Miljöoptimering av konstgräsplaner och kunskapssammanställning över alternativa infillsmaterial för konstgräsplaner

-Slutrapport för Naturvårdsverkets projekt NV-08169-21 och NV-08170-21.

Författare: Fritjof Nilsson, Docent i Polymera Material på KTH, fritjofn@kth.se, 0702501366
Uppdragsgivare: Beställargruppen för konstgräs (BEKOGR)
Finansiär: Naturvårdsverket (NV-08169-21 och NV-08170-21)
Rapportnummer: XXX
ISBN: XXX

Innehållsförteckning

0. Sammanfattning
1. Inledning
1.1. Bakgrund till studien
1.2. Syfte med studien
2. Metod
2.1. Litteraturstudier, intervjuer och studiebesök
2.2. Experimentell materialanalys
2.3. Livscykelanalys - utsläpp av växthusgaser
3. Resultat delstudie 1 – alternativa fyllmedel
3.1. Översikt över infillsmaterial för konstgräs
3.2. Specifika infillsmaterial (SBR, kärnor, skal, kork, sand mm)
3.3. Experimentella resultat och diskussion
3.4. Rekommendationer för infills-material för konstgräsplaner
4. Resultat delstudie 2 – miljöoptimering av konstgräsplaner
4.1. Inledning
4.2.Miljö- och hälsorisker med konstgräs och mikroplaster
4.3.Varför lossnar konstgrässtrån (=mikroplaster) lättare från vissa planer?
4.4. Rekommendationer för materialval, konstruktion och underhåll
5. Slutsatser och rekommendationer
6. Tacklista
7. Referenser

Sammanfattning

Konstgräs kräver mindre underhåll och möjliggör idrott under betydligt fler timmar per säsong jämfört med naturgräs samtidigt som det är avsevärt bekvämare att idrotta på än traditionella grusplaner. Det finns därför sedan årtionden tillbaka en stark trend att installera konstgräs på ytor avsedda för fotboll, idrott och lek. På fotbollsplaner för seriespel och avancerad breddfotboll dominerar idag den tredje generationens (3G) konstgräs som har långa konstgrässtrån och fylls med ett bottenlager av sand och ett toppskikt av granulat. Granulaten består ofta av SBR-gummi (från återvunna däck) eller andra polymera elastomerer (tex EPDM eller TPE), men biobaserade granulatmaterial förekommer också, exempelvis kork, kokos, PLA, lignin och valnötsskal. Konstgräs med enbart sand-infill eller helt utan infill finns också.

Eftersom gummigranulat från konstgräsplaner är en betydande källa till spridning av mikroplaster överväger EU-kommissionen att förbjuda försäljning av polymerbaserade granulat som kan bidra till mikroplastspridning. Försäljningsförbudet kommer preliminärt att träda i kraft 8 år efter att beslutet fattats. I denna studie undersöks vilka alternativ till konstgräs med gummigranulat som finns på kort och lång sikt.

Tyvärr finns det ännu inga konstgrässystem med helt mikroplastfria infill som i nordisk miljö ger lika goda spelegenskaper året runt som dagens konstgräs med gummigranulat. Många av de alternativa infill som uppfyller FIFAs kriterier kommer med största sannolikhet att omfattas av EU-kommissionens eventuella förbud, exempelvis sand med ett tunt ytlager polyeten, industriellt komposterbara bioplastgranulat och biobaserade kompositmaterial sammanfogade med polymera bindemedel. Det råder delade meningar om vilka mikroplastfria alternativ som idag är bäst för fotbollsspel, men vår samlade bedömning är att högkvalitativ kork är det mikroplastfria granulatmaterial som i dagsläget har bäst förutsättningar att ersätta gummigranulat på fotbollsplaner för seriespel och avancerad breddfotboll. Kork har i likhet med gummi en viss inbyggd fjädring som gör att den ger dämpning även vid minusgrader. De flesta andra naturmaterial, exempelvis fruktkärnor, nötskal, träflis och sand, saknar naturlig fjädring och attraherar dessutom mer vatten, vilket gör att de blir hårdare och halare på vintern. Tillgången på högkvalitativ kork är dock begränsad, så på europeisk nivå bör kork prioriteras till länder med nordiskt klimat och då främst till konstgräsplaner avsedda för seriespel. För ungdomsfotboll och enklare breddfotboll kan infill med enbart sand eller med naturliga biomaterial troligtvis också fungera.

Långt innan EU-kommissionens förbud träder i kraft är det dock väldigt sannolikt att fjärde generationens (4G) helt infillsfria konstgräs hinner utvecklats så mycket att det kan användas

året runt på alla sorters planer. Det finns visserligen viss tvekan från delar av branschen om det kommer att vara möjligt att uppfylla FIFA's kriterier för hudnötning med helt granulatfritt konstgräs, men utvecklingen går så snabbt framåt att kriterierna nästan garanterat kommer att uppnås. Eventuellt sätts sådana konstgrässystem på marknaden redan i år (2023). Redan idag finns 4G-planer som uppfyller de formella kriterierna för FIFA-quality, men FIFA certifierar i dagsläget inte infillsfritt konstgräs. Den principen dock kan komma att ändras i framtiden.

Tidigare studier har visat att vissa granulatfria konstgräsplaner släpper över 50 ggr fler konstgrässtrån (=mikroplaster) än andra. Det är svårt att fastslå en enskild allmängiltig förklaring till varför konstgrässtrån lossar lättare från vissa mattor än andra, men flera samverkande faktorer har identifierats. Studien sammanställer många generella råd för hur konstgräsplaner bör konstrueras och underhållas för att minimera utsläppen av mikroplaster samtidigt som goda spelegenskaper behålls. Både konstruktionen och underhållet av konstgräsmattan har nämligen stor inverkan på hur lätt konstgräsfibrer lossnar från mattan.

En konstgräsmatta består, förutom av eventuellt infill, av tre till fyra komponenter (grässtrån, eventuellt bindgarn, backing-matta och backing-coating) som alla kan påverka hur lätt mikroplaster frigörs från mattan. Materialet i stråna, vanligtvis lågdensitetspolyeten, bör vara av hög kvalitet och ha ett gott skydd mot UV-strålning. Infill med sand skapar extra friktion och denna sandpapperseffekt kan förkorta grässtråna livslängd. Buntar av grässtrån kan sammanfogas, antingen med bindgarn av nylon eller genom att tvinnas ihop, innan de fästs i backingen. Laboratorietester indikerar att tvinning ger bättre hållbarhet och dessutom bildar bindgarnet mikroplaster om det lossnar från mattan. Backing-mattan består ofta en mjuk polypropen-matta som konstgräsfibrerna sys fast i, men det går också att virka samman buntarna av konstgräsfibrer. Backingmaterialet är sällan den svagaste länken i kedjan, däremot har valet av teknik för infästning av gräsfibrerna stor påverkan. Optimering av sömnadsmönster, stygnlängd och virkningsteknik bedöms kunna leda till tydligt förbättrad mekanisk hållfasthet för mattan. Backing-coating appliceras vanligtvis på baksidan av backingmattan i syfte att stabilisera systemet och få stråna att sitta fast hårdare i mattan. Oftast används antingen flytande SBR-latex eller polyuretan (PU) för att limma ihop konstgrässystemet, men det finns också varianter där en mjuk väv av polyeten fästs på baksidan av backing-mattan. Laboratorietester indikerar att PU ger bättre hållbarhet än SBR-latex, i synnerhet om mattan regelbundet utsätts för fukt. Polyeten-backing som partiellt smälts samman med konstgräsfibrer (av polyeten) borde kunna ge god vidhäftning, men tekniken behöver vidareutvecklas innan den ger lika hög mekanisk slitstyrka som för PU.

Vid anläggning av konstgrässystem är det viktigt att säkerställa god dränering så att mattan inte regelbundet står under vatten under lång tid, eftersom det luckrar upp backing-coatingen, förkortar mattans livslängd och ökar risken för mikroplastspridning. Om man inte använder gummigranulat behövs extra stötdämpning under mattan. När mattan nyligen lagts ut och planens alla linjer skurits in bör mattan tvättas för att få bort lösa konstgräs. När man fyller mattan med sand är det viktigt att använda rundpolerad, homogen kvalitetssand som inte klumpar sig och att borsta ned sanden ordentligt i mattan. Om sanden och eventuella granulat är ojämnt fördelade över planen kan grässtråna lägga sig ned, vilket vid idrottande ökar skjuvspänningarna och risken för fibersläpp. Det är därför viktigt att regelbundet borsta planer med sand och/eller granulatinfill så att infillet fördelas jämnt över planen. Infillet bör också luckras upp någon gång per säsong att undvika onödig kompaktering. Snöröjning på konstgräsplaner med gummigranulat och andra mikroplastgenererande infill bör undvikas, men om snöröjning ändå genomförs bör snöhögarna läggas innanför ytterkanten av mattan eller på en hårdgjord asfaltsyta bredvid planen där granulaten lätt kan samlas upp.

För att minska konstgrässystemens bidrag till växthuseffekten bör man eftersträva att använda infill av sand eller rena naturmaterial och konstruera systemen så att de är mekaniskt hållbara, lätta att återvinna och innehåller återvunnen råvara. Idealt bör konstgrässystem bestå antingen av monomaterial eller av lättseparerade komponenter av monomaterial, eftersom materialet då blir lättare att återbruka eller återvinna mekaniskt utan kvalitetsförlust (downgrading). Materialvalet får dock inte leda till att mattans livslängd reduceras signifikant. En lång livslängd på mattan är nämligen ett av de effektivaste sätten att reducera konstgräsets klimatutsläpp, detta då mattans genomsnittliga årliga utsläpp är de totala utsläppen dividerat med mattans livslängd. Infillsfria 4G konstgräsmattor innehåller visserligen betydligt mer plast per kvadratmeter än konstgräs med infill, men i och med att de inte behöver något infill och kräver avsevärt mindre underhåll blir deras klimatpåverkan sannolikt ändå begränsad.

Sammanfattningsvis kommer det i Sverige att vara krävande men långt ifrån omöjligt att ersätta gummigranulat och andra mikroplastgenererande infill på konstgräsplaner avsedda för fotboll och annan idrott. Granulat av högkvalitativ kork och helt infillsfritt konstgräs är de alternativ som i dagsläget verkar mest lovande, men produktutvecklingen går oerhört snabbt, så det kommer säkerligen fler bra alternativ framöver. De främsta skälen till att vissa konstgräsplaner släpper betydligt mer konstgrässtrån än andra bedöms vara dels hur konstgräs-fibrerna sammanfogas och sys/virkas fast i mattan, dels vilket backing-coating material som används och dels hur anläggningen, driften och underhållet av konstgrässystemet sköts.

Material/egenskap	Mikroplast	Klimat	Sommarspel	Vinterspel	Pris	Kemi
SBR (återvunnen)	1	5	5	5	5	2
EPDM (ny)	1	1	5	5	2	4
EPDM (återvunnen)	1	4	5	5	3	2
TPE (ny)	1	1	5	5	2	4
plastad sand	2	3	4	4	3	4
Bioplast	2-4	3	4	4	3	4
Flis/lignin/bindmedel	3	4	4	3	4	4
Infillsfritt 4G (framtid)	4	4	4	4	4	4
Kork (hög kvalitet)	4	5	4	4	3	5
Nötskal (tex kokos)	4	5	3	2	4	5
Fruktkärnor (tex oliv)	4	5	3	2	4	5
Träspån	4	5	3	2	4	5
Sandinfill	4	5	3	2	4	5
Gräs	5	4	5	1	2	5
Grus	5	5	2	2	5	5

Tabell 1. *Uppskattad miljöpåverkan, spelegenskaper och (livslängds)pris för olika material för fotbollsplaner. Om EU-kommissionens förslag enligt REACH-förordningen går igenom kommer försäljning av granulat av SBR, EPDM, TPE, plastad sand och sannolikt även de flesta bioplaster och kompositer med polymerbaserade bindemedel att förbjudas. Konstgräs med högkvalitativt kork-infill samt framtidens fjärde generationens infillsfria konstgräs bedöms som mest lovande för fotbollsspel i nordiskt klimat. Notera att siffrorna är kvalificerade uppskattningar men långt ifrån absoluta sanningar.*

1. Inledning

1.1. Bakgrund till studien

Konstgräsplaner för fotboll, idrott och lek bidrar till spelglädje och förbättrad folkhälsa men är samtidigt också en källa till mikroplaster och negativ klimatpåverkan [ref]. Hur skall konstgräsplaner konstrueras för att minimera de negativa effekterna samtidigt som de positiva bibehålls? Genom att identifiera och konsekvent utnyttja bästa möjliga teknik bör det vara möjligt att minska miljöpåverkan radikalt med enkla medel. Exempelvis är mikroplast-utsläppen per area för ”bra” granulatfria konstgräsplaner bara 2 % av utsläppen från ”dåliga” [Olshammar 2021].

EU-kommissionen överväger att, som ett tillägg till REACH-förordningen, införa förbud eller tvingande regler som syftar till att minska spridningen av mikroplaster från konstgräsplaner med granulat-infill [EU-kommisionen 2023]. Förslaget har föregåtts av utredningsarbete av ECHA (Europeiska kemikalieinspektionen), som bedömt att ett dylikt förbud skulle kunna minska spridningen av mikroplaster i EU med 500 000 ton mikroplast över en 20-års period [ECHA 2019, ECHA 2023]. Preliminärt förväntas dessa regler innebära att försäljning av gummigranulat och andra granulat som kan generera mikroplaster förbjuds inom ca 6 år. Som en konsekvens denna förväntade förändring utvecklas nu i hög takt en mångfald av alternativa granulat-material (Figur 1) och även helt infillsfria konstgräsplaner. Den snabba utvecklingen gör det dock svårt att få överblick över alla nya material och deras för- och nackdelar. Kommuner och andra beställare av konstgräsplaner kan därför behöva stöd för att fatta väl genomtänkta beslut kring vilken materialkonfiguration som är ideal för miljön, fotbollsspelarna och ekonomin.

Detta projekt syftar till att skapa en systematisk kunskapsammaställning över de infills-material som idag finns på marknaden eller är under utveckling samt att studera hur konstgräskonstruktioner kan optimeras avseende olika egenskaper såsom klimat, mikroplaster, miljö, återvinning, ekonomi och spelaregenskaper.

Det här är varken den första eller den sista studien som syftar till att bidra till ökad kunskap om konstgräs och dess miljöpåverkan [Göthe 2022, Bauer 2018, Danielski 2021, Kaal 2019, Krång 2019, Andersson 2017, Rocha-Santos 2020]. Göthes review [Göthe 2022] ger en bra och aktuell sammanställning av litteraturen på området och Bauers studie [Bauer 2018] innehåller mycket information om granulatmaterial. Utvecklingen är dock så oerhört snabb är det av stor vikt att kontinuerligt följa progressionen på området för att minska konstgräsets miljöinverkan

och underlätta för beställare och tillverkare att fatta rationella beslut som rör inköp och konstruktion av konstgrässystem.

Figur 1. *Exempel på råvaror till biobaserade granulatmaterial. (a) Valnötsskal. (b) Olivkärnor, (c) Kork, (d) Trä.*

1.2. Syfte med studien

Projektet består av två separata delar som tillsammans är tänkta att bidra till ökad kunskap om hur miljöbelastningen från konstgräsplaner ska kunna minskas, idag och i framtiden.

Syftet med den första delen är att skapa en kunskapssammanställning över de nya infills-material för konstgräsplaner som utvecklas som alternativ till traditionella fossilbaserade infill (SBR, EPDM och TPE) i fotbolls- och idrottssammanhang. De nya materialens hittills kända för- och nackdelar presenteras systematiskt med avseende på bland annat mikrospridning, klimat, återvinning, ekonomi, spelaregenskaper och långtidsegenskaper och jämförs med traditionella infills-material. Målet är att skapa en överskådlig sammanfattning över de konstgräs-infill som existerar eller är under utvecklig, för att på så sätt underlätta för kommuner och andra konstgräsbeställare att fatta väl underbyggda miljövänliga beslut.

Syftet med den andra delen är att analysera konstgräskonstruktioner (material, bindmedel, geometri etc) ur ett livscykelperspektiv och därigenom bidra till ökad kunskap om vad som karaktäriserar en ”bra” konstruktion avseende flera eftersträvansvärda parametrar. Tanken är att slutrapporten ska kunna användas av såväl tillverkare som beställare av konstgräsplaner som vill minska sin miljöpåverkan på effektivast möjliga sätt.

2. Metod

2.1. Litteraturstudier, intervjuer och studiebesök

Som en del av studien analyserades den befintliga litteraturen inom området, både vetenskaplig litteratur, tekniska rapporter och information från tillverkare och websidor. Därtill genomfördes intervjuer och samtal med ett tjugotal kunskapsbärare inom området, bland annat företrädare för fotbollsförbund, fotbollstränare, kommuner, konstgräsbeställare förvaltare, rengöringsföretag, konstgrästillverkare, granulatproducenter, återvinningsföretag, miljöspecialister, läkare inom miljömedicin/epidemiologi och forskare inom miljö, plast och nanoteknologi. Vidare gjordes fältstudier på ett 10-tal konstgräsanläggningar i främst Stockholm för studiebesök och provtagning, både mätning på plats och insamling av prover för vidare analys i laboratorium. Ytterligare materialprover erhölls på konstgräsmässor och genom benäget bistånd från konstgräsproducenter.

