



**Sveriges
lantbruksuniversitet**

Växttillgängligt bor i svensk skogsmark

*Plant available boron
in Swedish forest soils*

Torbjörn Nilsson
Johan Stendahl



Institutionen för mark och miljö
Department of Soil and Environment

Rapport 20
Report 20
Uppsala 2016
ISBN 978-91-576-9443-0

Omslagsfoto: Ola Borin

Referera gärna till rapporten på följande sätt:

Nilsson, T., Stendahl, J. 2016. Växttillgängligt bor i svensk skogsmark. Rapport 20, Institutionen för mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.

Förord

Inom jordbruket har man länge känt till att bor är ett mikronäringsämne, som det i svenska jordar kan vara brist på i marken för grödorna. Analyser av växttillgängligt bor är därför relativt vanligt vid markkartering av svensk åkermark. Inom det svenska skogsbruket har man i snart 40 år känt till att skador till följd av borbrist kan uppstå efter upprepad skogsgödsling med kväve på vissa marker. Kännedomen om halten växttillgängligt bor i svensk skogsmark har dock varit låg, eftersom sådana analyser bara gjorts i några enstaka forskningsprojekt inom begränsade områden.

Syftet med projektet ”Växttillgängligt bor i svensk skogsmark” och denna rapport är således att belysa och öka kännedomen om halten vattenlösligt bor i vår skogsmark, samt redogöra för sambanden mellan bor och ståndortsfaktorer, samt andra markkemiska variabler.

Undersökningen har möjliggjorts genom välvilligt stöd från Stiftelsen Svensk Växtnäringsforskning, vid Kungl. Skogs- och Lantbruksakademien, samt från Markinventeringen vid SLU.

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	7
Summary	8
Inledning.....	10
Grundämnet bor och dess förekomst i naturen.....	10
Bor i jordskorpan och primära mineral	11
Markens innehåll av bor	11
Förekomstformer i mark och faktorer som påverkar dess tillgänglighet	12
Borkoncentrationen i nederbörd, krondropp, avrinningsvatten och hav	16
Bor som mikronäringsämne för växter.....	16
Växtupptaget	17
Borbrist träd.....	18
Bortoxicitet träd.....	20
Tillsats av bor vid skogsgödsling	20
Behovet av ökad kunskap om bortillståndet i svensk skogsmark	21
Material och metoder	22
Urval av ytor.....	22
Markprovtagning och analys	22
Beskrivning av ståndortsvariabler och övriga markkemiska variabler	22
Statistisk analys	25
Resultat.....	27
Halten växttillgängligt bor i humuslager och B-horisont.....	27
Samband mellan borhalt i humuslagret och borhalt i B-horisonten.....	28
Samband mellan borhalt och olika omgivningsvariabler.....	28
Latitud och longitud	29
Ståndortsvariabler kopplade till klimatet	32
Slutningens lutning.....	35
Dominerande markfuktighet	35
Jordart och textur.....	35
Humusform.....	36
Blekjordens mäktighet.....	37
Jordmånstyp	37
Fältskiktstyp och bottenskiktstyp	38
Provytans läge i beståndet	39
Beståndets ålder, medelhöjd och tillväxt.....	40
Borhaltens samband med andra markkemiska variabler.....	41

pH	41
Kol- och kvävehalt, samt C/N-kvot.....	43
Katjonbyteskapacitet	44
Utbytbara baskatjoner	45
Utbytbart Al.....	47
Titrerbar aciditet	48
Diskussion	49
Samband med ståndortsfaktorer	49
I humuslager	49
I B-horisonten.....	49
Samband med andra markkemiska variabler	50
Kol- och kvävehalt	50
Betydelsen av det organiska materialet i marken.....	51
Konsekvenser för skogsbruket	51
Förslag på forskning inom området	52
Referenser.....	53

Sammanfattning

Syftet med projektet "Växttillgängligt bor i svensk skogsmark" är att öka kännedomen om halten vattenlösligt bor i vår skogsmark, samt redogöra för sambanden mellan denna halt och ståndortsfaktorer, samt andra markkemiska variabler.

Utifrån de ca 4000 permanenta provytor inom Riksskogstaxeringen som inventerades av Markinventeringen åren 2000-2002 valdes 210 provytor ut, vilka var fördelade över större delen av Sverige med varierande egenskaper med avseende på ståndort och markkemi. Från Markinventeringens jordprovsarkiv togs delprover ut från lagrade prov från humuslager och B-horisont från de utvalda 210 provytorna. De totalt 420 proven skickades till Eurofins Food & Agro i Lidköping, där de analyserades på växttillgängligt bor med varmvattenextraktion (B_{HWE}).

B_{HWE} -halterna i proven från humuslager låg klart över detektionsgränsen (0,10 mg per kg torrsubstans) och medelvärdet (1,39 mg kg⁻¹ ts) låg något över vad som tidigare rapporterats från ett fåtal humusprov i svensk skogsmark, samt klart över genomsnittet för B_{HWE} -halten i matjord från svensk åkermark (0,41 mg kg⁻¹ ts). B_{HWE} -halten i humuslagret var i genomsnitt nästan en tiopotens högre än motsvarande halt i B-horisonten.

I proven från B-horisonten låg 30 % av proven under detektionsgränsen. Vid beräkningarna erhöll dessa prov värdet 0,05 mg kg⁻¹ ts för B_{HWE} -halten. Medelvärdet (0,17 mg kg⁻¹ ts) låg i nivå med eller något under vad som tidigare rapporterats för ett fåtal prov från B-horisonter i svensk skogsmark.

För hela datamaterialet fanns inget samband mellan B_{HWE} -halten i humuslagret och underliggande B-horisont. Av de många ståndortsvariabler som B_{HWE} -halterna jämfördes med kunde vi för humuslagret bara se signifikanta positiva samband med beståndets ålder och medelhöjd, samt med ökad markfuktighet.

För B_{HWE} -halten i B-horisonten noterades däremot flera signifikanta samband med klimat- och ståndortsvariabler, bl.a. minskade halter med främst ökad longitud, men även för ökad latitud och markfuktighet. Signifikant positiva samband fanns mellan B_{HWE} -halten och bl.a. humiditet, ökad deposition, samt marklutning.

När det gäller de markkemiska variablerna så fanns det för B_{HWE} -halten i humuslagret signifikanta positiva samband med kol- och kvävehalt, de utbytbara baskatjonerna, titrerbar aciditet, samt katjonbyteskapaciteten. För B_{HWE} -halten i B-horisonten konstaterades signifikanta positiva samband för i stort sett samma markvariabler, men också signifikant negativt samband med pH.

De höga halterna av B_{HWE} i humuslagret, samt sambanden mellan B_{HWE} och främst kolhalt och katjonbyteskapacitet och för humuslagret även beståndsålder samt medelhöjd tyder på att tillgången på växttillgängligt bor i marken till stor del styrs av interncirkulation mellan beståndet, förnan och humuslagret. Detta bör man ta hänsyn till vid skogsskötselåtgärder, speciellt vid helträdsavverkning då en stor del av det växttillgängliga borförrådet i ekosystemet kan exporteras från systemet i samband med uttaget av grenar och toppar från det helträdsavverkade området.

Summary

The aim of the project "Plant available boron in Swedish forest soils" is to increase the knowledge about the content of water soluble boron in our forest soils, and describe relationships between this content and site factors, and other soil chemical variables.

Based on approximately 4000 permanent sample plots, in the Swedish National Forest Inventory, where soil sampling were done by the Swedish Forest Soil Inventory (FSI) during the years 2000-2002 we chose 210 sample plots for this study. These 210 plots are located in different parts of Sweden and have varying characteristics regarding site factors and soil chemistry. From a soil sample archive, belonging to FSI, we took subsamples from stored samples of humus layer and B horizon from these 210 sample plots that were sampled in 2000-2002. These subsamples were analyzed on plant available boron (B_{HWE}) after hot water extraction (modified method after Berger & Troug, 1940).

The concentrations of B_{HWE} in samples from the humus layer were all well above the detection limit ($0.10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$) and the average ($1.39 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$) was slightly above the B_{HWE} -values, that have been reported previously from a few humus samples in Swedish forest soils. The average value for the humus layer from our study was well above the average for B_{HWE} -concentration in the topsoil from Swedish agricultural soils ($0.41 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$).

The B_{HWE} -concentration in the humus layer was, on average, almost an order of magnitude higher than the corresponding concentration in the B horizon.

In 30 % of the samples from the B horizon the B_{HWE} -concentration was below the detection limit. In the statistical analyses the values below the detection limit received a value that was 50 % of the detection limit. The mean value for the B_{HWE} -concentration in the B horizon ($0.17 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$) was in line with or slightly below that previously have been reported for a few samples from the B horizons of Swedish forest soils.

In our study there was no relationship between the B_{HWE} -concentration in the humus layer and the corresponding value in the B horizon. We also studied if the B_{HWE} -concentrations in the humus layer or the B horizon had any relationship with different site factors or soil chemical variables. For B_{HWE} -concentrations in the humus layer we found positive correlation with stand age and average stand height, and with increased soil moisture class in the plots. The B_{HWE} -concentrations in the humus layer also had significantly positive correlations with the content of organic carbon, nitrogen, exchangeable base cations, titratable acidity and cation exchange capacity (CEC).

The B_{HWE} -concentrations in the B horizon had significant negative correlations with increasing latitude, longitude, soil moisture class and thickness of the B horizon. Significant positive relationships were found between B_{HWE} -concentrations and increasing humidity, deposition, inclination within the plot, stand height and increasing soil fertility indicated by field layer and ground layer. B_{HWE} in the B horizon also had positive relationships with the content of organic carbon, nitrogen, exchangeable potassium, sodium and aluminum, titratable acidity and CEC. A significant negative correlation also existed between B_{HWE} and pH in the B horizon.

The high levels of B_{HWE} in the humus layer, and the positive relationships between B_{HWE} and primarily carbon content and cation exchange capacity and for the humus layer also the stand

age and average height suggests that the supply of plant-available boron in soil is largely controlled by the internal circulation between the forest stand, the litter and the humus layer. This should be taken into account in forest management, especially after whole-tree harvesting, as much of the plant available pool of boron in the ecosystem can be exported from the system when branches and tops are removed from the whole-tree harvested area.

Inledning

Bor utgör ett av de åtta essentiella mikronäringsämnen, som krävs för normal tillväxt för de flesta växter, samtidigt som det i höga koncentrationer kan vara toxiskt för växter. Intervallet mellan halter som ger bristsymptom och halter som är toxiska för växter är förhållandevis litet för just bor (Stone, 1990; Gupta, 2007). Symptomen på borbrist hos växter uppträder först i rotsystemet genom minskad rottillväxten, vilket bl.a. medför att kvoten mellan biomassan ovan markytan och biomassan under markytan ökar (Dell & Huang, 1997; Möttönen m.fl., 2001; Räisänen m.fl., 2009). När väl skador inträffat på rötterna kan symptomen på biomassan ovan mark komma ganska snabbt. För träd utgörs bristsymptomen på bor av t.ex. döda toppskott, barrförluster, krokiga toppskott, oregelbunden grentillväxt och minskad tillväxt (Braekke, 1983a; Möller, 1984; Wikner, 1986; Stone, 1990; Saarsalmi & Tamminen, 2005; Sutinen m.fl., 2006).

På jordbrukssidan är det vanligt att man vid kemiska analyser av åkermarken även tar med växttillgängligt bor (Bertilsson, 1984; Nilsson, 1984). När det gäller den svenska skogsmarken finns dock bara enstaka analyser gjorda av halten växttillgängligt bor och då enbart från ett litet antal forskningsprojekt utförda inom begränsade geografiska områden (ex. Wikner, 1986).

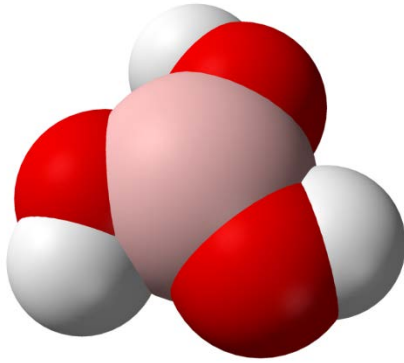
Ett av målen med denna undersökning är att öka kunskapen om bortillståndet i svensk skogsmark och beskriva de ståndortsfaktorer eller de fysikaliska och kemiska markegenskaperna som påverkar halten växttillgängligt bor i humuslager respektive B-horisonten.

Grundämnet bor och dess förekomst i naturen

Grundämnet bor (B) har i naturen två stabila isotoper; ^{10}B och ^{11}B , som förekommer i proportionerna 19,9 % respektive 80,1 %. Atommassan för bor brukar därför anges till 10,81 u och oxidationstalet är +III (Kabata-Pendias & Pendias, 1992).

Bor brukar betecknas som ett halvmetalliskt grundämne, d.v.s. dess egenskaper att leda elektricitet och värme ligger på gränsen mellan de rena metallerna (t.ex. koppar) och icke-metaller (t.ex. fosfor, kol). Ibland (främst tidigare) brukar dock bor klassas som en icke-metall. Dess fysikaliska och kemiska egenskaper bestäms i hög grad av en liten atomradie, den höga jonisationsenergin och bristen på elektroner i det yttre elektronskalet. Denna brist leder till att bor ofta bildar kovalenta föreningar.

Bor förekommer inte i ren form i naturen utan är alltid bundet till syre. Exempelvis i borsyra $\text{B}(\text{OH})_3$ (Fig. 1), borater (=salter av borsyra, där den positiva jonen vanligen är natrium, kalium, kalcium eller magnesium, ex.: borax; $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), eller borosilikater.



Figur 1. Kemisk struktur hos borsyra, $B(OH)_3$. Från Wikipedia: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Borsyra>
Figure 1. Chemical structure of boric acid, $B(OH)_3$. From Wikipedia: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Borsyra>

Bor i jordskorpan och primära mineral

Jämfört med andra mikronäringsämnen är bor förhållandevis ovanligt förekommande i jordskorpan. Totalkoncentrationen av bor i jordskorpan brukade tidigare anges till i medeltal ca 10 mg kg^{-1} (t.ex.: Taylor & McLennan, 1985), men enligt nyare sammanställningar är den genomsnittliga borhalten i den övre kontinentala jordskorpan betydligt högre; 47 mg kg^{-1} (Hu & Gao, 2008). Beroende på bergart varierar dock borhalten från ca 2 mg kg^{-1} upp till mer än 500 mg kg^{-1} (Aubert & Pinta, 1977; Wedepohl, 1995; Hu & Gao, 2008; Kot, 2009). Områden där berggrunden eller jordlagren har bildats i marina miljöer, exempelvis sedimentär berggrund eller lösa sedimentlager bildade under havsytan, har i regel högre borhalt än de berg- och jordarter som bildats i jordskorpan eller i landmiljöer. Den granitoida urberggrunden, som utgör en stor del av berggrunden i Sverige har liksom ren kalksten oftast låga borhalter.

Bor har fått sitt namn efter mineralet borax. Detta mineral är ett av de vanligaste borinnehållande mineralen, men totalt finns det mer än 200 mineral som innehåller bor i olika koncentrationer. De flesta av dessa är ovanliga eller har mycket låga borkoncentrationer, men några få borater som borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), ulexit ($\text{NaCa}[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), colemanit ($\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) och kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_6(\text{OH})_2 \cdot 3(\text{H}_2\text{O})$) har tillräckligt hög borhalt och finns i tillräckligt stora mängder på vissa ställen för att vara brytvärda (ex. Boron, Kalifornien, USA; Turkiet). Eftersom borater är vattenlösliga finns dessa fyndigheter i områden med låg nederbörd. Halten bor i borax brukar i medeltal anges till 11,3 % (Gupta, 2007).

Markens innehåll av bor

Det globalt sett vanligaste borinnehållande mineralet i berggrunden och i marken är silikatmineralet turmalin (Whetstone m.fl., 1941). Turmalin har en varierande och komplicerad sammansättning (allmän formel: $(\text{Na,Ca})(\text{Mg,Fe,Al,Mn,Li})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3(\text{OH,F})_4(\text{Si}_6\text{O}_{18}))$) och kan innehålla 3-11 % bor (Folkesson, 2007). Vanligtvis ligger dock borhalten kring 3 % (Gupta, 2007). Turmalin ingår i bergarter som exempelvis pegmatit, granit, skiffrar och gnejser (Woolley m.fl., 1977) och har tidigare ibland angetts som den huvudsakliga borkällan i marken. Men turmalin är extremt resistent mot vittring och i odlingsförsök av Fleming (1980) kunde tillförsel av finmalen turmalin till en åkermark med låga borhalter inte motverka borbristen för de grödor som växte på åkermarken. Således är tillförseln av bor till växterna från turmalin i marken i de flesta fall obefintlig eller mycket liten. Det finns dock spår av bor i många av de mineral som finns i våra marker, exempelvis fältspat och muskovit, vilka är betydligt mer vittringsbenägna än turmalin (Andersson m.fl., 2014).

Globalt sett så varierar totalhalten bor i de lösa jordlagren vanligtvis mellan 1 mg kg^{-1} till mer än 450 mg kg^{-1} , med en medelhalt av $9-85 \text{ mg kg}^{-1}$ (Gupta, 2007). Många arida jordar har ett

högt borinnehåll, vilket höjer det globala medelvärdet. Enligt Aubert & Pinta (1977) så varierar totalhalten bor i olika jordar världen över från 1-2 mg kg⁻¹ (podsoler) upp till 250-270 mg kg⁻¹ (närlingsrik torvjord från Israel), med ett medeltal som varierar mellan 20-50 mg kg⁻¹. Jordar som härstammar från skifferar bildade i marin miljö har i regel mycket höga borhalter, medan exempelvis jordar på graniter oftast har låga borhalter. Lerrika jordar har vanligtvis högre borhalt än sandiga jordar (Adriano, 1986). I humida områden så medför utlakningen i regel att borhalten i de övre marklagren är relativt låg.

Andersson m.fl. (2014) redovisade totalhalten av bl.a. bor i 2578 moränprover från 75 cm djup fördelade över hela Sverige. Av dessa prov hade 70 % borhalter som låg under detektionsgränsen (5 mg kg⁻¹). Den högsta borhalten som uppmättes var 41 mg kg⁻¹. Höga halter i moränen noterades i områden i anslutning till skifferberggrund (ex. Storsjön, Jämtland), i marina avlagringar (Skåne), samt i karbonatrik morän i södra Skåne och på Öland och Gotland. Man fann även ett samband mellan halterna av B, Al och kalium, vilket enligt författarna indikerar att bor har en tendens att anrikas i lerrika moräner.

Andersson m.fl. (2014) rapporterade även totalhalten av bl.a. bor i jordprov från de övre 10 cm i åkermark (n=174) och betesmark (n=179). Detektionsgränsen för totalhalten bor i dessa prover var 0,5 mg kg⁻¹. Medianvärdet i åkermark och betesmark var 1,3 resp. 1,2 mg B kg⁻¹, vilket bara var ungefär hälften av medianvärdena för hela Europa (Andersson m.fl., 2014). Överhuvudtaget så var borhalten i denna undersökning av åker- och betesmark betydligt lägre än vad många andra redovisat för åkermark från olika delar av världen (Whetstone m.fl., 1941; Aubert & Pinta, 1977; Shacklette & Boerngen, 1984; Adriano, 1986; Shorrocks, 1997).

Wikner (1985) redovisar en totalborhalt på 9 mg kg⁻¹ för humuslagret under en 70-årig granskog i Garpenberg, södra Dalarna. I mineraljorden (0-45 cm djup) varierade halten mellan 10-15 mg B kg⁻¹.

Förekomstformer i mark och faktorer som påverkar dess tillgänglighet

Man kan grovt säga att bor förekommer i marken i fyra olika pooler; 1) vattenlösligt (borsyra), 2) lätt adsorberat (utbytbar), 3) löst bundet till organiskt material och mikrobiell biomassa, 4) hårt bundet i ler- och mineralstrukturer, organiskt material, samt kristallina eller icke-kristallina järn- eller aluminiumoxider/hydroxider (Shorrocks, 1997).

Under normala förhållanden så innehåller marken små mängder av de två första formerna. Den vattenlösliga borformen i marken utgörs vid normala pH-värden av borsyra (B(OH)₃), som är en mycket svag syra. Borsyran kan lätt lakas ur marken. Vid pH-värden över 9.2 dominerar istället anjonen borat ((B(OH)₄)⁻). Koncentrationen av borsyra i marklösningen buffras av adsorptions- och desorptionsreaktioner av det bor som är adsorberat till oorganiska och organiska adsorptionsytor.

De huvudsakliga oorganiska adsorptionsytorna i marken utgörs av järn- och aluminiumoxider, lermineral, samt kalciumkarbonat. Adsorptionen av bor till dessa ytor, liksom till ytor på organiskt material, anses bero på ligandutbyte med reaktiva hydroxylgrupper på ytorna (Goldberg & Su, 2007).

Marker som innehåller mycket organiskt material har oftast ett högt innehåll av bor, som är mer eller mindre hårt bundet till det organiska materialet. Komplexbindningen av bor till organisk substans och dess tillgänglighet är dock relativt dåligt känd.

I de sekundära lermineralens skiktstruktur kan bor bindas in genom att ersätta aluminium eller kiseljoner.

Den totala borhalten i marken ökar i regel med ökad halt av ler och organiskt material (Eriksson m.fl., 2011). Marina leror är extra rika på bor och där kan totalhalten bor uppgå till 100-160 mg kg⁻¹. Andelen växttillgängligt bor, i förhållande till totalhalten, är dock vanligtvis låg på lerjordar jämfört med grövre jordar p.g.a. stora adsorptionsytor i lerjordarna. Men de grövre jordarna (ex. sandjordar) har oftast låga totalhalter av bor. Detta tillsammans med att bor lättare kan lakas ut från de grövre jordarna, medför att borbrist i regel uppkommer på de grövre jordarna (Goldberg, 1997; Shorrocks, 1997).

Eftersom bor i marken till stor del är hårt bundet till bl.a. organiskt material, oxider och hydroxider av järn och aluminium, etc., så utgör totalhalten bor ett dåligt mått på hur mycket bor som är tillgängligt för växterna. Enligt Kelling (1999) så är bara 0,5-2,5 % av borförrådet i marken växttillgängligt och det är sällan som denna andel överstiger 5 % (Berger & Troug, 1940). Power & Woods (1997) anger dock att ca 10 % av den totala mängden bor i marken vanligtvis är tillgängligt för växter.

Wikner (1985) redovisar bl.a. totalhalter och växttillgänglig halt (B_{HWE}) av bor i humuslager och mineraljord under ett 70-årigt granbestånd i Dalarna. I humuslagret var 11-12 % av borförrådet växttillgängligt. Motsvarande andel i mineraljorden var 0,08-2 %.

Halten växttillgängligt bor i jordprov bestäms vanligtvis genom extraktion med kokande vatten (Berger & Troug, 1940). Korrelationen mellan växttillgängligt bor i marken enligt denna metod och borinnehållet i de växter som finns på denna mark är i regel god (Baird & Dawson, 1955; Hill & Morrill, 1974; Wikner, 1983). Fortsättningsvis i rapporten så anges växttillgängligt bor i marken med denna metod för B_{HWE} , där HWE står för 'hot water extractable'.

