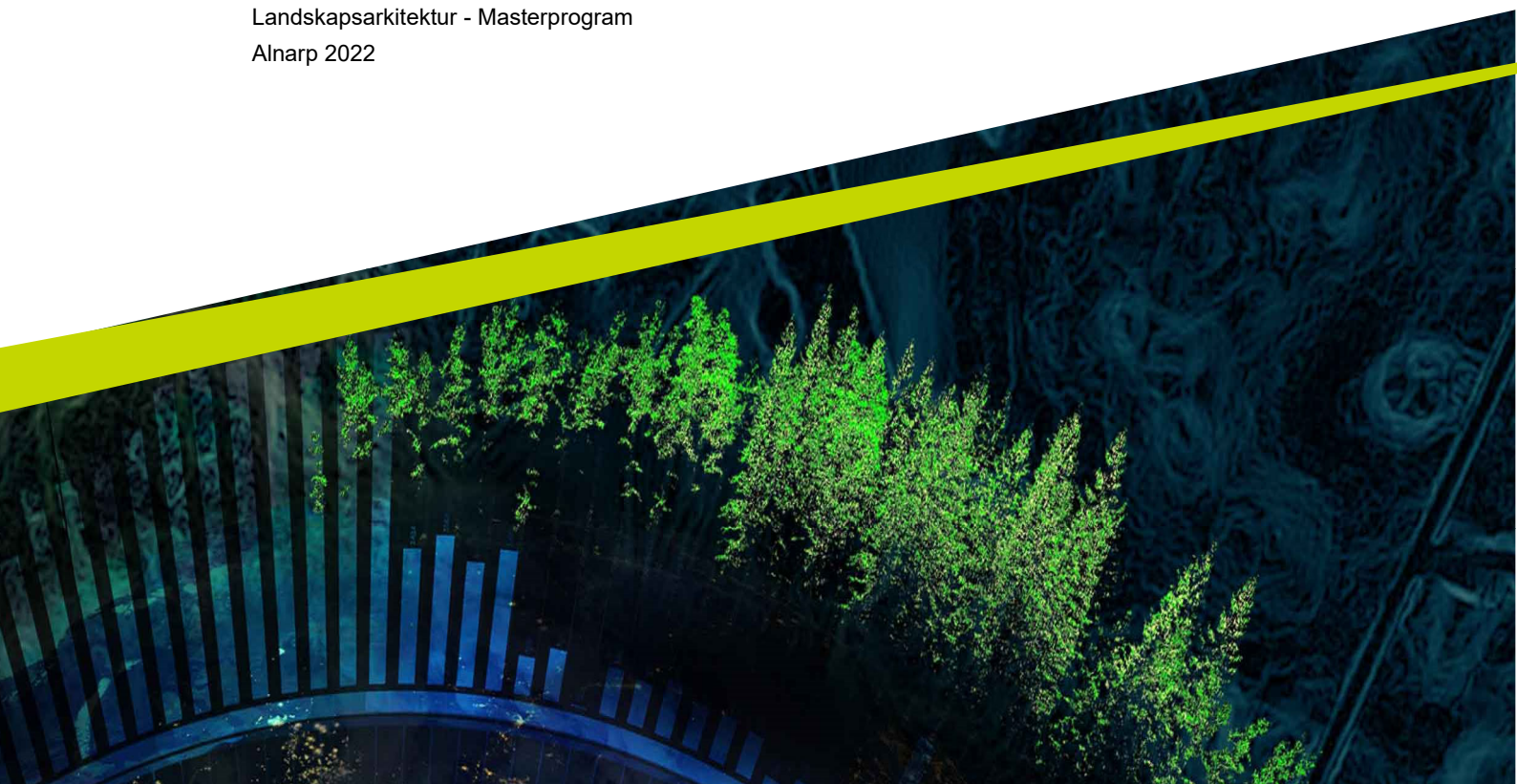




Kväve i åldrande gröna tak

Linnéa Lejon

Självständigt arbete • 30 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för Landskapsarkitektur, planering och förvaltning
Landskapsarkitektur - Masterprogram
Alnarp 2022



Kväve i åldrande gröna tak

Linnéa Lejon

Handledare: Ishi Buffam, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för Landskapsarkitektur, planering och förvaltning
Examinator: Mats Gyllin, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för arbetsvetenskap, ekonomi och miljöpsykologi.
Bitr. examinator: Arne Nordius, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för landskapsarkitektur, planering och förvaltning

Omfattning: 30 hp
Nivå och fördjupning: A2E
Kurstitel: Independent Project in Landscape Architecture
Kurskod: EX0852
Program/utbildning: Landskapsarkitektur - Masterprogram
Kursansvarig inst.: Landskapsarkitektur, planering och förvaltning
Utgivningsort: Alnarp
Utgivningsår: 2022

Nyckelord: Gröna tak, kvävecykel i gröna tak, kväveisotop 15N, kvävefixering
mossa

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap
Institutionen för landskapsarkitektur, planering och förvaltning

Sammanfattning

Gröna tak kan erbjuda ekosystemtjänster på annars outnyttjade ytor vilket kan vara fördelaktigt i städer om strävar efter förtätning. Gröna tak bildar ett ekosystem som är konstruerat av människan och det finns idag inte så mycket forskning på hur ekosystemtjänsterna förändras över tid och med olika typer av tak. Växtligheten är de som bidrar till att dessa ekosystemtjänster fungerar. Men växtligheten är samtidigt beroende av kväve för att inte tillväxten ska begränsas. Därför är det viktigt att studera hur kvävet i taken förändras över tid och för olika taktyper.

Detta arbete har utförts som en del i ett pågående forskningsprojekt på SLU i Alnarp. Forskningsprojektet studerar ett antal gröna tak i Malmö och Helsingfors utifrån hur dess ekosystemtjänster förändras över tid. Detta arbete har fokuserat på att studera hur kvävehalt och kvävemängd i substraten förändras över tid och med olika taktyper vid gröna tak i Helsingfors. Men även att undersöka indikation på kvävefixering i mossan på de gröna taken.

Slutsatser som kan dras av arbetet är att kvävet i substraten påverkas av taktyp och takålder. Där sedumtak tenderar förlora kväve med åldern och ängstakens kvävehalt ökar med åldern. Resultaten visar även att kvävet i sedumtaken påverkas av substratdjupet mer än vad ängstaken gör. Kvävehalt och kvävemängd ökade även med ökad organiskhalt i substraten oavsett taktyp.

Att kvävehalten i ängstakens substrat ökar med åldern kan minska risk för kvävebrist och på lång sikt gynna växtligheten på taken, vilket i sin tur gynnar takens förutsättningar för att leverera de förväntade ekosystemtjänsterna.

Slutsats kan även dras om att det fordras mer forskning om mossans roll på gröna tak och dess bidrag till kvävefixering.

Nyckelord: Gröna tak, kvävecykel gröna tak, kväveisotop ^{15}N , kvävefixering mossor

Abstract

Green roofs can offer ecosystem services on otherwise unused surfaces, which can be beneficial in cities if they strive for densification. Green roofs form an ecosystem that is constructed by humans and there is currently not much research on how ecosystem services change over time and with different types of roofs. Vegetation is what contributes to the functioning of these ecosystem services. But at the same time, vegetation is dependent on nitrogen so that growth is not restricted. Therefore, it is important to study how the nitrogen in the green roofs changes over time and for different roof types.

This work has been carried out as part of an ongoing research project at SLU in Alnarp. The research project studies a number of green roofs in Malmö and Helsinki based on how their ecosystem services change over time. This work has focused on studying how the nitrogen content and amount of nitrogen in the substrates change over time and with different roof types at green roofs in Helsinki. But also to investigate indication of nitrogen fixation in the moss on the green roofs.

Conclusions that can be drawn from the work are that the nitrogen in the substrates is influenced by roof type and roof age. Where sedum roofs tend to lose nitrogen with age and the nitrogen content of meadow roofs increases with age. The results also show that the nitrogen in the sedum roofs is affected by the substrate depth more than the meadow roofs do. Nitrogen content and amount of nitrogen also increased with increased organic content in the substrates regardless of roof type.

The fact that the nitrogen content in the meadow roof substrate increases with age can reduce the risk of nitrogen deficiency and in the long term benefit the vegetation on the roofs, which in turn benefits the roofs' conditions for delivering the expected ecosystem services.

Conclusion can also be drawn that more research is needed on the role of moss on green roofs and its contribution to nitrogen fixation.

Keywords: Green roofs, nitrogen cycle green roofs, nitrogen isotope ^{15}N , nitrogen fixation moss

Innehållsförteckning

Förkortningar	7
1. Introduktion	8
1.1 Gröna tak	8
1.2 Kväve i gröna tak	9
2. Arbetets syfte och mål	12
2.1 Syfte, mål och frågeställningar	12
2.1.1 Hypoteser	13
3. Material och metod	14
3.1 Metod	14
3.2 Begränsningar	14
3.3 Studerade tak	14
3.4 Provtagning och analys	16
3.5 Statistisk analys	17
4. Bakgrund	18
4.1 Kvävecykeln i gröna tak	18
4.2 Arbetsmodell över kväveprocessen	20
4.2.1 Taktyp	21
4.2.2 Substratdjup och organisk halt	21
4.2.3 Kvävefixerande bakterier och mikroorganismer	22
4.2.4 Takålder	23
4.2.5 Klimat	23
4.2.6 Växtartsrikedomen	23
4.2.7 Atmosfärisk kvävedeposition	23
4.2.8 Kväveläckage och lakbart kväve i systemet	24
4.3 Mossor på gröna tak	24
4.4 Kväveisotopsignaturer	25
5. Resultat	27
5.1 Kvävehalt	28
5.1.1 Kvävehalt och takålder	28
5.1.2 Kvävehalt och organisk halt	31
5.1.3 Kvävehalt och substratdjup	33
5.2 Kvävemängd	36
5.2.1 Kvävemängd och takålder	37
5.2.2 Kvävemängd och organiskhalt	39
5.2.3 Kvävemängd och substratdjup	40
5.3 Organisk halt och ålder	42
5.4 Indikation på kvävefixering i mossor	43
5.5 Sammanfattning av resultaten	46

6. Diskussion	47
6.1 Taktypen påverkar kvävet i taken	47
6.2 Ökad organisk halt kan indirekt gynna ekosystemtjänster	48
6.3 Gödsel kan minska kvävefixering	48
6.4 Indikation på kvävefixering i mossan	48
7. Slutsatser.....	51
8. Förslag på vidare forskning.....	52
Referenser.....	53
Bilaga 1.....	57

Förkortningar

^{15}N	Kväveisotop ^{15}N
^{14}N	Kväveisotop ^{14}N
MER	Ängtak (Meadow roof)
N	Kväve
SMR	Sedumtak (Sedum roof)

Begreppsförklaringar

Atmosfärisk kvävedeposition: Alla ekosystem tar emot kväve från atmosfärisk deposition där kväve deponeras via partiklar, lösta eller i gasform (Chapin m.fl 2011, sid 269)

Ekosystemtjänster: ”Ekosystemtjänster är alla produkter och tjänster som ekosystemen ger människan och som bidrar till vår välfärd och livskvalitet. Begreppet används för att skapa förståelse för att människors överlevnad och välmående är beroende av de tjänster som ekosystemen ger. Ekosystemtjänster synliggör på så sätt vårt beroende av fungerande ekosystem.” (naturvardsverket.se/ekosystemtjänster hämtad 2022-06-13).

Nitrifikation: Är en process där mikrober omvandlar ammonium NH_4^+ till nitrat NO_3^- (Mitchell & Buffam 2015).

Denitrifikation: Process där mikrober omvandlar växttillgängligt nitrat NO_3^- till kvävgas N_2 och N_2O (Mitchell & Buffam 2015).

Organisk halt: Den mängd material i jorden som utgörs av organogent material, exempelvis ofullständigt nedbrutet växtmaterial (Larsson 1985).

1. Introduktion

1.1 Gröna tak

Dagens ideal om att skapa täta och gröna städer har bidragit till ett ökat intresse för gröna tak (Pettersson-Skoog, Malmberg, Emilsson, Jägerhök & Capener, 2017). I städer som strävar efter förtätning kan gröna tak erbjuda ekosystemtjänster på annars outnyttjade ytor utan att ta upp eftertraktad markyta (Jonsson 2021). De gröna takens ekosystemtjänster kan bland annat utgöras av fördröjning och reducering av dagvatten, bidra till ökad biologisk mångfald, ta hand om luftföroreningar, binda koldioxid, avge syre, reglera temperatur, dämpa buller och bidra med hälsofrämjande utsikt (Pettersson-Skoog m.fl. 2017; Johnsson 2011).



Figur 1. Foto av grönt tak från studien i Helsingfors. Ängstak, 30 år (Pron 2). Foto: Petra Thorpert 2021.

1.2 Kväve i gröna tak

När städer förtätas och gröna tak byggs för att leverera ekosystemtjänster kan det vara fördelaktigt med kännedom om hur dessa konstruerade ekosystem utvecklas på sikt och dess förmåga att leverera ekosystemtjänster över tid.

Gröna tak kan konstrueras på olika sätt beroende på vilka ekosystemtjänster eller funktioner som taken avser gynna. Två vanliga taktyper är sedumtak med tunt substratdjup och ängstak med tjockare substratdjup (Pettersson-Skoog m.fl. 2017). Hur taket konstrueras har således stor inverkan på takets funktion.



Figur 2. Foto av grönt tak från studien i Helsingfors. Sedumtak, 1 år (Raku 1). Foto: Petra Thorpert 2021.

Gröna tak bildar ett ekosystem som är konstruerat av människan. Dessa ekosystem har inte utvecklats på naturlig väg och kanske inte följer samma utvecklingsmönster som naturliga ekosystem gör (Kaye m.fl. 2006). I naturliga ekosystem kan tillgång på kväve ofta vara begränsande för tillväxten (Chapin m.fl. 2011). I gröna tak kan näringsrika substrat kombineras med torktåliga växter som inte är anpassade för varandra och dessa placeras sedan i en utsatt miljö uppe på taken (Mitchell, Emilsson, Buffam 2021). Växterna på taken har dessutom ofta både begränsat rotutrymme och vattenmagasin (Pettersson-Skoog m.fl. 2017).

Vegetationen bidrar till att takets ekosystemtjänster fungerar. Växterna är samtidigt beroende av kväve. För växter är kväve ett essentiellt växtnäringsämne som de använder som byggstenar i dess protein, DNA och RNA (Blombäck,

Dahlin & Eriksson 2020). Brist på kväve kan begränsa växternas tillväxt och påverka takets funktion och försämrar och takens möjlighet att leverera önskade ekosystemtjänster. Medan ett överskott på kväve kan riskera bidra till kväveläckage och övergödning i nedströmsliggande vattendrag (Buffam & Mitchell 2015).

Gröna tak kan tillföras nytt kväve med hjälp av kvävefixerande bakterier eller genom exempelvis atmosfärisk kvävedeposition. Kväve förekommer i många olika kemiska former i naturen och atmosfären är den största källan till kväve (Turetsky 2003) där torrluft innehåller ca 78% kväve. Luftens kväve är dock inte tillgängligt för växterna utan en omvandling krävs för att växterna ska kunna ta upp kvävet (Chapin m.fl. 2011). Denna omvandling kan utföras av kvävefixerande bakterier som kan bidra med en betydande del av kvävet i ogödslade ekosystem. Kvävefixerande bakterier som tillför kväve till systemet kan finnas i jorden, i växternas rötter eller ovan jord på mossors växtvävnad (Chapin m.fl. 2011).

Mossor som samarbetar med kvävefixerande bakterier kan bidra med flera positiva egenskaper för det gröna taket. Mossor har inte rötter utan hämtar sitt vatten och näring från luften (Blomqvist & Lodin 2013) och därigenom konkurrerar inte mossan med kärlväxterna om näringen i jorden eller om det begränsade rotutrymmet. Mossan har dessutom hög vattenhållande förmåga vilket kan gynna att jorden inte torkar ut lika snabbt och främja nedbrytningen och livsmiljön för bakterier i jorden (Blomqvist & Lodin 2013).

Tidigare utförda studier på gröna sedumtak i Malmö visar att kvävehalten kan öka i substraten med ökad takålder i ett signifikant linjärt samband utan tecken på avmattning efter 22 år. (Mitchell, Emilsson, Buffam 2021). Andra studier tyder på att gröna tak kan medföra näringsläckage av kväve genom vattentransport genom substratet, vilket kan öka risk för bidrag till övergödning i nedströmsliggande vattendrag (Berndtsson 2010).

Om gröna tak kan ackumulera kväve i substraten med ålder kan det gynna växtligheten på taken och takens möjlighet att leverera önskade ekosystemtjänster över tid. Takens eftersträlvade funktioner kan förbättras och behovet av gödsling kan minska.

Det finns idag inte så mycket forskning på hur ekosystemtjänster hos gröna tak förändras över tid och med olika typer av tak (Mitchell, Emilsson, Buffam 2021). Detta är viktigt att undersöka då dessa konstruerade ekosystem kanske inte följer samma utvecklingsmönster som naturligt utvecklade ekosystem.

Det pågår ett forskningsprojekt på SLU i Alnarp där man studerar gröna tak i både Malmö och Helsingfors utifrån dessa frågor och hur gröna taks ekosystemtjänster förändras över tid. Det här arbetet har utförts som en del i detta forskningsprojekt och fokuserar på att studera hur kväve i substraten kan förändras över tid och med olika taktyper.



Figur 3. Foto av grönt tak från studien i Helsingfors. Ängstak, 18 år (Vers 4). Foto: Petra Thorpert 2021.

2. Arbetets syfte och mål

2.1 Syfte, mål och frågeställningar

Detta arbete har utförts som en del i ett pågående forskningsprojekt på SLU i Alnarp. Forskningsprojektet är finansierat av Formas, Nr 2019–00654, till Ishi Buffam, med titel: *”Åldrande grönblå infrastruktur: hur förändras gröna taks leverans av ekosystemtjänster när systemen blir äldre?”*. Forskningsprojektet studerar ett antal gröna tak i Malmö och Helsingfors angående hur gröna taks ekosystemtjänster förändras över tid. Detta arbete har fokuserat på att studera hur kväve i substraten förändras över tid och med olika taktyper för gröna tak i Helsingfors.

Syftet med detta arbete är att undersöka hur de gröna takens kvävehalt och kvävemängd i substraten förändras med takålder, taktyp, substratdjup och organisk halt. Men även att studera indikationer på kvävefixering i mossor på de gröna taken. Målet med undersökningen är att få en bättre förståelse för faktorer som påverkar kvävecykeln i gröna tak med åldern.

