potentiellt snabbreaktiva partiklar har noterats (tex flinta). I detta projekt har båda metoderna använts.

Ett tredje syfte var att undersöka variationen i återvunnen ballast av schaktmassor, vad gäller dess sammansättning, egenskaper och tekniska lämplighet för betongändamål.

1.2 Anknytning till SBUF:s mål

För att resultaten från projektet ska vara direkt tillämpbara och relevanta för industrin så har fokus varit på:

- Inverkan med avseende på beständighet vid inblandningsnivåer som är accepterade i husbyggnadskonstruktioner enligt gällande regelverk, dvs ersättning av upp till 30 % av den grova ballasten. För fin sortering finns inga uttalade regelkrav och även här har en ersättningsnivå på 30 % provats.
- Svenska förhållanden vad gäller klimat, geologiska förutsättningar och återvunnen ballast.
- Att ta fram rekommendationer/riktlinjer till återvinningsföretag och betongtillverkare för hur återvunnen ballast för betong ska hanteras i praktiken.

Resultaten i denna rapport är till nytta för potentiella användare och köpare, som vill välja en mer resurseffektiv betong och samtidigt vara säkra på att den inte ger sämre beständighet än betong med bara jungfruliga råvaror. Offentliga och icke-offentliga upphandlare och beställare

som vill ställa krav på mer miljövänliga och resurshushållande alternativ behöver ha kännedom om bäst praxis och vad som är praktiskt möjligt, och även för dem kan rapporten vara till nytta.

Återvinningsaktören har nytta av rapporten för att bättre styra materialhantering och återvinningsprocess, när det är tydligt vilka krav och förväntningar som finns på betongballast.

Sammantaget stöder dessa nyttor och den direkta tillämpbarheten framförallt SBUF:s mål om Minskad klimatpåverkan, Minskad energianvändning och Cirkularitet.

1.3 Projektets upplägg och genomförande

Arbetet var sekventiellt uppdelat i tre arbetspaket. De två första fokuserade på ballast respektive betong, medan det tredje handlade om sammanställning av resultat som gjorts, utvärdering och analys av dessa, samt framtagande av riktlinjer till användare (återvinningsaktörer och betongproducenter). Mellan och inom de två första arbetspaketen fanns avstämningspunkter, där beslut om detaljerna i påföljande arbetspaket eller aktivitet togs, baserat på resultaten från just avslutad aktivitet.

I **Arbetspaket 1** samlades 48 prover in från två av Swerocks tvättanläggningar för produktion av återvunnen ballast; hälften vardera från den i Malmö och den i Sundsvall. Swerock utförde inledande karaktärisering (screening) av alla proverna, varefter tolv prover (sex från vardera anläggningen) valdes ut och skickades till RISE laboratorium i Borås för en detaljerad karaktärisering. Beslut, planering och uppföljning gällande provtagningsobjekt (anläggning, sortering, etc.), provtagningsstrategi- och metodik, provlogistik, omfattning av och urvalskriterier av den inledande och den detaljerade karaktäriseringen, samt resultat, avhandlades vid projekt- och referensgruppsmöten. Den inledande karaktäriseringen omfattade siktkurva, korndensitet, vattenabsorption och ingående beståndsdelar enligt SS-EN 933-11. Den detaljerade karaktäriseringen omfattade petrografisk analys (okulär och med mikroskop), kemisk analys (vattenlöslig klorid och sulfat, syralösligt sulfat, total svavelhalt), ASR-provning enligt RILEM AAR 2 och NT Build 295, samt ballastens frostbeständighet.

Arbetspaket 2 fokuserade på gjutning och provning av betong, som innehåller ett urval av ballastproverna från den detaljerade karaktäriseringen i Arbetspaket 1. Målet var att bestämma hur den återvunna ballasten påverkar betong i färskt och hårdnat tillstånd. Provning av beständighet omfattade funktionsprovning med avseende på ASR, frostbeständighet och motstånd mot karbonatisering. Då samtliga ballastprover visat sig vara alkalisilika-reaktiva valdes ett bindemedel som har förmåga att hämma ASR-reaktioner. Det var därför intressant att se hur det specifika betongreceptet, inklusive typ av bindemedel och ersättningsgrad av återvunnen ballast, påverkade ASR-expansionen i en representativ betong. Betongrecept, val av vilka av de tolv proverna som skulle användas, ersättningsgrader, referensballast, bindemedelstyp och målsättning för konsistens avhandlades i projektgruppens möten och det andra referensgruppsmötet. Elisabeth Helsing tog fram specifikt recept för varje blandning, med utgångspunkt från ett av Swerocks betongrecept. Betong gjöts i RISE laboratorium i Borås. All provning genomfördes av RISE, förutom provning av frostbeständighet vilket genomfördes av Swerock i Helsingborg.

I **Arbetspaket 3** sammanställdes och utvärderades resultaten från projektets alla delar: insamling av provmaterial, ballastkaraktärisering och betongprovning. Baserat på resultat och slutsatser från projektet sammanställdes också riktlinjer till betongproducenter och återvinningsaktörer om hur återvunnen ballast bör hanteras och användas. Dessa bidrar till att öka förtroende för produkten och ger bland annat vägledning för hur variationer i kvalitet och porositet kan hanteras. Inriktningen på återvinningsaktören är för att denne bättre ska förstå betongtillverkarens behov, förutsättningar och specifikationer, så att hantering och processer kan

modifieras på ett sätt som höjer kvalitet, spårbarhet och homogenitet på den återvunna ballasten. Helt enkelt att skifta fokus till att kunna erbjuda en bra betongballast, snarare än ett bra avfall.

1.4 Projektets avgränsningar

Undersökt ballast omfattar endast återvunna schaktmassor, dvs material som uppstår som överskott i anläggningsprojekt.

Provningarna har valts med husbyggnadsbetong som utgångspunkt; betong utsatt för havsvatten eller avsningsmedel behandlas inte.

Den största mängd grov återvunnen ballast (minsta kornstorlek 4 mm) som använts överensstämmer med högsta tillåtna mängd enligt gällande betongstandard SS 137003, som är 30 %. Då inga krav anges för finkornig återvunnen ballast i SS 137003 har blandningar med 30 % inblandning av finfraktion provats.

2 BAKGRUND

Ett hållbart och ansvarsfullt nyttjande av naturresurser är en högprioriterad fråga för många, från enskilda företag och branscher via myndigheter och regering, till EU-nivå. Detta illustreras bland annat genom olika branschernas färdplaner för klimatneutral konkurrenskraft, EU:s mål om återvinning av minst 70% av bygg- och rivningsavfallet, samt tidigare regerings strategi för cirkulär ekonomi (Cirkulär ekonomi – strategi för omställningen i Sverige, M2020/01133) [1], med visionen om ett samhälle där resurser används effektivt och ersätter jungfruliga material. Vad gäller bygg- och rivningsavfall så är återvinningsgraden låg i Sverige och den del som återvinns är generellt i lågvärdiga tillämpningar, tex som fyllnadsmassor (down-cycling). För att behålla det investerade värdet i bygg- och rivningsavfall, vad gäller ekonomi, koldioxidavtryck och kvalitet, så bör många sådana material vara lämpligare för mer högvärdiga applikationer, såsom ballast i betong.

Användning av återvunnet rivningsmaterialavfall som råvara till ballast för användning i ny betong kräver enligt den svenska tillämpningsstandarden för betong (SS 137003) att den karaktäriseras och klassificeras. Klassificeringen av grov ballast (korndiameter större än 4 mm) sker enligt standarden för betongballast (SS-EN 12620) och bygger på halterna av ren betong, sten och andra beståndsdelar såsom tegel, bituminösa partiklar, glas och metall. Dessa halter bestäms enligt testmetod SS-EN 933–11. Eftersom SS-EN 12620 är harmoniserad ska återvunnen ballast CE-märkas, enligt i stort sett samma förfarande och system som för ballast producerad från täkt. Skillnaderna ligger i den nämnda klassificeringen med avseende på ingående material samt att kvalitetssystem och tillverkningskontroll måste anpassas för att passa den här formen av ballastproduktion (dvs schaktmassor hämtas från olika geografiska lokaler till en central tvättanläggning).

Klassificering av grov återvunnen ballast baseras som nämndes ovan på halterna av de olika ingående beståndsdelarna: Typ A är renare med avseende på krossad betong och sten, medan ökat inslag av tegel, bituminöst material, glas, metallbitar och liknande material sänker kvaliteten till Typ B. Uppfylls inte Typ B-kraven får materialet inte användas alls som betongballast. En tidigare otydlighet i SS137003 försvann i och med senaste utgåvan. Tidigare gällde att det för Typ A krävs att minst 90 % av materialet utgörs av betong och minst 95 % är betong plus sten, vilket strikt innebar att ett material som består av 95 % betong OCH sten, varav 80 % är betong och 15 % är sten, inte klarar kraven för Typ A, medan det hade gjort det om 90 % varit betong och 5 % sten. I nuvarande utgåva (2021) har det enskilda kravet på betonginnehåll tagits bort och endast betong och sten totalt sett är intressant; det är också det uppdaterade regelverket vi förhåller oss till i detta projekt.

Det finns restriktioner på hur stor andel av ballasten som får ersättas med återvunnen dito i en given betongblandning, där andelen baseras på den återvunna ballastens kvalitetsklass och den nya betongens avsedda exponeringsmiljö. Enligt SS 137003 så får 50% av den grova ballasten ersättas med återvunnen dito i ny betong avsedd för den snällaste exponeringsmiljön (X0, i princip inomhusbetong); i mer utsatta miljöer sjunker den tillåtna ersättningsgraden till 0 % i de allra strängaste. För husbyggnadsbetong i övrigt gäller att 30 % av den grova ballasten får ersättas med Typ A. Då vanligtvis cirka hälften av ballastmängden utgörs av grov ballast så halveras i runda tal siffrorna om man beräknar i förhållande till total ballastmängd. Begränsningen i ersättningsgrad har framför allt att göra med att man vill reducera eventuella risker vad gäller den nya betongens beständighet. Hur finare fraktioner av återvunnen ballast får användas anges inte i SS 137003. Det finns heller inga specialregler i ballaststandarden för sådan ballast, utöver vad som anges när det gäller ASR nedan.

Att en produktstandard tillåter användning av återvunnen ballast i betong är en sak, att sådan återvinning ännu inte kommit i gång i praktiken är en annan. I EU-projektet RE4 [2], som pågick 2016-2020, byggdes två betonghus med betongelement där betongen baserades på rivningsavfall. RISE deltog som aktiv part och bidrog bland annat med karaktärisering och klassificering av återvunnen ballast från Frankrike, Tyskland och England, samt utveckling av recept för självkompakterande och högpresterande betong baserad på återvunnen ballast. Med bibehållna industrikrav gick det att ersätta 50–90 % av den jungfruliga ballasten med återvunnet rivningsavfall. Ett av betonghusen står nu vid Creagh Concretes anläggning några mil väster om Belfast, Nordirland, och används som kontorsbyggnad. Motsvarande har inte gjorts i Sverige och för svenska förhållanden.

Även om det alltså är fullt möjligt att tillverka betong med god arbetbarhet och hållfasthet så finns det fortfarande områden där mer kunskap måste tas fram, för att öka potentiella användares tillit till återvunna material. Ett sådant område är beständighetsaspekten alkalisilika-reaktivitet (ASR). Reaktiv ballast kan ge skador på betong inifrån över tidshorisonter på decennier, till följd av att vissa silika-faser (silika = kiseldioxid: SiO_2) i ballasten är relativt lösliga i alkalisk miljö och i cementpastans porlösning reagerar med alkalimetaller och vatten, varvid expanderande reaktionsprodukter bildas. Detta leder till att betongen spricker, med reducerad hållfasthet och ytterligare vatteninträngning (och potentiellt ökad armeringskorrosion) som resultat (för exempel på skadade objekt, se Hållbart samhällsbyggande med beständig betong, Betongrapport 18 [3]). Oavsett den återvunna ballastens kvalitetsklass (Typ A eller B) så rekommenderar standarden för betongballast (SS EN 12620) att ”så länge inte motsatsen bevisats ska återvunnen ballast betraktas som potentiellt alkalisilikareaktiv (ASR)”.

Vanligtvis väljs metod för bruksprovning av ASR efter vad som identifieras från petrografisk analys (RILEM AAR-1): om inga potentiellt snabbreaktiva partiklar noteras så rekommenderas RILEM AAR-2, om potentiellt snabbreaktiva partiklar såsom flinta noteras så rekommenderas NT Build 295. Det är dock oklart hur främmande material som kan påträffas i återvunnen ballast ska bedömas och klassas med avseende på reaktionshastighet. Exempel på sådana material är glas, tegel och slagg. Det är inte säkerställt vilken av metoderna som bäst detekterar potentiell ASR i alla typer av återvunnen ballast, oavsett dess sammansättning.

I SS 137003 (2021) hänvisas till Betongrapport 18 [3] när det gäller bedömning av risken för ASR på ballast, vilket innebär ett mer nyanserat och mer specificerat förfarande för att bedöma risken för ASR än i den tidigare versionen. Syftet är att även ballast med viss alkalisilika-reaktivitet ska kunna användas i vissa tillämpningar och under vissa premisser, tex att bindemedel som hämmar ASR används. Det finns dock en otydlighet i Betongrapport 18 när det gäller val av provningsmetod. När det inte finns snabbreaktiva partiklar ska RILEM AAR-2 användas och om det finns sådana (> 0 %) ska NT Build 295 användas. En strikt tolkning är att en ballast där det finns både snabbreaktiva (kanske 1 %), men betydligt fler icke snabbreaktiva, partiklar bara ska provas med NT Build 295. Om denna metod verkligen återspeglar den risk för skadlig ASR som föreligger i sådana fall är inte klarlagt. I en kommande revidering kommer det troligtvis att införas att man i fall med båda typerna av reaktiva partiklar åtminstone initialt ska prova med båda metoderna.

3 FRAMSTÄLLNING AV ÅTERVUNNEN BALLAST

Ballast från tvättade schaktmassor från två olika våtsiktsanläggningar med skilda geografiska och geologiska upptagningsområden har använts i projektet.

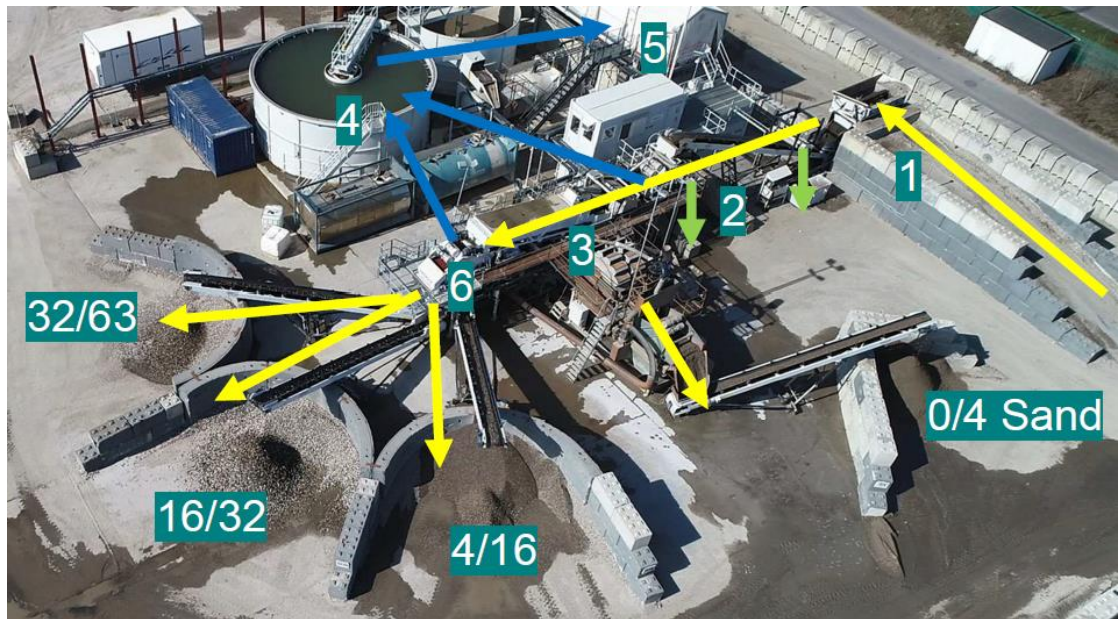
3.1 Våtsiktning av schaktmassor i Malmö och Sundsvall

På Swerocks våtsiktsanläggningar i Sundsvall och Malmö tar man emot rena och förorenade schaktmassor som uppstår som överskott i lokala anläggningsprojekt. Schaktmassorna används som råvara vid produktion av ballastprodukter. Anläggning i Malmö driftsattes 2017 och anläggning i Sundsvall driftsattes 2020. Kapaciteten i Malmö är ca 50 ton ballast per timme, vilket motsvarar en årsproduktion på ca 75 000 ton ballast per år. Kapaciteten i Sundsvall är likvärdig med den i Malmö men begränsas av en kortare produktionsperiod på grund av kallare klimat (Personlig kommunikation med Martin Walfridsson, Swerock AB). Schaktmassor utgör i många fall en lämplig råvara för att tillverka ny ballast för användning inom bygg och anläggningssektorn. De lokala geologiska förutsättningarna och de verksamheter som bedrivits i produktionsanläggningens upptagningsområde kommer att vara styrande för egenskaperna hos den färdiga ballastprodukten. Massornas egenskaper och föroreningsgrad är således avgörande för hur massorna kan användas. Inkommande massor är vanligtvis karaktäriserade i en markteknisk undersökningsrapport (MUR-rapport), vilken innehåller uppgifter om jordart och föroreningsgrad. Dessa uppgifter används vid bedömning av schaktmassornas lämplighet för användning till ny ballast. MUR-rapporten innehåller dock inte uppgifter om tekniska egenskaper för specifika användningsområden som tex ballast till betong. Schaktmassor med hög andel partiklar i sand- och grusfraktionerna har goda förutsättningar för att användas som råvara vid tillverkning av ny ballast. Genom tvättprocessen är det möjligt att avlägsna föroreningar från sand- och grusfraktionerna.

Processflödet i Malmöanläggningen visas i Figur 1. Anläggningen i Sundsvall skiljer sig något från Malmö, men principen är dock densamma.

1. Inkommande schaktmassor läggs på upplag på anläggningsområdet. Schaktmassorna tippas över ett galler för att sortera bort grova partiklar. Därefter tippas materialet i våtsiktens matarficka.
2. Materialet siktas i en försikt. Metaller tas bort genom magnetseparation.
3. Materialet skrubbas i en roterande tvättskruv och sand avskiljs i sandsorteringsenhet. Sanden klasseras i en cyklon där silt och lera avskiljs.
4. Slurryn med ler- och siltpartiklar från tvättprocessen transporteras till en sedimentationstank. Flockningsmedel tillsätts i slurryn för att sammanbinda partiklarna.
5. Vattnet pressas ut ur de sedimenterade ler- och siltpartiklarna i en filterpress, varvid en rest bestående av förorenade filterkakor erhålls. För öka filterpressens kapacitet tillsätts kalk till ler- och siltpartiklarna.
6. Tre olika grussorteringar siktas fram och läggs på upplag.

Produkterna från anläggningarna är CE-märkta för användning till obundna lager enligt europastandarden SS-EN 13242. Detta innebär att produkterna fortlöpande provas enligt standardens system för tillverkningskontroll. för att styrka överensstämmelse gentemot produktens deklarerade egenskaper.



Figur 1. Tvättanläggningen i Malmö betraktat från ovan. I bilden har sorteringarna (0/4, 4/16, 16/32 och 32/63) som förädlas fram som ny råvara markerats. De olika stegen är markerade med siffran "1" till "6".

3.2 Malmö – Geologiska förutsättningar

Urberget inom området kring Malmö domineras av gnejser som hör till den sydvästsvenska gnejsprovinzen. Förutom gnejser påträffas metabasiter och granitoider vilka bär spår av de mycket kraftiga metamorfa händelser som delar av sydvästra Sveriges berggrund påverkats av. Inom området finns också basiska gångbergarter i form av diabaser av skilda åldrar. Mest vanligt förekommande är de ca 1000 miljoner år gamla, nord-sydligt orienterade hyperitdiabaserna, vilka är knutna till den s.k. Protoginzonen och är vanligt förekommande i Dalby och Södra Sandby ca 25 km NO om Malmö.

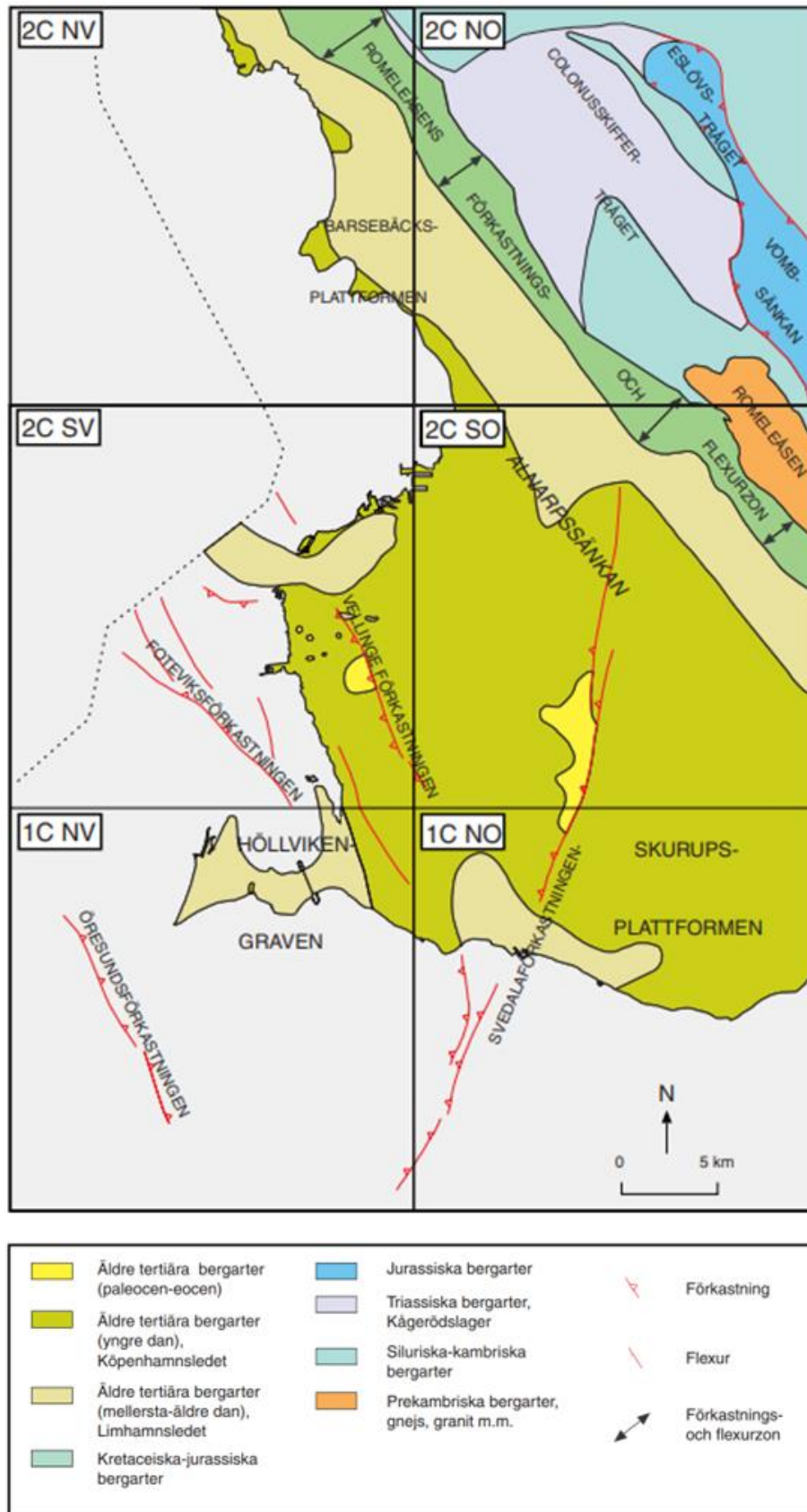
Protoginzonen utgör en stortektonisk gräns, som från Romeleåsen (Figur 2) kan följas genom hela Småland, upp genom Värmland och vidare in i Norge. Zonen kan sägas bilda en ungefärlig gräns mellan den sydvästsvenska berggrunden och den äldre berggrunden i öster.