Enligt Gupta (2007) så varierar B_{HWE} -halten i åkermark mellan 0,5 – 5 mg kg⁻¹. Eriksson m.fl. (1997) redovisar dock B_{HWE} -halter från <0,04 mg kg⁻¹ upp till 9,92 mg kg⁻¹ i matjord från svensk åkermark. För skogsmark är B_{HWE} -halterna, enligt Thor m.fl. (1997), <0,05 mg kg⁻¹ i mineraljorden och mellan 0,5 och 1,5 mg kg⁻¹ i humuslagret.

Om halten B_{HWE} understiger 1 mg B kg⁻¹ jord anses ofta att risk finns för borbrist hos växterna (gäller främst åkergrödor), medan halter över 5 mg kan vara toxiska (Gupta, 2007; Eriksson m.fl., 2011). De kritiska gränsvärdena varierar dock för olika växter, markegenskaper etc. Ahmad m.fl. (2009) anger således att den kritiska koncentrationen av B_{HWE} varierar från 0,15-0,50 mg kg⁻¹ jord.

Enligt Kabata-Pendias (2004) så kan borhalten i marklösningen, från områden som inte är förorenade, variera mellan 0,012-0,8 mg l⁻¹. Enligt Adriano (1986) så anses borhalter under 0,2 mg l⁻¹ kunna orsaka borbrist på åkergrödor, medan halter över 1 mg B l⁻¹ kan vara toxiska. Lägre värden för både borbrist och toxicitet har dock rapporterats (ex. Folkesson, 2007).

Faktorer som påverkar halten växttillgängligt bor i marken är främst halten av organiskt material, pH, modermaterialet, kornstorlek (speciellt då lerhalt), typ av lermineral, oxider och hydroxider av järn och aluminium, markens katjonbyteskapacitet, koncentrationen av andra grundämnen (ex. kalcium), klimatfaktorer (nederbörd, temperatur och avdunstning) som påverkar bl.a. markfuktighet (Jin m.fl., 1987; Goldberg, 1997; Barrett, 2004; Eriksson m.fl., 2011; Abu-Sharar m.fl., 2014)).

Modermaterialet

Jordar som bildats av sedimentära bergarter har oftast högre borhalt än magmatiska och metamorfa bergarter. Ren kalksten har dock i regel låga borhalter, men vid ökad inblandning av lermineral i kalkstenen så stiger oftast också borhalten (Uppin & Karro, 2012).

Humitt klimat

Jordar i humida områden har ofta låga halter B_{HWE} , p.g.a. hög utlakning och adsorption till järn- och aluminiumoxider. Växttillgängligt bor i dessa jordar finns i regel kopplat till det organiska materialet som finns i de övre marklagren. Växter i humida områden på grova jordar, med låg halt organiskt material, har därför ofta borbrist (Gupta, 2007).

Torka/markvattenhalt/temperatur

Enligt vissa undersökningar ökar adsorptionen av bor till markpartiklarna när markvattenhalten minskar (Goldberg, 1997). Eftersom växterna är i behov av ett kontinuerligt borupptag via rötterna och att detta upptag till stor del är kopplat till ett passivt borupptag via växternas vattenupptag, så kan långvarig torka medföra ett lågt eller inget vattenupptag och därmed ett litet eller inget upptag av bor. På samma sätt kan en låg lufttemperatur medföra låg transpiration och därmed lågt vatten- och borupptag (Lehto m.fl., 2010a). Under perioder med låg temperatur (vår och höst) är dessutom nedbrytningen av organiskt material liten, varvid lite bor frigörs (Gupta, 2007).

Textur

I jordar med grov kornstorlekssammansättning, ex. sandjordar lakas det ut mer bor än i mer finkorniga jordar, exempelvis lerjordar (Gupta, 2007). I lerjordar finns det betydligt mer adsorptionsyta än i sandjordar. På dessa adsorptionsytor kan mer bor bindas, men också frigöras (Goldberg, 1997).

Lermineral

Bland lermineralen, så brukar illit adsorbera mer bor än montmorillonit och kaolinit (Adriano, 1986; Goldberg, 1997). Illit är det kvantitativt vanligaste lermineralet i svenska jordar (Eriksson m.fl., 2011). Hur mycket bor som adsorberas till lermineralen påverkas också av pH-värdet i marken och vilken katjon som dominerar i utbyteskomplexet. Om kalcium dominerar i detta utbyteskomplex, så kan mer bor adsorberas än om natrium eller kalium dominerar (Goldberg, 1997; Kot, 2009).

Oxider och hydroxider av järn och aluminium

Järn- och aluminiumoxiders förmåga att binda bor, medför att dessa oxider kan spela en mycket viktig roll i retentionen av bor i marken. Adsorptionen av bor till organiskt material samt järn- och aluminiumoxider i marken ökar med ökande pH-värde till ett maximum vid pH 9 (Goldberg, 1997). Tillsammans med järn- och aluminiumhydroxider kan bor fällas ut (Dey m.fl., 2015). I områden med sura jordar och hög nederbörd är dock halten av växttillgängligt bor i regel låg, dels p.g.a. hög utlakning, samt att dessa jordar ofta också har ett högt innehåll av järn- och aluminiumoxider, som kan adsorbera mycket bor (Barman m.fl., 2014).

Organiskt material

Det organiska materialet i marken kan binda mycket bor. Detta beror troligen på att bor har en hög förmåga att bilda komplex med hydroxylgrupper från exempelvis organiska syror (Wikner, 1983). Adsorptionen av bor till organiskt material sker snabbt och ökar med ökande pH (Goldberg, 1997). Kot m.fl. (2012) anger att en betydande del eller t.o.m. huvuddelen av bor i marken är hårt bundet (inte utbytbar) till resistent humusämnen som humin, humus- eller fulvosyror.

Vid nedbrytningen av det organiska materialet frigörs dock bor (Gupta, 2007). Därför finns det i regel ett positivt samband mellan mängden organiskt material i marken och halten B_{HWE} (ex. Gupta, 1968). Även i marker med förhållandevis låga mängder organiskt material, så utgör detta material i regel den största borkällan för växterna. Det organiska materialets påverkan på borets tillgänglighet i marken förstärks vid höjningar av pH och lerhalt (Gupta, 2007). Enligt Lehto (2010a), så utgörs 70-80 % av den totala bormängden i humuslagret på podsoljordar av växttillgängligt bor (B_{HWE}). Denna uppgift motsäger delvis vad Kot m.fl. (2012) anger, se ovan. Men de jordar Kot m.fl. (2012) huvudsakligen refererar till är mineraljordar i områden, där åldern på de lösa jordlagren och det organiska materialet däri till stor del är betydligt äldre än i humuslagren i våra boreala skogar. Det organiska materialets sammansättning verkar således ha en stor roll för hur mycket bor som adsorberas respektive är växttillgängligt.

Markdjup

Vanligtvis så minskar både totalhalten och halten B_{HWE} med djupet i marken. Detta hänger samman med att främst halten organiskt material minskar med markdjupet och att bor binds till organiskt material (Eriksson m.fl., 1981; Wikner, 1983; Adriano, 1986). I exempelvis områden med hög nederbörd, grov textur och låg halt organiskt material i marken kan dock utlakningen medföra att halten bor i de ytliga markskikten är lägre än i de djupare belägna markskikten.

pH och kalkning

Upp till pH 9,2 förekommer bor i marklösningen huvudsakligen som odissocierad borsyra (H_3BO_3), d.v.s. som en oladdad jon. Detta innebär att bor i marklösningen inte fastläggs så lätt i marken och kan lätt utlakas, speciellt i marker med grov textur och lågt pH. Vid pH-värden över 9,2 blir boratjonen ($B(OH)_4^-$ eller $B_4O_7^{2-}$, $H_2BO_3^-$) förhärskande (Power & Woods, 1997; Gupta, 2007). Med stigande pH, mellan pH 3-9, ökar adsorptionen av bor i marken, så att bor är som hårdast bundet till olika markpartiklar vid pH mellan 7 och 9 (Keren & Bingham, 1985; Goldberg, 1997; Johansson, 2004; Goldberg & Suarez, 2011). Bor blir således i regel mer tillgängligt med minskat pH-värde (Gupta, 2007).

Kalkning medför ett ökat pH-värde i det översta marklagret, vilket då kan leda till ett minskat borupptag i växterna (Lehto & Mätkönen, 1994). Detta kan dock till stor del bero på att kalcium till vissa delar har samma funktion som bor i växten och en ökad tillgänglighet av kalcium medför ett ökat borbehov. Bor kan också adsorberas till ytorna på kalciumkarbonat (Goldberg, 1997). Dessutom så minskar växttillgängligheten av bor i marken när kalciumkoncentrationen ökar, troligtvis på grund av att kalcium-boratkomplex bildas, men även p.g.a. adsorption av bor till färska utfällningar av järn- och aluminiumhydroxider (Sillanpää, 1972; Barman m.fl., 2014). Å andra sidan medför kalkning ofta en ökad nedbrytning av organiskt material, vilket i sig frigör bor. Vid nedbrytningen av det organiska materialet produceras också olika organiska syror, vilka i sin tur kan frigöra bor adsorberat till olika ytor (ex. lermineral) (Dey m.fl., 2015).

Påverkan av andra grundämnen

Det är många studier som visat att höga halter av kalcium- eller magnesiumjoner i marken ofta medför låga borhalter i de växter som finns på denna mark. Det finns en antagonistisk interaktion mellan kalcium och bor i växtupptaget, så att borupptaget blir lågt om det finns mycket kalcium i marken (Adriano, 1986). Kalkning kan således medföra borbrist, men detta beror troligtvis i första hand på pH-effekten, se ovan (Lehto & Mätkönen, 1994).

Borkoncentrationen i nederbörd, krondropp, avrinningsvatten och hav

Det bor som i marken huvudsakligen finns som borsyra lakas lätt ut ur marken och hamnar till stor del i haven. Havsvatten har en hög borhalt; 4,5 mg l⁻¹ (Kot, 2009). Via avdunstning, storskalig luftcirkulation och deposition transporteras en del av detta bor till kontinenterna. Bordepositionen minskar dock med avståndet från haven. Enligt Kot (2009) så kommer troligen 80-90 % av borkoncentrationen i nederbörden från bor som avdunstat från havsytan. Våtdepositionen av bor i Sverige varierar från ca 25-40 g per hektar och år vid västkusten till ca 2 g ha⁻¹ och år i de norra delarna av inlandet (Wikner, 1983). Om man antar en medelårsnederbörd på 700 mm, skulle dessa depositionsvärden motsvara en medelhalt av bor i nederbörden på mellan 0,3 – 6 µg l⁻¹. Rose-Koga m.fl. (2006) anger, utifrån olika undersökningar världen över, att borhalten i regn och snö kan variera mellan 0,2 – 385 µg l⁻¹. Schlesinger & Vengosh (2016) anger att medianvärdet för borhalten i nederbörden på kontinenterna är ca 2 µg l⁻¹.

I en undersökning av bor i ett skogligt avrinningsområde i nordöstra Frankrike fann Cividini m.fl. (2010) att borhalten i 30 nederbördsprov varierade mellan 0,05-2,6 µg l⁻¹, med ett genomsnitt på 0,79 µg l⁻¹. Borkoncentrationen i krondroppet var betydligt högre, med en variation mellan 1-29 µg l⁻¹. Medelkoncentrationen var något högre under gran (9,2 µg l⁻¹) jämfört med bok (7,3 µg l⁻¹). De högre borkoncentrationerna i krondroppet, jämfört med i nederbörden, kan bero på torrdeposition av bor samt utlakning av bor från bladen/barren. I marklösningen fann Cividini m.fl. (2010) i regel lägre borkoncentrationer än i kronvattnet och att borkoncentrationen minskade exponentiellt med markdjupet. Den kraftigt avtagande borkoncentrationen med markdjupet kan enligt författarna bero på att bor ackumuleras överst via krondropp och förnafall och att borkoncentrationen längre ner minskar p.g.a. rotupptag. Borkoncentrationen i källvatten och bäckvatten i området varierade mellan 2,4 – 5,3 µg l⁻¹. De senare värdena var, enligt Cividini m.fl. (2010), något lägre än vad som rapporterats för avrinningsvatten från andra områden med granitberggrund. För flodvatten anger Gaillardet m.fl. (2003) ett genomsnittsvärde på 10 µg B l⁻¹, med en variation mellan 1,5 – 150 µg l⁻¹. Enligt en tabell i Reimann m.fl. (2009) så är medianvärdet för borhalten i europeiska avrinningsvatten 15,6 µg l⁻¹. Utgående från en undersökning gjord 1970 så varierade borkoncentrationen i svenska och norska älvvatten mellan 0 – 1516 µg l⁻¹, med ett medianvärde på 12 µg l⁻¹. Koncentrationer på mer än 16 µg B l⁻¹ hittades främst i älvvattnen i södra Sverige under högsta kustlinjen. I älvarna i norra Sverige var borkoncentrationen mestadels ≤ 4 µg B l⁻¹ (Ahl & Jönsson, 1972).

De våtdepositionsvärden som Wikner (1983) redovisade är lägre än den transport av bor som Ahl & Jönsson (1972) redovisat för svenska flodområden; 20-100 g ha⁻¹ och år. Diskrepansen beror troligen dels på torrdeposition av bor och dels på att utlakningen av bor från marken är större än våtdepositionen, så att borförrådet i svenska jordar kontinuerligt minskas, speciellt från de jordar som har höga borhalter, d.v.s. marint ursprung. Lundin & Nilsson (2014) redovisade dock betydligt lägre utlakning (5 g ha⁻¹), från ett litet avrinningsområde på skogsmark ovanför högsta kustlinjen i södra Dalarna. Efter kvävegödsling (med bortillsats; ca 1 kg bor ha⁻¹) noterades det första året efter behandlingen en markant ökning av borutlakningen till 60 g ha⁻¹ och år.

Bor som mikronäringsämne för växter

Bor utgör ett viktigt mikronäringsämne och krävs för bl.a. celldelning och celltillväxt, transport av kolhydrater i växten, cellväggstruktur, lignifiering (inlagring av lignin i cellväggarna, vilket gör dem stabila), metabolismen av kolhydrater, RNA, fenoler och

indol-3-ättiksyra (IAA), samt utgör en viktig del i cellmembranen (Dell & Huang, 1997; Ahmad m.fl., 2009; Eriksson m.fl., 2011). Upp till 90 % av växtcellernas borinnehåll kan finnas i cellväggarnas lignin (Matoh, 1997; Blevins & Lukaszewski, 1998).

För växternas rot- och skotttillväxt är bor ett viktigt ämne och vid bristsituationer kan skotten dö. Bor har också en viktig uppgift vid växternas blomning. Borbrist leder till sämre befruktning och därmed till mindre antal bildade frön eller kärnor. Vid frö- och fruktillväxten, samt troligtvis även vid biologisk kvävefixering utgör bor också en viktig faktor (Blevins & Lukaszewski, 1998). Det finns också studier som tyder på att en betryggande tillgång till bor kan bidra till att begränsa aluminiums toxicitet i jordar med låga pH-värden (ex.: LeNoble m.fl., 1996).

Enligt Shorrocks (1997) så är borbrist ett globalt problem inom växtproduktion och har rapporterats från mer än 80 länder och för 132 grödor.

Växtupptaget

Det bor som växterna tar upp från marken härstammar till stor del från atmosfärisk deposition, samt nedbrytning av organiskt material och till en mindre del från mineral i marken. Växterna tar via rötterna upp bor i form av oladdad borsyra ($B(OH)_3$) från marklösningen (Hu & Brown, 1997; Power & Woods, 1997). Detta upptag sker till största delen passivt, d.v.s. borsyran följer med vattenflödet in i rötterna i samband med växternas transpiration. Det finns dock studier som tyder på att vid låga koncentrationer av bor i marklösningen kan ett aktivt rotupptag av bor i växten ske via exempelvis utsöndring (exudation) av organiska föreningar (exempelvis sockeralkoholer) som bildar komplex med bor och som kan tas upp av rötterna. För att bibehålla tillräckliga borkoncentrationer i växten kan transporten av bor i växten dessutom höjas genom att membranpermeabiliteten ökar (ex. Hu & Brown, 1997; Takano m.fl., 2008; Lehto m.fl., 2010a). Eftersom borsyra inte har någon laddning kan den i regel lätt passera genom växternas olika biologiska membran (Reid, 2014).

Fördelning av bor i växten regleras sedan genom transpirationsflödet i växtens xylem (Raven, 1980). I många växter ackumuleras bor i växtens tillväxtdelar och speciellt då de delar varifrån den högsta transpirationen sker (Brown & Shelp, 1997; Blevins & Lukaszewski, 1998).

Borupptaget är således beroende av marklösningens koncentration av borsyra, permeabiliteten i de cellmembran som borsyran passerar, komplexbildning i cellerna, samt transpirationshastigheten (Hu & Brown, 1997). Upptaget av bor är också avhängigt av växtart. Det är viktigt att det kontinuerligt finns bor tillgängligt i marken eftersom många av växtarterna har en begränsad förmåga att omförflytta bor inom växten (Stone, 1990; Brown & Shelp, 1997). Men det finns flera studier som visar att många växtarter också har en förmåga att omförflytta bor från exempelvis bladen till andra delar, via floemet (Brown & Shelp, 1997). Även barrträd har viss förmåga att omförflytta bor från gamla barr till unga barr eller från skott till rot via floemet (Wikner, 1983; Aphalo m.fl., 2002; Lehto m.fl., 2010a). Detta kan ske genom att bor bildar komplex med sockeralkoholer, som mannitol och sorbitol (Brown & Shelp, 1997).

De första effekterna av borbrist sker i växternas rotsystem. Rötternas cellmembran förändras så att förmågan att ta upp speciellt fosfor, kalium och klor försämras. Tillväxten hos rötterna minskar eller upphör helt. Andra effekter av borbrist på växterna som kan uppstå är, enligt Gupta (2007) minskad mängd protein och lösliga kväveföreningar i växten, påverkan på omsättningen av sockerföreningar och stärkelse, ackumulering av fenol i växten, påverkan på

tillförseln av tillväxsubstanser som auxin i växten, försämring av membranfunktionen i växtcellerna, samt bildning av blommor och fröproduktion (Blevins & Lukaszewski, 1998).

Det totala innehållet eller det årliga upptaget av bor i trädbestånd är inte så väl undersökt. Wikner (1985) anger det totala borinnehållet (ovan + under jord) i ett 70-årigt granbestånd i Mellansverige till $0,63 \text{ kg ha}^{-1}$, varav nästan 84 % fanns i biomassan ovan jord. I förnan och humuslagret fanns totalt $0,95 \text{ kg B ha}^{-1}$, varav 12 % var växttillgängligt. I mineraljorden ner till 45 cm djup fanns totalt $43,5 \text{ kg B ha}^{-1}$, men av denna mängd var bara 0,8 % växttillgängligt. Helmisaari (1995), som studerade tre olikåldriga (15, 35 och 100 år) tallbestånd i sydöstra Finland fann att det totala borinnehållet i bestånden (ovan jord + under jord) var 0,20, 0,26 och $0,62 \text{ kg B ha}^{-1}$, varav 76-84 % fanns över jord. Det årliga upptaget i träden var 1,5, 3,6 och $4,5 \text{ mg B m}^{-2}$ och år i bestånden, varav i stort sett allt togs upp från marken i de unga bestånden. I det 100-åriga tallbeståndet togs $3,7 \text{ mg B m}^{-2}$ upp från marken och $0,8 \text{ mg B m}^{-2}$ skedde genom translokering inom träden. Förnafallet från trädets ovanjordiska delar bidrog med 0,7, 1,4 resp. $2,3 \text{ mg B m}^{-2}$ per år från de 15, 35 resp. 100 åriga bestånden. Aphalo m.fl. (2002) beräknade att i ett normalt moget granbestånd i Finland så är det årliga upptaget av bor i de delar som växer ovan mark ca $0,5\text{-}1,0 \text{ mg m}^{-2}$.

Borbrist träd

Braekke (1983a) uppger att i naturliga barrskogar utan gödsling, helträdsuttag, dränering, luftföroreningar etc. uppträder sällan några påtagliga brister av mikronäringsämnen, men vid kraftig torka kan dock tillgängligheten eller upptaget av exempelvis bor minska. Borbristsskador på skogsträd har dock rapporterats från ett stort antal länder inom alla världsdelar (Stone, 1990; Shorrocks, 1997).

Borbrist yttrar sig först på rotsystemet i form av bl.a. minskad rottillväxt, reducerat antal rotspetsar och därmed även mängden mykorrhiza (Pettersson, 2014). Symptomen på borbrist på träddelarna ovan jord kommer senare, men är många; minskad tillväxt, ofullständig eller obefintlig barrutveckling, barrförluster, krokiga eller döda toppskott, bildning av sekundära skott och buskformiga trädkronor (Stone, 1990; Lehto m.fl., 2010a; Pettersson, 2014). Borbrist medför också att träden blir mer känsliga för torka och även mer mottagliga för frostsador, samt svamp- och insektsangrepp (Kolari 1983; Stone, 1990; Pettersson, 2014). Långvarig torka kan i sin tur förstärka risken för borbrist (Braekke, 1983a; Lehto m.fl., 2010a).

Vid borbrist är det i regel de växande organen som drabbas först. I de inledande skedena av borbrist finns inga visuella skador, men med hjälp av mikroskop kan man se skador i exempelvis barr med oregelbunden cellstorlek och trasiga cellväggar (Johansson, 2004). Även om det inte finns några synliga skador, så kan otillräcklig tillgång på bor medföra minskad rot- och skotttillväxt (Stone, 1990).

Enligt Stone (1990) så är borkkoncentrationen hos träd vanligtvis högst i barr och blad, lägre i kvistar och bark, samt lägst i stamveden. Reimann m.fl. (2007), som insamlade blad, bark och stamved från 40 björkar (*Betula pubescens* Ehrh.), samt markprov från humuslager (O-horisont) och C-horisont, längs en 120 km lång transekt från S till N i Norge, rapporterade att borhalten (medianvärden) var högst i björklöven (29 mg kg^{-1}). Därefter kom bark (3 mg kg^{-1}) och stamved (2 mg kg^{-1}). Medianvärdet för totalkoncentrationen i O- och C-horisont var 2 mg kg^{-1} (där låg dock flera prov nära eller under detektionsgränsen (1 mg kg^{-1})). Borhalten i blad och barr är vanligtvis närmare en tiopotens högre än den totala borhalten i humuslagret eller mineraljord (se Reimann m.fl., 2007, 2015) vari träden har sina rötter.

Borbrist på grund av skogsgödsling

Stone (1990) förutspådde att ökad skogsgödsling, där bara en eller ett fåtal makronäringsämnen tillförs, på sikt kan öka risken för borbrist. Om den växttillgängliga borhalten i marken är låg, kan en ökad biomassaproduktion till följd av exempelvis kvävegödsling medföra att trädens ökade borbehov inte kan upprätthållas, med borbristsskador som följd (Aronsson, 1985).