Följande frågeställningar undersöks i detta arbete:

1. *Hur varierar kvävehalten i substratet i de gröna taken som en funktion av substratdjup, organisk halt, taktyp och ålder?*
2. *Hur varierar kvävemängden som en funktion av substratdjup, organisk halt, taktyp och ålder?*
3. *Finns det bevis på att kvävefixerande bakterier bidrar till ökad kvävemängd i systemet? Och i så fall, varierar detta bidrag med ålder och taktyp?*

2.1.1 Hypoteser

Hypoteser för forskningsfråga 1 och 2 är att kvävehalten och kvävemängden i jorden blir högre i tak med större substratdjup och högre ålder. Hypotesen grundar sig i tanken att kvävehalten i jorden kan påverkas av hur tjockt substratdjupet är i det gröna taket. Då tunna tak kan påverkas snabbare av förändringar i sin omgivning så som temperaturväxlingar och torka. Ett ökat substratdjup kan då bidra till mer stabila och varierande livsmiljöer för exempelvis växter (Pettersson-Skoog m.fl. 2017) och kvävefixerande bakterier i jorden (Best, Swadec & Burgess 2015). Hypotesen antar även att tiden kan påverka processer i det gröna taket som har anknytning till takets kvävehalt. Exempelvis genom att ju äldre taket blir desto längre tid har taket utsatts för atmosfärisk kvävedeposition och desto större mängd kväve har haft möjlighet att ackumuleras i taket. Tiden antas även kunna påverka växtartsrikedomen på taket där en högre växtarsrikedom kan gynna fler typer av kvävefixerande bakterier men även öka kvävehalten genom nedbrytning av dött växtmaterial.

Kväve kan läcka ut ur systemet genom erosion eller hydraulisk borttransport av vatten som passerar genom jorden (Mitchell & Buffam 2015). Ett ökat substratdjup antas kunna ge ökad möjlighet till högre vattenhållande förmåga i jorden, beroende på substratsammansättning och dess egenskaper. Ökad vattenhållande förmåga kan då minska kväveförluster och gynna att kväve ackumuleras i taken.

Hypotes för forskningsfråga 3 är att mossan på de gröna taken samarbetar med kvävefixerande bakterier och att detta bidrar till ökad kvävemängd i de gröna taken och där kvävehalten och kvävemängd blir högre i äldre tak. Mossan förväntas bidra med ökad kvävehalt i taken. Detta eftersom mossan inte har rötter utan tar upp vatten och näring från luften (Blomqvist & Lodin 2013) och därigenom inte förbrukar något kväve från jorden och konkurrerar inte heller om det begränsade rotutrymmet i jorden. Mossan kan även samarbeta med kvävefixerande bakterier som lever på mossans växtvävnad ovan jord och eventuellt kväveöverskott kan lakas ut från mossan vid regn och komma jorden tillgodo (Blomqvist & Lodin 2013). Mossan har även hög vattenhållande förmåga (Blomqvist & Lodin 2013) vilket kan gynna taken genom ökad fukthalt och jämnare temperatur i substraten vilket kan gynna andra växter och kvävefixerande bakterier i jorden.

3. Material och metod

3.1 Metod

Metoden för arbetet bygger på provtagningar och analyser som har utförts inom forskningsprojektet år 2021–2022 vid de gröna taken i Helsingfors. Använt data från provtagningar och analyser beskrivs närmare i kapitel 3.4. Underlag som studerats omfattas av analys av kvävehalt (N %) i substrat, organisk halt, substratdjup, information om takålder samt halt av kväveisotopen ^{15}N i mossor. Med hjälp av detta underlag har sedan statistiska analyser utförts i programvaran SPSS, version 27, för att studera samband mellan variablerna.

Litteratursökning har utförts på både svenska och engelska. Sökning har utförts på SLU's bibliotek Primo, Google scholar, web of science och internet. Sökord som har använts har bland annat innefattat: gröna tak, gröna tak näringscykel, green roof, green roof nutrient cycle, eco roof, kväveisotop, kvävefixering och ^{15}N kvävefixering mossor.

3.2 Begränsningar

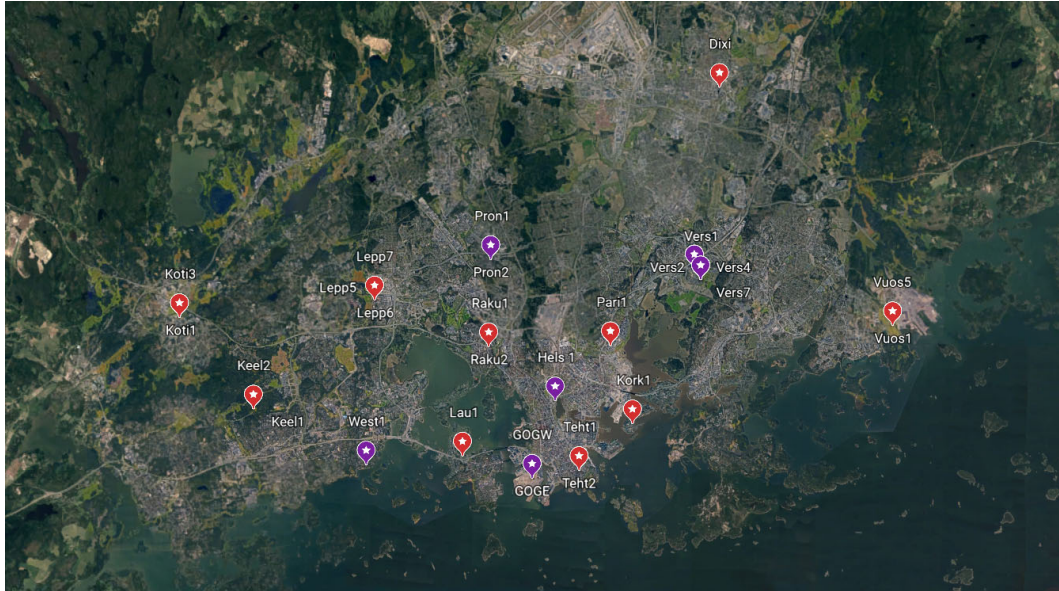
Arbetet begränsas till att studera kvävet kretslopp i de gröna taken. Näringskretsloppen för kväve, kol och fosfor påverkas av varandra men detta arbete begränsas till att studera kvävet kretslopp och hur kvävehalt och kvävemängd i substratet förändras över tid samt hur kväveisotopen ^{15}N i mossan påverkas av tid och taktyp i de undersökta gröna taken i Helsingfors.

3.3 Studerade tak

Arbetet bygger på underlagsdata från provtagningar och analyser av 31 gröna tak i Helsingfors. I 10 av dessa undersökta tak har spår av gödselkorn hittats vid provtagning där 8 st av dessa tak var sedumtak. Dessa 10 tak har uteslutits från arbetets analyser. Resterande tak har antagits vara ogödslade i detta arbete. För ett tak saknas erhållen information om substratdjup (tak id: LAU 1) varför detta tak

har uteslutits från sambandsanalys med substratdjup. 29 tak har analyserats för kväveisotopen ^{15}N i mossor, då det inte förkom mossor vid alla undersökta tak.

Taken är belägna i Helsingforsområdet med 2,8 mils största avstånd mellan taken och har en åldersvariation på 1–51 år och, se figur 4 nedan.



Figur 4. Översikt över undersökta tak i Helsingfors. Underlagskarta från Google Earth, hämtad 2022-04-21. Röda markeringar visar sedumtak (SMR) och lila markeringar visar ängstak (MER).

De undersökta taken har delats in i två kategorier där den ena kategorin klassas som sedumtak (SMD) med tunt substratdjup och den andra som ängstak (MER) med tjockare substratdjup. Taken är uppbyggda på olika sätt med olika substrat och olika växtkompositioner. Sedumtaken har generellt sett tunnare substratdjup och lägre medelålder än ängstaken som har ett mäktigare substratskikt men även en högre medelålder.

Sedumtaken (SMD), 10 st, har en substrattjocklek på 1–5 cm och ett åldersspann på 1–12 år där takens medelålder är 7,5 år.

Ängstaken (MER), 11 st, har en substrattjocklek på 7–24 cm och ett åldersspann på 18–51 år där takens medelvärde ligger på 24,7 år. Det äldsta taket (West1) är 51 år och bidrar med ett extremvärde i ålder i denna kategori.



Figur 5. Foto av ängstaket West1, 51 år. Foto: Maria Kunle år 2021.

Angivna takåldrar är beräknade år 2021. De undersökta taken har även undersökts vid ett tidigare forskningsprojekt år 2011 (Gabrych, Kotze & Lehvävirta 2016) och det nu aktuella forskningsprojektet bygger vidare på de tidigare studierna.

3.4 Provtagning och analys

Under juli – augusti år 2021 insamlades växt- och jordprover från de undersökta taken i Helsingfors. Provtagning av substrat utfördes i ett slumpmässigt provtagningsmönster fördelad i förhållande till takytan. Taken uppdelades i 8 eller 16 sektion och ett prov togs för varje sektion som var slumpmässigt utvald. Provtagning av substratet utfördes med en provtagningscylinder som pressades ner i substratet. I samband med avlägsnandet av provtagningscylindern mättes substratdjupet med en tumstock. Vid de tak där substratdjupet översteg provtagningscylinderns längd mättes substratdjupet genom att en metallstav trycktes ner till botten av substratlagret.

Proverna numrerades och delades in i två olika delprover. A-prover som innehöll jämna nummer och B-prover med udda nummer.

Varje delprov delades sedan in i fyra grupperingar:

- biomassa ovan jord (AGB)
- biomassa under jord (BGB) vilket innebär rötter
- mossa
- substrat

Flertalet analyser har sedan utförts på både substrat och biomassa. För detta arbete har vissa underlagsdata valts ut för vidare studier. Arbete bygger på data från substratdjup, takålder, organisk halt och kvävehalt i substraten då dessa faktorer har antagits kunna påverka kvävehalten i substraten i de gröna taken, se arbetsmodell, figur 7.

Nedan beskrivs de analyser som varit relevanta för detta arbete. Kvävehalten i substraten (N %) har analyserats från substrat med fraktion <0,6 cm för alla tak som jordprover insamlades från under sommaren 2021.

Analys av substratets organiska halt har utförts genom att torka substratprovet i 105 grader Celsius och sedan hetta upp en känd mängd substrat till 550 grader för att omvandla organiskt material till CO₂ så att det kvarvarande materialet består av oorganiskt material. Vägning av kvarvarande material ger differensen och utgör den organiska halten i jorden som anges i %, se bilaga 1.

29 tak har analyserats för förekomst av kväveisotopen ¹⁵N i mossans växtdelar. I detta arbete har 19 av taken använts som underlag då 10 tak exkluderades på grund av förekomst av gödselkorn i jordprover. Analysen (d¹⁵N ‰) är utförd på moss-prover i Stabel isotope lab of the SLU Forest Ecology and Management department i Umeå. Analysen utfördes i mars 2022-03-17/18. Analysvärden för d¹⁵N redovisas i bilaga 1.

3.5 Statistisk analys

Linjär regressionsanalys har utförts i programvaran IBM SPSS, version 27. För forskningsfråga 1 och 2 har ingående variabler utgjorts av kvävehalt, kvävemängd, takålder, taktyp, organisk halt och substratdjup. Där kvävehalt och kvävemängd är beroende variabler och taktyp, organisk halt och substratdjup är oberoende variabler. För forskningsfråga 3 har beroende variabel utgjorts av kväveisotopen d¹⁵N och oberoende variabler av taktyp och ålder. Gränsen p <0,05 för signifikansnivån har använts i arbetet. Korrelationsanalyser har utförts för att undersöka sambanden mellan beroende och oberoende variabler. Normalfördelning har okulärbedömts i histogram och P-värdeplot för att bedöma hur nära datauppsättningen passar modellen. I arbetet redovisade diagram har utförts i Excel.

4. Bakgrund

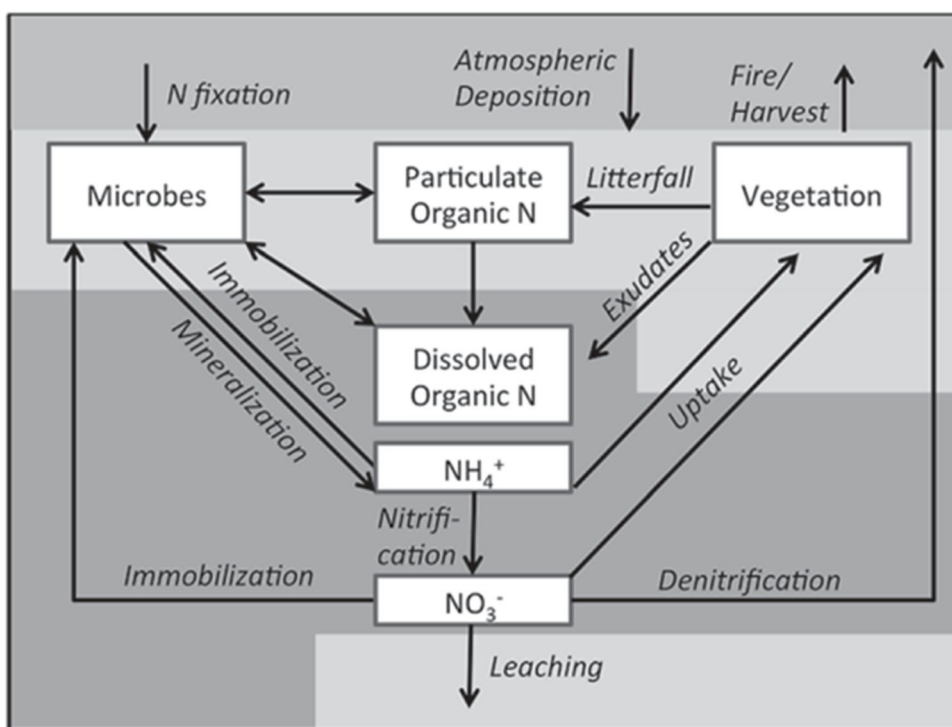
Detta kapitel beskriver resultat av litteraturstudier som utförts om kvävet kretslopp i gröna tak kopplat till forskningsfrågorna. Först beskrivs översiktligt kvävet kretslopp i gröna tak. Därefter beskrivs en konceptuell arbetsmodell över faktorer som påverkar kvävet i taken. Slutligen beskrivs utförda litteraturstudier om mossans möjlighet att fixera kväve.

4.1 Kvävecykeln i gröna tak

Kväve förekommer i många olika kemiska former i naturen och atmosfären är den största källan till kväve (Turetsky 2003) där torrluft innehåller ca 78% kväve. Luftens kväve är inte tillgängligt för växterna utan en omvandling krävs för att växterna ska kunna ta upp kvävet. Största delen av markens kväve finns i det organiska materialet och en liten del av detta kväve bryts ner och blir växttillgängligt under en växtsäsong (Sixtensson 2006). I många ekosystem är kväve i formen av oorganiskt kväve så som ammonium NH_4^+ och nitrat NO_3^- en betydande källa för växttillgängligt kväve. Ammonium och nitrat bildas vid mikroorganismers nedbrytning av aminosyror (Buffam & Mitchell 2015).

Kvävecykeln i naturliga ekosystem påverkas bland annat av atmosfärisk kvävedeposition, jordens egenskaper, kvävefixerande bakterier och lakbart kväve som kan lämna systemet.

Kvävecykeln i gröna tak kan i stora drag beskrivas som inkommande kväve i systemet samt de ackumulerade kvävet, minus det utgående kvävet, det vill säga det kväve som läcker ut ur systemet, se figur 6 nedan.



Figur 6. Illustration över kvävecykeln, Figur från Buffam & Mitchell (2015).

Inkommande kväve i systemet

Kväve kommer in i systemet genom att kvävefixerande bakterier omvandlar luftens kväve till ammonium (NH_4^+) och nitrat (NO_3^-). Ammonium och nitrat är växttillgängligt kväve (Buffam & Mitchell 2015). Atmosfärisk kvävedeposition bidrar även med kväve till systemet. Växttillgängligt kväve kan även bildas vid blixtnedslag och av trafikens förbränningsmotorer (NO_x). Kväve reagerar då med luftens syre och bildar NO_x som kan bilda salpetersyra HNO_3 vid reaktion med vatten. Salpetersyran kan tillsammans med vatten omvandlas till nitrat NO_3^- som är upptagbart för växter (SMHI; Chapin m.fl. 2011).

Kväveoxider NO_x är giftiga och kan irritera luftvägar och slemhinnor. Att växter kan ta upp NO_3^- som härstammar från NO_x är gynnsamt för hälsa och miljö (Naturvårdsverket.se 2022-04-28). Trafiken är en stor källa till kväveförorening (NO_x , NH_3) som kan förändra ekosystemens funktion och kvävehalten i växter och mossor som är speciellt känsliga för NO_2 . (Ackerman, Zakrisson, Rousk, 2012, sid 987).

Ackumulering av kväve i systemet

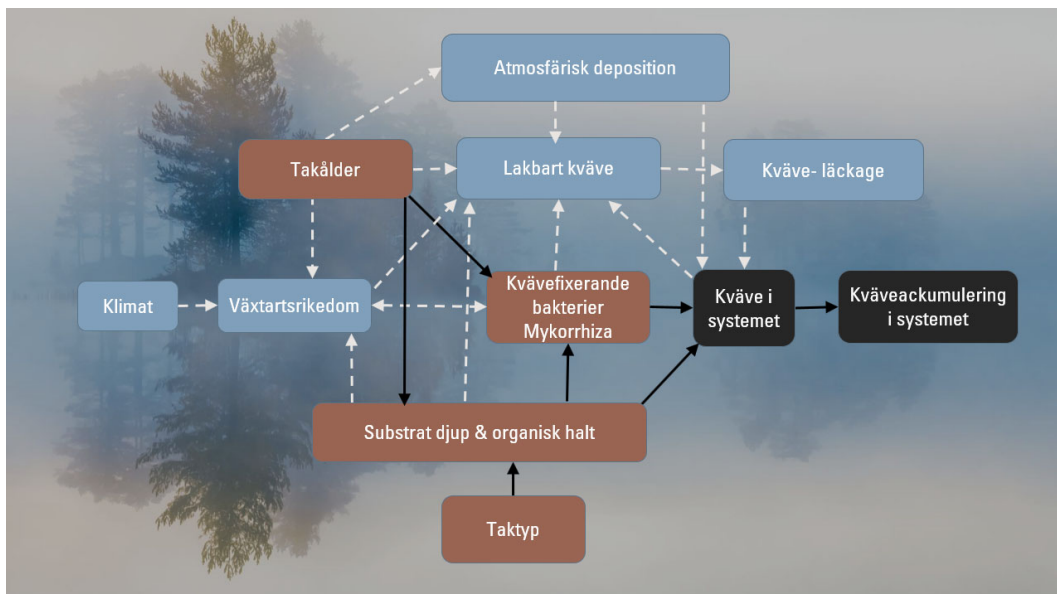
Kväve kan ackumuleras i systemet genom att kväve binds till partiklar i substratet eller hydrologiskt som lakbart kväve i markvattnet eller inom mikroorganismernas processer i marken. Kväve som tas upp av växter kan återgå till substratet när växten dör och bryts ner (Buffam & Mitchell 2015).