Den sedimentära berggrunden runt Malmö domineras av tertiära kalkstenar (Limhamns–Köpenhamnskalkstenar) med en ålder av ca 60-70 miljoner år. Köpenhamnsledet består av en mer eller mindre bioturberad finklastisk kalksten med flintlager av varierande mäktighet. Dessa bildar också ytberggrund i området sydväst om Romeleåsens förkastnings- och flexurzon. I denna zon bildar också triassiska sedimentära lager (<60 miljoner år) ytberggrund.

Norr därom, i Colonusskifferträget, överlagras ett tunt täcke av Kågerödsbergarter (upp till ca 70 m) den siluriska skiffern (ca 400 miljoner år). Dessa bergarter domineras ofta av arkos och sandsten med leriga lager av varierande mäktighet (Sivhed m.fl. 1999 [4]).

I Vombsänkan och dess förlängning åt nordväst, Eslövstråget, bildar jurassiska bergarter av främst arkos, skiffer, sandsten och lersten berggrundsyta. Berggrundskartan i Figur 2 ger en översiktlig bild av den komplexa geologin i närområdet till Malmö.

Det kan således förväntas att en stor andel av det material som förekommer i schaktmassorna i Malmö-området främst härrör från bergarter av gnejs, kalksten, skiffer, lersten, silt-/sandsten och flinta.



Figur 2 Utsnitt från "Beskrivning till berggrundskartorna 1C Trelleborg NV och NO samt 2C Malmö SV, SO, NV och NO" av Sivhed m.fl. 1999 [4] med tillhörande teckenförklaring i området kring Malmö.

3.3 Malmö – Industrihistoria

3.3.1 Järnverk - Industri-tillverkning

Ett av de mest kända industri-varumärkena i Malmö är Kockums (Frans Henrik Kockum).

År 1840 grundades Kockums Mekaniska Verkstad, ett gjuteri och en mekanisk verkstad som inledningsvis tillverkade lantbruksredskap, bränneriapparater, spisar, ugnar och från 1850 även järnvägsvagnar.

Satsningen under 1840- och 1850-talen på metallindustrier i Småland och Blekinge blev grunden till Kockums Jernverk AB, som bildades efter Frans Henrik Kockums död 1875. År 1870 anlades också ett skeppsvarv i anslutning till verkstaden.

3.3.2 Tegeltillverkning

I Skåne var det först i och med industrialismen (tidigt 1800-tal och framåt) som tegel började massproduceras och därmed blev ett billigt byggnadsmaterial. Uppbyggnaden av det täta järnvägsnätet gjorde samtidigt att teglet kunde transporteras i stor skala från tegelbruken. Skåne fick en blomstrande tegelindustri, där avstånden mellan bruken var små.

I slutet av 1800-talet var tegel det dominerande husbyggnadsmaterialet i Skåne. Vid den här tiden var ännu ett trettiotal tegelbruk i Skåne aktiva, med ett rikt urval, alltifrån de mörkare teglen från Börringe (30 km SO om Malmö) och Helsingborgs Ångtegelbruk över de ljusare, mer klarröda sorterna från Minnesberg och Veberöd till gul eller gulgrön sten från fabrikerna i Kanik och Tjustorp (Ca 50 km NO om Malmö).

Även Kockums drog fördel av sin tegeltillverkning i Skåne (Lomma). I samband med ökad tegeltillverkning specialiserade man sig också på cementtillverkning i det familjeägda bolaget vilket lade grunden för det 1871 bildade Skånska Cement AB, idag mer känt som Skanska.

3.3.3 Cement och kalksten.

I regionen finns en av de stora kalkcementtillverkarna, Limhams cementbruk, som använde som basråvara den kalksten som underlagrar Malmö Stad. Så långt tillbaka som 1500-talet kan man spåra kalkbränningen i Limhamn och 1622 grundades Limhamns kalkbruk. Malmös sydvästra förort Limhamn är som nämnts liksom övriga staden belägen på rika kalkstenslager och här har bränts kalk under lång tid. Ett äldre namn för kalk är lim, ”Limhamn” betyder alltså Kalkhamn.

I äldre tider var det främst murbruk som den brända kalken användes till. Under lång tid har det därefter utgjort underlag för cementtillverkning.

3.3.4 Allmän kommentar

Det är rimligt att förvänta sig att delar av schaktmassorna från olika delar av Malmö och dess närhet således kan ha rester av kalksten, kalkstens-slagg/rester uppkommen vid produktion av murbruk/cement, tegelmaterial från rivna byggnader eller fyllnadsmaterial från överskott och rimligen också en del olika järnrestmaterial (slag) från produktionen i Kockums. Detta utöver de bergarter som utgör del av de lösa avlagringarna och berggrunden kring Malmö.

3.4 Sundsvall – Geologiska förutsättningar

Detta avsnitt baseras på Person m.fl. 2010 [5]. Området kring Sundsvall domineras av bergarter som bildades under den Svekokarelska orogenesen (bergskedjebildningen) för ca 2 miljarder år sedan. Äldst i det aktuella området är Svekofenniska ytbergarter (bergarter ursprungligen avsatta på jordytan), vilka bildades när stora mängder sediment avsattes i det dåtida havet för minst 1900 miljoner år sedan, i det så kallade Bottniska bäckenet (även kallat Bottniska bassängen).

Ytbergarterna intruderades sedan av djup- och gångbergarter. Ovan nämnda bergarter utsattes för veckning och metamorfos (omvandling) när de fördes ner i jordskorpan och utsattes för höga temperaturer och högt tryck. I vissa områden var omvandlingen så stark att bergarterna helt eller delvis smälte. I områden där bergarterna delvis smälte, och där smältorna stannade kvar i ursprungsbergarten, bildades olika typer av migmatiter. En del smältor steg uppåt i jordskorpan och ansamlades till större kroppar (magmor) vilket gav upphov till en ny generation djup- och gångbergarter, som kallas senorogent eller syn- till senorogent svekokarelska.

Efter den svekokarelska orogenesisen intruderades den äldre berggrunden av granit (1500 miljoner år gammal) och diabas (1200–1270 miljoner år gamla) som gångar och flackt liggande skivor.

På Alnön strax utanför Sundsvall finns spår av magmakammare och gångar (i form av flera delintrusioner) bestående av alkalina och karbonatitiska bergarter som är unika i Sverige. De bildades under en period av vulkanism för ca 550–600 miljoner år sedan.

Nedan följer en genomgång av områdets bergarter.

Svekofenniska ytbergarter – metagråvacka (>1870 miljoner år)

Bergarterna är ställvis välbevarad och ställvis starkt metamorfoserad med kraftig åderbildning. I Figur 3 är dessa ytbergarter markerade med blå kulör.

Bergartstypen är dominerande över hela Sundsvallsområdet och kan förväntas utgöra en större del av de återvunna material som förekommer i schaktmassorna.

Tidigorogena intrusivbergarter – (1870-1840 miljoner år)

- Gabbro förekommer i mindre komplex. Bergarten är ofta metamorft präglad och benämns ofta amfibolit.
- Listporfyriska graniter och tonaliter, 1870 miljoner år gamla (Welin m.fl. 1993, [6]).
- Diatexitiska migmatiter. Upptar en stor del av det karterade området. I migmatiterna är ursprungsbergarten (protoliten) nästintill helt uppsmält där bergarten omkristalliserat.

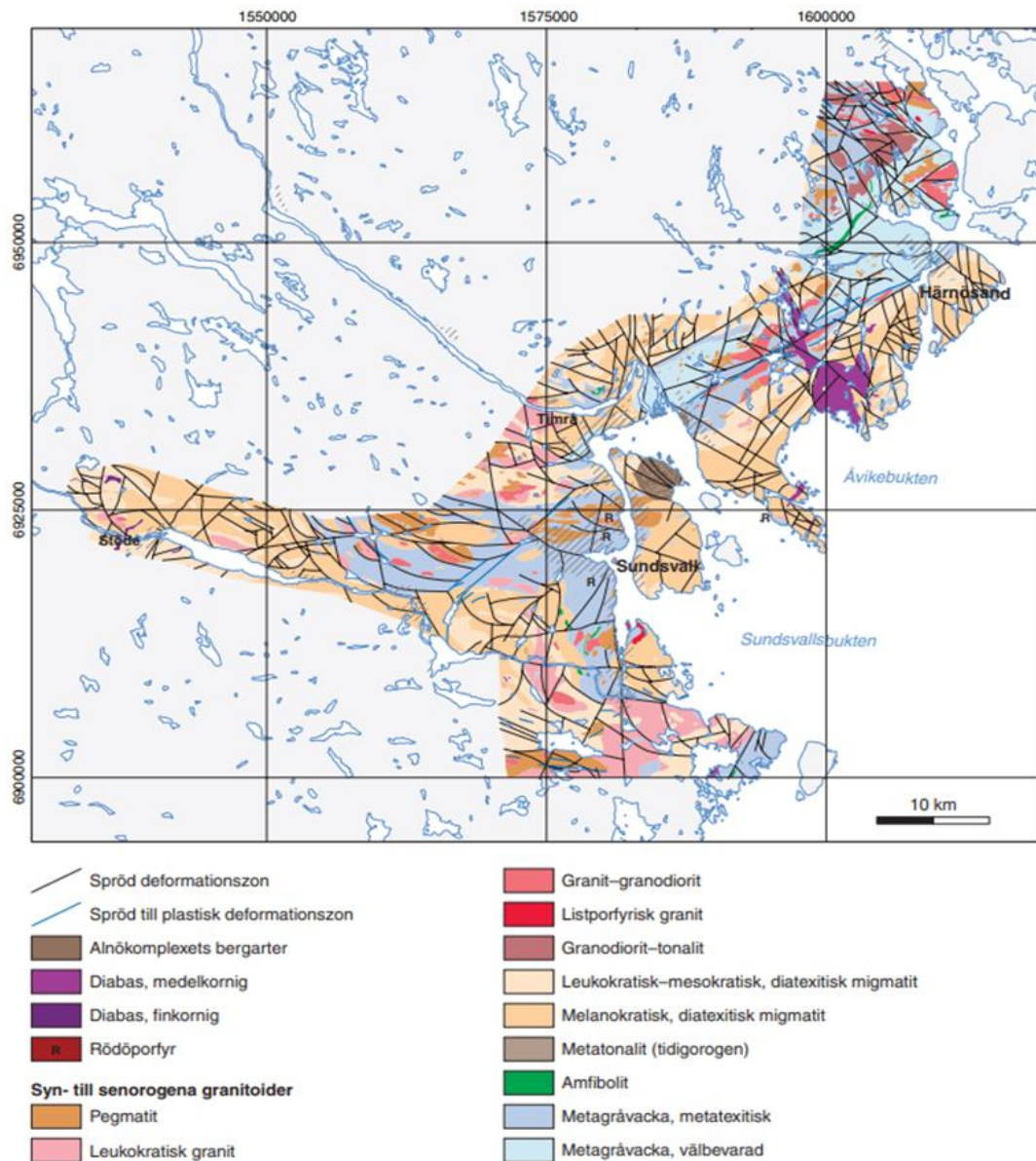
Syn- till senorogena granitoider (1840-1800 miljoner år)

- Leukokratisk granit - en i regel ljusgrå till ljusgrå metagranit (sprungen från uppsmält sedimentådergnejs).

Postorogena bergarter (<1800 miljoner år)

- Yngre diabas (1200-1270 miljoner år). Diabasen är i huvudsak medel- till grovkornig och massformig och förekommer främst i norra delarna av Sundsvall.
- Alkalina och karbonatitiska bergarter (Alnökomplexet) återfinns i en på Alnön belägen huvudintrusion. Dessa bergarter kan uppträda som tunna gångar (0,2-0,5 m) i de tidigare nämnda bergarterna.

Sammantaget kan förväntas att de tidigorogena bergarterna av granodiorit-granit, migmatitisk diatexit, leukokratisk granit samt metagråvacka utgör huvuddelen av de material som förekommer i schaktmassorna.



Figur 3 Förenklad berggrundskarta med tillhörande bergarter kring Sundsvall. Utdrag från "Beskrivning till bergkvalitetskartan – Sundsvall-Timrå-Härnösand (Persson, 2010, [5])

3.5 Sundsvall – Industrihistoria

3.5.1 Sågverk

Den huvudsakliga näringen i Sundsvallsregionen har varit timmerproduktion, där merparten har dominerat i bygden från 1600 till 2000-talet.

3.5.2 Järnbruk

Järnbruk i Sundsvallsregionen har anor från sent 1600-tal, där Galtströmmen är en av det mest kända. Bruket är beläget ca 15 km SSO om Sundsvall. I Bruket tillverkade stångjärn.

I slutet av 1800-talet var detta Medelpads största industrianläggning. 333 personer fördelade på 84 hushåll bodde vid bruket 1870. Järnbruket lades ner 17 januari 1916. Där producerades ca 1200 skeppspund stångjärn per år, motsvarande 163 ton, som utskeppades till Stockholm. Bruksmiljön är bevarad med masugn och stånghammare som drevs av vattenkraft och även kranar som del av utskeppningsmiljön. Bruket ägs idag av SCA (Svenska Cellulosa AB).

Flera järnbruk uppstod under sent 1700 till 1800-talet, där några även förekom i NO om Sundsvall i Timrå Kommun. Nämnas bör Lögdö Bruk, ca 20 km NO om Sundsvall med masugnar i Hässjö.

Vad restmaterialet vid tillverkning som masugnsslagg användes eller var det deponerade är delvis oklart.

3.5.3 Tegeltillverkning

En storskalig tegeltillverkning förekom i Hudiksvallsregionen (ca 40 km syd om Sundsvall) under 1920-1970-talen. Forsa tegelbruk levererade i början av 1940-talet ca 500 000 ton tegel i sin närregion. Olika varianter av tegel tillverkades med olika färg (gul och röd) och med olika densitet. Redan under sent 30-tal kvalitetskontrollerades teglet av Statens Provningsanstalt (SP) enligt Direktör Bergman (Hudiksvalls tidning, 1939, [7]).

Var tegelrester som inte godkändes i produktionen förlades står inte att finna.

3.5.4 Allmän kommentar

Det är rimligt att förvänta sig att delar av schaktmassorna från olika delar av Sundsvallsregionen och dess närhet kan innehålla en del slaggprodukter eller tegel i mindre mängd. Omplacering av byggnadsmassor i olika delar av kommuner saknar tyvärr ofta god spårbarhet, men dessa produkter kan således förväntas förekomma som rester i byggnadsmaterial förutom de dominerande bergarterna i området.

4 INLEDANDE KARAKTÄRISERING AV 48 PROVER

Prover togs löpande ut från nyproducerat material (tvättade och siktade schaktmassor) under sommaren och hösten 2021. Proverna togs ut med ett anpassat intervall för att erhålla ett representativt urval som speglar variationer i råvara och tillverkningsprocess. Varje prov var ett så kallat samlingsprov, då minst tre delprov togs vid varje tillfälle och slogs samman till ett prov; varje sådant samlingsprov var på minst 600 kg. Vid varje anläggning togs tolv samlingsprov på grov ballast och tolv samlingsprov på fin ballast, vilket ger totalt 48 prover. Provemballaget märktes med leverantör (anläggning), sortering och provtagningsdatum och skickades till Peabs Asfalts laboratorium i Hisings Backa, där samtliga 48 materialprover karaktäriserades i en inledande screening avseende grundläggande egenskaper för användning som ballast till betong.

4.1 Kornstorleksfördelning

Kornstorleksfördelning beskriver hur stora korn det är i materialet och hur stor andel av materialet som är i ett visst storleksspann. Kornstorleksfördelningen har tillsammans med kornformen stor inverkan på ballastens packningsegenskaper. Ballastens packningsegenskaper ger en uppfattning om den mängd cementpasta som behövs för att skapa en rörlighet i färsk betong och därmed också betongens vattenbehov.

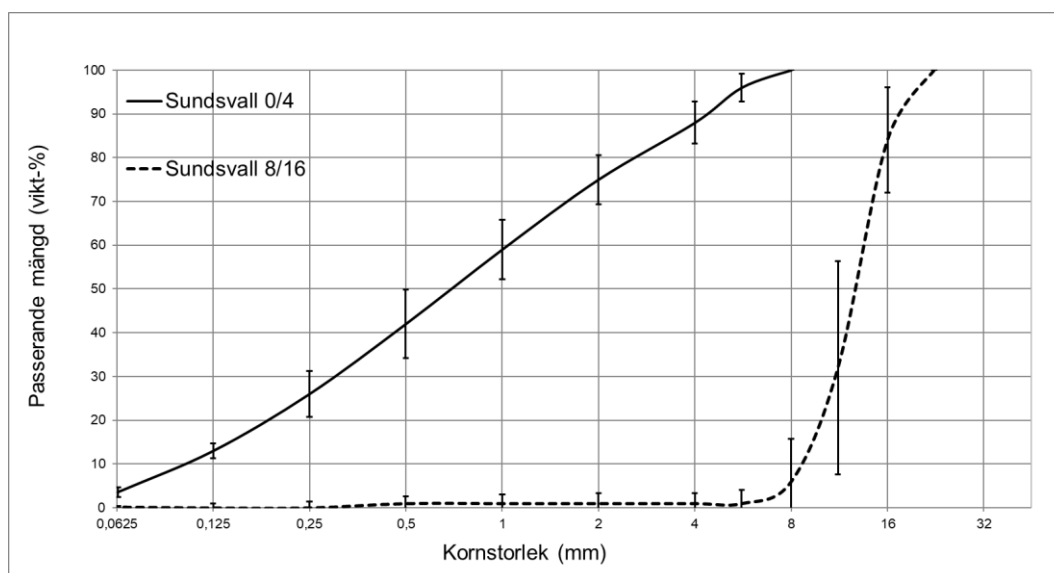
4.1.1 Metodik

Kornstorleksfördelningen bestämdes med tvättning och mekanisk siktning enligt SS-EN 933-1.

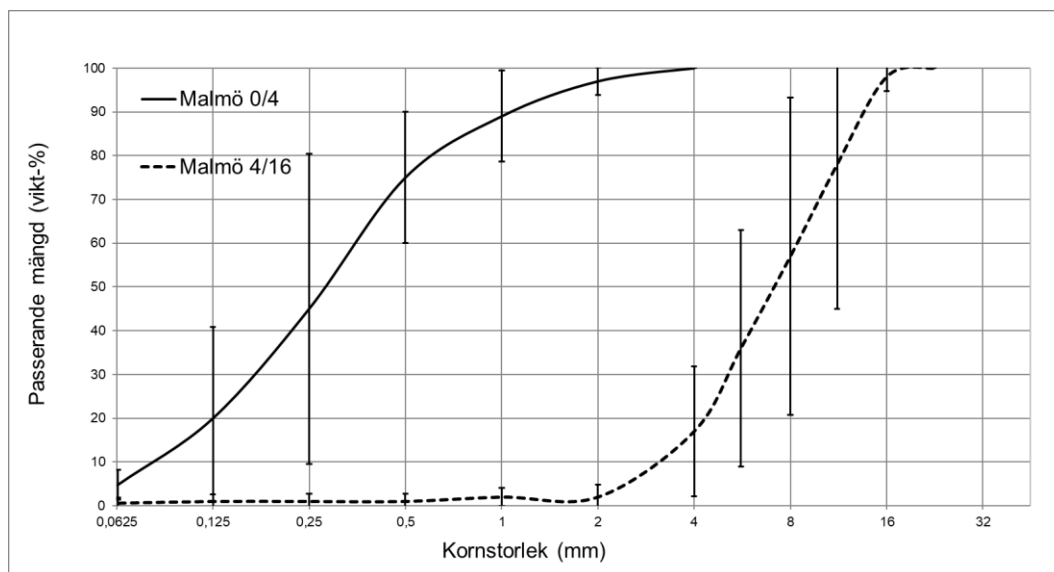
4.1.2 Resultat

Kornstorleksfördelning för de olika proverna redovisas i Figur 4 och Figur 5.

Medelvärdet av kornstorleksfördelningarna hos den grova ballasten är typisk för respektive sortering för både Malmö och Sundvall. Standardavvikelsen är dock stor för båda materialen.



Figur 4 Medelvärdet av kornstorleksfördelningarna hos undersökta från Sundsvall. Spridningen redovisas som +/- 2 standardavvikelser. Medelvärdet är baserat på 12 stickprov per sortering under perioden augusti – november 2021.



Figur 5 Medelvärde av kornstorleksfördelningarna hos undersökta prover från Malmö. Spridningen redovisas som +/- 2 standardavvikelser. Baserat på 12 stickprov per sortering under perioden augusti – november 2021.

4.1.3 Kommentarer

Medelvärde av kornstorleksfördelningarna hos Sundsvall 0/4 är mellangraderad med en relativt fraktionsvis jämn fördelning av partiklar. Standardavvikelsen visar att produkten under den undersökta perioden uppvisar en liten spridning. Kornstorleksfördelningen hos den fina ballasten från Malmö skiljer sig från Sundsvall då den är mer ensgraderad och domineras av partiklar i fraktionen 0,063 till 0,5 mm. Produkten uppvisar också en mycket stor spridning under den undersökta perioden. Medelvärde av kornstorleksfördelningarna hos den grova ballasten är typisk för respektive sortering för både Malmö och Sundsvall. Standardavvikelsen är dock stor för båda materialen.