2.2. Experimentell materialanalys

Konstgräset och infillet analyserades med 5 experimentella metoder: Differential Scanning Caliometri (DSC), Termogravimetrisk Analys (TGA), Scanning Electron Microscopy (SEM), mekanisk testning i laboratorium med Instron och mekanisk testning i fält med dynamometer.

DSC genomfördes bland annat för att få mer information om sammansättningen av de plastbaserade materialen, dvs främst själva konstgrässtråna. DSC-mätningarna gjordes med en Mettler Toledo DSC 1. Materialprover med en vikt av 5.5 mg placerades i förslutna 40 µl behållare av aluminium som perforerats med en nål. Temperaturen sänktes först snabbt från rumstemperatur till -30 °C, varefter den höjdes till 220 °C med en uppvärmningshastighet av 20 °C/min. Efter 5 min på 220 °C sänktes temperaturen åter till -30 °C, denna gång med en nedkylningshastighet av 20 °C/min, varefter temperaturen hölls konstant vid denna temperatur i 5 min innan hela cykeln repeteras en gång. Den snabb uppvärmnings- och nedkylningshastigheten var till för att tydligare se materialens glastransition [Gedde 2019]. Kvävgas (N_2) med en flödeshastighet av 50 ml/min användes vid experimentet.

TGA-analys gjordes för att se hur snabbt materialen degraderar vid höga temperaturer, mäta hur stor andel oorganiskt material de olika fyllmedlen innehåller och uppskatta andelen plastbeläggning på ytmodifierad sand. Mätningen gjordes med en Mettler-Toledo TGA/DSC 1, där ett prov med vikten 5 mg placerades i en 70 µl aluminiumbehållare. Provet hettades upp från 30 till 600 °C med en uppvärmningshastighet av 10 °C/min i en vätgasatmosfär med ett N_2-gasflöde av 50 ml/min.

SEM-mikroskopi genomfördes för att visuellt studera ytstrukturer i detalj, exempelvis för konstgräs och plastad sand. En Tabletop SEM Hitachi TM-1000 användes vid analysen. Innan mätningarna fästes materialproven på provhållarna med ledande koppartejp och belades (sputtrades) med ett tunt lager av platina. Förstoringar på mellan 100 och 5000 ggr användes.

Instron användes för att mäta mekaniska töjningsegenskaper (maximal spänning och brott-töjning) för enskilda konstgräsfibrer. Målsättningen var att kunna analysera skillnader i kvalitet mellan grässtrån från mattor av olika åldrar och konstruktioner. En Instron 5566 Universal Testing Machine (Figur 2a) användes för analysen, som gjordes i rumstemperatur i vanlig luft. Konsträsstråna fästes mellan två metallklämmor som täcktes av sandpapper för att öka friktionen och därigenom minska risken för att stråna skulle glida loss från klämmorna och orsaka felaktiga mätresultat. Klämmorna var initialt separerade 20 mm från varandra. Den mekaniska spänningen i provet mättes som funktion av töjning när provet utsattes för 0.4 mm/s töjning fram till brott. 5 replikat användes för varje prov.

Dynamometer användes för att mäta hur stor kraft som krävdes för att lossa enskilda konstgrässtrån från en konstgräsmatta. En digital Pesola dynamometer med 1 N upplösning och en maximal belastning av 400 N användes (Figur 2b). Vid provtagningen fästes dynamometern med en klämskruv till ett enskilt grässtrå ca 2 dm från kanten av mattan, varefter mätaren gradvis höjdes vertikal upp från mattan fram tills grässtrået antingen lossnade eller bröts av. Brottspänningen och brottmekanismen (dvs antingen fiberbrott eller att fibern lossnade från mattan) registrerades. För varje matta gjordes 5 replikat av mätningen.

Figur 2. *(a) Instron-apparat. (b) Dynamometer.*

2.3. Livscykelanalys – utsläpp av växthusgaser

Livscykelanalys med LCA programmet Simapro 9 med databasen Ecoinvent 3, IPCC 2013 GWP100 användes för att illustrera approximativt hur stor klimatbelastningen är för olika material som ingår i konstgräs. Den funktionella enheten är 1 kg konstgräsmaterial och ”attributional LCA”, som baseras på medelvärden och är den vanligaste LCA-metoden, användes. Notera att denna LCA-studie inte är avsedd att ge exakta utsläppssiffror för enskilda konstgräsprodukter utan snarare ge bild över det övergripande mönstret och visa på komplexiteten i att mäta klimatbelastning för olika materialkategorier. Betydligt mer detaljerade LCA analyser för konstgräs finns i litteraturen [Skenhall 2012, Magnusson 2017, Itten 2021, Sanne 2020] Utsläppen från materialtransporter försummas i denna studie, eftersom de brukar svara för en marginell andel (<5%) av materialens klimatbelastning [Sanne 2020]. De klimatbidrag som inkluderas är sålunda utsläppen från produktion och förbränning av råmaterialet (beräknat med Simapro 9) och en grov uppskattning av utsläppen från tillverkningen av slutprodukten. Alla biogena utsläpp från förbränning sätts till noll.

3. Resultat delstudie 1 – alternativa fyllmedel

3.1. Översikt över infillsmaterial för konstgräs

Konstgräs förekommer både med och utan fyllning av sand och/eller granulat. Helt infillsfritt konstgräs med korta grässtrån används idag främst på lekplatser, mässlokaler, golfbanor, ytor för breddidrott och liknande. Även för fotbollsändamål finns infillsfritt konstgräs, konstruerat genom att kombinera långa raka och korta krulliga grässtrå till en tät gräsmatta, men det är fortfarande mycket vanligare att använda långstråigt konstgräs med infill för fotbollsplaner. Fyllmaterialet, som borstas ned i konstgräsmattan innan användning, håller stråna upprätta, förbättrar planens spelegenskaper, bidrar till stötdämpning (inte minst på vintern), stabiliserar mattan och reducerar mängden konstgräsfibrer som behövs per kvadratmeter matta. För breddfotboll och annan idrottsverksamhet som inte ställer krav på FIFA-standard används ibland enbart kvartssand som infill, men för planer avsedda för seriespel/elitfotboll eller utomhusspel på vintern används nästan alltid någon form av kompletterande stötdämpande granulatfyllmedel, exempelvis SBR-gummigranulat från återvunna bildäck, ovanpå ett underliggande sandlager.

I september 2020 fanns 1149 fotbollsplaner med konstgräs i Sverige. Av dessa var 772 fullstora 11-mannaplaner, 289 5-7-9-mannaplaner och 88 mindre hallar [Lozano 2021], så den totala ytan konstgräs i Sverige kan skattas till approximativt $772*105*65+289*50*35+88*30*15 \approx 5\ 800\ 000\ m^2$. I hela Europa finns ca 21 000 fullstora och 72 000 mindre konstgräsplaner [Lozano 2021]. Antalet konstgräsplaner ökar från år till år eftersom de anses ha många fördelar jämfört med traditionella fotbollsplaner med gräs eller grus. Huvudanledningen till att konstgräs blir alltmer populärt är att en konstgräsplan ger många fler årliga speltimmar jämfört med en traditionell fotbollsplan med gräs, inte minst i vårt nordiska klimat. Skillnaden är ca 1200 mot 300-800 timmar/år [Konstgräsguiden 2021]. Gräs växer bara en begränsad del av året och slits snabbt om planen nyttjas för hårt, medan konstgräs (med gummigranulat) är slittåligt och mjukt hela året även om det är minusgrader och isbildning. En ytterligare anledning är att konstgräs kräver mindre underhåll och bevattning än riktigt gräs och därigenom blir billigare i drift. Konstgräsplaner är dessutom mycket behagligare att spela på än traditionella grusplaner, vilka tidigare brukade använda utanför grässäsongen.

Majoriteten av dagens konstgräsplaner för fotbollsändamål innehåller någon form av granulat utöver infill med sand. En fullstor konstgräsplan på $105*65\ m^2$ med gummigranulat + sand fylls initialt ca 140 ton gummigranulat varefter påfyllning sker med ca 3-5 ton/år [NTNU 2020]. Varje år försvinner en viss mängd granulat från planerna och hamnar i naturen i form av

mikroplaster, men exakt hur stor mängden är under debatt och spännvidden mellan olika studier är mycket stor. Vissa tidiga studier indikerade en oerhört stor årlig spridning av mikroplaster från Sveriges konstgräsplaner [Magnusson 2016] medan andra studier bedömde problemet som närmast försumbart förutsatt att rätt åtgärder vidtags vid konstruktion/underhåll av planerna och av de individuella fotbollsspelarna [Ecoloop 2019]. Idag bedöms konstgräsplaner fortfarande vara den näst viktigaste källan till mikroplastspridning i Sverige, med ca 676 ton/år [Krång 2019].

Över tid har det funnits flera utvecklingstrender för konstgräsgranulat. Under lång tid var gummigranulat från återvunna däck den helt dominerande formen av granulat-infill för konstgräsplaner. Den huvudsakliga materialkomponenten i återvunna bildäck är styren-butadien gummi (SBR). SBR-granulat är billiga, mekaniskt tåliga, mjuka och stötdämpande i kyla och är dessutom klimatvänliga eftersom de tillverkas av återvunnen råvara [Brydson 2016, Levin 2018, SGF 1996]. Nackdelarna är att de kan innehålla höga halter av kemikalier och metaller och att de är långlivade primära mikroplaster som riskerar att spridas i naturen [Schneider 2020]. Larmen om höga kemikaliehalter i SBR bidrog till att gummigranulat av nytillverkat etenpropengummi (EPDM) också började användas. Nytillverkat EPDM granulat har lägre kemikalie- och metallhalter än SBR, men har ett högre klimatavtryck, är dyrare och genererar fortfarande mikroplaster [Massay 2020]. I syfte att underlätta återvinning började snart också granulat av termoplastiska elastomerer (TPE) att utvecklas och säljas, eftersom TPE-material till skillnad från vanliga gummin kan smältas ned på nytt efter användning. Alla dessa tre elastomerer (SBR, EPDM och TPE) är fortfarande vanligt förekommande. Det senaste årtiondet har det också funnits en utvecklingstrend mot mer biobaserade och miljömässigt hållbara granulatmaterial i konstgrässammanhang. Förutom sand och plastbeklädd sand förekommer ifyllnadsmaterial av exempelvis kork (expanderad eller oexpanderad), nötskal (kokos, valnöt, ris, mandel, pistage mm), fruktkärnor (oliv, persika, avokado, aprikos mm), lignin/cellulosafibrer (+bindmedel), biobaserad plast (tex PLA och vissa polyestrar), biobaserat gummi (tex från majs och soja), bark, träflis, växtdelar och mycket annat. Målet med denna delstudie är att systematiskt undersöka alternativen.

EU-kommissionen väntas i år (2023) fatta beslut om att, inom ramen för Reach-förordningen, förbjuda försäljning av primära mikroplaster (solida polymera mikropartiklar) och mikropartiklar med en polymer ytbeläggning på mer än 0.01 viktsprocent. Vissa undantag kommer att finnas, exempelvis för vattenlösliga och naturliga polymerer. Förbudet beräknas minska de ackumulerade utsläppen av mikroplaster i Europa med ca 500 000 ton över en tjugoårsperiod [EU-kommissionen 2023]. Ett eventuellt försäljningsförbud kommer att föregås

av en flerårig utfasningsperiod, preliminärt på 8 år. Den direkta följden blir att försäljning av granulat av syntetiska polymerer (tex SBR, EPDM, TPE och LDPE-beklädd sand) kommer att förbjudas, vilket innebär att marknaden måste utveckla tillräckligt bra alternativa material inom den ca 8 år långa tidsfristen. De alternativ som i praktiken kvarstår är alltså helt infillsfritt konstgräs, konstgräs med enbart sand som infill och konstgräs med biobaserade granulat (+sand) som inte genererar mikroplaster (figur 3). Eftersom dagens naturmaterial ofta ger alltför hårda planer i nordiskt klimat på vintern kommer detta att vara en utmaning. Naturmaterial kräver ofta också mer skötsel, har kortare livslängd, drar åt sig mer fukt och ger större risk för bakterietillväxt än gummigranulat. Ett av målen med denna delstudie är att kartlägga och analysera de fyllmedel som idag finns på konstgräsmarknaden i syfte att ge vägledning till kommuner andra förvaltare av fotbollsplaner i Sverige och Europa.

Figur 3. *(a) En konstgräsplan och (b) biobaserat granulat till en konstgräsplan.*

3.2. Specifika infillsmaterial (syntetgummi, kärnor, skal, kork, sand mm)

SBR-gummi (styrenbutadien gummi) i gummigranulat för fotbollsplaner tillverkas nästan uteslutande av återvunna däck. SBR-granulat är billigt och har låg klimatpåverkan [Johansson 2018], eftersom råvaran är återbrukat material med få andra användningsområden. SBR är dessutom är tåligt mot mekanisk förslitning, har god stötdämpande förmåga både sommar- och vintertid och åldras inte nämnvärt över tid. Därför har SBR länge varit det mest använda granulatmaterialet för världens fotbollskonstgräsplaner. SBR-granulat med polyuretan-coating finns, men är vara ovanligt på den svenska marknaden. På grund av SBR-materialets kemikalieinnehåll [Gomes 2021, Krüger 2013, Murphy 2022, Selbes 2015, Wachtendorf 2017] och eftersom granulat av SBR klassificeras som primära mikroplaster som inte bör spridas i naturen strävar man idag mot gradvis fasa ut SBR-granulat från marknaden.

Fordonsdäck består inte bara av rent SBR-gummi utan har många andra tillsatser och materialkomponenter, vilket gör att SBR-granulat kan ha höga halter av exempelvis tungmetaller (bly, zink), polycykliska aromatiska kolväten (PAH), ftalater, fenyler, fenoler, flyktiga organiska föreningar (VOCs) och semiflyktiga organiska föreningar (SVOCs) [Baensch-Baltruschat 2020, EPA 2019, KEMI 2006]. Halterna är ofta högre än vad som är tillåtet enligt EU's leksaksdirektiv [EU 2009, KEMI 2019] för produkter som kan komma i närkontakt med barn. Fotbollsplaner är dock inte en sådan applikation och hälsofaran för fotbollspelare verkar försumbar för spel på utomhushusplaner [ECHA 2017, Pronk 2020, RIVM 2017, Bleyer 2018]. Echa rekommenderar dock god ventilation i inomhusanläggningar pga högre halter av VOC samt att man bör vidta vissa hygienåtgärder såsom tvätta händer och undvika granulat i munnen [KEMI 2023]. SBR-gummi är inte akut toxiskt, men innehåller så många potentiellt ohälsosamma föreningar att onödig spridning till naturen bör undvikas [Kole 2017, Larsson 2022]. Däck som producerats eller importerats till EU efter 1 januari 2010 har generellt lägre kemikaliehalter, eftersom EU då införde regeln att däck (och oljor) maximalt får innehålla 1 mg/kg bensapyren och 10 mg/kg totalt av alla listade PAH kemikalier [ECHA 2021]. Notera att eftersom SBR är kemiskt tvärbundet smälter det inte vid uppvärmning och är därför svårt att återvinna på annat sätt än energiåtervinning/förbränning.

EPDM. Etenpropengummi kan antingen tillverkas av ny råvara eller av återbrukat material från tex skor. I det senare fallet kallas materialet ofta r-EPDM. Nytillverkad EPDM innehåller betydligt lägre kemikaliehalter än återvunnen SBR [Kubota 2022, Moreno 2023, Bylina 2022] men har högre klimatavtryck. Återvunnen EPDM har lägre klimatpåverkan men högre kemikalienivåer än nytillverkad EPDM, men kemikaliehalterna och typen av kemikalier beror i mycket hög grad på varifrån det återvunna materialet kommer. Det finns exempelvis studier som visar att ytskiktet på återvunnen EPDM kan vara akut toxiskt för vissa djurplanktonet Daphnia Magna [Cedervall 2023]. I likhet med SBR är EPDM är slittåligt, har goda långtidsegenskaper och spelbarheten på fotbollsplaner med EPDM är hög både sommar- och vintertid. EPMD tycks dock ge upphov till fler luftburna nötningsfragment (plastdamm) än SBR och TPE [Nyberg 2018]. Materialet är vulkaniserat och därmed svårt att återvinna och eftersom det är en syntetisk polymer räknas EPDM-granulat som primära mikroplaster. EPDM är betydligt dyrare än SBR.

TPE. Termoplastiska elastomerer är termoplaster som behandlats för att få gummiliknande egenskaper. Den stora fördelen med TPE-material är att de till skillnad från vulkade gummin,

som är kemiskt tvärbundna, går att smälta och forma till nya produkter efter användning, dvs de är åtminstone i teorin betydligt lättare att materialåtervinna. Andra fördelar är att nytillverkad TPE vanligtvis innehåller begränsat med kemikalier och att spelbarheten på fotbollsplaner med TPE är hög även vintertid. Granulat av TPE räknas dock som primära mikroplaster, TPE är betydligt dyrare än SBR och klimatpåverkan från nytillverkat TPEs är hög. Det börjar dock dyka upp TPE med inblandning ca 30-40 % återvunnen råvara på marknaden, exempel från den svenska tillverkaren Ecorub [Ecorub 2023].