Utgående kväve från systemet

Kväve läcker ut från systemet genom erosion eller hydrologisk borttransport. Denitrifikationsbakterier kan omvandla NO_3^- till kvävgas som avgår till atmosfären. (Craine m.fl. 2015). En eldsvåda eller växter som skördas och borttransporteras från ytan minskar kvävet i systemet (Buffam & Mitchell 2015).

4.2 Arbetsmodell över kväveprocessen

För att visualisera förhållanden mellan kvävecykelns påverkansfaktorer och arbetets forskningsfrågor har en konceptuell arbetsmodell tagits fram, se figur 7 nedan. Bruna boxar illustrerar undersökta påverkansfaktorer. Svarta pilar illustrerar studerade samband mellan dessa faktorer och svarta boxar visar undersökta parametrar för kvävet. Arbetets forskningsfråga 1 och 2 syftar till att undersöka hur kvävehalt och kvävemängd i de gröna taken varierar som en funktion av substratdjup, organisk halt, taktyp och ålder. Medan forskningsfråga 3 syftar till att undersöka indikation på kvävefixering från kvävefixerande bakterier i mossan och om bidraget iså fall varierar med taktyp och ålder.



Figur 7. Konceptuell arbetsmodell över nyckelförhållandet mellan drivare och forskningsfrågor. Bruna boxar illustrerar undersökta påverkansfaktorer. Svarta pilar illustrerar studerade samband och svarta boxar visar undersökta parametrar för kvävet.

Nedan beskrivs faktorer och processer i arbetsmodellen och hur dessa förväntas påverkar kvävehalten och kvävemängden i de gröna taken samt hur mossan kan påverka kvävehalten i systemet.

4.2.1 Taktyp

Hur det gröna taket konstrueras påverkar takets framtida funktioner.

Taktypen påverkar indirekt kvävehalten i systemet genom val av substratdjup, organisk halt och substratsammansättning. Substratdjup och sammansättning påverkar bland annat möjliga val av växter (Pettersson-Skoog m.fl. 2017) och livsmiljö för kvävefixerande bakterier vilket indirekt kan påverka mängden kväve i systemet (Buffam & Mitchell 2015).

Sedumtak som utformas för att efterlikna alvar mark har ofta tunna växtbäddar på 3–8 cm och växtligheten kan bestå av torktåliga suckulenter och mossor (Pettersson-Skoog m.fl. 2017). Vid substratdjup större än 10 cm kan ängstak anläggas. Växtligheten beror på substratens uppbyggnad och egenskaper. Torrängsväxter i kombination med gräs är vanliga alternativ. (Pettersson-Skoog m.fl. 2017). Gröna tak klassas ofta som extensiva eller intensiva tak. Kategorierna syftar på takets skötselmängd. En designad perennplantering med en gestaltningssidé som kräver skötsel klassas då som ett intensivt tak medan en variationsrik ängsyta klassas som ett extensivt tak (Pettersson-Skoog m.fl. 2017).

4.2.2 Substratdjup och organisk halt

Substratets egenskaper har stor inverkan på takens funktioner och även kvävehalten i taken. Substratets uppbyggnad kan bland annat påverka takets hydrologi, vattenhållande förmåga, temperatur, mikrobiella livsmiljö och mängd lakbart kväve (Buffam & Mitchell 2015). Ett tak med tunt substratdjup kan innebära en mer begränsad livsmiljö för växter och mer känsligt för yttre förändringar i sin omgivning så som temperaturväxlingar och torka (Pettersson-Skoog m.fl. 2017). Substratdjup kan påverka takets växtartsrikedom där ett ökat substratdjup kan medföra en mer varierad livsmiljö där fler växter och kvävefixerande bakterier kan trivas. Men även att taken blir mindre känsligt för omgivningspåverkan (Pettersson-Skoog m.fl. 2017).

Substratdjup och strategiens egenskaper har stor inverkan på mikroorganismernas livsmiljö i jorden och mikroorganismerna reagerar starkt på den biokemiska miljön. Organismer kan även påverka jordpartiklarnas aggregatstruktur (McGuire, Payne, Orazi, Palmer 2015, sid 183). Ett ökat substratdjup kan bidra till mer stabila och varierande livsmiljöer för exempelvis växter (Pettersson-Skoog m.fl. 2017) och kvävefixerande bakterier i jorden (Best, Swadec & Burgess 2015).

Jordens organiska halt påverkar jordens egenskaper där ökad organisk halt kan bidra till ökad vattenhållande förmåga i jorden samt ökad näringstillgång och jordens förmåga att hålla kvar växtnäring vilket kan gynna växtartsrikedomen. Det organiska materialet kan stimulera den biologiska aktiviteten i jorden och

gynna jordens mikroorganismer genom att skapa gynnsamma mikromiljöer (Blombäck, Dahlin & Eriksson 2020).

4.2.3 Kvävefixerande bakterier och mikroorganismer

Kvävefixerande bakterier kan tillföra kväve till ekosystemet och kvävefixering kan utgöra en betydande del av det inkommande kväve i systemet (Chapin m.fl. 2011). Brist på kväve kan vara begränsande för tillväxten hos växter på gröna tak (Buffam & Mitchell 2015). Luften innehåller mycket kväve men i en form som inte växterna kan ta upp. För att kvävet ska bli tillgängligt för växterna krävs att kvävet omvandlas till växttillgängligt kväve så som ammonium eller nitrat. Kvävefixerande bakterier kan omvandla atmosfärens otillgängliga kväve så att det blir tillgängligt för växterna (Buffam & Mitchell 2015).

Kvävefixerande bakterier kan utgöras av frilevande bakterier i jorden eller bakterier som lever i symbios med växter vid dess rötter. Kvävefixerande bakterier kan även förekomma ovan jord på växtvävnad hos mossor och lavar (Chapin m.fl. 2011).

Kvävefixering kan bland annat utföras av cyanobakterier. Dessa bakterier fanns redan för 3,5 miljarder år sedan och förekommer i de flesta av jordens ekosystem så som i hav, sjöar, jordar och skogar (Bay 2013). Kvävefixering som utförs av kvävefixerande bakterier är en energikrävande process för att bryta de bindningar som atmosfärens kväve har och processen kräver att det finns tillgång på kolhydrater och fosfor (Chapin m.fl. 2011). Om marken gödslas kraftigt eller om det finns löst oorganiskt kväve i markvattnet kan den kvävefixerande processen minska (Larsson, Nyberg, Högländer, Walve 2014).

Det finns bland annat två olika grupper av kvävefixerande bakterier där den ena gruppen, *Heterotrofa kvävefixerande bakterier* får sitt organiska kol från sin omgivning. Den andra gruppen *Fototrofa kvävefixerande bakterier* (Fototrofa blågröna alger) kan tillverka sitt eget organiska kol genom fotosyntes (Chapin m.fl. 2011).

De kvävefixerande bakterierna kan leva i symbios eller samarbeta med växter men de kan även förekomma som fritt-levande bakterier i jorden. Kvävefixerande bakterier som lever i symbios med växter och bildar små rotnölar exempelvis ärt- och baljväxter (Heterotrofa) vilka är förhållandevis effektiva kvävefixerare och kan fixera ca 5–20 g N /m², år. Effektiviteten kommer från att plantan förser de kvävefixerande bakterierna med kolhydrater. Det finns även (Heterotrofa) kvävefixerande bakterier som lever fritt i jorden utan symbios med växter. Dessa är dock inte lika effektiva och kan fixera ca 0,1–0,5 g N/m², år

(Chapin m.fl. 2011, sid 268). Det finns även kvävefixerande cyanobakterier som lever ovan jord på mossans och lavans växtdelar (Fototrofa) där de kan omvandlar luftens kväve till växttillgängligt kväve (Chapin m.fl. 2011, sid 267). De kvävefixerande bakterierna får en skyddad levnadsmiljö på mossan och i utbyte erhåller mossan överflödet av kväve (Ackerman m.fl. 2012). I boreala ekosystem ökar mossans kvävefixering med åldern och i sen successionsålder kan mossan fixera ca 0,2 g N/m², år (Blomqvist, Lodin 2013; Bay 2013, sid 22).

4.2.4 Takålder

Takåldern kan påverka flera faktorer i kvävecykeln. Tiden påverkar levande processer i kvävecykeln så som ökad eller minskad växtartsrikedom, mängden kvävefixerande bakterier i substratet, tillväxt av mossor och lavar och dess mängd av kvävefixerande bakterier. Men även mängden kvävedeposition och mängden lakbart kväve i systemet.

4.2.5 Klimat

Klimatet kan påverka det gröna takets växtartsrikedom genom dels att ett varmare klimat kan medföra en livsmiljö där fler typer av växter och kvävefixerande bakterier trivs. Den dominerande kväveformen i jorden kan påverkas av klimatet där ett kallare klimat kan innebära att majoriteten av kvävet finns som upplöst organiskt kväve (DON) i jorden. I ett varmare klimat kan NO₃⁻ eller NH₄⁺ utgöra den största oorganiska kväveformen i jorden (Craine m.fl. 2015).

4.2.6 Växtartsrikedomen

Växtartsrikedomen förväntas kunna påverkas av klimatet, substratdjup, substratsammansättning och takålder. Växtartsrikedomen kan påverka mängden kvävefixerande bakterier i systemet. Exempelvis genom att ökad växtartsrikedom kan öka antal växter som samarbetar med kvävefixerande bakterier och därigenom påverka kvävehalten i systemet. Men växtartsrikedomen kan även påverkas åt andra hållet det vill säga att de kvävefixerande bakterierna ökar kvävehalten i jorden vilket kan gynna livsmiljön för att fler växtarter trivs på platsen. Växtartsrikedomen har även visat sig påverka mängden lakbart kväve i systemet. Där en ökad växtartsrikedom signifikant minskade mängden av kväveläckage (nitrat och ammonium) från systemet (Johnson, Schweinhart & Buffam 2016).

4.2.7 Atmosfärisk kvävedeposition

De gröna taken har en viss startnivå på kvävehalten i substraten vid anläggandet av taket via exempelvis kompost, torv eller gödsel. Atmosfärisk kvävedeposition utgör sedan ett kvävetillskott till systemet (Chapin m.fl. 2011) och påverkas av

tiden där ökad takålder medför ökad tid som systemet har påverkats av kvävedepositionen och ökad mängd kväve som möjligen kan ackumuleras i systemet. Även NO_x från trafikens förbränningsmotorer kan bidra med kvävedeposition till systemet.

4.2.8 Kväveläckage och lakbart kväve i systemet

Mängden lakbart kväve i systemet antas kunna påverkas av minst fyra faktorer, nämligen atmosfärisk deposition, takålder, växtartsrikedom och kvävefixerande bakterier enligt tidigare beskrivna processer. Mängden lakbart kväve påverkar i sin tur mängden kväve som läcker ut från systemet genom hydraulisk borttransport, erosion eller denitrifikation, där kvävet återgår till atmosfären i kvävgas (Buffam & Mitchell 2015).

4.3 Mossor på gröna tak

Mossor kan vara vanligt förekommande på gröna tak men har inte samma påverkan på kvävecykeln som kärlväxter. Detta eftersom mossan saknar rötter och tar upp vatten och näring från luftens deposition, förnedbrytning, krondropp och regn. Mossan kan sända ut kemiska signaler för att attrahera kvävefixerande bakterier till sina blad. Cyanobakterier som lever på mossan överför kväve till mossan (Bay 2013 sid 52,). Bakterierna lever på mossans växtdelar ovan jord och är väldigt effektiva i sin process på att fixera kväve. Bakterierna använder bara ca 20% av kvävet själva medan överflödet kommer mossan tillgodo i form av NH₄⁺ (Bay 2013, sid 62; Ackerman m.fl. 2012 sid 987). De kvävefixerande bakterierna ökar sin produktion när det är brist på kväve och minskar produktionen om kväveöverskott uppstår från exempelvis gödsling (Ackerman m.fl. 2012 sid 987). Zackrisson m.fl. (2004) visar i en studie att gödsling med (NH₄NO₃) med 0,45 g N/m², år bidrar till att cyanobakterierna på väggmossa, *Pleurozium schreberi* upphör med sin kvävefixering.

Mossor har förmågan att ackumulera vatten och näring och kan gynna tillväxten hos kringliggande växter på växtplatsen. När mossan varit uttorkad och sedan återfuktas av exempelvis regn eller dagg sker ett näringsläckage av organiskt kväve, kol och fosfor från mossan och ner i jorden (Ackerman m.fl. 2012 sid 987). Den näringsrika miljön som orsakas av näringsläckaget gynnar även förekomst av svamphyfer i mosstäckets (Blomquist & Lodin 2013).

Mosstäckets höga vattenhållande förmåga kan minska värmeväxlingar och uttorkningen i jorden. Den höga vattenhållande förmågan bidrar även till att mossan kan gynna nedbrytningshastigheten av exempelvis löv (Blomquist & Lodin 2013). Mossans temperaturreglerande egenskaper påverkar även den mikrobiella aktiviteten i jorden och har således en påverkan på mängden näringsämnen i jorden (Bay 2013).

4.4 Kväveisotopsignaturer

En isotop är en variant av ett grundämne med ett bestämt antal neutroner. Grundämnet kväve (N) har 7 protoner och 7 elektroner. En kväveisotop har ett olika antal neutroner i sin uppbyggnad. Kväve har två stabila isotoper vilka utgörs av kväve 14 och kväve 15 (^{14}N och ^{15}N). Stabila isotoper innebär att de inte sönderfaller radioaktivt. Kvävet i atmosfären består till 99,634 % av kväveisotopen ^{14}N och en liten del, 0,366 % består av kväveisotopen ^{15}N (Nationalencyklopedin, 2022-05-01).

Kväveförhållandet kan uttryckas som $\delta^{15}\text{N}$ med enheten (‰) enligt ekvationen nedan:

$$\delta^{15}\text{N} = \left(\left(\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}} \right)_{\text{prov}} / \left(\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}} \right)_{\text{standard}} \right) - 1$$

Där $\left(\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}} \right)_{\text{prov}}$ är kvävekompositionen för ett analyserat prov och $\left(\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}} \right)_{\text{standard}}$ är kvävekompositionen för ett standardmaterial. Standardmaterialet som använts är atmosfäriskt N (Craine m.fl. 2015).

Att undersöka förhållandet mellan kväveisotoperna $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ($\delta^{15}\text{N}$) kan bland annat användas som en indikation på var kvävet härstammar ifrån. Kväveisotopa analyser kan utföras på kvävehalt i jorden, rötter och växtdelar. Kvoten av N isotoper $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ($\delta^{15}\text{N}$) i växtdelar, (dessa kan skilja sig mellan växtens blad och rottdelar) kan ge en indikation på kortsiktiga variationer i kvävecykeln. Medan N isotoper ($\delta^{15}\text{N}$) i jord kan spegla långsiktiga variationer som spänner över flertal år (Craine m.fl. 2015).

Kväveisotopanalys av växtdelar kan bland annat användas för att studera indikationer på om en växt har blivit gödslad med konstgödsel eller med ekologiskt gödsel. Vid tillverkning av konstgödsel används luftens kväve vilket innebär att denna kväveform kommer innehålla liten mängd av kväveisotopen ^{15}N och till största del kväve ^{14}N . Kvoten $\delta^{15}\text{N}$ kommer då ligga nära 0 ‰. Organisk gödsel innehåller större mängd av kväveisotopen ^{15}N . Detta eftersom nitrifikation, denitrifikation och upptag av växter separerar de två olika kväveisotoperna. En analys av kvoten $\delta^{15}\text{N}$ kan således indikera på om växten har gödslats med konstgödsel eller med naturligt gödsel beroende på $\delta^{15}\text{N}$ värdet (Einarsson 2011). Konstgödsel tenderar ha ett kväve ^{15}N värde nära noll, vanligtvis mellan -2 och +2 ‰ (Bateman, Kelly, Woolfe, 2007).

Det finns även studier som använt isotopsignaturen i mossor som en indikation på luftföroreningar (Pearsson m.fl. 2000). Studien jämför kväveisotopsignaturer i mossa som utsätts för luftföroreningar från hårt trafikerade vägar och sedan jämfört med isotopsignaturer från mossor på landsbygd med liten eller ingen trafik. Studien visar att $\delta^{15}\text{N}$ värdet i mossan stiger med ökad trafikpåverkan. Växtprover som samlades in i närhet av motorvägar eller hårt trafikerade urbana vägar hade ett spann på $\delta^{15}\text{N}$ värdet +6 till -1 ‰. I landsbygd med lite trafik låg

spannet på -2 till -12 ‰. Studien visar på att NO_x från trafik bidrar till ett mer positivt δ¹⁵N värde i mossor (Pearsson m.fl. 2000).

Cyanobakterier som fixerar kväve från atmosfären som mestadels består av kväve ¹⁴N (99,644 % ¹⁴N och 0,366 % ¹⁵N) erhåller låga δ¹⁵N värde vid kvävefixering (-2,7 – 1 ‰) (Larsson m.fl. 2014).

5. Resultat

I Detta kapitel redovisas resultat från utförda regressionsanalyser.

Analys av kvävehalt och kvävemängd, som funktion av takålder, taktyp, organisk halt och substratdjup, har utförts i delanalyser enligt följande:

Svarsvariabel	Förklarande variabel	Taktyp
Kvävehalt (N %)	Ålder	Alla tak
Kvävemängd (N/m ²)	Organiskt innehåll	Alla tak exklusive west1
	Substratdjup	Sedumtak (SMR)
		Ängstak (MER)
		Ängstak (MER) exkl. west1

Först har kvävehalten och kvävemängd analyserats i förhållande till takålder för samtliga tak. Därefter har det äldsta taket West1 som bidrar med extremvärden uteslutits från analysen för att se hur extremvärdet påverkat resultatet. Sedan har taktyperna sedumtak (SMR) och ängstak (MER) analyserats separat för att se hur kvävehalt och kvävemängd påverkas av taktypen och till sist har taket West1 exkluderats från den separata analysen med ängstak för att se hur extremvärdet påverkat.

Slutligen redovisas analys av kväveisotopen d¹⁵N i förhållande till taktyp och takålder enligt nedan.

Svarsvariabel	Förklarande variabel	Taktyp
Kväveisotop d ¹⁵ N (‰)	Takålder	Alla tak
		Alla tak exklusive west1
		Sedumtak (SMR)
		Ängstak (MER)
		Ängstak (MER) exklusive west1

Modellstatistik finns sammanställd i tabell 1–4, vilka återfinns på sid 28, 36, 42 och 43.