Enligt Stone (1990) så kan vitaliteten hos träd försämrats när halten bor i blad/barr understiger $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$ och synliga skador på trädet uppträda när borhalten går under $2,0 \text{ mg kg}^{-1}$ i barren. Enligt Lehto m.fl. (2010a) bör dock $4,0 \text{ mg B kg}^{-1}$ i barr från tall (*Pinus sylvestris*) och gran (*Picea abies*) användas som en kritisk halt, där synliga skador ovan mark kan uppträda om halten understiger detta värde. Tydliga tillväxtstörningar hos tall och gran börjar dock ske först när borhalten i årsbarr ligger omkring eller under 3 mg kg^{-1} . Normala borhalter i årsbarr från tall och gran är $5\text{-}20 \text{ mg kg}^{-1}$ (Pettersson, 2014). I södra Sverige ligger borhalterna i årsbarren för gran ofta över 15 mg kg^{-1} , medan de i norra Sverige i många fall understiger 5 mg kg^{-1} (Möller 1983, 1984). De högre borhalterna i södra Sverige beror huvudsakligen på att bordepositionen här är betydligt högre än i norra Sverige, se Wikner (1983).

För bor i marklösningen är skillnaden i koncentration mellan värden som ger bristsymptom respektive tecken på toxicitet hos växterna vanligtvis relativt liten (mindre än en tiopotens). Men i trädens blad eller barr kan borkoncentrationen gå upp mot 200 mg kg^{-1} utan synbara toxicitetsskador (Stone, 1990), d.v.s. nästan två tiopotenser mellan brist och toxicitet. Lehto m.fl. (2010a) påpekar att blad-och barranalyser av bor kan vara osäkra, bl.a. beroende på att borhalten i dessa trädskikt kan förändras snabbt beroende på markvattenhalten. Enligt Wikner (figur 3 1983) kan man observera ett visst positivt samband mellan B_{HWE} -halten i humuslagret och borhalten i tallbarr. Bl.a. så understeg borhalten i barren 4 mg kg^{-1} när B_{HWE} -halten i humuslagret var lägre än $0,25 \text{ mg kg}^{-1}$. Enligt samma studie framgår att motsvarande samband mellan B_{HWE} -halten i B-horisonten och borhalten i tallbarren var betydligt sämre.

Det mesta av mängden B_{HWE} i marken kommer antingen från organiskt material, som i sin tur kommer från växtmaterial (rotförra eller fallförra), eller från lättlösliga mineral som innehåller bor, speciellt mineral som bildats eller legat i marina miljöer (Gupta, 2007). Enligt Lehto m.fl. (2010b, c) så frigörs bor snabbt från förra från exempelvis björk och gran.

I Sverige upptäckte man i slutet av 1970-talet och början av 1980-talet att gödsling med enbart kväve eller i kombination med andra ämnen (P, K, kalk) på fastmark i främst Norrlands inland kunde orsaka skador på trädens tillväxtpunkter. Studier visade att skadorna berodde på borbrist (Aronsson, 1984; Möller, 1984). Möller (1983) observerade de lägsta borhalterna i årsbarr från ogödslad skog i norra Norrlands inland. Efter kvävegödsling, speciellt efter täta omgödslingar (5-7 åriga intervall) med höga kvävegivor ($\geq 240 \text{ kg N ha}^{-1}$), så minskade borhalten i årsbarren kraftigt (Pettersson, 2014). Till stor del kunde borbristen förklaras av en utspädningseffekt (Aronsson, 1985), p.g.a. ökad tillväxt, bl.a. barrmassa. Mängden växttillgängligt bor i marken förändras enligt Wikner (1983) inte efter kvävegödsling. Den ökade tillväxten efter kvävegödsling ökar dock trädens behov av bor och på marker med lågt innehåll av växttillgängligt bor kan det ökade behovet av bor ibland inte tillgodoses. Kvävegödsling innebär också att trädens allokering av kol till rötterna minskar. Detta kan i sin tur innebära att rötterna utsöndrar mindre mängd organiska syror och en större andel bor fastläggs då till järn- och aluminiumoxider i marken (Wikner, 1983). Tillväxten av finrötter och mykorrhiza minskar också vid kvävegödsling, vilket troligtvis påverkar upptaget av bor

negativt, speciellt om kväveomgödslingen sker med korta intervall som 5-7 år (Pettersson, 2014).

Borbrist har även konstaterats på gran och tall som planterats på nedlagd åker- eller betesmark i Sverige och Finland (Folkesson, 2007; Pettersson, 2014). Det finns också exempel på borbrist för gran på marker i östra Finland där man bedrivit återkommande svedjebbruk ända in i modern tid (Saarsalmi & Tamminen, 2005). Braekke (1983b) har även rapporterat om borbrist på gran, tall och björk på dikade torvmarker, med mäktiga torvlager, efter PK- och NPK-gödsling. Liknande borbristsskador för tall på dikade och gödslade torvmarker i Finland har rapporterats av ex. Kurkela (1983). I Sverige har borbrist även noterats på tallar på våtmarker i Västerbotten efter våtmarkskalkning (Johansson, 2004). Även efter skogsmarkskalkning på fastmark har det påvisats skogsskador, som är relaterade till borbrist (Lehto & Mälkönen, 1994).

Bortoxicitet träd

I arida områden kan en hög avdunstning i kombination med bevattning medföra att bor ansamlas i de övre marklagren och förorsaka toxiska skador på växterna. I humida områden kan antropogena åtgärder medföra toxiska skador. Exempelvis genom för höga givor av borgödselmedel, via luftföroreningar, samt vid tillförsel av avloppsvatten, slam, vissa kolaskor, etc. (Eriksson m.fl., 1981; Stone, 1990). I närheten av en boremitterande fiberglasindustri i Mellansverige kunde skador på björk påvisas vid borhalter på 5 mg kg⁻¹ i marken och 200 mg kg⁻¹ i bladen (Eriksson m.fl., 1981)

Tillsats av bor vid skogsgödsling

Sedan mitten av 1980-talet ingår 0,2 % bor (i form av borsyra) i den kvävegödsel (Skog-CAN), som används inom det svenska skogsbruket. Detta kan ses som en säkerhetsåtgärd för att avvärja eventuella skador till följd av borbrist. Skogsgödsling med kväve sker sedan 1984 enbart i Svealand och norrut. De senaste åren genomförs skogsgödsling med kväve på 40 000 – 60 000 hektar per år (Näslund, 2015). Med en normal giva på 550 kg ha⁻¹ Skog-CAN (=150 kg N ha⁻¹) så sprids således ca 1 kg bor per hektar vid varje gödseltillfälle. För en skogsgeneration med 1-3 omgödslingar kan det innebära att totalt 2-4 kg bor per hektar tillförs. Enligt Thor m.fl. (1997) kan toxiska symptom uppträda vid engångsgivor på över 4-5 kg B per hektar. I norra Svealand och Norrland är våtdepositionen av bor under en trädgeneration (100 år) ca 0,2-1 kg per hektar, d.v.s. lägre än om kvävegödsling med bor utförts (Rosenberg, 2002). Gödslade bestånd har därför numera något högre borhalt i barren än ogödslade bestånd (Jacobson & Nohrstedt, 1993, Pettersson, 2014).

Enligt Pettersson (2014) så kan borbristsskador på träd uppträda efter kvävegödsling på följande marker:

- Torra marker med grov textur och låg deposition av bor
- Marker som innehåller liten mängd organiskt material.
- Marker som tidigare använts för svedjebbruk, åkerbruk eller bete.

Utgående från dessa kriterier skulle de mest utpräglade riskmarkerna för borbrist, efter kvävegödsling på skogsmark, vara tallbestånd med låg tillväxt på torra marker med grov textur samt låg humushalt och i kärva klimatlägen i norra Norrlands inland.

Borhalten i årsbarr på ogödslade ytor minskar i regel ju längre norrut man kommer i Sverige. Data från Pettersson (2014) visar att borhalten i barr från södra Sverige är nästan dubbelt så höga som i norra Norrland.

Barrprovtagning med efterföljande analys kan vara ett hjälpmedel att diagnosticera eller förutse kommande brist eller toxicitet av bor på skogsmark. Barranalyser har dock sina begränsningar på grund av snabba fluktuationer i barrrens borkoncentration, beroende på bl.a. variationer i markvattenhalten i rotzonen (Sutinen m.fl., 2006).

Behovet av ökad kunskap om bortillståndet i svensk skogsmark

Växttillgängligt bor återfinns i en relativt snabbt omsättbar pool som kan påverkas av störningar i samspelet mellan mark och växt. En förväntad klimatförändring med högre temperaturer kan leda till ökad produktivitet med ökat växtnäringssupptag, men också ökad risk för torkstress. Båda dessa faktorer ökar risken för borbrist. Till detta kommer också en ökad förlust av bor från skogsekosystemet genom bl.a. GROT-uttag. En kunskapssammanställning och mindre inventering av borhalten i skogsmarken är därför av stort värde för skogsnäringen, speciellt då en storskalig undersökning av bortillståndet i svensk skogsmark aldrig tidigare har utförts.

Syftet med denna rapport är att redovisa hur halten vattenlösligt bor varierar i den svenska skogsmarken, samt redogöra för sambanden mellan vattenlösligt bor i marken och vissa ståndortsfaktorer, samt andra markkemiska variabler.

Material och metoder

Urval av ytor

210 provytor inom Markinventeringen (MI) 2000-2002 valdes ut där prover tagits från både humuslagret (O-horisont) och B-horisonten. Vid urvalet ingick enbart provytor med följande egenskaper:

- Ägoslaget (produktiv) skogsmark
- Jordarten morän eller sediment med hög eller låg sorteringsgrad (d.v.s. inte håll- eller torvmark)
- Endast fastmark (torvmark saknas på ytan)
- Texturen (kornstorleksfördelningen) grus/grusig morän eller finare.
- Markfuktighetsklassen fuktig eller torrare (d.v.s. ej blöt mark)
- Ej kulturpåverkad mark (inkl. nedlagd jordbruksmark)
- Beståndsåldern var ≥ 20 år
- Humustäcket var < 25 cm

Markprovtagning och analys

Inom MI tas volymsbestämda prov från hela humuslagret med en humusborr, med 100 mm diameter. För humusformerna mull och mullikande moder begränsas provtagningsdjupet till de översta 10 cm. Prov från B-horisonten insamlas i de övre 5 cm av rostjorden och om rostjord saknas tas provet i de översta fem cm av mineraljorden (Nilsson m.fl., 2015).

Jordproverna transporteras till institutionen för mark och miljö, SLU, Uppsala där proven bereds och lufttorkas vid provmottagningen inom institutionens markkemiska laboratorium. Efter lufttorkningen prepareras proven genom malning (för humusproverna) och siktning. Därefter tas en delmängd av proven ut för att analyseras på markkemiska variabler. Den överblivna provmängden lagras i ett jordprovsarkiv. I detta jordprovsarkiv finns jordprov tagna inom Markinventeringen och dess föregångare sedan 1960-talet och framåt.

Från Markinventeringens jordprovsarkiv togs delprover ut från de lagrade jordproven från humuslager och B-horisont från de urvalda 210 provytorna. Delproven som togs ut innehöll cirka 15 g från humuslagret resp. 30 g från B-horisonten. De sammanlagt 420 proven analyserades vid Eurofins Food & Agro i Lidköping. Där analyserades proven för växttillgängligt bor med varmvattenextraktion, enligt en modifierad version av Berger & Troug (1940). I värmebeständiga plaströr invägs 6,25 gram för prov från humuslager respektive 12,5 gram för prov från B-horisonten. 25 ml dubbelavjonat vatten tillsattes rören, som därefter placerades på värmeblock för kokning i exakt 15 minuter. Efter kylning tillsattes 0,25 ml 2.5 M kalciumklorid i varje rör. Lösningen filtrerades omedelbart och filtratet hölls upp i 3 ml provrör för bestämning av borhalten på ICP-OES (SS-ISO 11885:2009). Borhalten i filtratet räknas om till mg bor/kg torrs substans.

Beskrivning av ståndortsvariabler och övriga markkemiska variabler

I denna studie har vi testat om de analyserade halterna av växttillgängligt bor i humuslager och B-horisont har något samband med ståndortsvariabler eller andra markkemiska variabler.

Från samma provytor finns sedan tidigare uppskattade eller inventerade ståndortsvariablerna som gjorts inom Riksskogstaxeringen och Markinventeringen, samt data från markkemiska analyser som tidigare gjorts på samma prover inom Markinventeringen (Tabell 1).

Tabell 1. Beskrivning av de ståndortsvariabler vars samband med halten växttillgängligt bor i humuslager respektive B-horisont har studerats. Kont. = kontinuerlig variabel.

Table 1. Description of the site property variables that were studied in relationship to the plant-available concentrations of boron in the humus layer and B-horizon. Cont. = continuous variable.

Ståndortsvariabel <i>Habitat variable</i>	Antal klasser <i>Number of classes</i>	Publikation / länk / figur som beskriver variabeln <i>Publication / link / figure that describes the variable</i>
Latitud / <i>Latitude</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	
Longitud / <i>Longitude</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	
Höjd över havet / <i>Altitude (m)</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	
Depositionsområde / <i>Deposition region</i>	4	Fig. 2.
Kustavstånd / <i>Distance to coast (km)</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	
Temperatursumma / <i>Temperature sum (°C)</i>	6	2)
Humiditet / <i>Humidity (mm)</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	Nederbörd-avdunstning / <i>Precipitation –Evapotranspiration</i>
Specifik avrinning / <i>Specific runoff (l s⁻¹ km⁻²)</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	3)
Skogsskötselzon / <i>Silviculture zone</i>	8	Fig. 3.
Slutningens lutning / <i>Inclination class</i>	5	1) sid 5:12
Rörligt markvatten / <i>Lateral soil water movement</i>	3	4)
Markfuktighet / <i>Soil moisture class</i>	4	5)
Ytblockighet (antal/ha) / <i>Surface boulder frequency (number/ha)</i>	8	6)
Jordart / <i>Soil parent material</i>	3	Nilsson m.fl. (2015)
Textur / <i>Soil texture</i>	7	Nilsson m.fl. (2015)
Humusform / <i>Humus form</i>	6	Nilsson m.fl. (2015)
Humustäckets tjocklek / <i>Thickness of the humus layer (cm)</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	
Blekjordens tjocklek / <i>Thickness of the B horizon (cm)</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	
Jorddjup i gropan / <i>Soil depth (cm)</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	
Jordmånstyp / <i>Soil type</i>	9	Nilsson m.fl. (2015)
Beståndsålder / <i>Stand age (år/year)</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	1) sid 6.29
Beståndets medelhöjd / <i>Average stand height (m)</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	
Tillväxt (m ³ sk år ⁻¹) / <i>Annual forest increment (m³ solid volume inc. bark)</i>	Kont. / <i>Cont.</i>	
Läge i beståndet / <i>Location of the plot within the stand</i>	7	
Fältskiktstyp / <i>Field layer type</i>	15	1) sid 5:11
Bottenskiktstyp / <i>Ground layer type</i>	6	1) sid 5:10

1) Riksinventeringen av skog. Fältinstruktion 2014:

https://www.slu.se/globalassets/ny_struktur/org/centrb/rt/dokument/faltinst/ris_fin_2014.pdf

2) MarkInfo, temperatursumma: <http://www-markinfo.slu.se/sve/klimat/tempsum.html>

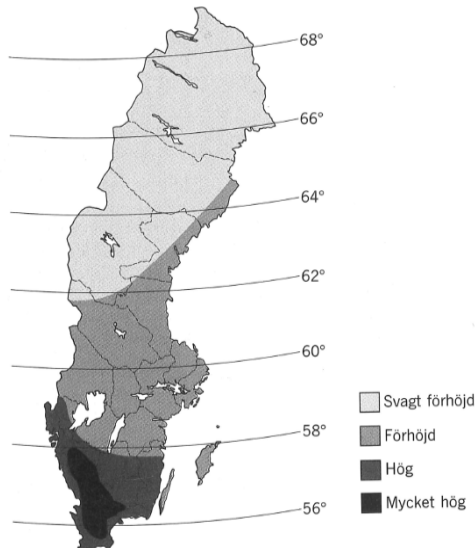
3) SMHI, Avrinningen i Sverige: http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.6351/faktablad_avrinning%5B1%5D.pdf

4) MarkInfo, rörligt markvatten: <http://www-markinfo.slu.se/sve/mark/markvatt.html>

5) MarkInfo, markfuktighet: <http://www-markinfo.slu.se/sve/mark/markfukt.html>

6) MarkInfo, ytblockighet: <http://www-markinfo.slu.se/sve/mark/block.html>

Variabeln depositionsområde har fyra klasser, där klasserna är grovt indelade efter den belastning av svavel- och kvävedeposition, som rådde i slutet av 1970-talet – början av 1980-talet (Fig. 2).



Figur 2. Depositionsområden i Sverige, modifierad efter Bernes (1981).

Klass 1 = svagt förhöjd belastning av främst svavel- och kvävedeposition.

Klass 2 = förhöjd belastning.

Klass 3 = hög belastning.

Klass 4 = mycket hög belastning.

Figure 2. Depositions regions in Sweden, modified after Bernes (1981).

Class 1 = slightly elevated load, mainly of sulfur and nitrogen deposition.

Class 2 = Elevated load.

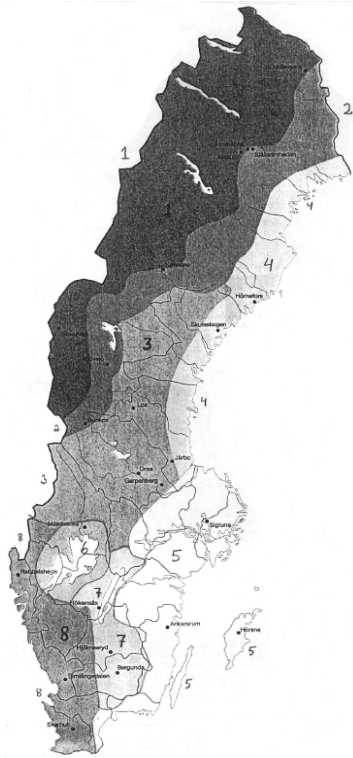
Class 3 = High load.

Class 4 = Very high load.

De åtta skogsskötselzonerna är kopplade till åtta klimatzoner (Fig. 3). Zon 1 omfattar områden med extremt kyligt temperaturklimat med temperatursumma < 750 dygnsgrader. Svårförnygrad mark. Zon 2 är områden med ett kyligt temperaturklimat; temperatursumma = 750-900 dygnsgrader. Zon 3 omfattar områden med relativt kyligt – medelgott temperaturklimat; 900-1300 dygnsgrader. Zon 4 avser områden med sommartorr och svagt humitt klimat i ett 4-6 mils brett bälte längs Norrlands kustland. Zon 5 omfattar områden med gynnsamt – mycket gynnsamt temperaturklimat; > 1300 dygnsgrader inom östra delarna av Götaland och Svealand. Övervägande sommartorr och till mindre del svagt humitt klimat. Zon 6 avser ett gynnsamt – mycket gynnsamt temperaturklimat; > 1300 dygnsgrader inom ett område runt Vänern. Övervägande svagt humitt område med till mindre del sommartorr klimat. Zon 7 omfattar områden med medelgott – gynnsamt temperaturklimat; 1100-1500 dygnsgrader inom de centrala delarna av sydsvenska höglandet. Området har ett svagt humitt till normalhumitt klimat. Zon 8 omfattar områden med gynnsamt – mycket gynnsamt temperaturklimat; > ca 1300 dygnsgrader inom västra Götaland. Frånsett kustbandet ett starkt humitt till mycket starkt humitt klimat.

När det gäller slutningens lutning så avses då den kraftigaste lutning som kan uppletas mellan två diametralt motsatta punkter på periferin av den 20 m-yta, inom vari provytan är belägen. Av de sex lutningsklasser som ingår i inventeringen fanns fem klasser med i vårt undersökningsmaterial: 1 = <1,0:20; 2 = 1,1:20 – 2,0:20; 4 = 2,1:20 – 4,0:20; 7 = 4,1:20 – 7,0:20; 10 = 7,1:20 – 10,0:20.

För provytans läge i beståndet fanns i ursprungsdata sju olika klasser. Vi har slagit samman klasserna till två klasser: inne i beståndet och i beståndskant.



Figur 3. Skogsskötselzoner i Sverige. Kartan är något förenklad jämfört med databasens gränser.
Figure 3. Silviculture zones in Sweden. The map are somewhat simplified compared to the limits in the database.

De markkemiska variablerna (beskrivning av de kemiska analyserna, se Nilsson m.fl., 2015) som vi studerat eventuellt samband med halten växttillgängligt bor är:

pH i vattenlösning (pH-H₂O)

Kolhalt (C) i % av torrsubstanshalten

Kvävehalt (N) i % av torrsubstanshalten

Kol-kväveknot (C/N)

Utbytbara halter av Ca, Mg, K, Na, Mn, Al och titrerbar aciditet (TA) (enhet: mmolc kg⁻¹ av torrsubstanshalten)

Katjonbyteskapacitet (CEC) (CEC = summan av de utbytbara baskatjonerna; Ca, Mg, K, Na)

Basmättnadsgrad (BS) ($BS = \frac{\sum(Ca + Mg + K + Na)}{\sum(Ca + Mg + K + Na + TA)}$)

Basmättnadsgraden brukar anges i %.

För mer information om Riksskogstaxeringen och Markinventeringen, se:

<http://www.slu.se/riksskogstaxeringen>, respektive <http://www.slu.se/markinventeringen>.

Statistisk analys

Den statistiska utvärderingen av datamaterialet har utförts med hjälp av det statistiska programpaketet SAS, version 9.3 (SAS Institute Inc., 2011, 2012). Korrelationsanalysen gjordes enligt Spearmans rangkorrelation, eftersom en del av variablerna var klassvariabler (se tabell 1), men där klasserna var rangordnade (ex. markfuktighet; klass 1 = torr mark, 2 = frisk mark, 3 = frisk-fuktig mark och 4 = fuktig mark). Rangkorrelation är också fördelaktig att använda när datamaterialet är snedfördelat och det finns få extremvärden, vilket var fallet för halterna av växttillgängligt bor (B_{HWE}) i både humuslagret respektive B-horisonten (Fig. 4). För de klassvariablerna där man inte kan göra en rangordning mellan klasserna användes istället variansanalys för att undersöka om B_{HWE}-halterna i humuslagret respektive B-horisonten

skiljde sig mellan klasserna. Denna variansanalys genomfördes med proceduren GLM i programpaketet SAS. Innan variansanalysen logaritmerades B_{HWE} -halterna.

Resultat

Halten växttillgängligt bor i humuslager och B-horisont

I humuslagret (O-horisonten) varierade halten växttillgängligt bor (B_{HWE}) mellan 0,33 – 4,42 mg kg^{-1} torrs substans (ts). Inte i något av proven från humuslagret låg halten B_{HWE} under detektionsgränsen (0,10 mg kg^{-1}). I närmare 70 % av proven låg halten B_{HWE} mellan 0,75-1,75 mg kg^{-1} och fördelningen av värdena hade en positiv skevhet, d.v.s. det fanns en 'svans' med höga halter (Tabell 2, Fig. 4).