Det finns en mängd olika TPE-material, där egenskaperna varierar beroende vilka polymerer som används vid framställningen. Beroende på kemisk sammansättning får de olika benämningar, exempelvis TPE-V (vulkaniserad PP-EPDM blandning), TPE-E (sampolyesterblandning), TPE-U (termoplastisk polyuretan), TPE-A (termoplastisk polyamid), TPE-O (termoplastiska polyolefiner) och TPE-S (SBS/SEBS/SEPS) [Mårtensson 2013]. Ofta förkortar man namnen så att PTE-U skrivs PTU, PTE-V skrivs TPV osv.

Polyeten. Polyeten är världens vanligaste plast och används bland annat i själva konstgrässtråna på en konstgräsplan. Polyetengranulat finns till försäljning för fotbollsplaner (exempelvis FieldTurf ProMax), men verkar inte särskilt vanligt på den svenska marknaden. Fördelen med polyetengranulat jämfört med gummigranulat (SBR, EPDM, TPE) är att de går att smälta och därför är lättare att återvinna [Gedde 2020]. En teknisk rapport från 2022 indikerar att nanoplaster av högdensitetspolyeten (HDPE) inte verkar vara akut toxiska för djurplanktonet Daphnia Magna [Cedervall 2022]. Även polyetengranulat räknas dock som mikroplaster och kommer sålunda inte att tillåtas med EU-kommissionens nya regler.

Bioplaster (tex PLA). Vissa bioplaster, tex polylactic acid (PLA), Polyhydroxyalkanoates (PHA), polybuten-succinat (PBS) och termoplastisk stärkelse (TPS) är biologiskt nedbrytbara, medan andra, tex bio-PET och bio-PE, inte är det [Brännström 2022]. Den gemensamma nämnaren är att de har biologiskt ursprung. Granulat bestående av biologiskt nedbrytbar plast, kombinerat med fyllmedel och andra ofarliga materialkomponenter, finns på marknaden och omdömena från fotbollsspelarna är överlag ganska positiva. PLA bryts vanligtvis ned snabbt i vid förhöjd temperatur och luftfuktighet [Mitchell 2014, Ho 1999], dvs vid de förhållanden som råder i en industrikompost (ca 40-70 ^{o}C, >70% RH [Composting 2019]) men påfallande långsamt vid de lägre temperaturer som råder i exempelvis sjö- och havsvatten [Deroine 2014, Huang 2020]. Nedbrytningshastigheten påverkas också av tex polymerens molmassa [Tsuji 2001]. Det är därför inte säkert att granulat av bioplast kommer att godkännas med EU-

kommissionens nya regler, även om det finns tillverkare som anger att de har granulat av bioplast som bryts ned snabbt i naturen, exempelvis A Good Choice [Melkersson 2022] och Unisport. Besked om huruvida de blir godkända kommer att fattas framöver. Granulat av vattenlösliga och/eller bionedbrytbara plaster kan vara en potentiell väg framåt, men för att tillämpa försiktighetsprincipen bör fler noggranna vetenskapliga studier göras på den sortens plaster för att säkerställa att det inte blir några negativa överraskningar i efterhand [Bahl 2021, Chen 2020, Mondellini 2022, Shan 2008]. I teorin borde bioplaster ha lågt klimatavtryck, men flera LCA studier (inklusive denna) tyder på att klimatavtrycket för nytillverkade bioplaster kan vara större än förväntat, åtminstone om produktionen leder till avskogning och permanent förlust av regnskogsareal. Ur återvinningssynpunkt är det också viktigt att undvika att nedbrytbara plaster blandas med icke-nedbrytbara, annars försämras kvaliteten på den återvunna plasten och det blir större risk för mikroplastspridning [Wei 2021, Wei 2022].

Kork är ett rent naturmaterial som inte genererar några mikroplaster. Klimatmässigt är kork ett gott alternativ [Johansson 2018] eftersom korkekarna inte behöver huggas ned för att erhålla korken, vilket görs genom att ca vart 9e år skörda delar av ekens bark. Vattenåtgången för odling av korkek är dock ganska hög. Idag finns god tillgång till kork, men produktionen går inte att skala upp hur mycket som helst. Tillgången bedöms dock som tillräckligt god för att åtminstone räcka hållbart till alla elit/seriespelsplaner i Norden. Kvaliteten hos kork beror på hur snabbt korken växer, där långsam tillväxt innebär högre kvalitet. Högkvalitativ kork sägs enligt vissa tillverkare karaktäriseras av att den kommer från långsamväxande träd, har tagits från insidan av korkeksbarken, är ljus till färgen och väger ca 120 g/cm.

Kork kan antingen användas som ett monomaterial eller blandas med något ytterligare biobaserat fyllmedel (tex kokos), i syfte att kombinera korkens goda stötdämpande förmåga med den andra komponentens fördelar. Korkgranulaten kan antingen expanderas med vattenånga eller förbli i sin naturliga form. Expanderad kork får lägre densitet och blir mer fjädrande, homogen och får bättre termiska egenskaper, men den lägre vikten gör att den lättare dammar, fastnar på kläder (pga statisk elektricitet) och påverkas av nederbörd.

Eftersom kork har låg densitet behövs färre ton per konstgräsplan jämfört med gummi, men samtidigt krävs mer borstning och underhåll för att säkerställa att korkgranulaten hålls kvar på rätt plats på mattan. Detta gäller i synnerhet för expanderad kork. God dränering är extra viktigt för korkfyllda konstgräsmattor, eftersom korkgranulat annars kan sköljas bort vid skyfall. En viss lutning på planen (0.6 - 0.8 %) är därför att rekommendera.

Priset för kork är något högre än för SBR (ca 5 euro/m^2 mer) men betydligt lägre än för tex TPE. Det årliga påfyllnadsbehovet för oexpanderad kork är i paritet med för SBR medan det för expanded kork är något högre.

Kork är brandsäkert, giftfritt, doftfritt, temperatursänkande, har goda mekaniska egenskaper och har tolererbara långtidsegenskaper, även om kork bryts ned snabbare än syntetiskt gummi. Kork har en inbyggd elasticitet som den till viss del behåller även vid måttliga minusgrader, vilket ger en naturligt stötdämpande förmåga. I jämförelse med andra naturmaterial attraherar kork mindre vatten, vilket gör materialet mindre fuktkänsligt och hårt på vintern. Men även kork blir förstås hårdare och halare när det är minusgrader, i synnerhet om planen är genomblöt. Det är ytterligare en anledning att säkerställa god dränering vid användning av kork.

Omdömena om kork-infill har historiskt varit blandade från Sveriges fotbollsspelare. Vissa tidigt inlagda fotbollsplaner med kork fick mycket klagomål att man tvingades byta tillbaka till gummigranulat [arkitekten 2019]. Klagomålen rörde främst att spelarna fick granulat i ögonen och att korken fastnade på kläderna pga statisk elektricitet. På nyare planer i tex Göteborg och Värmdö är kork (med relativt hög densitet) emellertid det bio-infill som fått bäst omdömen. Utvecklingen av korkgranulat har gått framåt, vilket skulle kunna förklara att diskrepansen i omdömen. Kork har trots sina nackdelar ändå en tydlig potential att bli ett bra och miljövänligt alternativ till gummigranulat.

Skal av tex kokos, valnöt, mandel, pistage eller ris, är naturmaterial som inte genererar några mikroplaster. Skal är billigt, klimatvänligt, kemikaliefritt, svalarare att spela på än gummi och miljövänligt överlag. Planer med tex kokosskal kan dock behöva vattnas om fuktigheten blir för låg, till skillnad från tex ren kork. Ofta används en kombination av flera naturmaterial i syfte att ge synergistiska materialegenskaper som kombinerar och förstärker materialens individuella fördelar. Exempelvis finns en materialkombination med 90% kokosskal och 10% kork på den svenska marknaden. Nötskal är avsevärt svårare än gummi att spela på vid låga temperaturer, eftersom ytan drar åt sig fukt och därför lätt blir styv och hal vid isbildning [Svedala 2022]. Denna typ av material behöver mer underhåll och har kortare livslängd än gummigranulat, men är betydligt mer miljövänligt.

Kärnor från tex oliver, persika, avokado och aprikos är naturmaterial som har mycket lågt klimatavtryck, inte genererar mikroplaster, inte innehåller giftiga kemikalier och har lågt pris. I Sverige är olivkärnor klart vanligast och dessa har goda testvärden i FIFAs tester. Den gemensamma nämnaren för alla sorters kärnor är att de är hårda och saknar inbyggd elasticitet

och därför behöver ett extra tjockt stötdämpande skikt under konstgräsmattan. I synnerhet vintertid tenderar planer med olika typer av kärnor att bli hårda och hala. Kommunerna har också rapporterat att spelare klagat på fula skrapsår efter spel på planer med olivkärnor. Problemen med skrapsår skulle möjligtvis kunna reduceras om kornen polerades mer innan användning, men det är svårt att helt komma bort från det faktum att fruktkärnor är mycket hårdare än gummi. Det finns säkerligen skillnader i materialegenskaper mellan olika typer av fruktkärnor, men sannolikt är skillnaderna inte särskilt stora. I likhet med andra naturmaterial är livslängden på granulat från kärnor kortare än för gummi och behovet av skötsel något högre, men miljöegenskaperna är mycket bättre.

Lignin. Granulat bestående av lignin, sågspån och bindemedel ger med största sannolikhet låga klimatutsläpp och har sannolikt lågt kemikalieinnehåll. Även mikroplastutsläppen är sannolikt begränsade, men inte helt försumbara så länge bindmedlet kan generera mikroplaster. Idag används fossilbaserade bindmedel som sannolikt kan generera mikroplastutsläpp om produkten förmultnar i naturen i stället för att eldas upp, men det kan förbättras med produktutveckling. Sannolikt kommer produkttypen inte att godkännas med EU-kommissionens kommande regler, eftersom mikroplaster riskerar att bildas när granulaten bryts ned. Ligninbaserade granulat har fått relativt goda omdömen för spelkvalitet, men i likhet med de flesta andra naturmaterial drar de åt sig vatten och blir hårda runt fryspunkten. God dränering och tjock dämpning under mattan är därför nödvändig, men även då kommer materialet att bli hårdare och halare än gummigranulat. Eftersom lignin är en restprodukt från skogsindustrin blir priset överkomligt.

Träflis. Små flisade bitar av trä är ett rent naturmaterial som är giftfritt och utan mikroplaster. Materialet är klimatvänligt, i synnerhet om råvaran är restprodukter från skogsindustrin. Därtill är det billigt och har relativt god dämpningsförmåga. I likhet med de flesta andra naturmaterial drar det åt sig vatten och blir hårt på vintern, men det ger ändå en viss naturlig flexibilitet. De flesta spelegenskaperna är acceptabla, men spelarna kan få obehagliga stickor när de ramlar på flis, så de försök som gjorts med träflis i Norge har avbrutits av denna anledning. Det skall också noteras att träflis tidigare används flitigt på svenska elljusspår, men användningen har minskat efter larm i epidemiologiska studier om att träflis i sådana tillämpningar kan resultera i ohälsosamt höga av bakterier och mikroorganismer [Walters 2023].

Sand/grus. I princip alla konstgräsplaner med granulatinfill har ett lager av sand under granulatet, men det finns också konstgräsplaner med enbart sand-infill samt traditionella

grusplaner utan konstgräs. Sand består inte av polymerer och genererar därför inga direkta mikroplastutsläpp, men slitaget på konstgräsfibrerna ökar jämfört med när gummigranulat används, eftersom sanden har en strävare ytstruktur. Sandens friktion mot konstgrässtråna kan ge en sandpapperseffekt som både genererar mikroplaster och förkortar mattans livslängd med uppskattningsvis 10-20%, med försämrade livscykelegenskaper som följd. De direkta klimatavtrycken från sand beror på hur sanden tillverkas, men är generellt relativt begränsade. För att hålla utsläppen låga bör man så långt som möjligt tvätta och återanvända sand snarare än att använda ny råvara. Sand är billigt jämfört med de flesta andra infillsmaterial och innehåller inga kemikalier. Det finns många kvaliteter på sand och dessa ger olika egenskaper på fotbollsplanerna. Kvartssand som tillverkats genom krossning kan ha skarpa kanter och orsaka lungskador (stendammslunga) vid långvarig exponering, men för utomhusplaner torde det problemet vara försumbart. För inomhusplaner bör infill med sand undvikas för att förebygga stendammsrelaterade lungskador. Åtminstone bör partikelhalterna i inomhusluften mätas. Natursand är generellt att föredra. Fuktig sand som fryser blir stenhårt, därför är god dränering nödvändigt när sand används som infill. Porositeten och dräneringsförmågan hos sanden förbättras om kornen är så runda och jämnstora som möjligt, eftersom det ökar andelen luft mellan sandkornen. Därför bör man idealt eftersträva sand som både tvättats och silats, för att få bort de minsta kornen och få en så snäv storleksfraktionering som möjligt. Större sand/gruskorn ökar också generellt dräneringsförmågan, eftersom den genomsnittliga storleken på hålrummen mellan sandkornen då blir större. Även med god dränering blir planer med sand/grus hårdare än planer med gummigranulat, så det måste kompenseras genom en tjockare dämpning under planen. Det finns ännu inga fotbollssystem med enbart sand som klarar Fifas högsta standard (Fifa quality pro) och omdömena för system med sand varierar storligen mellan olika bedömare. Flera tillverkare och kommuner anser att planer med enbart sand som infill är bättre än planer med biobaserade granulat, medan andra anser att det är högsta prioritet att få bort just dessa planer.

Plastbeklädd sand. Kvartssand som ytbehandlas med tunt lager (2 viktsprocent) lågdensitetspolyeten (LDPE) för att få en mjukare yta har blivit ett populärt alternativ med goda spelegenskaper. Den totala mängden plast/gummi på planen reduceras radikalt med ca 98 % jämfört med när rena gummigranulat används och klimatpåverkan blir sannolikt betydligt lägre jämfört med granulat av nytillverkade polymerer. Jämfört med infill av naturlig sand blir nötningen på konstgrässtråna lägre och livslängden på konstgräsplanen därmed längre. Plastbeklädd sand har godkänts av FIFA för spel på elitnivå och har fått goda omdömen av

fotbollsspelarna. Plastbeläggningen tenderar dock att nötas loss med tiden, vilket frigör små mikroplastfragment från ytorna, vilket bekräftats med SEM mikroskopi. Fältstudier från inomhusplaner med denna sorts infill visar att det uppstår ett mycket finkornigt plastdamm (figur 4), där åtminstone delar av fragmenten är så små att de klassificeras som nanoplaster. Även om ytterligare epidemiologisk forskning skulle krävas för att säkerställa ett strikt samband mellan exponering av denna sorts nanoplaster och människors hälsa så bör försiktighetsprincipen tillämpas, varvid plastad sand bör undvikas i inomhushallar. För utomhusplaner är hälsoriskerna för spelarna sannolikt ytterst marginella, men risken för migrering av mikroplaster till vattendrag kvarstår. Kontinuerlig produktutveckling pågår och produkterna torde bli bättre för varje produktgeneration. Inomhusplanen som undersöktes (Spånga fotbollshall) installerades 2020 med fjärde generationens Bioflex, som inte längre säljs. Materialet var sålunda två år gammalt när undersökningen genomfördes hösten 2022. Den nuvarande versionen av Bioflex (generation 8) är sannolikt bättre, men det bedöms ändå som osannolikt att problemet med nötning av ytbeläggningen helt försvinner. Plastad sand räknas hur som helst som primära mikroplaster och försäljning kommer sålunda inte längre att tillåtas om EU-kommissionens föreslagna förbud träder i kraft.

Figur 4. *Plastdamm från inomhusplan med plastad sand. (a) Skoborste, (b) vid vägg.*

Granulatfritt. Det finns idag konstgrässystem helt utan infill som inte ens behöver fyllas med sand. Hitintills är det främst för andra tillämpningar än fotboll som granulatfritt konstgräs har används, tex lekplatser, mässor, golfbanor och liknande, men det börjar också komma fjärde generationens granulatfria konstgräs som lämpar sig för fotboll och annan idrott. Utvecklingen för denna kategori av konstgräs går mycket snabbt och det finns redan idag granulatfria konstgrässystem som klarar FIFAs krav för breddfotboll (FIFA quality), även om det inte formellt licentierats ännu. Friktionen för granulatfritt konstgräs är dock större än för

motsvarande system med gummigranulat och därför uppfyller ännu inga granulatfria konstgräs FIFAs krav för elitfotboll (FIFA quality pro). Det är dock sannolikt att produktutvecklingen kommer att fortsätta så att granulatfritt konstgräs gradvis blir både bättre och mer vanligt förekommande i framöver. Huruvida det i framtiden kommer att bli tillräckligt bra för elitfotboll går förstås inte veta, men det är mycket sannolikt. Det finns redan idag infillsfritt konstgräs under utveckling som ger avsevärt mindre risk för skrubbsår och sådana produkter förväntas sättas på marknaden redan i år (2023). Exempelvis är Greenfields ”PURE” matta värd att studera närmare, men det kommer garanterat snart att finnas motsvarande produkter även från andra tillverkare. Det finns också en positiv trend att använda färre materialtyper i mattan, vilket underlättar mekanisk materialåtervinning utan ”down-grading”. Blandningar av exempelvis polyeten (strån) och polyuretan (backing) går förvisso att återvinna mekaniskt redan idag, men det återvunna materialet får högre kvalitet om >95% av mattan består av ett material (tex polyeten) och resten består av material från samma klass (tex polypropen som också är en polyolefin). Exempelvis GreenTurf, Nordic Area service och LimeGreen ONE-DNA och många andra konstgräsföretag strävar mot det målet.