Malmö 0/4 och 4/16 uppvisade en betydande variation i kornstorleksfördelningen. Sannolikt kommer en sådan variation vara svår att hantera i betongproduktion, i synnerhet gällande den fina fraktionen, som har en betydande påverkan på färsk betongs egenskaper och vattenbehov. Det skall dock beaktas att produktionen under provtagningsperioden inte varit optimerad för att erhålla en jämn produkt avseende geometriska egenskaper (Personligt kommunikation med produktionspersonal). Det finns således stort utrymme för förbättringar. Detta påvisas av att produktionen i Sundsvall under provtagningsperioden uppvisat en mycket liten variation för den fina ballasten. Genom att aktivt styra tvättsiktens processinställningar är det möjligt att kompensera för variationer i råvaran och därmed erhålla en jämn kornstorleksfördelning. Det är också på detta sätt möjligt att styra produktens finmaterialhalt. Det ger goda förutsättningar för att optimera ballastens packningsegenskaper och därmed minska vattenbehovet hos betongen.

4.2 Vattenabsorption och korndensitet

Korndensitet och vattenabsorption används vid proportionering av betong. Vattenabsorptionen används vid beräkning av effektivt vatten tillgängligt för cementreaktionerna och för en första bedömning av om ballasten kan anses vara frostbeständig eller inte. Det finns tre olika typer av korndensitet som används för att beskriva ballast.

- Ugnstorkad korndensitet som är kvoten mellan kornens massa och volym inkluderat inneslutna och öppna porer tillgängliga för vatten.

- Skenbar korndensitet som är kvoten mellan kornens massa och volym inkluderat inneslutna porer men exkluderat porer tillgängliga för vatten
- Mättad och yttorkad korndensitet som är kvoten mellan kornens massa inkluderat massan av vatten i porer och volymen inkluderat inneslutna och öppna porer tillgängliga för vatten.

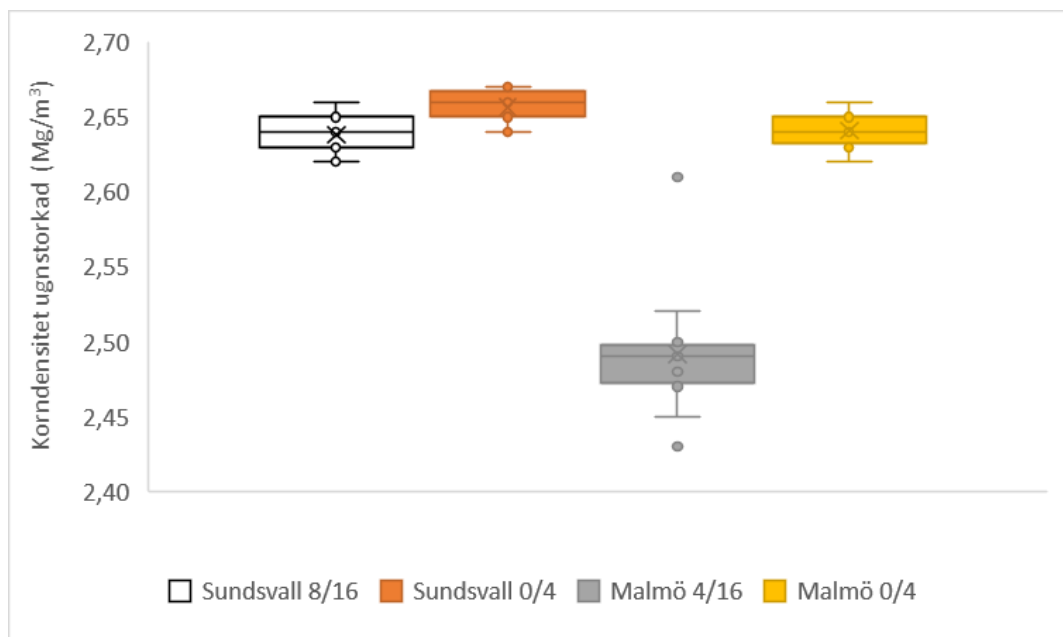
Enligt SS 1370003, tabell 2 ska uppgift om korndensiteten lämnas i prestandadeklarationen. Vidare anges också att den ugnstorkade korndensiteten bör användas. Resultat från provning av korndensitet redovisas därför som ugnstorkad densitet i denna rapport. I samma tabell anges att ballast kan anses vara frostbeständig om vattenabsorptionen är $\leq 1\%$.

4.2.1 Metodik

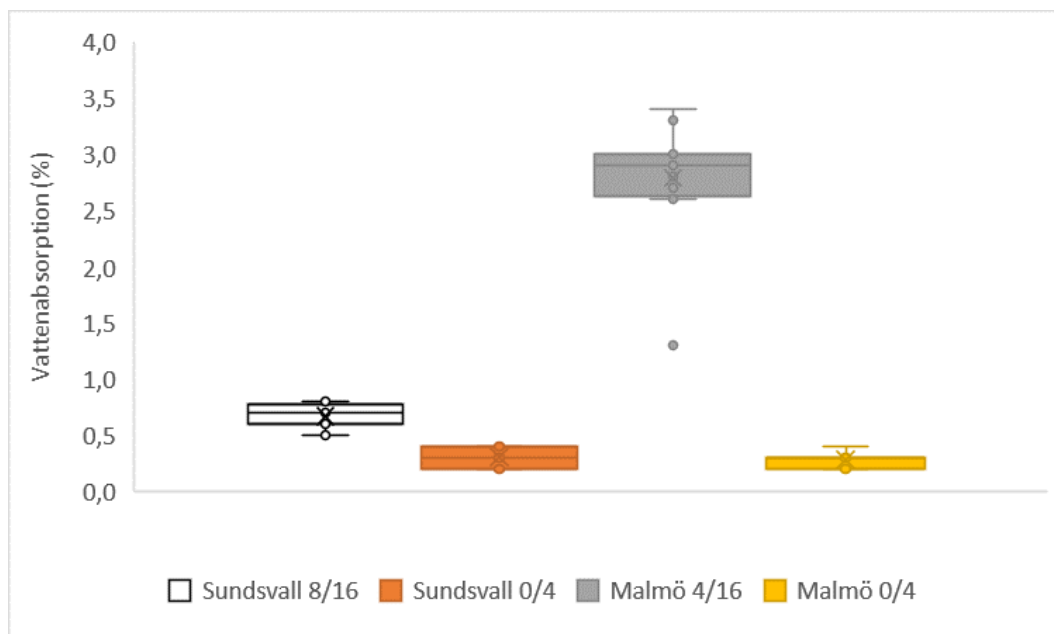
Ugnstorkad korndensitet och vattenabsorption för grov ballast bestämdes enligt SS-EN 1097-6 (avsnitt 8 pyknometermetod för ballast med kornstorlek mellan 4 mm och 31,5 mm). Ugnstorkad korndensitet och vattenabsorption för fin ballast bestämdes enligt SS-EN 1097-6 (avsnitt 9 pyknometermetod för ballast med kornstorlek mellan 0,063 mm och 4 mm).

4.2.2 Resultat

Korndensitet och vattenabsorption för de 48 proverna redovisas i Figur 6 och Figur 7.



Figur 6 Ugnstorkad korndensitet. Spridningen hos 12 stickprov per ballastmaterial under perioden juli – december 2021.



Figur 7 Vattenabsorption. Spridningen hos 12 stickprov per ballastmaterial under perioden juli – december 2021.

4.2.3 Kommentarer

Resultaten visar att spridningen avseende densitet och vattenabsorption är relativt liten hos de undersökta materialen med undantag för Malmö 4/16, som uppvisar en något större spridning. Vattenabsorptionen för Malmö 4/16 klarar inte kravet för att anses som frostbeständigt utan ytterligare provning. För materialen från Malmö är det en stor skillnad i ugnstorkad korndensitet och vattenabsorption mellan grov och fin ballast.

Metoden för att bestämma vattenabsorptionen enligt avsnitt 9 har ifrågasatts inom industrin. Detta för att det är svårt för en operatör att i enlighet med metoden bedöma när kornen i denna fraktion har uppnått det vattenmättade och yttorra tillståndet [8]. Problemet tas upp i SS 137003 (tabell 2 i versionen från 2021), där det anmärks att provningsmetoden kan ge missvisande resultat för helkrossad ballast 0/4, då kornformen påverkar rasvinkeln för materialet och följaktligen när kornen kollapsar. Detta kan för ett krossat material med oregelbunden kornform leda till att vattenabsorptionen underskattas. Detta kan förklara att skillnaden i vattenabsorptionen mellan grov och fin ballast från Malmö är oväntat stor. Dessutom är andelen potentiellt mer porösa komponenter, såsom betong, tegel och kalksten, i den grova och den fina ballasten inte avvikande på ett sådant sätt att det kan förklara denna skillnad. Snarare borde den större specifika ytan hos den fina ballasten ge en högre vattenabsorption.

Det har också ifrågasatts om metoden är tillämplig på andra typer av ballast än naturlig ballast [9] på grund av att det tar betydligt längre tid att vattenmätta en ballast med grövre porösa korn än en icke-porös ballast. För användning av vattenabsorption vid receptframtagning och beräkning av betongens vatten-cement-tal borde detta dock inte ha någon betydelse, eftersom det färsk tillståndet under vilket ballasten absorberar blandningsvatten och betongen inte har bundit så att en fast struktur har uppnåtts, är fråga om några timmar, alltså lägre än de 24 timmar vid vilken tidpunkt vattenabsorptionen bestäms.

Skillnaden i ugnstorkad korndensitet är också betydande. Detta förklaras av att den ugnstorkade korndensitet beräknas som kvoten mellan kornens massa och volym inkluderat inneslutna och öppna porer tillgängliga för vatten, bestämd som vattenabsorption. Ett fel i bestämning av vattenabsorption ger följaktligen en felaktig ugnstorkad korndensitet. Är vattenabsorptionen för

låg kommer korndensiteten att bli för hög. Det kan därför antas att den faktiska skillnaden i ugnstorkad korndensitet mellan grov och fin ballast för Malmö är betydligt lägre än den uppmätta.

4.3 Sammansättning grov återvunnen ballast

Sammansättning hos grov återvunnen ballast ska deklarerars enligt SS-EN 12620 och SS 137003. SS 137003 delar in återvunna rivningsmaterial i två klasser, typ A och typ B baserat på halt av ingående beståndsdelar; Rcu (betong och naturlig ballast), Rb (tegel, klinker och dylikt), Ra (bituminösa material), FL (flytande material) och XRg (glas, metall, övrigt). Tabell 1 redovisar krav på beståndsdelar för respektive typ.

4.3.1 Metodik

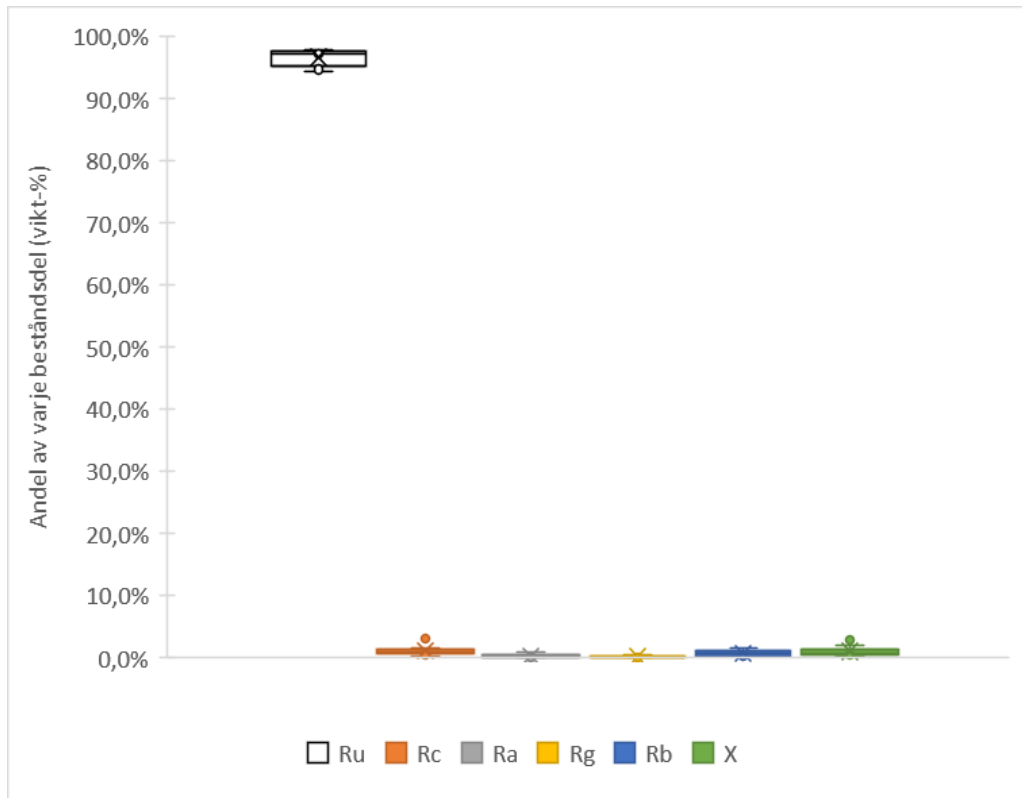
Sammansättning hos den grova återvunna ballasten bestämdes enligt SS-EN 933–11. Metoden utförs genom att okulärt bedöma och för hand sortera korn i de olika komponenterna. Massan av varje komponent bestäms förutom flytande partiklar där volymen bestäms. Resultatet uttrycks som andelen av varje komponent i viktprocent för komponenter som sjunker. För flytande komponenter uttrycks resultatet som andel i volymprocent. Det framgår inte i metodens hur olika typer av slagg ska kategoriseras. Samtliga förekommande typer av slagg har därför kategoriserats som övrigt (X). Partiklar med spår av cementbruk eller bitumen har kategoriserats som betong (Rc) respektive bituminöst (Ra). Detta innebär att den faktiska massan för cementbruk och bitumen är betydligt mindre än de redovisade resultatet för betong och bituminösa material.

4.3.2 Resultat

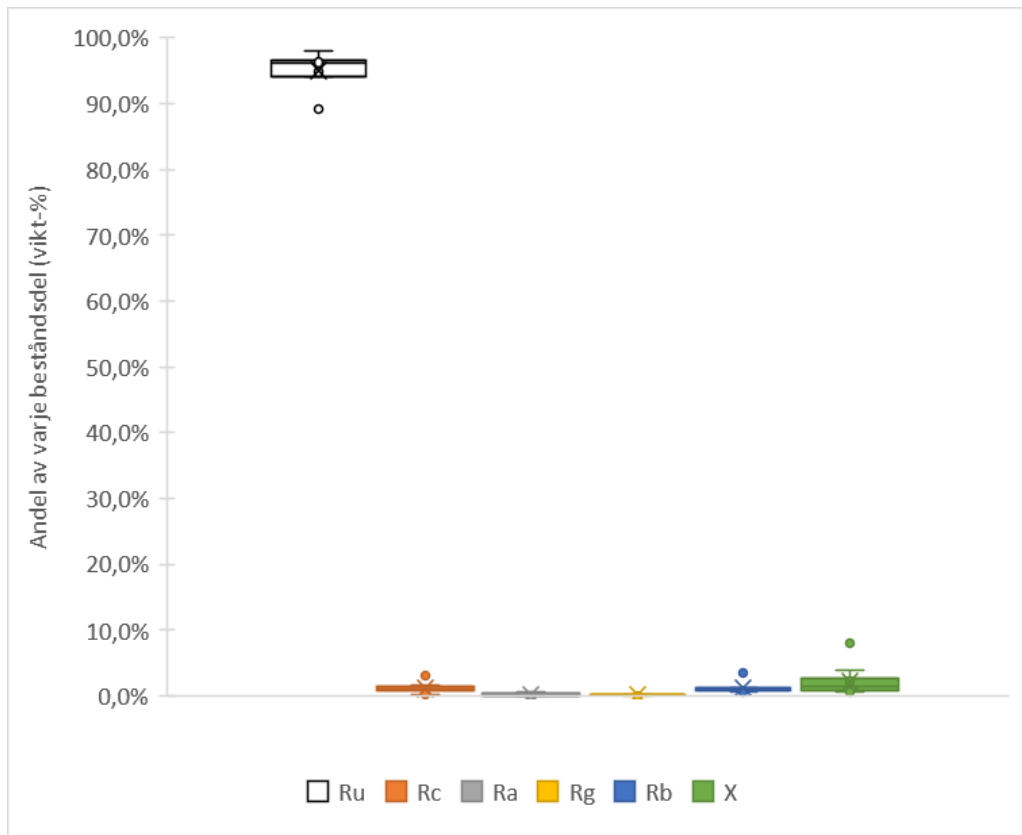
Sammansättningen och variationen uttryckt som en standardavvikelse från medelvärdet hos de undersökta proverna samt gränsvärden för ballast typ A och B redovisas i Tabell 1.

Tabell 1 Medelvärden och standardavvikelser (SD) för sammansättningen hos de undersökta proverna samt krav på sammansättning ballast typ A och B enligt SS 137003

Komponent	Medelvärde ± SD		Krav	
	Sundsvall	Malmö	Typ A	Typ B
Rcu: betong, naturlig ballast (vikt-%)	97,8 ± 1,2	96,1 ± 2,3	≥95	≥70
Rb: tegel, klinker (vikt-%)	0,7 ± 0,4	1,2 ± 0,7	≤10	≤30
Ra: bituminöst (vikt-%)	0,3 ± 0,3	0,2 ± 0,2	≤1	≤5
FL: flytande (vol-%)	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	≤2	≤2
XRg: glas, metall, övrigt (vikt-%)	1,2 ± 0,8	2,3 ± 2,1	≤1	≤2



Figur 8 Sammansättning hos Sundsvall sortering 8/16. Spridningen hos 12 prover uttagna under perioden augusti – november 2021.



Figur 9 Sammansättning hos Malmö sortering 4/16. Spridningen hos 12 prover uttagna under juli – december 2021.

4.3.3 Kommentarer

Undersökta prover domineras av naturlig ballast (Ru). Partiklar från av människan skapade material såsom tegel, betong, glas, asfalt och slagg förekommer i mindre mängd. Flytande partiklar har inte observerats i något av de undersökta proverna. Variationen i sammansättning är relativt liten (Figur 8 och Figur 9). Dock uppvisar ett av proverna från Malmö en avvikande och högre andel övrigt (X); vid en närmare okulär bedömning visade det sig att övrigt-kategorin i fråga främst utgjordes av olika typer av metallurgisk slagg. Detta prov redovisas som en “outlier” i Figur 9.

Undersökta prover klarar kravet på sammansättning för ballast typ A med avseende på alla typer av komponenter, utom kategorin “övrigt”. Bidragande orsak till detta är andelen metallurgisk slagg som kategoriserats som övrigt vid analysen. Kommande metod kan komma att förtydligas med avseende på kategorisering av slagg. Enligt remiss till prEN 933–11 från 2021 föreslås kategorin Ru (obundna och bundna hydrauliska material) delas upp i naturlig sten (Rn), jämförbara material (Rh), samt material från metallurgisk industri (Rs). Andelen slagg i proverna bestämdes inte men den kompletterande petrografiska analysen (avsnitt 5.3) visar på att andelen slagg utgör merparten av kategorin övrigt. Det kan därför antas att de undersökta materialen skulle klara kravet för ballast typ A vid provning enligt den kategorisering av slagg som föreslås i remissen.

5 DETALJERAD KARAKTÄRISERING OCH PROVNING

5.1 Urval av prover för detaljerad karaktärisering och analys

För att välja ut tolv prover för detaljerad karaktärisering från de 48 som genomgått inledande karaktärisering (screening), så diskuterade och beslutade projektgruppen om urvalskriterier. Dessa baserade sig på ett antal konstaterande/omständigheter:

- Resultat på sammansättning, vattenabsorption och densitet uppvisar en relativt liten variation mellan prover från samma anläggning och sortering;
- Geografisk spridning är önskvärd, för att möjliggöra utvärdering av skillnader mellan anläggningar och regional/lokal geologi;
- Endast den grova sorteringen omfattas av sammansättning enligt SS-EN 933–11 och bara den går därmed att sätta i relation till ingående främmande materialslag;
- Fin sortering är intressant, då kornens form förmodligen mer liknar den hos sand och grus än den hos krossberg, och därför har potential att bidra till tätare betong med bättre färskas egenskaper än med stenmjöl;
- Sikt kurvorna inom varje triad (tre grova från Malmö, tre fina från Malmö, osv) bör vara lika, för att utesluta eventuella effekter av kornstorleksfördelning i betongprovningarna.

Urvalskriterierna blev:

- Sex prover ska komma från anläggningen i Malmö, sex prover från den i Sundsvall;
- Från vardera anläggningen ska tre prover vara grov sortering, tre prover fin sortering;
- Inom en grupp, fick endast prover med snarlik sikt kurva ingå i urvalet;
- För grov sortering, så valdes från respektive anläggning tre prover med största möjliga spridning i både sammansättning (andel sten, Ru) och vattenabsorption (högst, lägst och medelvärde för båda egenskaperna).
- För de fina sorteringarna så valdes de prover med samma uttagsdatum som respektive vald grov sortering.

De 12 utvalda proverna ankom i olika omgångar till RISE Borås under hösten och vintern 2021–2022. Proverna märktes med provnummer, där de sex proverna från Malmö fick beteckningen M1, M2, M3, M4, M5 och M6, medan de sex proverna från Sundsvall betecknades S1, S2, S3, S4, S5 och S6. Tre av proverna från respektive anläggning utgjordes av finsortering, 0/4 mm, och dessa prover följer numrering 1, 2 och 3. Tre av proverna från respektive anläggning utgjordes av grovsortering, 4/16 mm alternativ 8/16 mm, och dessa prover följer numrering 4, 5 och 6.

Den detaljerade karaktäriseringen omfattade kemiska analyser, petrografisk undersökning och ASR-provning enligt både RILEM AAR-2 och NT Build 295 på alla tolv prover. Motstånd mot frys-tö-växling provades dock bara på de sex grova sorteringarna (M4, M5, M6, S4, S5 och S6).

5.2 Kemiska analyser

Alla tolv materialen analyserades med avseende på vattenlösliga sulfat- och kloridjoner, syralösliga sulfatjoner, samt totalhalt svavel. Provpreparering gjordes av RISE Ballastlabb, medan provning och analys utfördes av RISE Kemi, material och ytor.

5.2.1 Metodik

Innehåll av vattenlösligt sulfat och klorid analyserades enligt metoder i SS-EN 1744-1. Sulfat och klorider analyserades på samma vattenprov, uttaget från det bad som provmaterialet legat i under minst 24 timmar under omrörning. Kvantifiering av halter gjordes med jonkromatografi.

Innehåll av syralösligt sulfat analyserades enligt metoden SS-EN 196-2:2013 del 4.4.2 (likvärdig med SS-EN 1744-1:2009+A1 2012 del 12). Totalhalt svavel analyserades enligt SP-metod 0658 (likvärdig med SS-EN 1744.1:2009+A1 2012 del 11.2).

5.2.2 Resultat

Provningsresultaten av de kemiska analyserna av de tolv uttagna materialen redovisas i Tabell 2.