5.1 Kvävehalt

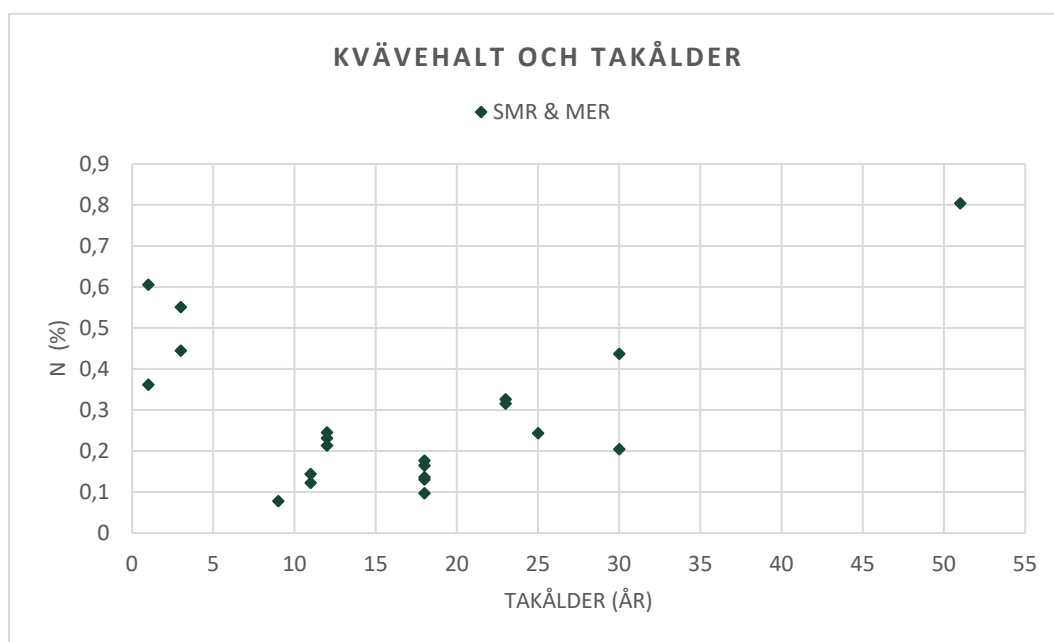
Nedan redovisas modellstatistik över hur kvävehalten i substraten påverkas av taktyp, ålder, organiskhalt och substratdjup, se tabell 1.

Tabell 1. Sammanställning av modellstatistik med kvävehalt som svarsvariabel. Signifikanta samband redovisas med fet textstil.

Svars- variabler	Enhet	Taktyp	Förklarande variabel	Modellstatistik					
				Förklarande variabels lutning	Std. error	Intercept	N	R ²	Sig.
Kvävehalt i substrat	N (%)	Alla tak	Takålder (år)	0,004	(0,004)	0,228	21	0,050	0,328
	N (%)	Alla tak exkl. West1	Takålder (år)	-0,006	(0,004)	0,348	20	0,118	0,139
	N (%)	(SMR)	Takålder (år)	-0,031	(0,007)	0,533	10	0,683	0,003
	N (%)	(MER)	Takålder (år)	0,019	(0,002)	-0,197	11	0,874	0,001
	N (%)	(MER) exkl west1	Takålder (år)	0,016	0,005	-0,126	10	0,529	0,017
	N (%)	Alla tak	Organisk halt (%)	0,044	(0,006)	-0,007	21	0,749	0,001
	N (%)	Alla tak exkl. west1	Organisk halt (%)	0,037	(0,006)	0,026	20	0,656	0,001
	N (%)	(SMR)	Organisk halt (%)	0,036	(0,008)	0,023	10	0,728	0,002
	N (%)	(MER)	Organisk halt (%)	0,060	(0,007)	-0,08	11	0,880	<0,001
	N (%)	(MER) exkl west1	Organisk halt (%)	0,132	(0,026)	-0,439	10	0,760	0,001
	N (%)	Alla tak	Substratdjup (cm)	-0,006	(0,007)	0,345	20	0,038	0,407
	N (%)	Alla tak exkl. west1	Substratdjup (cm)	-0,005	(0,005)	0,311	19	0,044	0,390
	N (%)	(SMR)	Substratdjup (cm)	0,093	(0,016)	0,024	9	0,831	<0,001
	N (%)	(MER)	Substratdjup (cm)	-0,013	(0,011)	0,442	11	0,142	0,254
	N (%)	(MER) exkl. west1	Substratdjup (cm)	-0,003	(0,006)	0,270	10	0,037	0,594

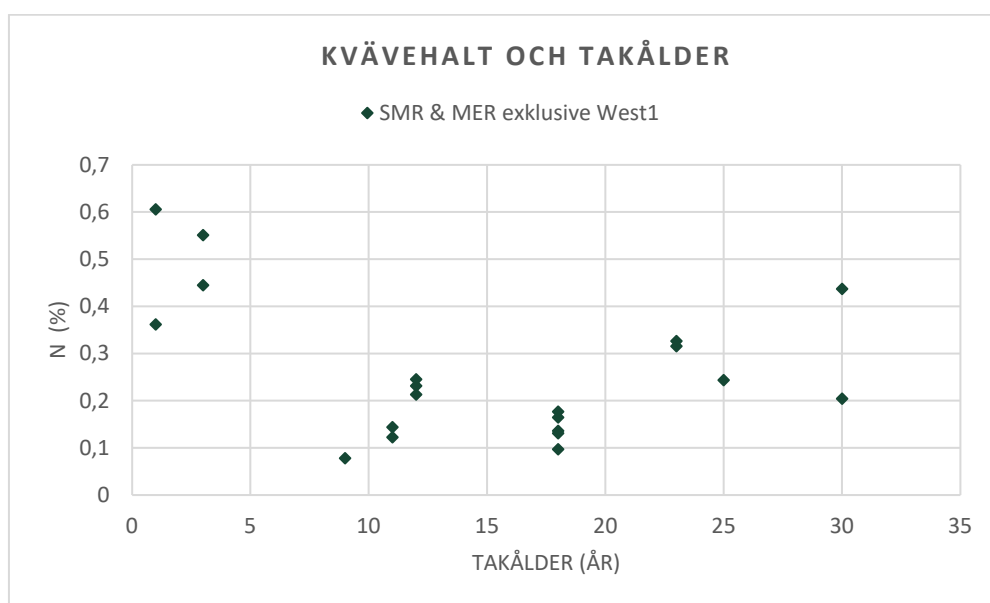
5.1.1 Kvävehalt och takålder

Resultaten visar att kvävehalten i takens substrat påverkas av både taktyp och takålder i signifikanta samband vid analys av taktyperna separat. Sedumtakens kvävehalt minskar med ökad takålder medan ängstakens kvävehalt ökar med ökad takålder. Vid analys av kvävehalt för samtliga tak (N=21) i förhållande till takålder, utan att dela upp taken efter taktyp, ses inget signifikant samband ($p = 0,328$), se figur 8 nedan.



Figur 8. Kvävehalt i förhållande till takålder för samtliga tak. Gröna prickar representerar ett tak. Linjär regressionsanalys: $p=0,328$ och $N=21$.

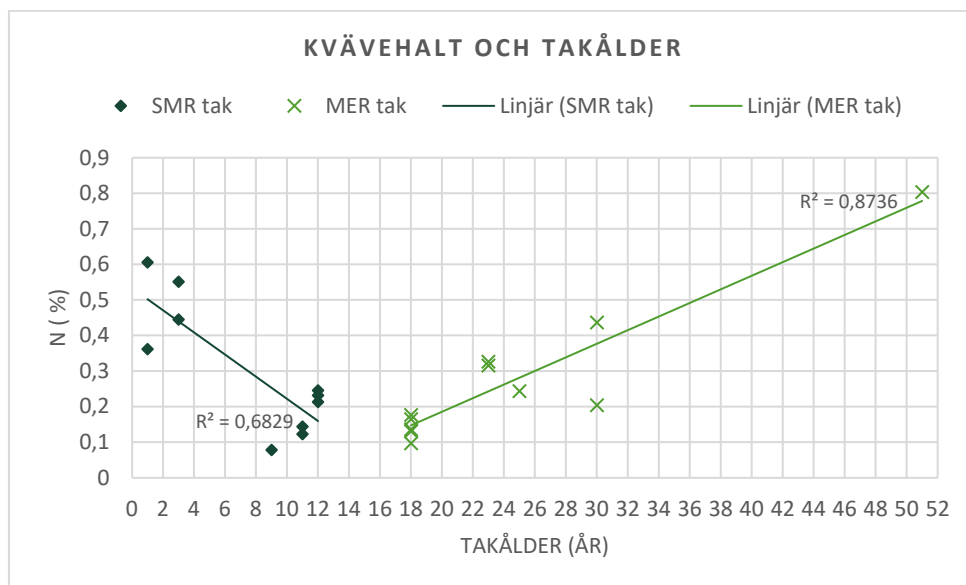
Om det äldsta taket, som bidrar med ett extremvärde, exkluderas från analysen erhålls fortfarande inget signifikant samband mellan kvävehalt och takålder ($p = 0,139$), se figur 9 nedan.



Figur 9. Kvävehalt i förhållande till ålder för samtliga tak exklusive det äldsta taket (West1). Linjär regressionsanalys: $p=0,139$ och $N=20$.

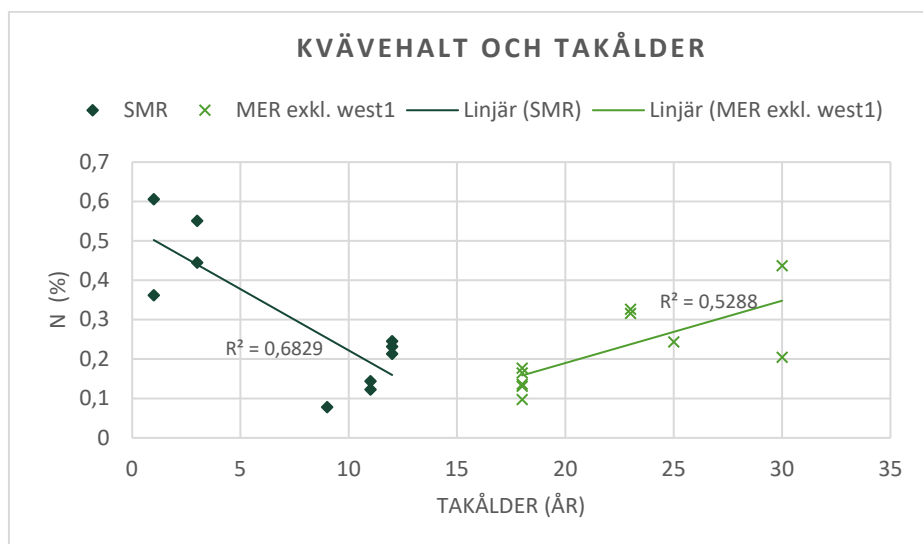
Vid separat analys för de två olika taktyperna sedumtak SMR (N=10) och ängstak MER (N=11) finns ett negativt signifikant samband mellan kvävehalt och takålder för sedumtaken (SMR) ($p=0,003$).

Ängstaken (MER) har däremot ett positivt signifikant samband mellan kvävehalt i substrat och takålder ($p=0,001$), se figur 10 nedan.



Figur 10. Substratens kvävehalt för sedumtak (SMR) och ängstak (MER) i förhållande till takålder för alla tak. Signifikanta samband illustreras med heldragen trendlinje ($p < 0,05$). Linjär regressionsanalys: (SMR): $p=0,003$, $N=10$. (MER): $p=0,001$, $N=11$.

Sambandet är signifikant även om analysen utförs utan det äldsta taket West1 ($p=0,017$), se figur 11 nedan.



Figur 11. Substratens kvävehalt för sedumtak (SMR) och ängstak (MER) i förhållande till takålder för alla tak exklusive west1. Signifikanta samband illustreras med heldragen trendlinje ($p < 0,05$). Linjär regressionsanalys: (SMR): $p=0,003$, $N=10$. (MER): $p=0,017$, $N=10$.

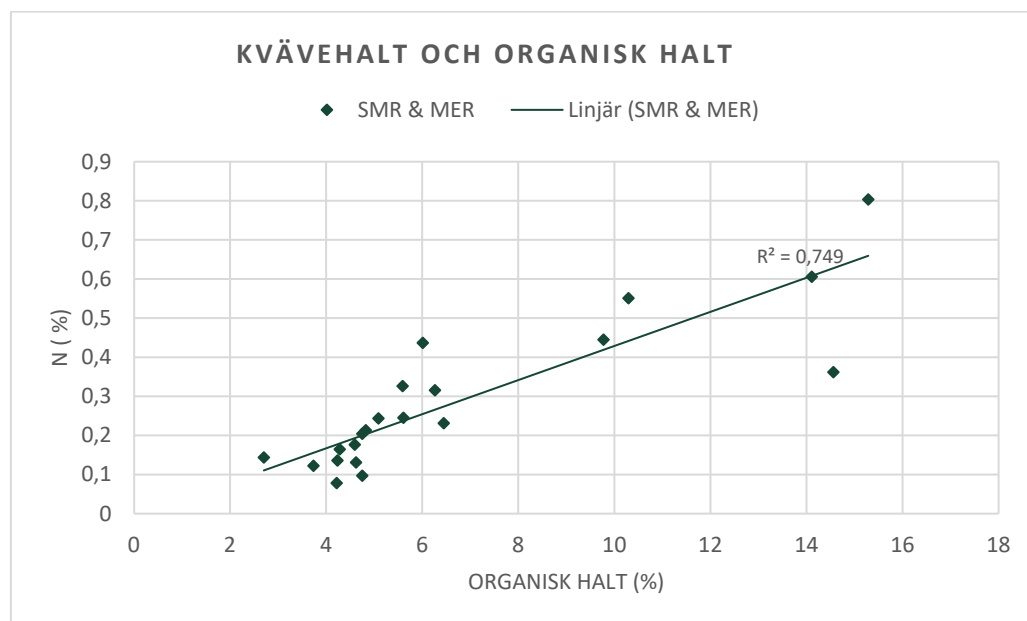
Att kvävehalten minskar med tiden för sedumtaken kan tänkas påverkas av en hög initial kvävehalt från anläggningsskedet. Om de fyra yngsta taken (1–3 år) som har en förhållandevis hög kvävehalt, exkluderas från analysen erhålls istället en positiv trendlinje för resterande sedumtak.

Det äldsta taket som är 51 år (West1) sticker ut med ett extremvärde i kvävehalt (0,8 %). Detta tak skiljer sig även i både sin uppbyggnad och växtkomposition jämfört med övriga tak. Om det äldsta taket, som bidrar med ett extremvärde, exkluderas från analysen erhålls fortfarande ett signifikant samband mellan kvävehalt och takålder för ängstaken.

Kvävehalt och takålder har däremot inget signifikant samband när man studerar alla taken tillsammans. Vilket kan bero på att sedumtaken har en negativ trendlinje medan ängstaken har en positiv trendlinje.

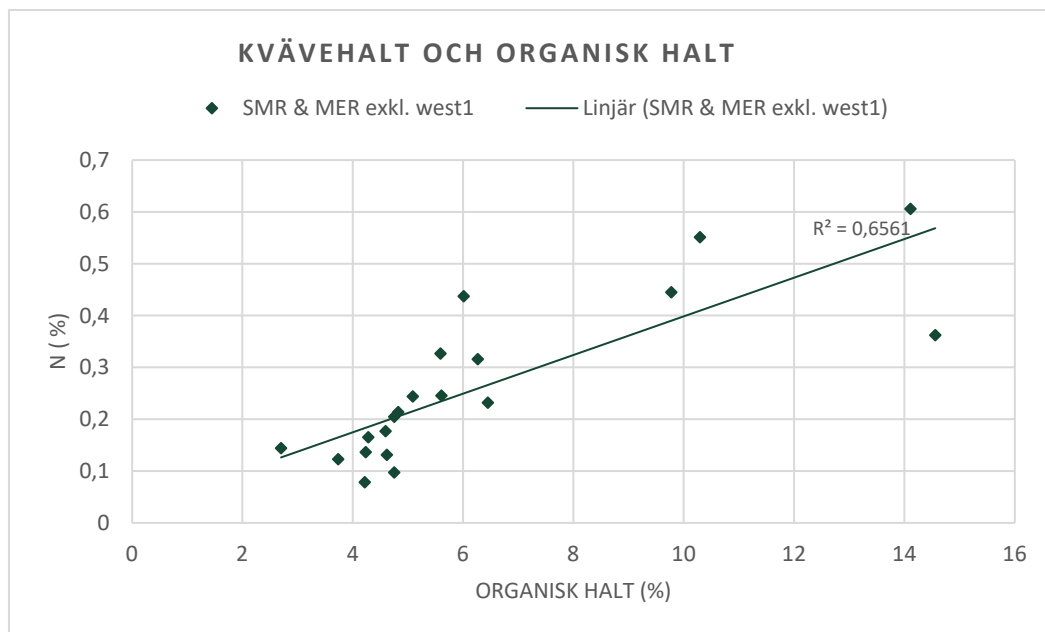
5.1.2 Kvävehalt och organisk halt

Kvävehalten ökar med ökad organiska halt i substratet. Sambandet är signifikant positivt ($p=0,001$) vid analys av alla tak tillsammans, se figur 12 nedan.



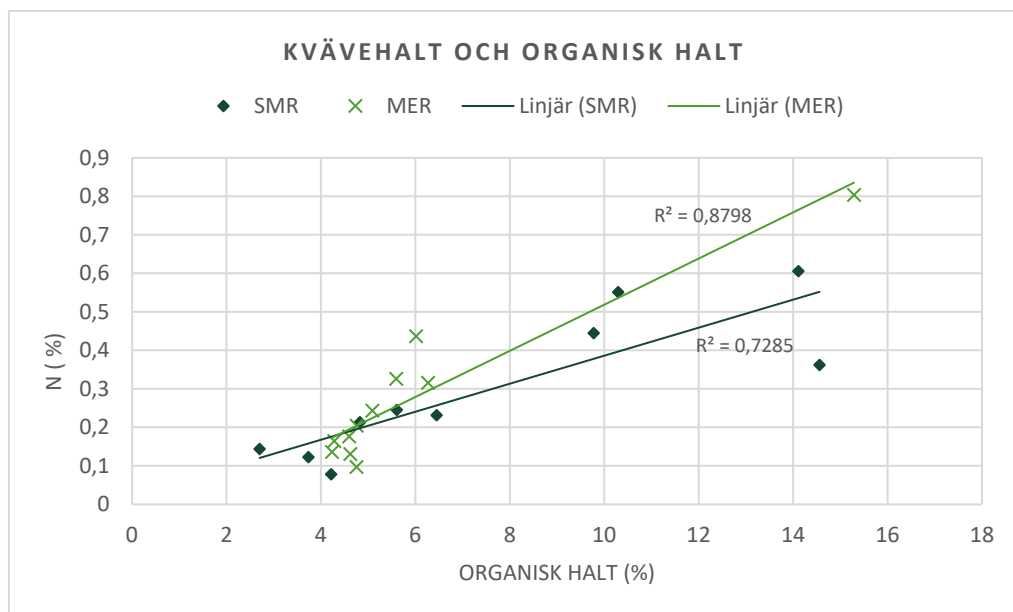
Figur 12. Kvävehalt i förhållande till organisk halt för alla tak. Signifikanta samband illustreras med heldragen trendlinje ($p < 0,05$). Linjär regressionsanalys: $p=0,001$, $N=21$.