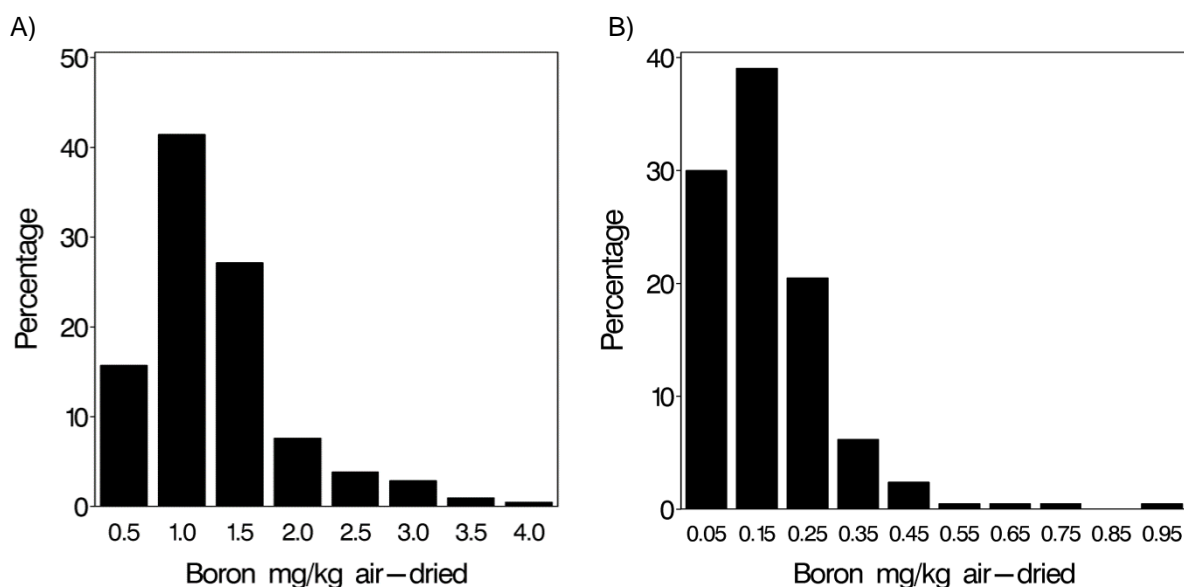
Tabell 2. Medelvärden, minimi- och maximivärden, standardavvikelse (st.avv.), samt skevhet för koncentrationer av B_{HWE} på prov från O- resp. B-horisonterna från de 210 provytorna. Proven insamlade 2000-2002 inom Markinventeringen. ts= torrs substanshalt

Table 2. Mean, minimum and maximum values, standard deviation (st. dev.), and skewness for concentrations of B_{HWE} , in the O and B horizons from the 210 sample plots. The soil samples were taken 2000-2002 within the Swedish Forest Soil Inventory. ts = dry weight

Variabel och enhet Variable and unit	Horisont Horizon	Medel Mean	Minimum Minimum	Maximum Maximum	St. avv. St. dev.	Skevhet Skewness
B_{HWE} (mg kg^{-1} ts)	O	1.393	0.33	4.42	0.708	1.40
- " -	B	0.169	0.05*	0.98	0.131	2.35

*För 63 prov från B-horisonten låg borhalten under detektionsgränsen (0,10 mg kg^{-1} ts) och har då ersatts med värdet 0,05 mg kg^{-1} ts.

*The concentration of B_{HWE} was below the detection limit (0.10 mg kg^{-1} dw) for 63 samples from the B horizon. The B_{HWE} -concentration for these samples was set to 0.05 mg kg^{-1} dw.



Figur 4. Frekvensdiagram över halten B_{HWE} i humuslagret (A) och B-horisonten (B). För B-horisonten har värden under detektionsgränsen (0,10 mg kg^{-1} t.s.) ersatts med värdet 0,05 mg kg^{-1} t.s.

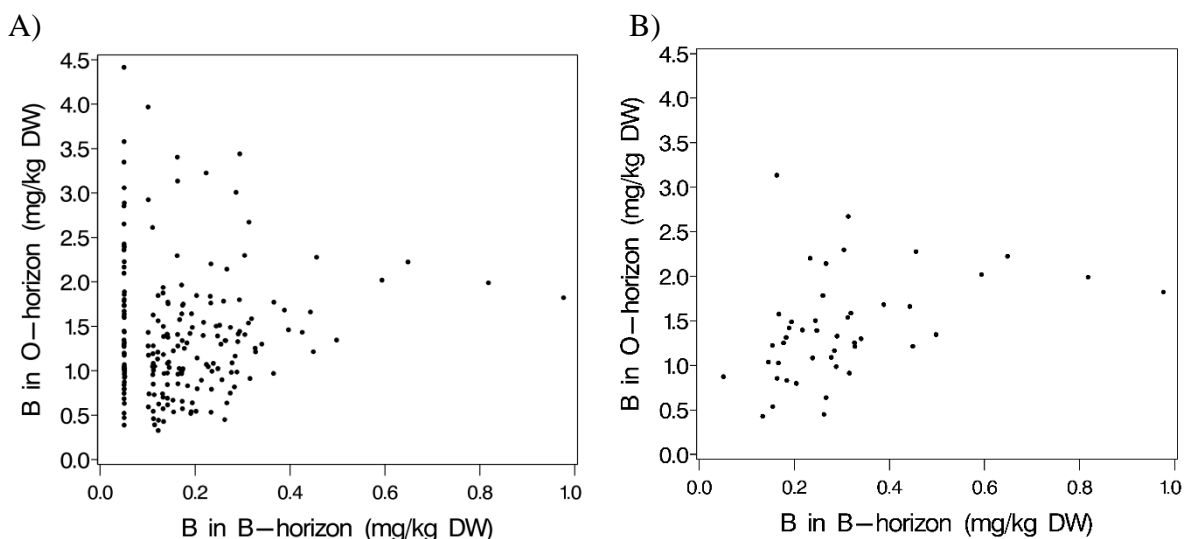
Figure 4. Frequencies of B_{HWE} -concentrations in the humus layer (A) and B horizon (B). In the B-horizon, 63 samples with values below the detection limit (0.10 mg kg^{-1} dw) were replaced with the value 0.05 mg kg^{-1} dw.

För proven från B-horisonten så hade 30 % (63 prov) halter av B_{HWE} som låg under detektionsgränsen (0,10 mg kg^{-1}). För dessa prov ansattes ett värde på 50 % av

detektionsgränsen, d.v.s. $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$. Närmare 90 % av proven från B-horisonten hade en borhalt som låg under $0,30 \text{ mg kg}^{-1}$, d.v.s. lägre än den lägsta borhalten i humuslagret (Fig. 4).

Samband mellan borhalt i humuslagret och borhalt i B-horisonten

Något samband mellan halten B_{HWE} i humuslagret och motsvarande halt i B-horisonten fanns inte (Fig. 5A). Inte heller om man delade upp materialet i depositionsområde, jordart eller textur. Vid uppdelning av kolhalt eller katjonbyteskapaciteten (CEC) i B-horisonten i tre olika klasser (låga värden, 'normala' värden, resp. höga värden) noterades ett signifikant negativt samband mellan halterna av B_{HWE} i O- resp. B-horisonten för de provtyper som hade låga värden på kolhalt eller CEC i B-horisonten, medan det för 'normala' värden på kolhalt eller CEC inte förelåg något samband. För de provtyper som hade höga värden på kolhalt eller CEC i B-horisonten fanns det däremot ett signifikant positivt samband mellan B_{HWE} -halterna i O- resp. B-horisonten. I denna klass fanns relativt många prov med höga halter B_{HWE} i B-horisonten och bara ett prov under detektionsgränsen (Fig. 5B).



Figur 5. A) Sambandet mellan B_{HWE} -halten i B-horisonten och B_{HWE} -halten i humuslagret för alla prov, (Spearman $r=0,01$, $p=0,83$). B) Sambandet mellan B_{HWE} -halten i B-horisonten och B_{HWE} -halten i humuslagret för enbart de prov som hade en katjonbyteskapacitet $> 100 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1} \text{ ts}$. (Spearman $r=0,46$, $p=0,002$).

Figure 5. A) Relationship between B_{HWE} in the B horizon and B_{HWE} in the humus layer for all samples, (Spearman $r=0.01$, $p=0.83$). B) Relationship between B_{HWE} in the B horizon and B_{HWE} in the humus layer for only those samples which had a cation exchange capacity $> 100 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1} \text{ DW}$ (Spearman $r=0.46$, $p=0.002$).

Samband mellan borhalt och olika omgivningsvariabler

Beskrivande statistik för ståndortsvariablerna på de 210 ingående provtyperna presenteras i Tabell 3. För att undersöka om dessa olika möjliga påverkansfaktorer samvarierar med halten växttillgängligt bor (B_{HWE}), i humuslager respektive B-horisont, har vi gjort korrelations- och variansanalyser. Korrelationskoefficienter (Spearman's rangkorrelation) mellan B_{HWE} , i humuslager respektive B-horisont, och dessa andra variabler, redovisas i tabell 4. Några av ståndortsvariablerna är klassvariabler utan någon rang m.a.p. klasserna och ingår därför inte i

korrelationsanalysen. Borhaltens variation för dessa klassvariabler har därför studerats med enbart variansanalys.

Latitud och longitud

Endast mycket svaga geografiska skillnader förekom för halterna B_{HWE} i humuslagret inom Sverige (Fig. 6). För borhalterna i B-horisonten fanns dock tendenser till mönster, bl.a. relativt höga halter längs västkusten och de västligaste delarna av Svealand och Norrland, medan de östra delarna av Sverige i regel har låga halter (Fig. 6).

Halten växttillgängligt bor i humuslagret hade inget signifikant samband med latitud och longitud (Tabell 4), vilket också framgår av figur 6. Motsvarande halt i B-horisonten hade dock visst negativt signifikant samband med latitud och i synnerhet med longitud, d.v.s. borhalten minskade något norrut i landet och speciellt öster ut (Tabell 4, Fig. 6 och 7).

Tabell 3. Medelvärden, minimi- och maximivärden och standardavvikelse (st.avv.) för några ståndortsvariabler på provytorna, och koncentrationer av B_{HWE} , samt tidigare gjorda markkemiska analyser på prov från O- resp. B-horisonter från de 210 provytorna. Proven insamlade 2000-2002 inom Markinventeringen. ts= torrsubstanshalt

Table 3. Mean, minimum and maximum values, and standard deviation (st. dev.) for some of the site factors on the sample plots, and concentrations of B_{HWE} , and previous soil chemical analysis on samples from O and B horizons from the 210 sample plots. The soil samples were taken 2000-2002 within the Swedish Forest Soil Inventory. ts = dry weight

Variabel och enhet <i>Variable and unit</i>	Medel <i>Mean</i>	Minimum <i>Minimum</i>	Maximum <i>Maximum</i>	St. avv. <i>St. dev.</i>
Latitud / <i>Latitude</i>	61.09	55.93	67.79	3.29
Longitud / <i>Longitude</i>	15.59	11.50	23.59	2.46
Höjd över havet / <i>Altitude (m)</i>	258	0	680	170
Kustavstånd / <i>Distance from the coast (km)</i>	100	0	281	70.4
Temperatursumma / <i>Temperature sum (°C)</i>	1075	500	1590	301
Humiditet / <i>Humidity (mm)</i>	62.3	-60	218	59.8
Avrinning / <i>Specific runoff (l s⁻¹ km⁻²)</i>	10.7	5	40	
Humustäckets tjocklek / <i>Thickness of the humus layer (cm)</i>	8.41*	1	25	4.87
Blekjordens tjocklek / <i>Thickness of the E horizon (cm)</i>	10.1	1	42	
Jorddjup i gropen / <i>Soil depth (cm)</i>	93.9	9	99	
Beståndsålder / <i>Stand age (år/year)</i>	73.6	20	195	42.5
Beståndets medelhöjd / <i>Average stand height (m)</i>	15.8	3.1	31	5.79
Tillväxt (m ³ sk år ⁻¹) / <i>Annual forest increment (m³ solid volume inc. bark)</i>	5.55	0	25.4	4.36

*Provytor med humuslager > 25 cm ej medtagna. / *Sample plots where the humus layer depth was > 25 cm were not included.*

Tabell 4. Korrelationer (Spearman rangkorrelation) mellan ståndortsfaktorer och halten B_{HWE} i humuslagret respektive B-horisonten. För de 63 prov från B-horisonten där borhalten låg under detektionsgränsen ($0,10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ ts}$) har erhållet värdet $0,05 \text{ mg kg}^{-1} \text{ ts}$. p = signifikans för korrelationen: NS - ej signifikant, * - $p < 0,05$, ** - $p < 0,01$, *** - $p < 0,001$.

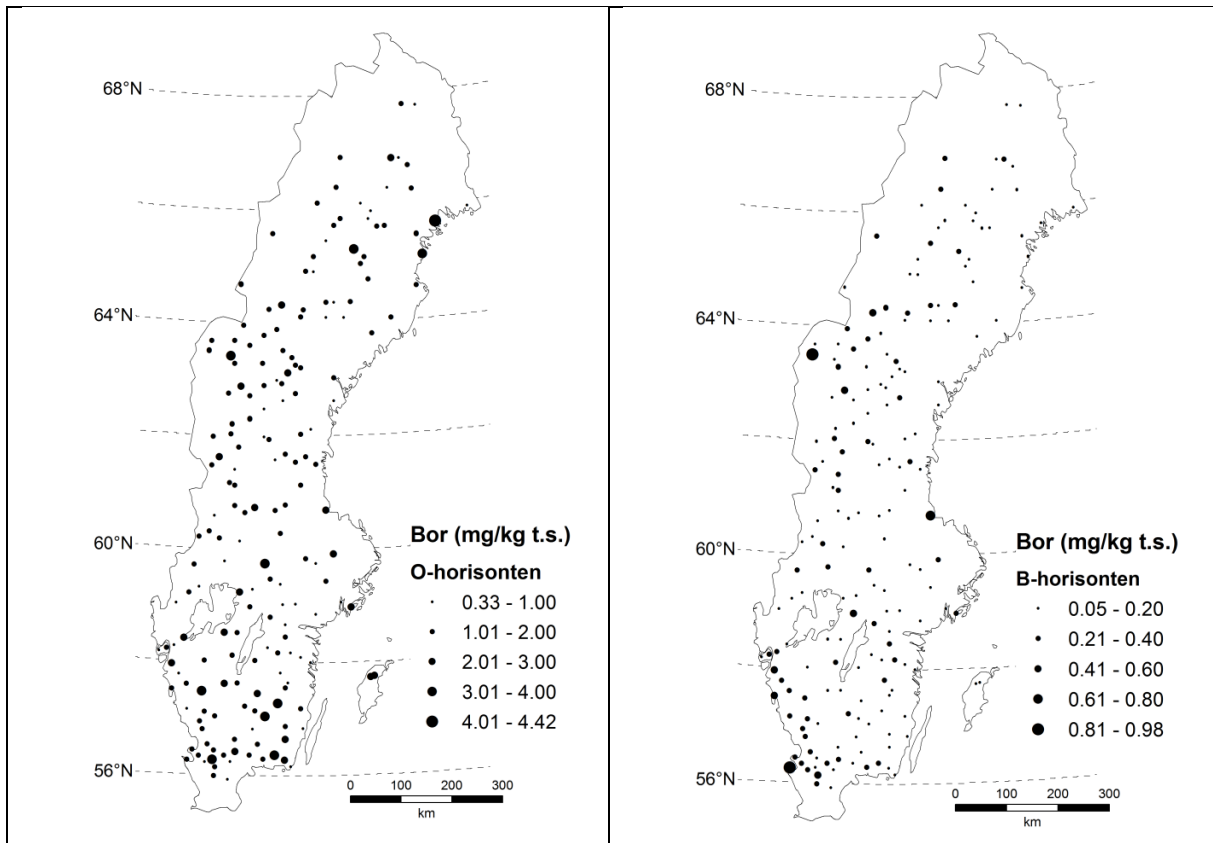
Table 4. Spearman rank correlation between site factors and B_{HWE} concentrations in humus layer and B horizon. For 63 samples from the B horizon, which had B_{HWE} concentrations below the detection limit ($0.10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$), the B_{HWE} concentration was set to $0.05 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$. p = significance for the correlation: NS – not significant, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Variabel	Klass- variabel	--- Korrelation med B_{HWE} i ---			
		Humuslager		B-horisont	
		r	p	r	p
Latitud / <i>Latitude</i>		-0.114	NS	-0.156	*
Longitud / <i>Longitude</i>		-0.105	NS	-0.287	***
Höjd över havet / <i>Altitude (m)</i>		-0.047	NS	0.084	NS
Depositionsområde / <i>Deposition region</i>	X	0.112	NS	0.141	*
Kustavstånd / <i>Distance to coast (km)</i>		-0.052	NS	0.041	NS
Temperatursumma / <i>Temperature sum (°C)</i>		0.065	NS	0.048	NS
Humiditet / <i>Humidity (mm)</i>		0.057	NS	0.343	***
Specifik avrinning / <i>Specific runoff (l s⁻¹ km⁻²)</i>		0.034	NS	0.214	**
Skogsskötselzon / <i>Silviculture zone</i>	X	0.119	NS	0.059	NS
Slutningens lutning / <i>Inclination class</i>	X	-0.050	NS	0.235	***
Rörligt markvatten / <i>Lateral soil water movement class</i>	X	-0.082	NS	0.066	NS
Markfuktighet / <i>Soil moisture class</i>	X	0.192	**	-0.186	**
Ytblockighet (antal/ha) / <i>Surface boulder frequency (number/ha)</i>	X	-0.048	NS	0.083	NS
Jordart / <i>Soil parent material class</i>	X	-0.016	NS	0.257	***
Textur / <i>Soil texture class</i>	X	-0.039	NS	0.147	*
Humusform / <i>Humus form class</i>	X	0.055	NS	-0.023	NS
Humustäckets tjocklek / <i>Thickness of the humus layer (cm)</i> ¹⁾		0.129	NS	-0.016	NS
Blekkjords tjocklek / <i>Thickness of B horizon (cm)</i>		0.119	NS	-0.170	*
Jorddjup i gropen / <i>Soil depth (cm)</i>		-0.005	NS	-0.117	NS
Jordmånstyp / <i>Soil type class</i>	X ²⁾	-	-	-	-
Beståndsålder / <i>Stand age (år/year)</i>		0.229	***	0.073	NS
Beståndets medelhöjd / <i>Average stand height (m)</i>		0.255	***	0.144	*
Tillväxt ($\text{m}^3 \text{ sk år}^{-1}$) / <i>Annual forest increment (m³ solid volume inc bark)</i>		0.074	NS	0.077	NS
Läge i beståndet / <i>Location of the plot within the stand</i>	X ³⁾	-	-	-	-
Fältskiktstyp / <i>Field layer type</i>	X	-0.052	NS	-0.153	*
Bottenskiktstyp / <i>Ground layer type</i>	X	-0.089	NS	0.215	**

1) Provytor med humuslager > 25 cm ej medtagna. / *Sample plots where the humus layer depth was > 25 cm were not included.*

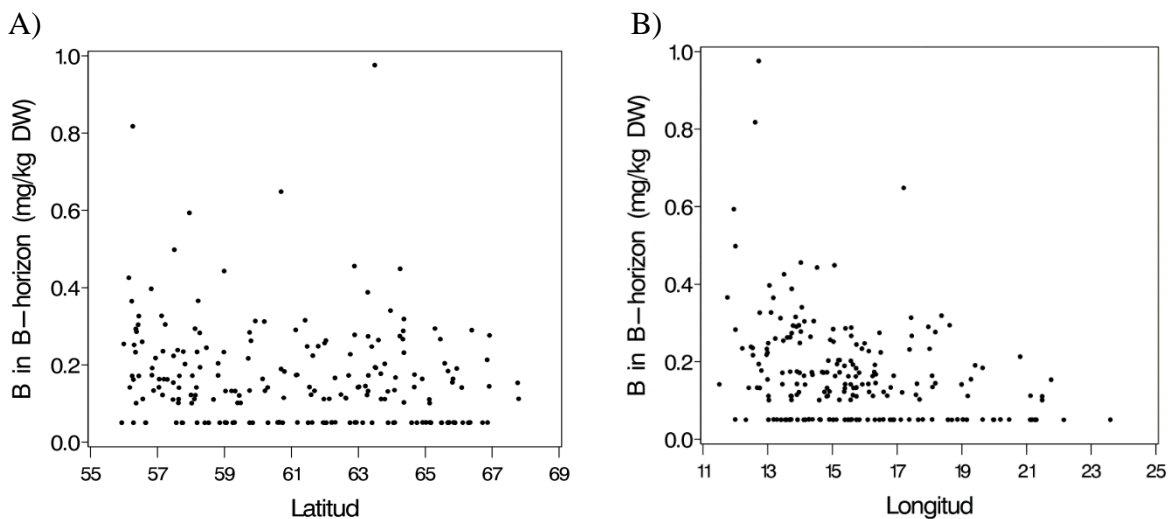
2) Ingen rangordning kunde göras för jordmånstyp, rangkorrelation utfördes därför inte, enbart variansanalys (se tabell 14) / *No ranking could be done for the soil type classes, rank correlation was therefore not performed, only the analysis of variance (Table 14).*

3) De sju klasserna ombildades till två klasser; inne i beståndet eller i ytterkant av beståndet. Enbart t-test utfördes (se tabell 17) / *The seven classes for location of the plot within the stand were converted into two classes; inside the stand or at the outer edge of the stand. Only t-test was performed (Table 17).*



Figur 6. Halten av B_{HWE} i humuslagret och B-horisonten från 210 provtytor på skogsmark inom Sverige. För 63 prov från B-horisonten låg halten B_{HWE} under detektionsgränsen ($0,10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ t.s.}$) och har då ersatts med värdet $0,05 \text{ mg kg}^{-1} \text{ t.s.}$

Figure 6. Concentration of B_{HWE} in the humus layer and B horizon at 210 sample plots on forest land in Sweden. 63 samples from the B horizon had B_{HWE} -concentrations below the detection limit ($0.10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw.}$) and have been replaced with the value $0.05 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw.}$



Figur 7. Sambandet mellan B_{HWE} -halten i B-horisonten och latitud (A) samt longitud (B).
Figure 7. Relationship between B_{HWE} in the B horizon and latitude (A) and longitude (B).

Ståndortsvariabler kopplade till klimatet

I detta avsnitt behandlas variabler, som alla är mer eller mindre kopplade till klimatet: temperatursumma, humiditet, höjd över havet, kustavstånd, skogsskötselzon och depositionsområde.

Temperatursumman hade ingen signifikant inverkan på halten B_{HWE} i humuslagret eller B-horisonten, om man gör en korrelationsanalys på hela materialet (Tabell 4). Vid en uppdelning av materialet i olika temperatursummaklasser, så har dock områden med temperatursumma över 1500 °C signifikant högre halt B_{HWE} i B-horisonten än områden med lägre temperatursumma (Tabell 5). Eventuellt skulle detta kunna bero på att proven från denna temperatursummaklass har i medeltal högre kolhalt i B-horisonten än övriga klasser. Men skillnaden i B-horisonternas kolhalt är dock inte stor om man jämför temperatursummaklassen 1500-1590 °C med temperatursummaklasserna 1100-1299 °C och 1300-1499 °C (visas ej).