I Tabell 2 anges även gränsvärde för vattenlöslig klorid och total svavelhalt enligt SS-EN 12620 och för vattenlösligt och syralösligt sulfat enligt SS 137003. För syralösligt sulfat och svavelhalt anges två gränsvärden, där det första gäller för naturlig ballast och det andra för masugnsslagg.

Tabell 2 Provningsresultat kemiska analyser

Prov-ID	Vattenlöslig klorid (vikt%)	Vattenlösligt sulfat (vikt%)	Syralösligt sulfat (vikt%)	Total svavelhalt (vikt%)
M1 0/4	<0,001	0,23	0,19	0,10
M2 0/4	<0,001	0,11	0,09	0,07
M3 0/4	<0,001	0,03	<0,05	0,04
M4 4/16	<0,001	0,04	0,38	0,19
M5 4/16	<0,001	0,07	0,23	0,13
M6 4/16	<0,001	0,06	0,21	0,16
S1 0/4	0,002	0,01	0,07	0,04
S2 0/4	<0,001	0,002	<0,05	0,04
S3 0/4	<0,001	0,003	<0,05	0,02
S4 8/16	<0,001	0,002	<0,05	0,10
S5 8/16	<0,001	0,001	0,06	0,08
S6 8/16	<0,001	0,002	0,08	0,08
Gränsvärde	≤0,1	≤0,7	≤0,8 eller ≤1	≤1 eller ≤2

5.2.3 Kommentarer

Alla prover klarar gränsvärdena i SS-EN 12620 respektive SS 137003 för alla fyra analyserade kemiska ämnen.

För vattenlösliga klorider klarar alla proverna gränsvärdet med en faktor 100 eller mer.

Malmöproverna har högre halt vattenlösligt sulfat jämfört med Sundsvallproverna, men fortfarande en bra bit under gränsvärde. Två av finsorteringarna från Malmö ligger på 0,1–0,2 vikt%, vilket är lite närmare gränsvärdet på 0,7, så finsorteringar från Malmö kan man med fördel följa upp och hålla ett extra öga på.

Även vad gäller syralösligt sulfat så ligger alla proverna under gränsvärdet, även om de grövre sorteringarna från Malmö ligger något högre och strax under angivet gränsvärde. Vi vet dock inte om dessa förhöjda halter härrör från de naturliga bergarterna i området eller om de beror på främmande material såsom slagg eller tegel. Det högre gränsvärdet (<1%) gäller för slagg, medan det lägre (>0,8%) gäller för naturlig ballast. Eftersom proverna utgörs av återvunna massor där endast några vikt% är slagg, så är det rimligt att det lägre gränsvärdet bör gälla.

Som konsekvens av något högre halt vattenlöslig och syralösligt sulfat i Malmöproverna, så ligger dessa också högre i totalhalt svavel. Dock ligger alla prover en bit under gränsvärdet för luftkyld slagg (2 vikt%) respektive naturlig ballast (1 vikt%). Egentligen hade det räckt med att analysera totalhalt svavel för att därifrån kunna konstatera att halterna är så låga att det omräknat till sulfat inte är möjligt att nå upp till gränsvärdet för vattenlösligt sulfat. Enligt SS 137003 behöver bara endera av dessa värden redovisas. Här analyserades dock alla tre varianterna av svavelförekomst för att bättre förstå materialen. SS 137003 påbjuder också att syralöslig klorid provas, vilket inte gjordes i projektet.

5.3 Petrografisk sammansättning

Syftet med en petrografisk analys är att identifiera och eventuellt kvantifiera ingående materialslag i ett mineralbaserat material, såsom ballast, entreprenadberg, schaktmassor eller natursten. Med materialslag avses tex bergarter, mineral och tillverkade material såsom glas, tegel, slagg eller metaller. Utifrån sammansättningen kan antaganden och rekommendationer göras med avseende på ytterligare provningar eller misstänkta svagheter. Observation av sulfidmineral föranleder tex analys av totalhalt svavel, medan hög andel fri glimmer kan förklara sämre arbetbarhet i färsk betong. Vid petrografisk analys identifieras också mineral och bergarter som kan vara potentiellt alkalisilika-reaktiva, om de är långsamt- eller snabbreaktiva, och därmed vilken metod som ska användas för bruksprovningen. Svårigheten med petrografisk analys är att den kräver mycket teoretisk kunskap och praktisk erfarenhet, samt det faktum att i stort sett hur mycket information och detaljrikedom som helst går att få ut, om tid och pengar är obegränsade. Normalt är så inte fallet, varför operatören måste välja vad som ska fokuseras på, i relation till syfte och eventuella kravdokument. En sådan begränsning är att det för kvantifiering bara är praktiskt att hantera runt tio olika kategorier, vilket för bergkross bestående av en eller ett fåtal bergarter innebär att det är rimligt att kvantifiera på mineralnivå, medan det för jordarter och schaktmassor, som består av en stor mängd olika bergarter och i det senare fallet även främmande material, praktiskt är mer rimligt att kategorisera på bergarts-/materialnivå. Sådan kategorisering, hopklumpning av flera olika bergarter, försöker man göra genom att gruppera bergarter och material med snarlika egenskaper tillsammans, samt lämna utrymme åt specifika material som kan förväntas vara extra intressanta.

5.3.1 Metodik

Analysen utfördes genom petrografisk analys enligt RILEM AAR-1, vilken är likvärdig SS-EN 932-3, men ger kompletterande instruktioner för kvantitativ analys och specifika instruktioner för bruks- och betongändamål. Analysen omfattade såväl okulär beskrivning och kvantifiering (dvs med blotta ögat) som kvantifiering i tunnslipspreparat i transmissionsmikroskop. Provet delades ner med rotationsneddelare, varefter det siktades upp i olika storleksfraktioner. Okulärt analyserades de grova sorteringarna i sin helhet (8–16 respektive 4–16 mm), medan endast eventuella överkorn (>4 mm) analyserades i de fina sorteringarna (0/4).

Tunnslip för analys i mikroskop preparerades på olika sätt beroende på sortering. Grov sortering krossades varefter en provburk fylldes med material i fraktionen 2–4 mm. Materialet gjöts in i

epoxi och två tunnslip tillverkades från burken. Fin sortering siktades upp i fraktionerna 0,063–2 mm och 2–4 mm, varefter tunnslip tillverkades på samma sätt som för grov sortering, med skillnaden att endast ett tunnslip togs ut från 0,063–2 mm-burken. Tunnslipen undersöktes i polarisationsmikroskop, genom beskrivning och kvantifiering med hjälp av punkträkning. I varje 2–4 mm-tunnslip räknades 400–500 punkter, i 0,063–2 mm-tunnslipet 800–1000 punkter.

5.3.2 Resultat Malmö

Okulär analys

Ballastkornen är generellt oregelbundna och kantiga, med företrädesvis raa ytor. Materialen ger över lag ett friskt intryck utan tecken på vittring. Sulfidmineral eller lermineral har ej noterats, förutom i sannolik lägre halt i fåtal ballastkorn av skiffer. Proverna har relativt likartat innehåll, om än i varierande proportioner (se under *Okul* i Tabell 3).

Proverna domineras av olika bergarter (Ru enligt SS-EN 933–11), men främmande material utgör en inte oansenliga del och då framför allt slagg, betong, bruk och bituminösa partiklar. Slaggen är svart och i regel antingen porös eller glasig. Bergarterna utgörs av *kvartsit* (ljusgrå, finkornig), *kalksten* (vit, mycket finkornig), *granit* (röd, fint medelkornig), *amfibolit* (mörkgrå, finkornig), *sandsten* (beige, finkornig), *fria korn av kvarts* (transparenta till vita), samt *flinta*.

Tabell 3 Resultat petrografisk sammansättning proverna från Malmö. Resultatet är angivet som vikt-%. för okulär (Okul) för övriga är resultatet angivet som volym-%

Prov-ID	M4		M1		M5		M2		M6		M3	
	Okul	Slip	2-4	0-2	Okul	Slip	2-4	0-2	Okul	Slip	2-4	0-2
Bergart/material												
Granit, kvarts, fältspat	22	27	37	69	26	27	34	69	17	31	28	67
Amfibolit, diabas, grönsten	14	16	8	3	15	11	9	3	7	12	12	2
Mikrokristallin kvarts (ASR)	-	2	3	6	-	1	5	9	-	3	4	5
Porfyr/vulkanit, mylonit, kataklasit	3	3	6	<1	2	5	4	1	5	0	3	2
Flinta	10	5	7	1	9	10	2	<1	7	5	5	1
Kalksten/marmor, kalcit	17	22	15	8	18	17	15	8	18	16	23	9
Skiffer, ler-/siltsten	1	2	3	1	2	2	7	1	0	5	5	2
Sandsten/kvartsit	16	10	3	<1	11	10	7	1	11	7	8	<1
Fri glimmer			1	1				<1				<1
Opaka faser		<1	<1	1				<1			1	1
Betong/bruk	5	3	6	4	7	7	6	5	7	3	4	6
Slagg	5	5	6	1	4	2	4	1	18	10	3	1
Bituminöst	4	4	4	2	3	4	6	1	6	7	5	3
Tegel, klinker			1	1	2	4	1	<1	1			
Glas		<1						<1	2		<1	<1
Övrigt	1	<1					<1	1	1	1		<1
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ru	85	87	83	90	83	83	83	92	65	79	89	89
Ru+Rc	90	90	89	94	91	90	89	97	72	82	93	95
Ru+Rc+Slagg	95	95	95	95	95	92	93	98	90	92	96	96
Rb, Ra, Rg, X, slagg	10	9	11	4	9	10	11	3	28	18	8	4
Rb, Ra, Rg, X, EJ Slagg	5	4	5	3	5	8	7	2	10	8	5	3

Analys i mikroskop

Innehållet i proverna är mycket likartat, men uppvisar en viss variation i proportioner (Tabell 3). De vanligaste bergarterna och komponenterna är granit, tonalit till kvartsdiorit (samlade i kategorin "Granit"), diabas, grönsten/amfibolit (samlade i en kategori), porfyrisk metavulkanit, kalksten, fri fältspat och kvarts, samt partiklar av asfalt och betong. Glimmer utgörs främst av biotit och klorit, trots att muskovit och prehnit inte är ovanlig (40-30-20-10%-fördelning). Opaka mineral finns som subhedrala korn och anhedrala skeletala utfyllningar. Fältspat förekommer som helt primär till kraftigt och ställvis genomgripande sericit- och/eller epidotomvandlad. Övriga mineral är granat, kalcit, titanit, epidot, zoisit, klinozoisit, pumpellyte och apatit.

Kommentarer

Proverna domineras av naturliga bergarter och mineralkorn, i regel >80% såväl okulärt som i mikroskop. Undantaget är M6, där en hög andel slagg i den okulära analysen (18%) petar ner steninnehållet till 65%. Denna andel slagg bekräftas dock inte i mikroskopet, där samma sortering landar på 10% slagg och 79% sten. Samtidigt är halten svarta/mörka bergarter högre i mikroskopet, varför en förklaring kan vara att en del av det som identifierades som slagg vid den okulära analysen egentligen är mörka bergarter. Detta sätter fingret på utmaningen att korrekt bedöma inte bara bergarter, utan också olika tillverkade främmande material, med blotta ögat.

Tendensen i de andra Malmöproverna är annars att andelen sten (Ru), bituminöst material (Ra), betong och bruk (Rc) och slagg (Ru enligt nya regler) ligger relativt stabila från okulär analys till mikroskop, vilket är en bekräftelse på att det ofta fungerar bra att okulärt bedöma halterna. Det avvikande resultatet för M6 är därmed oroande och mer systematiska analyser och jämförelser mellan de olika metoderna skulle kunna genomföras, för hitta eventuella svagheter.

Ru + Rc + slagg sammanräknat landar på över 90% för alla prover och sorteringar, med såväl okulär som mikroskopmetod, flera också över 95% och därmed Typ A-klass. Dock innebär den höga halten bituminöst material (Ra) på över 1 att denna klass inte nås; halter på över 5% i vissa fall innebär att inte heller Typ B-klass uppnås. Här föreligger dock en otydlighet i hur partiklar ska räknas. I föreliggande fall har vi i Ra-kategorin lagt alltifrån partiklar som till stor del består av bitumen till sådana som till >95 % består av ballastkorn med endast lite bitumenbeläggning, vilket innebär att dessa får mycket stor tyngd i den totala sammanräkningen. Rimligare kanske hade varit att hitta en trade-off, tex minst 20% bitumen på ett ballastkorn för att detta i sin helhet ska räknas i Ra-kategorin, men sådana gränser måste förstås etableras genom noggrann analys och tester, för att inte forcera material till god klass men med skadliga partiklar.

Den dominerande kategorin i alla prover är *Granit, kvarts, fältspat*, vilket inte är konstigt då olika typer av granitbergarter är bland de vanligaste i kontinental jordskorpa och fältspat och kvarts bland de vanligaste mineralen. Att halten för denna kategori ökar från grov till fin sortering är inte heller konstigt, eftersom det är naturliga vittringsprocesser som producerat de lösa avlagringarna genom nedbrytning av bergarter till mindre partiklar. Dels blir det en effekt av hur beständiga olika mineral är mot kemisk vittring, där kvarts och alkalifältspat är relativt robusta, medan andra mineral i högre grad vittrar till bland annat lermineral (som tvättats bort), dels en analytisk artefakt där tex fältspat bunden i diabas hamnat i den kategorin i grövre sortering, men vid nedbrytning frigörs till fristående fältspat som hamnar i Granit-kategorin.

Noterbart är annars hög andel kalksten och sandsten, samt partiklar av betong och bruk, vilka sammantagna sannolikt förklarar den relativt höga vattenabsorptionen hos Malmö-proverna.

Såväl potentiellt långsamt reaktiva (mikrokristallin kvarts, vulkanit, mylonit, kataklasit) som snabbreaktiva (flinta) partiklar noteras.

5.3.3 Resultat Sundsvall

Okulär analys

De tre grova sorteringarna från Sundsvall har undersökts okulärt, med fokus på ballastkorn >8 mm. Ballastkornen är generellt oregelbundna och kantiga, med företrädesvis råa ytor. Ca 25% av kornen är dock rundade och har släta ytor. I prov S6 är en relativt hög andel (ca 20%) av ballastkornen elongerade. Materialen ger över lag ett friskt intryck utan allvarligare tecken på vittring (begränsad ytvittring noteras på några ballastkorn). Sulfidmineral eller lermineral har ej noterats, förutom i sannolik lägre halt i fåtal ballastkorn av lerskiffer.

Proverna har relativt likartat innehåll, om än i varierande proportioner (Tabell 4). De domineras av olika bergarter (Ru enligt SS-EN 933–11), men underordnat finns upp till 15% ballastkorn av framför allt betong, bruk, tegel, glas och slagg.

Tabell 4 Resultat petrografisk sammansättning proverna från Sundsvall. Resultatet är angivet som vikt-%. för okulär (Okul) för övriga är resultatet angivet som volym-%

Prov-ID	S4		S1		S5		S2		S6		S3	
	Okul	Slip	2-4	0-2	Okul	Slip	2-4	0-2	Okul	Slip	2-4	0-2
Bergart/material	Okul	Slip	2-4	0-2	Okul	Slip	2-4	0-2	Okul	Slip	2-4	0-2
Granit, kvarts, fältspat	48	77	65	75	56	75	69	73	53	75	69	77
Diabas, grönsten, pyroxen, amfibol	31	8	10	2	20	4	11	5	20	5	10	3
Mikrokristallin kvarts		5	5	9		6	5	9		8	5	8
Porfyr, mylonit, kataklasit	11	<1	5	2	13	2	2	3	8	1	4	3
Flinta	1	2	2	<1	1	3	1	<1	4	2	<1	<1
Kalksten/marmor, calcit	2	1	1	1	1	<1	1	1	1	2	<1	<1
Ler-/siltsten, glimmerskiffer	<1	2	7	2		2	4	1	1	1	6	2
Sandsten/kvartsit		<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	2	<1	1	1
Fri glimmer		<1	<1	5		<1	<1	4		<1	<1	3
Opaka faser (fri korn)		<1	<1	1		<1	<1	<1		<1	<1	<1
Betong/bruk, cementpasta (Rc)	<1	2	1	1	3	6	<1	1	3	2	1	1
Slagg (Ru eller X)	3	1	2	1	2	<1	1	<1	4	2	1	<1
Bituminöst material (Ra)	3	<1	1	1	2	1	6	2	4	<1	1	<1
Tegel, klinker, lättbetong (Rb)	1	1	<1	<1	1	1	<1	<1	1	1	1	1
Glas (Rg)		<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1		<1	<1	<1
Övrigt (X)	<1	<1	<1	<1		<1	<1	<1	<1	1	<1	<1
TOTAL	100	99	99	100	99	100	100	99	101	99	99	99
Ru	93	95	95	97	91	92	93	96	89	94	95	97
Ru+Rc	93	97	96	98	94	98	93	97	92	96	96	98
Ru+Rc+Slagg	96	98	98	99	96	98	94	97	96	98	97	98
Rb, Ra, Rg, X, slagg	7	2	3	2	5	2	7	2	9	3	3	1
Rb, Ra, Rg, X, EJ Slagg	4	1	1	1	3	2	6	2	5	1	2	1

Analys i mikroskop

Innehållet i de olika proverna är mycket likartat, men uppvisar en viss variation i proportioner. De vanligaste bergarterna och komponenterna är olika granitoider, diabas (helt primär), grönsten (låggradig metamorf bergart), porfyrisk metavulkanit (fältspatfenokrister), glimmerskiffer,

lersten/lerskiffer, kalksten, fri fältspat och kvarts, samt partiklar av betong, tegel, slagg och bituminöst material. Glimmer utgörs av biotit, klorit och muskovit. En mikro- till kryptokristallin silikatbergart förekommer; det är oklart om den strikt ska klassificeras som flinta. Proportioner av olika bergarter, mineral och beståndsdelar redovisas i Tabell 4.

Kommentarer

Proverna domineras av “naturliga” bergarter och mineralkorn, i regel ≥ 90 partikel% i den okulära analysen och generellt ≥ 95 volym% i mikroskop. Naturliga bergarter underskattas därmed med några procentenheter i den okulära analysen, jämfört med mikroskopianalys. En förklaring till detta är att man i den förra räknar procent på antal korn och i den senare på tvärsnittsarean i tunnslip; det noterades att partiklar av de främmande materialslagen generellt är mindre än de naturliga bergarterna, varför de får oproportionerligt genomslag vid den okulära analysen. En annan är att det inte alltid är lätt att korrekt fastställa materialtyp med blotta ögat; i mikroskopet är det i regel lättare då man får fler ledtrådar att gå efter. Sammantaget bör analysen i mikroskop ligga närmare sanningen.

Sammanräknad sten (Ru), betong och bruk (Rc) och slagg (Ru enligt nya regler) ligger relativt stabilt mellan de olika analysmetoderna och inom ett snävare spann, från 96 till 99% från okulär analys till mikroskop, med ett enskilt värde på 94%. Därmed hade alla prover utom ett klassificerats som Typ A, om det inte hade varit för den relativt höga halten bituminöst material (Ra) som ofta är >1 . Som nämndes vid kommentaren till Malmöproverna föreligger dock otvetygligheten i hur partiklar ska räknas; i förekommande fall är halten Ra sannolikt överskattad, dels på grund av att en tunn hinna bituminöst material fällt ett helt korn, dels att de bituminösa partiklarna i regel är mindre än de andra materialslagen (inklusive naturliga bergarter) och därmed slår igenom oproportionerligt i den okulära analysen.

Den dominerande kategorin i alla prover är Granit, kvarts, fältspat, vilket inte är konstigt då olika typer av granitbergarter är bland de vanligaste i kontinental jordskorpa och fältspat och kvarts bland de vanligaste mineralen. Det är en stor differens i halt för “Granit, kvarts, fältspat” mellan den okulära analysen och mikroskopianalysen för samma sortering; jämför under *Okul* och *Slip* där okulär ofta ligger på drygt 50% och tunnslip på 70-75%. Detta beror på att flera ballastkorn i den okulära analysen har kategoriserats som “Diabas, grönsten, pyroxen, amfibol” och “Porfyr, mylonit, kataklasit”, vilka båda har en högre halt i okulär än i tunnslip. Vid okulär analys bedöms bergarten till stor del baserat på färg, tyngd och kornstorlek, medan det är svårare att korrekt uppfatta typ och kvantitet av olika mineral. Sannolikt har mörka ballastkorn och vad som uppfattades som mycket finkorniga bergarter tolkats i dessa två kategorier, fast det egentligen rört sig om olika typer av graniter. Mikroskopianalysen fångar i regel lättare upp korrekt mineralogi, textur och kornstorlek, varför den analysen ska ses som mer sann.

Potentiellt långsamt reaktiva partiklar har noterats: mikrokristallin kvarts, vulkanit, mylonit, kataklasit, samt ler-/siltsten och glimmerskiffer. Oavsett om den mikro- till kryptokristallina silikatbergarten som noterats är flinta i strikt mening eller om det rör sig om någon annan typ av silikautfällning, så är dess närvaro nog för att misstänka potentiellt snabbreaktivt material och behov av att testa alkali-silika-reaktivitet även med NT Build 295.

5.4 Alkalisilikareaktivitet

Alkalisilikareaktivitet (ASR) är en reaktion som kan uppstå i betong mellan lättlöslig kiseldioxid (silika = SiO_2) från ballast, alkalimetaller (Na, K) från cement, vissa ballasttyper och tölsalter, samt vatten. Finns dessa tre komponenter i betongen kan det med tid bildas vattenabsorberande alkali-silikagel i och runt ballastkorn. Denna gel tar större plats än reaktanterna och då den sväller kan den orsaka sprickor i betongen. Sprickorna kan reducera betongens hållfasthet och även minska motståndet mot andra nedbrytningsmekanismer, som upprepad frysning-upptining, karbonatisering och inträngning av klorider. Lättlöslig kiseldioxid i svensk ballast utgörs i regel av mikrokristallin kvarts i mycket finkorniga bergarter, t.ex. mylonit, metaryolit, metagråvacka och flinta, där den senare är mycket reaktiv och utgörs av mikro- till kryptokristallin kvarts. Två av de grundläggande metoderna för att undersöka om en ballast är potentiellt alkalisilika-reaktiv är RILEM AAR-2 och NT Build 295, som båda utgår från expansionsmätning av bruksprismor.

5.4.1 Metodik

Provberedning för RILEM AAR-2 och NT Build 295 går till på samma sätt. Materialet delas ner slumpmässigt till lämplig provmängd. Sorteringar med storlek 8/16 krossas i en konkross till ca 0/4 mm. Materialen siktas sedan upp i fraktionerna 0,125/0,250 mm, 0,250/0,5 mm, 0,5/1 mm, 1/2 mm och 2/4 mm. Fraktionerna tvättas på 0,063 mm-sikt och torkas till konstant vikt i 110°C. Därefter tas ett prov på 1350 g fram med fördelningen 10 vikt% 0,125/0,250 mm, 25 vikt% 0,250/0,5 mm, 25 vikt% 0,5/1 mm, 25 vikt% 1/2 mm, samt 15 vikt% 2/4 mm. För NT Build 295 är detta ett avsteg från metoden då den endast anger provberedning för en fin natursand.