Sambandet är signifikant ($p=0,001$) även om taket West1 utesluts från analysen.



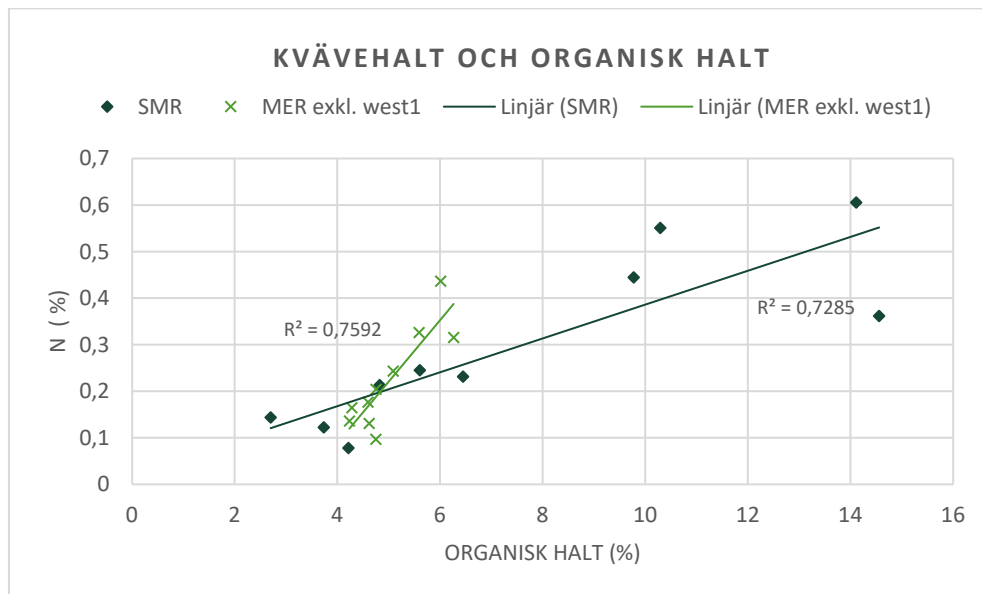
Figur 13. Kvävehalt i förhållande till organisk halt för alla tak exklusive west1. Signifikanta samband illustreras med heldragen trendlinje ($p < 0,05$). Linjär regressionsanalys: $p=0,001$, $N=20$.

Separat analys av de två tak typerna visar signifikant samband för både sedum- och ängstak där ökad organisk halt medför ökad kvävehalt i substratet vilket gäller för både sedumtak ($p=0,002$) och ängstak ($p=0,001$), se figur 14 nedan.



Figur 14. Kvävehalt i förhållande till organisk halt i substraten för samtliga 21 tak. Heldragen trendlinje visar signifikant samband ($p < 0,05$). Linjär regressionsanalys: (SMR) $p=0,002$, $N=10$, (MER) $p < 0,001$, $N=11$.

Sambandet är fortfarande signifikant om taket West1 exkluderas från analysen av ängstak ($p=0,001$) se figur 15 nedan.

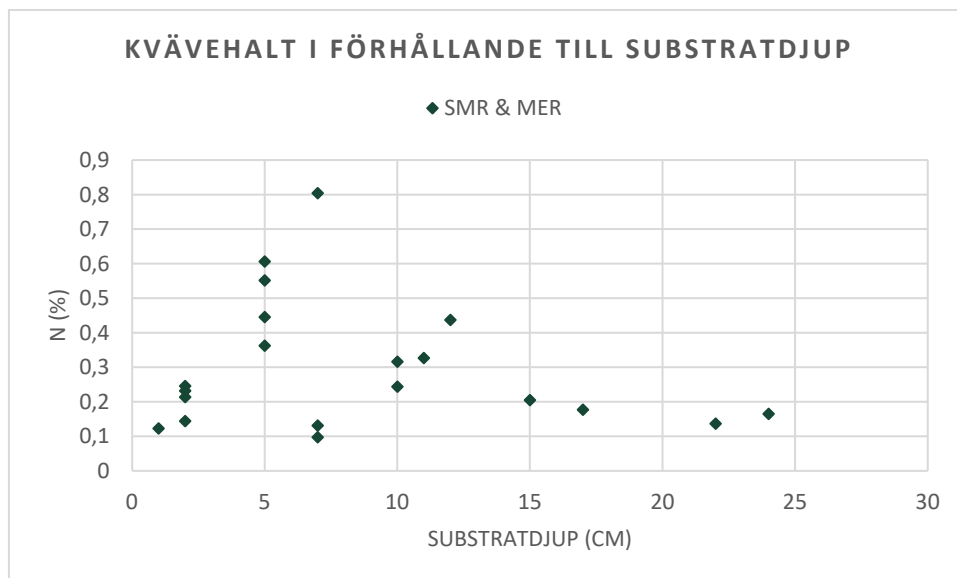


Figur 15. Kvävehalt i förhållande till organisk halt i substraten för samtliga tak exkl. West1. Helt dragen trendlinje visar signifikant samband. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p=0,002$, $N=10$, (MER) $p=0,001$, $N=10$.

5.1.3 Kvävehalt och substratdjup

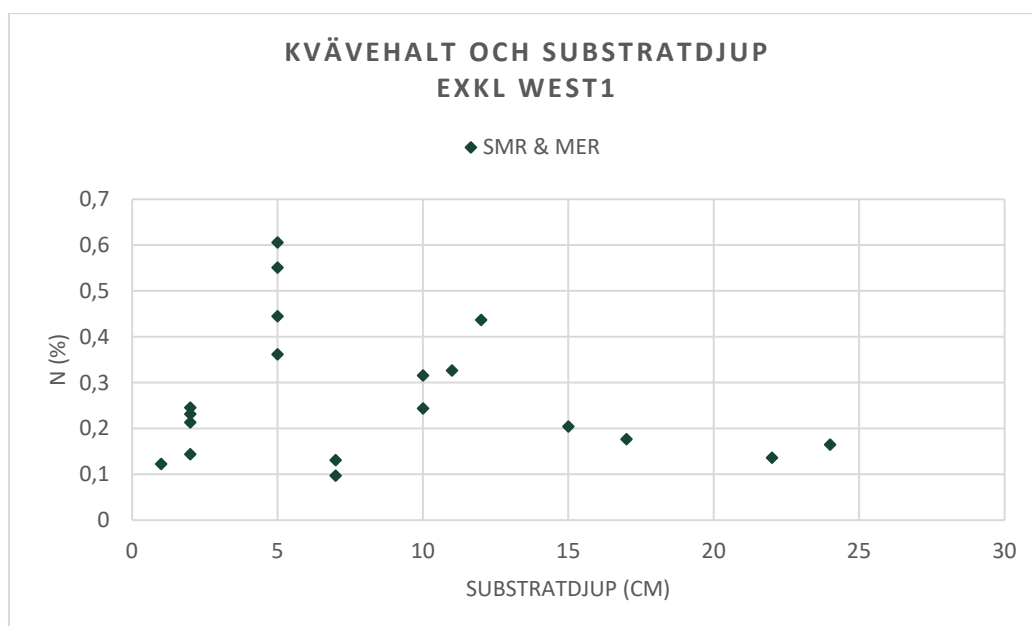
Vid analys av samtliga tak för kvävehalt i förhållande till substratdjup finns inget signifikant samband, se figur 16 nedan. Arbetets hypotes var att ökat substratdjup bidrar till ökad kvävehalt i jorden. Resultaten visar dock endast signifikant samband för sedumtaken mellan kvävehalt och substratdjup där kvävehalten ökar med ökat substratdjup.

Sambandet påverkas möjligen av de fyra yngsta sedumtaken (1–3 år gamla) som har relativt hög kvävehalt (0,36–0,6 %) jämfört med alla resterande tak, både sedum och ängstak, vilket kan påverka sambandet. Den höga halten hos dessa 4 sedumtak kan härstamma från när taken nyanlades. Även det äldsta taken West1 sticker ut med den högsta kvävehalten på 0,8 %.



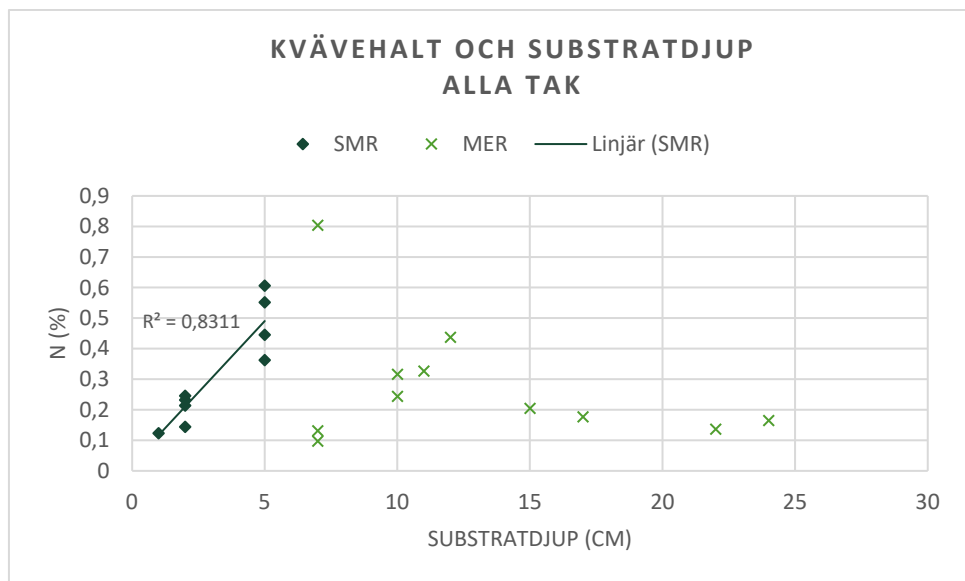
Figur 16. Kvävehalt i förhållande till substratdjup för alla tak. Linjär regressionsanalys: $p=0,407$, $N=20$.

Exkluderas taket west1 erhålls fortfarande inget signifikant samband.

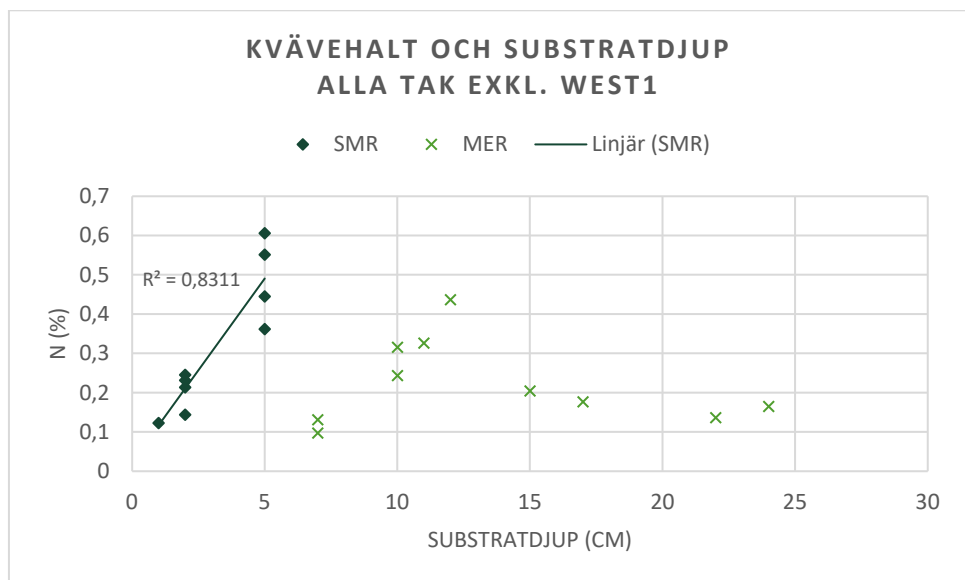


Figur 17. Kvävehalt i förhållande till substratdjup för alla tak exkl. west1. Linjär regressionsanalys: $p=0,390$, $N=19$.

Vid separat analys av de två taktyperna visar att sedumtaken (SMR)($N=9$) har ett signifikant samband ($p < 0,001$) där kvävehalten ökar med substratdjupet. Sambandet gäller dock inte för ängstaken (MER) ($N=11$) oavsett om analysen utförs med taket West1 ($p=0,575$) eller utan ($p=0,744$), se figur 18 och 19 nedan.



Figur 18. Kvävehalt i förhållande till substratdjup för sedum- och ängstak. Heldragen linje visar signifikant samband. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p < 0,001$, $N=9$, (MER) $p=0,254$, $N=11$.



Figur 19. Kvävehalt i förhållande till substratdjup för sedum- och ängstak exklusive West1. Heldragen linje visar signifikant samband. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p=0,002$, $N=10$, (MER) $p < 0,594$, $N=10$.

5.2 Kvävmängd

Kvävmängd i substraten anges i enheten (g N/m²). För omvandling av kvävehalt (N %) till (g/m²) har majoriteten av substratets kvävehalt antagits förekomma i substraten med fraktion <6 mm. Substratens kvävehalt N (%) har sedan multiplicerats med substratens uppmätta vikt per kvadratmeter (g/m²).

Modellstatistik över hur kvävmängd i substraten varierar med takålder, taktyp, organisk halt och substratdjup, redovisas i tabell 2 nedan.

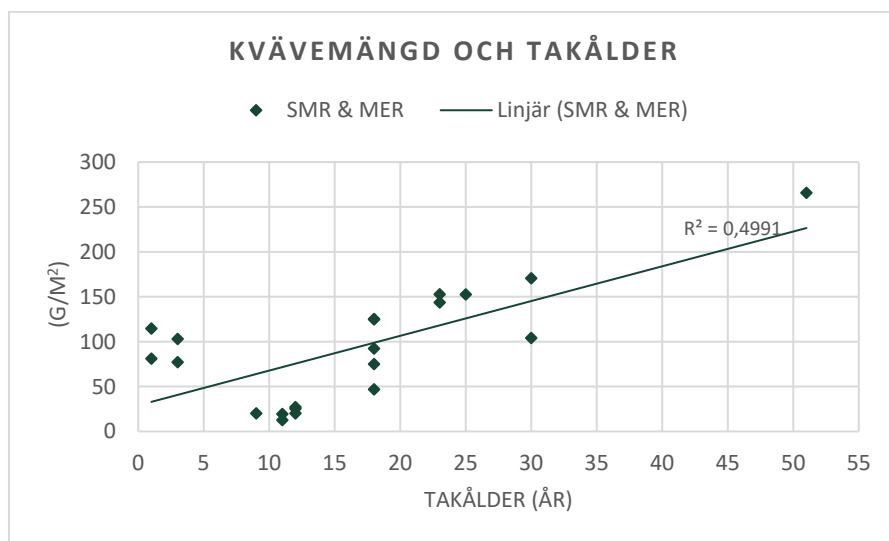
Tabell 2. Sammanställning över modellstatistik med kvävmängd som svarsvariabel. Signifikanta samband redovisas med fet textstil.

Svars- variabler	Enhet	Taktyp	Förklarande variabel	Modellstatistik					
				Förklarande variabels lutning	Std. error	Intercept	N	R ²	Sig.
Kvävmängd i substrat	N (g/m ²)	Alla tak	Takålder (år)	3,873	(0,890)	29,134	21	0,499	<0,001
	N (g/m ²)	Alla tak exkl. west1	Takålder (år)	2,925	(1,193)	41,195	20	0,250	0,025
	N (g/m ²)	(SMR)	Takålder (år)	-7,587	(0,992)	107,034	10	0,880	<0,001
	N (g/m ²)	(MER)	Takålder (år)	4,945	(1,032)	9,924	11	0,718	<0,001
	N (g/m ²)	(MER) exkl. west1	Takålder (år)	4,459	(2,306)	20,311	10	0,318	0,089
	N (g/m ²)	Alla tak	Organisk halt (%)	7,849	(3,492)	40,149	21	0,210	0,037
	N (g/m ²)	Alla tak exkl. west1	Organisk halt (%)	3,218	(3,649)	64,141	20	0,041	0,389
	N (g/m ²)	(SMR)	Organisk halt (%)	8,372	(1,304)	-13,719	10	0,837	<0,001
	N (g/m ²)	(MER)	Organisk halt (%)	15,303	(3,290)	41,124	11	0,706	0,001
	N (g/m ²)	(MER) exkl. west1	Organisk halt (%)	36,506	(14,590)	-64,344	10	0,439	0,037
	N (g/m ²)	Alla tak	Substratdjup (cm)	4,342	(2,008)	59,643	20	0,206	0,044
	N (g/m ²)	Alla tak exkl. west1	Substratdjup (cm)	4,684	(1,412)	47,439	19	0,393	0,004
	N (g/m ²)	(SMR)	Substratdjup (cm)	22,380	(2,597)	-18,659	9	0,914	<0,001
	N (g/m ²)	(MER)	Substratdjup (cm)	-1,847	(3,179)	156,051	11	0,036	0,575
	N (g/m ²)	(MER) exkl. west1	Substratdjup (cm)	0,689	(2,318)	109,547	10	0,011	0,744

5.2.1 Kvävmängd och takålder

Kvävmängden i substraten förväntades öka med ökad takålder och ökat substratdjup. Hypotesen kan delvis bekräftas genom att kvävmängden ökar med tiden för alla tak.

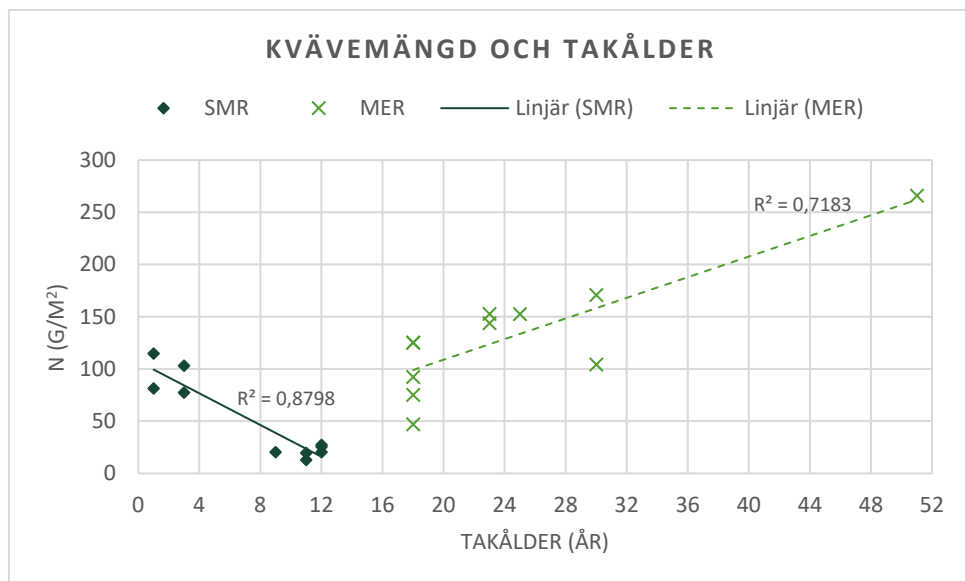
Resultaten tyder på att kvävmängden ökar med ökad takålder i ett signifikant samband ($p < 0,001$) när alla tak analyseras, se figur 20 nedan. Sambandet kvarstår om taket West1 utesluts från analysen ($p = 0,025$).