Konstgräs utan infill kräver betydligt tätare fiberstruktur än konstgräs med infill, vilket ökar den nödvändiga massan konstgräsfibrer per kvadrater. En ökad mängd plastmaterial leder till ökade utsläpp av växthusgaser från själva mattan, men samtidigt minskar behovet av infill och underhåll, vilket reducerar utsläppen från dessa källor. Huruvida de totala livscykelutsläppen ökar eller minskar beror bland annat på vilket infill man jämför med, men åtminstone vissa LCA analyser [NTNU 2020] tyder på att granulatfritt konstgräs över sin livstid (ca 10 år) ger betydligt lägre klimatutsläpp än mattor med nytillverkade gummigranulat (tex EPDM) och något lägre även jämfört med återvunna gummigranulat (tex SBR). Samma studier indikerar att de monetära kostnaderna i ett livscykelperspektiv blir lägre för det granuatfria systemet.

Mikroplastutsläppen från granulatfritt konstgräs är sannolikt betydligt lägre än för motsvarande system med gummigranulat, men eftersom materialet trots allt består av plast, främst LDPE, kan det fortfarande förekomma viss ofrivillig spridning av mikroplaster även från sådana planer. Granulatfritt konstgräs kommer emellertid att bli godkänt med EU-kommissionens föreslagna regler.

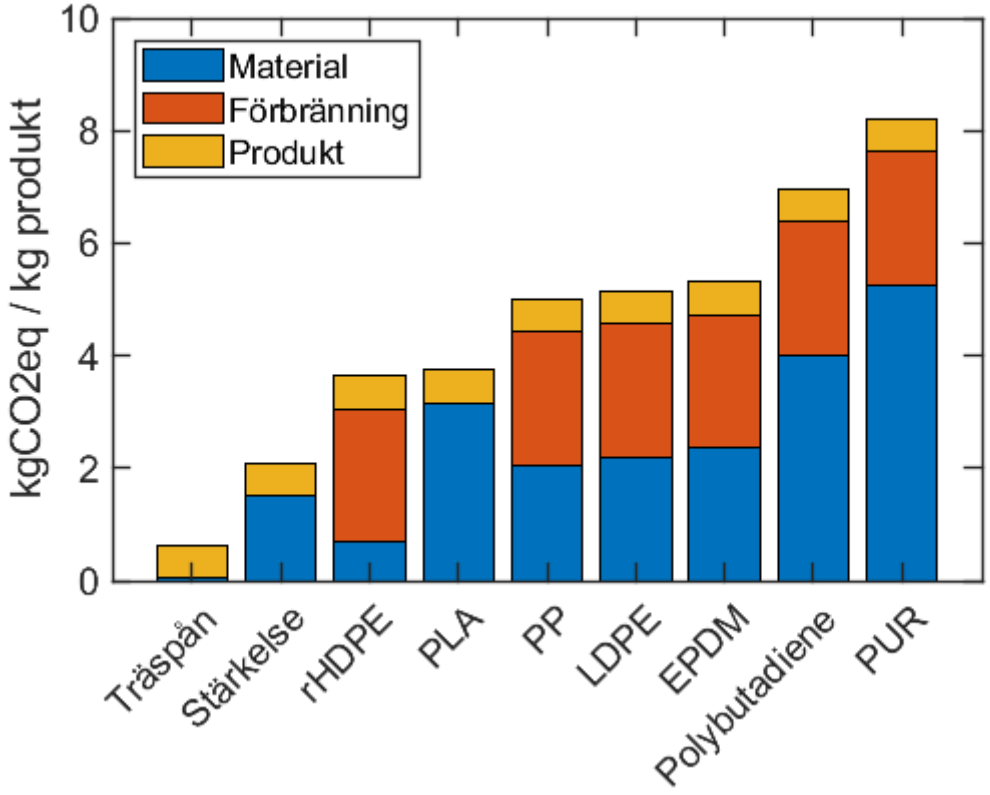
3.3. Experimentella resultat och diskussion

Idag finns många sorters granulatmaterial till konstgräsplaner och det är inte lätt för en beställare att avgöra vilka för- och nackdelar varje material har. Granulatmaterialet ska vara miljövänligt avseende klimat, mikroplaster och kemikalier, men samtidigt ge goda spelegenskaper och inte orsaka skador på spelarna. Vårt nordiska klimat med snö och is på vintrarna gör det svårare, jämfört med resten av Europa, att hitta mikroplastfritt granulatmaterial som möjliggör utomhusspel året om. Gummimaterial såsom SBR, EPDM, TPE och naturgummi har till skillnad från de flesta biomaterial en inbyggd elasticitet som möjliggör ett mjukt och fjädrande underlag även vid minusgrader, förutsatt att planen är någorlunda väl dränerad. Det är osannolikt att det går att hitta miljövänliga och mikroplastfria ersättningsmaterial som under alla årstider har lika bra spelegenskaper som gummigranulat, men eftersom ECHAs mikroplastlagstiftning kommer att vara tvingande gäller det att hitta bästa möjliga alternativ bland de alternativ som står till förfogande.

Livscykelanalyser (LCA) av granulatmaterial är notoriskt svåra att genomföra på ett kvantitativt korrekt och generaliserbart sätt, detta eftersom resultaten är starkt beroende både av metodikval, systemgränser, okända materialparameterar och hur det specifika materialet tillverkats. Exempelvis påverkas resultaten av huruvida man använder vanlig ”attributional LCA”, där medelutsläpp för olika utsläppskällor används, eller ”consequential LCA”, där marginalutsläpp för utsläppskällorna används. I figur 5 visas approximativa klimatutsläpp (per kg material) för tillverkning av några material som förekommer i konstgrässammanhang, däribland nytillverkad/återvunnen LDPE, PP, EPDM, PUR, PLA, träspån och bio-PET. LCA-programmet Simapro 9 med databasen Ecoinvent 3 (IPCC 2013, GWP100) användes och beräkningarna gjordes med attributional LCA. De totala livscykelutsläppen inkluderar också utsläppen från transporter, produkttillverkning och återvinning/förbränning. Transporternas bidrag är ofta små i sammanhanget och sätts till noll, produkttillverkningen skattas grovt till 0.58 kg CO2/kg produkt och utsläppen för förbränning kan sättas till noll för biogena utsläpp och approximeras till 2.35 kg CO_2/kg produkt för fossilbaserade utsläpp.

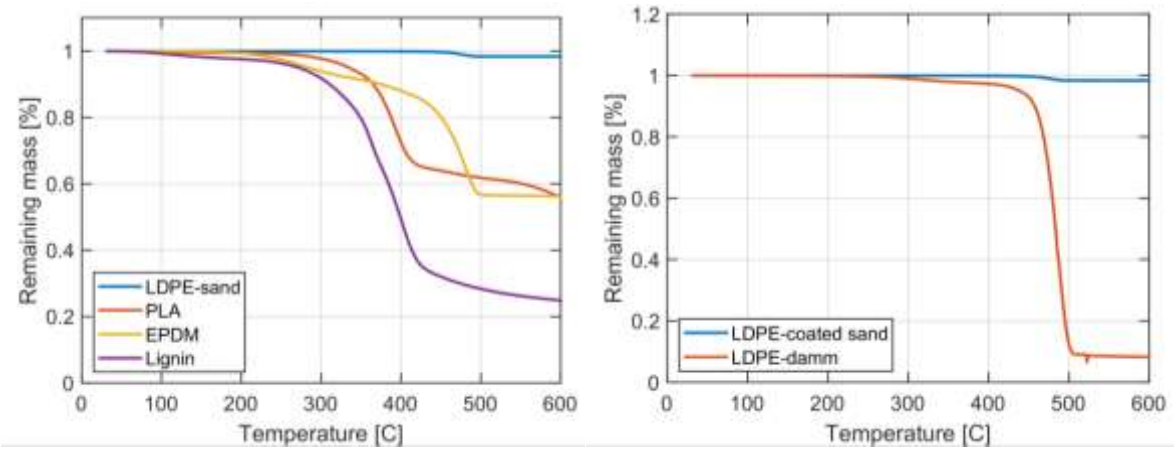
LCA-analysen (Figur 5) indikerade att klimatutsläppen för tillverkning av restprodukten träspån är ca 0 kg CO2/kg produkt, återvunnen LDPE ca 0.7, bio-PET ca 1.4, de flesta fossila plaster och gummin (LDPE, PP, EPDM) ca 2.0, PLA drygt 3 och PUR drygt 5.2. Förbränningsutsläppen är runt 2.2 för de fossila polymererna och sätts till 0 för de biobaserade. Förbränningsutsläppen för återvunna material (tex rEPDM, rSBR och rHDPE) skulle eventuellt också kunna sättas till noll, det är bara en fråga om val av allokeringsmetod. Dessa siffor är som

sagt medelvärden som inte nödvändigtvis stämmer för en specifik produkt, eftersom utsläppen påverkas av tex vilken råvara och energikälla som använts. Antagandet att utsläppen för produkttillverkningen och förbränningen för alla fossila material är samma är förstås också en grov förenkling. Även om värdena bör tas med en nypa salt ger de ändå en grov indikation på vilka trender som kan förväntas. Exempelvis är klimatavtrycket oftast är väldigt lågt för närmast oprocessade restprodukter av naturmaterial, såsom kokosskal, fruktkärnor, cellulosaspill etc, men det kan vara betydligt högre för processade bioplaster såsom PLA. Återvunnen plast/gummi har också generellt betydligt lägre klimatavtryck än nytillverkat, ca 1/3 av utsläppen för att tillverka ny plast. Ur klimatsynpunkt är det därför eftersträvansvärt att i så hög grad som möjligt använda närmast oprocessade biomaterial eller återvunna/återvinningsbara plaster/gummin.



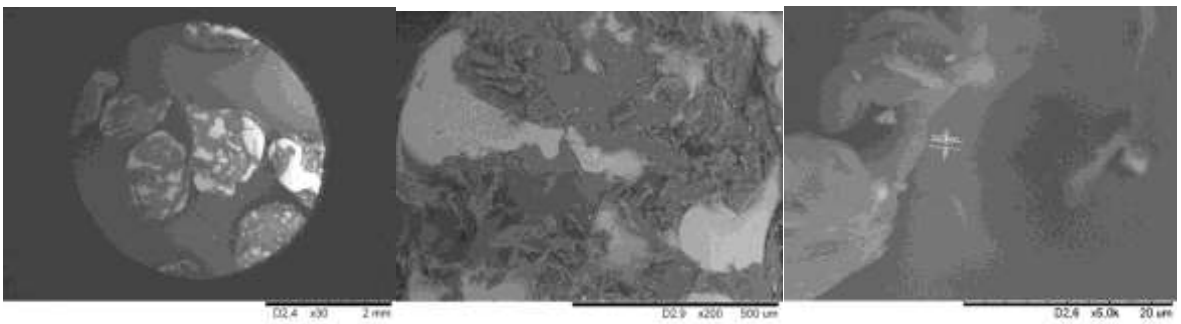
Figur 5. *LCA-analys för klimatutsläpp vid tillverkning av olika material som förekommer i konstgrässammanhang, tillsammans med utsläpp från förbränning i slutet av produktens livslängd och en grov skattning av utsläppen vid tillverkning av produkter av materialen. Förbränningsutsläppen för återvunna material (tex rHDPE) skulle också kunna sättas till 0.*

Termogravimetrisk analys (TGA) av några granulat- och konstgräsmaterial (Lignin, PLA, EPDM, plastad sand och LDPE-damm från plastad sand) visade att de flesta materialen innehöll en hög andel ickeorganska fyllmedel som inte bryts ned vid höga temperaturer (figur 6). Exempelvis innehåller både EPDM- och PLA granulaten nära 60 % icke-organiska komponenter. Den LDPE-belagda plastade sanden verkar innehålla ca 2 % LDPE, vilket är i överensstämmelse med produktinformationen från tillverkaren. Dammet som samplats upp i en inomhusfotbollsanläggning med infill av plastad sand bekräftades bestå av LDPE.



Figur 6. *Termisk TGA analys. (a) Olika granulat, (b plastad sand och plastdamm.*

Elektronmikrografi (SEM) på plastad sand från år 2020 visar att LDPE-ytbeläggningen kan släppa från sandkornens yta och bilda små plastfragment som tillsammans bildar ett fint plastdamm (figur 7). Mikrografierna visar att de minsta kornen är så små att de räknas som nanoplaster, vilka misstänks ha högre hälsorisker än annan mikroplast. Om möjligt bör man därför undvika att använda plastad sand i inomhusanläggningar.



Figur 7. *SEM av plastad sand med olika förstoringar. (a) 30 ggr, (b) 200 ggr, (c) 5000 ggr.*

Praktiska test. Stockholms fotbollsförbund har fyra testplaner i Solna (Nordic Testbed) där de sedan 2021 systematiskt testar alternativa underlag för fotbollsspel under minst en hel

spelsäsong (<12 månader). Detta är ett mycket lovvärt initiativ eftersom det därigenom blir möjligt att jämföra olika infillsmaterial och utvärdera dem under likvärdiga och kontrollerade former. Planerna utvärderas både av spelarna som testar planerna och med FIFAs testutrustning. Första året (2021-2022) utvärderade fyra olika infill: (1) olivkärnor med kork, (2) olivkärnor, (3) bionedbrytbar PLA med hampa och kalksten samt (4) återvunnen vinyl med olikkärnor och TPU. På en 5-gradig skala gav spelarna planerna betygen 2.17, 3.0, 3.58 och 3.17 och alla planer utom den första klarade FIFAs testkriterier [testbednordic 2022]. Planerna var dock för små för officiell FIFA-kreditering. Denna säsong (2022-2023) utvärderas även kork och ”Biopitch” som består av grot (restmaterial från skogsindustrin), lignin och bindmedel. Utvärderingsplaner av detta slag är mycket värdefulla för att kunna jämföra och utvärdera de produkter som finns på marknaden och för att ge ett bättre beslutsunderlag till kommuner och andra inköpare av konstgräsplaner.

3.4. Rekommendationer för infills-material för konstgräsplaner

Det finns ännu inga mikroplastfria konstgrässystem som i nordisk miljö över hela året ger lika goda spelegenskaper som dagens konstgräs med gummigranulatinfill. Gummimaterial och elastomerer såsom SBR, EPDM och TPE har en naturligt inbyggd elasticitet som de flesta alternativa material (förutom kork) saknar, vilket gör att extra stötdämpning under konstgräsplanen behövs för alla alternativa konstgrässystem. De flesta gummin behåller dessutom sin elasticitet långt under fryspunkten, vilket gör att de till skillnad från alternativen förblir mjuka och stötdämpande även under vinterhalvåret. Sand, och de flesta biobaserade naturmaterial (nötskal, fruktkärnor, grot etc) binder fukt som fryser vid minusgrader, vilket gör att ytor med sådan beläggning lätt blir hårda och hala vintertid.

Trots dessa svårigheter bedöms det ändå inte vara omöjligt att fasa ut gummigranulat och andra mikroplastgenererande infill från konstgräsplanerna i framtiden. Produktutvecklingen är redan snabb och förväntas accelerera kraftigt om EU fattar beslut om förbud mot försäljning av gummigranulat och andra primära mikroplaster. I större delen av Europa är vintrarna betydligt mildare än i Norden, så där kommer det att vara avsevärt lättare att hitta ersättningsprodukter som fungerar året om. Biobaserade infill med tex kokosnötskal skulle mycket väl kunna fungera i Sydeuropa även om de blir hårdare än önskvärt på vintern i Sverige. Frågan är vilka alternativ som är mest lämpliga här i Norden?

Det finns idag inget entydigt svar på den frågan och det finns ännu ingen enskild produkt som helt kan fylla den roll som konstgräs med gummigranulat fyller idag. Det kommer med allra största sannolikhet behövas en kombination av flera olika lösningar. Ett konstgrässystem som är bra i södra Sverige behöver inte vara bra i norra Sverige och en variant som fungerar för ungdomsidrott kanske inte fungerar för elitidrott, men genom att använde rätt underlag på rätt plats bör det gå att få tillräckligt bra förutsättningar överallt.

I tabell 1 finns en sammanfattande bedömning av för- och nackdelar med olika konstgrässystem. Notera att detta bara är en subjektiv uppskattning baserad på tillgänglig litteratur och samtal med många olika intressenter (kommuner, tillverkare, fotbollsförbund). Ofta har olika personer gjort helt olika bedömningar av hur bra olika produkter är avseende spelkvalitet och andra egenskaper, vilket försvårar möjligheterna att ranka produkterna.