RILEM AAR-2

Tre bruksprismor ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) med ett vct på 0,47 gjöts. För porös ballast tillsätts extra vatten till blandningen motsvarande ballastens vattenabsorption. Prismorna avformas efter ett dygn, mäts och vägs, samt placeras i vatten i 80°C i ett dygn och därefter i NaOH-lösning (1 %) i 80°C under 28 dygn. Under provtiden mäts prismornas längsta dimension för bestämning av och eventuell (longitudinell). Gränsvärdet för expansion under vilket ballasten anses vara oskadlig med avseende på ASR ligger på 0,25 % efter 28 dagar i NaOH-lösning enligt SS 137003.

NT Build 295

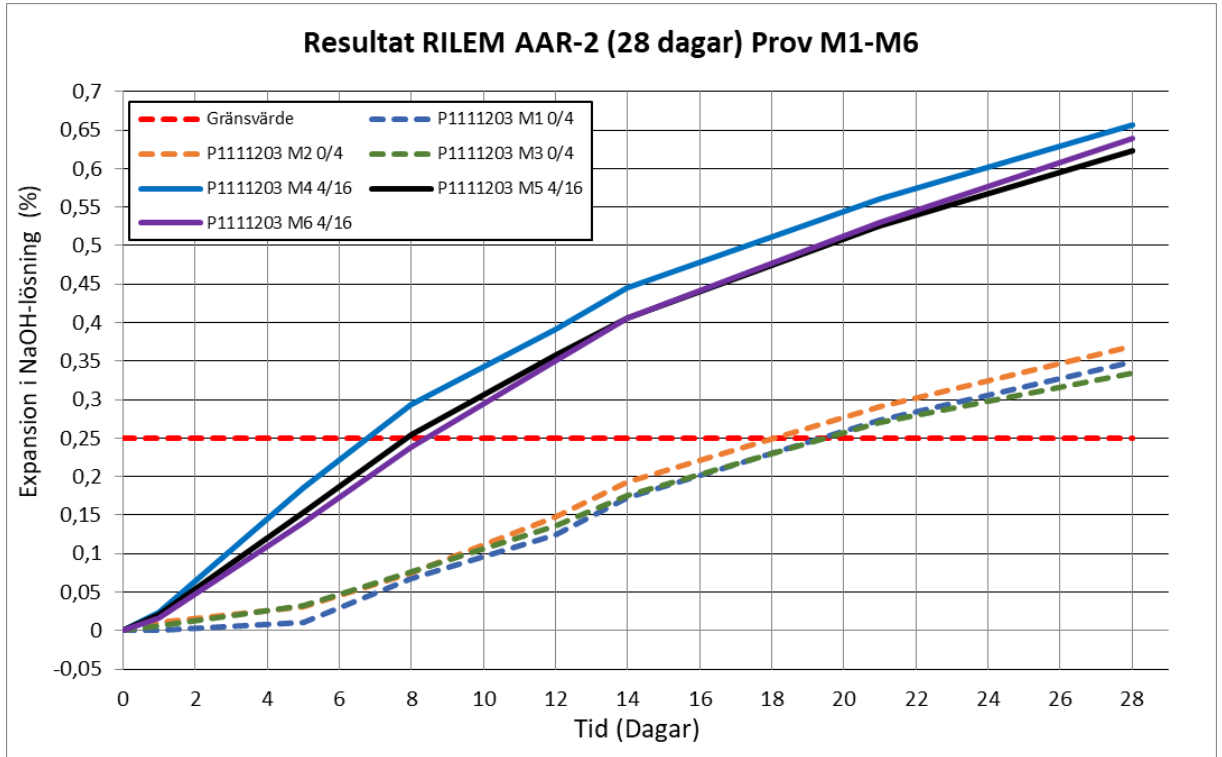
Tre bruksprismor ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) med ett vct på 0,50 gjöts. För porös ballast tillsätts extra vatten till blandningen motsvarande ballastens vattenabsorption. Prismorna avformas efter ett dygn och placeras därefter i vatten med temperaturen 20°C i 4–5 veckor. Därefter placeras prismorna i mättad NaCl-lösning i 50°C i 20 veckor. Under provtiden mäts prismornas längsta dimension för bestämning av och eventuell (longitudinell). Gränsvärdet för expansion under vilket ballasten anses vara oskadlig med avseende på ASR ligger på 0,10 % efter 20 veckor i NaCl-lösning enligt SS 137003.

5.4.2 Resultat

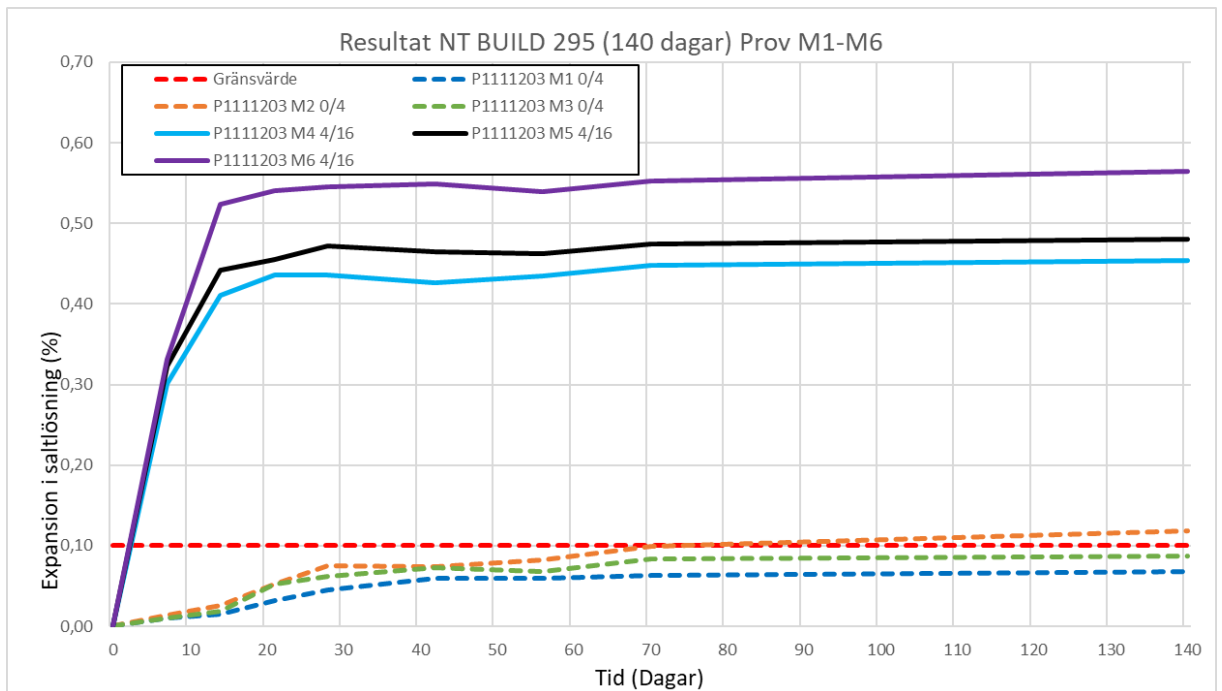
Resultaten från RILEM AAR-2 och redovisas i Figur 10 och Figur 12 för NT Build 295 i Figur 11 och Figur 13.

Fel! Hittar inte referenskölla.Fel! Hittar inte referenskölla.Fel! Hittar inte referenskölla.Fel! Hittar inte referenskölla.Fel! Hittar inte referenskölla.Fel! Hittar inte referenskölla.Fel! Hittar inte referenskölla.Fel! Hittar inte referenskölla.Fel! Hittar inte referenskölla.Fel! Hittar inte referenskölla.

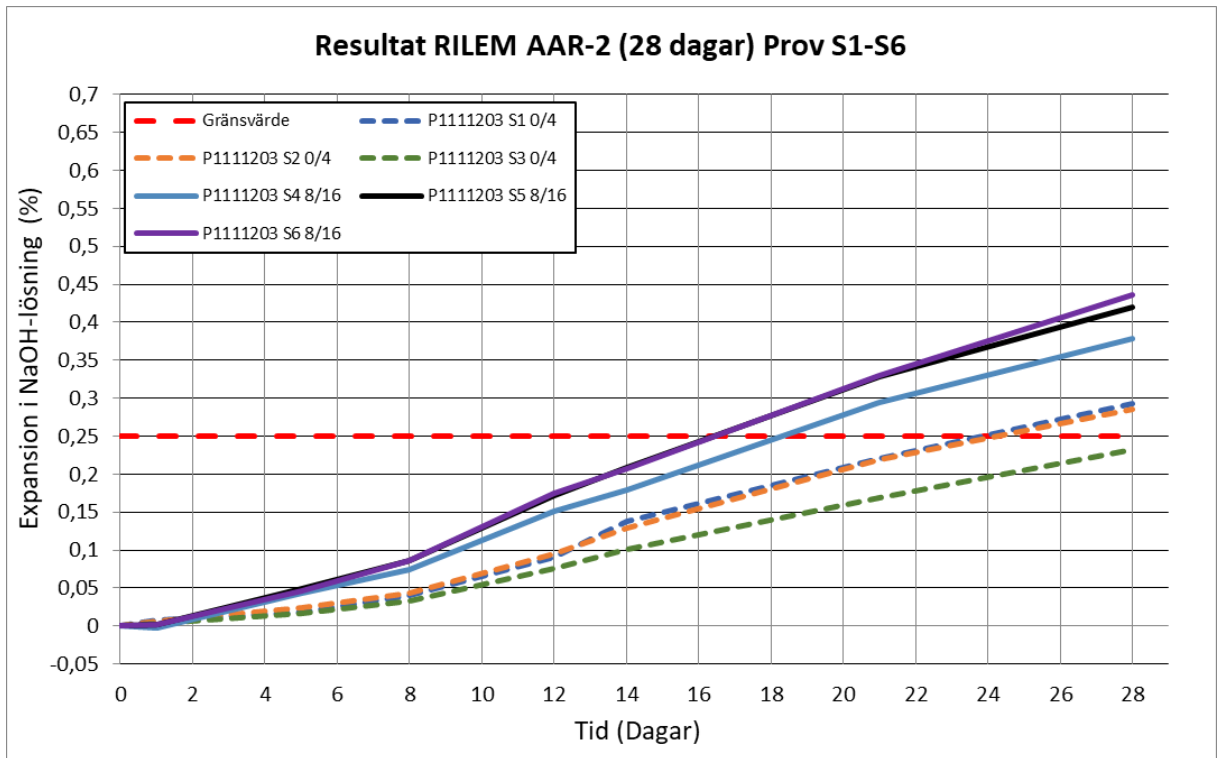
referensskälla.Fel! Hittar inte referensskälla.



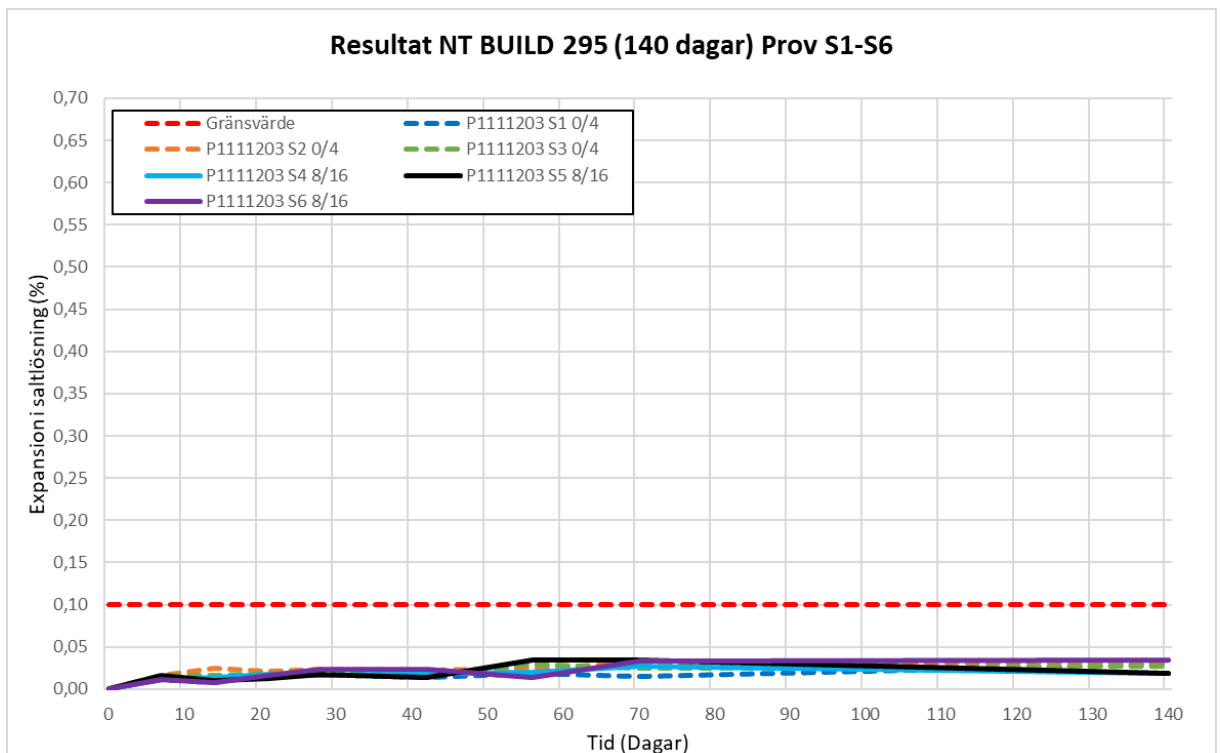
Figur 10 Expansion vid RILEM AAR-2 för Malmö-proverna över tid. Grafen för respektive material visar medelvärdet av uppmätt expansion i tre prismor. Gränsvärden för expansion är enligt SS 137003.



Figur 11 Expansion vid provning enligt NT Build 295 för Malmö-proverna över tid. Grafen för respektive material visar medelvärdet av uppmätt expansion i tre prismor. Gränsvärden för expansion är enligt SS 137003.



Figur 12 Expansion vid RILEM AAR-2 för Sundsvall-proverna över tid. Grafen för respektive material visar medelvärdet av uppmätt expansion i tre prismor. Gränsvärden för expansion är enligt SS 137003.



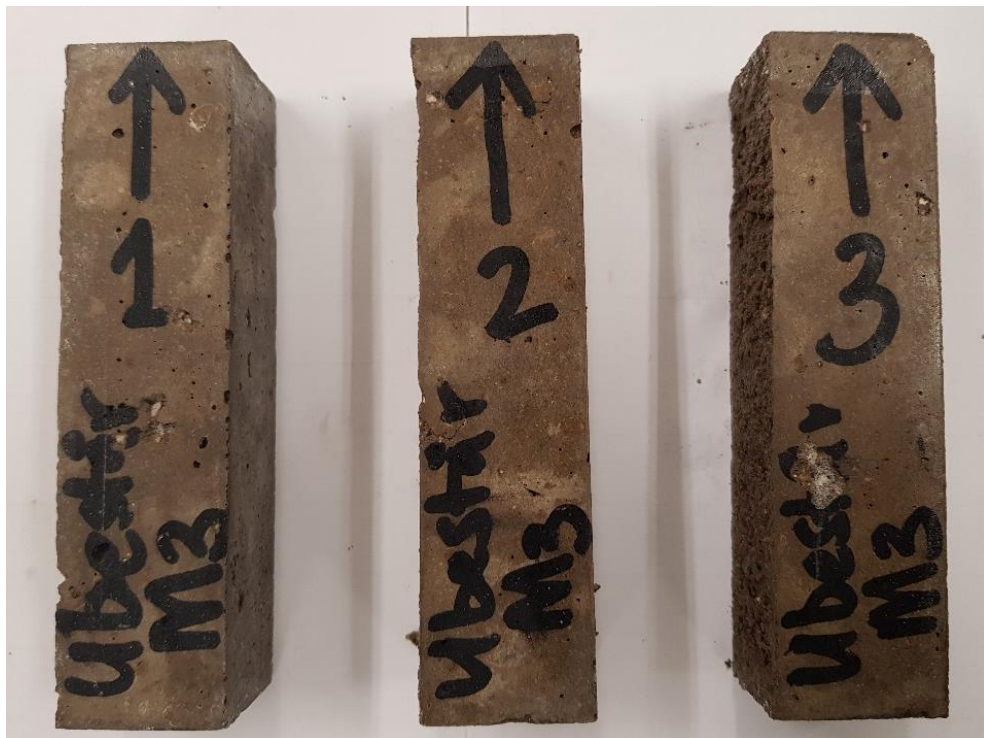
Figur 13 Expansion vid NT Build 295 för Sundsvall-proverna över tid. Grafen för respektive material visar medelvärdet av uppmätt expansion i tre prismor. Gränsvärden för expansion är enligt SS 137003.

5.4.3 Kommentarer

Resultaten för RILEM AAR-2 visade att alla tolv proverna innehåller alkalisilika-reaktivt material. Elva av proverna har en expansion över gränsvärdet på 0,25 % efter 28 dagar i NaOH-lösning, medan det tolfte (S3) ligger precis under detta gränsvärde. Genomgående för proverna är att de grova materialen orsakade större expansion än de finare. De grova materialen har utsatts för mer provpreparering såsom krossning, med exponering av nya färska mineralytor, annars är provningen genomförd på samma sätt. Inverkan av kornstorlek på ASR-reaktiviten behandlas i Betongrapport 18 [3]. Sambandet är komplicerat då två huvudsakliga reaktionssätt observeras i svenska material; dels att reaktionen sker inne i ballastkorn, dels att den sker på ytan av ballastkorn. Inre reaktion sker främst med långsamreaktiva bergarter och reaktion på ytan främst med snabbreaktiva bergarter. Inre expansion ger långsamt ökande expansion medan den ytliga reaktionen sker snabbt med ett pessimum avseende andel reaktiv ballast. Mellanting kan också förekomma. Det har visat sig att långsamt reaktivt ballast som är medelgrovkornig ofta ger störst expansion i stenfraktionen, medan finkornig ballast ger störst expansion i sand- och grusfraktionen. Detta kan förklara skillnaderna mellan grov och fin ballast i Figur 10 och Figur 12.

Resultaten för NT Build 295 uppvisar stora skillnader mellan provningarna. Alla proverna från Sundsvall har en liten expansion. För material från Malmö är expansionen stor, speciellt för de grova materialen (M4, M5 och M6), där resultatet ligger långt över gränsvärdet. För de fina materialen (M1, M2 och M3) ligger expansionen runt gränsvärdet. Intressant är också att resultatet för M4, M5 och M6 visar på en snabb expansion i början och att expansionen sedan planar ut. På prismorna ser man fina sprickor och enstaka pop-outs. På prismorna för M1, M2 och M3 syns mer skador, prismorna har många pop-outs men inte lika många sprickor.

När det gäller snabbreaktiva komponenter så styrs expansionen av att det finns ett pessimum som brukar vara vid ca 4% snabbreaktiva komponenter och styrs av tillgång på silika och alkalier. Vid låga andelar och för snabbreaktiva komponenter över 10–15 % fås ringa expansion. Dessutom är expansionen ofta särskilt stor i en viss fraktion. [3]



Figur 14 Foto på prismor av Malmö-materialet M3 efter avslutad provning med NT Build 295. Prismorna visar tecken på pop-outs.



Figur 15 Foto på prismor med material från Malmö M4 efter avslutad provning med NT Build 295. Prismorna visar tecken på sprickor och enstaka pop-outs.

5.5 Ballastens frostbeständighet

När vatten fryser sker en volymmetrisk expansion vid övergången till is. Detta orsakar ett tryck inuti kornet. När detta tryck överstiger kornets draghållfasthet sker ett brott. Vattenabsorptionen är därför av betydelse för ballastens frostbeständighet vid upprepad frysning-upptining. Enligt SS 137003 (2021 års version, tabell 2) kan ballast anses vara frostbeständig om vattenabsorptionen är $\leq 1\%$. För att ballast med vattenabsorption $>1\%$ ska anses frostbeständig ska den provas och deklarerats avseende viktförlust vid upprepad frysning-upptining enligt SS-EN 12620+avsnitt 5.7.1. Vilka krav som gäller står i SS 137003. Provning av hur upprepad frysning-upptining påverkar den mekaniska hållfastheten i ballast görs endast på grov ballast.

5.5.1 Metodik

Materialförlust i rent vatten bestäms enligt SS-EN1367-1. Prov av ballastfraktioner som vattenmättats vid atmosfäriskt tryck utsätts för tio frysning-upptiningscykler. Detta omfattar nedkylning till $-17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ under vatten och upptining i vattenbad med en temperatur på $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Därefter beräknas hur stor andel av material som har brutits ner på grund av frys-tö-skador (massförlust av material över 4 mm kornstorlek).

Materialförlust i saltlösning bestäms enligt SS-EN1367-6 och görs på i princip samma sätt som i rent vatten, men mätning och frysning sker i en enprocentig NaCl-lösning.

5.5.2 Resultat

Resultat från provning av vattenabsorption och frostprovningen redovisas i .

Prov-ID	Vattenabsorption ^{a)}	Materialförlust	
	(vikt%)	saltlösning (vikt%)	rent vatten (vikt%)
M4 4/16	2,9	9,1	-
M5 4/16	3,0	9,9	3,8
M6 4/16	2,9	10,4	-
S4 8/16	0,5	1,6	-
S5 8/16	0,8	2,8	-
S6 8/16	0,7	2,5	0,7
<i>Gränsvärde (krav enligt SS 137003)</i>	≤ 1	<i>För XF4 och XF2 ≤ 2 vikts-%</i>	<i>För XF1 ≤ 2 vikts-% För XF3 ≤ 1 vikts-%</i>

^{a)} Från den inledande karaktäriseringen

5.5.3 Kommentarer

Ett första screening-test för att avgöra ett ballastmaterials frostresistens är att bestämma vattenabsorptionen. Är vattenabsorptionen ≤ 1 % så anses ballasten vara frostbeständig utan vidare provning. Alla materialen från Sundsvall klarar detta krav, men det gör inte materialen från Malmö.

Om inte kravet på vattenabsorption uppfylls kan frostbeständighet påvisas med endera SS-EN 1367-1 (utan salt) eller SS-EN 1367-6 (med salt). Vilken metod som krävs och vilket gränsvärde som gäller beror på vilken miljö (exponeringsklass) betongen ska utsättas för. Metoden utan salt används för exponeringsklasserna XF1 och XF3 och metoden med salt för exponeringsklasserna XF2 och XF4.

För material från Malmö (M4, M5 och M6) ligger resultaten efter provning i saltlösning på ca 10 vikts-%, vilket betyder att 10 % av materialet har brutits ner till följd av upprepad frysning-upptining. Materialen från Sundsvall (S4, S5 och S6) har klarat sig bättre, med 2-3 vikts-% materialförlust efter frys-tö-växling. Ett prov från respektive återvinningsanläggning har provats i vatten utan salt; vid den provningen var förlusten ca 4 vikts-% i materialet från Malmö och <1 vikts-% i materialet från Sundsvall.