Figur 20. Kvävmängd i förhållande till takålder för samtliga tak. Linjär regressionsanalys: $p < 0,001$, $N=21$.

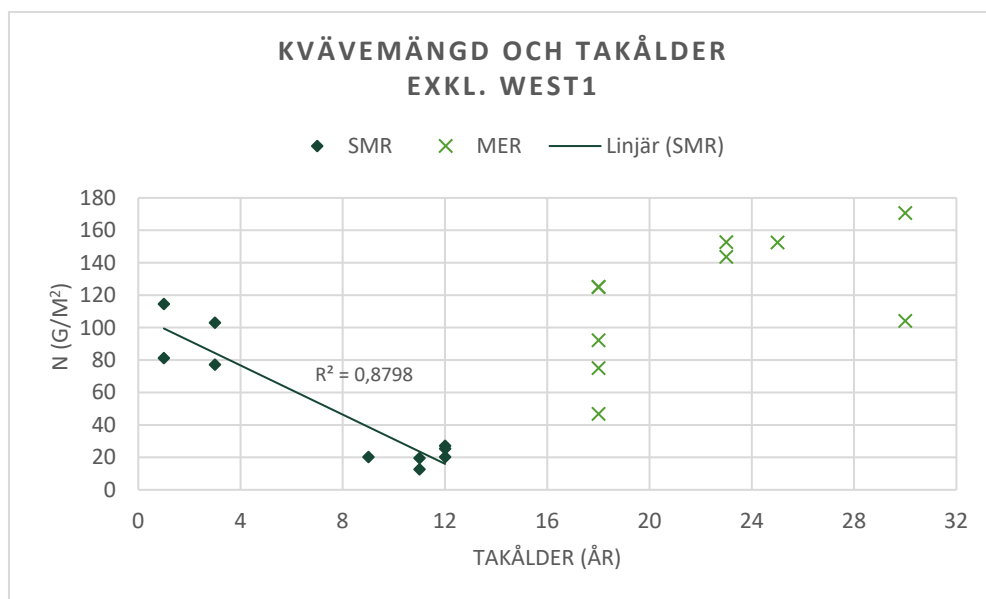
Separat analys av taktyperna (SMD och MER) visar ett signifikant samband för sedumtaken där kvävmängd minskar med ökad takålder. Ängstaken ser initialt ut att ha ett positivt signifikant samband ($p = 0,001$) där kvävmängden ökar med åldern, se figur 21 nedan, men sambandet påverkas av extremvärdet från West1 och vid exkludering att detta tak så försvagas sambandet ($p = 0,089$), se figur 22 nedan.

Sedumtakens samband kan vara påverkat av de yngsta takens höga kvävehalt som kan tänkas härstamma från anläggningsskedet. Ängstaken har över lag en högre halt av kväve ackumulerat i substraten jämfört sedumtaken.



Figur 21. Substratens kvävmängd i förhållande till takålder för alla tak. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p < 0,001$, $N=10$, (MER) $p < 0,001$, $N=11$.

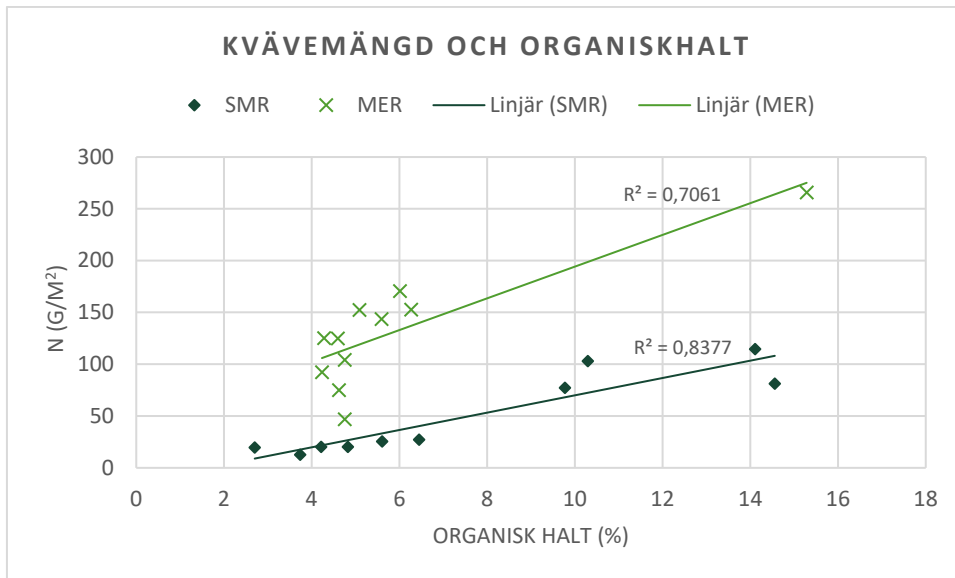
Ängstaken ser initialt ut att ha ett positivt signifikant samband ($p=0,001$), se figur 21, men sambandet påverkas av extremvärdet från West1 och vid exkludering att detta tak så försvagas sambandet ($p=0,089$), se figur 22 nedan.



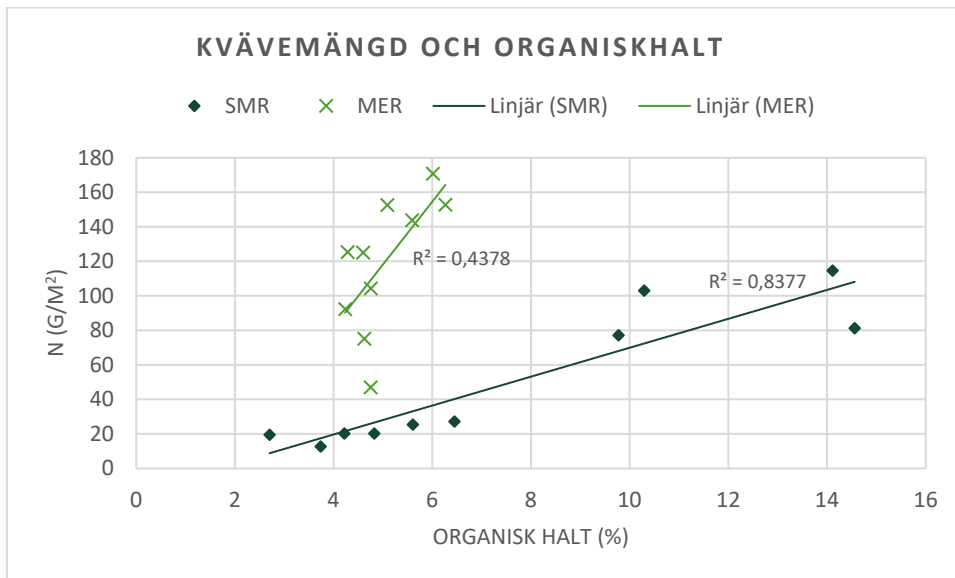
Figur 22. Takens kvävmängd i förhållande till takålder, för alla tak exklusive taket West1. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p < 0,001$, $N=10$, (MER) $p = 0,089$, $N=10$.

5.2.2 Kvävmängd och organiskhalt

När den organiska halten ökar i substraten så ökar även kvävmängden i substraten. Dessa samband är signifikanta för både sedumtaken ($p=0,001$) och ängstaken och även efter exkludering av West1 ($p=0,037$), se figur 23–24 nedan.



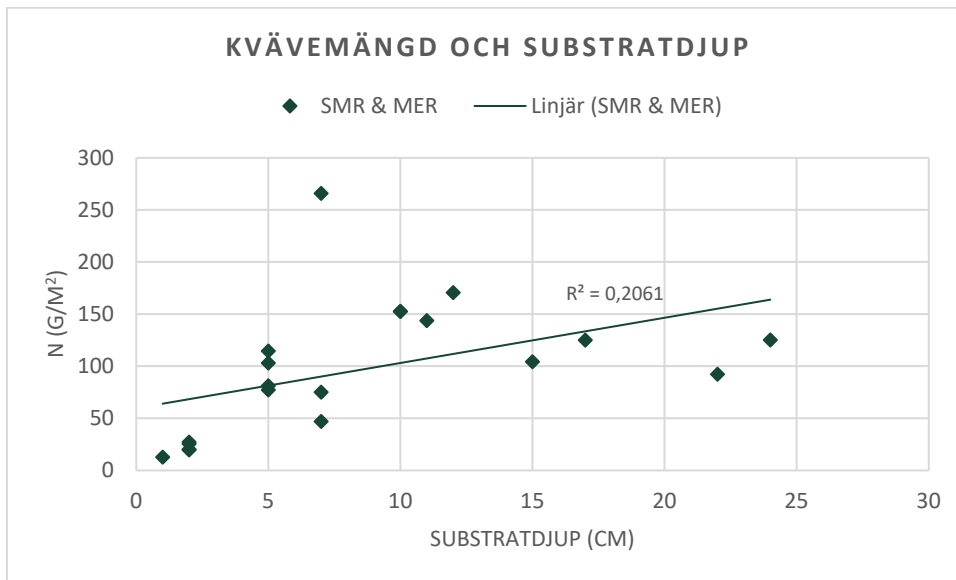
Figur 23. Kvävmängd i substrat i förhållande till organisk halt för alla tak. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p < 0,001$, $N=10$, (MER) $p = 0,001$, $N=11$.



Figur 24. Kvävmängd i förhållande till organisk halt för sedumtak och ängstak exklusive West1. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p < 0,001$, $N=10$, (MER) $p = 0,037$, $N=10$.

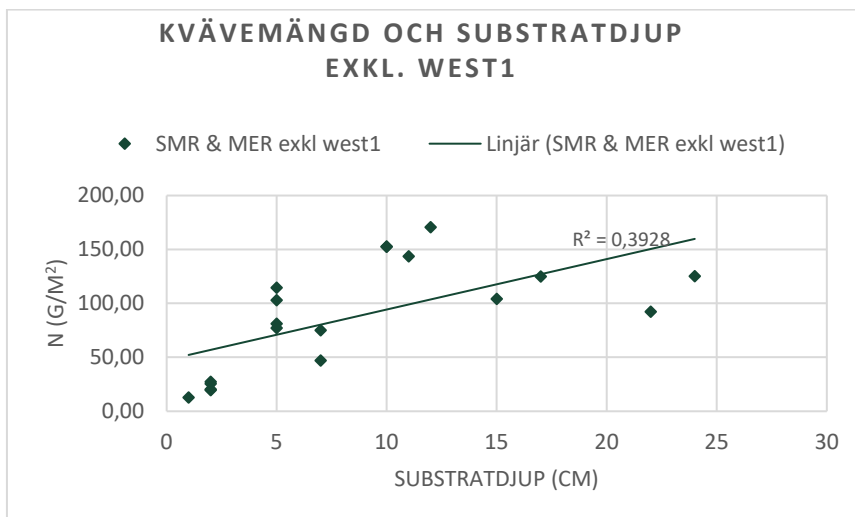
5.2.3 Kvävmängd och substratdjup

Arbetshypotesen om att kvävmängd ökar med ökat substratdjup bekräftas delvis då analys av alla tak tillsammans visar att kvävmängden ökar med ökat substratdjup. Kvävmängden i substratet ökar med ökat substratdjup i ett signifikant samband ($p=0,044$) vid analys av alla tak, se figur 25 nedan.



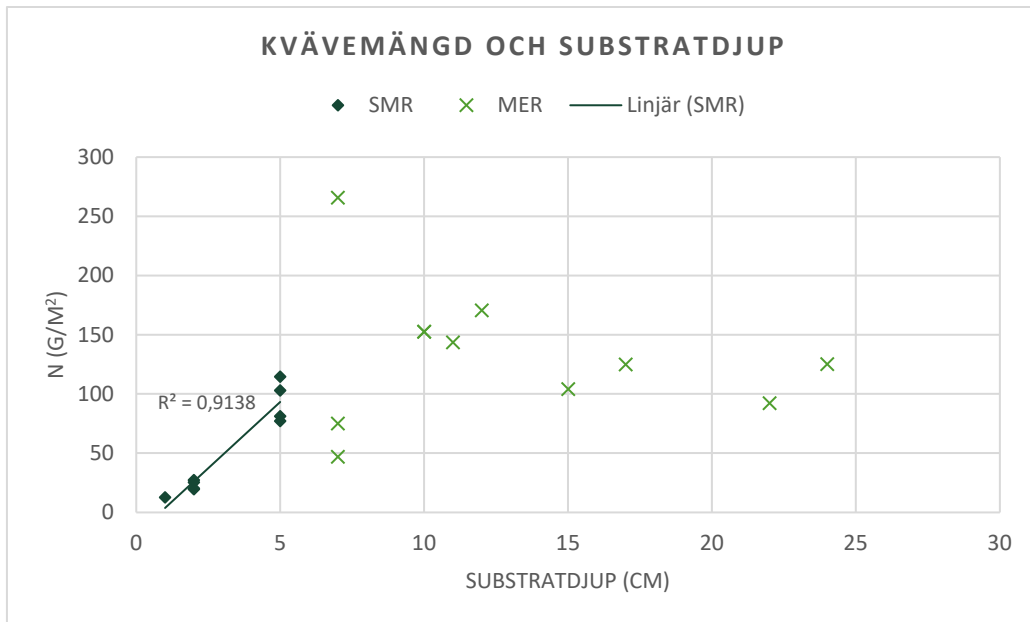
Figur 25. Kvävmängd i förhållande till substratdjup för alla tak. Signifikant samband ($p < 0,05$) illustreras med heldragen linje. Linjär regressionsanalys: $p=0,044$, $N=20$.

Taket West1 sticker ut med ett extremvärde på kvävmängd (266 g/m^2). Om taket exkluderas från analysen erhålls fortfarande ett signifikant samband ($p=0,004$) där kvävet ökar med ökat substratdjup, se figur 26 nedan.



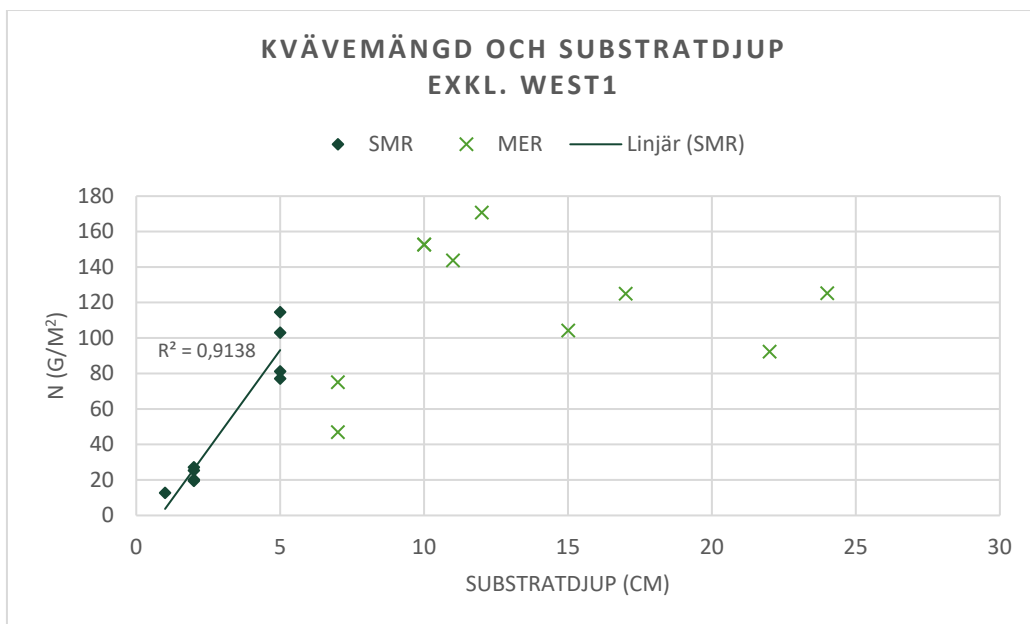
Figur 26. Kvävmängd i förhållande till substratdjup för alla tak exklusive West1. Signifikant samband ($p < 0,05$) illustreras med heldragen linje. Linjär regressionsanalys: $p=0,004$, $N=19$.

Vid separat analys av taktyperna erhålls ett positivt signifikant samband för sedumtaken ($p < 0,001$) där kvävet ökar med ökat substratdjup. För ängstaken finns inget signifikant samband mellan substratdjup och kvävemängd, se figur 27 nedan.



Figur 27. Kvävemängd i substraten i förhållande till substratdjup och taktyp för alla tak. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p < 0,001$, $N=9$, (MER) $p=0,575$, $N=11$.

Om taket West1 exkluderas från analysen av ängstaken erhålls fortfarande inget signifikant samband för ängstaken, se figur 28 nedan.



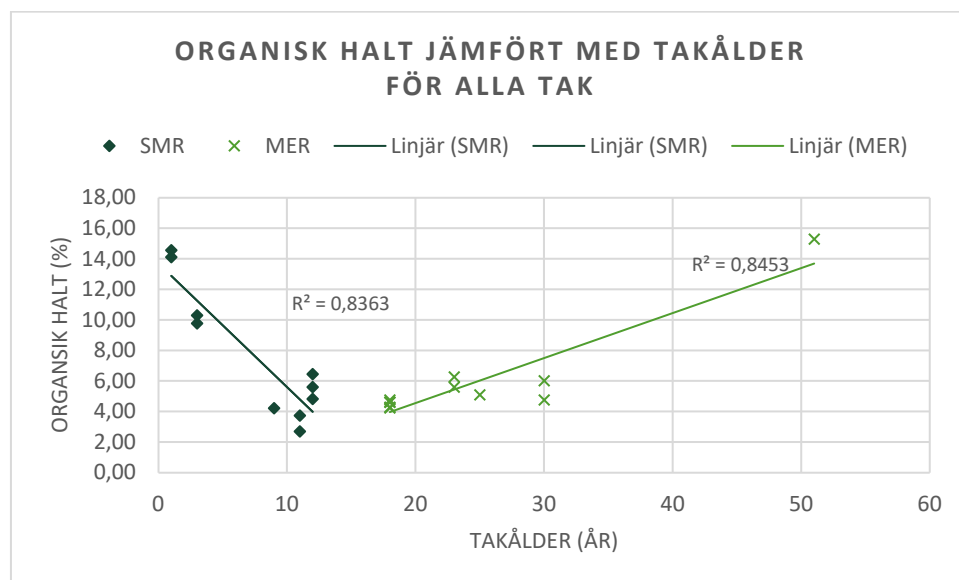
Figur 28. Kvävemängd i substraten i förhållande till substratdjup och taktyp för alla tak exkl. West1. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p < 0,001$, $N=9$, (MER) $p=0,744$, $N=10$.