Den samlade bedömningen är att granulat av högkvalitativ kork i dagsläget har störst möjlighet att kunna ersätta gummigranulat på fotbollsplaner avsedda för seriespel och senior breddfotboll i Norden. Eftersom den globala tillgången på kork är begränsad vore det eftersträvansvärt att uppmuntra EU-länder med mildare vintrar att prioritera andra infill än kork, så att korken kan användas här där den gör störst nytta. För ungdomsfotboll går det åtminstone i södra delen av landet att använda konstgräs med andra naturmaterial (+ sand) eller med enbart sand, även om det förkortar säsongen något jämfört med gummigranluat. I de nordliga delar av Sverige där tillgången på snö är mycket god hela vintrarna är det miljömässigt och ekonomiskt bättre att vintertid prioritera renodlad vinteridrott, såsom skidor och skridskor, snarare än fotboll.

På några års sikt bedömer vi att den fjärde generationens (4G) helt infillsfria konstgräs kommer att ha utvecklats så långt att den kan användas för fotbollspel på alla nivåer året om, även om det finns tillverkare som tror att 4G planer aldrig kommer att lyckas uppnå FIFAs krav för hudnötning. Redan idag finns dock 4G konstgrässystem som uppfyller kraven för FIFA Quality på marknaden, men FIFA har som policy att inte certifiera granulatfria konstgrässystem även om de uppfyller alla FIFAs kriterier. Eftersom konstgrässtråana och mattan fortfarande är av plast kommer även dessa att generera små mängder mikroplaster, men betydligt mindre än idag, förutsatt att de konstrueras väl. Infillsfritt 4G konstgräs innehåller fler plastfibrer per kvadratmeter än konstgräs med infill, vilket skulle kunna öka klimatutsläppen. Samtidigt kräver 4G mattan mindre underhåll och behöver inget infill, så klimatutsläppen över planens livstid borde hållas låga, åtminstone om (delvis) återvunnet eller återvinningsbart material [Malin 2012] används i mattan.

Material/egenskap	Mikroplast	Klimat	Sommarspel	Vinterspel	Pris	Kemi
SBR (återvunnen)	1	5	5	5	5	2
EPDM (ny)	1	1	5	5	2	4
EPDM (återvunnen)	1	4	5	5	3	2
TPE (ny)	1	1	5	5	2	4
plastad sand	2	3	4	4	3	4
Bioplast	2-4	3	4	4	3	4
Flis/lignin/bindmedel	3	4	4	3	4	4
Infillsfritt 4G (framtid)	4	4	4	4	4	4
Kork (hög kvalitet)	4	5	4	4	3	5
Nötskal (tex kokos)	4	5	3	2	4	5
Fruktkärnor (tex oliv)	4	5	3	2	4	5
Träspån	4	5	3	2	4	5
Sandinfill	4	5	3	2	4	5
Gräs	5	4	5	1	2	5
Grus	5	5	2	2	5	5

Tabell 1. *Uppskattad miljöpåverkan, spelegenskaper och (livslängds)pris för olika material för fotbollsplaner. Om EU-kommissionens förslag enligt REACH-förordningen går igenom kommer försäljning av granulat av SBR, EPDM, TPE, plastad sand och sannolikt även de flesta bioplaster och kompositer med polymerbaserade bindemedel att förbjudas. Konstgräs med högkvalitativt kork-infill samt framtidens fjärde generationens infillsfria konstgräs bedöms som mest lovande för fotbollsspel i nordiskt klimat. Notera att siffrorna är kvalificerade uppskattningar men långt ifrån absoluta sanningar.*

4. Resultat delstudie 2 – miljöoptimering av konstgräsplaner

4.1. Inledning

Konstgrässystem kräver mindre underhåll än naturgräs och möjliggör fotbollsspel och annat idrottande betydligt fler timmar per säsong, därför installeras fler konstgräsmattor i hög takt. Konstgräs genererar mikroplaster under mattans drift samt utsläpp av växthusgaser vid konstruktionen och förbränning/återvinning av mattan. Med en välkonstruerad konstgräsmatta med väl valda material och med en genomtänkt strategi för drift och återbruk/återvinning [Nielsen 2021] behöver emellertid inte miljöbelastningen vara särskilt stor sett över mattans hela livstid. Frågan är hur detta kan uppnås på bästa sätt?

För att besvara frågan behöver man veta vilka miljö- och hälsorisker som konstgräs och mikroplaster potentiellt skulle kunna leda till, hur dagens konstgrässystem ser ut, vad som skiljer ett miljömässigt bra konstgrässystem från ett mindre bra, hur man kan konstruera och underhålla konstgräset och vilka utvecklingsstrategier som finns för framtiden. Avsikten med denna delstudie är att gå igenom alla dessa faktorer, med speciellt fokus på att undersöka hur det kommer sig att vissa konstgräsmattor släpper mycket mer (över 50 ggr mer) mikroplaster än andra, vilket observerades i en tidigare studie [Olshammar 2021].

4.2. Miljö- och hälsorisker med konstgräs och mikroplaster

Det finns tre huvudsakliga miljörisker med konstgrässystem: de frigör mikroplaster, bidrar till växthuseffekten och kan innehålla kemikalier. Även damm av kvartssand, vilket används som infill, kan vara skadligt för luftvägarna.

Det är väl känt att inandning av små partiklar, i synnerhet PM 2.5, har möjlighet att penetrera lungorna och tas upp i blodet, vilket kan leda till kardiovaskulära, cerebrovaskulära (stroke) och andningsmässiga komplikationer. Hälsorisker och exponeringsvägar för nano- och mikroplast redogörs utförligt för i en review-artikel av Rahman [Rahman 2021]. Studien visar på möjliga störningar med oxidativ stress, störd metabolism, immunitet, neurotoxicitet, påverkan på reproduktion och canceruppkomst. Hälsoeffekter och toxicitet analyseras också i många andra artiklar [Jiang 2020, Wang 2021a]. Sådan patogenes som visar sig i störd cellfunktion hos försöksdjur ger också ledtrådar till de potentiellt hälsoskadliga effekterna på människan [Kahn 2023]. De samlade hälsoriskerna påverkas bland annat av partiklarnas storlek, koncentration, form, material och exponeringstid, kombinerat med andra miljöfaktorer och recipientens tålighet [Kögel 2020]. Ackumulering av nanoplast i biologisk vävnad har

observerats [Sökmen 2020]. Toxicitet för specifika plastmaterial har nu också börjat studeras systematiskt [Kelpsiene 2022].

Exponering för stendamm som innehåller kristallint kisel kan ge en typ av lungfibros som kallas silikos eller stendammslunga. Arbetstagare skyddas av begränsningar i hur stor exponeringen får vara. Arbetsmiljöverket har beslutat (2018) att nivågränsvärdet för kvartsdamm är 0,1 mg/m3 [AFS 2018]. På utomhusplaner kommer sannolikt varken fotbollsspelare eller anläggningsskötare upp i detta värde, men för inomhushallar är det viktigt att mäta partikelexponeringen och helst helt undvika sand och andra infill inomhus.

Växthusgasutsläpp bidrar global uppvärmning, vilket är väl dokumenterat i exempelvis IPCCs rapporter [IPCC 2023]. Konstgräsmattor är vanligtvis tillverkade av fossil plast, vilket bidrar till växthuseffekten, och även många granulatmaterial har en negativ klimatpåverkan.

Halterna av hälsofarliga kemikalier i nytillverkad plast, såsom polyeten och polypropen, är vanligtvis mycket låga. Arbete med polyuretan (PU) och SRB-latex kräver noggranna arbetsmiljöföreskrifter, tex eftersom isocyanater används vid tillverkning av PU. Detta är dock främst en arbetsmiljöfråga. När limmen har härdat bedöms materialen vara inerta. SBR-gummi från äldre återvunna däck kan innehålla tungmetaller, polycykliska aromatiska kolväten, mjukgörare mm, men exponeringsnivåerna för en genomsnittlig vuxen fotbollsspelare är relativt låga [Murphy 2022]. Övriga granulatmaterial har ännu lägre kemikaliehalter. Biologiskt material som möglar kan medföra exponering av mögelsporer, vilket gör att möglig flis, hö och halm kan leda till allergisk alveolit (inhalationsfeber) [Walters 2023]. Av dessa material är det dock bara flis som har provats på konstgräsplaner och det är inte vanligt förekommande.

4.3. Varför lossnar konstgrässtrån (=mikroplast) lättare från vissa planer?

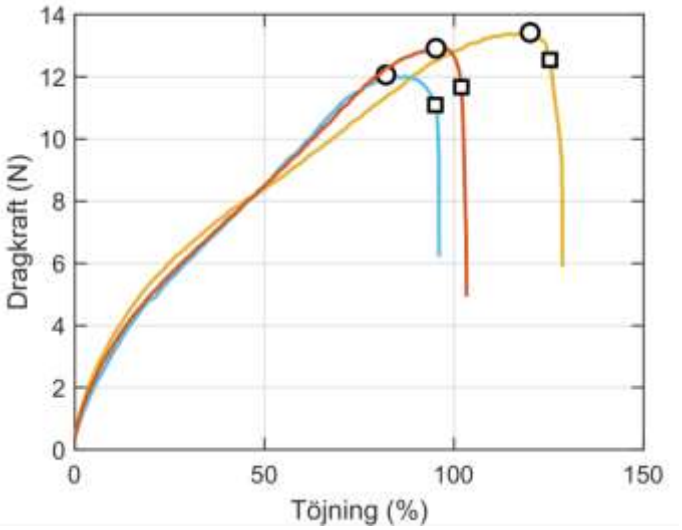
Bakgrund. I mikroplaststudien NV7021 [Olshammar 2021], som genomfördes som ett samarbete mellan KTH, IVL och Sandmaster på uppdrag av Naturvårdsverket, undersöktes hur stora de årliga svenska mikroplastutsläppen är från ytor med gummigranulat och från granulatfria konstgräsplaner. För att kunna göra denna skattning analyserades mikroplasthalterna i tvättvattnet från Sandmasters tvättmaskiner efter att de används för att rengöra olika ytor med konstgräs och gjutet gummigranluat (figur 8). En av de viktigaste slutsatserna var att det är mycket stor skillnad på hur många konstgrässtrån, dvs mikroplaster, som lossnar per kvadratmeter och tvätt mellan olika konstgräsytor. Den sämsta konstgräsmattan släppte 19.0 g/m^2/år, vilket är mer än 50 gånger mer än för de två bästa mattorna som släppte

0.28-0.36 g/m^2/år. Genom att identifiera vad som särskiljer en bra matta från en dålig bör man kunna reducera de potentiella mikroplastutsläppen rejält.

Figur 8. *En tvättmaskin som användes för att tvätta ytor och samla in tvättvatten för analys av mikroplaster i studien "Microplastics from cast rubber granulate and granulate-free artficial grass surfaces"* [Olshammar 2021].

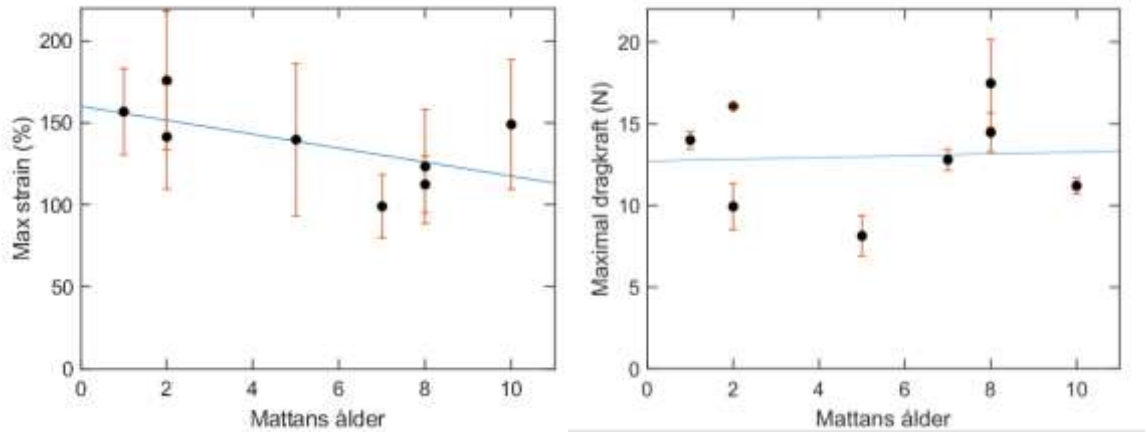
För att försöka besvara frågan gjordes dels intervjuer med ett antal tillverkare och användare av konstgräsplaner och dels fältstudier och experimentell analys av konstgräsmaterial. Huvuddelen av fältstudierna genomfördes i Stockholm på åtta fotbollsplaner med kända anläggningsåldrar. På varje plan mättes (med dynamometer) hur stor dragstyrka som krävdes för att dra loss en gräsfiber från mattan ca 2 decimeter från ytterkanten. För varje matta gjordes 5 mätningar. En handfull grässtrån från varje matta klipptes också loss med sax för att mätas med ett Instron-instrument på KTH, även denna gång med 5 replikat för varje prov. Gräsproven analyserades även med DSC, TGA och SEM.

Instron. I figur 9 visas ett exempel på ett spännings-töjningsdiagram uppmätt med Instron. Resultaten för fem olika konstgrässtrån visas i samma diagram. Den översta punkten i varje kurva är fiberns maximala spänning, vilket har markerats med cirklar i figuren. Brott-töjningen för de fem proverna har markerats med fyrkanter. Det är en viss spridning i data, men inte mer än vad som kan anses vara acceptabelt. Fint sandpapper användes på mätuppställningens klämmor för att undvika att de korta och hala grässtråna skulle riskera att glida loss från sina fästpunkter.



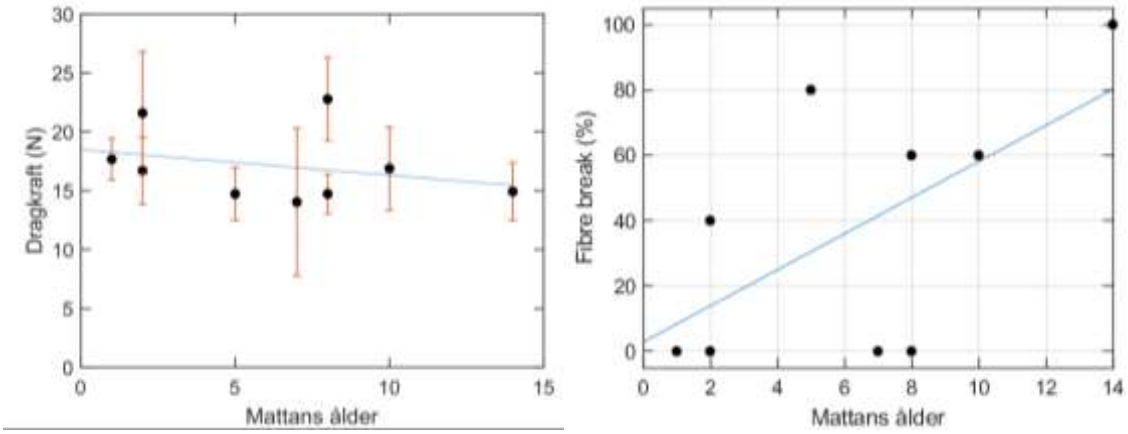
Figur 9. *Ett typiskt spännings-töjningsdiagram från Instron-apparaten. Tre grässtrån från samma plan har plottats i samma graf. Den maximala spänningen markeras med cirklar medan brottöjningen markeras med fyrkanter.*

Resultaten från Instron-mätningarna har sammanfattats i figur 10, där den maximala töjningen och den maximala spänningen har plottats mot konstgräsmattans ålder. Båda egenskaperna verkar minska något med ökande ålder hos mattan, men sambandet är inte särskilt starkt och det är ganska stor spridning i data. Det går inte att avgöra om orsaken till att de äldre mattorna har lägre draghållfasthet är att mattorna åldrats eller om produktutvecklingen helt enkelt gjort att materialet i konstgrässtråna idag är bättre än tidigare. Sannolikt inverkar båda dessa två förklaringsmodeller åtminstone i någon mån. Notera att det är positivt att konstgräsfibrernas mekaniska hållbarhet inte sjunker alltför mycket med mattans ålder, eftersom det är en indikation på att mattornas livslängd är lång och att de inte behöver bytas ut alltför ofta. En lång livslängd på konstgrässystemen är bra både för ekonomin och för miljön.