Materialen från Malmö klarar alltså varken absorptionskravet eller provningskraven med och utan salt och anses alltså inte lämpligt att använda i miljöer där betongen utsätts för frysning.

Materialen från Sundsvall klarar absorptionskravet och behöver då inte provas vidare utan kan användas i alla miljöer där betongen utsätts för frysning. Dock visar det sig att dessa material inte klarar provningskravet med salt medan det klarar provningskravet utan salt. Eftersom det saknas erfarenhet av provning av ballasts frostbeständighet och hur provningsresultaten från en sådan provning korrelerar med betongens frostbeständighet, kan det vara så att gränsen för ballastprovningenskraven i SS 137003 valts med överdriven försiktighet.

6 BETONGPROVNING

6.1 Val av material och betongparametrar

6.1.1 Val av bindemedel

Typ av bindemedel som väljs påverkar betongens beständighetsegenskaper. Då syftet med projektet är att studera inverkan av användning återvunnen ballast kontra naturlig ballast måste bindemedlet vara detsamma i samtliga blandningar, i synnerhet då antal blandningar som kan undersökas är begränsat. Valet står då mellan att välja ett bindemedel som traditionellt har använts i husbyggnadsbetong, tex ett CEM II/A-LL (med 16 % kalkstensfiller), eller ett som idag är möjligt att använda och kommer att bli mer vanligt i framtiden på grund av strävan att minska klimatpåverkan. I detta fall valdes det senare alternativet och det beslutades att använda ett bindemedel med 32 % mald granulerad masugnsslagg (GGBS) och 68 % portlandcement, CEM I, vilket ger en portlandcementklinkerhalt (PC-halt) på 65 %. Ett bindemedel med GGBS ger en betong med bättre motstånd mot skadliga alkalisilika-reaktioner än ett rent portlandcement, men ger något sämre motstånd mot karbonatisering och frostpåverkan.

6.1.2 Val av vct_{ekv}

Det lägsta vct_{ekv} som gäller för XC4/XF1 är 0,50 om PC-halten är mellan 35 och 80 %. För denna typ av betong väljs dock ofta i praktiken ett något lägre vct_{ekv} . Om bindemedlet sammansätts av ett portlandcement CEM I (68,5 %) och 31,5 % GGBS och ett vbt (vatten per total bindemedelshalt) på 0,45, för vilken k -värdesprincipen ska tillämpas med det k -värde (0,7) som gäller för alla GGBS som uppfyller dess produktstandard så blir $vct_{ekv} = 0,53$. Om förhöjt k -värde enligt SS137003 (0,8 eller 0,9) tillämpas så blir $vct_{ekv} = 0,41$ respektive 0,50. Används ett CEM II/B-S eller en bindemedelskombination BK II/B-S med påvisad likvärdig prestanda (EPCC) så blir $vct_{ekv} = 0,45$ om $vbt = 0,45$. vbt 0,45 med denna bindemedelssammansättning gör alltså att kravet för XC4/XF1 alltid uppfylls om förhöjt k -värde på 0,90 eller EPCC tillämpas. Eftersom PC-klinkerhalten med detta bindemedel inte understiger 65 % så klarar dessa betongsammansättningar under dessa förutsättningar även kraven för exponeringsklass XF3.

6.1.3 Val av ersättningsnivåer av återvunnen ballast

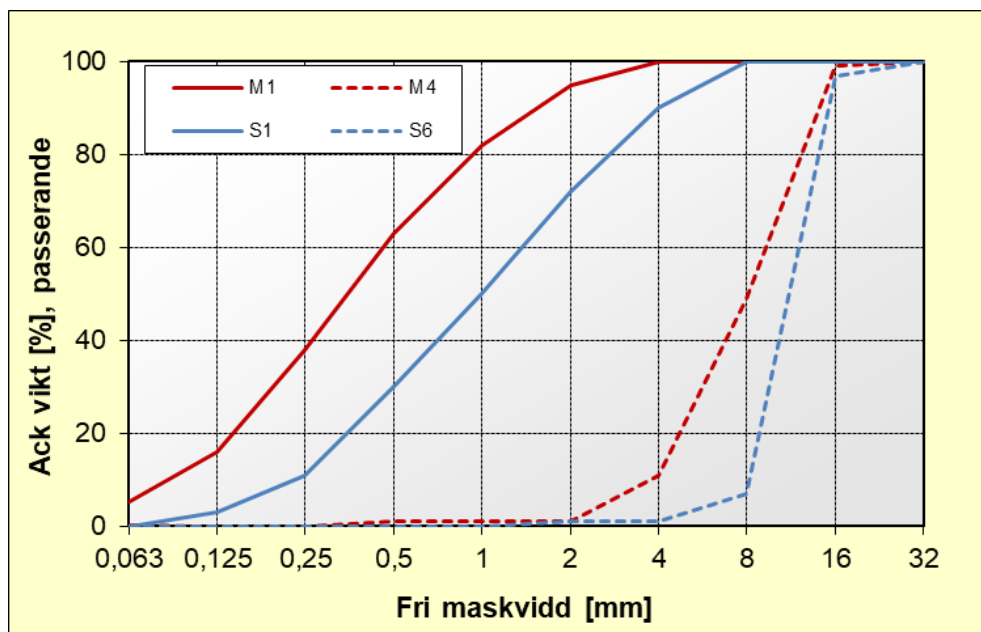
I exponeringsklass XC4 och XF1 accepteras enligt SS137003:2021 att 30 % av den grova ballasten ersätts med återvunnen ballast, om den uppfyller kvalitetskraven för *ballast av återvunna rivningsmaterial Typ A*. Med grov ballast avses ballast med en kornstorlek över 4 mm. I denna studie valdes 20% respektive 30 % ersättning av den grova ballasten. För fin ballast finns inga explicita gränser eller krav angivna, men att ersätta en del av den finkorniga ballasten med återvunnen ballast vore mycket fördelaktigt av miljöskäl. Därför valdes också en kombination med 30% återvunnen ballast i den fina sorteringen och 30 % i den grova. Som referens ingick en blandning med bara naturlig ballast.

6.1.4 Val av återvunnen ballast

För tillverkning av betong valdes M1 och M4 från Malmö och S1 och S6 från Sundsvall. Provernas kornstorleksfördelning framgår av Figur 16, medan korndensitet och vattenabsorption anges i Tabell 6.

6.1.5 Val av referensballast

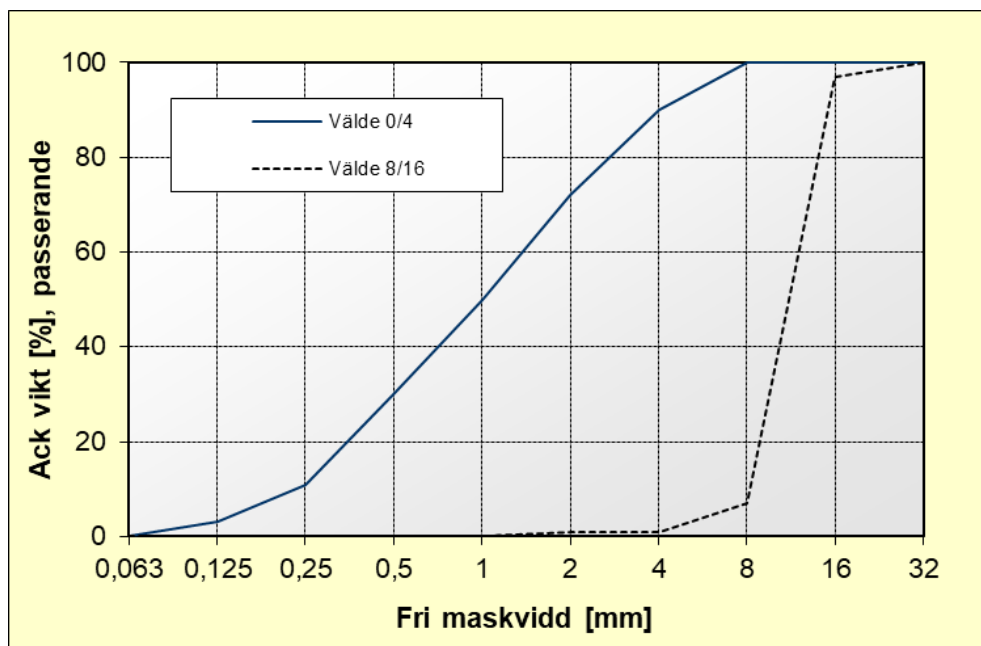
Utgångspunkten var att välja en referensballast som används i betongproduktion och som var måttligt reaktiv med avseende på ASR. Valet föll på 0/4 och 8/16 från Vändle. Ugnstorkad korndensitet och vattenabsorptionen för båda fraktionerna var 2,62 kg/dm³ respektive 0,5 %. Kornstorleksfördelning framgår av Figur 17.



Figur 16 Kornstorleksfördelning för M1, M4, S1 och S6.

Tabell 6 Korndensitet och absorption för ballast M1, M4, S1 och S6

Ballast	Ugnstorkad korndensitet [kg/dm ³]	Vattenabsorption [%]
M1	2,63	0,3
M4	2,49	2,9
S1	2,66	0,5
S6	2,62	0,7



Figur 17 Kornstorleksfördelning för Vælde 0/4 och Vælde 8/16.

6.1.6 Val av bindemedelsmängd och korngradering

Som utgångspunkt användes ett par recept som använts för betong för samma användningsområde och som i viss mån var anpassade till en kornstorleksfördelning med gap (vissa fraktioner saknas helt) som det kom att bli fråga om med de ballastmaterial som var tillgängliga. Detta recept fick dock modifieras något för att ge lämplig konsistens. I samtliga recept utgjordes 49 % av ballasten av fin ballast ($\leq 4\text{mm}$) och 51 % av grov ballast. Bindemedelshalten i samtliga grundrecept var $388,8\text{ kg/m}^3$ betong. I dessa recept används även luftporbildare med en avsedd lufthalt på 4,5 %. Eftersom blandningarna även skulle funktionsprovas med avseende på ASR och sådan provning kräver att ingen luftporbildare används, tillverkades betongblandningar med samma förhållande mellan övriga beståndsdelar som i grundrecepten, men utan luftporbildare. Bindemedelshalten i dessa blev då $400,4\text{ kg/m}^3$ betong vid en antagen naturlig lufthalt på 1,5 %.

6.2 Betongrecept

Sju grundrecept togs fram, vilken vardera även hade en ASR-provningsvariant utan luftporbildare. Ballastmängder samt mängd luftporbildare och flytmedel i de olika blandningarna framgår av Tabell 7.

Bindemedelshalt:

- i grundrecepten (med luftporbildare) = $388,8\text{ kg per m}^3$ betong
- i ASR-recepten (utan luftporbildare) = $400,4\text{ kg per m}^3$ betong

Av bindemedlet utgjordes 68,5 % av CEM I 52.5 R (Cementa Velox) och 31,5 % av GGBS (Merit från Swecem)

Flytmedel: Viscocrete 1030, densitet $1,06\text{ kg/ml}$, torrhalt 30 %. Ett sättmått på 160–210 mm eftersträvades.

Luftporbildare: Master Air 105, densitet $1,0\text{ g/ml}$, torrhalt 0,55 %. En lufthalt på ca 4,5 % eftersträvades.

Tabell 7 Sammansättning hos betongblandningarna

Recept	Mängd ballast per bindemedel, B (kg/kg)						Luftpor- bildare (% per B)	Flytmedel (% per B)	
	Välde 0/4	Välde 8/16	M1	M4	S1	S6		Grund- recept	ASR- recept
Referen- s	2,31	2,03	--	--	--	--	0,83*	0,39*	0,3
0/20M	2,06	1,77	--	0,51	--	--	0,80	0,28	0,49
0/30M	2,04	1,54	--	0,74	--	--	0,80	0,13	0,18
30/30M	1,82	1,20	0,55	0,74	--	--	0,80	0,4	0,40
0/20S	2,66	1,23	--	--	--	0,45	1,25	0,17	0,30
0/30S	2,65	1,01	--	--	--	0,67	1,10	0,4	0,30
30/30S	1,81	1,20	--	--	0,74	0,59	0,80	0,19**	0,34

* Osäker notering
** Gav sättmått enbart 90 mm

6.3 Gjutning och provning färska egenskaper samt härdning

Sättnmätt mättes på varje blandning enligt SS-EN 12350–2. Lufthalt bestämdes på samtliga blandningar med luftporbildare enligt SS-EN 12350–7. På vissa blandningar med luft bestämdes även den färskas betongens densitet vid lufthaltsmätningen.

Av varje grundrecept med luftporbildare gjöts:

- 15 kuber 150×150 ×150 mm för provning av tryckhållfasthet
- 4 kuber 150×150 ×150 mm för provning av frostbeständighet
- 3 betongprismor 100×100×400 mm för bestämning av karbonatiseringsdjup

Av varje ASR-recept (utan luftporbildare) gjöts 3 betongprismor (75×75×280 mm) för bestämning av ASR-motstånd.

- Kuberna för bestämning av tryckhållfasthet vattenlagrades fram till provning.
- Kuberna för frostbeständighet härdades i enlighet med SS 137244.
- Prismorna för karbonatisering vattenlagrades i 28 dygn och härdades därefter i 50 % RF i 14 dygn innan karbonatiseringen startades.
- Prismorna för ASR-provning lagrades i enlighet med RILEM AAR-11.

6.3.1 Provning på hårdnad betong

Tryckhållfasthet och densitet

Tryckhållfasthet bestämdes enligt SS-EN 12390–3 på tre provkroppar från varje blandning med luftporbildare efter 1, 7, 28, 56 och 91 dygn. På samtliga provkroppar bestämdes även densitet genom mätning av vikt och dimensioner.

Frostbeständighet

Samtliga blandningar med luftporbildare provades i 56 frostcykler i enlighet med SS 137244 metod B (utan salt). Resultaten ges som medelvärden av fyra provkroppar.

Motstånd mot karbonatisering

Samtliga blandningar med luftporbildare provades i enlighet med SS-EN 12390–12, d.v.s. karbonatiseringsdjupet mättes på 12 punkter utmed den exponerade ytan på vardera av två provkroppar vid exponering för en CO₂-koncentration på 3 % under 70 dygn efter en härdningstid i vatten på 28 dygn och 14 dygn i laboratorieatmosfär. Angivna värden är medelvärden av dessa.

Beständighet mot skadliga alkalisilikareaktioner (ASR)

Provning av betongens beständighet med avseende på ASR genomfördes enligt RILEM AAR-11, variant 3, d.v.s. mätning av expansion vid ca 100 % RF och 60 °C under 20 veckor efter en härdningstid i vatten på 28 dygn och 14 dygn i laboratorieatmosfär. Resultaten ges som medelvärden av tre provkroppar.

6.4 Resultat

6.4.1 Sättmått, lufthalt och densitet hos den färska betongen

Uppmätta värden på sättmått, lufthalt och densitet anges i Tabell 8.

Tabell 8 Uppmätta värden på lufthalt, sättmått och färsk densitet

Recept	Grundrecept (med luft)			ASR-recept (utan luft)
	Uppmätt lufthalt, %	Uppmätt sättmått, mm	Uppmätt densitet, kg/dm ³	Uppmätt sättmått, mm
Referens	5,4	165	2,140	200
0/20M	4,6	195	2,172	200
0/30M	6,1	170	----*	175
30/30M	5,5	210	2,169	165
0/20S	7	170	2,133	185
0/30S	8	180	----*	170
30/30S	5,8	90	2,257	152
* Notering saknas				

Kommentar sättmått

Då inte exakt samma konsistens erhöles i samtliga blandningar och lufthalten varierar är det svårt att dra bestämda slutsatser om påverkan av återvunnen ballast på behov av flytmedel för att få önskad konsistens. Det framgår dock att den grova återvunna ballasten inte har någon negativ inverkan på konsistensen, snarare det motsatta. Vid tillsats av fin återvunnen ballast ökar dock behovet av flytmedel något för att uppnå önskad konsistens.

Kommentar lufthalt

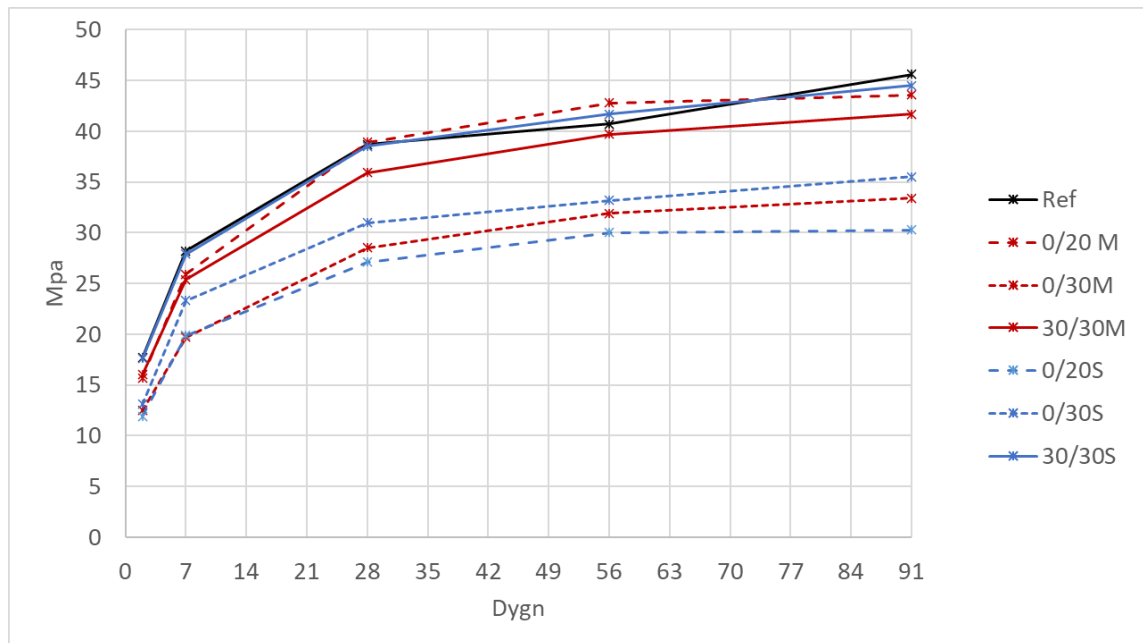
Den uppmätta lufthalten är i flera blandningar betydligt högre än avsett. Skillnader i lufthalt inverkar bl.a. på hållfastheten, se nedan.

Kommentar ugnstorkad korndensitet

I SS 137003 anges att ugnstorkad korndensitet ρ_{rd} (ugnstorkad vikt dividerat med den volym den uppfyller i vatten, inklusive inre slutna hålrum och hålrum som fylls med vatten) ska anges för ballasten. I stället borde skenbar korndensitet ρ_a (ugnstorkad vikt dividerat med den volym den uppfyller i vatten, inklusive inre slutna hålrum men exklusive hålrum som fylls med vatten) anges och användas vid receptframtagning. Det finns ingen anledning att räkna med volymen av de hålrum som kan fyllas med vatten (d.v.s. vattenabsorptionen), då dessa även kommer att fyllas med vatten i den färska betongen. Denna volym ska inte räknas in vid beräkning av $vct/vbt/vct_{ekv}$.

6.4.2 Hållfasthetsutveckling

I Figur 18 visas medelvärdena av de tre kuberna för de olika blandningarna (grundrecept med luft) vid de olika provningstillfällena.



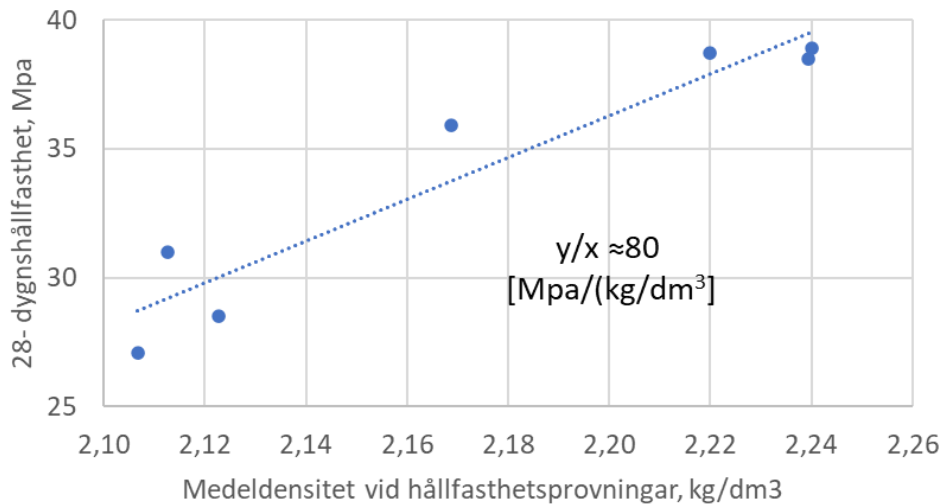
Figur 18 Uppmätt hållfasthetsutveckling för blandningarna med luft. Medelvärde av tre provkroppar.

Som framgår av Figur 18 varierar hållfastheten mycket mellan blandningarna. Vid 91 dygn är spannet mellan högsta och lägsta hållfasthet drygt 15 MPa; den med högst hållfasthet har alltså en 91-dygnshållfasthet som är 50 % högre än den med lägst. De blandningar som har lägst hållfasthet är också de som har högst lufthalt (se Tabell 9).

Inverkan av en skillnad på 1 % lufthalt kan vara 2–4 MPa på 28-dygnshållfastheten [10]. Den lufthalt som mäts vid gjutning är heller inte alltid rättvisande för den lufthalt som finns i de kuber som hållfastheten bestäms på, då vibreringsintensitet varierar mellan det prov som lufthalten mäts på och hållfastetskuberna. Lufthalten återspeglas i densiteten hos kuberna. Densiteten har mätts på samtliga kuber på vilka tryckhållfastheten bestämts (15 per blandning). Medelvärde och standardavvikelse för dessa anges i Tabell 9. 28-dygnshållfasthet som funktion av medeldensiteten hos provkropparna för de olika blandningarna med luft visas i Figur 19.

Tabell 9 Medelvärde och standardavvikelse för densitet hos provkroppar som hållfasthetsprovats (15 värden per blandning).