5.3 Organisk halt och ålder

Tabell 3 Sammanställning över modellstatistik med organisk halt som svarsvariabel. Signifikanta samband redovisas med fet textstil.

Svars-variabler	Enhet	Taktyp	Förklarande variabel	Modellstatistik					
				Förklarande variabels lutning	Std. error	Intercept	N	R ²	Sig.
Organisk halt	(%)	Alla tak	Takålder (år)	-0,013	(0,073)	6,959	21	0,002	0,865
	(%)	Alla tak exkl. west1	Takålder (år)	-0,230	(0,068)	9,723	20	0,386	0,003
	(%)	(SMR)	Takålder (år)	-0,808	(0,127)	13,690	10	0,836	0,001
	(%)	(MER)	Takålder (år)	0,295	(0,42)	-1,332	11	0,845	<0,001
	(%)	(MER) exkl. west1	Takålder (år)	0,083	(0,041)	3,174	10	0,338	0,078

Den organiska halten i substraten påverkas av taktyp och ålder där sedumtakens organiska halt minskar med åldern och ängstakens organiska halt ökar med åldern i signifikanta samband, se figur 29 nedan.



Figur 29. Organisk halt jämfört med takålder för alla tak. Signifikant samband visas med heldragen trendlinje. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p=0,001$, $N=10$, (MER) $p<0,001$, $N=11$.

5.4 Indikation på kvävefixering i mossor

Hypotesen i arbetet är att kvävefixerande bakterier förekommer i mossan på taken och att dessa bidrar till kvävemängd i taken och att kvävemängd blir högre i äldre tak.

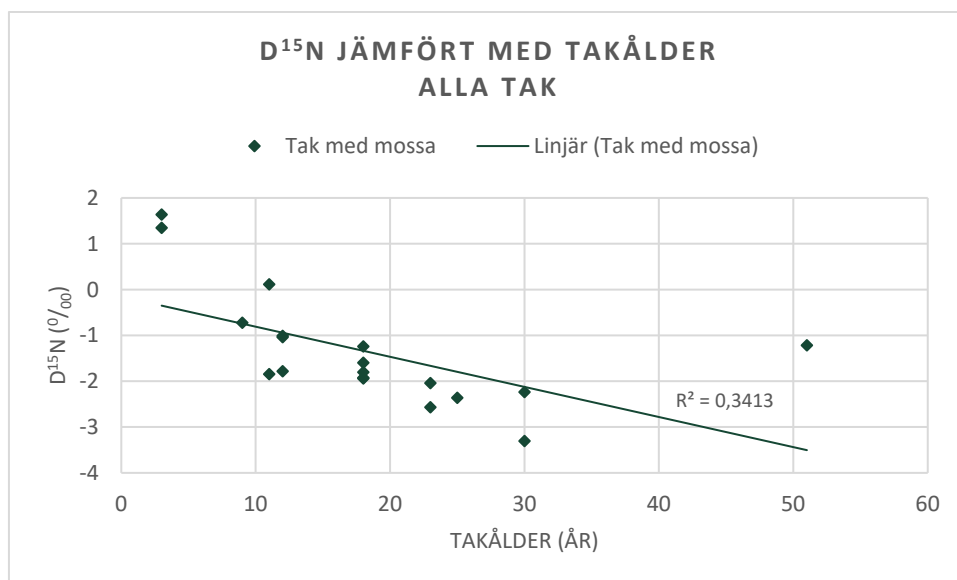
Utförda kväveisotop-analyser av $d^{15}N$ i mossans växtdelar visar på ett negativt signifikant samband mellan $d^{15}N$ och takålder. Värdena ligger relativt nära noll med ett spann från ca +1,6 till -3,3 ‰. Sedumtaken har över lag högre $d^{15}N$ värden jämfört med ängstaken, se bilaga 1.

I tabell 4 nedan redovisas modellstatistik över hur kväveisotop $d^{15}N$ i mossans växtdelar varierar som en funktion av takålder och taktyp.

Tabell 4. Sammanställning över modellstatistik med kväveisotop $d^{15}N$ som svarsvariabel. Signifikanta samband redovisas med fet textstil.

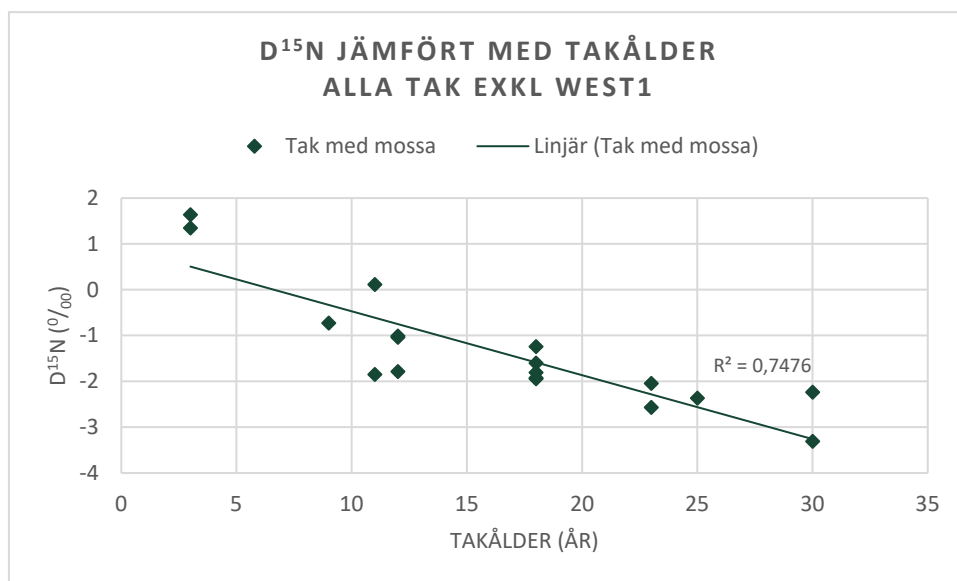
Svars- variabler	Enhet	Taktyp	Förklarande variabel	Modellstatistik					
				Förklarande variabels lutning	Std. error	Intercept	N	R ²	Sig.
Kväveisotop $d^{15}N$ i mossor	$d^{15}N$ (‰)	Alla tak	Takålder (år)	-0,066	(0,022)	-0,154	19	0,341	0,009
	$d^{15}N$ (‰)	Alla tak exkl. West1	Takålder (år)	-0,139	(0,020)	0,924	18	0,748	<0,001
	$d^{15}N$ (‰)	(SMR)	Takålder (år)	-0,304	(0,062)	2,355	8	0,797	0,003
	$d^{15}N$ (‰)	(MER)	Takålder (år)	0,003	(0,020)	-2,110	11	0,003	0,867
	$d^{15}N$ (‰)	(MER) exkl. west1	Takålder (år)	-0,091	(0,025)	-0,097	10	0,624	0,007

I jämförelsen mellan kväveisotopen $d^{15}N$ i mossor och takålder framgår att $d^{15}N$ minskar med ökad takålder i ett signifikant samband ($p=0,001$) när alla taken analyseras, se figur 30 nedan.



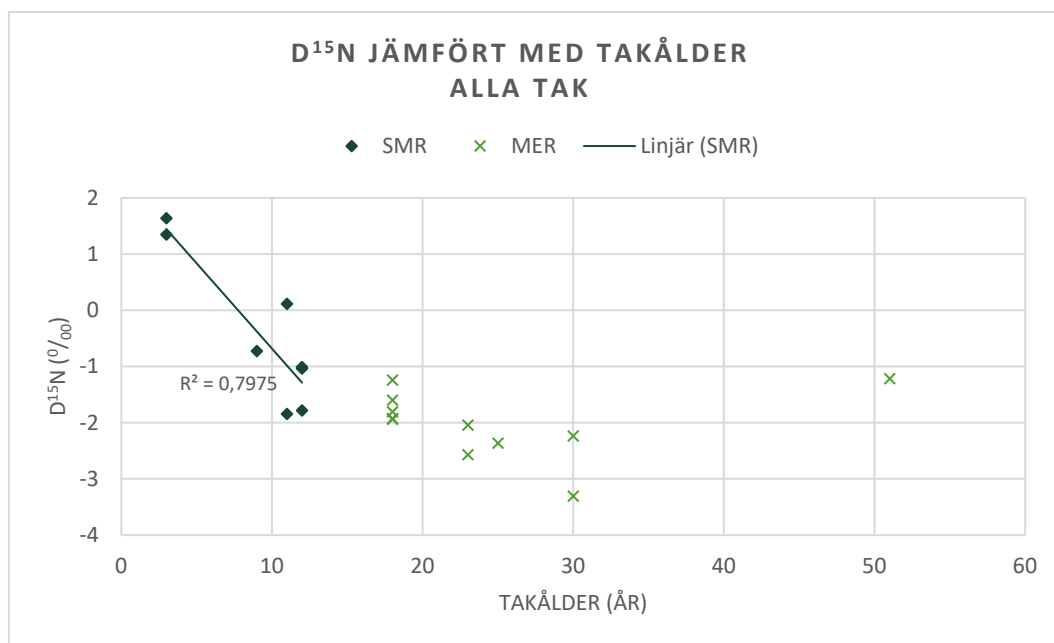
Figur 30. $D^{15}N$ jämfört med takålder för alla tak. Heldragen trendlinje visar signifikant samband. Linjär regressionsanalys: $p=0,009$, $N=19$.

Analys av $d^{15}N$ i förhållande till takålder för alla tak utan West1 visar fortfarande ett signifikant samband ($p < 0,001$), se figur 31 nedan.



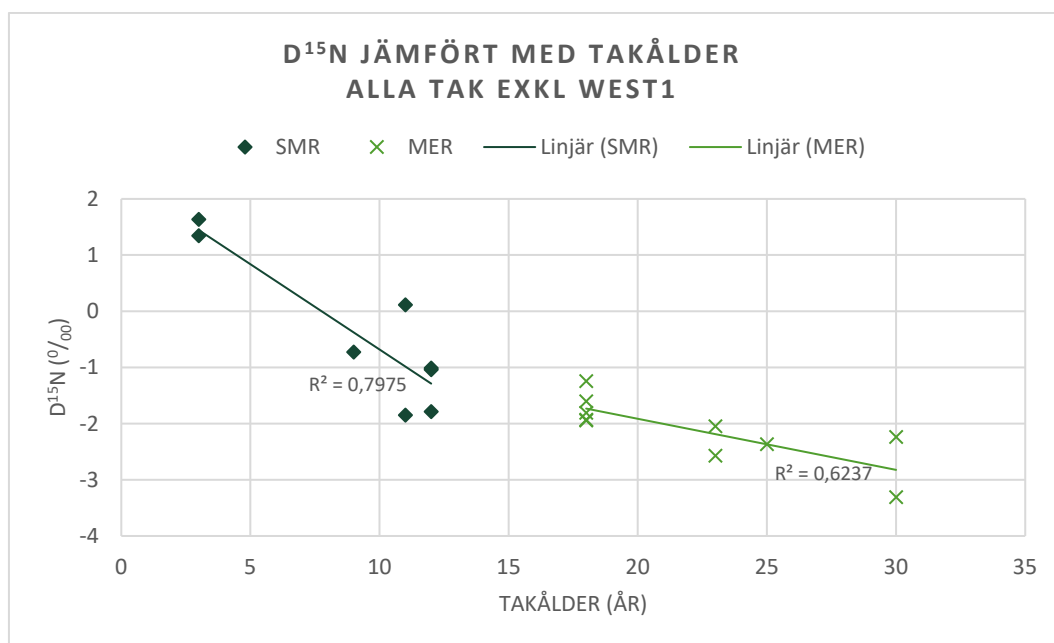
Figur 31. $D^{15}N$ i förhållande till takålder för alla tak exklusive West1. Heldragen trendlinje visar signifikant samband. Linjär regressionsanalys: $p < 0,001$, $N=18$.

Vid separat analys för de två taktyperna ses signifikant samband för sedumtaken (SMR) ($p=0,003$) men inte för ängstaken (MER), se figur 32 nedan.



Figur 32. D¹⁵N i förhållande till takålder för de två olika taktyperna. Heldragen trendlinje visar signifikant samband. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p=0,003$, $N=8$, (MER) $p=0,867$, $N=11$.

Analysen påverkas av taket West1 som bidrar med ett extremvärde. Exkluderas detta tak ses ett signifikant samband även för ängstaken ($P=0,007$), se figur 33 nedan.



Figur 33. D¹⁵N i förhållande till takålder för alla tak exklusive West1. Heldragen trendlinje visar signifikant samband. Linjär regressionsanalys: (SMR) $p=0,003$, $N=8$, (MER) $p=0,007$, $N=10$.

5.5 Sammanfattning av resultaten

Enligt hypotesen förväntades kvävehalten att öka med ökad takålder och ökat substratdjup. Resultaten från arbetet kan delvis bekräfta hypotesen. Det finns signifikant samband mellan kvävehalt och takålder men endast om man analyserar taktyperna (sedumtaken och ängstaken) var för sig.

Sedumtakens kvävehalt ökar med ökad organisk halt och substratdjup i positiva signifikanta samband vilket bekräftar hypotesen om att kvävehalt ökar med ökat substratdjup. Men däremot minskar sedumtakens kvävehalten med ökad takålder i ett negativt signifikant samband.

Ängstakens kvävehalt ökar däremot med ökad takålder samt ökad organisk halt i positiva signifikanta samband vilket stämmer med hypotesen. Men däremot finns inget samband mellan ängstakens kvävehalt och substratdjup.

Tittar man dock på samtliga tak tillsammans (SMR + MER) så ses ett positivt signifikant samband mellan kvävemängd och substratdjup där ökat substratdjup medför ökad kvävemängd.

Resultaten från kväveisotopanalyserna av mossans växtdelar som jämförs med takålder visar ett signifikant negativt samband mellan kväveisotopen $d^{15}N$ och takålder där $d^{15}N$ minskar med ökad takålder. Värdena ligger även relativt nära noll med ett spann från +1,6 till -3,3 ‰ och där sedumtaken har generellt högre $d^{15}N$ värden jämfört med ängstaken.

6. Diskussion

Kapitlet diskuterar erhållna resultat och dess inverkan på de gröna takens ekosystemtjänster på lång sikt.

6.1 Taktypen påverkar kvävet i taken

Resultaten visar att kvävehalt i substraten förändras över tid på olika sätt beroende på taktyp. Där ängstakens kvävehalt ökar med tiden medan sedumtakens kvävehalt minskar över tid. Detta bekräftar delvis hypotesen om att äldre tak har högre kvävehalt än de yngre taken.

Dessa resultat kan jämföras med en tidigare studie av Mitchell, Emilsson & Buffam (2021) som visar att de gröna sedumtaken i Malmö ackumulerar kväve och att kvävehalten ökar med åldern i ett linjärt samband utan tecken på avstanning efter 22 år. Taken i den studien hade likartad uppbyggnad på både substrat och växtkomposition med 2,5–3 cm substrat planterade med sedum- och fetbladsväxter. Taken kom även från samma leverantör och hade inte gödslats eller haft någon skötsel (Mitchell, Emilsson, Buffam 2021).

Om resultaten från denna undersökning jämförs med studien i Malmö, ses att ängstaken i Helsingfors och sedumtaken i Malmö båda visar på en ökad kvävehalt med ålder trots att taken har olika substratdjup och taktyp. Medan kvävehalten i sedumtaken i Helsingfors sjunker med ökad takålder och att de yngsta nyanlagda sedumtaken (1–3 år) har en relativt hög kvävehalt i förhållande till de äldre sedumtaken.

Sedumtaken i Helsingfors följer inte samma mönster som sedumtaken i Malmö avseende kvävemängd och ålder utan tenderar att förlora kväve över tid. En förklaring kan ligga i att gröna tak ofta kan installeras med ett kväverikt substrat exempelvis innehållandes kompost för att gynna en god växtetablering (Mitchell m.fl. 2018) och detta skulle även kunna var fallet för de yngsta taken i Helsingfors. Hög kvävehalt kan dock medföra risk för kväveläckage från taken de första åren efter installation (Mitchell m.fl. 2018).

Resultaten från denna undersökning visar även att kvävet i sedumtaken påverkas av substratdjupet mer än vad ängstaken gör. Där ett ökat substratdjup ger ökad kvävehalt i sedumtaken. Detta samband gick inte att se hos ängstaken. Kvävehalt och kvävemängd ökade även med ökad organisk halt i substraten oavsett taktyp. Att kvävehalten i ängstaken ökar med åldern kan minska risk för kvävebrist och på lång sikt gynna växtligheten på taken, vilket i sin tur gynnar takens förutsättningar för att leverera de förväntade ekosystemtjänsterna.

6.2 Ökad organisk halt kan indirekt gynna ekosystemtjänster

Undersökningen visar att ökad organisk halt i substraten medför ökad kvävehalt och kvävemängd i substraten. Taktypen påverkar däremot hur den organiska halten förändras över tid, där sedumtakens organiska halt minskar med ökad takålder och ängstakens organiska halt ökar med ålder.

Detta kan jämföras med tidigare studie av tak i Malmö (Mitchell, Emilsson, Buffam 2021) som visade att trots ökad kvävehalt i både substrat och växter så ökade inte den organiska halten i jorden över tid (Mitchell, Emilsson, Buffam 2021). Detta skiljer sig från resultaten i denna studie som visar på att sedumtaken förlorar organisk halt med åldern medan ängstakens organiska halt ökar med åldern. En ökad organisk halt i jorden kan medföra att mer kväve kan mineraliseras och omvandlas till växttillgängligt kväve under växtperioden, till fördel för växterna (Sixtensson 2006) och kan gynna de gröna takens funktion och dess ekosystemtjänster på lång sikt.