Tabell 5. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrsubstans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika temperatursummaklasser. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 5. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different temperature sum classes. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Temperatursummeklass <i>Temperature sum class</i>	Antal prov <i>Number of samples</i>	----- Horisont / Horizon -----	
		Humuslager <i>Humus layer</i>	B-horisont <i>B horizon</i>
500 - 799	51	1.33 \pm 0.08 a	0.183 \pm 0.022 b
800 - 899	23	1.30 \pm 0.11 a	0.144 \pm 0.018 b
900 - 1099	38	1.34 \pm 0.13 a	0.118 \pm 0.012 c
1100 - 1299	25	1.48 \pm 0.16 a	0.151 \pm 0.016 b
1300 - 1499	63	1.49 \pm 0.10 a	0.182 \pm 0.017 b
≥ 1500	10	1.27 \pm 0.20 a	0.302 \pm 0.068 a

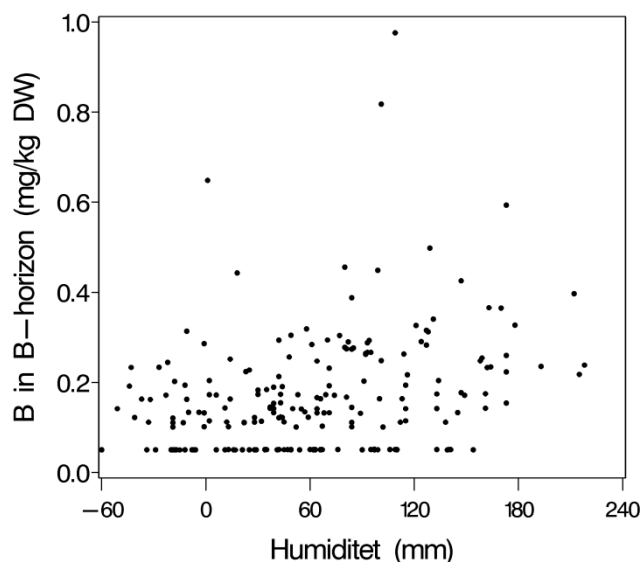
Höjden över havet samt kustavståndet, som båda till viss del är kopplade till temperatursumman, hade heller inga signifikant samband med halten B_{HWE} i humuslagret eller B-horisonten (Tabell 4).

Humiditeten hade ingen signifikant inverkan på halten B_{HWE} i humuslagret. I B-horisonten var dock sambandet signifikant ($r=0,343$, $p < 0,001$), d.v.s. halten B_{HWE} ökade ju högre årsmedelhumiditeten var (Tabell 4, 6, Fig. 8). I detta datamaterial finns en tydlig ökning av kolhalten i B-horisonten när humiditeten ökar.

Tabell 6. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrs substans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika humiditetsklasser. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 6. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different humidity classes. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Humiditetsklass Humidity class (mm)	Antal prov Number of samples	----- Horisont / Horizon ----- Humuslager Humus layer	B-horisont B horizon
-60 - -50	3	1.91 \pm 0.47 a	0.081 \pm 0.030 d
-50 - 0	33	1.42 \pm 0.19 a	0.130 \pm 0.013 cd
0 - 50	61	1.36 \pm 0.08 a	0.136 \pm 0.013 cd
50 - 100	60	1.40 \pm 0.09 a	0.169 \pm 0.014 bcd
100 -150	35	1.26 \pm 0.06 a	0.220 \pm 0.035 abd
>150	18	1.63 \pm 0.17 a	0.262 \pm 0.028 a



Figur 8. Sambandet mellan B_{HWE} -halten i B-horisonten och humiditet.
Figure 8. Relationship between B_{HWE} in the B horizon and the humidity.

Halten B_{HWE} i humuslagret var signifikant lägre i depositionsområde 2 jämfört med depositionsområdena 3 och 4. I B-horisonten var även borhalterna i depositionsområde 1 signifikant lägre än i område 3 och 4 (Tabell 7).

Tabell 7. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrs substans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika depositionsområden. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 7. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different deposition regions. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Depositionsområde <i>Deposition region</i>	Antal prov <i>Number of samples</i>	----- Horisont / <i>Horizon</i> -----	
		Humuslager <i>Humus layer</i>	B-horisont <i>B horizon</i>
1	85	1.37 \pm 0.08 ab	0.158 \pm 0.014 b
2	74	1.25 \pm 0.07 b	0.145 \pm 0.012 b
3	32	1.67 \pm 0.14 a	0.218 \pm 0.029 a
4	19	1.58 \pm 0.17 a	0.221 \pm 0.026 a

Prover fanns från alla de åtta skogsskötselzonerna (Fig. 3), men från skogsskötselzon 6 fanns bara två prover. I humuslagret fanns de i genomsnitt högsta halterna B_{HWE} i skogsskötselzon 4 (Norrlandskusten), men dessa halter var inte signifikant skilda mot medelhalterna i övriga skogsskötselzoner. Enda signifikanta skillnaden, när det gäller borhalterna i humuslagret var mellan zon 5 (Mälardalen) och 8 (sydvästra Götaland) (Tabell 8).

I B-horisonten fanns de i genomsnitt klart högsta halterna B_{HWE} i skogsskötselzon 8, d.v.s. i sydvästra Sverige. Om man bortser från zon 6 (enbart två prover), så fanns de i medeltal lägsta halterna i skogsskötselzon 4, d.v.s. efter Norrlandskusten (Tabell 8). Detta var lite förvånande, eftersom man kanske förväntade sig att närheten till Bottenhavet och Bottenviken skulle medföra lite högre borhalter i B-horisonten, samtidigt som borhalterna i humuslagret i denna zon var högst. Den låga genomsnittliga B_{HWE} -halten i skogsskötselzon 4 kan till stor del förklaras av att kolhalten i B-horisonten i denna zon var i medeltal signifikant lägre än i de övriga skogsskötselzonerna. De låga kolhalterna i B-horisonten inom zon 4 kan delvis förklaras av att texturen i denna zon var i genomsnitt en klass grövre än i de övriga zonerna. Detta kan i sin tur troligtvis förklaras av att ytorna i skogsskötselzon 4 ligger under högsta kustlinjen och detta område längs Norrlandskusten har i regel svallats kraftigt. De översta lagren i mineraljorden saknar därför ofta en stor del av den ursprungliga finjorden och har således en relativt grov textur.

Tabell 8. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrs substans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika skogsskötselzoner. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 8. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different silviculture zones. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Skogsskötselområde <i>Silviculture zone</i>	Antal prov <i>Number of samples</i>	----- Horisont / <i>Horizon</i> -----	
		Humuslager <i>Humus layer</i>	B-horisont <i>B horizon</i>
1	35	1.23 \pm 0.08 ab	0.171 \pm 0.028 bcd
2	39	1.40 \pm 0.10 ab	0.171 \pm 0.018 bd
3	37	1.24 \pm 0.09 ab	0.141 \pm 0.015 bcd
4	14	1.67 \pm 0.32 ab	0.121 \pm 0.042 cd
5	34	1.36 \pm 0.14 b	0.150 \pm 0.016 bcd
6	2	1.61 \pm 1.04 ab	0.091 \pm 0.041 d
7	19	1.54 \pm 0.69 ab	0.145 \pm 0.020 bcd
8	30	1.56 \pm 0.13 a	0.259 \pm 0.031 ad

Slutningens lutning

I lutningsklass 10 (med högsta lutningen) fanns bara två provytor. Den i genomsnitt högsta borhalten i humuslagret återfanns för ytor med minst lutning, medan den lägsta fanns på ytor där lutningen var 2,1-4 m. Mellan dessa två klasser fanns den enda signifikanta skillnaden i borhalter (Tabell 9).

För B-horisonten var förhållandet det motsatta; de i medeltal klart högsta B_{HWE} -halterna fanns i de två lutningsklasser med den största lutningen. De lägsta borhalterna återfanns i lutningsklass 1 (Tabell 9).

Tabell 9. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrsubstans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika lutningsklasser. Lutningen bedöms utgående från markens höjdskillnad inom en 20 meterssträcka. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 9. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different inclination classes. The inclination was estimated on the height difference within a 20 meter range. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Lutningsklass Inclination class	Antal prov Number of samples	----- Horisont / Horizon -----	
		Humuslager Humus layer	B-horisont B horizon
1 = 0-1 m	83	1.49 \pm 0.09 a	0.140 \pm 0.012 c
2 = 1.1-2 m	63	1.38 \pm 0.09 ab	0.174 \pm 0.016 b
4 = 2.1-4 m	44	1.22 \pm 0.09 b	0.153 \pm 0.012 bc
7 = 4.1-7 m	18	1.41 \pm 0.10 ab	0.309 \pm 0.055 a
10 = 7.1-10 m	2	1.30 \pm 0.50 ab	0.264 \pm 0.029 abc

Dominerande markfuktighet

För detta datamaterial fanns bara två provytor där markfuktigheten klassades som fuktig. I humuslagret var halterna av B_{HWE} klart högst i de fuktigaste klasserna, men i B-horisonten fanns inte denna gradient (Tabell 10).

Tabell 10. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrsubstans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika markfuktighetsklasser. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 10. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different soil moisture classes. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Markfuktighetsklass Soil moisture class	Antal prov Number of samples	----- Horisont / Horizon -----	
		Humuslager Humus layer	B-horisont B horizon
Torr / Dry	11	1.32 \pm 0.18 bc	0.138 \pm 0.021 ab
Frisk / Mesic	152	1.27 \pm 0.04 c	0.181 \pm 0.011 a
Frisk-fuktig / Mesic-moist	45	1.76 \pm 0.15 ab	0.133 \pm 0.017 b
Fuktig / Moist	2	2.90 \pm 0.54 a	0.172 \pm 0.122 ab

Jordart och textur

I humuslagret fanns de högsta halterna B_{HWE} på lågsorterade sediment, men skillnaderna mellan jordarterna var inte signifikant. Men i B-horisonten hade morän den klart högsta borhalten (Tabell 11).

Tabell 11. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrsubstans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika jordarter. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 11. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different soil parent material. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Jordart <i>Soil parent material</i>	Antal prov <i>Number of samples</i>	----- Horisont / <i>Horizon</i> -----	
		Humuslager <i>Humus layer</i>	B-horisont <i>B horizon</i>
Högsorterat sediment / <i>Well sorted sediments</i>	33	1.34 \pm 0.12 a	0.125 \pm 0.016 b
Lågsorterat sediment / <i>Poorly sorted sediments</i>	21	1.68 \pm 0.21 a	0.128 \pm 0.032 b
Morän / <i>Till</i>	156	1.37 \pm 0.05 a	0.183 \pm 0.011 a

Av de åtta texturklasser som används inom MI, hade vi valt bort ytor med den grövsta texturklassen; stenig morän eller sten. Av de sju återstående texturklasserna, så fanns de flesta provytorna (92 st) på sandig-moig morän eller grovmo. Inom texturklassen grusig morän/grus fanns bara en yta.

I humuslagret fanns inga signifikanta skillnader i borhalter med avseende på vilken textur som underlagrade humuslagret. När det gäller B-horisonten, så hade ytor med texturklassen sandig-moig morän / mellansand signifikant lägre borhalt än de tre finkornigaste texturklasserna, d.v.s. jordar med fin textur har ofta högre borhalt i B-horisonten (Tabell 12).

Tabell 12. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrsubstans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika texturklasser. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 12. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different texture classes. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Texturklass / <i>Texture class</i>	Antal prov <i>Number of samples</i>	----- Horisont / <i>Horizon</i> -----	
		Humuslager <i>Humus layer</i>	B-horisont <i>B horizon</i>
Grusig morän / grus <i>Gravelly till / Gravel</i>	1	1.51	0.252
Sandig morän / grovsand <i>Sandy till / Coarse-grained sand</i>	9	1.27 \pm 0.22 a	0.137 \pm 0.025 ab
Sandig- <u>moig</u> morän / mellansand <i>Sandy-silty till / Medium-grained sand</i>	40	1.53 \pm 0.12 a	0.138 \pm 0.018 b
Sandig- <u>moig</u> morän / grovmo <i>Sandy-silty till / Fine sand</i>	92	1.35 \pm 0.08 a	0.181 \pm 0.016 a
Moig morän / finmo <i>Silty till / Coarse silt</i>	53	1.40 \pm 0.09 a	0.170 \pm 0.015 a
Mjällig morän / mjäla <i>Fine silty till / Fine silt</i>	9	1.33 \pm 0.27 a	0.144 \pm 0.037 ab
Lerig morän / lera <i>Clayey till / Clay</i>	6	1.25 \pm 0.33 a	0.237 \pm 0.028 a

Humusform

Av de sex olika humusformer som fanns i detta datamaterial var mår typ 1 den vanligaste ($n=105$). Bland humusformerna så hade torvartad mår den klart högsta halten av B_{HWE} i humuslagret, medan mulliknade moder och mull hade de klart lägsta halterna (Tabell 13). Det senare berodde till stor del på att mulliknade moder och mull båda hade de i genomsnitt lägsta kolhalterna ($< 14\%$) och därmed också lägre katjonbyteskapacitet.

I B-horisonten gäller det omvända; mulliknande moder och mull hade de i genomsnitt högsta B_{HWE} -halterna (Tabell 13). Det kan för mulliknande moder till viss del förklaras att denna humusform hade något högre kolhalt i B-horisonten än de övriga humusformerna.

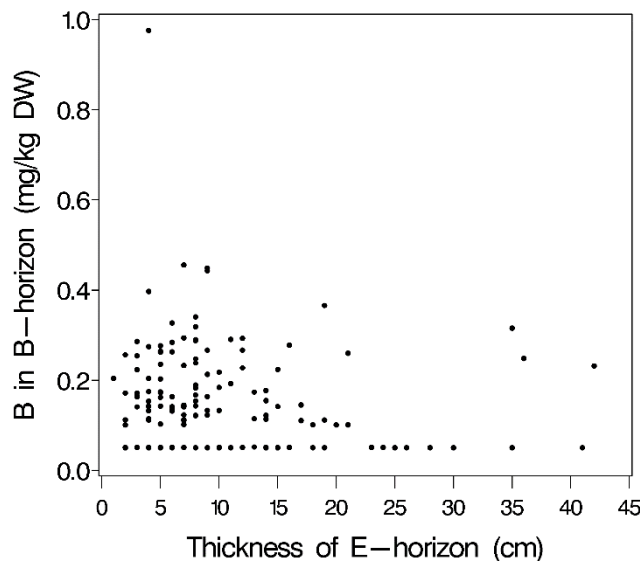
Tabell 13. Medelvärden \pm medelfel för halten av B_{HWE} (mg kg^{-1} torrsubstans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika humusformer. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 13. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different humus forms. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Humusform / Humus form	Antal prov Number of samples	----- Horisont / Horizon -----	
		Humuslager Humus layer	B-horisont B horizon
Mår, typ 1 / Mor type 1	105	1.31 \pm 0.05 b	0.160 \pm 0.012 b
Mår, typ 2 / Mor type 2	42	1.50 \pm 0.11 b	0.167 \pm 0.019 b
Moder / Moder	10	1.37 \pm 0.16 b	0.140 \pm 0.032 b
Mulliknande moder / Mull-like moder	13	0.97 \pm 0.11 c	0.232 \pm 0.031 a
Mull / Mull	20	1.05 \pm 0.16 c	0.219 \pm 0.047 ab
Torvartad mår / Peat-like mor	20	2.24 \pm 0.24 a	0.138 \pm 0.023 b

Blekkjordens mäktighet

För B_{HWE} -halten i humuslagret fanns inget samband med blekkjordens mäktighet. Halten B_{HWE} i B-horisonten hade däremot ett negativt samband med blekkjordsmäktigheten (Tabell 4, Fig. 9).



Figur 9. Sambandet mellan halten B_{HWE} i B-horisonten och blekkjordens mäktighet.
Figure 9. Relationship between B_{HWE} in the B horizon and the thickness of the E horizon.

Jordmånstyp

I det dataurval som gjordes fanns nio olika jordmånstyper. Blockmarker, lithosoler (grunda marker) och störda jordmånar fanns inte med i datamaterialet. Järnpodsoler dominerade materialet med 104 provtytor, medan kulturjordmån och jordmånar utan B-horisont p.g.a. grovjordart bara hade var sin provtyta.

De klart högsta halterna av B_{HWE} i humuslagret påträffades i humuspodsoler och sumpjordmånar, medan låga halter noterades speciellt i brunjordar. Orsaken till dessa

differenser hänger till viss del samman med kolhalten i humuslagret. De i genomsnitt klart lägsta kolhalterna noterades i brunjordarna, medan exempelvis humuspodsoler hade de i medeltal högsta kolhalterna (Tabell 14).

I B-horisonten fanns de i genomsnitt högsta borhalterna i brunjordar, medan de lägsta halterna fanns i humuspodsoler (Tabell 14). De senare hade också i medeltal de lägsta kolhalterna i B-horisonten bland jordmånerna.

Tabell 14. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg/kg torrs substans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika jordmånstyper. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 14. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg⁻¹ d.w.) in humus layers and B horizons divided into different soil types. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Jordmånstyp Soil type	Antal prov Number of Samples	----- Horisont / Horizon -----	
		Humuslager Humus layer	B-horisont B horizon
<u>Med utbildad B-horisont / With visible B horizon</u>			
Kulturjordmån / Cultivated soil	1	0.47	0.051
Brunjord / Brown forest soil	18	1.05 \pm 0.13 c	0.252 \pm 0.051 a
Övergångstyp / Transition type	23	1.21 \pm 0.15 bc	0.188 \pm 0.027 ab
Järnpodsol / Iron podzol	104	1.35 \pm 0.06 b	0.154 \pm 0.012 b
Järnhumuspodsol / Humus-iron podzol	33	1.35 \pm 0.06 b	0.191 \pm 0.020 ab
Humuspodsol / Humus podzol	9	2.30 \pm 0.40 a	0.056 \pm 0.006 c
Sumpjordmån / Hydromorphic soil	16	2.03 \pm 0.21 a	0.152 \pm 0.028 b
<u>Utan utbildad B-horisont / Without visible B horizon</u>			
P.g.a. tät jordart / Due to massive soil parent material	5	1.11 \pm 0.22 bc	0.189 \pm 0.040 ab
P.g.a. grov jordart / Due to coarse soil parent material	1	1.51	0.252

Fältskiktstyp och bottenskiktstyp

Fältskiktstyperna som registreras inom MI representerar en bördighetsgradient. Av de 16 fältskiktstyper som registreras, så fanns i detta material endast 12 st, varav två typer bara hade en provyta var. Den mest förekommande fältskiktstypen i detta datamaterial var blåbärstyp (n=63).

När det gäller humuslagret så fanns det inga signifikanta skillnader i B_{HWE} -halten med avseende på fältskiktstyp. Man kan dock notera att fattiga ristyper som kråkbär/ljung och lingon hade relativt låga halter B_{HWE} i humuslagret. I B-horisonten var det ytor utan fältskikt som hade de högsta halterna (Tabell 15).

Tabell 15. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrsubstans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika fältskiktstyper. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 15. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different field layer types. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Fältskiktstyp <i>Field layer types</i>	Antal prov <i>Number of samples</i>	----- Horisont / Horizon -----	
		Humuslager <i>Humus layer</i>	B-horisont <i>B horizon</i>
Höga örter utan ris / <i>Rich-herb without shrubs</i>	16	1.47 \pm 0.24 a	0.202 \pm 0.036 ab
Höga örter med ris-blåbär <i>Rich-herb with shrubs - bilberry</i>	3	1.36 \pm 0.22 a	0.147 \pm 0.057 abc
Låga örter utan ris / <i>Low herbs without shrubs</i>	21	1.36 \pm 0.19 a	0.203 \pm 0.041 abc
Låga örter med ris-blåbär <i>Low herbs with shrubs - bilberry</i>	17	1.43 \pm 0.13 a	0.146 \pm 0.018 abc
Låga örter med ris-lingon <i>Low herbs with shrubs - lingonberry</i>	1	1.68	0.388
Utan fältskikt / <i>Without field layer</i>	15	1.60 \pm 0.14 a	0.221 \pm 0.025 a
Breda gräs / <i>Broad-leaved grass</i>	9	1.65 \pm 0.39 a	0.135 \pm 0.031 bc
Smala gräs / <i>Thin-leaved grass</i>	30	1.30 \pm 0.11 a	0.159 \pm 0.018 abc
Låg starr / <i>Sedge-horsetail</i>	1	1.67	0.050
Blåbär / <i>Bilberry</i>	63	1.41 \pm 0.10 a	0.170 \pm 0.015 abc
Lingon / <i>Lingonberry</i>	25	1.29 \pm 0.09 a	0.138 \pm 0.037 c
Kräkbär-ljung / <i>Crowberry-heather</i>	9	1.10 \pm 0.12 a	0.119 \pm 0.030 bc

I detta datamaterial fanns fem olika bottenskiktstyper, varav den klart vanligaste var friskmosstyp ($n=165$). Lavtyp och lavrik typ hade båda låga borhalter i både humuslager och B-horisont. Den klart högsta borhalten i humuslagret hade vitmosstyp. Friskmosstyper hade den högsta borhalten i B-horisonten, medan lavrika typer hade den lägsta (Tabell 16).

Tabell 16. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrsubstans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på olika bottenskiktstyper. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

Table 16. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into different ground layer types. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Bottenskiktstyp <i>Ground layer type</i>	Antal prov <i>Number of samples</i>	----- Horisont / Horizon -----	
		Humuslager <i>Humus layer</i>	B-horisont <i>B horizon</i>
Lavtyp / <i>Lichen type</i>	10	1.12 \pm 0.18 c	0.127 \pm 0.028 ab
Lavrik typ / <i>Lichen-rich type</i>	6	1.22 \pm 0.15 bc	0.070 \pm 0.019 b
Vitmosstyp / <i>Sphagnum type</i>	9	2.47 \pm 0.42 a	0.137 \pm 0.032 ab
Sumpmosstyp / <i>Swamp moss type</i>	20	1.67 \pm 0.18 ab	0.132 \pm 0.021 ab
Friskmosstyp / <i>Mesic moss type</i>	165	1.32 \pm 0.05 c	0.181 \pm 0.011 a

Provytans läge i beståndet

I de två klasser vi skapade (från de ursprungliga sju), så dominerade klassen inne i beståndet ($n=121$). De övriga 89 provytorna låg i kanten av respektive bestånd.

De genomsnittliga halterna av B_{HWE} i humuslager från provytorna inne i bestånden var signifikant högre än motsvarande medelvärden från provytorna som låg mot vägar eller andra ägoslag (Tabell 17).

Tabell 17. Medelvärden \pm medelfel för halten B_{HWE} (mg kg^{-1} torrsubstans) i prov från humuslager resp. B-horisont uppdelat på provytornas lägen inom skogsbestånden. Medelvärdena inom respektive kolumn är signifikant skilda ($p < 0,05$) om bokstäverna efter medelvärdena är olika.