Figur 10 *Instron.* ***(a)*** *Maximal töjning och* ***(b)*** *maximal spänning (dragkraft) som funktion av mattans ålder. Den maximala töjningen minskar med fiberns ålder men den maximala spänningen förblir i princip konstant.*

Dynamometer. Mätningarna som gjordes med dynameter direkt på planerna sammanfattas i figur 11. Den maximala dragkraften som behövdes för att dra av konstgrässtråna eller dra loss dem från backingen var relativt konstant som funktion av tid och storleksordningen på värdena överensstämde med värdena från Instron, dvs ca runt 15 Pa. För de äldre mattorna var det ofta själva grässtråna som gick av medan grässtråna i de nyare mattorna var betydligt hållbarare och istället långsamt drogs loss från backingen. Det krävdes alltså sammanlagt mer energi för att ta loss stråna från de nyare mattorna trots att den maximala spänningen var approximativt samma som för de äldre. Inte i någon av mätningarna lossnade stråna anmärkningsvärt lätt, vilket tyder på att det bara är en mindre fraktion av fibrerna som sitter löst även i mattor med relativt hög andel löst sittande fibrer. Noterbart är också att det under fältförsöken gick att hitta små sammanhållna buntar med konstgräsfibrer även vid relativt nyanlagda planer. Det indikerar att en god infästning av konstgrässtråna i mattan är centralt för att det inte ska lossna strån också från nyanlagda konstgrässystem.

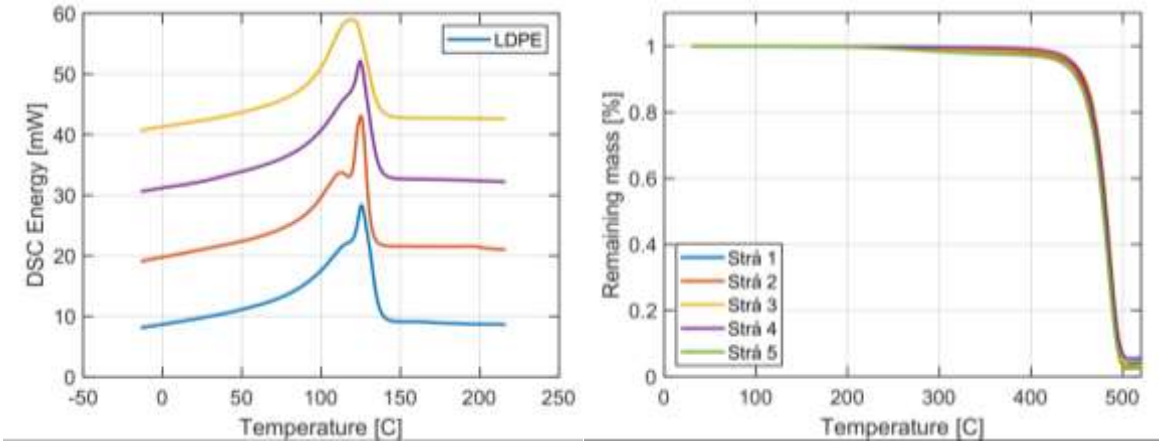


Figur 11. *Dynamometer.* ***(a)*** *Maximal spänning (dragkraft) och* ***(b)*** *andel fibrer som går av i stället för att lossna från mattan, som funktion av mattans ålder. Den maximala spänningen var relativt konstant men andelen fibrer som gick av ökade med mattans ålder.*

DSC. Konstgrässtrån från de åtta utvalda planerna analyserades med DSC för att undersöka skillnaderna mellan materialen, se Fig 12a. De tre översta DSC-kurvorna är för konstgrässtrån från tre representativa konstgräsplaner, medan den understa referenskurvan är ren LDPE från

plastad sand. Referenskurvan har en enda DSC-topp och ser som förväntat ut som en standardkurva för LDPE [Nilsson 2021, Soroudi 2022]. Kurvorna för konstgrässtråna verkar däremot vara sammansatta av två toppar, en topp som sammanfaller med den för LDPE och en topp vid något högre temperatur. Det tyder på att stråna är sammansatta av två sorters polyeten (PE) med något olika molvikter, vilket var lite överraskande eftersom de flesta av dagens konstgräsfibrer sägs bestå av ren (linjär) LDPE. Det är inte ett stort bekymmer, men kan vid återvinning på marginalen påverka kvaliteten av det återvunna materialet.

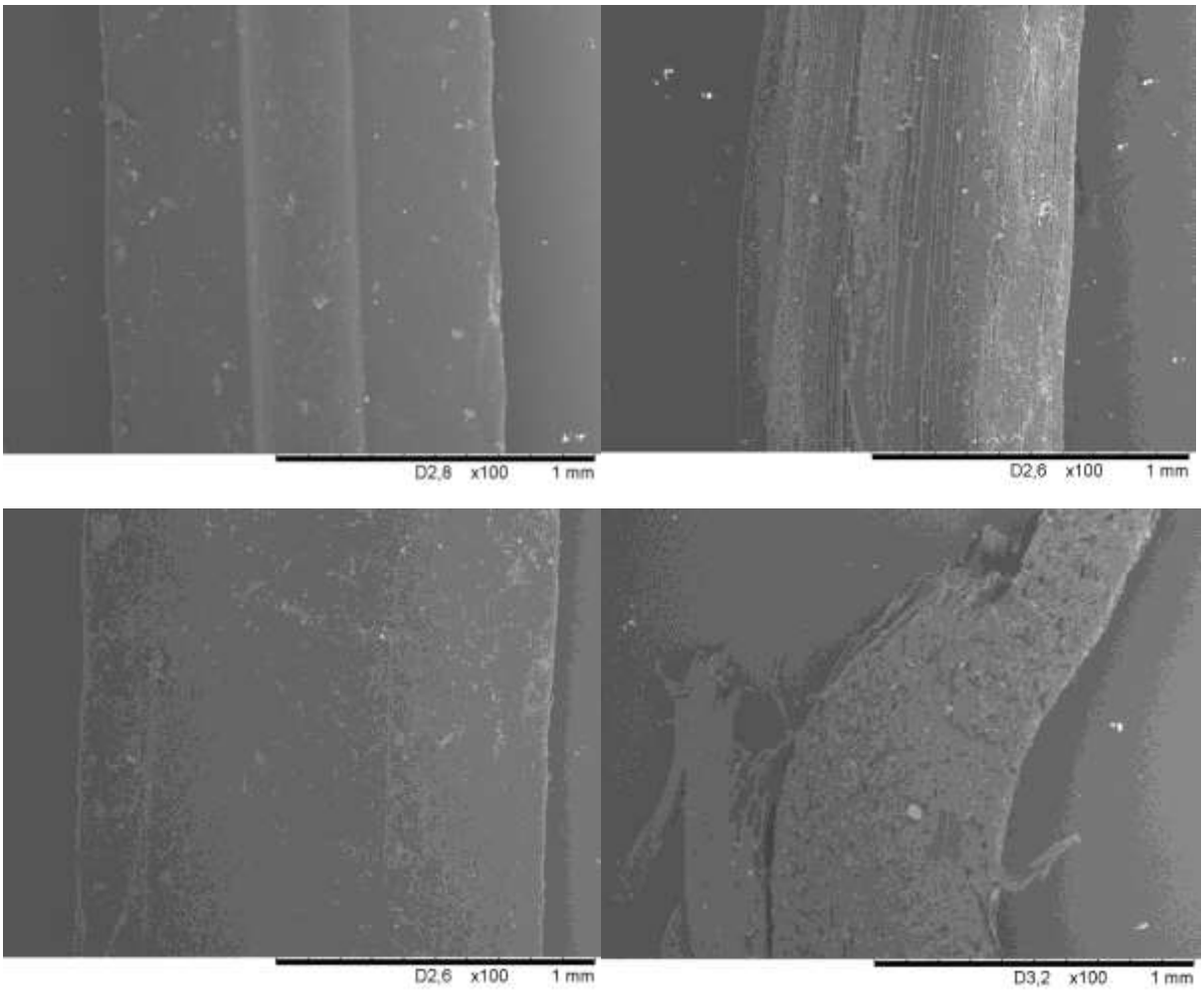
TGA. Termogravimetrisk analys av konstgrässtrån från fyra representativa mattor genomfördes och resultaten presenteras i Fig 12b. Det framgår av figuren att materialet i alla testade konstgrässtrån har approximativt samma smälttemperatur, vilket bekräftar att alla strån består av approximativt samma material (LDPE) och sålunda har likartade termiska egenskaper. Alla kurvor utom en går som förväntat mot noll vid mycket höga temperaturer (över 500 ^{o}C), men den sista kurvan stannar på ca 3-4 % kvarvarande massa även vid mycket höga temperaturer. Detta skulle antingen kunna innebära att materialet innehåller några procent oorganiska fyllmedel eller att några sandkorn oplanerat följt med i provet.



Figur 12. *Termisk analys av konstgräsfibrer.* ***(a)*** *DSC,* ***(b)*** *TGA.*

SEM och okulär besiktning. Mikroskopi med SEM visar att ytstrukturen på olika konstgrässtrån skiljer sig ganska mycket åt, vilket kan påverka strånas hållbarhet (Figur 13). Vissa grässtrån har exempelvis en tydlig kärna medan andra är slätare och mer homogena. När fibrerna går till brott syns tydligt att materialet i närheten av brottet också tydligt deformeras.

Visuell jämförelse mellan nytillverkat konstgräs, konstgräs som använts tillsammans med mjuka granulat (i detta fall plastad sand) och konstgräs med bara sandinfill visar tydligt att sanden ruggar upp ytan på konstgräsfibrerna (figur 14). Detta riskerar att förkorta fibrernas livslängd och skulle även kunna leda till att mikroplaster frigörs.



Figur 13. *SEM-bilder med 100 ggr förstorning för fyra olika konstgrässtrån. Den första bilden visar ett konstgrässtrå med en tydlig kärna medan de två mellersta stråna har slätare ytstruktur. Den sista bilden visar en brottyta för en fiber som slitits av.*

Figur 14. *Foton från Unisport. (a) Nytt konstgräs, (b) åldrat konstgräs som används tillsammans med plastad sand, (c) åldrat konstgräs som använts tillsammans med vanlig sand. Det syns tydligt att den vanliga sanden nöter mer på konstgrässtråna, vilket kan förkorta mattans livslängd och öka risken för mikroplastspridning av avnötta plastfragment.*

När man undersöker baksidorna på olika konstgräsplaner som varit i bruk en längre tid kan man ofta observera att undersidan av backingen börjar krackelera, vilket garanterat leder till att konstgrässtråna inte längre fäster lika väl i mattan (figur 15). Även om de mekaniska testerna inte visade en särskilt tydlig effekt av mattans ålder kan man ändå förutsätta att detta är en viktig faktor som påverkar hur lätt fibrerna lossnar och hur stora mikroplastutsläppen blir.

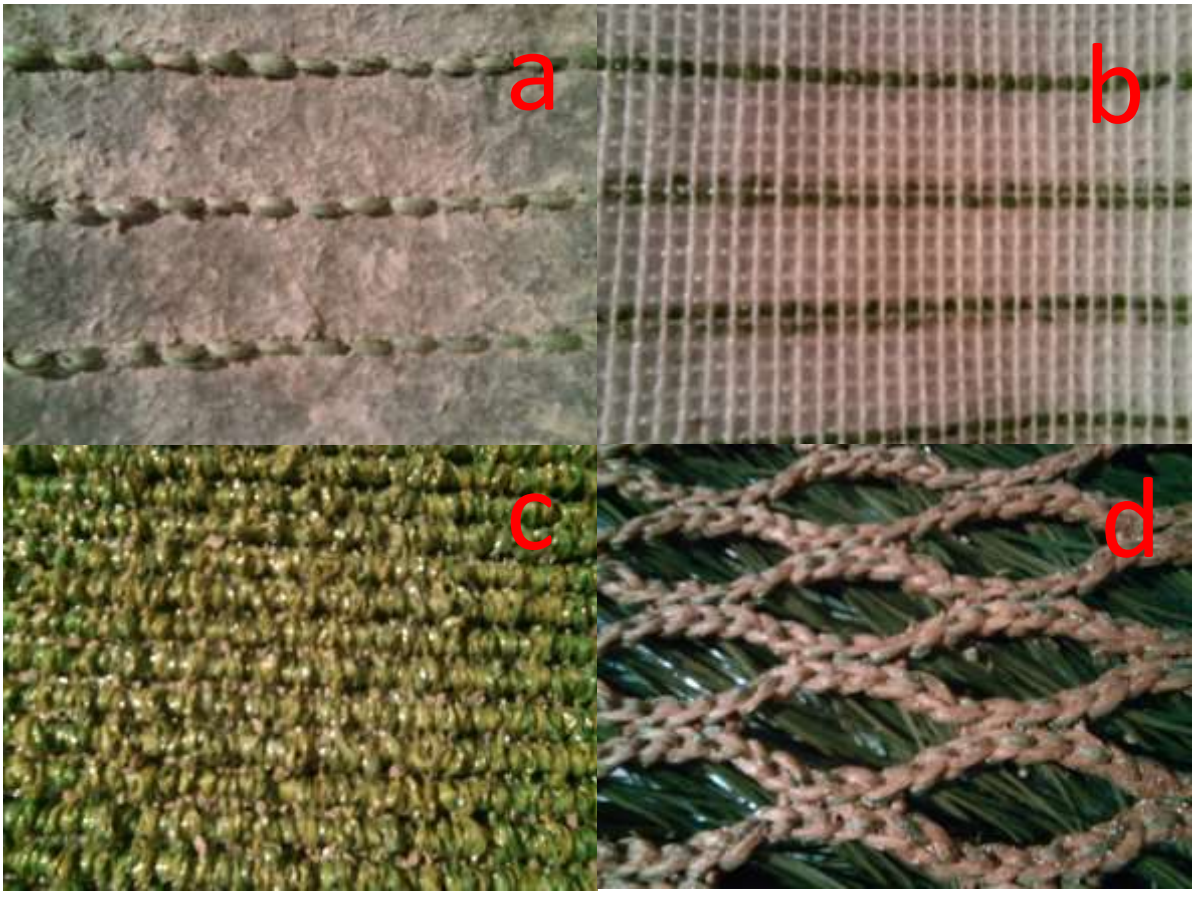
Det finns flera olika sätt att fästa grässtråna i mattan (figur 16-17) och med allra största sannolikhet har valet av infästningsmetod en mycket stor påverka på hur lätt fibrer lossnar från mattan. Ofta buntas en handfull (6-10) konstgrässtrån (filament) ihop till en bunt (bundle) som antingen kan sammanbindas med bindgarn (wrappingtråd) av tex Nylon (polyamid) eller tvinnas ihop (figur 18). En normal fullstor fotbollsplan kräver ca 300-500 kg bindgarn. Tvinnade fibrer får sannolikt förbättrad mekanisk hållbarhet, bland annat eftersom tvinningen underlättar god limkontakt mellan fibrerna, men sådana system blir också något dyrare.

Buntarna med konstgräsfilament kan sedan antingen sys fast i en backing-matta av tex polypropen (PP) (Fig 16a-c) eller virkas ihop (Fig 16d). Valet av teknik för att sy eller virka samman konstgrässtråna har garanterat betydande inverkan på mattans hållbarhet både på lång och kort sikt. Exempelvis är det sannolikt att kort stygnlängd eller mer avancerade och innovativa sy- och vävmönster skulle kunna göra att filamenterna sammanfogas starkare.

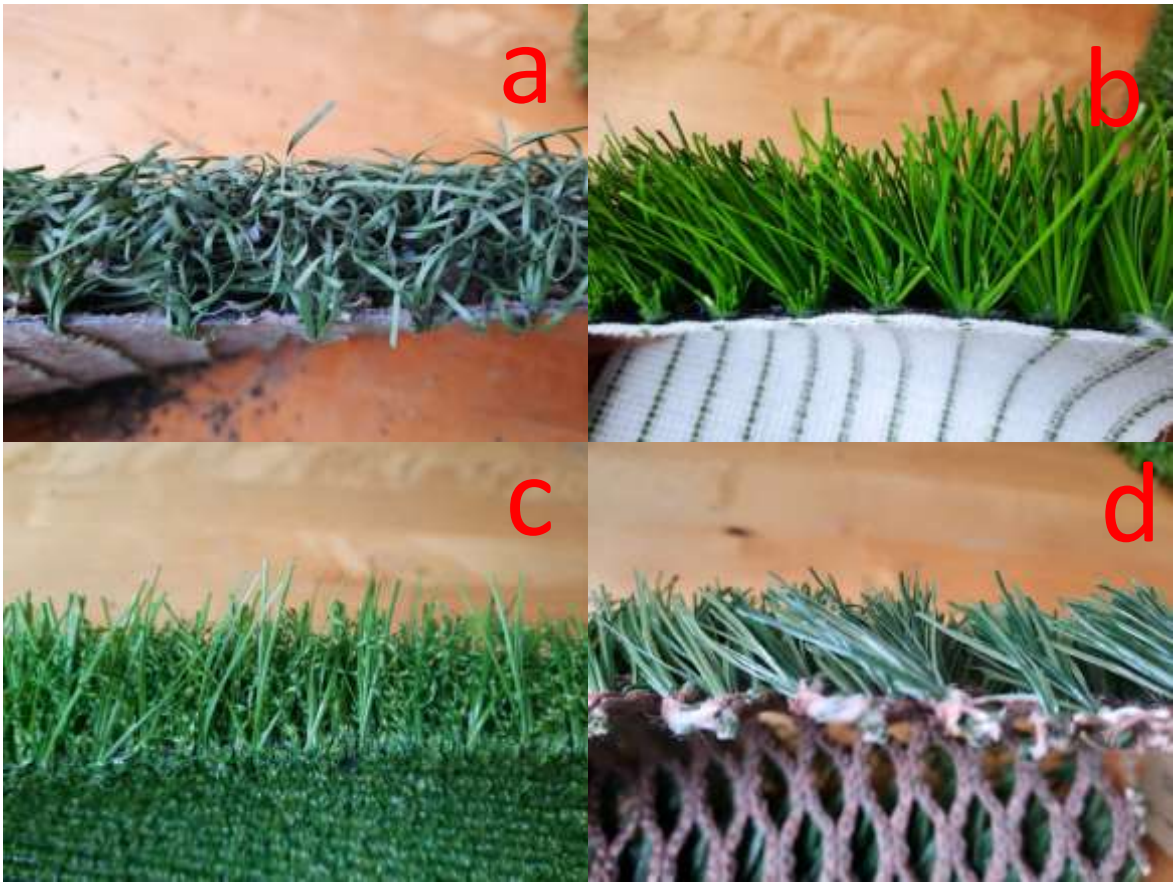
Backingmattan, alternativt mattans virkade undersida, brukar sedan limmas med antingen SBR-Latex (som inte ska förväxlas med naturlatex=naturgummi!) eller med polyuretan (PU) i syfte att limma fast grässtråna ordentligt i mattan och hålla allt på plats. På senare tid har det också kommit mattor med ett undre backing-lager av LDPE där konstgrässtråna, som också är av LDPE, smälts fast i underlaget istället för att limmas fast. Beroende på materialval för backingens undersida kommer stråna att sitta mer eller mindre hårt fast i mattan.