6.3 Gödsel kan minska kvävefixering

Undersökningen visar att de yngsta taken har ett hög halt av kväveisotopen $d^{15}N$ i förhållande till övriga tak, vilket skulle kunna tyda på att organiskt gödsel har använts vid anläggningen. Indikationen baseras på att organisk gödsel innehåller större mängd av kväveisotopen ^{15}N än konstgödsel (Einarsson 2011). Detta eftersom nitrifikation, denitrifikation och upptag av växter separerar de två olika kväveisotoperna (Einarsson 2011). Konstgödsel tenderar dock att ha ett kväve ^{15}N värde nära noll, vanligtvis mellan -2 och +2 ‰ (Bateman, Kelly, Woolfe, 2007) vilket är ett spann där även fler äldre tak hamnar. Här fordras dock fortsatt forskning för att säkrare kunna svara på sambanden i gröna tak. Gödsling av mossa kan försämra mossans kvävefixerande förmåga enligt en undersökning av Zakrisson m.fl. (2004) som visar att gödsling med NH_4NO_3 i boreala ekosystem påverkar mossan (väggmossa, *Pleurozium schreberi*) så att kvävefixering helt upphör vid en gödselmängd på 0,45g N/ m² år.

6.4 Indikation på kvävefixering i mossan

Hypotesen för forskningsfråga 3 är att mossan på de gröna taken samarbetar med kvävefixerande bakterier som bidrar till ökad kvävemängd i substraten i de gröna taken och att denna blir högre i äldre tak.

Mossan förväntas bidra med ökad kvävehalt i taken eftersom mossan inte har rötter utan tar upp vatten och näring från luften och därigenom inte förbrukar

något kväve från jorden och konkurrerar inte heller om det begränsade rotutrymmet i jorden (Blomquist & Lodin 2013). Mossan kan även samarbeta med kvävefixerande bakterier som lever på mossans växtvävnad ovan jord och eventuellt kväveöverskott kan lakas ut från mossan vid regn och komma jorden tillgodo (Blomquist & Lodin 2013). Mossan har även hög vattenhållande förmåga vilket kan gynna taken genom ökad fukthalt och jämnare temperatur i substraten vilket gynnar andra växter och kvävefixerande bakterier i jorden (Blomquist & Lodin 2013). Mossans kvävefixering förväntas öka med åldern (Zakrisson m.fl. 2004) vilket skulle kunna medföra att äldre gröna tak gynnas mer av mossans kvävefixering.

Resultaten visar ett signifikant negativt samband mellan kväveisotopen $d^{15}N$ och takålder där $d^{15}N$ minskar med ökad takålder. Värdena ligger även relativt nära noll med ett spann från +1,6 till -3,3 ‰ och där sedumtaken har generellt högre $d^{15}N$ värden jämfört med ängstaken, se figur 23.

För att ge omfattande svar på varför $d^{15}N$ värdet sjunker med ökad takålder krävs fortsatta studier inom området då det under arbetet inte har påträffats mycket forskning om förändringar i isotopsignaturer hos mossor på gröna tak.

Litteraturstudier tyder dock på att växter som förlitar sig på kvävefixerande bakterier vanligen antas ha ett $d^{15}N$ -värde kring 0 ‰ (Craine m.fl. 2015 sid 12). Kvävefixerande cyanobakterier på mossor använder atmosfäriskt kväve vilket medför låga $d^{15}N$ -värden som brukar ligga i spannet -2,7 till 1 ‰ (Larsson, m.fl. 2014).

Resultaten visar att $d^{15}N$ -värden från utförda isotopanalyser ligger relativt nära noll och relativt väl inom spannet (-2,7 till 1 ‰), förutom de två yngsta taken och ett tak i 30 års åldern. Resultaten kan då tyda på förekomst av kvävefixerande bakterier hos mossorna som bidrar till systemets kvävemängd.

Resultaten visar även att de gröna takens $d^{15}N$ nivåer sjunker med ökad takålder. En förklarande idé skulle kunna bero på förändringar i klimatet då $d^{15}N$ -värden i växter och jordar har visat sig minska med ökad årlig nederbörd och även med och minskad årlig temperatur (Amundson 2003). De äldre gröna taken i Helsingfors har möjligen utsatts för lägre årliga temperaturer i tidigare skede jämfört med de yngre taken.

En annan möjlig förklaring till att de äldre taken har lägre $d^{15}N$ värde skulle kunna vara att taken har utsatts för ökad luftförorening genom åren som härstammar från trafik, eftersom $d^{15}N$ värdet stiger med ökad NO_x påverkan från trafik och sjunker med ökad NH_x påverkan (Pearsson m.fl. 2000). Pearsson m.fl. (2000) gjorde en studie där de samlade in mossprover i närhet av motorvägar samt mossprover från lantlig miljö och $d^{15}N$ värdet i mossan jämfördes. Studien visade att mossprover som utsatts för luftförorening (NO_x) från hårt trafikerade vägar hade högre värden på $d^{15}N$ värden och låg i ett spann på +6 till -1 ‰. Medan mossprover som samlats in i lantlig miljö hade lägre $d^{15}N$ värden i ett spann på -2 till -12 ‰. Studien indikerar på att NO_x och NH_x från atmosfären bidrar till olika

$\delta^{15}\text{N}$ värden i mossan (Pearson m.fl. 2000). Mossans kvävefixering kan dessutom öka med ålder (Zakrisson m.fl. 2004) vilket skulle kunna innebära att de äldre takens mossa fixerar mer kväve än de yngre taken.

Slutsatser som kan dras för den sista forskningsfrågan är att det behövs mer forskning inom området där mossans kvävefixerande roll på de gröna taken undersöks.

7. Slutsatser

Slutsatser som kan dras från detta arbete är att sedumtaken i undersökningen tenderar att förlora kväve med åldern vilket skiljer sig mot tidigare studier av sedumtak i Malmö (Mitchell, Emilsson, Buffam 2021) som istället visar på en ökad kvävehalt i substraten med ökad takålder. Vad som bidrar till denna skillnad är oklart. Sedumtakens förmåga att leverera ekosystemtjänster över tid kan påverkas av om kvävebrist uppstår i taken eller om kvävet ökar i substraten över tid.

Ängstaken däremot visade tendens till att kunna öka kvävehalten i substraten med åldern vilket kan vara bra information vid val av taktyp i tidigt skede. Då en ökning av kvävehalt i substraten på sikt kan minska risk för kvävebrist och gynna takets förmåga att leverera ekosystemtjänster på sikt.

Arbetets resultat visar på att olika faktorer kan påverka kvävehalten i gröna tak över tid och att dessa konstruerade ekosystems påverkas av olika val som görs i tidigt skede. Där exempelvis en ökad organisk halt i substraten bidrar till ökad kvävehalt i jorden oavsett taktyp vilket indirekt kan gynna växtligheten på taken och dess förmåga att leverera ekosystemtjänster vilket kan vara bra information vid val av substrat till taket.

Litteraturstudien tyder på att mossor kan bidra med flera positiva kvaliteter till det gröna taket så som att tillföra kväve till substraten, bidra med vattenhållande förmåga och därigenom även minska uttorkning av jorden, dämpa temperaturväxlingar i jorden samt öka nedbrytningen och gynna mikrolivet i jorden för både växter och kvävefixerande bakterier i jorden. Mossan konkurrerar inte heller om näringen i jorden eller det begränsade rotutrymmet i substraten. Fortsatta studier behövs dock för att visa att mossan bidrar med ökad kvävehalt i substraten på de gröna taken.

8. Förslag på vidare forskning

Gröna tak av enbart mossor skulle möjligen kunna erbjuda många av de ekosystemtjänsterna som sedumtak kan erbjuda men utan samma krav på substratdjup och substratsammansättning. Ett grönt tak av mossor skulle då kunna medföra ett tak med lättare konstruktionsvikt och därigenom möjligen ett billigare alternativt anläggningsmässigt (Burszta- Adamiak et al. 2019). Mossor och lavar förekommer i boreala ekosystem även i kallare klimat vilket skulle kunna innebära att gröna tak av mossor skulle kunna vara ett alternativ i kallare klimat där växtvalen är mer begränsade. Mossor kan även trivas i skuggiga förhållanden vilket kan vara en fördel i den förtätade staden med brist på direkt solljus i vissa lägen. Många av sedumtakens fördelar som bidrar med ekosystemtjänster kan tänkas gälla även för mossor så som exempelvis fördröjning och reducering av dagvatten då mossan har vatten- och näringshållande förmåga, (Blomquist & Lodin 2013). Bidra med kvävefixering och upptag av NO_x från trafik (Bay 2013, sid 62), men även att fånga upp partiklar, metaller och luftföroreningar samt binda koldioxid, avge syre och verka bullerdämpande. Mossan kan även verka temperaturreglerande, öka den biologiska mångfalden och bidra med hälsofrämjande utsikt.

Förslag på vidare studier kan vara att jämföra ekosystemtjänster som gröna tak av mossor kan erbjuda jämfört med sedumtak. Kan takkonstruktionens vikt och anläggningspris reduceras med ett moss-tak jämfört med ett sedumtak? Kan ett moss-tak vara fördelaktigt i kallt klimat?



Figur 34. Mossor och lava. Foto från Pixabay 2022-05-04.

Referenser

- Ackerman, K., Zakrisson, O., Rousk, J., Jones, D. L., (2012) N₂ Fixation in Feather Mosses is a Sensitive Indicator of N Deposition in Boreal Forests. Källa: *Ecosystems*, September 2012, Vol. 15, No. 6 (September 2012), sid. 986-998
Published by: Springer, <https://www.jstor.org/stable/23253738>
- Amundson, R., Austin, A. T., Schuur, E. A. G., Yoo, K., Matzek, V., Kendall, C., Uebersax, A., Brenner, D. & Baisden, W. T. (2003), Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen, *Global biogeochemical cycles*, vol. 17, no. 1, 1031, doi:10.1029/2002GB001903, 2003
- Bateman, A. S., Kelly, S. D., Woolfe, M., (2007) Nitrogen Isotope Composition of Organically and Conventionally Grown Crops. *Journal of agricultural and food chemistry*. 55, 2664-2670.
- Bay, G., (2013). Symbioses Between Cyanobacterial Communities and Feather Mosses in Boreal Forests and Consequences for Dinitrogen Fixation. Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences. Faculty of Forest Sciences
Department of Forest Ecology and Management Umeå.
<http://pub.epsilon.slu.se/10854>
- Berndtsson, J. C., (2010) Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review, *Ecological engineering*, 36, 351-360,
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Best, B.B., Swadek, R.K., Burgess, T.L., (2015) Soil-based green roofs. I Sutton, R. K. (red.), *Green roof ecosystem*, Ecological Studies, Analysis and Synthesis, Volume 223, Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska Lincoln, Springer, 107-139.
- Blombäck, K., Dahlin, S., Eriksson, J., (2020) Markvetenskap, för landskapsarkitekt- och landskapsingenjörsutbildningarna i Uppsala. Institutionen för mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet.
- Blomqvist, M., Lodin, I., (2013). Mosstäcket ökar tillväxten hos *Vaccinium myrtillus*. Studentarbete. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för skogens ekologi och skötsel

- Buffam, I., Mitchell, M., (2015) Nutrient Cycling in Green Roof Ecosystems. I Sutton. R. K. (red.), *Green roof ecosystem*, Ecological Studies, Analysis and Synthesis, Volume 223, Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska Lincoln, Springer, 107-139.
- Burszta-Adamiak. E., Fudali. E., Lomotoski. J., Kolasinska. K. (2019) A pilot study on improve the functioning on extensive green roofs in city centers using mosses. *Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences* (2019), 28 (1), 118–130, DOI 10.22630/PNIKS.2019.28.1.11.
- Chapin, F. S. III., Matson, P. A., Vitousek, P. M. (2011) *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Second Edition, Springer, New York Dordrecht Heidelberg London, ISBN 978-1-4419-9503-2, e-ISBN 978-1-4419-9504-9, DOI 10.1007/978-1-4419-9504-9
- Craine, J. M., Brookshire, E.N.J., Cramer, M.D., Hasselquist, N.J., Koba, K., Marin-Siotta, E., Wang, L. (2015) Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils. Springer International Publishing Switzerland 2015, *Plant Soil* (2015) 396:1–26, DOI 10.1007/s11104-015-2542-1
- Einarsson, R., (2011) Även konstgödselbruk lever snart farligt, Olika kväve i naturlig och syntetisk gödsel. *Ekologiskt lantbruk* 3/2011.
- Gabrych, M., Kotze, D.J., Lehvävirta, S. (2016) Substrate depth and roof age strongly affect plant abundances on sedum-moss and meadow green roofs in Helsinki, Finland. *Ecological Engineering* 86 (2016) 95–104.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.10.022>
- Johnson, C., Schweinhart, S., Buffam, I., (2016) Plant species richness enhances nitrogen retention in green roof plots. *Ecological Applications*, 26(7), 2016, pp. 2130–2144, © 2016 by the Ecological Society of America.
- Johnsson, H., (2011) Vegetation som luftfilter i urban miljö. Studentarbete, examensarbete, LTJ-fakulteten, SLU Alnarp 2011.
- Jonsson, A., (2021) Planera för hållbara städer med gröna tak. Studentarbete, Magisterprogrammet i miljövetenskap, Umeå universitet.
- Kaye, J.P., Groffman, P.M., Grimm, N.B., Baker, L.A., & Pouyat, R.V. (2006) A distinct urban biogeochemistry? *Trends in Ecology and Evolution* Vol.21 Nr.4 April 2006, sid. 192-199, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.12.006>

- Larsson, R., Nilsson, G., Rogbeck, J. (1985) Bestämning av organisk halt, karbonathalt och sulfidhalt i jord. Rapport nr 27, Statens geotekniska institut. ISSN 0348–0755.
- Larsson, U., Nyberg, S., Högländer, H., Walve, J. (2014) Himmerfjärden 2013, Rapport till SYVAB, Technical report no 51, Department of ecology, Environment & plant sciences, Stockholm university.
- McGuire, K.L., Payne, S.G., Orazi, G., Palmer, M.I. (2015), Bacteria and Fungi in Green Roof Ecosystems. I Sutton. R. K. (red.), *Green roof ecosystem*, Ecological Studies, Analysis and Synthesis, Volume 223, Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska Lincoln, Springer, sid. 175-.191.
- Mitchell, M.E., Emilsson, T., Buffam, I. (2021) Carbon, nitrogen, and phosphorus variation along a green roof chronosequence: Implications for green roof ecosystem development. *Ecological Engineering* 164 (2021) 106211. Ecological Engineering journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecoleng
- Karlsson, G. P., Danielsson, H., Karlsson, P. E., Wängberg, I. (2017) Samband mellan halter i mossa och deposition av metaller, kväve och svavel. IVL, Svenska miljöinstitutet, Nr C 231. ISBN 978-91-88319-47-0
- Pearson, J., Wells, D.M., Selle, K.J., Bennett, A., Soares, J., Woodall, J., Ingrouille, M.j., (2000) Traffic exposure increases natural ¹⁵N and heavy metal concentrations in mosses. Published online by Cambridge University Press, 147, 317-326
<https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00702.x>
- Pettersson-Skoog, A. Sweco, Malmberg. J. Ecotopic, Emilsson, T. SLU, Jägerhök, T. White, Capener, C.M. Rise, (2017) *Gröna takhandboken*, Växtbädd och vegetation, betong, isolering och tätskikt, andra utgåvan, Svensk byggtjänst. ISBN 978-91-7917-072-1
- Sixtensson, O. (2006) Kväve i mark och gröda från sådd till skörd vid odling av höstraps (*Brassica napus* L.) Nitrogen in soil and plant from sowing to harvest during cultivation of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) Examensarbete, Sveriges lantbruksuniversitet, Avdelningen för precisionsodling.
- Turetky, M.R, (2003). The Role of Bryophytes in Carbon and Nitrogen Cycling. *The Bryologist*, Autumn, 2003, Vol. 106, No. 3 (Autumn, 2003), pp. 395-409
Beständig länk: <https://www.jstor.org/stable/3244721>
- Zackrisson, O., DeLuca, T. H., Nilsson, M. –C., Sellstedt, A. & Berglund, L. M. (2004). Nitrogen fixation increases with successional age in boreal forests. *Ecological Society of America Ecology*, 85(12), 3327-3334

Internetkällor:

Naturvårdsverket: (<https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/luft/utslapp/utslapp-av-kvaveoxider-till-luft-fran-vagtransporter/>, hämtad 2022-04-28)

Nationalencyklopedin: <https://www.ne.se>

SMHI: <https://www.smhi.se/reflab/om-luftforeningar/luftforeningar/kvavedioxid-1.19620>, hämtad 2022-04-21.

Bilaga 1

Gröna tak i Helsingfors

Underlagsdata

short ID	roof type	building year	Roof age 2021	Sub. depth 2021 cm	N%	LOI_105 Medelv. %	d ¹⁵ N ‰ *	SUB. FINEMED (g/m ²)	N substrat fine/med (g/m ²)
Pari1	SMR	2009	12	2	0,21	4,82	-1,785	9497,04	20,26
KEEL1	SMR	2018	3	5	0,55	10,29	1,345	18691,94	103,00
KEEL2	SMR	2018	3	5	0,44	9,77	1,635	17350,58	77,18
LAU1	SMR	2012	9		0,08	4,22	-0,7275	25881,74	20,25
TEHT1	SMR	2009	12	2	0,25	5,61	-1,04	10353,97	25,41
TEHT2	SMR	2009	12	2	0,23	6,45	-1,0125	11743,78	27,20
RAKU1	SMR	2020	1	5	0,61	14,11		18915,40	114,57
Koti1	SMR	2010	11	2	0,14	2,70	0,1125	13588,99	19,55
Koti3	SMR	2010	11	1	0,12	3,74	-1,8475	10363,35	12,71
Raku2	SMR	2020	1	5	0,36	14,56		22439,90	81,20
Pron1	MER	1991	30	15	0,20	4,75	-3,3075	50998,01	104,22
Pron2	MER	1991	30	12	0,44	6,01	-2,2375	39064,99	170,68
Vers1	MER	2003	18	24	0,16	4,28	-1,9425	75969,25	125,23
Vers2	MER	2003	18	22	0,14	4,23	-1,6	67753,91	92,32
Vers4	MER	2003	18	17	0,18	4,60	-1,2425	70713,39	125,00
Vers6	MER	2003	18	7	0,13	4,62	-1,9275	57343,92	75,11
Vers7	MER	2003	18	7	0,10	4,75	-1,8075	48301,95	46,95
Hels1	MER	1996	25	10	0,24	5,09	-2,365	62608,87	152,53
MAAK1	MER	1998	23	10	0,32	6,26	-2,57	48357,67	152,71
MAAK2	MER	1998	23	11	0,33	5,59	-2,045	44025,93	143,69
West1	MER	1970	51	7	0,80	15,29	-1,2175	33075,77	265,82

*d¹⁵N = ¹⁵N/¹⁴N där isotopförhållandet är uttryckt med hjälp av den atmosfäriska kväveskalan.

FN = isotopmängd fraktion ¹⁵N/(¹⁴N + ¹⁵N); beräknat från d¹⁵N med hjälp av Rref = ¹⁵N/¹⁴N = 1/272.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Läs om SLU:s publiceringsavtal här:

- <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

☒ JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

☐ NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.