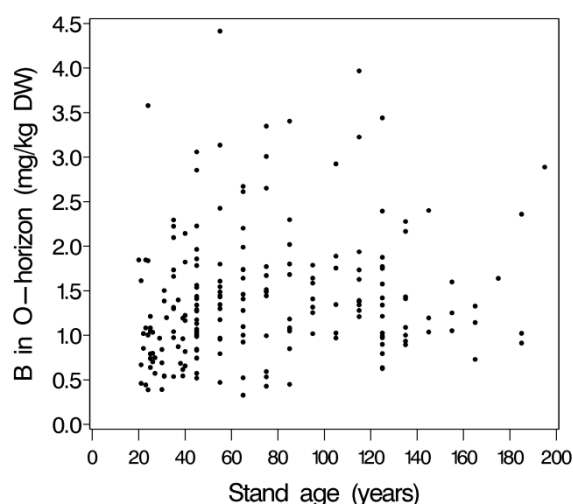
Table 17. Mean values \pm standard error for concentrations of B_{HWE} (mg kg^{-1} d.w.) in humus layers and B horizons divided into locations of the plots within the stands. Mean values within each column are significantly different ($p < 0.05$) if the letters after the mean values are different.

Läge i beståndet (exposition) <i>Location within the stand (exposition)</i>	Antal prov <i>Number of samples</i>	----- Horisont / <i>Horizon</i> -----	
		Humuslager <i>Humus layer</i>	B-horisont <i>B horizon</i>
Inne i bestånd / <i>Inside the stand</i>	121	1.49 \pm 0.07 a	0.153 \pm 0.009 a
Mot väg eller andra ägoslag/bestånd <i>Towards road or other land use/stands</i>	89	1.26 \pm 0.07 b	0.190 \pm 0.017 a

I B-horisonten var förhållandet det motsatta, d.v.s. ytor som låg mot vägar eller andra ägoslag hade i genomsnitt något högre B_{HWE} -halter än provytor längre in i bestånden. Men denna skillnad var inte signifikant (Tabell 17).

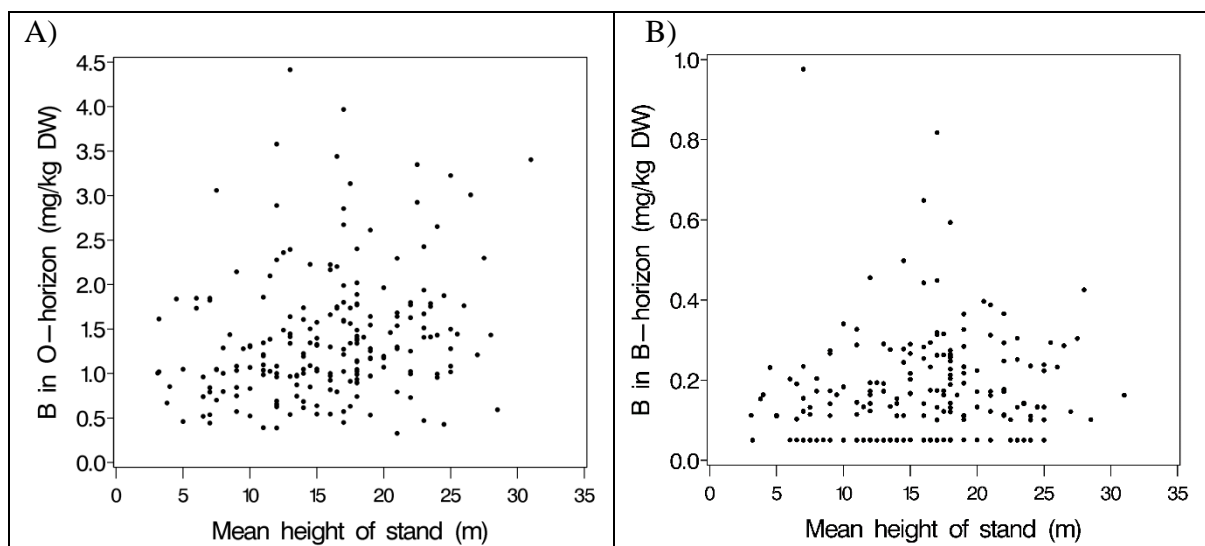
Beståndets ålder, medelhöjd och tillväxt

Beståndsåldern hade inget samband med halten B_{HWE} i B-horisonten, men ett svagt men signifikant samband med B_{HWE} -halten i humuslagret (Tabell 4, Fig. 10).



Figur 10. Sambandet mellan halten B_{HWE} i humuslager och beståndsålder.
Figure 10, Relationship between B_{HWE} in the humus layer and the stand age.

Beståndens medelhöjd hade signifikanta samband med B_{HWE} -halten i humuslagret och B-horisonten (Tabell 4, Fig. 11). Tillväxten i bestånden hade dock inget samband med B_{HWE} -halten i varken humuslager eller B-horisont (Tabell 4).



Figur 11. Sambandet mellan B_{HWE} -halten och beståndens medelhöjd i A: humuslagret ($r_{sp}=0,255$, $p<0,001$) och B: B-horisonten ($r_{sp}=0,144$, $p <0,05$). r_{sp} = Spearmans rangkorrelation.

Figure 11. Relationship between B_{HWE} and the mean height of the stands in A: the humus layer ($r_{sp}=0.255$, $p<0.001$), and B: the B-horizon ($r_{sp}=0.144$, $p <0.05$). r_{sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

Borhaltens samband med andra markkemiska variabler

De inom Markinventeringen analyserade markkemiska variablerna har också använts för att se om de hade något samband med B_{HWE} -halterna i humuslager respektive B-horisont (Tabell 18).

Både halten B_{HWE} i humuslagret och B-horisonten hade signifikanta samband med de flesta markkemiska variabler inom sina respektive markhorisonter. Däremot fanns det i regel inga signifikanta samband mellan B_{HWE} -halterna och de markkemiska variablerna i motsatt markhorisont. De få signifikanta samband som fanns mellan B_{HWE} -halterna och de markkemiska variablerna i motsatt markhorisont var relativt svaga. Halten B_{HWE} i humuslagret styrs således inte av markvariabler i underliggande B-horisont och vice versa. De flesta av de markkemiska variablerna hade en positiv skevhet, som för de utbytbara baskatjonerna och speciellt då i B-horisonten kunde vara betydande (Tabell 18).

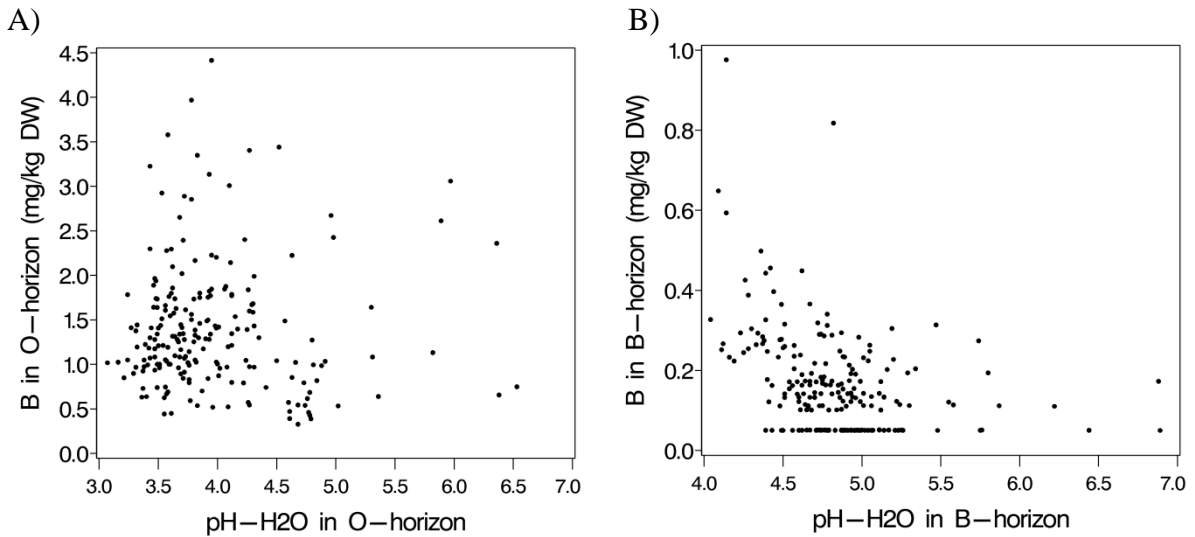
pH

När det gäller B_{HWE} -haltens korrelation med pH-värdet i respektive markhorisont, så fanns det inget samband mellan halten B_{HWE} i humuslagret och pH-värdet i samma markhorisont. I B-horisonten var tendensen dock en ökning av B_{HWE} -halten med minskat pH-värde (Tabell 18, Fig. 12B).

Tabell 18. Antal värden (n), medelvärden, minimum-maximumvärden och skevhet för olika kemiska variabler i humuslagret (O) och B-horisonten (B), samt de kemiska variablernas korrelationer (Spearman rangkorrelation) med halten växttillgängligt bor (B_{HWE}) i humuslagret respektive B-horisonten. p = signifikans för korrelationen: NS - ej signifikant, * - $p < 0.05$, ** - $p < 0.01$, *** - $p < 0.001$.

*Table 18. Number of values (n), mean, minimum-maximum values and skewness for different soil chemical properties in the humus layer (O) and B horizon (B), and Spearman rank correlations for these chemical variables with the concentration of plant available boron (B_{HWE}) in the humus layer and B horizon. p = significance for the correlation: NS – not significant, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.*

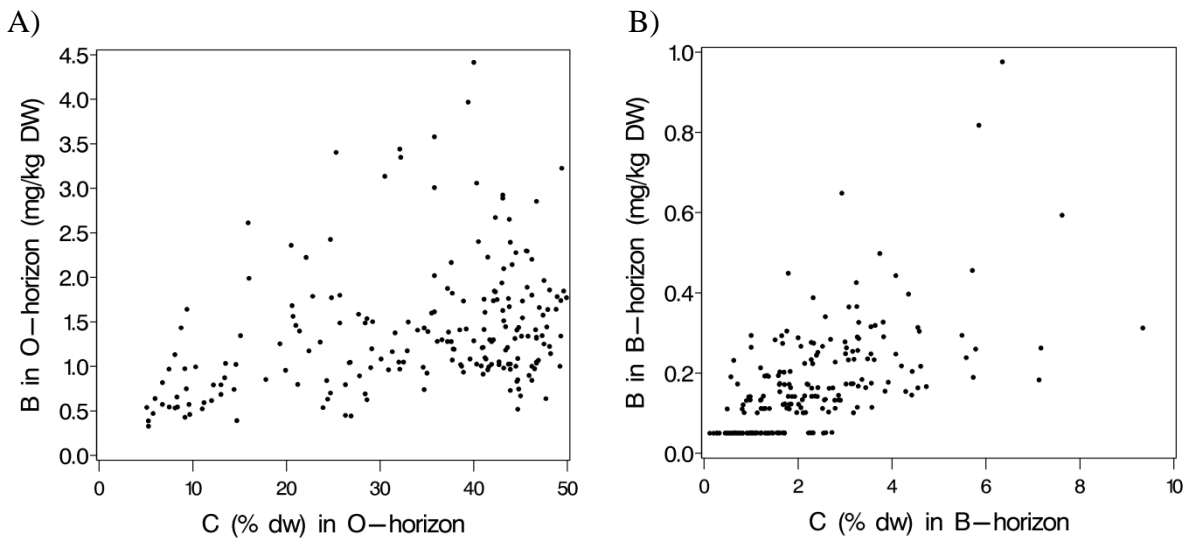
Variabel	Horisont	n	Medel	min – max	Skevhet	Korrelation med B_{HWE} / Correlation with B_{HWE}			
Variable	Horizon		Mean	min – max	Skewness	i humuslager in humus layer		i B-horisont in B-horizon	
						r	p	r	p
pH-H ₂ O	O	210	3.96	3.07 – 6.53	1.76	-0.049	NS	0.049	NS
Kolhalt (C) (% av ts)	O	210	33.6	5.08 – 49.9	-0.78	0.371	***	-0.021	NS
Kvävehalt (N) (% av ts)	O	210	1.11	0.28 - 2.63	0.06	0.589	***	0.057	NS
C/N	O	210	30.5	11.5 – 78.1	0.94	-0.011	NS	-0.166	*
Utb. Ca (mmol _c kg ⁻¹ ts)	O	210	51.0	2.27 – 442	4.42	0.343	***	-0.046	NS
Utb. Mg (mmol _c kg ⁻¹ ts)	O	210	13.0	1.71 – 36.3	1.09	0.537	***	0.098	NS
Utb. K (mmol _c kg ⁻¹ ts)	O	210	16.1	1.77 – 43.3	0.41	0.388	***	-0.058	NS
Utb. Na (mmol _c kg ⁻¹ ts)	O	210	3.87	0 – 22.2	2.72	0.458	***	-0.004	NS
Utb. Mn (mmol _c kg ⁻¹ ts)	O	210	2.66	0.076 – 23.5	2.76	0.245	***	0.081	NS
Utb. Al (mmol _c kg ⁻¹ ts)	O	210	9.08	0 – 44.9	1.79	-0.034	NS	-0.146	*
Tit. aciditet (mmol _c kg ⁻¹ ts)	O	210	615	32.0 – 1180	-0.38	0.320	***	-0.025	NS
CEC (mmol _c kg ⁻¹ ts)	O	210	702	147 – 1280	-0.42	0.394	***	-0.030	NS
Basmättnadsgrad (%)	O	210	14.3	4.06 – 85.2	3.37	0.115	NS	0.005	NS
pH-H ₂ O	B	210	4.83	4.04 – 6.89	1.73	-0.182	**	-0.408	***
Kolhalt (% av ts)	B	210	2.26	0.12 – 9.34	1.47	-0.000	NS	0.693	***
Kvävehalt (% av ts)	B	210	0.120	0.01 – 0.52	1.82	-0.043	NS	0.695	***
C/N	B	210	18.4	4.00 – 31.7	0.15	0.002	NS	0.263	***
Utb. Ca (mmol _c kg ⁻¹ ts)	B	210	3.78	0.031 – 111	6.55	0.017	NS	0.122	NS
Utb. Mg (mmol _c kg ⁻¹ ts)	B	210	0.874	0.026 – 17.5	6.08	0.036	NS	0.391	***
Utb. K (mmol _c kg ⁻¹ ts)	B	210	0.605	0.024 – 5.76	5.12	-0.102	NS	0.506	***
Utb. Na (mmol _c kg ⁻¹ ts)	B	210	0.653	0 – 3.82	2.92	-0.030	NS	0.454	***
Utb. Mn (mmol _c kg ⁻¹ ts)	B	210	0.086	0 – 1.22	4.15	0.114	NS	0.227	**
Utb. Al (mmol _c kg ⁻¹ ts)	B	210	6.63	0 – 39.9	2.02	0.079	NS	0.625	***
Tit. aciditet (mmol _c kg ⁻¹ ts)	B	210	70.8	0 – 220	1.01	0.021	NS	0.761	***
CEC (mmol _c kg ⁻¹ ts)	B	210	76.8	7.78 – 225	1.10	-0.018	NS	0.778	***
Basmättnadsgrad (%)	B	210	8.15	0.86 – 100	4.02	0.048	NS	-0.116	NS



Figur 12. Sambandet mellan halten B_{HWE} och $pH-H_2O$. A: I humuslagret ($r_{Sp}=-0,049$, $p=NS$). B: I B-horisonten ($r_{Sp}=-0,408$, $p < 0,001$). r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.
 Figure 12. Relationship between B_{HWE} -concentration and $pH-H_2O$. A: In the humus layer ($r_{Sp}=-0.049$, $p=NS$). B: In the B horizon ($r_{Sp}=-0.408$, $p < 0.001$). r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

Kol- och kvävehalt, samt C/N-kvot

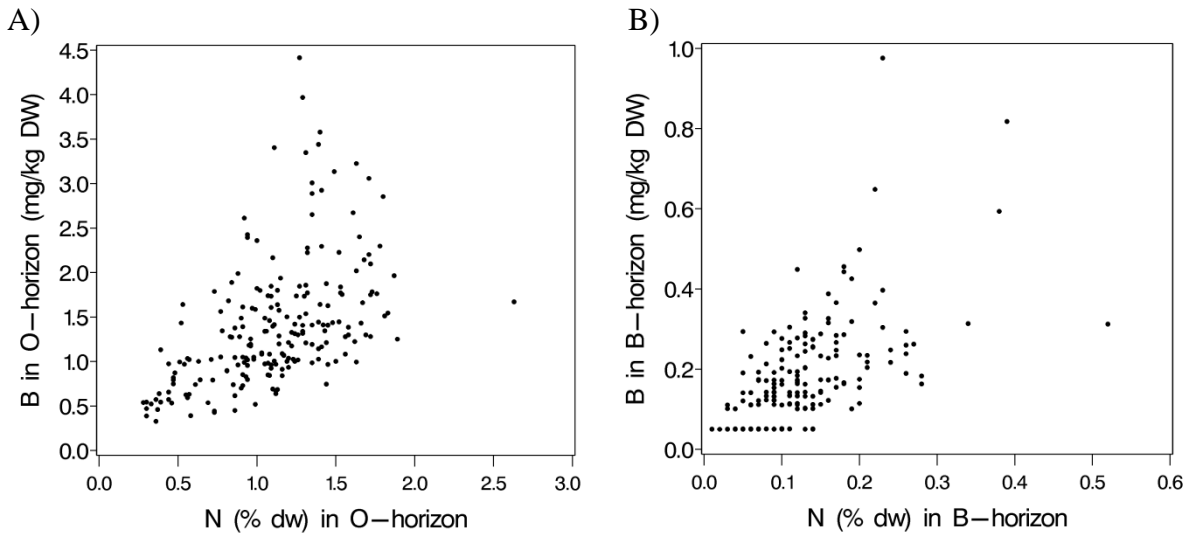
Kolhalten hade signifikant positiv korrelation med halten B_{HWE} i respektive markhorisont. Speciellt sambandet i B-horisonten var tydligt (Tabell 18, Fig. 13). Att kolhalten har en positiv inverkan på B_{HWE} -halten i marken är känt från många andra underökningar.



Figur 13. Sambandet mellan B_{HWE} och kolhalten. A: I humuslagret ($r_{Sp}=0,371$, $p < 0,001$). B: I B-horisonten ($r_{Sp}=0,693$, $p < 0,001$). r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.
 Figure 13. Relationship between B_{HWE} and the carbon content. A: In the humus layer ($r_{Sp}=0.371$, $p < 0.001$). B: In the B horizon ($r_{Sp}=0.693$, $p < 0.001$). r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

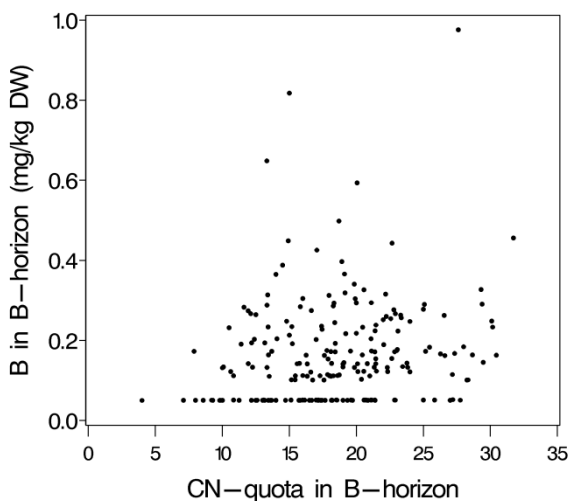
För kvävehalten fanns ett starkare positivt samband med halten B_{HWE} i respektive horisont, än vad som noterades för kolhalten (Tabell 18, Fig. 14).

C/N-kvoten hade ingen signifikant inverkan på halten B_{HWE} i humuslagret. I B-horisonten fanns dock en signifikant korrelation mellan C/N-kvoten och B_{HWE} -halten, men detta samband var inte så starkt (Tabell 18, Fig. 15).



Figur 14. Sambandet mellan B_{HWE} och kvävehalten. A: I humuslagret ($r_{Sp}=0,589$, $p<0,001$). B: I B-horisonten ($r_{Sp}=0,695$, $p<0,001$). r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.

Figure 14. Relationship between B_{HWE} and the nitrogen content. A: In the humus layer ($r_{Sp}=0.589$, $p<0.001$), B: In the B horizon ($r_{Sp}=0.695$, $p<0.001$). r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.



Figur 15. Sambandet mellan B_{HWE} och C/N-kvoten i B-horisonten ($r_{Sp}=0,263$, $p<0,001$).

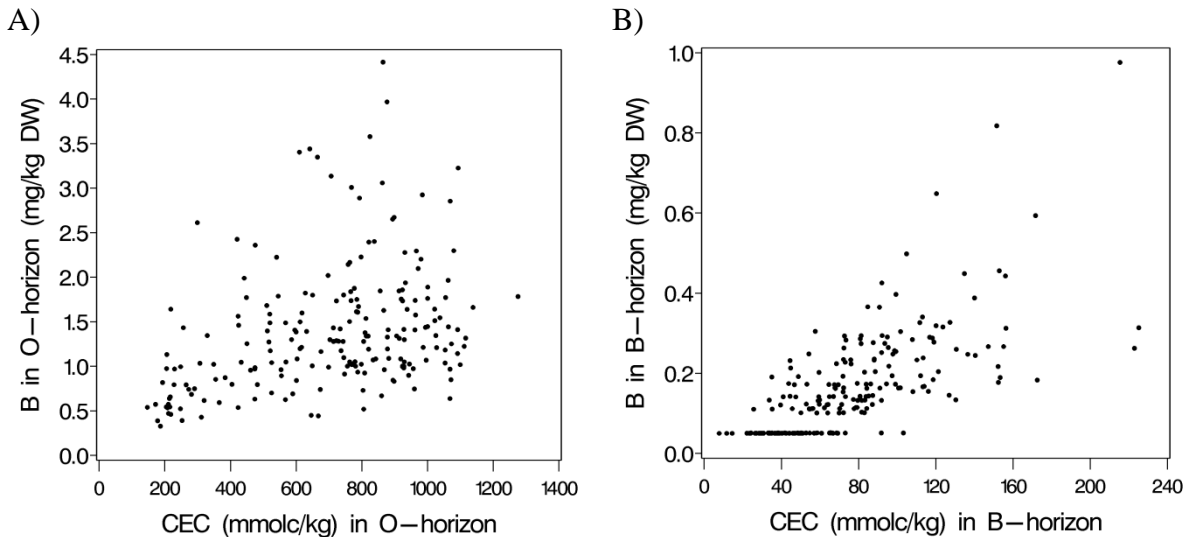
r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.

Figure 15. Relationship between B_{HWE} and the C/N quota in the B horizon. ($r_{Sp}=0.263$, $p<0.001$).

r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

Katjonbyteskapacitet

I B-horisonten finns ett relativt starkt positivt samband mellan B_{HWE} -halt och katjonbyteskapacitet (CEC), medan samma samband i humuslagret är något svagare (Tabell 18, Fig. 16). Dessa positiva samband torde till stor del hänga samman med att CEC i båda horisonterna är kopplat till mängden organiskt material och därmed till kolhalten. Starka positiva samband mellan kolhalt och CEC finns således i både humuslagret (Spearmans rangkorrelation, $r_{Sp}=0,915$) och B-horisonten ($r_{Sp}=0,826$).