Recept	Densitet (kg/m ³)	Standardavvikelse (kg/m ³)
Referens	2,220	0,042
0/20M	2,240	0,024
0/30M	2,123	0,016
30/30M	2,169	0,017
0/20S	2,107	0,031
0/30S	2,113	0,030
30/30S	2,239	0,016



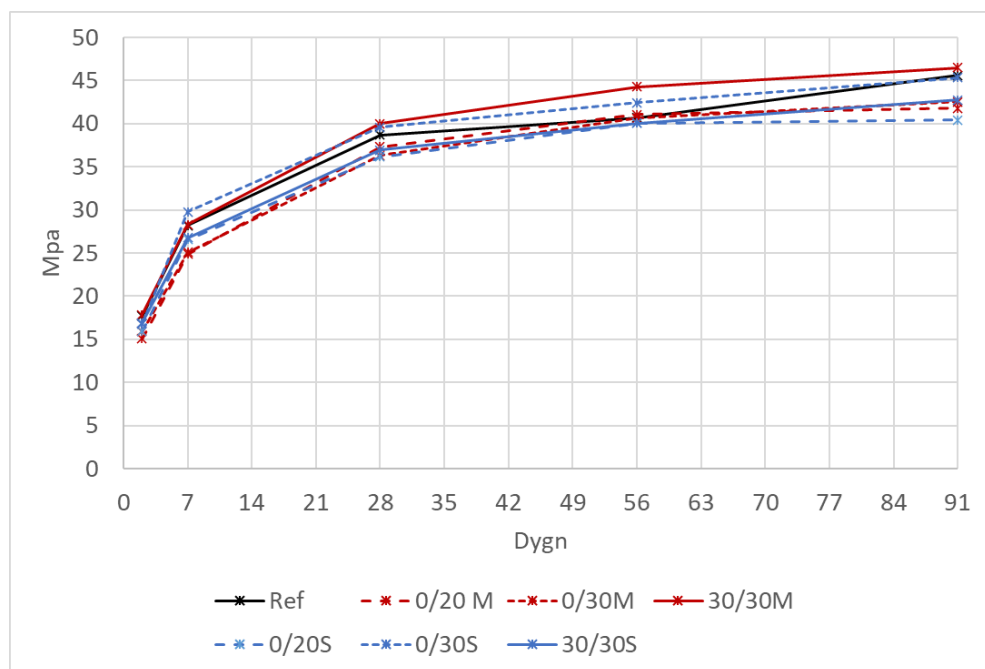
Figur 19 28-dygns hållfasthet som funktion av medeldensitet hos tryckhållfasthetsprovkroppar för de olika blandningarna med luft.

Den uppmätta tryckhållfastheten vid de olika mättillfällena har för blandning N korrigerats med en faktor k_N beräknad enligt

$$k_N = (f_{u28N} + (\text{dens}_N - \text{dens}_{\text{ref}}) * 80) / f_{u28N}$$

där f_{u28N} är uppmätt 28-dygns hållfasthet för blandning N och dens_N och dens_{ref} är medeldensiteten för blandning N respektive referensblandningen.

Med denna korrigering fås hållfasthetsutveckling för de olika blandningarna enligt Figur 20.

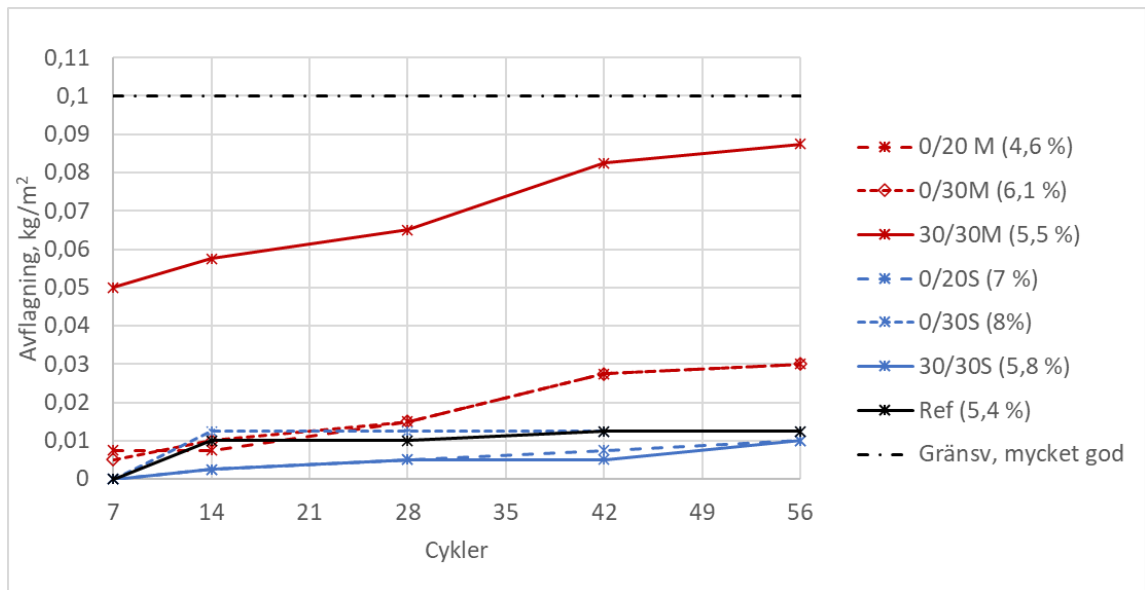


Figur 20 Hållfasthetsutveckling korrigerad baserat på medeldensitet hos hållfastetskuber för respektive blandning.

Denna korrigering ger ett betydligt mindre spann mellan högsta och lägsta hållfasthet (6 MPa vid 91 dygn) vilket motsvarar ca 15 % på det lägsta värdet. Det finns heller inga avgörande skillnader mellan hållfasthetsutvecklingen hos blandningarna med eller utan återvunnen ballast eller med olika typer av återvunnen ballast.

6.4.3 Frostbeständighet

Avflagnings under 56 frostcykler vid provning enligt SS 137244 metod B, utan salt visas i Figur 21.



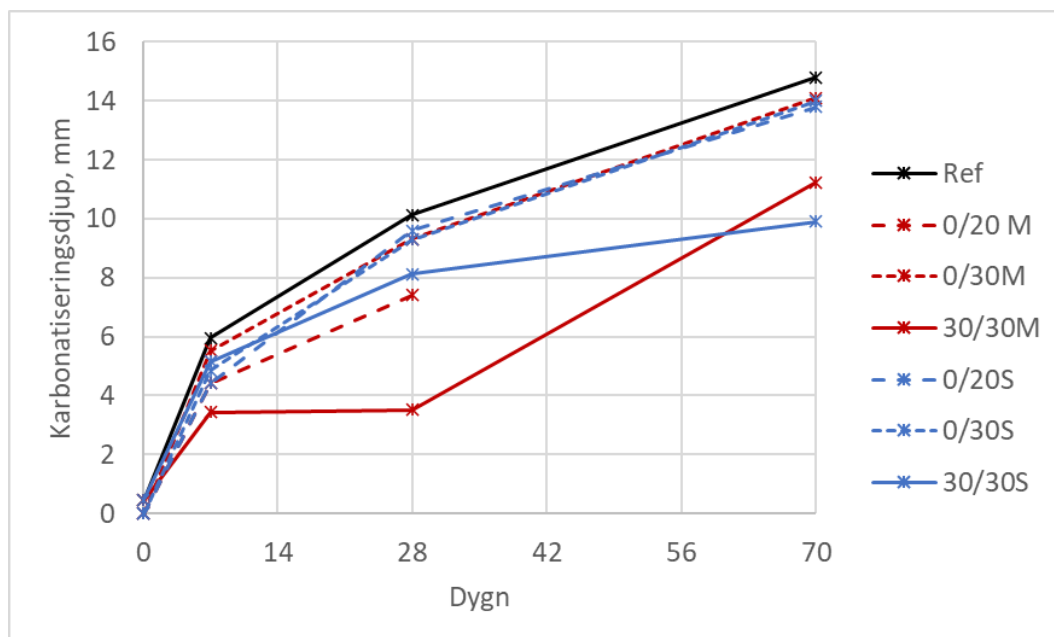
Figur 21 Avflagnings vid provning enligt SS 137244 metod B, (utan salt) för blandningarna. Värderna inom parentes är uppmätt lufthalt i den färska betongen.

Den grova återvunna ballasten från Malmö uppfyllde inte kravet vid ballastprovningen av frostresistens utan salt medan den från Sundsvall klarade sig (se Tabell 5). Användning av den grova Malmöballasten ger en viss ökning av avflagnings. I det här fallet är ökningen nästan identisk med 20 och 30 % grov ballast från Malmö. Den grova ballasten från Sundsvall har ingen noterbar inverkan på frostresistensen utan salt. Den fina återvunna ballastens inverkan är inte något som man ägnat intresse åt i standarder eller i litteraturen, och det förvånande är att den blandning som innehåller den fina återvunna ballasten från Malmö är den som har den största inverkan på avflagnings bland dessa blandningar. Den fina återvunna ballasten från Sundsvall påverkar däremot inte frostbeständigheten negativt, utan blandning 30/30S är den blandning som har lägst uppmätt avflagnings av alla. Det bör dock noteras att inga förändringar är större än att gränsen för mycket god frostbeständighet utan salt enligt SS 137244 uppfylls för samtliga blandningar.

6.4.4 Motstånd mot karbonatisering

Karbonatiseringsdjupet vid exponering för 3 % CO₂ under 70 dygn för de olika blandningarna (med luft) visas i Figur 22.

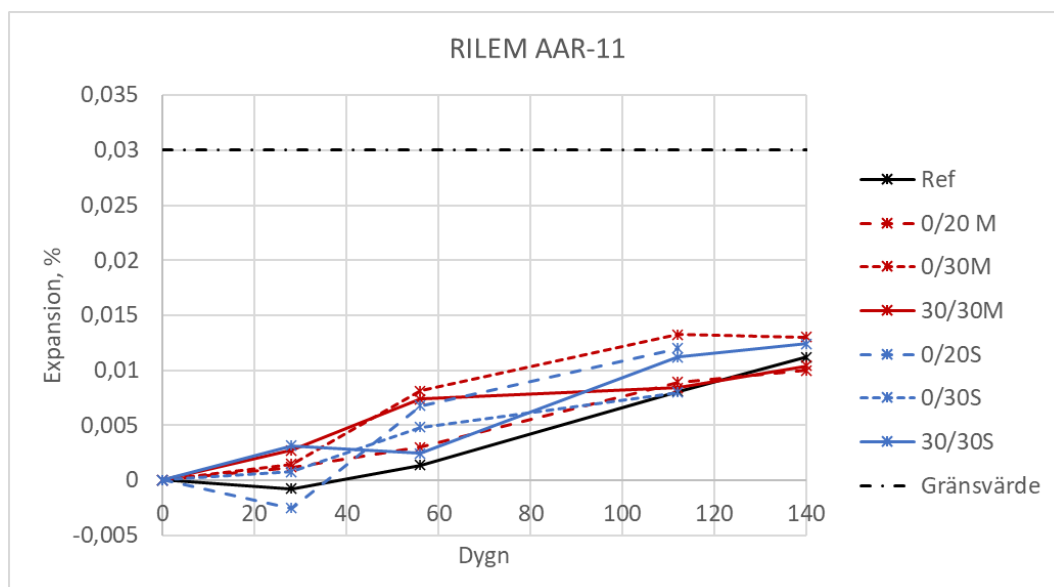
Samtliga mätvärden för referensblandningen utan återvunnen ballast ligger högre än för de övriga blandningarna. Man kan alltså konstatera att användning av denna typ av återvunnen ballast inte påverkar karbonatiseringsmotståndet negativt. Lägst karbonatiseringsdjup fås i de blandningar som även innehåller finkorning återvunnen ballast (30/30 M och 30/30S).



Figur 22 Karbonatiseringsdjup i provkroppar (med luft) exponerade för en atmosfär med 3 % CO₂.

6.4.5 Beständighet mot skadlig ASR

Medelvärde för expansionen hos tre provkroppar av betongblandningarna utan luft vid provning enligt RILEM AAR-11 visas i Figur 23.



Figur 23 Medelexpansion av tre provkroppar per blandning (utan luft) vid provning enligt RILEM AAR-11.

I ballastprovningen uppvisade den grova återvunna ballasten från Malmö mycket dåligt motstånd mot skadlig ASR, både vid provning med RILEM AAR-2 och med NT Build 295 medan den fina återvunna ballasten från Malmö var något bättre, men klarade inte gränsvärdet för RILEM AAR-2 och låg runt gränsvärdet för NT Build 295 (Figur 10 och Figur 11).

När det gäller återvunna ballasten från Sundsvall så visade varken den fina eller grova ballasten tendenser till att vara skadliga när de provades med NT Build 295 (Figur 13). Däremot klarade den grova återvunna ballasten från Sundsvall inte gränsen för oskadlig vid provning med RILEM

AAR-2. För den fina återvunna ballasten från Sundsvall låg expansionen runt detta gränsvärde (Figur 12).

I de betongblandningar som provats här har ett bindemedel som hämmar utvecklingen av skadlig ASR-expansion använts (31,5 % av portlandcementklinkern har ersatts med mald granulerad masugnsslagg). Expansionen ökar vid användning av återvunnen ballast, i synnerhet i det tidiga skedet. Den återvunna ballasten från Malmö ger som förväntat något större expansion än den från Sundsvall. Men av Figur 23 framgår det också att användning av denna typ av bindemedel är en tillräcklig åtgärd för att hålla expansionen under den nivå som accepteras vid provning med RILEM AAR-11 enligt Betongrapport nr 18 [3] och SS137003 vid de ballstersättningsnivåer som provats här.

Enligt Betongrapport 18 [3] och SS 137003 bör betong med ballast som innehåller snabbreaktiva komponenter funktionsprovas med CBI-metod nr 1 som beskrivs i bilaga F till Betongrapport 18 [3]. Under projektiden var det dock inte möjligt att genomföra sådan provning. Detta gäller i synnerhet funktionsprovning av betong med ballast från Malmö men även i viss mån betong med ballast från Sundsvall, då den innehåller partiklar med osäker alkalisilika-reaktivitet.

För att helt friskriva dessa betongsammansättningar med återvunnen ballast från Malmö och Sundsvall bör provningarna kompletteras med funktionsprovning med CBI-metod nr 1.

7 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

- När det gäller ersättning av högst 30 % grov ballast med ÅV-ballast av schaktmassor så kan detta göras utan att hållfasthetsutvecklingen påverkas. Inte heller krävs mer flytmedel för att åstadkomma en betong med lämplig konsistens. Ersätts dessutom 30 % av den fina ballasten med återvunnen ballast från schaktmassor så ökar behovet av flytmedel marginellt.
- Frostbeständigheten, bestämd i form av avflagning vid cyklisk frysning-upptining enligt SS 137244 metod B (utan salt), är för samtliga blandningar mycket god (högst 0,1 kg/m² efter 56 cykler). Kravet i SS 137003 är god, d.v.s. högst 0,5 kg/m² efter 56 cykler. En viss tendens till ökad avflagning fås vid användning av återvunnen ballast från Malmö, som vid ballastprovning både hade för hög absorption och för hög nedbrytning vid ballastprovning i rent vatten för att få användas i frostutsatt betong enligt SS 137003. Återvunnen ballast från Sundsvall, som klarade gränsvärdet för vattenabsorption men inte gränsvärdet vid ballastprovningen medförde inga förändringar av frostresistensen i jämförelse med naturlig ballast.
- Noterbart är den stora skillnad i reaktivitet som kan observeras mellan sorteringarna vid funktionsprovning av ballast. Detta med tyngdpunkt på materialet från Malmö, men en likartad trend kan noteras för material från Sundsvall avseende funktionsprovning enligt RILEM AAR-2. Den grövre sorteringen, 4/16 och 8/16 ger en betydligt större expansion för RILEM AAR-2 metoden i jämförelse dess motsvarighet i respektive 0/4-sortering. Detta är också uppseendeväckande tydligt för NTBuild 295 metoden vid undersökning av material från Malmö. En förklaring till detta beteende är kornstorleken, vilket adresseras i [3].
 - (i) Den specifika ytan ökar och därmed mineralkornens exponering mot alkalina lösningar i cementpastan.

Med andra ord är en tolkning att ”färska” mineralytor bidrar till högt jonutbyte, där ingen skyddande yt-film (oxidation) förekommer i ett tidigt skede.

Detta kan vara en av orsakerna till den skillnad som observeras, då det undersökta materialet i dessa ”grova sorteringar, 4/16 och 8/16” krossas ned till fraktion <4 mm inför funktionsprovningarna, vilket således frigör en hög andel mineralkorn som exponeras och kan reagera med porlösningen.

I ett motsatsförhållande kan också det omvända faktumet beskrivas;

- (ii) att de använda sorteringarna (0/4) i projektet varit exponerade mot luften en betydligt längre tid än det ”grövre sorteringar som 4/16 och 8/16” som krossas ner inför funktionsprovning. Alltså är sannolikt dessa exponerade mineralkorn i sorteringar 0/4 längs kornens ytor mindre reaktiva initialt, då dessa bör ha reagerat mot omgivande fukt under en betydande tid. Notera att dessa sorteringar i 0/4 inte krossats inför funktionsprovning, utan enkom är sorterade vid anläggningarna. Vid jämförelse mellan fina (0/8) och grova (8/16) sorteringar, enligt betongrapport nr 18, är en slutsats att ”en medelkornig bergarter tenderar att ge en mer reaktiv ”grövre sortering” och en betydligt mer finkornig bergart, som vulkanit ger ett omvänt förhållande.”

Ytterligare en faktor som spelar roll för reaktiviteten och därmed expansionspotentialen i betong är mineralkornstorleken i ballastkornen och ballastens egen kornstorlek. Det beror

på att den specifika ytan ökar och därmed mineralkornens exponering mot alkalina lösningar i cementpastan. De flesta s.k. långsamt alkalireaktiva bergarter i Sverige har en relativt ordnad kristallstruktur i silikatmineralen, där kristallgittret ibland är svagt plastiskt deformerat eller att mineralkornen ofta är medelkorniga. De något mer medelreaktiva bergarterna är oftast mycket finkorniga (mikro- till kryptokristallin) och/eller tydligt plastiskt deformerad kvarts, vilket kan medföra ett bidrag till reaktiviteten.

Avseende återvunna ballastens kornstorlek är det en markant skillnad mellan Malmö och Sundsvalls sorteringar (0/4). Malmös sortering utgörs av ca 90 % <1 mm. I jämförelse utgörs Sundsvalls materialets av 60 % <1mm. Den här stora skillnaden kan således ge en förklaring till den skillnad i reaktivitet som kan noteras mellan dessa sorteringar med hänsyn till specifik yta. Man kan också konstatera att skillnader i reaktivitet också består för de grövre sorteringarna. Då dessa dock ej är likartade är en direkt jämförelse orättvis. Men även i detta fall kan observeras att Malmö sortering 4/16 är mer reaktiv än material från Sundsvall 8/16. Hur stor inverkan kornstorlek och specifik yta har i detta fall är omöjligt avgöra.

Påverkan av bergarts-sammansättning torde också bidra med olika reaktivitet. En del kända kombinationer av kryptokristallina till amorfa mineral (Betongrapport nr 18) bidrar sannolikt till det snabba expansionsförloppet i funktionsprovningen NTBuild 295 avseende återvunna ballasten från Malmö.

- Den använda grova återvunna ballasten från Malmö överskred gränsvärdena för skadlig med god marginal både med RILEM AAR-2 och NT Build 295. Den fina Malmöballasten hade lägre expansion men över gränsvärdet med RILEM AAR-2 och värden nära gränsvärdet med NT Build 295 hämmar ASR-expansionen. Detta var tillräckligt för att ge betong som med god marginal klarade gränsvärdena som gäller vid funktionsprovning av aktuell sammansättning. Den återvunna ballasten från Sundsvall klarade sig mycket bättre än den från Malmö i ballastprovningen. Vid provning med NT Build 295 var expansionen i princip obefintlig. I funktionsprovningen av betongen sågs inga avgörande skillnader mellan materialen från Malmö och Sundsvall, även om mätvärdena för Malmö låg något högre. Tyvärr havererade provningsanordningen innan det sista mätvärdet erhöles för vissa blandningar. En viss ökning av expansionen fås för alla blandningar med ÅV-ballast i förhållande till naturballast. I synnerhet sker expansionen något snabbare under de första 60 dygnens exponering när ÅV-ballast av schaktmassor används. Med det valda bindemedlet uppfyller samtliga blandningar kravet som gäller vid funktionsprovning av aktuell sammansättning som gäller om inga snabbreaktiva partiklar ingår. För att helt friskriva betongen från risk för skadlig ASR bör provningarna kompletteras med provning med CBI-metod nr 1, vilket rekommenderas i reglerna när ballasten innehåller snabbreaktiva partiklar
- Ersättning med återvunnen ballast medförde ingen ökning av betongens känslighet för karbonatisering, snarare tvärtom. I synnerhet var effekten positiv då även 30 % av den fina ballasten ersattes med återvunnen ballast från schaktmassor.

Vid genomförandet av projektet har vi observerat flera oklarheter eller problem när det gäller tillämpning av regelverk och standarder som i onödan kan begränsa användningen av återvunnen ballast av schaktmassor i betong. Vissa kräver att regelverk/standarder behöver förtydligas, i andra fall behöver tex provningsmetoder modifieras som utgör oklarheter eller kan på onödigt sätt begränsa användning av återvunnen ballast. Nedan listas ett antal oklarheter/problem:

- När det gäller återvunnen ballast så är kraven i både den europeiska (SS-EN 206) och den svenska (SS137003) betongstandarderna utarbetade med tanke på krossat material från rivna konstruktioner av betong, murverk och dylikt och från restbetong vid betongtillverkning. Man har inte alls tänkt på ballast som återvunnits ur schaktmassor från geokonstruktioner. För att klargöra vad som ska gälla för återvunnen ballast från schaktmassor bör SS 137003 förtydligas.
- En annan fråga som också behöver förtydligas i SS 137003 är hur finkornig återvunnen ballast ska hanteras och hur den kan användas.
- När det gäller vissa provningskrav på ballast som införts i SS 137003 saknas erfarenhet i Sverige och de har kanske valts med överdriven försiktighet, d.v.s. de är konservativa. Osäkerhet råder om lämpliga kravnivåer, tex gällande hur ballastens frostresistens påverkar betongens frostresistens. Då absorptionen hos grov återvunnen ballast ofta överskrider gränsvärdet 1 % ska frostbeständigheten påvisas med särskilda provningsmetoder. Hur resultaten från dessa metoder korrelerar med betongens frostbeständighet borde undersökas närmare, för att ge gränsvärden med större säkerhet.
- Återvunnen ballast där erfarenhet av användning bör initialt användas med låg ersättningsgrad ($\leq 30\%$ av totala ballastmängden) som med tiden kan ökas, allteftersom erfarenhet och förtroende för materialet och dess egenskaper växer. Lägre ersättningsgrad underlättar dessutom för betongproducenten att parera fluktuationer i kvalitet.
- Metoden 933–11 är subjektiv och operatörsberoende. Det är svårt att korrekt kategorisera olika tillverkade främmande material med blotta ögat.
- Oklart hur korn med *spår* av cementbruk eller bitumen ska kategoriseras enligt SS-EN 933–11. Metoden kan tolkas som att sådana korn ska kategoriseras som betong (Rc) respektive bituminöst (Ra) alternativt som naturlig ballast (Ru). Den första tolkningen innebär att den faktiska massan för cementbruk och bitumen blir betydligt mindre än de redovisade resultatet för betong och bituminösa material.
- Hur hanterar vi olika typer av slagg? Ingen skillnad görs i standarder.
- Den metod som används för bestämning av vattenabsorption, SS-EN 1097–6, ger för fin återvunnen ballast mycket osäkra resultat, vilket borde studeras närmare så att metoden kan modifieras. Enligt SS 137003 bör ugnstorkad korndensitet användas (ugnstorkad vikt dividerat med den volym den uppfyller i vatten, inklusive inre slutna hålrum och hålrum som fylls med vatten). I stället borde skenbar korndensitet anges och användas vid receptframtagning (ugnstorkad vikt dividerat med den volym den uppfyller i vatten, inklusive inre slutna hålrum men exklusive hålrum som fylls med vatten), då hålrum som fylls med vatten även kommer att fyllas även med vatten vid blandning av betong.
- Rekommendationerna i Betongrapport 18 när det gäller val av provningsmetod för att påvisa ASR-reaktivitet behöver förtydligas, så att provning initialt sker med både RILEM AAR-2 och NT Build 295 om materialet innehåller både snabbreaktiva och mer långsamreaktiva partiklar, då resultaten från dessa båda metoder inte korrelerar med varandra.
- Frostbeständighet och korrelation mellan provresultat och fältprovning är för betong för exponeringsklass XF4 (frysning i miljö med salt) väl undersökta och kravvärdena är väl underbyggda. När det gäller för XF3 (fuktig miljö utan salt) finns inte samma breda bas för kravvärden och lämpliga provningsmetoder. Risk finns att kraven är onödigt

konservativa, eller att helt enkelt inte rätt frysmekanism provas. Avflagnig som provas med SS 137244 är kanske inte den mekanism som bryter ner betongen i XF3, utan i stället sker en inre frostsprängning som bör provas med annan metod.