Exempel på olika konstgrässystem i genomskärning från sidan visas i figur 17 och i figur 18 visas exempel på 3G- och 4G-konstgräsmattor sida vid sida.

Figur 15. *Foton av baksidan av två konstgräsmattor,* ***(a)*** *en i bruk och* ***(b)*** *en som kasserats av åldersskäl. Det framgår tydligt att coatingen på mattans backingen har börjat brytas ned, vilket leder till att konstgrässtråna inte längre sitter fast lika hårt i mattan.*



Figur 16. *Baksidan av fyra olika konstgräsmattor. (a) sydd äldre matta med infill, (b) sydd ny matta med infill, (c) sydd ny matta utan infill, (d) stickad ny matta med infill.*



Figur 17. *Vy från sidan av fyra olika konstgräsmattor. (a) sydd äldre matta med infill, (b) sydd ny matta med infill, (c) sydd ny matta utan infill, (d) stickad ny matta med infill.*

Figur 18. (a) *Ett 3G-konstgräs där man ser bindgarn som håller fast buntar med 6-10 långa raka konstgrässtrån.* ***(b)*** *Ett 4G konstgräs, där konstgräsmattan är betydligt tätare packad än 3G mattan och har både raka och böjda grässtrån.*

Intervjuer. Samtal med tillverkare, kommuner, planförvaltare och idrottsförbund har lett till ökad kunskap om vilka faktorer som påverkar spridningen av mikroplaster från själva konstgräsmattan. Dels påverkar mattans konstruktion och dels påverkar mattans installation, skötsel och underhåll. Rent generellt har alla jag samtalat med varit oerhört hjälpsamma och det är tydligt att hela branschen gemensamt strävar mot att uppnå gradvis mer miljövänliga konstgräsmaterial med bibehållen spelkvalitet. En stor eloge för detta till alla som bidragit till studien!

Det finns 3-4 komponenter i konstgräs, utöver eventuellt infill, och alla dessa kan påverka mattans hållbarhet och potentiellt förklara varför strån släpper från mattan. Komponenterna är (1) konstgrässtråna, (2) backingen, (3) undersidan av backingen och (4) eventuellt bindgarn. Konstgräsfibrerna består vanligtvis av polyeten (PE) och en god kvalitet på PE-materialet ger stråna med bättre hållbarhet. Det som främst kan försämra strånas materialegenskaper är om materialen har bristande UV-stabilitet, vilket ökar risken för att stråna splittras och förkortar mattans livslängd. Grässtråna profil påverkar förstås också deras mekaniska egenskaper. Backingen består ofta av polypropen + lim. I normalfallet är det antagligen inte denna primära backing som är den svagaste länken i systemet. Baksidan av backingen, som är till för att limma fast stråna i mattan och hålla allt på plats, består oftast av SBR-Latex eller polyuretan (PU), men polyeten förekommer också. Enligt laboratorierapporter som UNISPORT låtit beställa från oberoende FIFA-ackrediterade testningsinstitut har PU 36% - 116% bättre värden på fiberlås- och skarvstyrka jämfört med SBR-latex, med störst skillnad för prover som åldrats i vatten [Unisport 2022]. PU-backing möjliggör också att mattan smälts till ny plast utan komponentsseparering [Unisport 2022], men egenskaperna hos den återvunna plasten försämras jämfört med nytillverkad polyeten. LDPE-backing som smälts samman med LDPE-grässtrån borde i teorin ge god mekanisk hållfasthet, men materialkombinationens fulla potential har sannolikt ännu inte uppnåtts i dagens produkter. Bindgarn, vars syfte är att bunta ihop 6-10 fiber till en tråd som sedan sys in i mattan, kan bidra till mikroplastspridning om det lossnar från mattan. Ett annat alternativ är att tvinna fibrerna för att slippa bindgarnet, vilket är något dyrare men ger enligt laboratorietester [Unisport 2022] bättre mekanisk hållbarhet.

Anläggning, drift och underhåll av konstgrässystemen påverkar också i mycket hög grad mattans livslängd och hur lätt konstgrässtrån/mikroplaster som lossnar från den. Ett bra dräneringsskikt under mattan och en plan med lagom lutning och goda avrinningsmöjligheter minskar risken att vatten ansamlas på planen. God dränering minskar slitaget på backing-coatingen, reducerar risken att lätta granulat (tex kork) flyter bort vid kraftigt regn och minskar med isbildning, vilket annars ger onödigt hårda och hala ytor på vintern. Om annat infill än

gummigranulat används behövs ett tjockare stötdämpande skikt under mattan. När alla markeringslinjer på en ny konstgräsmatta har skurits ut och fixats till bör mattan tvättas för att få bort alla lösa fibrer. Om sand används som infill i systemet är det viktigt att använda bra sand som inte klumpar sig, dvs tvättad, rundkorning, jämnstor natursand med medelstora sandkorn. Genom att tvätta bort de minsta sandkornen ökas sandens porositet, vilket ökar dess dräneringsförmåga. Sanden skall borstas ned noggrant enligt konstens alla regler i mattan och fördelas jämnt över planen. Även eventuella granulat ska fördelas jämnt över ytan vid anläggning av planen. Vid drift av konstgräsplaner med infill behöver sanden och granulatet regelbundet borstas så att infillet förblir jämnt fördelat över planens hela yta (figur 19). När man borstat planen bör borsten rengöras från lösa mikroplaster. Någon gång per säsong bör sanden och granulatet dessutom luckras upp för att undvika att det kompakteras alltför mycket. För planer med gummigranulat eller andra granulat som kan generera mikroplaster är det extra viktigt att följa svenska fotbollsförbundets guide för underhåll av konstgräsplaner, vilken bland annat rekommenderar användning av skoborstar (figur 20) och att planen omgärdas av en sarg och/eller galler som minskar spridning av mikroplaster respektive gör det svårare för obehöriga att komma in på planen. Snöröjning av konstgräsplaner med granulat bör helst undvikas helt eftersom det sliter mycket på underlaget, men om det ändå genomförs bör snön tippas på mattan så att granulaten återförs till mattan när snön smälter. Det finns mattor som är specialanpassade för att var extra tåliga mot snöröjning och andra yttre mekaniska påfrestningar. Om man har löst plastskräp, tex uppsamlade lösa konstgräsfibrer, bör det förvaras i låsbara kärl (tex containrar) så att det inte sprids med vinden. Det finns många ytterligare råd om hur man anlägger, driver och underhåller konstgräsplaner sammanställda i guider av bland annat svenska fotbollsförbundet. [SVFF 2020, ESTC 2023, Magnusson 2020].

Figur 19. *En maskin som används för att underhålla konstgräsplaner.*

Figur 20. *Skoborstar för att borsta gummigranulat från skorna innan man lämnar planen.*

Slutsatser och rekommendationer för att undvika att grässtrån lossnar från mattan:

- Bristande konstgräskvalitet och UV-skydd leder till att stråna åldras snabbare.
- Fysikalisk åldring av mattans material sker alltid i någon mån, och på äldre planer går stråna oftare av.
- På äldre planer går stråna oftare av, eftersom materialet åldras och blir skörare.
- Då även nya konstgräsplaner kan ha lösa fibrer rekommenderas tvättning efter anläggning.
- Infill med sand ger en sandpapperseffekt som förkortar strånas livslängd.
- Polyuretan-coating är enligt laboratorietest mekaniskt hållbarare än SBR-latex.
- LDPE-coating kan vara hållbart, men tekniken kan utvecklas mer.
- Långvarig vattenexponering kan luckra upp coatingen, särskilt för SBR-latex.
- Bindgarn och infästning av konstfibrer i mattan kan vara svaga punkter.
- Att tvinna stråna istället för att använda bindgarn kan ge starkare konstgräs.
- Valet av infästningsmetod är centralt och tekniken kan förbättra ytterligare.
- Lagom mängd sand/fyllmedel måste användas, annars viks och skjuvas stråna.
- Fel sand, som inte är tvättad, rundkornig, medelstor och homogen, klumpar sig.
- Bristande underhåll förkortar livslängden. Borsta, luckra upp och fördela infill!

4.4. Rekommendationer för konstruktion, materialval och underhåll av planer

Konstgrässystem för fotboll och annan idrott måste uppfylla många kriterier: de ska ge tillräckligt god spelkvalitet, inte generera onödiga mikroplaster, inte bidra för mycket till växthuseffekten, inte innehålla farliga kemikalier, ha maximalt lång livslängd, inte leda till avskogning, vattenbrist eller livsmedelsbrist och dessutom vara billiga. Nedan sammanfattas några råd för materialval, konstruktion och underhåll av konstgrässystem som kan bidra till ökad klarhet i hur man kan uppnå dessa ibland motstridiga kriterier. Råden är baserade på information som framkommit under studiens gång, men alla gör inte samma bedömningar.

Materialval

- Konstgräsmaterial med hög kvalitet och lång livslängd minskar klimatavtrycket.
- Säkerställ att grässtråna sitter fast ordentligt infästa i backingen.
- Backing-coating av polyuretan är stabilare och vattentåligare än SBR-latex och LDPE.
- Tvinning av konstgräsknippen verkar stabilare än användning av bindgarn.
- Infästningen av konstgräset i mattan är central och sy-/virktekniken bör optimeras.
- Använd om möjligt återvunnen råvara och/eller återvinningsbara material.
- Återvunnen råvara av tex polyten/polypropen reducerar utsläppen med ca 2/3.
- Eftersträva på sikt system som går att separera till lättåtervunna monomaterial.
- Ren polyeten och polypropen är lätt att återvinna om den inte är förorenad.
- Materialåtervinning bäst om 95 % är huvudmaterial och <5 % kompatibel plast.
- Även mattor med tex polyeten + polypropen + polyuretan går att smälta till ny plast.
- Sand och biomaterial såsom kokos, oliv kork och flis ger låga växthusutsläpp.
- Sand bör vara rund (havssand), tvättad, jämstor, medelstor och återvinnas efteråt.
- Sand-infill kan öka nötningen på konstgräsfibrerna.
- Granulat av oprocessade naturmaterial (tex kork eller kokos) ger inga mikroplaster.
- Korkgranulat verkar mest lovande av dagens material, men tillgången är begränsad.
- Infillsfritt 4G konstgräs kan på sikt vara en bra lösning ur mikroplastsynpunkt.
- Alla granulat som innehåller processade polymer kommer antagligen förbjudas.
- Bioplaster, LDPE-coatad sand och kompositmaterial med bindmedel riskerar förbud.
- Använd bara nedbrytbar bioplast som bryts ned i naturen (ej bara i kompost).
- Polymerbeklädd sand innehåller bara lite plast men den kan lossna och bilda damm.
- Undvik sand-infill och plastad sand inomhus. Kontrollera luftkvaliteten.
- Stötdämpningslagret under mattan bör vara lättåtervunnet och av återvunnet material.

Konstruktion (omgivning, underlag och utformning)

- God dränering säkerställs med stabilt dräneringsunderlag, tex stenkross / stendamm.
- Planera konstgrässystemet så att det går lätt att reparera eventuella skador.
- Planera systemet så att det går lätt att reparera och återvinna/återanvända efteråt.
- Undvik att gräsytan står under vatten, med hjälp av dränering, planering och lutning.
- Borsta ned rätt mängd av rätt sorts sand i mattan och fördela den väl.
- Dagvattenbrunnar nära planer kan förses med granulatfällor som töms regelbundet.
- En dräneringsduk kan läggas under ytan för dränering och uppsamling av mikroplast.
- Omgärda gräsplanen med någon form av sarg för att hindra spridning av mikroplaster.
- Ordna stationer för avsopning av granulat, i synnerhet om det är gummi/plastgranulat.
- Följ Svenska fotbollsförbundets guider [SVFF 2020]!

Underhåll

- Utarbeta en underhållsplan tillsammans med leverantören.
- Borsta planen regelbundet och fördela sand/infill över ytan (ca 1-2 ggr/vecka).
- Luckra upp planens sand och granulat då och då (1-2 gånger / säsong)
- Kontrollera planen regelbundet för att snabbt lokalisera skador. (3-10 ggr/säsong)
- Reparera eventuella skador så fort som möjligt innan de förvärras.
- Plogning och snöröjning av konstgräsytor bör helst undvikas, men om det ändå görs bör snö tippas i utkanten av planen så att granulaten hamnar på planen vid smältning.
- Töm eventuella mikroplastfilter regelbundet, minst varje säsong men troligen oftare.
- Följ Svenska fotbollsförbundets guider [SVFF 2020]!

5. Slutsatser och rekommendationer

Studiens huvudresultat kan sammanfattas med nedanstående rekommendationer:

- **För inomhusplaner:** Eftersträva infillsfritt konstgräs eller mät partikelhalten i luften.
- **För breddplaner utomhus:** Eftersträva infillsfritt eller infill med sand/biomaterial.
- **För elitplaner utomhus:** Eftersträva infillsfritt eller korkgranulat.
- **För planer med annat infill:** Minimera spridningen av granulat med skyddsåtgärder.
- **För sviktpad:** Använd återvunnet återvinningsbart material och ha god dränering.
- **För framtida upphandlingar:** Uppmuntra produkter med lång livslängd som inte släpper konstgräsfibrer, består av återvunnet material och går lätt att separera till monomaterial som kan återvinnas mekaniskt med begränsad kvalitetsförlust. Om monomaterial används, betänk att limmet till skarvarna bör vara av samma material.
- **För att minimera lösa konstgräsfibrer** bör hållbar backing-coating av tex polyuretan användas, knippen av gräsfibrer bör buntas ihop ordentligt tex genom att tvinnas och fiberknippena bör sys/virkas fast så hårt som möjligt i backingen. Både materialval, konstruktion, anläggning och underhåll av konstgräsmattan påverkar hur mycket konstgräsfibrer/mikroplaster den släpper. Följ ESCS och SVFFs underhållsmanualer.

6. Tacklista.

Naturvårdsverket och BEKOGR tackas storligen för finansieringen av projekten NV-08169-21 och NV-08170-21 som slutrapporteras i denna rapport. Unisport tackas för tillgång till mätdata och foton på konstgräs. (Övriga bilder är antingen egenproducerade eller open access.) Alla företrädare för konstgrästillverkare, kommuner, myndigheter, fotbollsförbund, anläggningsägare, akademi, återvinningsföretag, konstgräsnätverk, politiker och andra intressenter som jag samtalat med under projektets gång tackas för all input och goda råd. Tillsammans kan vi hjälpas åt att bidra till ännu mer miljövänliga idrottsanläggningar med fortsatt goda spelmöjligheter.

7. Referenser

[Baensch-Baltruschat 2020] Baensch-Baltruschat B, Kocher B, Stock F, Reifferscheid G. Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. Science of the total Environment 733:137823 (2020).

[AFS 2018] AFS. Hygieniska gränsvärden. Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om hygieniska gränsvärden. AFS 2018.1. (2018).

[Andersson 2017] Andersson A, Burstöm J, Dahlstrand G, Lavenius A, Lidbeck O, Trojanowski W. Jämförelse av alternativa fyllnadsmaterial till konstgräsplaner. Självständigt arbete i miljö- och vattenteknik 15 hp. (2017).

[Arkitekten 2019] https://arkitekten.se/nyheter/miljovanlig-utfyllnad-av-konstgrasplaner-fungerade-inte/ Besökt 2023-03-22.

[Bahl 2021] Bahl S, Dolma J, Singh JJ, Sehgal S. Biodegradation of plastics: A state of the art review. Materials Today: Proceedings 39: 31-34 (2021).