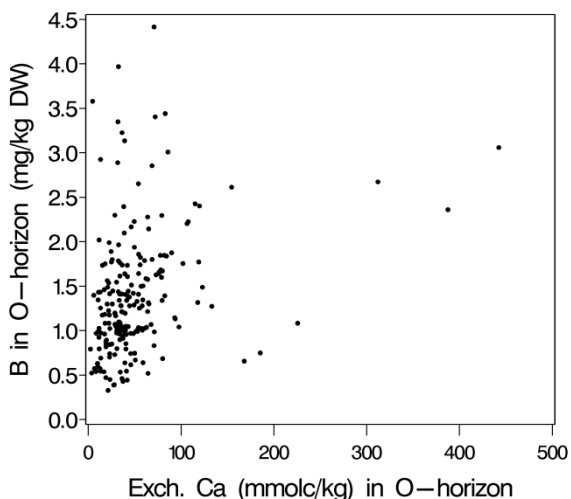


Figur 16. Sambandet mellan B_{HWE} och katjonbyteskapaciteten. A: I humuslagret ($r_{Sp}=0,394$, $p<0,001$). B: I B-horisonten ($r_{Sp}=0,778$, $p<0,001$). r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.

Figure 16. Relationship between concentration of B_{HWE} and the cation exchange capacity CEC. A: In the humus layer ($r_{Sp}=0.394$, $p<0.001$), B: In the B horizon ($r_{Sp}=0.778$, $p<0.001$). r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

Utbytbara baskatjoner

Enligt korrelationsanalys fanns det ett signifikant samband mellan halten B_{HWE} i humuslagret och utbytbart Ca i samma lager. Plottar man upp detta samband ser man dock att korrelationen blir signifikant främst beroende på tre höga värden på utbytbart Ca, samtidigt som B_{HWE} -halten i de proven är förhållandevis höga (Tabell 18, Fig. 17). I B-horisonten fanns inget samband mellan B_{HWE} -halt och utbytbart Ca (Tabell 18).



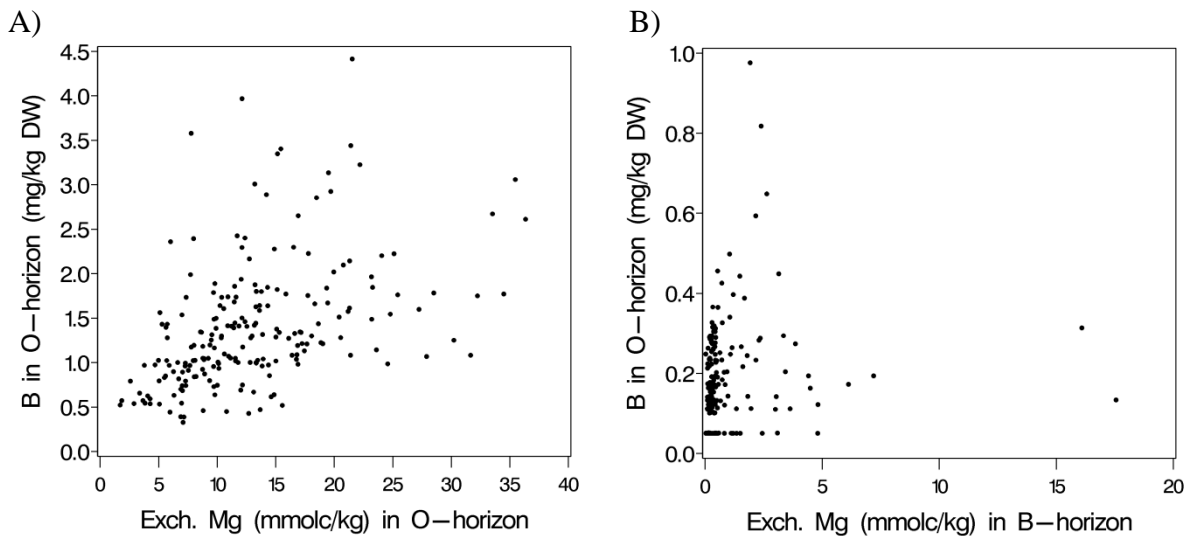
Figur 17. Sambandet mellan B_{HWE} och utbytbart Ca, i humuslagret ($r_{Sp}=0,343$, $p<0,001$).

r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.

Figure 17. Relationship between B_{HWE} and exchangeable Ca in the humus layer ($r_{Sp}=0.343$, $p<0.001$). r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

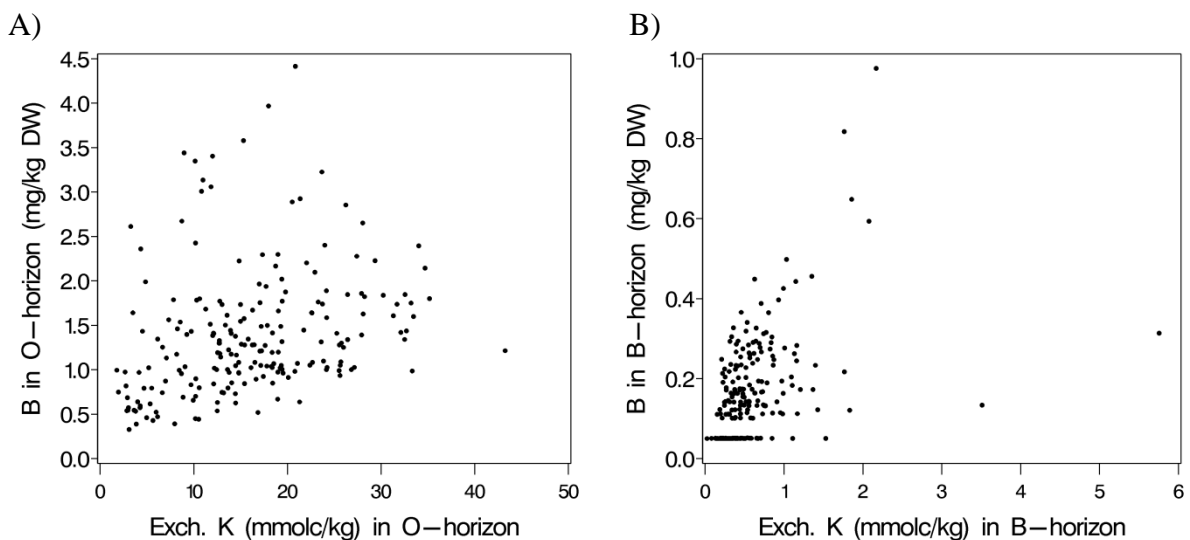
För utbytbart Mg i humuslagret fanns ett tydligt positivt samband med B_{HWE} -halten. Även i B-horisonten fanns ett signifikant positivt samband mellan dessa två variabler, men det var

svagare och berodde främst på några enstaka höga värden för båda variablerna (Tabell 18, Fig. 18).



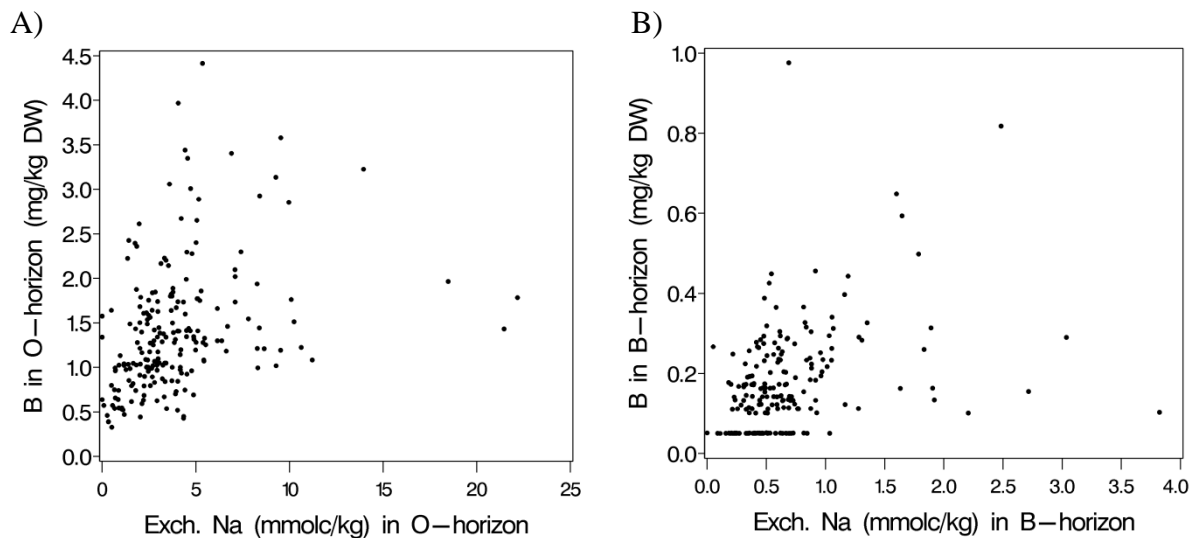
Figur 18. Sambandet mellan B_{HWE} och utbytbart Mg. A: I humuslagret ($r_{Sp}=0,537$, $p<0,001$). B: I B-horisonten ($r_{Sp}=0,391$, $p<0,001$). r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.
 Figure 18. Relationship between B_{HWE} and exchangeable Mg. A: In the humus layer ($r_{Sp}=0.537$, $p<0.001$), B: In the B horizon ($r_{Sp}=0.391$, $p<0.001$). r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

Utbytbart K hade ett signifikant samband med halten B_{HWE} i både humuslager och B-horisont. Enligt korrelationsanalysen var sambandet starkare i B-horisonten, men det berodde främst på några få höga värden för B_{HWE} -halten och utbytbart K. Så även om korrelationen var lägre i humuslagret fanns det en tydlig tendens till att höga halter K också i regel innebar höga halter av B_{HWE} (Tabell 18, Fig. 19A). Det skall också påpekas att halten utbytbart K hade ett starkt positivt samband med kolhalten i humuslagret (Spearmans rangkorrelation, $r_{Sp}=0,670$). I B-horisonten var detta samband något svagare ($r_{Sp}=0,500$).



Figur 19. Sambandet mellan B_{HWE} och utbytbart K. A: I humuslagret ($r_{Sp}=0,388$, $p<0,001$). B: I B-horisonten ($r_{Sp}=0,506$, $p<0,001$). r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.
 Figure 19. Relationship between B_{HWE} and exchangeable K. A: In the humus layer ($r_{Sp}=0.388$, $p<0.001$), B: In B horizon ($r_{Sp}=0.506$, $p<0.001$). r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

Även för utbytbar Na fanns ett signifikant samband med B_{HWE} -halten i både humuslager och B-horisont (Tabell 18, Fig. 20). Halten utbytbar Na hade ett signifikant samband med kolhalten i båda horisonterna ($r_{Sp}=0,49-0,50$).



Figur 20. Sambandet mellan B_{HWE} och utbytbar Na. A: I humuslagret ($r_{Sp}=0,458$, $p<0,001$).

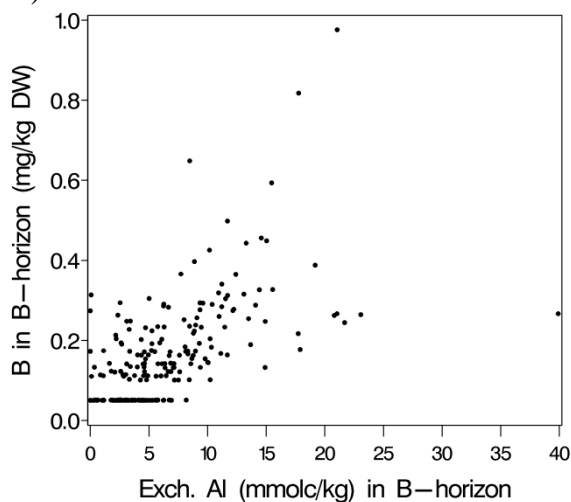
B: I B-horisonten ($r_{Sp}=0,454$, $p<0,001$). r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.

Figure 20. Relationship between B_{HWE} and exchangeable Na. A: In the humus layer ($r_{Sp}=0.458$, $p<0.001$), B: In the B-horizon ($r_{Sp}=0.454$, $p<0.001$). r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

I både humuslagret och B-horisonten fanns ett signifikant, men rätt svagt samband mellan B_{HWE} -halten och utbytbar Mn (Tabell 18).

Utbytbar Al

Halten utbytbar Al uppvisade ett relativt starkt positivt samband med halten B_{HWE} i B-horisonten (Fig. 21). För denna horisont fanns också ett förhållandevis starkt positivt samband mellan halten utbytbar Al och kolhalten ($r_{Sp}=0,633$). I humuslagret fanns dock inget samband mellan utbytbar Al och kolhalten och inte heller mellan utbytbar Al och B_{HWE} -halten (Tabell 18).



Figur 21. Sambandet mellan B_{HWE} och utbytbar Al i B-horisonten ($r_{Sp}=0,625$, $p<0,001$).

r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.

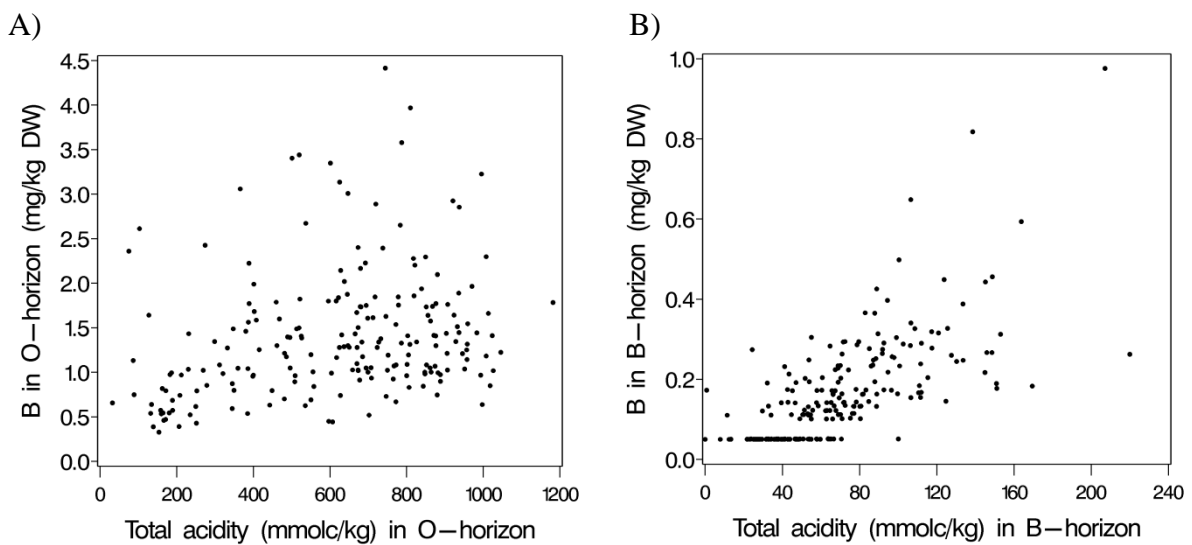
Figure 21. Relationship between B_{HWE} and exchangeable Al in the B horizon ($r_{Sp}=0.625$, $p<0.001$).

r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

Titrerbar aciditet

Även för den titrerbara aciditeten fanns signifikanta positiva samband med B_{HWE} -halten i både humuslager och B-horisont (Tabell 18, Fig. 22). I B-horisonten var korrelationen ganska hög, vilket kan bero på att sambandet mellan titrerbar aciditet och kolhalt var hög i denna horisont ($r_{Sp}=0,860$). Å andra sidan var korrelationen mellan titrerbar aciditet och kolhalt även hög i humuslagret ($r_{Sp}=0,889$).

Sambanden mellan B_{HWE} -halt och titrerbar aciditet i de båda markhorisonterna liknade till stor del sambanden mellan B_{HWE} -halt och katjonbyteskapacitet (CEC), se figur 16. Detta beror på att den titrerbara aciditeten i många av proven utgjorde huvuddelen av CEC. Korrelationen var dock något lägre mellan B_{HWE} -halt och titrerbar aciditet jämfört mellan B_{HWE} -halt och CEC, speciellt i humuslagret (Tabell 18).



Figur 22. Sambandet mellan B_{HWE} och titrerbar aciditet. A: I humuslagret ($r_{Sp}=0,320$, $p<0,001$). B: I B-horisonten ($r_{Sp}=0,761$, $p<0,001$). r_{Sp} = Spearmans rangkorrelation.
Figure 22. Relationship be B_{HWE} and titratable acidity. A: In the humus layer ($r_{Sp}=0.320$, $p<0.001$). B: In the B-horizon ($r_{Sp}=0.761$, $p<0.001$). r_{Sp} = Spearman's rank correlation coefficient.

Diskussion

Till vår kännedom har några värden på halten växttillgängligt bor (B_{HWE} -halt) i svensk skogsmark bara redovisats av Wikner (1983, 1985). I artikeln från 1983 redovisas, i en figur, halter för B_{HWE} från 35 prov från humuslager resp. B-horisont (oklart dock varifrån i Sverige proven är tagna). I humuslagren låg halterna av B_{HWE} under 1 mg/kg och mestadels mellan 0,25-0,75 mg/kg, medan de i B-horisonten i de flesta fall låg under 0,25 mg/kg, med några enstaka värden mellan 0,25-0,50 mg/kg. I vår undersökning hade de flesta proven från humuslagret högre halter av B_{HWE} än vad Wikner redovisar. Däremot ligger våra värden från B-horisonten på samma nivå eller t.o.m. något lägre än vad Wikner redovisar för B-horisonten.

Analyser av växttillgängligt bor i den svenska åkermarken är betydligt vanligare. Utgående från 3060 prov tagna i matjorden från svensk åkermark (dock mycket få eller inga prov från inlandet i Svealand och Norrland) konstaterades att halten B_{HWE} var i genomsnitt 0,41 mg/kg. Halterna varierade från <0,04 mg/kg upp till 9,92 mg B/kg (Eriksson, m.fl., 1997). De högsta borhalterna fann man i områden med kalkhaltiga jordar, d.v.s. i Skåne, på Öland och Gotland, i Uppland, samt kring Storsjön i Jämtland. Relativt höga halter förekom längs Västkusten, vilket man förmodade berodde på deposition av bor från havssalter. Borhalter under genomsnittet påträffades i delar av inre Götaland, inre Svealand och längs Norrlandskusten.

Samband med ståndortsfaktorer

I humuslager

I vår undersökning uppvisade B_{HWE} -halterna från humuslagret få samband med några ståndortsvariabler. De enda signifikanta sambanden (positiva) var med beståndens medelhöjd och ålder samt med ökad markfuktighet. En förklaring till den positiva korrelationen mellan B_{HWE} -halten i humuslagret och beståndens medelhöjd och ålder är att det sker en betydande intern cirkulation av bor mellan beståndet, förran och humuslagret. Däremot är det svårt att hitta en rimlig förklaring till att B_{HWE} -halten tenderar att öka när markfuktigheten är högre.

I B-horisonten

Flera ståndortsvariabler hade signifikanta samband med B_{HWE} -halten i B-horisonten. Många av dessa ståndortsvariabler (ex. latitud, longitud, depositionsområde, humiditet, specifik avrinning) är kopplade till klimatvariabler, bland annat nederbörd. Ju större nederbördsmängden eller humiditeten är desto högre är oftast halten B_{HWE} i B-horisonten. Detta är i sin tur kopplat till att kolhalten i B-horisonten i regel är högre ju större nederbörden är. De höga halterna av B_{HWE} i B-horisonten för de sydvästra delarna av Sverige beror, förutom höga kolhalter i B-horisonten förmodligen även på att depositionen av bor är som högst där.

Även för en del andra ståndortsvariabler, som uppvisar signifikanta samband med B_{HWE} -halten i B-horisonten, kan det delvis förklaras med att kolhalten i B-horisonten samvarierar med B_{HWE} -halten.

Att B_{HWE} -halten i vare sig humuslager eller B-horisont hade något signifikant samband med höjden över havet var något förvånande, eftersom åtminstone mineraljordar belägna under högsta kustlinjen i regel brukar ha högre borhalter p.g.a. det marina inflytandet (Wikner, 1983). Men i vår studie har vi enbart undersökt skogsjordar, vilka merparten har en

förhållandevis grov textur och därmed inte kan kvarhålla så mycket bor i mineraljorden. I vår studie ingick enbart sex provytor, där texturen i mineraljorden klassades som lerig morän/lera. Dessa ytor hade de i medeltal högsta halterna B_{HWE} i B-horisonten, även om medelvärdet i sig inte avvek signifikant från medelvärdena från fem av de sex övriga texturklasserna (Tabell 12).

Inte heller kustavståndet visade någon korrelation med B_{HWE} -halten i vare sig humuslager eller B-horisont. Även detta var något förvånande eftersom depositionen av bor minskar med avståndet från havet (Wikner, 1983; Kot, 2009). Många av ytorna är dock belägna närmare Östersjön än Atlanten, varför kustavståndet i dessa fall markerar avståndet till just Östersjön. Borhalten i Östersjön är betydligt lägre än i Atlanten, där borhalten är $4,5 \text{ mg l}^{-1}$. I södra Östersjön är borhalten ca $1,1 \text{ mg l}^{-1}$, medan den i Bottenhavet är ca $0,5 \text{ mg l}^{-1}$ (Nitsch, 1967). Så variabeln kustavstånd är förmodligen inte fullt användbar som indikation på bordepositionen.

Samband med andra markkemiska variabler

Kol- och kvävehalt

I vår undersökning fanns klara signifikanta positiva samband mellan halten B_{HWE} och kolhalt samt katjonbyteskapacitet. Eriksson m.fl. (1997) redovisar också starkt positiva korrelationer mellan B_{HWE} -halt och effektiv katjonbyteskapacitet ($r=0,62$), samt humushalten ($r=0,38$) i matjorden på åkermark. Den höga korrelationen med effektiv katjonbyteskapacitet kan bero på att denna variabel, liksom växttillgängligt bor, är starkt korrelerad med både humushalt och lerhalt.

30 % av proven från B-horisonten hade B_{HWE} -halter under detektionsgränsen ($0,10 \text{ mg kg}^{-1}$). Dessa prov var relativt jämnt fördelade över landet, men förekom främst då kolhalten och/eller katjonbyteskapaciteten i proven var låg.

Sambandet mellan kol- och kvävehalt i respektive markhorisont är relativt starkt, så det är inte så förvånande att det finns ett samband mellan B_{HWE} -halten och kvävehalten. Vi kan dock i nuläget inte förklara varför korrelationen är högre mellan borhalt och kvävehalt, jämfört med korrelationen borhalt – kolhalt, speciellt i humuslagret. En möjlig förklaring skulle kunna vara att de provytor, som har höga kväve- och B_{HWE} -halter i humuslagret eventuellt kan ha kvävegödslats nyligen. Dagens kvävegödselmedel i skogsbruket innehåller ju 0,2 % bor. En normalgiva på $150 \text{ kg N per hektar}$ skulle, grovt räknat för ett genomsnittligt humuslager med 8 cm humuslager med volymvikten $0,1 \text{ g cm}^{-3}$ och kvävehalt på 1 % innebära att kvävehalten i humuslagret ökar med högst ca 20 % efter kvävegödsling. Samma räkneövning men för bor innebär att en kvävegödsling innebär tillförsel med ca $1,1 \text{ kg B ha}^{-1}$. Om humuslagret före gödsling innehöll $1,4 \text{ mg } B_{HWE} \text{ kg}^{-1}$ innebär det att detta humuslager innehåller totalt ca $0,11 \text{ kg } B_{HWE} \text{ ha}^{-1}$. Kvävegödsling innebär då en 10-dubbling av halten B_{HWE} i humuslagret direkt efter gödsling.