- Klassificeringssystemet för återvunnen ballast typ A och Typ B och användningsreglerna i SS 137003 baseras på att det är fråga om ballast av krossade rivna konstruktioner av betong, murverk eller dylikt. Ballast återvunnen ur schaktmassor från klassificeringssystemet A och B

8 REKOMMENDATIONER

I detta avslutande kapitel ges rekommendationer och riktlinjer riktade till tillverkare av ballast, som beskriver kvalitetssäkrande åtgärder, tillverkningskontroll och hur regelverket kan tillämpas med slutmålet ”bra betongballast”, samt till betongtillverkare, som beskriver hur återvunnen ballast kan hanteras praktiskt i enlighet med gällande regelverk.

8.1 Tillverkaren av ballast

8.1.1 Återvunnen ballast ska CE-märkas

Ballast som är avsedd att användas i betong omfattas av den harmoniserade standarden SS-EN 12620. Tillverkaren har därmed en skyldighet att CE-märka ballasten enligt byggproduktförordningen. Detta innebär att producenten behöver utföra en typprovning av ballasten samt tillämpa ett system för tillverkningskontroll i enlighet med standarden (SS-EN 12620A1:2008 Bilaga H Produktionskontroll). Typprovningen ska omfatta samtliga i CE-märkningen deklarerade egenskaper. Vilka egenskaper som ska deklarerars för ballast för betong anges i SS 137003 (tabell 2 i versionen från 2021) som är den svenska tillämpningsstandarden till den europeiska betongstandarden SS-EN 206.

Utöver detta kan eventuella kundkrav eller marknadsspecifika krav deklarerars. Standarden föreskriver att de allmänna kornstorleksfördelningskraven och klassificering av beståndsdelarna hos grov återvunnen ballast alltid ska deklarerars. De egenskaper som ska deklarerars enligt den svenska tillämpningsstandarden är avhängigt vilken råvara produkten är tillverkad av. Tabell 10 redovisar vilka egenskaper som behöver deklarerars för ballast från tvättade schaktmassor.

SS-EN 12620 anger att för produkter med höga säkerhetskrav ska system 2+ för bestyrkande av överensstämmelse tillämpas. Vidare anges att ”säkerhetskrav definieras av i medlemsländernas nationella lagar, föreskrifter och administrativa regler”. SS 137003 anger att ”för ballast och filler till betong för användning i bärverk ska system 2+ tillämpas för bedömning och fortlöpande kontroll av prestanda”. Detta innebär att system 2+ blir ett krav på ballast för användning i princip all konstruktionsbetong.

8.1.2 Åtgärder som kan behöva vidtas för återvunnen ballast

Kännedom om materialet

Tillverkaren behöver utreda de lokala geologiska förutsättningarna och med fördel även de historiska industriernas verksamhet i upptagningsområdet för inkommande schaktmassor. Detta för att identifiera områden med förekomst av bergarter och av människan skapade beståndsdelar med känd risk för att påverka betong menligt. Sådan kännedom är också nödvändig för att göra en samlad bedömning av den lokala råvarans lämplighet och begränsningar för användning som betongballast. Vid utarbetandet av rutiner för tillverkningskontroll bör tillverkaren särskilt beakta behov av kvalitetssäkrande åtgärder med avseende på de lokala geologiska förutsättningarna. Sådana åtgärder kan vara ökad provning av en särskild egenskap, anpassad mottagningskontroll av schaktmassor, frisläppande av upplag för produktion och leverans eller att justera produktens deklarerade prestanda.

Provningsfrekvens

Vid speciella förhållanden medger SS 12620 en reducerad provningsfrekvens under den i standarden angivna minsta frekvensen. Detta kan enligt standarden tillämpas vid mycket homogena täkter eller vid provningsresultat som ligger långt ifrån det deklarerade värdet och där det över tid kan påvisas en relativt liten variation hos egenskapen. Omvänt gäller att en ökad provningsfrekvens är nödvändig om en egenskap ligger nära det deklarerade värdet eller där man

inte kan påvisa en relativt liten variation. För ballast tillverkad av schaktmassor kan råvaran inte anses vara homogen utan snarare tvärtom. Det kan därför i många fall vara motiverat med utökad provningsfrekvens av produktens råvaruberoende egenskaper.

Tabell 10 Krav på ballast tillverkad av återvunna schaktmassor vid förekomst av olika komponenter enligt SS 137003 och SS-EN 12620

Komponent	Egenskap	Prestandakrav	Notering
Allmänna krav för återvunnen ballast	Kornstorleksfördelning	Deklarerad kategori	
	Kornform	Deklarerad kategori	För typ B FI ₄₀
	Finmaterialhalt	Deklarerad kategori	
	Korndensitet	Deklarerat värde	
	Vattenabsorption	Deklarerat värde	
	Alkalisilikareaktivitet	Oskadlig*	Endast till betong i omgivningskategori E2 och E3
	Klassificering av beståndsdelar hos grov återvunnen ballast a ¹)	Enligt typ A och B	Typ A och B definieras i SS 137003
	Frostbeständighet	Enligt exponeringsklass	Om vattenabsorptionen > 1%
	Vattenlöslig sulfathalt hos återvunnen ballast	SS _{0,7}	
	Syralöslig kloridjonshalt	Deklarerat värde	
	Inverkan på bindetid	A40	Endast typ B
	Förekomst av humus	Tröskelvärde enligt SS-EN 12620	
	Innehålla av hårda skal i grov ballast	SC ₁₀	(vid ballastkomponenter av marint ursprung)
	Svavelföreningar, endera total svavelhalt eller syralösligt sulfat.	AS _{1,0} eller S ₂	Vidluftkyld masugnsslagg eller vid misstanke om svavelinnehåll
Vattenlöslig sulfat	Högst SS 0,7	Endast återvunnen ballast	
Innehåll av Ruc: betong, bruk och naturlig ballast; Ra: bituminöst; Rb: tegel, klinker och dylikt; Rg: glas; FL: flytande komponenter samt X: övrigt			

*Alkalisilikareaktivitet kan inte deklarerars i CE-märkningen eftersom hänvisning till en europeisk provningsmetod saknas i produktstandarden SS-EN 12620

Kontroll av inkommande schaktmassor och upplag

För att säkerställa att egenskaper inneboende i råvaran som till exempel alkalisilikareaktivitet, densitet och beståndsdelar hos grov ballast behöver tillverkaren ha god kontroll på inkommande schaktmassor. För att säkerställa detta kan tillverkaren tillämpa en rutin där den inkommande schaktmassor kontrolleras och frisläpps för produktion av ballast till betong. Upplag för frisläppande bör definieras som en sats schaktmassor för vilket beskaffenheten kan anses som

likartad. Genom ett sådant arbetssätt minskas risken för icke överensstämmande produkter och reklamationer. Viss information om föroreningsnivå och jordart hos schaktmassor från ett specifikt objekt kan erhållas i den marktekniska undersökningsrapporten. Men för att frisläppa ett upplag av schaktmassor för användning till betong behöver tillverkaren kontrollera att råvarans inneboende egenskaper överensstämmer med den färdiga produktens deklarerade egenskaper.

Provning och deklarerings av alkalisilikareaktivitet

Återvunnen ballast som tillverkats av schaktmassor kan innehålla både snabba och medel/långsam reaktiva. Om ballasten ska användas i betong för annan omgivningskategori än E1 (torr inomhusmiljö) behöver ballastens ASR-reaktivitet bestämmas. För detta anges olika metoder beroende på om en petrografisk analys visar att det finns snabbreaktiva komponenter eller inte, RILEM AAR-2 utan och NT Build 295 med snabbreaktiva komponenter. Även i det fall den snabbreaktiva komponenten förekommer i en mycket liten halt. Provningsresultatet bestämmer om ballasten kan deklarerats som oskadlig eller alkalireaktiv. De provningsfrekvenser som rekommenderas i Betongrapport 18 [3] är utformade för jungfruligt berg. Då källan för den återvunna ballasten varierar mer än för jungfrulig ballast bör eventuellt tätare provningsfrekvens än den rekommenderade tillämpas. Betongrapport 18 rekommenderar att provet ska tas på samtliga sorteringar på färdig produkt. För naturgrus kan en sortering anses som representativ för andra sorteringar inom samma storleksintervall. Ballast tillverkat av schaktmassor kan i detta avseende likställas med naturgrus. Provning ska utföras av ett ackrediterat laboratorium.

Om ballasten påvisats vara alkalireaktiv kan ballastproducenten funktionsprova sin ballast och påvisa att den är oskadlig i omgivningskategori E2 (fuktig miljö utomhus utan förvärrande faktorer som t.ex salt) under specifika villkor (bindemedelssammansättning och max alkalihalt i betongen). En sådan funktionsprovning är giltig i 6 år så länge materialet är i princip oförändrat.

Tillverkaren bör överväga att deklarerat ballasten som potentiellt reaktiv för att undvika provning och tidskrävande upplagshantering vid frisläppande av schaktmassor för produktion. Potentiellt alkalireaktiv ballast kan enligt SS 137003 användas till betong i torr omgivning skyddad från yttre fukt (omgivningskategori E1). Under vissa förutsättningar kan reaktiv ballast även användas till betong i fuktutsatta konstruktioner (E2). I de flesta fall ansvarar betongtillverkaren för att dessa villkor uppfylls. Ballastproducenten bör därför ha kontakt med betongproducenten för att klargöra vilka krav denne har på ballasten (se vidare under rubriken "Vad kan man göra om ballasten är ASR-skadlig?").

Reaktiv ballast kan också användas i konstruktioner med kort förväntad livslängd tex fundament till landbaserad vindkraft.

Då det saknas europeiska standarder för ASR ingår inte detta i CE-märkningen och prestandadeklarationen utan detta får intygas på annat sätt.

Flockningsmedel

Vid användning av flockningsmedel i tvättprocessen kan betongens egenskaper påverkas. Flockningsmedlet kan förändra partiklarnas kornstorlek och interaktion i den färska betongen. Det kan i sin tur påverka betongens viskositet. Flockningsmedel kan också potentiellt påverka betongens förmåga att behålla konsistens över tid och sammanhållande förmåga. Beroende på typ av flockningsmedel och koncentration kan effekten vara olika. Ballasttillverkaren bör därför i samverkan med betongtillverkaren utvärdera valet av flockningsmedel genom tester för att bedöma effekterna av flockningsmedlet. För att optimera koncentrationerna av flockningsmedel i tvättvattnet bör tillverkaren installera utrustning för auto-dosering.

8.1.3 Radioaktivitet

Alla byggprodukter där bergmaterial ingår som delmaterial innehåller en viss mängd naturligt förekommande radionuklider. Enligt 16 § SSMFS (2018:4) Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om naturligt förekommande radioaktivt material och byggnadsmaterial gäller att för byggnadsmaterial med aktivitetsindex som överstiger 1 ska användaren planera användningen så att referensnivån enligt strålskyddsförordningen (2018:506) 1 mSv/år effektiv dos inte riskerar att överskridas. Tillverkaren av ballast bör därför ha god kontroll på produktens aktivitetskoncentrationer av kalium-40, radium-226 och torium-232 samt aktivitetsindex (I). Detta för att kunna lämna uppgift till betongtillverkaren så att denne kan bedöma om ballasten är lämplig för användning som delmaterial i den specifika betongsammansättningen.

Aktivitetsindex beräknas enligt SSMFS (2018:4):

$$I = C_{\text{Ra}226}/300 + C_{\text{Th}232}/200 + C_{\text{K}40}/3000$$

Där C_{Ra} , $C_{\text{Th}232}$ och $C_{\text{K}40}$ är aktivitetskoncentrationerna i becquerel per kilo torrsubstans.

8.2 Betongtillverkaren

Nedan ges svar på några frågeställningar som en betongtillverkare bör tänka på vid användning av ballast tillverkad av schaktmassor.

Vilken dokumentation ska ballastleverantören tillhandahålla?

- CE-märkesinformation med aktuell deklarerad prestanda enligt Tabell 10. På begäran ska leverantören också tillhandahålla prestandadeklaration.
- Certifikat för tillverkningskontroll (System 2+) utfärdad av ackrediterat certifieringsorgan. Intyget ska omfatta standarden SS-EN 12620 Ballast till betong.
- I det fall ballasten behöver vara bedömd som oskadlig avseende alkalisilikareaktivitet bör ballastleverantören fortlöpande tillhandahålla provningsresultat enligt de rekommendationer som ges i betongrapport 18 [3]. Leverantören bör också redovisa hur variationer i råvaran hanteras för att säkerställa produktens överensstämmelse.
- Dokumentation som redovisar produktens aktivitetskoncentrationer av kalium-40, radium-226 och torium-232, samt aktivitetsindex (I). Krav på aktivitetsindex gäller inte delmaterial, men vanligtvis kommer det största bidraget till betongens aktivitetsindex från ballasten.
- Petrografisk analys enligt RILEM AAR 1 med utlåtande om ballastens lämplighet som betongballast.
- Resultat från tillverkningskontroll bör tillhandahållas på begäran.

Vad behöver vi tänka på vid framtagande av recept?

- Då vattenabsorptionen hos återvunnen ballast vanligtvis är högre än hos naturlig svensk urbergsballast, måste detta beaktas vid framtagning av recept.
- Enligt SS 137003 bör ugnstorkad korndensitet ρ_{rd} användas (ugnstorkad vikt dividerat med den volym den uppfyller i vatten, inklusive inre slutna hålrum och hålrum som fylls med vatten). I stället borde skenbar korndensitet ρ_a anges och användas vid receptframtagning (ugnstorkad vikt dividerat med den volym den uppfyller i vatten,

inklusive inre slutna hålrum men exklusive hålrum som fylls med vatten). Hålrum som fylls med vatten ingår i det angivna värdet på vattenabsorptionen.

- Sammansättningen hos en återvunnen ballast kan förmodas variera över tid, beroende på att råvarans ursprung ändras över tid. Detta ställer särskilda krav på kvalitetssäkring av den återvunna ballasten och tillverkningskontrollen av betongen, exempelvis kan tätare provningar än vad betongstandarderna anger vid kontinuerlig produktion med naturlig ballast vara nödvändigt.
- Ett sätt att kompensera för variationer i materialet är att för ett specifikt betongrecept eller en produkt jobba med ersättningsspann för hur mycket som ersätts med återvunnen ballast i stället för låst siffra och därmed kunna justera uppåt och neråt (tex 10–20 % i stället för fixerat 15%).

Vad kan man göra om ballasten är ASR-skadlig?

- Om betongen enbart ska användas i omgivningskategori E 1 (inomhus i torr miljö) kan ASR-skadlig ballast användas utan restriktioner.
- Om betongen ska användas i omgivningskategori E2 (i fuktig miljö utan förvärrande faktorer, tex närvaro av salt) kan ASR-skadlig ballast som inte innehåller snabbreaktiva komponenter användas om vissa alternativa förutsättningar uppfylls:
 - Alt 1: Alkalihalten i betongen överstiger inte 3,0 kg/m³.
 - Alt 2: Ballasten har genom provning påvisats vara användbar under specifika villkor (bindemedelssammansättning och max alkalihalt i betongen)
 - Alt 3: Specifika bindemedel som påvisats hämma ASR används. (Provning sker med en svensk "värsta"-ballast).
 - Alt 4: Den specifika betongsammansättningen har genom provning påvisats inte ge skadlig ASR-expansion.

Om betongen innehåller snabbreaktiva komponenter och ska användas i omgivningskategori E2 eller E3 (i fuktig miljö förvärrande faktorer, tex närvaro av salt) kan ASR-skadlig ballast användas om det genom provning påvisats att den specifika betongsammansättningen inte erhåller skalig ASR-expansion. Detsamma gäller för ballast utan snabbreaktiva komponenter för användning i omgivningskategori E3.

Detaljerad beskrivning av dessa möjligheter ges i bilaga A avsnitt A.2 i Betongrapport nr 18 [3]. I de fall det rör sig om ren ballastprovning (tex Alt 2 ovan) kan de genomföras av ballastproducenten utan involvering av betongtillverkaren. När det gäller de övriga alternativen har betongtillverkaren det övergripande ansvaret.

REFERENSER

- [1] Regeringen, 2021: Strategi för cirkulär ekonomi i Sverige (M2020/01133)
- [2] Brander L., m.fl. 2020: RE4-rapport D7.8 – Certification and standardization. European commission.
- [3] Svenska Betongföreningens betongrapport nr 18, ASR i svensk betong - vägledning för nya och befintliga konstruktioner, Utgåva 1, 2020 (även publicerad som SBUF-rapport 13244)
- [4] Sivhed, U., Wikman, H. & Erlström, M., **1999**: Beskrivning till berggrundskartorna 1C Trelleborg NV och NO samt 2C Malmö SV, SO, NV och NO. *Sveriges geologiska undersökning Af 191–198, 143 s.*
- [5] Persson Nilsson K., Johansson R. & Bergman T., **2010**: K 297 Beskrivning till bergkvalitetskartan Sundsvall–Timrå–Härnösand. *Sveriges geologiska undersökning, 50s.*
- [6] Welin, E., Christiansson, C. & Kähr, A.-M., **1993**: Isotopic investigations of metasedimentary and igneous rocks in the Paleoproterozoic Bothnian Basin, central Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 115, 285–296.*
- [7] [Forsa Tegelindustri – Dellenportalen](#) (Hudiksvalls Tidning – 1939).
- [8] Cepurits R., 2012: Physical properties of Norwegian mineral fillers investigated by different methods. COIN Project report 43 – 2012. SINTEF.
- [9] Schouenborg B., Aurstad J och Péturson P., **2004**, Test methods adapted to alternative aggregates, Tillgänglig på <https://www.researchgate.net/publication/265159103>
- [10] Helsing, E., 2019, Uppföljning av tryckhållfasthetsresultat, Rapport 6P00109, Borås RISE
- [11] Brander L., Helsing E, Gabrielsson I. **2020**: Constructivate arbetspaket 3 – Återvinning av rivningsavfall som ballast i betong. *RISE Rapport 2020:25.*

Beteckning i rapporten	Fullständig beteckning, utgivningsår
Standarder utgivna av SIS	
SS-EN 196-2	SS-EN 196-2:2013 Cement- Provning – Del 2: Kemisk analys, 2013
SS-EN 206	SS-EN 206:2013+A1:2016 Concrete – Specification, performance, production and conformity, 2016
SS-EN 933-1	SS-EN 933-1:2012. Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method, 2012
SS-EN 1097-6	SS-EN 1097-6:2013. Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption. SIS, 2013
SS-EN 1367-1:	SS-EN 1367-1:2007. Tests for thermal and weathering properties of aggregates – Part 1: Determination of resistance to freezing and thawing., 2007-SIS
SS-EN 1367-6:	SS-EN 1367-6:2008. Tests for thermal and weathering properties of aggregates – Part 1: Determination of resistance to freezing and thawing in the presence of salt (NaCl), 2008

SS-EN 1744-1	SS-EN 1744-1:2009+A.1:2012, Ballast – Kemiska egenskaper – Del 1: Kemisk analys, 2012
SS-EN 12350-2	SS-EN 12350-2 :2019 Provning av färsk betong – Del 2: Sättnått, utgåva 3, 2019
SS-EN 12350-7	SS-EN 12350-7:2019 Provning av färsk betong – Del 7: Lufthalt – Tryckmetoder, utgåva 3, 2019
SS-EN 12390-3	SS-EN 12390-3:2019 Provning av hårdnad betong – Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar, utgåva 3, 2019
SS-EN 12390-12	SS-EN 12390-12:2020 Provning av hårdnad betong – Del 12: Bestämning av motståndsförmåga mot karboantisering: accelererad metod, utgåva 1
SS-EN 12620	SS-EN 12620:2002+A1:2008 Aggregates for concrete, 2008
SS 137003	SS 137003:2021 Betong - Användning av EN 206:2013+A1:2016 i Sverige, 2021
SS 137244	SS 137244:2019 Betongprovning - Hårdnad betong- Avflagning vid frysning, utgåva 5, 2019
Metodbeskrivningar utgivna av andra än SIS	
RILEM AAR-1	RILEM Recommended Test Method AAR-1.1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - Part 1: – Petrographic examination method, I RILEM Recommendations for Prevention of Damage by Alkali-Aggregate reactions in New Concrete Structures, State-of-the-Art Report of RILEM Technical committee 219 –ACS, pp 35-60, 2016
RILEM AAR-2	RILEM Recommended Test Method AAR-2 - Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Accelerated mortar bar test method for aggregates, I RILEM Recommendations for Prevention of Damage by Alkali-Aggregate reactions in New Concrete Structures, State-of-the-Art Report of RILEM Technical committee 219 –ACS ,pp 61-78, 2016
RILEM AAR-11	Recommendation of RILEM TC 258-AAA, RILEM AAR-11; Determination of binder combinations for non-reactive mix design or the resistance to alkali-silica reaction of concrete mixes using concrete prisms – 60 °C test method, .Publicerad i Materials and Structures 54(6), 2021, (DOI:10.1617/s11527-021-01680-3) , Förf: Borcher I., Lindgård J., Rönning T. och Wigum B. J.
NT Build 295	NT Build 295: 1985, Sand: Alkali-Silica Reactivity Accelerated Test, Utgivare: Nordtest, 1985.