[Bauer 2018] Bauer B, Egebæk K, Aare AK . ”Environmentally friendly substitute products for rubber granulates as infill for artificial turf fields.” PlanMiljø ApS.M-955|2018. (2018)

[Bauer 2018] Bauer B, Egebaek K, Aare AK. Environmentally friendly substitute products for rubber granulates as infill for artificial turf fields. Norska miljöinstitutet, report M-955 (2018).

[Bleyer 2018] Bleyer A, Keegan T. Incidence of malignant lymphoma in adolescents and young adults in the 58 counties of California with varying synthetic turf field density. Cancer epidemiology 53:129-136 (2018).

[Brydson 2016] Brydson J. Plastics Materials, 8th ed. Elsevier 2016.

[Brännström 2022] Brännström S, Lydig SG, lidfeldt M, Mawdsley I, Strömberg E, Rydberg T. Från bioråvara till plast- nuälge och trender. IVL-rapport C653. (2022)

[Bylina 2022] Bylina BG, Rakwic B, Slupik BS. Tests of rubber granules used as artificial turf for football fields in terms of toxicity to human health and the environment. Scientific reports 12:6683 (2022).

[Cedervall 2023] Hua J, Ekvall MT, Lundqvist M, Cedervall T. Tekniskt rapport. https://bekogr.se/wp-content/uploads/2023/03/Slutrapport-PM-final.pdf. (2023)

[Cedervall 2022] Hua J, Ekvall MT, Lundqvist M, Cedervall T. Environmental impact of nanoplastics from fragmentized consumer plastics. Naturvårdsverket forskning, Tekniskt rapport. (2022).

[Chen 2020] Chen X, Yan N. A brief overview of renewable plastics. Materials today sustainability 7-8:100031 (2020).

[Composting 2019] European bioplastics. Fact sheet nov 2009 – industrial composting. (2009)

[Danielski 2021] Danielski I. ”The development of artificial turf in Swedish football fields - From the perspective of different stakeholders”. Mistra Sport & Outdoors Rapport 2021:4” (2021)

[Deroine 2014] Deoine M, Le Duigou AL, Corre YM, LeGac PY, Davies P, Cesar G, Bruzaud S. Accellerated ageing of polylactide in aqueous environments: Comparative study between distilled water and seawater. Polymer degradation and stability 108 (2014) 319-329. (2014).

[Ecoloop 2019] Ragnsell Ecoloop, Mikroplastspridning från en modernt utformad konstgräsplan med skyddsåtgärder- fallstudie Bergaviks IP, Kalmar. Teknisk rapport (2019)

[Ecorub 2023] https://www.ecorub.se/produkter/ Nedladdad 2023-03-21.

[ECHA 2021] ECHA. ANNEX XVII TO REACH – Conditions of restriction. Entry 50 - Polycyclic-aromatic hydrocarbons (PAH). (2021).

[ECHA 2023] https://echa.europa.eu/hot-topics/microplastics. Retrieved 20230321.

[ECHA 2019] ECHA. ANNEX XV restriction report. Proposal for a restriction. Restricting the use of intentionally added microplastic particles to consumer or professional use products of any kind. (2019).

[ECHA 2017] European Chemicals Agency (ECHA). An evaluation of the possible health risks of recycled rubber granulates used as infill in synthetic turf sports fields.

[ESTC 2023] https://www.estc.info/. Besökt 2023-03-22-

[EU 2009] Europeiska Unionen. Europaparlamentets och rådets direktiv 2009/48/EG om leksakers säkerhet. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0048&from=SV. (2009).

[EU-kommissionen 2023] COMMISSION REGULATION (EU) …/… of XXX amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards synthetic polymer microparticles. (2023) Nedladdad 2023-04-19.

[EPA 2019] United States Environmental Protection agency (EPA). Synthetic Turf Field Recycled Tire Crumb Rubber Research Under the Federal Research Action Plan. Report EPA/600/R-19/051.2. (2019).

[Gedde 2019] Gedde UW, Hedenqvist M. Fundamental Polymer Science, 2’nd ed. Springer 2019.

[Gedde 2020] Gedde UW, Hedenqvist M, Nilsson F, Hakkarainen M, Das O. Applied Polymer Science. Springer (2020).

[Gomes 2021] Gomes FO, Rocha MR, Alves A, Ratola N. A review of potentially harmful chemicals in crumb rubber used in synthetic football pitches. Journal of hazardous materials 409:124998 (2021).

[Göthe 2022] Göthe L, Losman M. Kunskapssammanställning konstgräs och fallskyddsgummi. Naturvårdsverket (2022).

[Ho 1999] Ho KLG, Pometto AL, Hinz PN. Effects of temperature and relative humidity on polylactic acid plastic degradation. Journal of environmental polymer degradation 7(2) (1999)

[Huang 2020] Huang D, Hu ZD, Liu TY, Lu B, Zhen ZC, Wang GX, Ji JH. Seawater degradation by water soluble PVA. E-Polymers 2020(20):759-772. (2020)

[IPCC 2023] Hoesung Le et al.IPCC AR6 SYR. Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6). Summary for policy makers. 2023.

[Itten 2021] Itten R, Glauser L, Stucki M. ”Life Cycle Assessment of Artificial and Natural Turf Sports Fields - Executive Summary.” Life Sciences and Facility Management. ZHAW Institute of Natural Resource Sciences. (2021)

[Jiang 2020] Jiang B, Kauffman AE, Li L, McFee W, Cai B, Winstein J, Lead JR, Chatterjee S, Scott GI, Xiao S. Health impacts of environmental contamination of micro- and nanoplastics: a review. Environmental Health and Preventive Medicine 24:29 (2020).

[Johansson 2018] Johansson K. Life-cycle assessment of two end of life tyre applications -: artificial turfs and asphalt rubber. Ragn-sells däckåtervining AB.

[Kaal 2019] Kaal M, Holgersson P, Hammar M, Näätsaari A, Carlsson MT, Siemers U, Trossholmen T, Torring M, Oxfall H, Jansson A. ”Optimal hantering av konstgräsmattor.” Hifab AB, RE:Source, projektnummer 47562-1. (2019)

[Kahn 2023] Khan, A.; Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. iScience 2023, 26, 106061, doi:10.1016/j.isci.2023.106061. 2023, 23, 85-91, doi:10.1097/aci.0000000000000894.

[Kelpsiene 2022] Kelpsiene E, Ekvall M, Lundqvist M, Torstensson O, Hua J, Cedervall T. Review of exotoxicological studies of widely used polystyrene nanparticles. Environmental Science processes & impacts 2022, 24,8. (2022).

[KEMI 2019] Kemikalieinspektionen (KEMI). Kort om regler för kemikalier i leksaker. https://www.kemi.se/download/18.60cca3b41708a8aecdbbe8ed/1586959440088/faktablad-regler-for-kemikalier-i-leksaker.pdf, (2019).

[KEMI 2006] Kemikalieinspektionen. Konstgräs ur ett Kemikalieperspektiv – en lägesrapport. (2006)

[KEMI 2023] https://www.kemi.se/kemiska-amnen-och-material/konstgrasplaner-och-fallskydd. Nedladdad 2023-04-19.

[Kole 2017] Kole PJ, Löhr AJ, van Belleghem FGAJ, Ragas AMJ. Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. International Journal of Environmental Research and Public Health 14:1265, (2017).

[Konstgräsguiden 2021] Konstgräsguiden – Miljö och material aspekter vid val av konstgräsplan. Teknisk rapport av RISE och BEKOGR. (2021). .

[Krång 2019] Krång AS, Olshammar M, Edlund D, Hållén J, Stenfors E, von Friesen LW. Sammanställning av kunskap och åtgärdsförslag för att minska spridning av mikroplast från konstgräsplaner och andra utomhusanläggningar för idrott och lek. Svenska Miljöinstitutet IVL, rapport C359, (2019).

[Krüger 2013] Krüger O, Kalbe U, Richter E, Egeler P, Römbke J, Berger W. New approach to the ecotoxicological risk assessment of artificial outdoor sporting grounds. Environmental pollution 175:69-74 (2013).

[Kubota 2022] Kubota R, Obama T, Kawakami T, Sakai S, Inoue K, Ikarashi Y. Characterization of synthetic turf rubber granule infill in Japan: Total content and migration of metals. Science of the total environment 842: 156705 (2022).

[Kögel 2020] Kögel T, Björög Ö, Toto B, Bienfait AM, Sanden M. Micro- and nanoplastic toxicity on aquatic life: Determining factors. Science of total environment 709:136050 (2020).

[Larsson 2022] Larsson M. Analys med avseende på PAH16 visar bara toppen av isberget. MTM Forskningscentrum Örebro Universitet. (presentation). (2022)

[Levin 2018] Levin N, Mårtensson BU. Gummiteknologi – En introduktion. Läroverket i Småland AB. (2018).

[Lozano 2021] Lozano JE, Ferguson S. Ecosystem services for compensation of artficial turf systems. Teknisk rapport på uppdrag av Naturvårdsverket och Beställargrupp konstgräs. (2021).

[Magnusson 2016] Kerstin Magnusson, Karin Eliaeson, Anna Fråne, Kalle Haikonen, Mikael Olshammar, Johanna Stadmark, Johan Hultén. Swedish sources and pathways for microplastics to the marine environment. IVL-rapport C183. (2016)

[Magnusson 2020] Simon Magnusson & Josef Mácsik. Determining the effectiveness of Risk Management Measures to minimize infill migration from synthetic turf sports fields. Ecoloop (2020).

[Magnusson 2017] Magnusson S, Mácsik J . Analysis of energy use and emissions of greenhouse gases, metals and organic substances from construction materials used for artificial turf. Resources, Conservation and Recycling. Volume 122, Pages 362-372. (2017)

[Malin 2012] Malin T. FPCC-RECY Test report cecycling of artificial turf, saltex Oy. Teknisk rapport. (2012)

[Massay 2020] Massey R, Pollard L, Jacobs M, Onasch J, Harari H. ”Artificial Turf Infill: A Comparative Assessment of Chemical Contents.” A Journal of Enviromental and Occupational Health Policy. Vol. 30(1) 10–26 (2020).

[Melkersson 2022] Melkersson E, Orebrand A. Biobaserat granulat för konstgräsplan med utgångspunkt i fallstudie från nyetableread konstgräsplan i kortdala Götaborg. Teknisk rapport av Chalmers Teknologkonsulster. (20222)

[Mitchell 2014] Mitchell MK, Hirt DE. Degradation of PLA Fibers at Elevated Temperature and humidity. Polymer engineering and Science. (2014)

[Moreno 2023] Moreno T, Balasch A, Bartrolf R, Eljarrat E. A new look at rubber recycling and recreational surfaces: The inorganic and OPE chemistry of vulcanized elastomers used in paygrounds and sports facilities. Science of the total environment 868:161648 (2023).

[Mondellini 2022] Mondellini S, Schott M, Löder MGJ, Agarwal S, Greiner A, Laforsch C. Beyond microplastics: Water soluble synthetic polymers exert sublethal adverse effects in the freshwater cladoceran Dapnia magna. Science of the total environment 847:157608 (2022).

[Murphy 2022] Murphy M, Warner GR. Health impacts of artificial turf: Toxicity studies, challenges and future directions. Environmental pollution 310:119841 (2022).

[Mårtensson 2013] Mårtensson BU. Gummiteknologi – Materialkunskap. Läroverket i Småland AB (2013).

[Nielsen 2021] Tobias Nielsen, Linnea Steen & Malin Redmo. ”Förstudie och kartläggning av styrmedel kopplat till konstgräs samt kartläggning av vilka möjliga anläggningar som kan omhänderta konstgräs. IVL Svenska Miljöinstitutet.” IVL rapport Nr U 6475 . (2021)

[Nilsson 2021] Nilsson F, Karlsson M, Gedde UW, Kadar R, Gaska K, Mueller C, Hagstrand CA, Olsson RT, Hedenqvist MS, Gkourmpis T. Nanocomposites and polyethylene blends: two potentially synergistic strategies for HVDC insulation materials with ultra-low electrical conductivity. Composites Part B: Engineering 204:108498. (2021)

[NTNU 2020] https://www.nordicarenaservice.se/varfr-4g-konstgrs. Nedladdad 2023-03-01.

[Nyberg 2018] Nyberg R, Johansson O. Jämförelse av konstgrässystem med avseende på luftburna partiklar. Examensarbete i maskinkonstruktion på KTH. TRITA-ITM-EX 2018:86 (2018).

[Olshammar 2021] Olshammar M, Graae L, Robijn A, Nilsson F. Microplastic from cast rubber granulate and granulate-free artificial grass surfaces. Naturvårdsverket (2021)

[Pronk 2020] Pronk MEJ, Woutersen M, Herremans JMM. Synthetic turf pitches with rubber granulate infill: are there health risks for people playing sports on such pitches? Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology. 30:567-584 (2020).

[Rahman 2021] Rahman, A.; Sarkar, A.; Yadav, O.P.; Achari, G.; Slobodnik, J. Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and microplastics and knowledge

gaps: A scoping review. Sci Total Environ 2021, 757, 143872, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143872.

[RIVM 2017] National Institute for Public health and the environment. Evaluation of health risks of playing sports on synthetic turf pitches with rubber granulate. Scientific background document. Tekniskt rapport. RIVM Report 2017-0017. (2017).

[Rocha-Santos 2020] Rocha-Santons T, Costa M, Moueyrac C. Handbook of microplastics in the environment. Springer Nature (2020).

[Sanne 2020] Sanne J, Rydberg T, Bahr J, Johannesson C. Samhällsekonomisk bedömning av konstgräs - Statusrapport 2020.

[Schneider 2020] Schneider K, Bierwisch A, Kaiser E. ERASSTRI – European risk assessment study on synthetic turf rubber infill – Part 3: exposure and risk characterisation. Science of teh total environments 718 (2020) 137721. (2020)

[Selbes 2015] Selbes M, Yilmaz O, Khan AA, Karanfil T. Leaching of DOC, DN and inorganic constituents from scrap tires. Chemosphere 139:617-623 (2015).

[SGF 1996] Sveriges Gummimekaniska förening SGF. Rubber Handbook. Ystads Centraltryckeri (1996).

[Shan 2008] Shan AA, Hasan F, Hameed A, Ahmed S. Biological degradation of plastics: a comprehensive review. Biotechnological advances 26:246-265 (2008).

[Skenhall 2012] Skenhall SA, Hallberg L, Rydberg T. Livscykelanalys på återvinning av däck-Jämförelser mellan däckmaterial och alternativa material i konstgräsplaner, dräneringslager och ridbanor. Svenska Miljöinstitutet IVL, rapport U3891, (2012).

[Soroudi 2022] Azadeh Soroudi, Yingwei Ouyang, Fritjof Nilsson, Ida Östergren, Xiangdong Xu, Zerui Li, Amir Masoud Pourrahimi, Mikael Hedenqvist, Thomas Gkourmpis, Per-Ola Hagstrand, Christian Müller. Highly insulating thermoplastic nanocomposites based on a polyolefin ternary blend for high-voltage direct current power cables. Nanoscale 14:21(2020).

[Svedala] https://www.svt.se/nyheter/lokalt/skane/svedala-konstgrasplan-anlades-for-miljoner-men-obrukbar-vintertid. Nedladdad 2023-03-22.

[SVFF 2020] SVFF. Svenska Fotbollsförbundets rekommendationer för anläggning av konstgräsplaner. Utförandebeskrivning. (2020).

[Sökmen 2020] Sökmen TÖ, Sulukan E, Türkoglu M, Baran A, Özkaraca M, Cayhun SB. Polystyrene nanoplastics (20 nm) are able to bioaccumulate and cause oxidative DNA damages in the brain tissue of zebrafish embryo (Danio rerio). Neurotoxicology 77:51-59 (2020).

[testbednordic 2022] Sports labs. TestbedNordic Report 22 nove 2022. (2022).

[Tsuji 2001] Tsuji H, Miyauchi S. Enzyamatic hydrolysis of poly(lactide)s: effects of molecular weight, L-Lactide content and enantiomeric and diatereoisomeric polymer blending. Biomacromolecules 2001,2,597-604. (2001).

[Unisport 2022] Tekniska data och rapporter beställda av bland annat sportslabs på uppdrag av UNISPORT.

[Wachtendorf 2017] Wachtendorf V, Kalbe U, Krüger O, Bandow N. Influence of weathering on the leaching behaviour of zing and PAH from synthetic sports surfaces. Polymer testing 63:621-631 (2017).

[Walters 2023] Walters, G.I.; Huntley, C.C. Novel occupational causes of hypersensitivity pneumonitis. Curr Opin Allergy Clin Immunology 2023.

[Wang 2021] Wang L, Wu WM, Bolan NS, Tsang DCW, Li Y, Qin M, Hou D. Environmental fate, toxicity and risk management strategies of nanoplastics in the environment: Current status and future perspectives. Journal of Hazardous Materials 401:123415 (2021).

[Wei 2021] Wei XF, Nilsson F, Yin H, Hedenqvist MS. Microplastics originating from polymer blends: an emerging threat? Environmental Science & Technology 55 (8), 4190-4193. (2021)

[Wei 2022] Xin-Feng Wei; Mikael S. Hedenqvist; Luyao Zhao; Andreas Barth; Haiyan Yin Risk for the release of an enormous amount of nanoplastics and microplastics from partially biodegradable polymer blends. Green Chemistry. (2022)