Eriksson m.fl. (1997) rapporterade en positiv korrelation mellan B_{HWE} -halten och pH ($r=0,30$). I vår studie fann vi istället ett signifikant negativt samband mellan B_{HWE} -halt och pH. Det senare beror troligtvis på att vi i B-horisonten har betydligt högre halter av järn- och aluminiumoxider än i åkermarkernas matjord, samt att vid de låga pH-värden som ofta finns i skogsmarkernas B-horisont så ökar halten av järn- och aluminiumoxider när pH minskar. Järn- och aluminiumoxiderna kan adsorbera en stor del av B_{HWE} i marken (Barman m.fl.,

2014). I vår undersökning hade dock B_{HWE} -halten i B-horisonten ett signifikant positivt samband med halten utbytbar Al.

Noterbart är att utbytbar Mg i humuslagret har något bättre samband med B_{HWE} -halten än vad utbytbar Ca har. Enligt Cividine m.fl. (2010) finns ofta ett samband mellan Mg och B i vatten- och berggrundssystem.

Betydelsen av det organiska materialet i marken

Tidigare har man ansett att tillgången av växttillgängligt bor i marken till stor del beror på vittring av mineral innehållande bor (ex. turmalin). Vittringen är dock förmodligen i de flesta fall otillräcklig för växternas behov av bor (Park & Schlesinger, 2002). Vidare är koncentrationen av bor i nederbörden i regel så låg att den inte räcker till för växternas borbehov (Kot, 2009; Kot m.fl. 2016). Resultat från tidigare undersökningar (ex. Aphalo m.fl., 2002; Gurlevik m.fl., 2003; Lehto m.fl., 2010) tyder istället på att organiskt material och troligtvis då främst förnafallet har en central roll för omsättningen av bor i skogsmarken och därmed tillgången på växttillgängligt bor i boreala skogsekosystem. Kot m.fl. (2016) anger också att förnan från växterna är den huvudsakliga källan för växttillgängligt bor i marken. Gurlevik m.fl. (2003) fann att ca 40 % av det bor som fanns i barrförna från loblollytall (*Pinus taeda* L.) i North Carolina, USA frigjordes genom nedbrytning av det organiska materialet under första året.

Konsekvenser för skogsbruket

De enligt vår undersökning höga halterna av B_{HWE} i humuslagret, samt de signifikanta sambanden mellan B_{HWE} och främst kolhalt och katjonbyteskapacitet, samt för humuslagret även beståndsålder och medelhöjd, bekräftar uppfattningen att tillgången på växttillgängligt bor i marken till stor del styrs av interncirkulation mellan beståndet, förnan och humuslagret. Detta bör man ta hänsyn till vid olika skogsskötselåtgärder, speciellt vid helträdsavverkning då en stor del av det växttillgängliga borförrådet i ekosystemet kan exporteras från systemet i samband med uttaget av grenar och toppar från det helträdsavverkade området. I områden med låg bordeposition så sker den huvudsakliga omsättningen av bor i skogsekosystemet inom själva beståndet (Aphalo m.fl., 2002; Lehto m.fl., 2010a). I sådana områden kan skörd och speciellt då helträdsavverkning medföra en kraftig förlust av växttillgängligt bor från systemet. Data från Finér (1989), som bl.a. studerade upptaget av olika näringsämnen (bl.a. bor) i tre olika bestånd (tall, tall+björk, samt gran) på torvmarker i östra Finland, visar att borinnehållet i grenar + blad/barr utgjorde 29-60 % av det totala borinnehållet i de ovanjordiska träddelarna. Mer än 74 % av det totala borinnehållet i bestånden ovan + under jord fanns i träddelarna ovan jord.

Kvävegödning i kärva klimatlägen i norra Norrlands inland och speciellt då på marker med grov textur och låg mängd organiskt material kan enligt bl.a. Pettersson (2014) medföra borbristsskador på träd. I vår undersökning kan vi se att halten B_{HWE} i humuslager och B-horisont i detta område kan vara lika hög som i södra Sverige. Men på grund av att humustäckena i norra Norrlands inland ofta är tunna och att kolförråden även i mineraljorden är låga här, så är förråden av växttillgängligt bor i detta område i regel små. Det kärva klimatet medför dessutom att den årliga mineraliseringen av organiskt material är låg och därmed även frigörelsen av bor bundet till det organiska materialet.

Förslag på forskning inom området

Hur bor är bundet i förna och det organiska materialet i humuslagret och övre mineraljordsskikten behöver undersökas mer ingående. Detta speciellt med tanke på att kommande förändringar i klimat och skogsskötsel kommer påverka biomassaproduktionen och därmed även upptaget av makro- och mikronäringsämnen.

I våra skogar finns det mesta av B_{HWE} vanligtvis i förnan och humuslagret. Torka medför låga markvattenhalter, vilket också hämmar nedbrytningen av det organiska materialet, och därmed påverkas även upptaget av bor i träden påtagligt. Barrträdens förmåga att omförflytta bor inom trädet kan förmodligen till stor del upphäva effekten av minskat borupptag vid torka. Men ett aktivt upptag av bl.a. komplexbundet bor i marklösningen, via bl.a. mykorrhizan, kan eventuellt också upprätthålla ett visst borupptag från marken under torkperioder. Studier av komplexbundet bor i marklösningen och rhizosfären (speciellt då i de övre marklagren med hög halt organiskt material), samt trädens upptag av dessa borkomplex borde vara en intressant framtida forskningsuppgift.

Referenser

- Abu-Sharar, T.M., Bani Hani, N., Al-Khader, S. 2014. Boron adsorption–desorption characteristics of irrigated soils in the Jordan Valley. *Geoderma Regional* 2-3: 50-59.
- Adriano, D.C. 1986. Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag, New York. 533 sid.
- Ahl, T., Jönsson, E. 1972 Boron in Swedish and Norwegian fresh waters. *Ambio* 1: 66-70.
- Ahmad, W., Niaz, A., Kanwal, S., Rahmatullah, Rasheed, M. K. 2009. Role of boron in plant growth: A review. *Journal of Agricultural Research* 47: 329-338.
- Andersson, M., Carlsson, M., Ladenberger, A., Morris, G., Sadeghi, M., Uhlbäck, J. 2014. Geokemisk atlas över Sverige. Sveriges geologiska undersökning. 208 sid.
- Aphalo, P.J., Schoettle, A.W., Lehto, T. 2002. Leaf life span and the mobility of “non-mobile” mineral nutrients – the case of boron in conifers. *Silva Fennica* 36: 671-680.
- Aronsson, A. 1983. Growth disturbances caused by boron deficiency in some fertilized pine and spruce stands on mineral soils. In: Kolari, K.K. (Ed.). *Growth Disturbances of Forest Trees. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 116: 116-122.
- Aronsson, A. 1984. Inverkan av mikronäringsgödsling på barrhalterna i ett ungt tallbestånd. *K. Skogs- o. Lantbr.akad. tidskr. Suppl.* 16: 67-70.
- Aronsson, A. 1985. Indikationer på stress vid obalans i trädens växtnäringsinnehåll. *K. Skogs- o. Lantbr.akad. tidskr. Suppl.* 17:40–51.
- Aubert, H., and M. Pinta. 1977. Trace elements in soils. New York: Elsevier.
- Baird, G.B., Dawson, J.E. 1955. Determination of that portion of soil boron available to plants by a modified soxhlet-extraction procedure. *Soil science Society of America Journal* 19:219-222.
- Barman, M., Shukla, L.M., Datta, S.P., Rattan, R.K. 2014. Effect of applied lime and boron on the availability of nutrients in an acid soil. *Journal of Plant Nutrition* 37: 357-373.
- Barrett, T.B. 2004. Soil boron in Loblolly pine plantations of the southeastern United States. Ph.D. thesis. 54 pp.
- Berger, K.C., Truog, E. 1940. Boron deficiencies as revealed by plant and soil tests. *Journal of American Society of Agronomy* 32: 297-301.
- Bernes, C. (Red.). 1981. Förurning av mark och vatten. Statens naturvårdsverk, Monitor 1981. 175 sid.
- Blevins, D.G., Lukaszewski, K.M. 1998. Boron in plant structure and function. *Annual Review of Plant Physiology and Plant molecular Biology* 49: 481-500.
- Braekke, F.H. 1983a. Occurrence of growth disturbance problems in Norwegian and Swedish forestry. In: Kolari, K.K. (Ed.). *Growth Disturbances of Forest Trees. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 116: 20-25.

- Braekke, F.H. 1983b. Micronutrients – prophylactic use and cure of forest growth disturbances. In: Kolari, K.K. (Ed.). *Growth Disturbances of Forest Trees. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 116: 159-169.
- Brown, P.H., Shelp, B.J. 1997. Boron mobility in plants. *Plant and Soil* 193: 85-101.
- Cividini, D., Lemarchand, D., Chabaux, F., Boutin, R., Pierret, M.-C. 2010. From biological to lithological control of the B geochemical cycle in a forest watershed (Strengbach, Vosges). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74 : 3143–3163.
- Dell, B., Huang, L. 1997. Physiological response of plants to low boron. *Plant and Soil* 193: 103-120.
- Dey, A., Dwivedi, B.S., Datta, S.P., Meena, M.C., Agarwal, B.K. 2015. Soil boron status: impact of lime and fertilizers in an Indian long-term field experiment on a Typic Paleustalf, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 65: 54-62.
- Eriksson, J., Bergholm, J. & Kvist, K. 1981. Injury to vegetation caused by industrial emissions of boron compounds. *Silva Fennica* 15:459–464.
- Eriksson, J., Andersson, A., Andersson, R. 1997. Tillståndet i svensk åkermark. Naturvårdsverket, Rapport 4778. 59 sid + figur- och tabellbilagor.
- Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I., Simonsson, M. 2011. *Marklära. Studentlitteratur, Lund.* 392 sid.
- Finer, L. 1989. Biomass and nutrient cycle in fertilized and unfertilized pine, mixed birch and pine and spruce stands on a drained mire. *Acta Forestalia Fennica* 208. 63 pp.
- Fleming, G.A. 1980. Essential micronutrients I: Boron and molybdenum. In: Davies, B.E. (Ed.). *Applied Soil Trace Elements.* Wiley, New York. Pp: 155-197.
- Folkesson, C. 2007. Marktillstånd och borbrist på åkermark planterad med gran i Västerbottens län. Institutionen för skogens ekologi och skötsel, Sveriges lantbruksuniversitet. Examensarbeten 2007:9. 36 sid.
- Gaillardet, J., Viers, J., Dupré, B. 2003. Trace elements in river waters. In: *Treatise on Geochemistry, Volume 5.* Editor: Drever, J.I. Elsevier. Pp: 225-272.
- Goldbach, H.E., Wimmer, M.A. 2007. Boron in plants and animals: Is there a role beyond cell-wall structure? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170: 39-48.
- Goldberg, S. 1997. Reactions of boron with soils. *Plant and Soil* 193: 35-48.
- Goldberg, S., Su, C. 2007. New advances in boron soil chemistry. In: Xu, F. et al. (ed): *Advances in Plant and Animal Boron Nutrition*, pp: 313-330.
- Goldberg, S., Suarez, D.L. 2011. Influence of soil solution cation composition on boron adsorption by soils. *Soil Science* 176: 80-83.
- Gupta, U.C. 1968. Relationship of total and hot-water soluble boron, and fixation of added boron, to properties of podzol soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 32: 45-48.
- Gupta, U.C. 2007. Boron. In: Barker, A.V., Pilbeam, D.J. (Eds.). *Handbook of Plant Nutrition.* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. sid: 241- 277.
- Gurlevik, N., Kelting, D.L., Allen, H.L. 2003. The effects of vegetation control and fertilization

- on net nutrient release from decomposing loblolly pine needles. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 2491-2502.
- Helmisaari, H.S. 1995. Nutrient cycling in *Pinus Sylvestris* stands in eastern Finland. *Plant and Soil* 168-169: 327-336.
- Hill, W.E., Morrill, L.G. 1974. Assessing boron needs for improving peanut yield and quality. *Soil Science Society of America Proceedings* 38: 791-794.
- Hu, H., Brown, P.H. 1997. Absorption of boron by plant roots. *Plant and Soil* 193: 49-58.
- Hu, Z., Gao, S. 2008. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update. *Chemical Geology* 253: 205-221.
- Jacobson, S. & Nohrstedt, H-Ö. 1993. Effects of repeated nitrogen supply on stem growth and nutrients in needles and soil. *Skogforsk, Report No. 1, 1993*. 36 sid.
- Jin, J, Martens, D.C., Zelanzny, L.W. 1987. Distributions and plant availability of soil boron fractions. *Soil Science Society of America Journal* 51:1228-1231.
- Johansson, O. 2004. Skogsskador till följd av våtmarkskalkning. Omfattning och orsaker. Länsstyrelsen Västerbottens län. *Meddelande 6-2004*. 41 sid.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. 1992. Trace elements in soils and plants. 2nd Edition, CRC Press, Boca Ratón, Florida, USA. 315 sid..
- Kabata-Pendias, A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements – an environmental issue. *Geoderma* 122:143-149.
- Kelling, K.A. 1999. Soil and applied boron. University of Wisconsin Extension Service Bulletin A2522. University of Wisconsin Cooperative Extension Service, Madison, Wisconsin. 2 sid.
<http://www.soils.wisc.edu/extension/pubs/A2522.pdf>
- Keren, R., Bingham, F. T. 1985. Boron in water, soils, and plants. *Advances in Soil Sciences*, Vol. 1: 229-276.
- Kolari, K.K. 1983. Physiological and biochemical role of micronutrients in growth disturbances of forest trees. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 116: 39-43.
- Kot, F.S. 2009. Boron sources, speciation and its potential impact on health. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 8: 3-28.
- Kot, F.S., Farran, R., Kochva, M., Shaviv, A. 2012. Boron in humus and inorganic components of Hamra and Grumosol soils irrigated with reclaimed wastewater. *Soil Research* 50: 30-43.
- Kot, F.S., Farran, R., Fujiwara, K., Kharitonova, G.V., Kochova, M., Shaviv, A., Sugo, T. 2016. On boron turnover in plant-litter-soil system. *Geoderma* 268: 139-146.
- Kurkela, T. 1983. Early observations on die-back of Scots pine in the fertilization experiments at Kivisuo. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 116: 10-13.
- Lehto, T., Mälkönen, E. 1994. Effects of liming and boron fertilization on boron uptake of *Picea abies*. *Plant and Soil* 163: 55-64.

- Lehto, T., Ruuhola, T., Dell, B. 2010a. Boron in forest trees and forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 260: 2053-2069.
- Lehto, T., Smolander, A., Aphalo, P.J. 2010b. Decomposition and element concentrations of silver birch leaf litter as affected by boron status of litter and soil. *Plant and Soil* 329: 195-208.
- Lehto, T., Aphalo, P.J., Saranpää, P., Laakso, T., Smolander, A. 2010c. Decomposition and element concentrations of Norway spruce needle litter with differing B, N, or P status. *Plant and Soil* 330: 225-238.
- LeNoble, M.E., Blevins, D.G., Sharp, R.E. & Cumbie, B.G. 1996. Prevention of aluminium toxicity with supplemental boron. I. Maintenance of root elongation and cellular structure. *Plant, Cell & Environment* 19: 1132-1142.
- Lundin, L., Nilsson, T. 2014. Initial effects of forest N, Ca, Mg and B large-scale fertilization on surface water chemistry and leaching from a catchment in central Sweden. *Forest Ecology and Management* 331: 218-226.
- Matoh, T. 1997. Boron in plant cell walls. *Plant and Soil* 193: 59-70.
- Möller, G. 1983. Borbristskador efter upprepad kvävegödsling på fastmark. I: Årsbok 1983 (Föreningen Skogsträdsförädling, Institutet för skogsförbättring). Sid. 47-70.
- Möller, G. 1984. Synpunkter på mikronäringsämnen inom skogsbruket med särskild hänsyn till borsituationen. *K. Skogs- o. Lantbr.akad. tidskr. Suppl.* 16: 41-58.
- Möttönen, M., Lehto, T., Aphalo, P.J. 2001. Growth dynamics and mycorrhizas of Norway spruce (*Picea abies*) seedlings in relation to boron availability. *Trees* 15: 319-326.
- Nilsson, L.G. 1984. Utvärdering av metod för boranalys i jord. Avdelningen för växtnäringslära, institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet. Rapport 155. 16 sid.
- Nilsson, T., Stendahl, J., Löfgren, O. 2015. Markförhållanden i svensk skogsmark – data från Markinventeringen 1993-2002. Institutionen för mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet. Rapport 19. 58 sid.
- Nitsch, U. 1967. Om Östersjövattnets användbarhet för bevattningsändamål. Institutionen för lantbrukets hydroteknik, Sveriges lantbruksuniversitet. Stenciltryck nr 35. 35 sid.
- Näslund, B.-Å. 2015. Skogsmarksgödsling med kväve - Kunskapssammanställning inför Skogsstyrelsens översyn av föreskrifter och allmänna råd om kvävegödsling. Skogsstyrelsen Rapport 2015:2. 51 sid.
- Park, H., Schlesinger, W.H. 2002. Global biogeochemical cycle of boron. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 1072. 11 pp.
- Pettersson, F. 2014. Behovet av borttillförsel vid kvävegödsling av barrskog på fastmark. Skogforsk Arbetsrapport 846-2014. 35 sid.
- Power, P.P. & Woods, W.G. 1997. The chemistry of boron and its speciation in plants. *Plant and Soil* 193: 1-13.
- Raven, J. A. 1980. Short- and long-distance transport of boric acid in plants. *New Phytologist* 84: 231-249.

- Rees, R., Robinson, B.H., Evangelou, M.W.H., Lehmann, E., Schulin, R. 2012. Response of *Populus tremula* to heterogeneous B distributions in soil. *Plant and Soil* 358: 403-415.
- Reid, R. 2014. Understanding the boron transport network in plants. *Plant and Soil* 385: 1-13.
- Reimann, C., Arnoldussen, A., Finne, T.E., Koller, F., Nordgulen, Ø., Englmaier, P. 2007. Element contents in mountain birch leaves, bark and wood under different anthropogenic and geogenic conditions. *Applied Geochemistry* 22: 1549-1566.
- Reimann, C., Finne, T.E., Nordgulen, Ø., Sæther, O.M., Arnoldussen, A., Banks, D. 2009. The influence of geology and land-use on inorganic stream water quality in the Oslo region, Norway. *Applied Geochemistry* 24: 1862-1874.
- Reimann, C., Englmaier, P., Fabian, K., Gough, L., Lamothe, P., Smith, D. 2015. Biogeochemical plant–soil interaction: Variable element composition in leaves of four plant species collected along a south–north transect at the southern tip of Norway. *Science of the Total Environment* 506-507: 480-495.
- Rose-Koga, E.F., Sheppard, S.M.F., Chaussidon, M., Carignan, J. 2006. Boron isotopic composition of atmospheric precipitations and liquid–vapour fractionations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 1603–1615.
- Rosenberg, O. 2002. Miljöeffekter av bor i kvävegödselmedel. Skogforsk Arbetsrapport 508, Uppsala. 16 s.
- Rosenberg, O., Högbom, L. 2005. Retention av bor efter gödsling med Skog-CAN innehållande olika borformuleringar. SkogForsk, Arbetsrapport nr 605. 11 sid.
- Räisänen, M., Repo, T., Lehto, T. 2009. Cold acclimation of Norway spruce roots and shoots after boron fertilization. *Silva Fennica* 43: 223–233.
- Saarsalmi, A., Tamminen, P. 2005. Boron, phosphorus and nitrogen fertilization in Norway spruce stands suffering from growth disturbances. *Silva Fennica* 39: 351–364.
- SAS Institute Inc. 2011. *SAS/STAT® 9.3 User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- SAS Institute Inc 2012. *SAS/GRAPH® 9.3: Reference, Third Edition*. Cary , NC: SAS Institute Inc.
- Shacklette, H.T., Boerngen, J.G. 1984. Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States. U.S. Geological Survey, Professional paper 1270. 63 pp.
- Schlesinger, W.H., Vengosh, A. 2016. Global boron cycle in the Anthropocene. *Global Biogeochemical Cycles* 30: 219-230.
- Shorrocks, V.M. 1997. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and Soil* 193: 121-148.
- Sillanpää, M. 1972. Trace elements in soils and agriculture. *FAO Soils Bulletin No. 17*. Rome.
- Stone, E.L. 1990. Boron deficiency and excess in forest trees: a review. *Forest Ecology and Management* 37: 49-75.
- Sutinen, S., Vuorinen, M., Rikala, R. 2006. Developmental disorders in buds and needles of mature Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst, in relation to needle boron concentrations. *Trees* 20: 559-570.

- Takano J., Miwa K., Fujiwara T. 2008. Boron transport mechanisms: collaboration of channels and transporters. *Trends in Plant Science* 13: 451–457.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M. 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell Scientific Publ., Oxfors, England. 312 sid.
- Thor, M., Nohrstedt, H.-Ö., Weslien, J.-O. 1997. Möjliga miljöeffekter av stubbehandling med TimBor, Rotstop (pergamentsvamp) och urea – en litteraturstudie. Skogforsk Arbetsrapport 351. 47 sid.
- Uppin, M., Karro, E. 2012. Geological sources of boron and fluoride anomalies in Silurian-Ordovician aquifer system, Estonia. *Environmental Earth Sciences* 65: 1147-1156.
- Wedepohl K. F. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42: 999–1009.
- Whetstone, R.R., Robinson, W.O., Byers, H.G. 1941. Boron distribution in soils and related data. United States Department of Agriculture, Technical Bulletin No 797. 32 pp.
- Wikner, B. 1983. Distribution and mobility of boron in forest ecosystems. In: Kolari, K.K. (Ed.). *Growth Disturbances of Forest Trees*. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 116: 131-141.
- Wikner, B. 1985. The biogeochemistry of boron and its role in forest ecosystems. In: Caldwell, D.E., Brierly, J.A. and Brierly, C.L. (Eds.): *Planetary ecology*. Van Nostraand Reinhold, New York. Sid. 522-536.
- Wikner, B. 1986. Boron: determination and biogeochemistry with special reference to forestry. Dissertation. Department of Analytical and marine Chemistry, Chalmers University of Technology and University of Göteborg. 47 pp.
- Woolley, A.R., Bishop, A.C., Hamilton, W.R. 1977. *Bergarter, mineral, fossil – en fälthandbok*. Albert Bonniers Förlag AB. Stockholm. 320 sid.